

火災加熱を受けるコンクリートの  
載荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響に関する実験的研究

2016年1月

千葉大学大学院工学研究科  
建築・都市科学専攻 建築学コース

山下 平祐

(千葉大学審査学位論文)

火災加熱を受けるコンクリートの  
載荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響に関する実験的研究

2016年1月

千葉大学大学院工学研究科  
建築・都市科学専攻 建築学コース

山下 平祐

## 目次

第1章 序論	
1.1 研究の背景	2
1.2 既往の研究	3
1.3 研究の目的	11
1.4 本論文の構成	12
第2章 試験体の諸元	
2.1 はじめに	17
2.2 調合および作製方法	18
2.3 養生方法	19
2.4 含水率	22
2.5 単位体積重量	22
2.6 常温時における力学的特性	23
2.7 800℃までの加熱による重量減少	24
2.7.1 重量減少測定実験	
2.7.2 重量減少と温度の関係	
2.8 セメント水和物の熱的变化	29
2.9 まとめ	31
第3章 応力-ひずみ関係に及ぼす水分の影響	
3.1 はじめに	35
3.2 実験条件	37
3.3 実験装置	37
3.4 実験方法	40
3.5 応力-ひずみ関係	41
3.6 圧縮強度	46
3.6.1 養生条件の影響	
3.6.2 水セメント比の影響	
3.7 弾性係数および圧縮強度時ひずみ	49
3.8 まとめ	50
第4章 荷重時熱ひずみに及ぼす水分の影響	
4.1 はじめに	54
4.2 全ひずみ実験の概要	55
4.3 全ひずみ・熱膨張ひずみと温度の関係	59

4.4 荷時熱ひずみ	62
4.4.1 養生条件の影響	
4.4.2 水セメント比の影響	
4.4.3 応力レベルの影響	
4.5 荷時熱ひずみと重量減少率の関係	71
4.6 荷時熱ひずみの数式化	74
4.7 まとめ	77
第5章 結論	
5.1 研究の成果	81
5.2 今後の課題	82
資料編	85
謝辞	231
発表論文	233
論文内容の要旨	237

## 第1章 序論

1.1 研究の背景	・・・・・・・・・2
1.2 既往の研究	・・・・・・・・・3
1.3 研究の目的	・・・・・・・・・11
1.4 本論文の構成	・・・・・・・・・12

## 1.1 研究の背景

コンクリートが圧縮応力を受けながら温度上昇する際に生じる収縮ひずみ（以下、荷重時熱ひずみとする）は、同時に発生する熱膨張ひずみを打ち消すほど大きなものである<sup>1)</sup>。そのため、コンクリート系構造の火災時変形挙動を解析的に検討する際には、コンクリートの高温時応力-ひずみ関係と熱膨張ひずみに加え、荷重時熱ひずみの性状を把握することが重要となる。荷重時熱ひずみ\*（LITS：Load-Induced Thermal Strain）は、Khouryらが提案したコンクリートの高温時ひずみ構成則に用いるひずみ成分の一つであり（式1.1）、コンクリートが一定の圧縮応力のもとで加熱される際に生じるひずみの総和（Total Thermal Strain, 以下、全ひずみとする）から、その熱膨張ひずみと初期応力ひずみを差引いたひずみとして定義されている<sup>2)</sup>。そのため、荷重時熱ひずみは、熱膨張ひずみに現れる骨材やセメントなどの物理的特性の影響を受けない、圧縮応力に依存した機械的収縮ひずみといえる。そして、定常温度下での実験から得られる高温時機械的ひずみ（応力ひずみや基本クリープ）と比較すると、著しく大きな収縮ひずみとなることが知られている。

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma,init} + LITS \quad \dots(1.1)$$

$\varepsilon_{tot}$ ：全ひずみ， $\varepsilon_{th}$ ：熱膨張ひずみ， $\varepsilon_{\sigma,init}$ ：初期応力ひずみ，LITS：荷重時熱ひずみ

荷重時熱ひずみに関する研究は、高温、高圧に曝される原子炉圧力容器の耐火性を検討するため、1960年代から始まった。その後、コンクリート系構造の火災応答解析を精度よく行ったり、高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす熱応力の影響を検討するためには荷重時熱ひずみを考慮する必要があることが認識され、様々な条件における実験データの収集や解析に用いるための数式モデルの提案など、荷重時熱ひずみに関する研究は多岐にわたり報告されてきた。国内では、荷重時熱ひずみに関する研究は1990年代から始まった。1999年からは、過渡ひずみ（全ひずみから熱膨張ひずみ・応力ひずみ・クリープひずみを差引いたひずみ、1.2(1)に詳述）に関する実験データの蓄積を目的とした一連の高温素材実験が計画され、千葉大学で実施された。筆者も関わったこれら一連の実験の結果から、国産の普通強度コンクリート（Fc27N/mm<sup>2</sup>級、石灰岩骨材）と高強度コンクリート（Fc80～100N/mm<sup>2</sup>級、砂岩骨材）の過渡ひずみのモデル化が行われ、従来よりも精度の高い鉄筋コンクリート柱の火災応答解析を可能にするという成果が得られた。これらの成果は、常世田<sup>3)</sup>と豊田<sup>4)</sup>の学位論文としてまとめられている。

\* 本研究では、原文の「荷重により生じる熱ひずみ」という定義を反映させ、Load-Induced Thermal Strainを『荷重時熱ひずみ』と訳した。

## 1.2 既往の研究

### (1) 載荷時熱ひずみに関する主な特徴

表 1.1, 表 1.2 に, 載荷時熱ひずみに関する既往の実験的研究を示す。これらの研究で報告されている載荷時熱ひずみの主な特徴は以下である。

表 1.1 載荷時熱ひずみに関する実験的研究 (国外)

文献番号	著者	W/C (%)	養生条件	粗骨材	セメント	有機繊維	加熱速度 (°C/分)	載荷時熱ひずみに影響を及ぼす要因
5)	Weigler	60	—	珪石 重晶石	OPC 高炉	—	—	・セメント,骨材種 ・温度履歴
6)	Anderberg	60	気中 絶乾 湿潤	珪石	OPC	無	1.5, 5	・養生条件
2)	Khoury	30 32	気中 絶乾 湿潤	石灰岩 玄武岩 砂利 軽量骨材	OPC 抗硫酸	無	0.2, 1	・骨材種(350°C以上) ・養生条件(250°C以下)
7)	Schneider	既往研究成果のまとめ						・骨材セメント比 ・骨材種 ・養生条件(20~300°C)
8)	Diederichs	26	—	玄武岩	シリカフォーム	無	2	・水セメント比
		27			フライアッシュ	無		
		30			高炉	無		
		45			珪岩	OPC		
9)	Thienel	45 48 61	気乾	珪岩	OPC	無	2	・骨材セメント比 ・水セメント比
10)	Hassen	30	気乾	—	—	無	1.5	・温度履歴
11)	Mindeguia	54	気乾	石灰岩	—	無	1, 5	・温度履歴
12)	Diederichs	26	気乾 湿潤	玄武岩	早強	無	3	・調合
		22		珪岩		ホリフロピレン		
		22				無		
13)	Tao	41	気乾	石灰岩	OPC	ホリフロピレン	5, 10, 15	・常温時強度(300°C以上) ・ホリフロピレン繊維
		64				ホリフロピレン		
		64				無		
14)	Jensen	35	気乾	石灰岩	—	—	1.5, 2	・調合(400°C以上)
		41						
15)	Huismann	32	気乾	珪岩	—	ホリフロピレン	1	・養生条件 ・ホリフロピレン繊維
			絶乾			無		
16)	Mindeguia	30	気乾	珪岩	—	無	1	・温度履歴 ・骨材種(300°C以上)
		30		石灰岩				
		36		石灰岩				
		52						
17)	Hager	既往研究成果のまとめ						・温度履歴 ・骨材種 ・有機繊維 ・含水率

- ・処女加熱時のみに発生し，冷却過程や再加熱時には生じない例えば 1)。(図 1.3)
  - ・温度上昇により生じる，セメント水和物の物理的・化学的反応や微細ひび割れの進展に伴い発生する<sup>例えば 16)</sup>。
  - ・応力レベル（载荷応力／常温時圧縮強度）に比例して増加する<sup>2),16),24)</sup>。(図 1.4)
  - ・加熱速度が及ぼす影響は比較的小さい<sup>例えば 2)</sup>。(図 1.5)
  - ・骨材量が多いと発生量が減少する<sup>7),9)</sup>。
  - ・骨材に砂利や珪岩を使用すると，300℃以上で発生量が增大する<sup>2),16)</sup>。(図 1.6)
  - ・爆裂防止を目的としたポリプロピレン繊維の混入により，発生量が增大する<sup>13),15),25)</sup>。
- さらに，使用している材料が同じであっても，調合や養生条件といった水分条件が異なるコンクリートであれば，その载荷時熱ひずみは大きく変化することが報告されている。

表 1.2 载荷時熱ひずみに関する実験的研究（国内）

文献番号	著者	W/C (%)	養生条件	粗骨材	セメント	有機繊維	加熱速度 (°C/分)	载荷時熱ひずみに影響を及ぼす要因
18)	山崎	62	封緘	砂岩	OPC	無	0.17	・温度履歴
19)	丹羽	34 63	封緘	砂岩	早強	無	2.5 5	・調合
20)	常世田	57	気乾	石灰岩	OPC	無	1 *100°C毎 に3時間の 温度保持	—
21)	常世田	57	気乾	石灰岩	OPC	無	1, 3, 6	—
22)	豊田	18 24 35	気乾	砂岩	低熱	無	1 *100°C毎 に3時間の 温度保持	—
23)	兼城	24	気乾	砂岩	低熱	無	1, 3, 6	—
24)	道越	22.5 30 50	断熱	安山岩	OPC	ホリプロピレン ホリプロピレン 無	2	・調合
25)	右田	32 32 32.6 32.6	気中 絶乾	砂岩	中庸熱 OPC	ホリプロピレン 無	1	・ホリプロピレン繊維 ・養生条件 (100~200°C)
26)	山下	18 24 35	気中 絶乾	砂岩	低熱	無	1.5	・養生条件 (200°C以下)
27)	崔	12.5 14.5 20	気中	花崗岩	OPC	無	1	・常温時強度

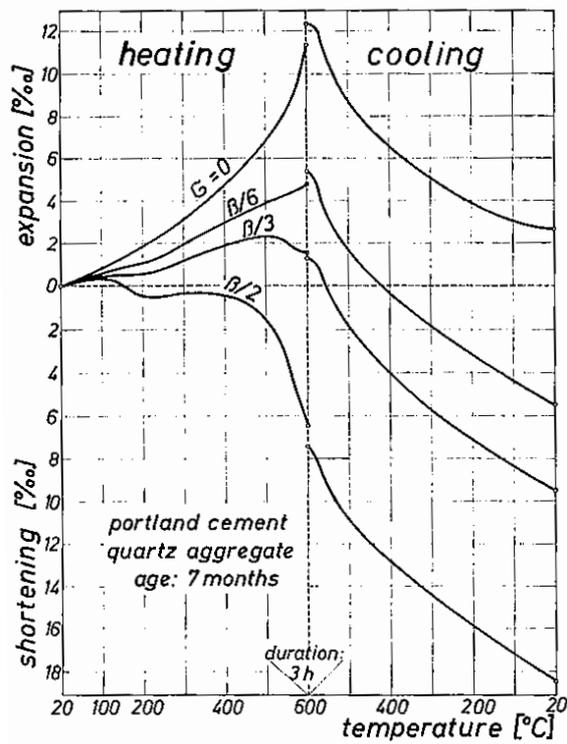


図 1.3 昇温時・冷却時における全ひずみ<sup>5)</sup>  
(冷却時には熱膨張ひずみのみが減少する)

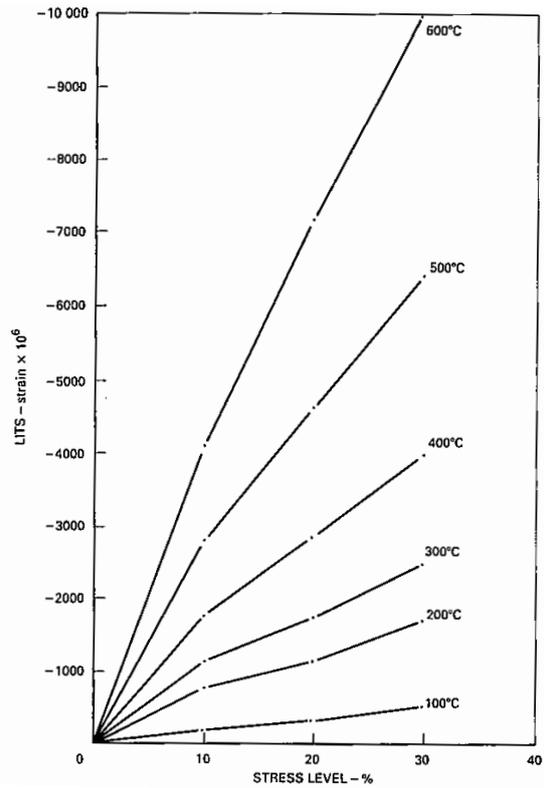


図 1.4 载荷時熱ひずみと応力レベルの関係<sup>2)</sup>  
(载荷時熱ひずみは応力レベルに比例する)

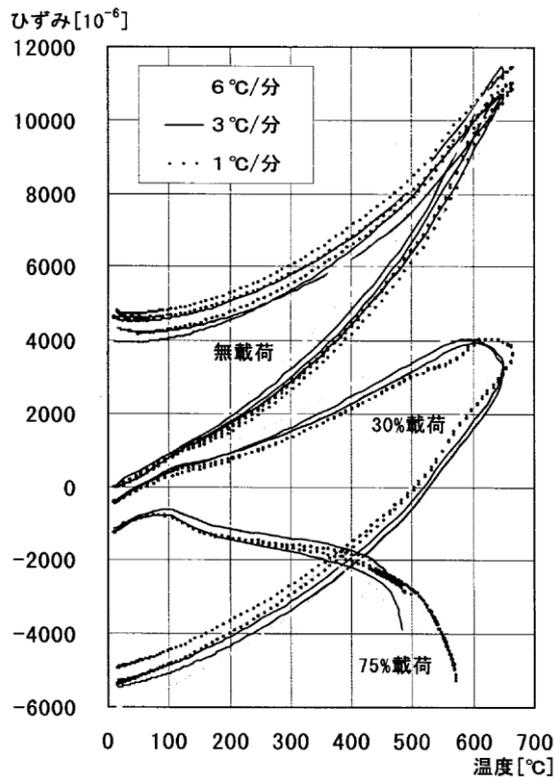


図 1.5 全ひずみに及ぼす加熱速度の影響<sup>21)</sup>  
(载荷時熱ひずみに及ぼす加熱速度の影響は小さい)

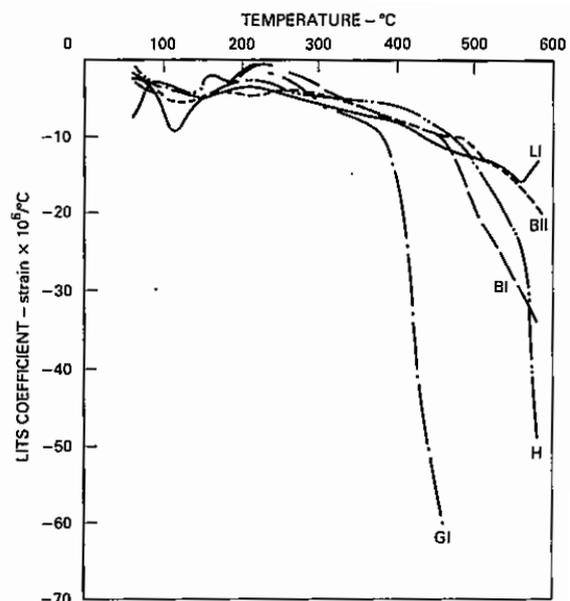


図 1.6 载荷時熱ひずみに及ぼす骨材の影響<sup>2)</sup>  
(载荷時熱ひずみに及ぼす骨材の影響は 300°C 以上で現れる)

## (2) 荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響

コンクリートの養生条件の違いが及ぼす影響について、Anderberg らは、105°Cで事前乾燥した試験体は、気乾試験体や湿潤試験体よりも、収縮方向への全ひずみの増加が小さくなる傾向があることを報告している<sup>6)</sup>。同様に、Khoury らは、105°Cで事前乾燥した試験体の荷時熱ひずみは小さくなることを報告する一方、その影響は250°C以上では見られなくなるとしている<sup>2)</sup> (図 1.7)。さらに、Mindeguia らは、80°C、250°C、および300°Cの温度履歴を与えた試験体は、いずれも与えられた温度以下では荷時熱ひずみが発生しないことを報告している<sup>11),16)</sup> (図 1.8)。国内では、右田らが、気乾試験体の全ひずみは100°C以降で収縮傾向がみられるのに対し、105°Cで事前乾燥した試験体の全ひずみは200°C程度まで膨張傾向がみられることを報告している<sup>25)</sup> (図 1.9)。筆者らも、事前乾燥した試験体は気乾試験体よりも、荷時熱ひずみが200°C以下で小さくなることを報告している<sup>26)</sup>。また、水セメント比の違いが及ぼす影響についても報告されており、豊田らは、水結合材比の影響は全ひずみにほとんど現れないことを報告する<sup>22)</sup>一方、丹羽ら<sup>19)</sup> (図 1.10)、Tao ら<sup>13)</sup> (図 1.11)、Jensen ら<sup>14)</sup>、崔ら<sup>27)</sup>は、常温時圧縮強度が大きい、もしくは水セメント比が小さいコンクリートほど荷時熱ひずみや過渡ひずみが大きくなることを報告している。

このように、荷時熱ひずみと温度の関係は、調合や養生条件といったコンクリートの水分条件の影響を受けることが報告されている。これは、荷時熱ひずみが発生する要因の一つであるセメント水和物の物理的・化学的反応(脱水や分解など)の進行が、水分条件が異なるコンクリートでは変化するためと考えられる。

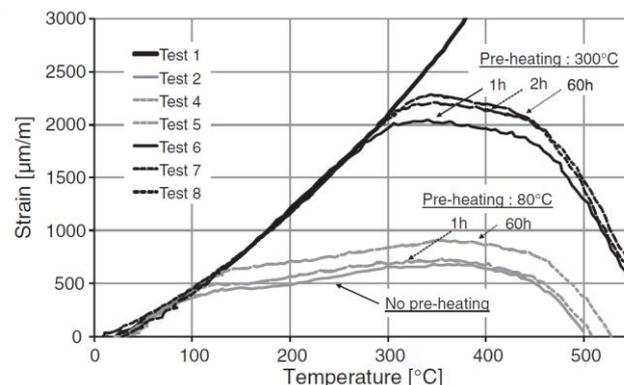
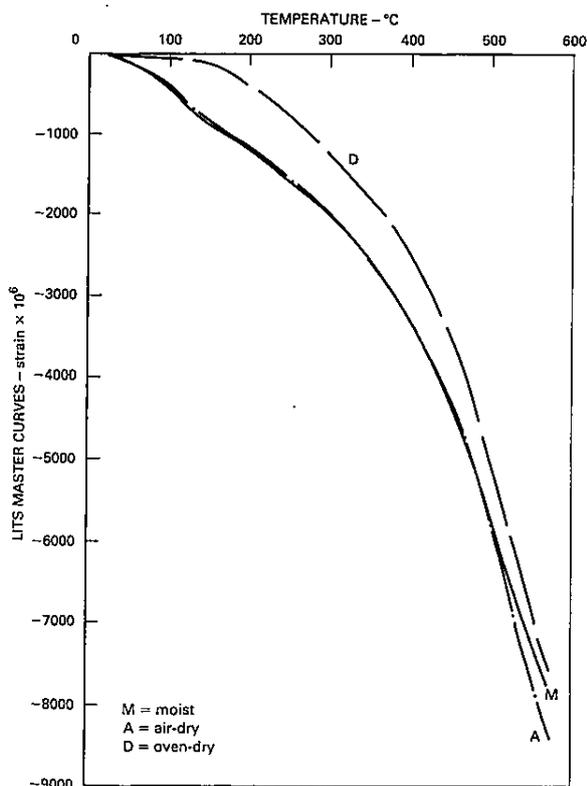


図 1.8  
荷時熱ひずみに及ぼす温度履歴の影響<sup>16)</sup>

図 1.7  
荷時熱ひずみに及ぼす養生条件の影響<sup>2)</sup>

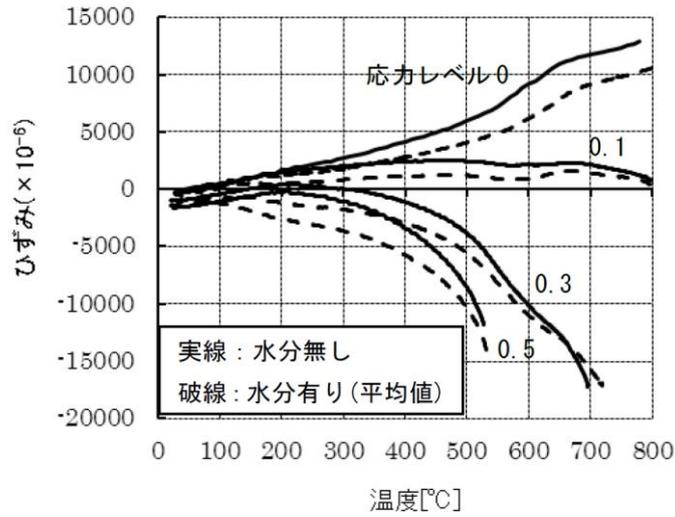


図 1.9 全ひずみに及ぼす養生条件の影響<sup>25)</sup>

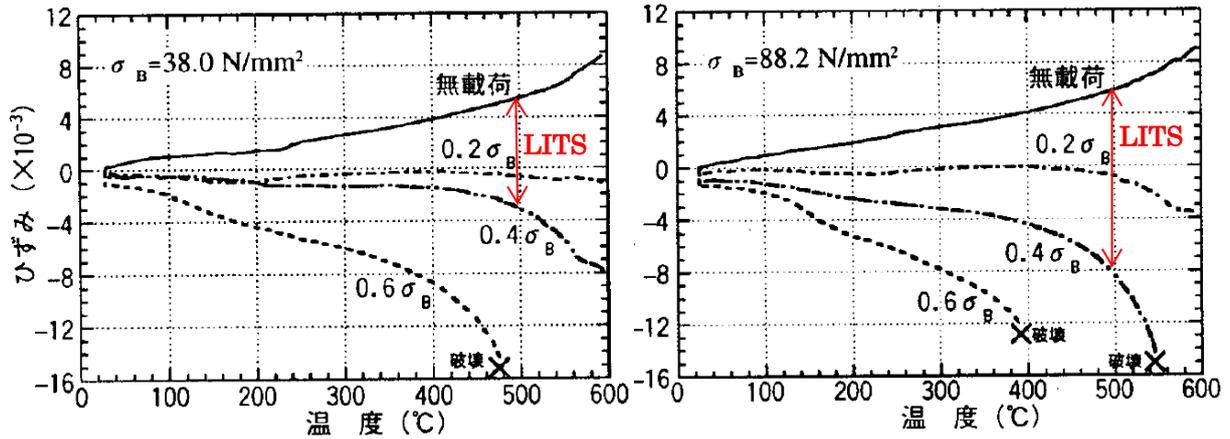


図 1.10 荷重時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響<sup>19)</sup>

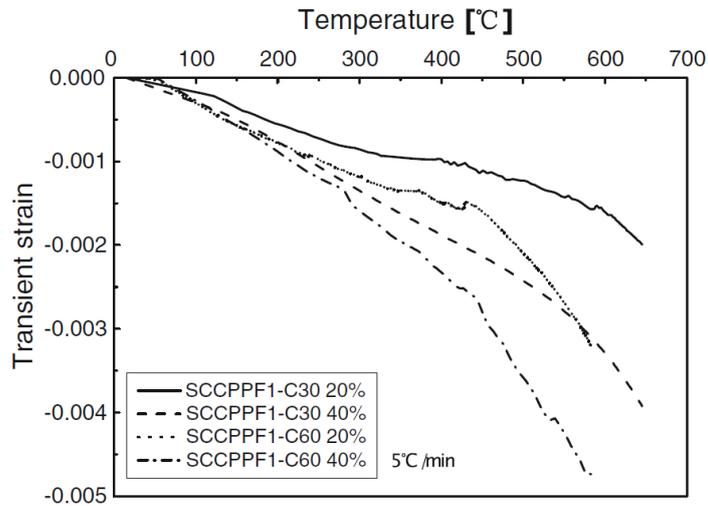


図 1.11 荷重時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響<sup>13)</sup>

(3) 荷時熱ひずみの数式化

コンクリート系構造の火災応答解析に荷時熱ひずみを組み込むため、荷時熱ひずみの数式モデルが多く提案されてきた。国内におけるコンクリート系構造の火災応答解析では、Anderbergらによって提案された「過渡ひずみモデル」<sup>6)</sup>、Schneiderによって提案された「遷移クリープモデル」<sup>7)</sup>、Khoury<sup>2)</sup>と Terro<sup>28)</sup>によって提案された「荷時熱ひずみモデル」の何れかが用いられている(表 1.3)。

表 1.3 荷時熱ひずみの数式モデル

<p>・過渡ひずみモデル<sup>6)</sup></p> $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{tr}$ $\varepsilon_{tr} = -k_2 \times (\sigma/\sigma_b) \times \varepsilon_{th}$
<p>・遷移クリープモデル<sup>7)</sup></p> $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{tcr}$ $\varepsilon_{tcr} = (\sigma \times \Phi) / E(20)$ $\Phi = g(\sigma, T) \times (\varphi + 1) - 1$ $\varphi = C_1 \cdot \tanh \gamma_w \cdot (T - 20) + C_2 \cdot \tanh \gamma_0 \cdot (T - T_g) + C_3$ $\gamma_w = (0.3w + 2.2) \times 10^{-3}$
<p>・荷時熱ひずみモデル<sup>2),28)</sup></p> $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma,init} + LITS$ $LITS = (A_0 + A_1 \cdot T + A_2 \cdot T^2 + A_3 \cdot T^3 + A_4 \cdot T^4) \times (0.032 + 3.226 \cdot (\sigma/\sigma_b))$
<p>・熱化学損傷モデル<sup>32)</sup></p> $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{tcr}$ $d\varepsilon_{tcr} = \beta_{tr}(V) \cdot (\sigma/\sigma_b) \cdot dV$
<p>・脱水クリープモデル<sup>33)</sup></p> $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{dcr} + \varepsilon_{dhcr}$ $d\varepsilon_{dcr} = \alpha_{dc} \cdot (\sigma/\sigma_b) \cdot dh_r$ $d\varepsilon_{dhcr} = 0 \quad (T \leq 105^{\circ}\text{C})$ $d\varepsilon_{dhcr} = \alpha_{hc} \cdot (\sigma/\sigma_b) \cdot dm_{hyd} \quad (T > 105^{\circ}\text{C})$
<p><math>\varepsilon_{tot}</math>: 全ひずみ, <math>\varepsilon_{th}</math>: 熱膨張ひずみ, <math>\varepsilon_{\sigma}</math>: 応力ひずみ, <math>\varepsilon_{cr}</math>: 基本クリープ  <math>\varepsilon_{tr}</math>: 過渡ひずみ, <math>\varepsilon_{tcr}</math>: 遷移クリープ, <math>\varepsilon_{\sigma,init}</math>: 初期応力ひずみ, LITS: 荷時熱ひずみ  <math>\varepsilon_{dcr}</math>: 乾燥クリープ, <math>\varepsilon_{dhcr}</math>: 脱水クリープ, <math>\sigma</math>: 荷時応力, <math>\sigma_b</math>: 常温時圧縮強度, <math>E(T)</math>: <math>T^{\circ}\text{C}</math>での弾性係数  <math>T</math>: 温度, <math>k_2</math>: 過渡ひずみ係数(= 2.35), <math>g(\sigma, T)</math>: 応力履歴を考慮するための関数  <math>C_1, C_2, C_3, \gamma_0, T_g</math>: 定数(= 2.6, 1.4, 1.4, 0.0075, 700 (骨材が珪岩の場合)), <math>w</math>: 含水率  <math>A_0, A_1, A_2, A_3, A_4</math>: 定数(= -43.87, 2.73, <math>6.35 \cdot 10^{-2}</math>, <math>-2.19 \cdot 10^{-4}</math>, <math>2.77 \cdot 10^{-7}</math>)  <math>\beta_{tr}(V)</math>: 実験結果から定める関数, <math>V</math>: 熱化学損傷係数(= <math>1 - E(T)/E(20)</math>)  <math>\alpha_{dc}</math>: 乾燥クリープ係数(= <math>2.7 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}</math>), <math>h_r</math>: 乾燥速度  <math>\alpha_{hc}</math>: 脱水クリープ係数(= <math>7 \cdot 10^{-7} \cdot m_{hyd}</math>), <math>m_{hyd}</math>: セメント水和物の重量減少率(単位体積当たり)</p>

Anderberg らは、載荷時熱ひずみを応力ひずみ、基本クリープおよび過渡ひずみの総和とした構成則を提案し、載荷時熱ひずみの大半は過渡ひずみが占めることを実験結果から示している。そして、応力レベルで除した過渡ひずみは温度の関数  $g(T)$  となり (図 1.12)、さらに  $g(T)$  が熱膨張ひずみで近似できることを示すことで、過渡ひずみを熱膨張ひずみと応力レベルの関数として数式化している (図 1.13)。このように、過渡ひずみモデルでは、載荷時熱ひずみを温度に依存する力学的ひずみ (thermo mechanical strain) として扱っており、数式の簡便さからコンクリート構造の熱変形・熱応力解析に関する多くの研究で使用されている。また、Schneider は、乾燥クリープに関する Bazant の粘弾性モデル<sup>29)</sup>を基に、載荷時熱ひずみを応力ひずみ (弾性ひずみと塑性ひずみ) と遷移クリープの総和とした構成則を提案している。そして、載荷時熱ひずみの大半を占める遷移クリープを、温度、応力レベルおよび含水率の関数として数式化している。このことから、遷移クリープモデルでは、載荷時熱ひずみを、コンクリートの水分の拡散によるクリープの増大として捉えていると考えられる。一方、Terro は、Khoury らが定義した載荷時熱ひずみを直接、温度と応力の関数として数式化している。以上の数式モデルは、いずれも温度を主要因としている。そのため、前節で示したような水分の影響を、これらの数式モデルで包括的に評価することは難しい。例えば、各モデルに組み込まれている定数 ( $k_2$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) は、コンクリートの調合によって変化することが報告されている<sup>1),30)</sup>。コンクリート構造の火災応答解析を精密に、かつ効率的に行うためには、養生条件や水セメント比といったコンクリート中の水分の影響を包括的に評価できる数式モデルが望まれる。

一方、載荷時熱ひずみをセメント水和物の反応との関係で直接表す試みもなされている。Ulm らは、高温時におけるコンクリートの機械的特性は温度ではなく脱水度 (dehydration degree) に依存するとし、脱水度を弾性係数の高温時残存率で表すことを提案している<sup>31)</sup>。また、Gawin らは、弾性係数の高温時残存率と、セメント水和物の重量変化で定量化した脱水度が相関関係にあることを示す共に、遷移クリープと弾性係数の高温時残存率 (熱化学損傷係数) の関係を数式化している<sup>32)</sup> (表 1.3, 図 1.14)。さらに、Sabeur らは、セメント水和物の脱水量を TGA (熱重量測定) から得た重量減少で表し、遷移クリープとの関係を数式モデル化している<sup>33)</sup> (表 1.3, 図 1.15)。そして、この数式モデルが、圧縮強度 40 ~ 120N/mm<sup>2</sup> のコンクリート試験体の実験データを追跡できることを報告している (図 1.16)。このように、載荷時熱ひずみをセメント水和物の反応との関係で直接表すことができれば、両者の関係は前述した水分の影響を包含したものになり、従来よりも汎用的な数式モデルを作成することが可能になると考えられる。ただし、高温時弾性係数の精確な測定は困難であり、また昇温過程において継続的に測定することもできないため、脱水度はコンクリートの重量変化で表す方が望ましいと考えられる。また、TGA で用いる微量サンプルと試験体では、脱水反応と温度の関係が異なるため、セメント水和物の脱水量は載荷時熱ひずみ測定時における試験体の重量減少で表した方がより適切である。

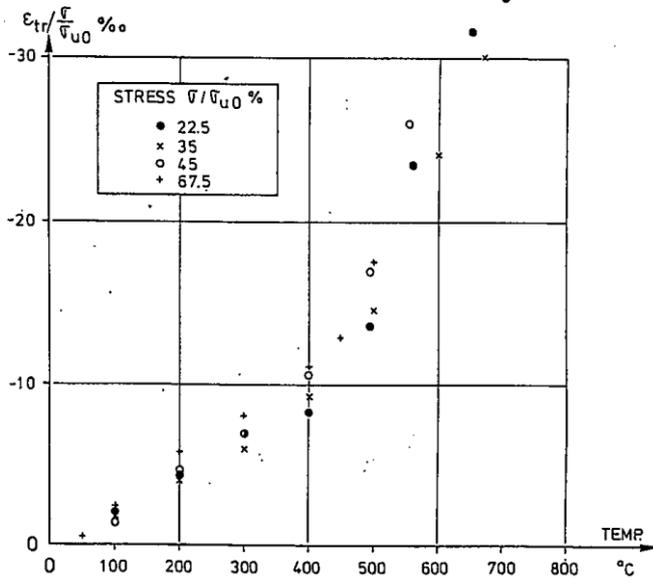


図 1.12 過渡ひずみと温度の関係<sup>6)</sup>

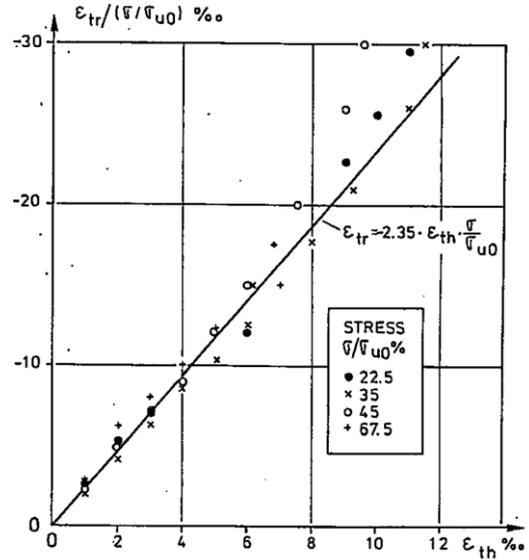


図 1.13 過渡ひずみと熱膨張ひずみの関係<sup>6)</sup>

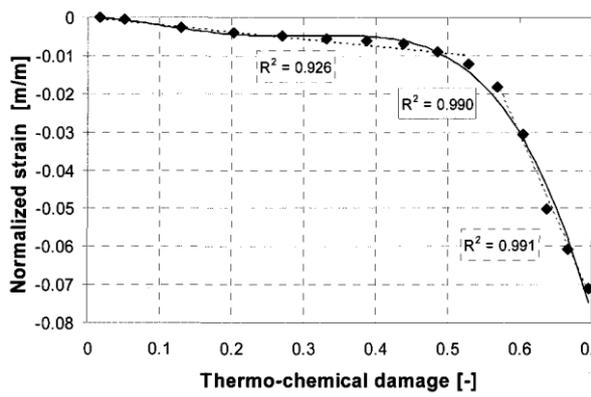


図 1.14 遷移クリープと熱化学損傷係数の関係<sup>32)</sup>

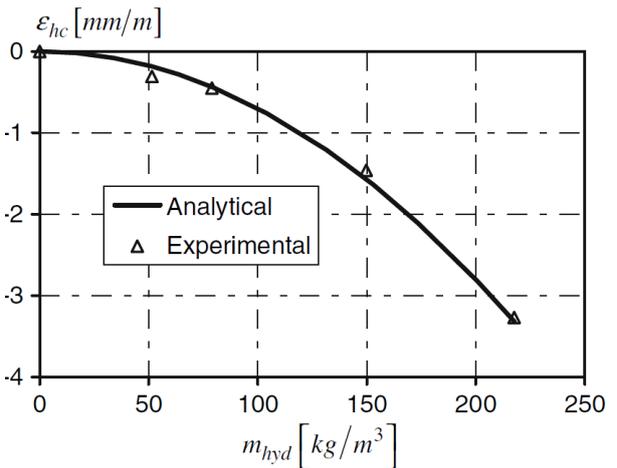


図 1.15 遷移クリープとセメント水和物脱水の関係<sup>33)</sup>

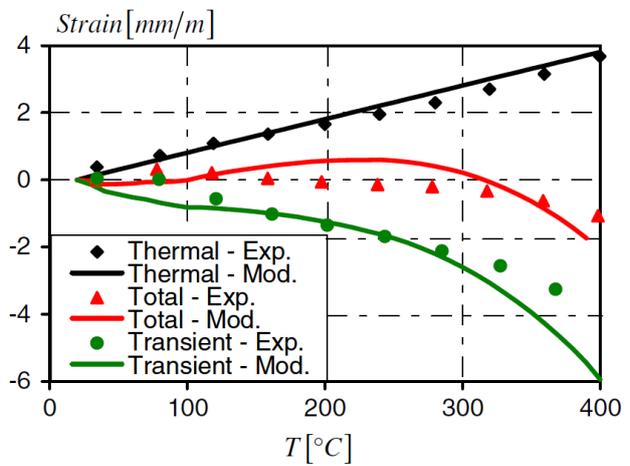
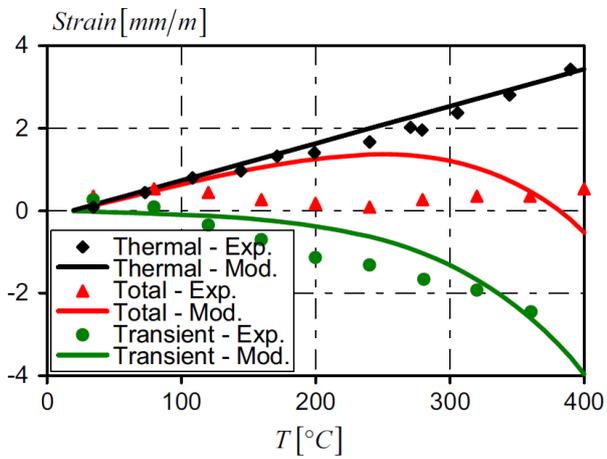


図 1.16 全ひずみの実験値と脱水クリープモデルによる計算値の比較<sup>33)</sup>

### 1.3 研究の目的

これまで示したように、コンクリート構造の火災時挙動をより精度よく解析するためには、コンクリート中の水分の影響を適切に評価できる、試験体の重量減少を主要因とした載荷時熱ひずみの数式モデルが必要となる。このような数式モデルを提案するためには、載荷時熱ひずみと重量減少の関係について、水分が関係する要因を条件とした網羅的な実験データが必要となる。しかし、水分の影響を検討した研究の多くは、設計基準強度が  $60\text{N/mm}^2$  を超えるような高強度コンクリートを対象としている（表 1.2）。これは、大きな圧縮力を負担する必要がある超高層ビルの柱部材やプレストレストコンクリート梁等で、水セメント比が 40%未満の高強度コンクリートの使用実績が近年増加していることと関係している。しかし、多くの一般的な鉄筋コンクリート造建築物では、より強度の低いコンクリートが広く使用されている。そのため、一般的な鉄筋コンクリート建築物の耐火性の検討にも利用できる数式モデルを提案するためには、水セメント比が 40%以上のコンクリートを対象として、養生条件や水セメント比の違いが載荷時熱ひずみに及ぼす影響を検討する必要がある。

以上より、本研究では、載荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響を定量的に把握するため、養生条件や水セメント比の異なる試験体について一定圧縮応力下で加熱されるコンクリートの全ひずみを測定する実験（以下、全ひずみ実験とする）を実施し、載荷時熱ひずみの実験データを蓄積する。特にコンクリートの水セメント比については、知見の不足している 40%以上を対象とする。また、全ひずみ実験と同じ条件で加熱した際の試験体の重量減少を測定し、載荷時熱ひずみと試験体重量の関係を定量化するとともに、両者の関係の数式化を試みる。

## 1.4 本論文の構成

本論文は、以下の 5 章により構成されている。

### 第 1 章：序論

本研究の序論として研究の背景を述べ、载荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響に関する実験的研究および既往の载荷時熱ひずみの数式モデルを紹介し、本研究の目的を示した。

### 第 2 章：試験体の諸元

本研究で使用する試験体の調合や養生方法に加え、加熱時における試験体の重量減少の測定結果などを示す。

### 第 3 章：応力-ひずみ関係に及ぼす水分の影響

本研究で使用する試験体の高温時における応力-ひずみ関係を把握するために実施した定常温度圧縮実験の結果を示し、圧縮強度や弾性係数に及ぼす水分の影響について検討する。

### 第 4 章：载荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響

载荷時熱ひずみを測定するために実施した全ひずみ実験の結果を示し、载荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響について検討する。また、第 2 章で得た試験体の重量減少と载荷時熱ひずみの関係について検討し、数式化を試みる。

### 第 5 章：結論

各章での結論を総括して本研究の成果を述べ、今後の課題を示す。

## 第1章の参考文献

- 1) 日本建築学会 編: 構造材料の耐火性ガイドブック, 丸善, 2009.3
- 2) Gavriel A. Khoury, Brian N. Grainger, Patrick J.E. Sullivan: Strain of concrete during first heating to 600°C under load, Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.133, pp.195-215, 1985.12
- 3) 常世田昌寿: 石灰岩骨材を用いた普通コンクリートの火災高温時における過渡ひずみに関する実験的研究, 千葉大学博士論文, 2006
- 4) 豊田康二: 火災応答フレーム解析に用いる高強度コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究, 千葉大学博士論文, 2010
- 5) Weigler H. and Fischer R.: Influence of high temperature on strength and deformation of concrete, Concrete for nuclear reactors, Detroit, American Concrete Institute, 1972, Special Publication SP-34, pp.481-493
- 6) Anderberg Y. and Thelendersson S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature 2.Experimental Investigation and Material Behaviour Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 7) Schneider U.: Concrete at High Temperatures – A general Review, Fire Safety Journal, 1988, 13, No1, pp.55-68
- 8) Diederichs U., Jumppanen U. and Penttala V.: Material properties of high strength concrete at elevated temperatures, IABSE congress report, 1988, pp.488-494
- 9) K.C.Thienel and F.S.Rostasy: Transient creep of concrete under biaxial stress and high temperature, Cement and Concrete Research, 26(9), pp.1409-1422, 1996
- 10) S. Hassen and H. Colina: Transient thermal creep of concrete in accidental conditions at temperatures up to 400°C, Magazine of Concrete Research 58 No.4, pp.201-208, 2006
- 11) J.C. MINDEGUIA, P. PIMIENIA, I. HAGER, C. LABORDERIE and H. CARRÉ: Experimental Study of Transient Thermal Strain and Creep of an Ordinary Concrete at High Temperatures, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Workshop « Structures in Fire », pp.697-709, 2006
- 12) Diederichs U. and Mertzsch O.: Behaviour of Ultra High Strength Concrete at High Temperatures, Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, pp.347-354, 2008
- 13) Jin Tao, Xian Liu, Yong Yuan, Luc Taerwe: Transient strain of self-compacting concrete loaded in compression heated to 700°C, Materials and Structures, pp.191-201, 2013
- 14) E. Jensen, B. Schuel and M. Joshi: Deformation Characteristics of Two Higher

- Strength Concretes Exposed to Elevated Temperatures and Mechanical Loads, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Structures in Fire, pp.639-648, 2012
- 15) S. Huismann, F. Weise, B. Meng and U. Schneider: Transient strain of high strength concrete at elevated temperatures and the impact of polypropylene fibers, Materials and Structures, pp.793-801, 2012
  - 16) Jean-Christophe Mindeguia, Izabela Hager, Pierre Pimienta, Helene Carre, Christian La Borderie: Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete, Cement and Concrete Research, pp.40-52, 2013
  - 17) I. HAGER: Behaviour of cement concrete at high temperature, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 61, No. 1, pp.1-10, 2013
  - 18) 山崎庸行:高温下(20~700°C)におけるコンクリートの熱変形挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1159-1160, 1991
  - 19) 丹羽博則, 長尾覚博, 江戸宏彰, 上杉英樹, 齋藤光: 20°C~600°Cまでの高温載荷加熱を受けるコンクリートのひずみ挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.249-250, 1999.9
  - 20) 常世田昌寿, 豊田康二, 織茂俊泰, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 松戸正士, 中込昭, 平島岳夫, 上杉英樹: 普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究, 構造工学論文集 B 48B, pp.149-154, 2002
  - 21) 常世田昌寿, 山下平祐, 豊田康二, 平島岳夫, 前田孝一, 上杉英樹: 普通コンクリートの高温時ひずみに対する加熱速度の影響, 日本建築学会 構造工学論文集 Vol.51B, pp.395-400, 2005
  - 22) 豊田康二, 山下平祐, 篠原幸一, 常世田昌寿, 平島岳夫, 前田孝一, 上杉英樹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究: その 2. 一定応力下において温度変化を伴う高温圧縮実験, 構造工学論文集. B 50B, pp.9-14, 2004
  - 23) 兼城莉乃, 豊田康二, 平島岳夫: 高強度コンクリートの高温時の力学的特性 その 1 加熱速度の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.181-182, 2008
  - 24) 道越真太郎, 小林裕, 黒岩秀介: 圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 621 号, pp.169-174, 2007
  - 25) 右田周平, 平島岳夫, 前田孝一: 高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維および水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1126-1131, 2012
  - 26) 山下平祐, 平島岳夫, 吉田徹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 4.コンクリートの高温時全体ひずみに与える水分の影響-, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.1-7, 2015
  - 27) 崔景喆, 金圭庸, 崔亨吉, 金武漢: 超高強度コンクリートの高温ひずみ特性を考慮した提案式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.991-996, 2015

- 28) Mohamad J. Terro: Numerical Modeling of the Behavior of Concrete Structures in Fire, ACI Structural Journal, pp.183-193, 1998
- 29) Z.P. Bazant, J.C. Chern: Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism, Materials and Structures, Vol.18, No.103, pp. 1-20, 1985
- 30) J. A. Purkiss and L. Y. Li: Fire Safety Engineering Design of Structures, Third Edition, p.141, CRC Press, 2013
- 31) F. J. Ulm, O. Coussy and Z. P. Bazant: The “Chunnel” fire. I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete, Journal of Engineering mechanics, ASCE, 125(3), pp.272-282, 1999
- 32) D. Gawin, F. Pesavento, B.A.Schrefler: Modelling of deformation of high strength concrete at elevated temperatures, Materials and Structures, pp.218-236, 2004
- 33) Hassen Sabeur, Fekri Meftah: Dehydration creep of concrete at high temperatures, Materials and Structures, pp.17-30, 2008

第2章 試験体の諸元	
2.1 はじめに	・ ・ ・ ・ ・ 17
2.2 調合および作製方法	・ ・ ・ ・ ・ 18
2.3 養生方法	・ ・ ・ ・ ・ 19
2.4 含水率	・ ・ ・ ・ ・ 22
2.5 単位体積重量	・ ・ ・ ・ ・ 22
2.6 常温時における力学的特性	・ ・ ・ ・ ・ 23
2.7 800℃までの加熱による重量減少	・ ・ ・ ・ ・ 24
2.7.1 重量減少測定実験	
2.7.2 重量減少と温度の関係	
2.8 セメント水和物の熱的变化	・ ・ ・ ・ ・ 29
2.9 まとめ	・ ・ ・ ・ ・ 31
第2章の参考文献	・ ・ ・ ・ ・ 32

## 2.1 はじめに

本章では、本研究で使用した試験体の詳細を述べる。第 1 章で述べたように、本研究では、コンクリート中の水分が載荷時熱ひずみに及ぼす影響の検討を主目的としている。硬化したコンクリート中の水分は、100℃程度の加熱で蒸発する水分と、100℃以上の加熱でのみ逸脱する水分に大きく分けられる。前者は蒸発性水分と呼ばれ、セメント硬化体中の空隙や毛細管に存在する自由水や毛細管水、および骨材中の吸収水が含まれる。後者は非蒸発性水分と呼ばれ、セメント水和物（水酸化カルシウム、けい酸カルシウム水和物など）中に化学的に結合して存在する化学結合水、および骨材中の結晶水が含まれる。そして、これら 2 者の間に、セメントゲル内に保持されるゲル水や吸着水が存在する<sup>1)~3)</sup>（図 2.1）。蒸発性水分の量は含水率として表すことができ、コンクリートが乾燥状態にあるほど少なくなるなど、養生条件によって変化すると考えられる。また、コンクリートに使用している骨材量が同じであれば、非蒸発性水分の量はセメント水和物の量に比例するため、水セメント比が小さいほど多くなると考えられる。

蒸発性水分の有無が載荷時熱ひずみに及ぼす影響については、気乾状態の試験体と、事前に蒸発性水分を蒸発させた絶乾状態の試験体の載荷時熱ひずみを比較することで検討した研究が、高強度コンクリートに関しては報告されている<sup>4),5)</sup>。一方、実際の RC 造建築物では、打設後、部材内部には含水率の差が生じ、時間の経過とともに差が小さくなることが報告されている<sup>6)</sup>。例えば、柱部材では打設後 100 日の時点で、空気に曝される気乾状態の表層部と、水分が抜けにくく封かん状態にある中心部では体積含水率で 10%弱の差が生じている（図 2.2）。コンクリート系部材の耐火性を検討する際には、比較的早期に耐力を喪失する表層部に比べ、温度上昇が緩やかな中心部（主筋内部のコア部）の挙動が重要になる。そのため、適切な耐火性の検討を行うためには、コンクリートが封かん状態で養生されることにより生じる現象（例えば、含水率が気乾状態よりも高くなる）が及ぼす載荷時熱ひずみへの影響を把握する必要があるが、国内では未だ知見が得られていない。

また、非蒸発性水分が載荷時熱ひずみに及ぼす影響については、水セメント比が異なる試験体を用いた全ひずみ実験の結果から検討できる<sup>7)~10)</sup>。ただし、水セメント比が 40%未満になると、調合中のセメント量を増やしても未水和セメント粒子が増えるばかりで、セメント水和物量は殆ど変わらない。そのため、非蒸発性水分の量が載荷時熱ひずみに及ぼす影響を詳細に検討するためには、水セメント比が 40%以上のコンクリートで載荷時熱ひずみを比較することが望ましいが、国内では未だ知見が得られていない。

以上をふまえ、本研究では、コンクリートの養生条件（気乾養生、絶乾養生、封かん養生）および水セメント比（40%、50%、65%）を主な実験条件とする。

## 2.2 調合および作製方法

試験体の使用材料を表 2.1, 調合条件を表 2.2 に示す。水セメント比の最大値は, JASS 5<sup>1)</sup> に規定されている普通ポルトランドセメントの水セメント比の上限である 65%とした。また, 残りの水セメント比 (50%, 40%) は, 水セメント比 65%の試験体と同じ化学混和剤の条件で無理なく打設できる範囲で決定した。実験結果への水セメント比による影響を明確にするため, 単位水量を一定にした調合とした。また, 実験結果を比較する際に, 粗骨材による影響を排除するため, 粗骨材のかさ容積を一定にした調合とした。粗骨材は, 国内で一般的に使用されている硬質砂岩とした。円柱試験体の寸法は, 電気炉を用いて加熱する際に内部温度が均一になり, かつ直径が粗骨材の最大寸法の 3 倍以上となるように考慮し, 直径 75mm, 高さ 150mm とした。

コンクリートの練混ぜは, 容量 100ℓ のパン型強制練りミキサで行った。試験体間のばらつきを極力小さくするため, 試験体の作製は JIS A 1132 「コンクリート強度試験用供試体の作り方」および JIS A 1138 「試験室におけるコンクリートの作り方」に従い実施すると共に, 水セメント比ごとに同バッチから試験体を採取した。

表 2.1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	東京都青梅市産砕石(硬質砂岩) 表乾密度: 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.60% 最大寸法: 20 mm, 実積率: 63.5%
細骨材	静岡県掛川市産陸砂 表乾密度: 2.58 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.91%
化学混和剤	AE 減水剤

表 2.2 試験体調合およびフレッシュコンクリート試験結果

水セメント比	調 合					フレッシュコンクリート試験結果		
	細骨材率	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤使用量	スランプ	空気量
		水	セメント	細骨材	粗骨材			
(%)	(%)					(Cx%)	(cm)	(%)
65	47.0	176	271	841	973	0.25	19.5	4.8
50	45.0	176	352	777	973	0.25	19.5	4.8
40	42.6	176	440	704	973	0.25	18.0	4.9

### 2.3 養生方法

各試験体の養生工程を図 2.3 に示す。試験体は打設の翌日に脱型した後、材齢 28 日まで標準水中養生を行った。試験体上面の研磨は材齢 7 日に実施した。標準水中養生後は、20℃・60%R.H.に設定された養生室内で 160 日間以上養生を行った。実験は材齢 205 日から順次開始し、材齢 485 日で全ての実験が終了した。養生室内で気中養生を行った試験体を気乾試験体と称す。また、気乾試験体と同様に養生するが、標準水中養生後、ポリ塩化ビニリデン製フィルムとポリエチレン製の袋で封かんにした試験体を封かん試験体と称す。封かん試験体は、封かんを解除してから実験に供した。また、気乾試験体と同様の養生を行い、実験前に 105℃に設定された乾燥機内で 14 日間の事前乾燥を行った試験体を絶乾試験体と称す。絶乾試験体は、シリカゲルで除湿したデシケータ内で 1～5 日間の放冷を行ってから実験に供した。

なお、封かん養生は、コンクリート中の水分が蒸発しにくい鉄筋コンクリート部材中心部における養生条件を再現するために採用した。しかし、作製可能な試験体数の制限から、封かん養生を全ての水セメント比で実施することはできなかった。そのため、余剰水（セメントの水和に使われない調合中の水）が最も多く、他の養生条件の試験体に対して含水率の差をつけやすい水セメント比が 65%のコンクリートのみを対象として、封かん養生は実施した。

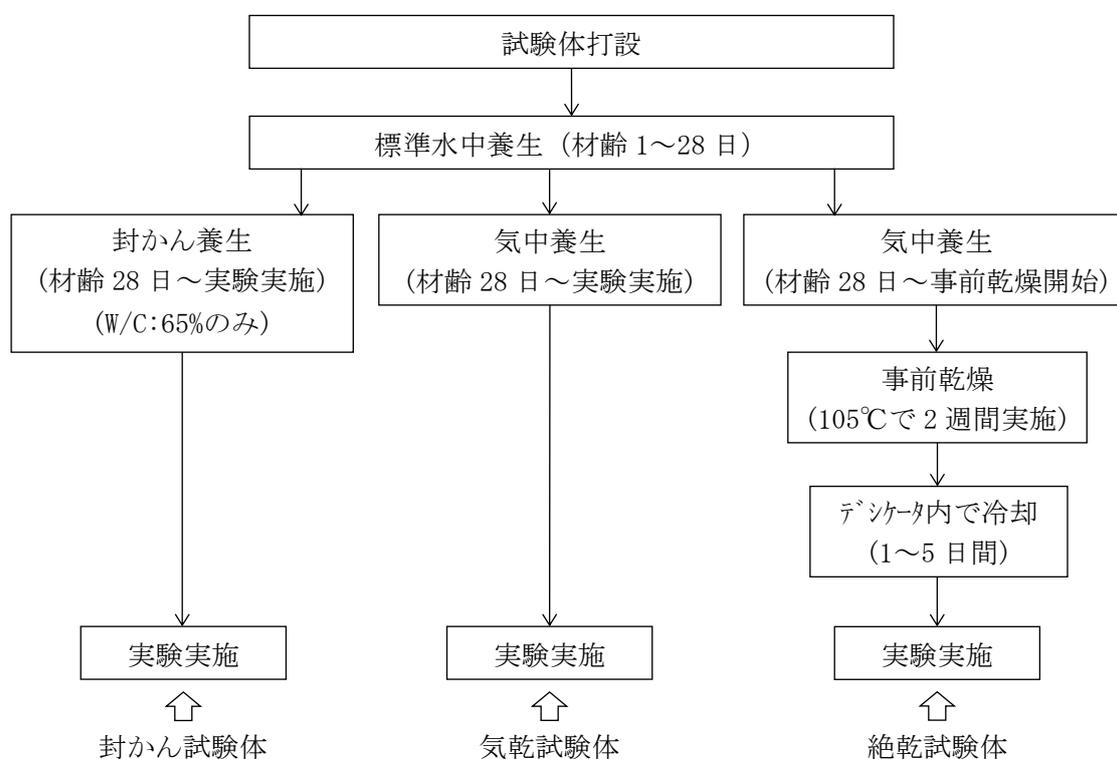


図 2.3 試験体の養生工程

養生中の試験体の重量変化率（式(2.1)から算出）を図 2.4 に示す。なお、図 2.4 は試験体研磨後からの測定結果であり、水中養生中の重量測定は試験体表面の水分を十分に拭き取ってから実施した。

$$R_{cure} = (W_{pres.} - W_{init.}) / W_{init.} \times 100 \quad \dots (2.1)$$

$R_{cure}$  : 養生時の重量変化率(%),  $W_{pres.}$  : 試験体の測定時の重量(g),

$W_{init.}$  : 試験体の初期重量(gf)

水中養生を行っている間、試験体重量は増加した。これは、水和の促進に伴いセメント水和物中の毛管空隙が増加し、この空隙内へ水を取込んだためと考えられる<sup>1)</sup>。養生室内での養生を開始すると、気乾試験体は、試験体内部の比較的大きな空隙に存在する自由水が蒸発するため重量が減少した。その際、水セメント比が大きい試験体ほど自由水が多く存在するため、重量の減少が大きくなった。材齢 112 日以降、気乾試験体の重量減少は小さくなり、実験期間中は殆ど変化しなかった。封かん試験体は、封かんにより気中への自由水の蒸発が抑えられるため、気乾試験体に比べ重量の減少は小さかった。しかし、自由水の一部が封かんを透過して気中へ蒸発しており、実験期間中も若干の重量減少が継続した。

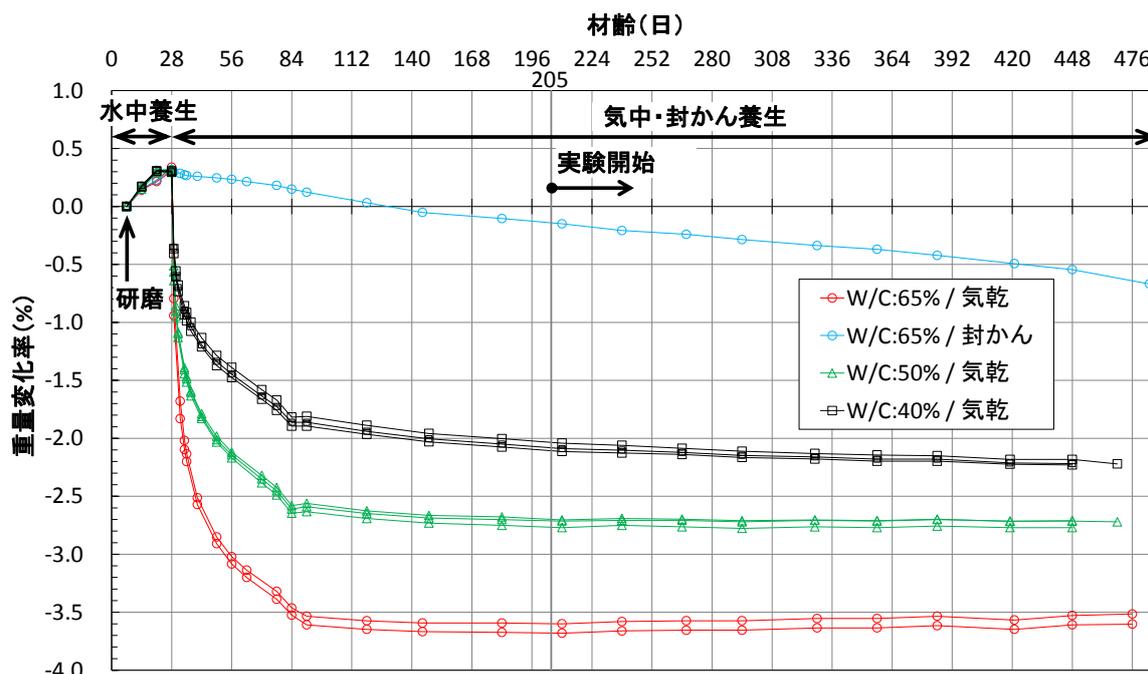


図 2.4 試験体養生時の重量変化率

絶乾試験体の養生工程において、気乾試験体を 105℃で事前乾燥した際の重量減少率（式(2.2)から算出）を図 2.5 に示す。また、封かん試験体を 105℃で乾燥した際の重量減少率も併せて示す。封かん試験体の乾燥は、実験期間前（材齢 182 日）と実験期間後（材齢 490 日）にそれぞれ開始した。なお、重量減少の傾向を詳細に検討するため、図 2.5 の横軸は対数目盛で表示した。

$$R_{wl} = (W_{init} - W_{pres.}) / W_{init} \times 100 \quad \dots (2.2)$$

$R_{wl}$  : 重量減少率(%),  $W_{pres.}$  : 試験体の測定時の重量(g),  $W_{init.}$  : 試験体の初期重量(gf)

全ての試験体において乾燥開始直後に大きな重量減少が生じた。その後、徐々に重量減少は緩やかになり、乾燥開始から 7 日以降、重量の変化は殆ど生じなかった。乾燥開始から 14 日目（事前乾燥終了時）における 1 日あたりの重量変化率は 0.02% 以下であった。JIS A 1476「建築材料の含水率測定方法」では、含水率の変化が 0.1%/日以下になった場合に恒量と見なしていることから、14 日間の事前乾燥によって、試験体は絶乾状態に達していると想定される。また、参考のため、一部の試験体については乾燥開始後 14 日以降も乾燥を継続したが、重量の変化は見られなかった。105℃の乾燥による試験体重量の減少は、コンクリート中の水分が蒸発することで生じる<sup>1)3)</sup>。本報では、14 日間の事前乾燥によって生じた重量減少量を蒸発性水分量と定義する。

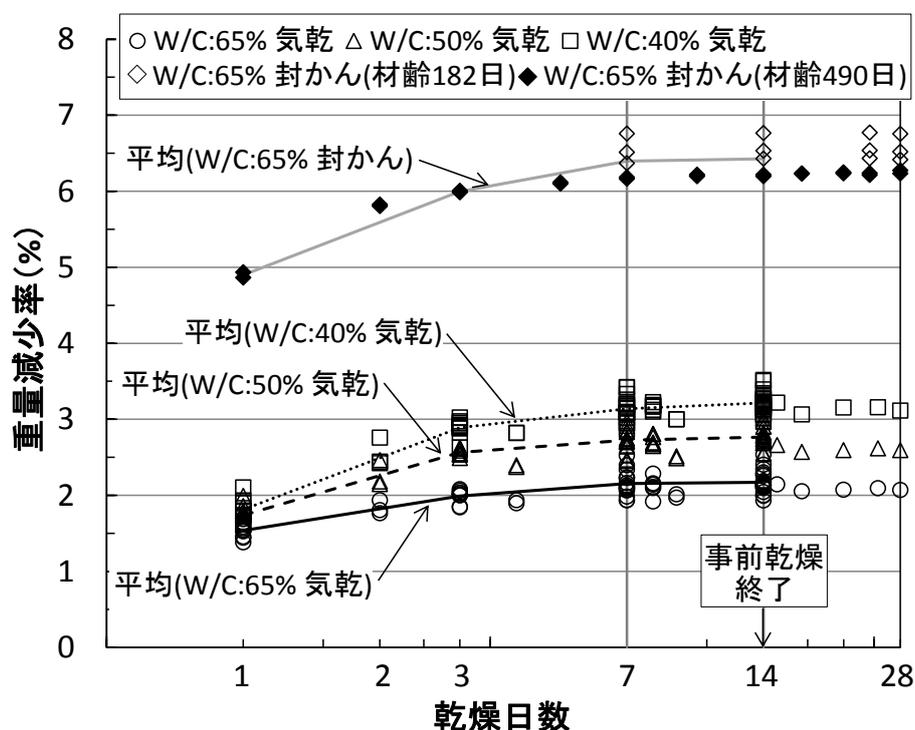


図 2.5 105℃での乾燥による試験体の重量減少率

## 2.4 含水率

表 2.3 に、気乾試験体および封かん試験体の含水率を示す。なお、本研究では、JIS A 1476「建築材料の含水率測定方法」に基づく含水率ではなく、105℃での乾燥を行う前の重量に対する蒸発性水分量の割合を含水率 ( $R_{wc}$ ) と称す。これは、重量減少測定実験 (2.7 に示す) から得る試験体の重量減少率 (式(2.2)から算出) と算出方法を揃えたためである。なお、参考として、JIS の方法により算出した含水率 (14 日間乾燥後の重量に対する蒸発性水分量の割合) も併記した。気乾試験体の含水率は、図 2.5 に示した重量減少率測定結果の平均とした。封かん試験体の含水率は、図 2.5 に示した測定結果から得た重量減少の平均に対して、実験準備中 (約半日の気乾状態時) に生じた蒸発性水分の蒸発による重量減少 (乾燥前の重量に対する割合:0.35%) を差引いた値を用いて算出した。気乾試験体の含水率は、水セメント比が小さい試験体ほど高くなった。これは、水セメント比が小さい場合、コンクリート中のセメント水和物量が多くなり、それに伴い事前乾燥時に蒸発するゲル水、吸着水の量も多くなるためと考えられる。また、封かん試験体の含水率は、気乾試験体 (水セメント比:65%) の3倍程度であった。含水率算出方法の違いによる算出値の差は1%未満であった。

表 2.3 試験体の含水率

養生条件	気乾			封かん
水セメント比 (%)	65	50	40	65
含水率 $R_{wc}$	2.19%	2.78%	3.23%	6.08%
含水率 (JIS)	2.24%	2.86%	3.33%	6.87%

## 2.5 単位体積重量

各試験体の実験前における単位体積重量を表 2.4 に示す。同種類の試験体数は 21 体である。表に示すように、同種類の試験体間における単位体積重量のばらつきは  $0.1\text{gf}/\text{cm}^3$  未満に収まった。

表 2.4 試験体の単位体積重量 (単位:  $\text{gf}/\text{cm}^3$ )

水セメント比 (%)	65			50		40	
	気乾	絶乾	封かん	気乾	絶乾	気乾	絶乾
最小値	2.18	2.17	2.26	2.24	2.18	2.24	2.21
最大値	2.25	2.25	2.33	2.28	2.25	2.32	2.25
平均値	2.23	2.21	2.30	2.26	2.21	2.29	2.23

## 2.6 常温時における力学的特性

気乾試験体の力学的特性に及ぼす材齢の影響を確認するため、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従い、圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。試験は、3000kN 全自動圧縮試験機（図 2.5）により、材齢 7 日、28 日、182 日、490 日に実施した。試験結果を表 2.5 に示す。気乾試験体の弾性係数は材齢 28 日まで、圧縮強度は材齢 182 日まで増加するが、その後は殆ど変化しなかった。また、3 章で報告する定常温度圧縮実験から得た常温時における圧縮強度および弾性係数の結果から、封かん試験体についても、気乾試験体と同様の傾向が得られた。封かん試験体と気乾試験体 (W/C:65%) の実験結果と実験時の材齢の関係を図 2.6 に示す。図中に示す結果は、高温実験用の装置（3 章参照）により、材齢 205 日から 284 日の間に実施した実験から得たものである。図 2.6 に示すように、気乾試験体、封かん試験体共に、材齢 200 日以降で圧縮強度および弾性係数の変化は見られなかった。また、封かん試験体と類似の湿潤養生を行った試験体について、圧縮強度の増加は材齢 180 日でほぼ平衡状態になることも報告されている<sup>1)</sup>。以上の結果から、本報の実験結果に及ぼす材齢の影響は小さいと考えられる。

表 2.5 JIS A 1108 に従い実施した圧縮強度試験の結果

		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
		65%	50%	40%	65%	50%	40%
材 齢 (日)	7	23.4	36.0	47.7	25.4	28.3	31.0
	28	31.4	46.1	59.4	29.2	31.4	32.9
	182	35.5	51.4	64.8	27.7	28.9	32.9
	490	33.7	49.9	65.1	27.7	30.0	32.8

・試験体寸法：φ100×200mm ・3体の試験結果の平均を示す。



図 2.5 3000kN 全自動圧縮試験機

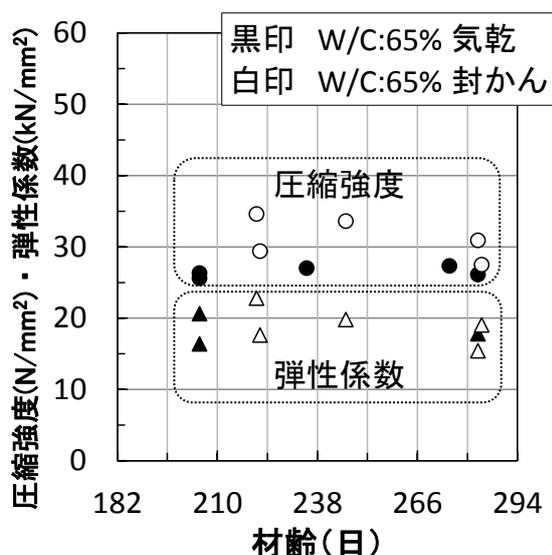


図 2.6 定常温度圧縮実験(常温時)の結果

## 2.7 800℃までの加熱による重量減少

### 2.7.1 重量減少測定実験

全ひずみと試験体の重量減少の関係を把握するため、全ひずみ実験と同試験体による重量減少測定実験を、試験体種類ごとに2回ずつ行った。重量減少測定実験では、試験体を全ひずみ実験と同じ加熱速度（1.5℃/分）で800℃まで加熱しながら試験体重量の測定を行った。実験に使用した実験装置を図2.7および図2.8に示す。実験では、箱型電気炉を用いて同種類の試験体を2体ずつ、合計4体の加熱を同時に行い、同種類の試験体のうちの1体で試験体重量、残りの1体で試験体内部温度を測定した。試験体は、電気炉の上方からステンレスワイヤーで吊るしたステンレス籠に入れた状態で加熱した。電気炉からの直接の輻射を避け内部温度差を緩和するため、試験体の外周にはセラミック製耐火クロスを巻きつけた。重量測定用試験体は、ワイヤーの途中にロードセルを介して吊るした。その際、電気炉の炉蓋がワイヤーに干渉しないように注意して試験体の設置を行った。また、温度測定用試験体のみにはK熱電対を埋め込み、重量測定用試験体の内部温度は温度測定用試験体と同じとみなした。図2.9に、重量減少測定実験における試験体内部温度測定位置を示す。電気炉の加熱制御は、全ひずみ実験と同じく（第4章参照）、試験体の端部における表面温度（図2.9中の $T_1, T_2$ ）が1.5℃/分で昇温するように行った。図2.10に、実験時における試験体内部温度と時間の関係の一例（試験体：65W）を示す。全ての重量減少測定実験において、端部における表面温度（図2.9中の $T_3, T_4$ ）の加熱速度は1.5℃/分で概ね制御できた。また、各実験における試験体内部の温度差の最大は43℃～54℃であった。試験体内部温度を代表する「試験体温度」は全ひずみ実験と同じく（第4章参照）、試験体表面温度（表面から深さ6mmの位置で測定）の平均値とした（式2.3）。

$$T = (T_3 + T_4 + 2 \cdot T_5) / 4 \quad \dots (2.3)$$

$T$ : 重量減少測定実験での試験体温度(℃),

$T_3, T_4, T_5$ : 試験体表面温度(図2.9)(℃)

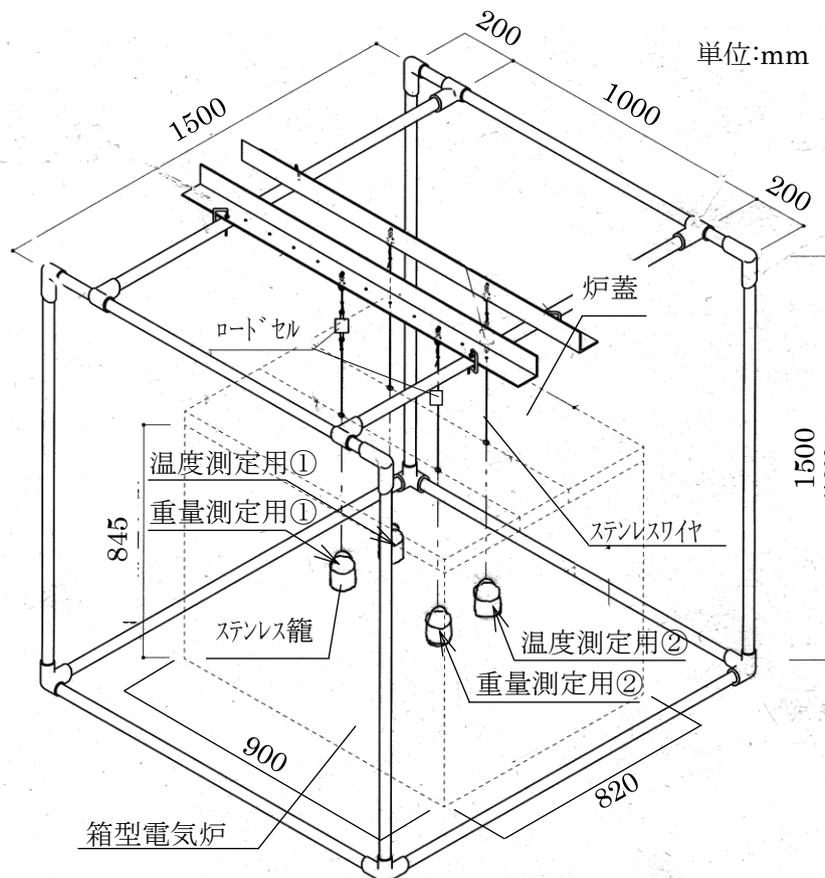
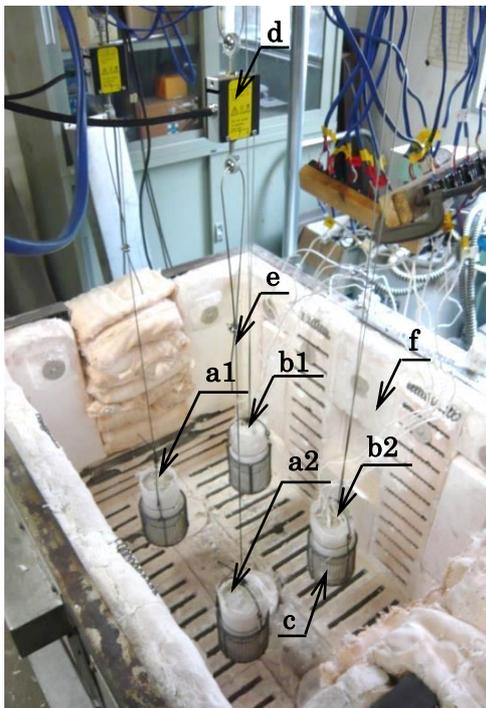


図 2.7 重量減少測定実験装置 (概観)



- a1, a2 : 重量測定用試験体\*
  - b1, b2 : 温度測定用試験体\*
  - c : ステンレス籠( $\phi 100 \times H100$  mm)
  - d : ロードセル  
 (東京測器研究所製 TCLZ-50NA,  
 容量 50N, 定格出力  $4000 \times 10^{-6}$  ひずみ)
  - e : ステンレスワイヤー( $\phi 2$  mm)
  - f : 箱型電気炉(外寸:  $820 \times 900 \times 845$  mm)
- \* a1 と b1 および a2 と b2 は同種類の試験体とした。

図 2.8 重量減少測定実験装置 (電気炉内の状況)

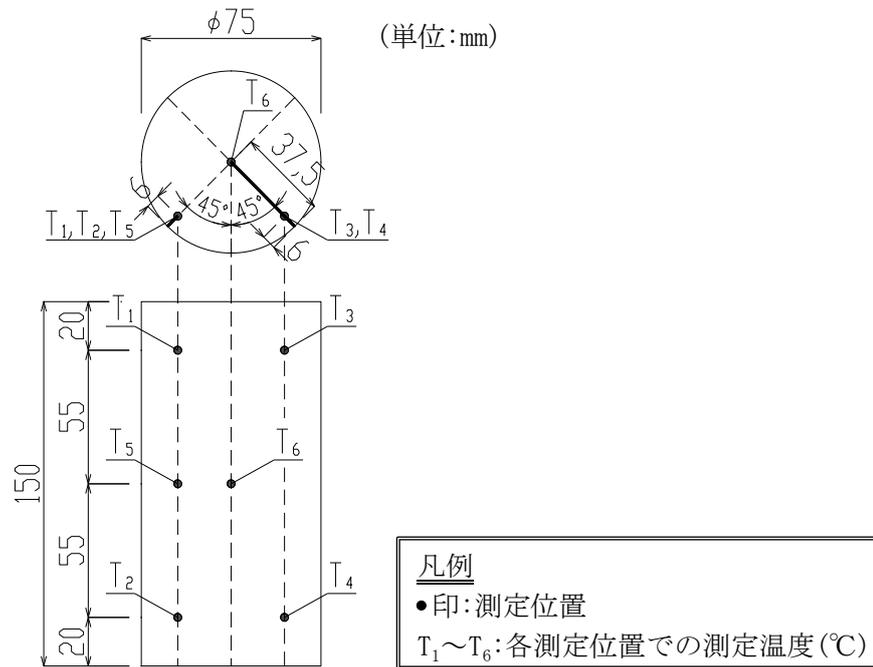


図 2.9 試験体内部温度測定位置

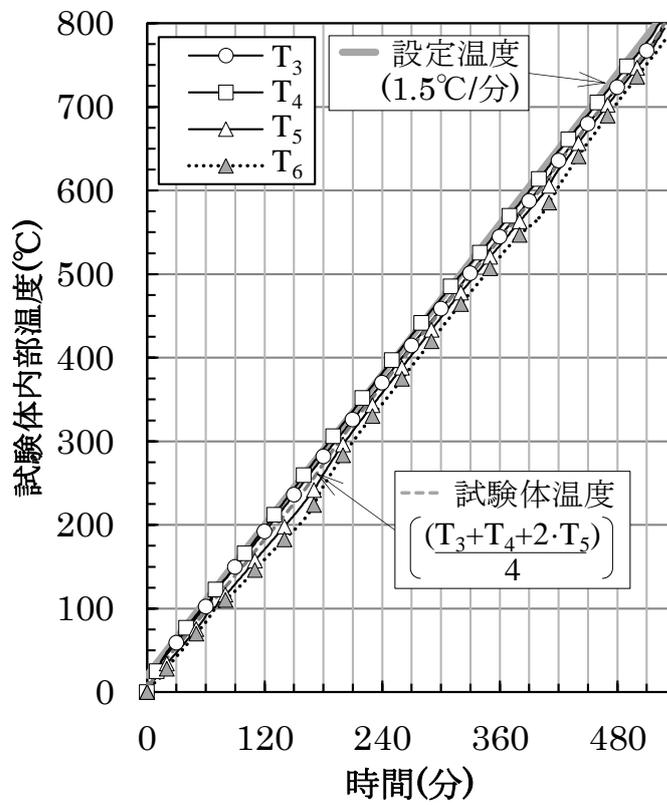


図 2.10 試験体内部温度と時間の関係

## 2.7.2 重量減少と温度の関係

重量減少測定実験では、同種類の試験体による2回の実験で同様の測定結果が得られた。図 2.10 に、各試験体の重量減少率（式(2.2)より算出）と試験体温度の関係を一例ずつ示す。気乾試験体および封かん試験体の重量減少率は100℃から急激に増加する一方、絶乾試験体の重量減少率は200℃までほとんど変化しなかった。気乾試験体および封かん試験体の急激な重量減少は、重量減少率が各試験体の含水率に達すると緩やかになることから、蒸発性水分の蒸発に因ると考えられる。蒸発性水分の蒸発は、気乾試験体では約200℃、封かん試験体では約250℃まで継続した。気乾試験体の急激な重量減少が100℃～200℃程度で発生することは既往の報告と一致する<sup>12),13),14)</sup>。200℃からは絶乾試験体の重量減少も始まる。これは、セメントゲル内に化学吸着されている水の解放やケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の脱水などによる<sup>15)</sup>。本研究では、これらの現象をセメント水和物の「脱水」と呼ぶ。

気乾試験体および封かん試験体の蒸発性水分の蒸発が終了した250℃以降、同じ水セメント比の気乾試験体と絶乾試験体では、重量減少率と試験体温度の関係から得る勾配が同等になった。一方、250℃から500℃にかけて、封かん試験体(65S)は気乾試験体および絶乾試験体(65A, 65D)よりも勾配が急になる傾向がみられた。また、同じ温度領域では水セメント比が小さい試験体ほど勾配が急になる傾向もみられた。封かん試験体や水セメント比が小さい試験体はセメント水和物の含有量が比較的多いため、セメント水和物の脱水による重量減少が多くなったと考えられる。一方、文献13)では250℃を超えると養生条件(air-dry, oven-dried at 105℃ and moist)の影響はなくなると報告されている。500℃～600℃では、全ての試験体において重量減少率の勾配が急になった。この要因として、水酸化カルシウムの分解による重量減少が考えられる。Anederbergらは、試験体を500℃で加熱した際、水酸化カルシウムの分解による重量減少が時間の経過に伴い発生することを報告している<sup>12)</sup>。600℃以降では、セメント水和物の脱水は終了する一方<sup>15)</sup>、ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の分解<sup>15),16)</sup>が発生する。重量減少測定実験で発生した試験体の反応と温度の関係を表2.6にまとめる。

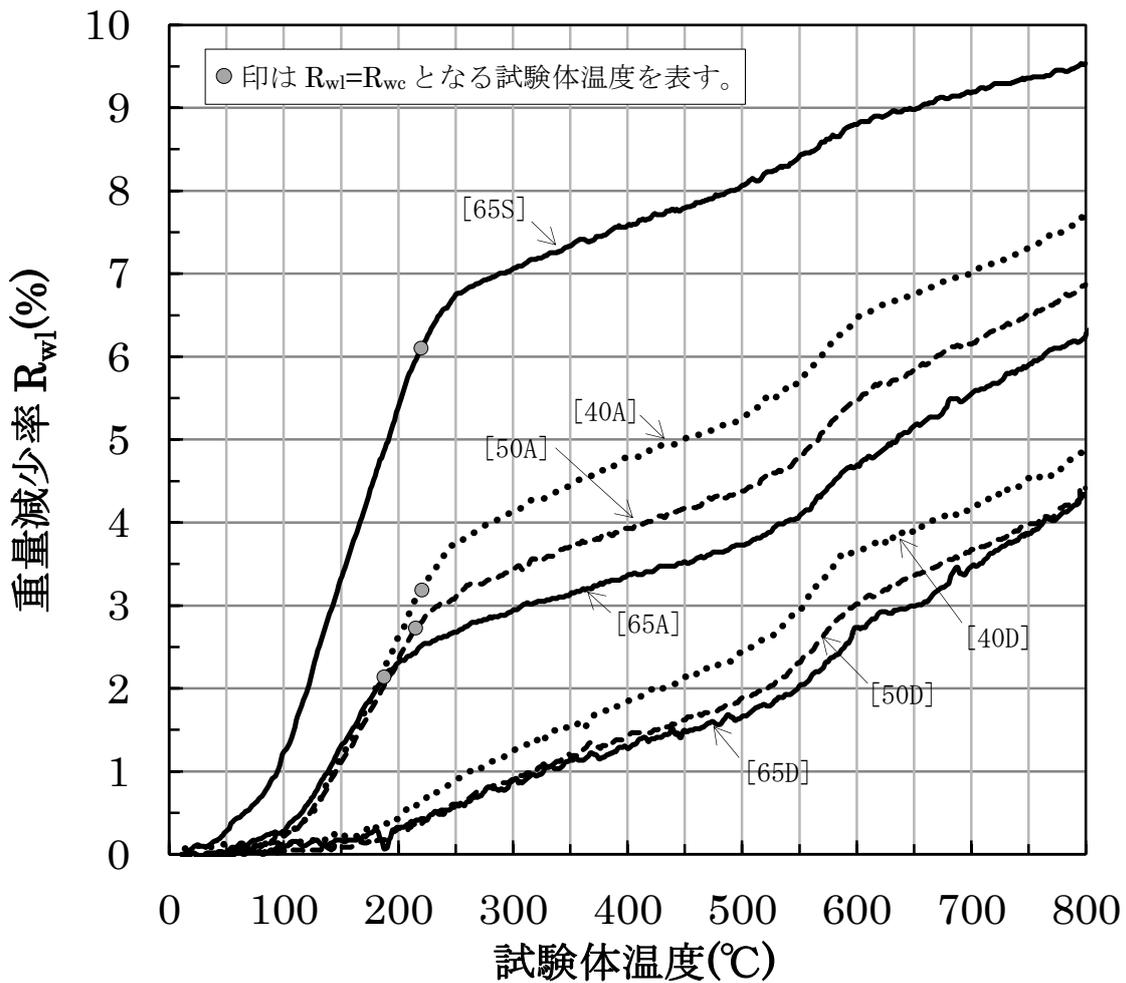


図 2.11 重量減少率と試験体温度の関係

表 2.6 試験体で発生する反応と温度の関係

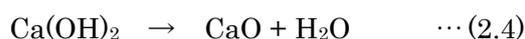
温度(°C)	試験体で発生する反応
100~200	気乾試験体の蒸発性水分の蒸発
100~250	封かん試験体の蒸発性水分の蒸発
200~600	セメント水和物の脱水
500~800	セメント水和物 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , C-S-H) の分解

## 2.8 セメント水和物の熱的变化

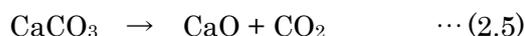
前節で示したように、コンクリートを構成するセメント水和物は温度上昇に伴い化学反応することが報告されている<sup>15)</sup>。本研究に使用した試験体のセメント水和物で温度上昇に伴い生じる化学反応の傾向を把握するため、熱分析実験を実施した。

実験に使用した装置は Rigaku 社製 差動型示差熱天秤である。本装置では、温度上昇に伴い生じるセメント水和物試料の重量減少および吸発熱変化を測定することができる。試料は、常温での定常温度圧縮実験（3章参照）を実施後の試験体から採取した。試験体中心部から採取したモルタル片は、まず、水和反応を停止させるためアセトンに一晩漬けた。その後、十分に風乾してから、細骨材を取り除きながらメノウ鉢を用いて摩砕し、最終的に  $44\mu\text{m}$  ふるいを通過したものを試料とした。実験は、気乾試験体、封かん試験体については2回ずつ、絶乾試験体については3回ずつ実施した。実験は窒素ガス下で行い、加熱速度は  $10^\circ\text{C}/\text{分}$  とした。用いた試料量は  $10\sim 20\text{mg}$  である。

実験結果の代表例を図 2.12 に示す。重量減少率は式(2.2)より算出した。加熱開始とともに、蒸発性水分の蒸発によると考えられる重量減少が、養生条件によらず全ての試料で生じた。これは、気乾試験体の重量減少が  $100^\circ\text{C}$  以降で生じた重量減少測定実験とは異なる傾向であり、比表面積に大きな差のある分析用試料と試験体では蒸発水分の蒸発傾向にも差が生じると考えられる。気乾試験体および封かん試験体では約  $90^\circ\text{C}$  および約  $150^\circ\text{C}$  でエトリングイトもしくはせっこうの脱水によると考えられる吸熱反応が生じる。一方、絶乾試験体ではこれらの吸熱反応はみられないことから、 $105^\circ\text{C}$  での事前乾燥によってエトリングイトもしくはせっこうの脱水が発生していると想定される。 $450^\circ\text{C}$  付近では、全ての試験体で大きな吸熱反応が生じるとともに、重量減少率の勾配も急になった。これは、セメント水和物中の水酸化カルシウムが以下の式に従って熱分解するためである。なお、重量減少測定実験では、水酸化カルシウムの分解は約  $500^\circ\text{C}$  で生じた。



$600^\circ\text{C}$  から  $700^\circ\text{C}$  にかけても吸熱反応がみられ、重量減少率の勾配もやや急になった。これは、セメント水和物中の炭酸カルシウムが以下の式に従って分解するためと考えられる。



なお、本実験装置では、熱的に安定した基準物質（酸化アルミニウム）を加熱した際に得られる吸発熱変化（ベースライン）が約  $500^\circ\text{C}$  を頂点とした放物線となる（図 2.11 参照）。各試料の吸発熱変化が約  $500^\circ\text{C}$  を境に吸熱から発熱に転じるのは、ベースラインに影響されているためと想定される。

以上より、本研究に用いる試験体では、温度上昇に伴いセメント水和物の反応が生じることが確認できたが、重量減少測定実験とは反応が生じる温度が異なることも明らかになった。

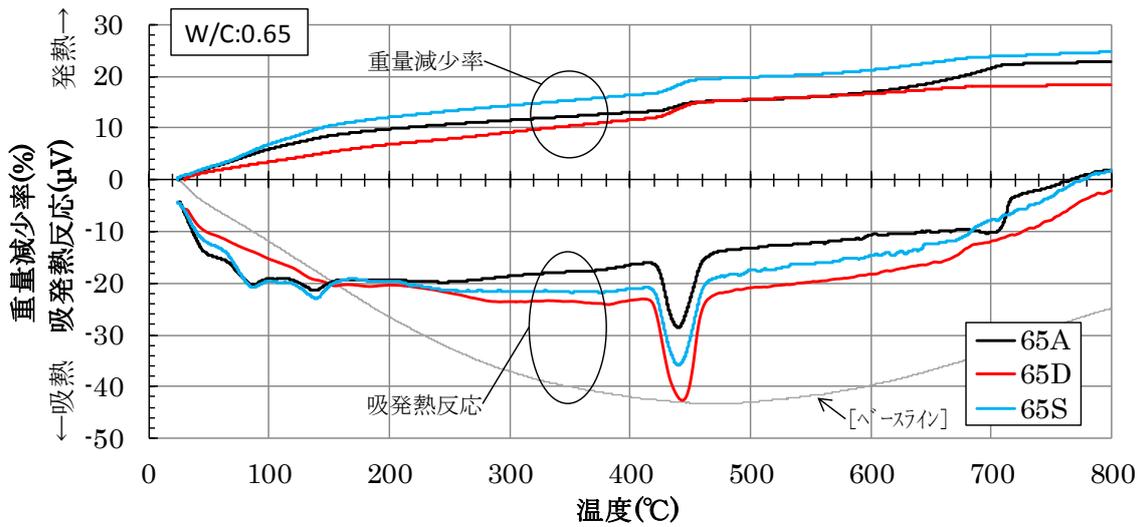
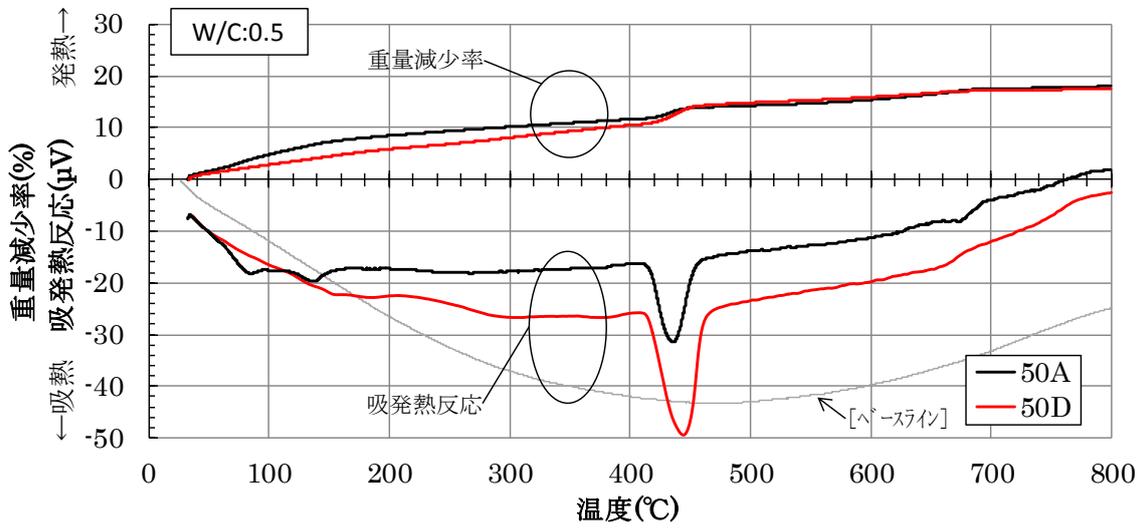
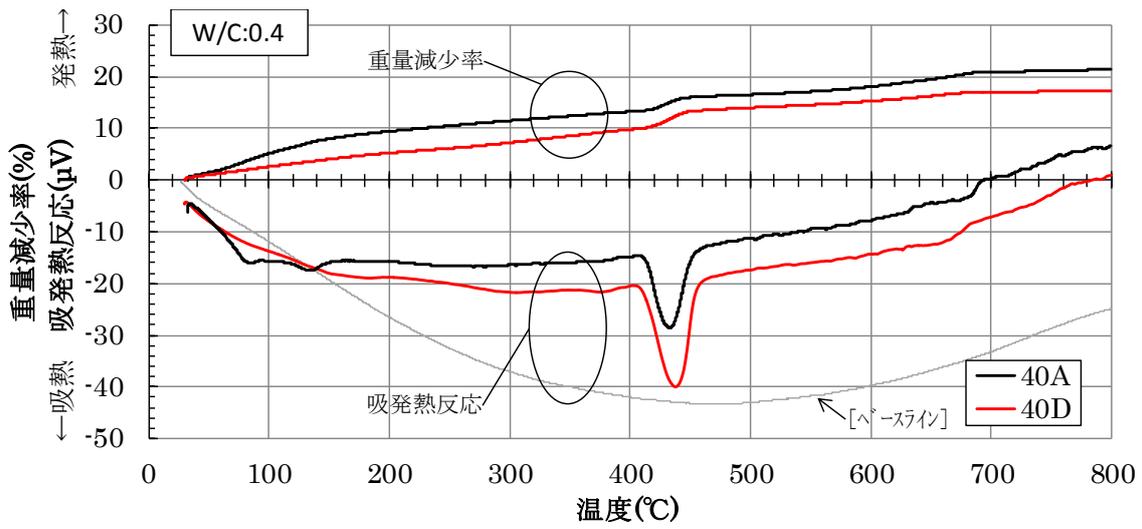


図 2.12 熱分析実験の結果

## 2.9 まとめ

本章では、本研究で使用した試験体の調合、作成方法、養生方法、常温時における力学的特性および800℃までの加熱による重量減少について述べた。

- ・本研究では、コンクリート中の水分が載荷時熱ひずみに及ぼす影響を検討するため、コンクリートの養生条件（気乾養生，絶乾養生，封かん養生）および水セメント比（40%，50%，65%）を主な実験条件とした。
- ・実験結果への水セメント比による影響を明確にするため，単位水量を一定にした調合とした。また，実験結果を比較する際に，粗骨材による影響を排除するため，粗骨材のかさ容積を一定にした調合とした。
- ・半年間の養生を行うことにより，実験開始前にコンクリートの水和反応はほぼ平衡状態となり，実験期間中における力学的特性の変動も見られなかった。
- ・設定した養生方法により，一般的な含水率（2～3%）を有する気乾試験体，蒸発性水分をほぼ含まない絶乾試験体，および気乾試験体よりも高い含水率（6%）の状態での養生された封かん試験体を用意することができた。
- ・試験体を全ひずみ実験と同じ加熱速度（1.5℃/分）で800℃まで加熱しながら試験体重量の測定を行った（重量減少測定実験）。その結果，重量減少率に及ぼす水分の蒸発による影響は100℃～200℃，セメント水和物の脱水による影響は250℃～500℃にかけて表れることが分かった。また，脱水による重量減少は，試験体が含有するセメント水和物の量に依存することを明らかにした。
- ・試験体から採取した試料を用いた熱分析実験の実施により，温度上昇に伴いセメント水和物の反応が生じることが確認できたが，重量減少測定実験とは反応が生じる温度が異なることも明らかになった。

## 第2章の参考文献

- 1) A. M. Neville: *Properties of Concrete*, Person Education Limited, 2002
- 2) 田代忠一: セメント硬化体中の水分, *コンクリート工学*, Vol.32, No.9, 1994.9
- 3) 紺谷修, 石澤昭浩, 浅野研一, 高田敏也: コンクリートの化学的結合水の計測方法に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.29, No.1, pp.693- 698, 2007
- 4) 右田周平, 平島岳夫, 前田孝一: 高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維および水分の影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1126-1131, 2012
- 5) 山下平祐, 平島岳夫, 吉田徹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 4.コンクリートの高温時全体ひずみに与える水分の影響-, *日本建築学会構造工学論文集*, Vol.61B, pp.1-7, 2015
- 6) 長尾覚博, 中根淳: コンクリート構造部材の含水率測定結果, *日本建築学会大会学術講演梗概集 A*, pp.225-226, 1994.7
- 7) 丹羽博則, 長尾覚博, 江戸宏彰, 上杉英樹, 齋藤光: 20°C~600°Cまでの高温載荷加熱を受けるコンクリートのひずみ挙動, *日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2*, pp.249-250, 1999.9
- 8) 豊田康二, 山下平祐, 篠原幸一, 常世田昌寿, 平島岳夫, 前田孝一, 上杉英樹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究 : その 2. 一定応力下において温度変化を伴う高温圧縮実験, *構造工学論文集. B 50B*, pp.9-14, 2004
- 9) 道越真太郎, 小林裕, 黒岩秀介: 圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動, *日本建築学会構造系論文集*, 第 621 号, pp.169-174, 2007.11
- 10) 崔景喆, 金圭庸, 崔亨吉, 金武漢: 超高強度コンクリートの高温ひずみ特性を考慮した提案式の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.991-996, 2015
- 11) 日本建築学会 編: *建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事* 2015, p.242, 2015
- 12) Anderberg Y. and Thelendersson S.: *Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature 2.Experimental Investigation and Material Behaviour Model*, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 13) Gavriel A. Koury, Brian N. Grainger, Patrick J.E. Sullivan: *Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents*, *Magazine of Concrete Research*, Vol.37, No.132, pp.131-144, 1985.9
- 14) Jean-Christophe Mindeguia, Izabela Hager, Pierre Pimienta, Helene Carre, Christian La Borderie: *Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete*, *Cement and Concrete Research*, pp.40-52, 2013

- 15) U. シュナイダー著, 森永繁, 山崎庸行, 林章二訳: コンクリートの熱的性質, 技報堂, 1983.12
- 16) G.F.Peng, S.Y.N.Chan, M.Anson: Chemical kinetics of C-S-H decomposition in hardened cement paste subjected to elevated temperatures up to 800°C, Advances in Cement Research, pp.47-52, 2001

第3章 応力-ひずみ関係に及ぼす水分の影響	
3.1 はじめに	・ ・ ・ ・ ・ 35
3.2 実験条件	・ ・ ・ ・ ・ 37
3.3 実験装置	・ ・ ・ ・ ・ 37
3.4 実験方法	・ ・ ・ ・ ・ 40
3.5 応力-ひずみ関係	・ ・ ・ ・ ・ 41
3.6 圧縮強度	・ ・ ・ ・ ・ 46
3.6.1 養生条件の影響	
3.6.2 水セメント比の影響	
3.7 弾性係数および圧縮強度時ひずみ	・ ・ ・ ・ ・ 49
3.8 まとめ	・ ・ ・ ・ ・ 50
第3章の参考文献	・ ・ ・ ・ ・ 51

### 3.1 はじめに

本章では、本研究で使用する試験体の高温時における応力-ひずみ関係を把握するために実施した定常温度圧縮実験の結果を示し、圧縮強度や弾性係数、圧縮強度時ひずみに及ぼす水分の影響について検討する。

コンクリートの高温時における応力-ひずみ関係（以下、高温時力学的特性とする）の把握を目的とした、高温圧縮実験を伴う研究は国内外で数多く行われてきた<sup>1)・2)</sup>。これら既往の研究において、載荷時熱ひずみと同様、高温時力学的特性に対してもコンクリート中の水分が影響を及ぼすことが指摘されている。表 3.1 に、国内におけるコンクリートの高温時圧縮強度実験に関する既往の研究を示す。多くの研究で水セメント比を複数設定した実験が行われ、その影響が検討されている。ただし、水セメント比による影響を検討した研究の多くは、載荷時熱ひずみに関する研究と同様、高強度コンクリートを対象としており、水セメント比が 40%以上のコンクリートの高温時力学的特性について検討した研究は、古村<sup>1)</sup>・安部ら<sup>2)</sup>・一瀬ら<sup>6)</sup>の研究に限られる。古村<sup>1)</sup>の研究では幅広い範囲の水セメント比について検討されているが、使用している粗骨材（川砂利と軽量骨材）は近年利用されていない。また、安部ら<sup>2)</sup>はコンクリートの水セメント比が小さいほど高温時強度残存率が小さいと報告しているのに対し、一瀬ら<sup>6)</sup>は水セメント比が小さいほど高温時強度残存率が概ね大きくなることを報告しており、水セメント比の影響に関する見解は一致していない。このような背景から、データの蓄積は未だ必要である。蒸発性水分の影響に関しては、気乾状態の試験体と蒸発性水分を含まない試験体（105℃で事前乾燥した試験体）では 100℃における強度残存率が大きく異なることを、右田ら<sup>14)</sup>が報告している。しかし、水セメント比 32.6%の高強度コンクリートに限られた報告となっており、より広範囲の水セメント比についても検討する必要がある。また、コンクリートが封かん状態で養生されることにより生じる高温時力学的特性への影響について検討した研究は見当たらない。

以上のように、コンクリートの高温時力学的特性に及ぼす水分の影響に関する知見については、未だ十分に蓄積されているとはいえない。本実験の実施は、これらの不足している知見の蓄積にもつながるものである。

表 3.1 国内における高温時力学的特性に関する研究内容

文献	粗骨材の種類	水セメント比 (W/C) 水結合材比 (W/B)	試験体の主な養生条件
1)	川砂利, 軽量骨材	40, 45, 65, 70	気中養生
2)	砂岩	32, 41, 58	気中養生
3)	砂岩	30	封かん養生
4)	砂岩	34, 63	現場封かん養生
5)	石灰岩	57	気中養生
6)	砂岩	20, 25, 30, 40, 50	封かん養生
7)	砂岩	18, 24, 35	気中養生
8)	砂岩+角礫岩	37	気中養生
9)	豆砂利	22, 26, 28, 34, 36	封かん養生(12ヶ月)→気中養生
10)	砂岩	58	気中養生
11)	安山岩	22.5, 30, 50	簡易断熱養生
12)	砂岩	37	気中養生
13)	安山岩	23	気中養生
14)	砂岩	32.6	気中養生, 事前乾燥
15)	砂岩+石灰岩	54	封かん養生

### 3.2 実験条件

表 3.2 に実験条件を示す。実験温度は 100℃から 800℃まで 100℃毎に設定し、常温での実験も実施した。実験を行う試験体数は、実験条件ごとに、常温実験は 5 体、高温実験は 1 体、合計 91 体とした。

表 3.2 実験条件

水セメント比	養生条件(試験体名)	設定温度(試験体数)
65%	気中養生(65A)	常温(5 体)
	事前乾燥(65D)	
	封かん養生(65S)	
50%	気中養生(50A)	100℃, 200℃
	事前乾燥(50D)	300℃, 400℃
40%	気中養生(40A)	500℃, 600℃
	事前乾燥(40D)	700℃, 800℃

(各 1 体)

### 3.3 実験装置

実験に使用した実験装置を図 3.1～図 3.3 に示す。本実験装置は、既往の研究<sup>5),7),8),14),23)</sup>で使用されたものと同じ装置であり、試験体への加熱、载荷および試験体の軸方向変形量の測定を同時に行うことができる。試験体の加熱に用いる電気炉の内部には、試験体の上下面が接する加圧鋼材を加熱できるように、カンダル線から成るヒーターが上下に分けて配置されている。これにより、炉内に設置された試験体はカンダル線からの放射熱によって直接加熱されるのではなく、加圧鋼材からの熱伝導により加熱されるため、試験体の表層部と中心部の温度差を小さくすることができる<sup>23)</sup>。試験体の温度制御は、試験体表面に取付けた熱電対の測定温度が設定温度になるようにヒーターの出力を自動制御することで行われる。試験体の表面温度を安定させるため、試験体には厚さ 12.5mm のセラミックファイバブランケットを巻き付けた。試験体への加力は、下側加圧鋼材に載せた試験体を油圧ジャッキで押し上げ、上側加圧鋼材ごと反力フレームに押し当てることで行う。試験体へ偏心荷重がかかることを避けるため、上側加圧鋼材上部には球座を設け、さらにその上に荷重測定用のロードセルを設置している。実験前には、試験体にひずみゲージ（東京測器研究所製,PL-60-115L）を貼り、2tf 程度の加力を行ったうえで、各ひずみゲージの出力値の差が 10 $\mu$  以下になるように球座とロードセルの位置を調整した。また、試験体の上下には変位計が 2 台設置されている。変位計を高温の試験体に直接当てることはできないため、石英管を介して試験体上下面の軸方向相対変位を測定する。石英管の線膨張係数(0.5 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )はコンクリートに比べて十分小さいため、石英管の熱膨張の影響は無視した。変位計やロードセルは扇風機で冷却しながら実験を行うことで、電気炉から漏れる熱が測定値に影響を与えないようにした。

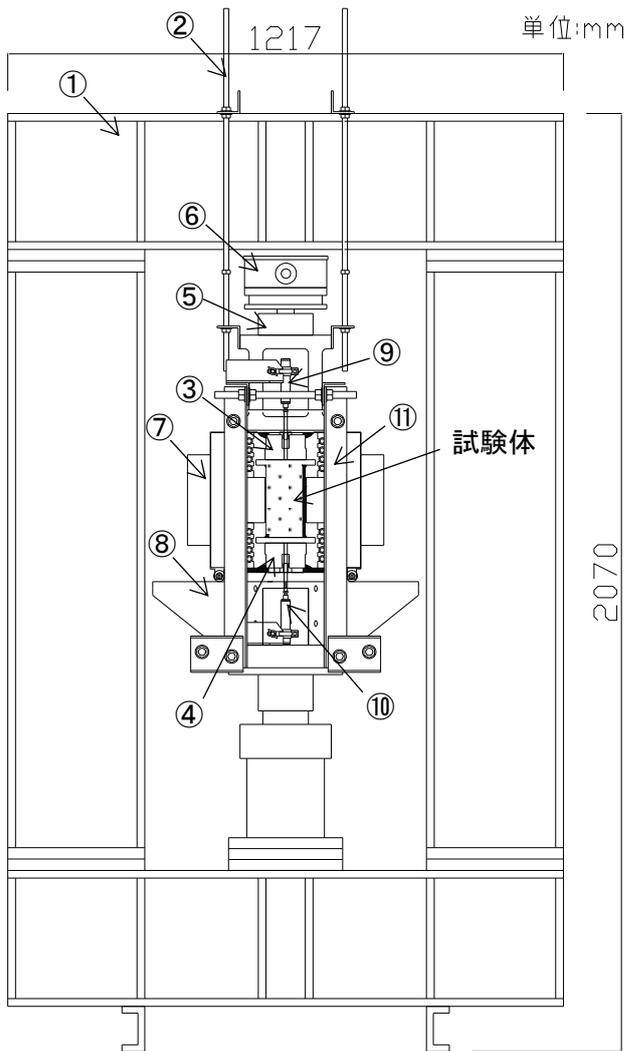


図 3.1  
実験装置外観図(電気炉部は断面図)

①	反力フレーム
②	上側加圧鋼材吊り下げ用棒鋼
③	加圧鋼材(上下に各 1)
④	油圧ジャッキ(RIKEN 製, 容量 1000kN)
⑤	球座
⑥	ロードセル(東京測器研究所製(CLF-100S-D), 容量 1MN, 定格出力 $4080 \times 10^{-6}$ ひずみ)
⑦	電気炉
⑧	電気炉開閉用レール(下側加圧鋼材に固定)
⑨	上側変位計(東京測器研究所製(CDP-5), 容量 5mm, 定格出力 $10000 \times 10^{-6}$ ひずみ)
⑩	下側変位計(東京測器研究所製(CDP-10), 容量 10mm, 定格出力 $10000 \times 10^{-6}$ ひずみ)
⑪	変位計固定用フレーム(上側加圧鋼材に固定)

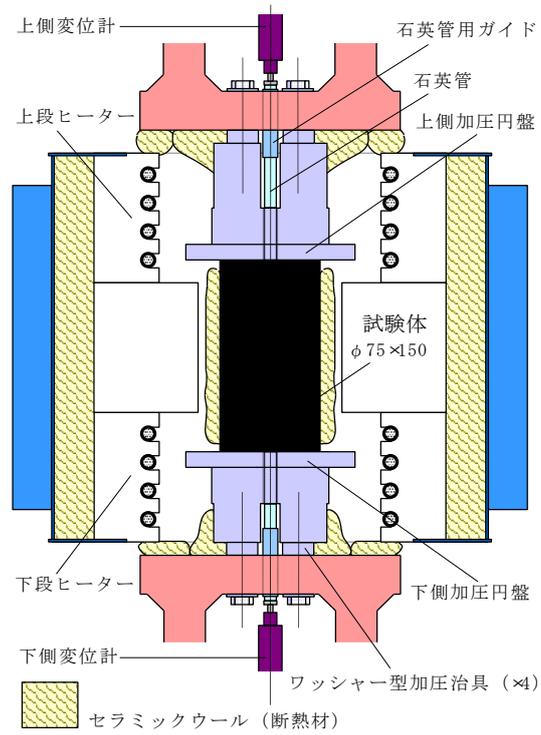


図 3.2 電気炉周辺の詳細図



図 3.3 実験装置の写真

### 3.4 実験方法

実験中の試験体温度を測定するため、試験体の表面から深さ 6mm の位置に K 熱電対を 6 点埋め込んだ。測定位置を図 3.4 に示す。なお、常温での既往実験において熱電対の有無による試験体強度への影響は確認されなかったことから、熱電対を埋め込むことによる実験結果への影響は無視した。加熱中の試験体温度の制御は図 3.4 の測定位置①と②で行い、記録は③～⑥で行った。試験体の加熱速度は全ひずみ実験と同じ 1.5°C/分とし、制御温度が設定温度に到達した後、試験体温度（測定位置③～⑥）の平均が設定温度に近づくように電気炉の出力の調整を 90 分間行った。試験体の加熱および温度調整は無荷重の状態で行った。90 分間の温度調整後、9.8kN/分の速度で荷重を行い、試験体が破壊するまで荷重荷重と試験体の上・下端部間の軸方向相対変位を測定した。各実験で測定した試験体温度の平均と時間の関係を図 3.5 に示す。荷重開始時における試験体温度の平均は概ね設定温度であり、軸方向（上下端と中間高さ）の温度差は、最大で 18°C、平均で 7°C であった。

また、実験時の試験体重量減少の傾向を把握するため、‘実験前’および‘実験終了後に炉内で自然冷却した後’の試験体重量を測定した。以下、式(2)で算出した値を実験時の重量変化率とする。

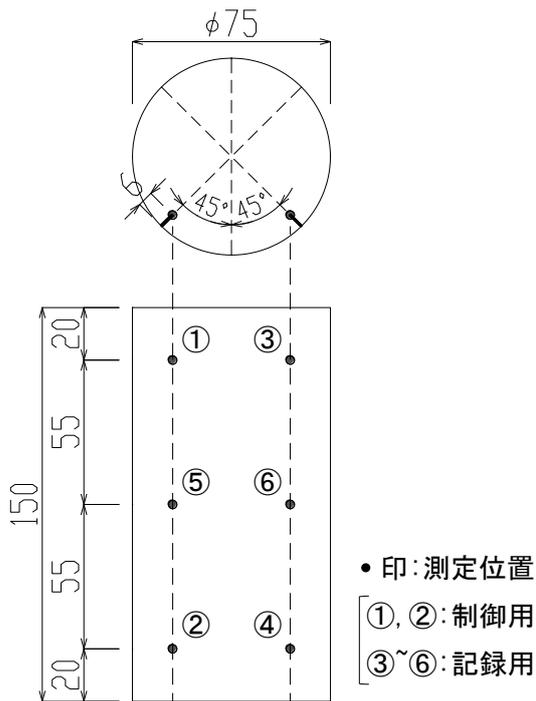


図 3.4 試験体温度測定位置

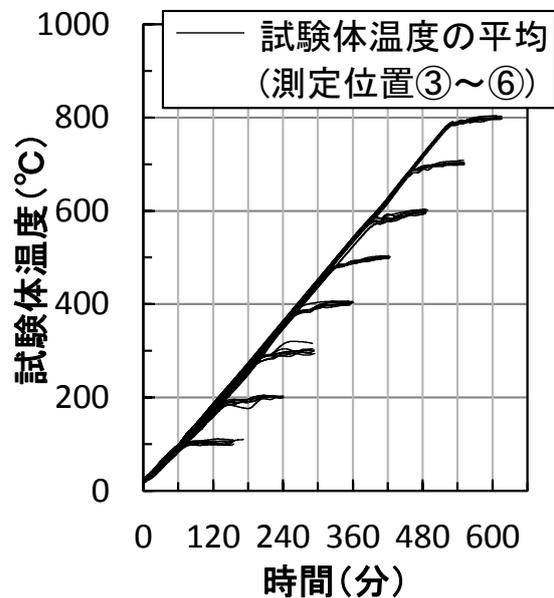


図 3.5 試験体温度測定結果

### 3.5 応力-ひずみ関係

図 3.6(1)~(4)に実験から得られた常温時および高温時の応力-ひずみ曲線を示す。水セメント比 40%の試験体では、設定温度常温~400℃の実験で破壊時に大きな破裂音を伴った。応力-ひずみ曲線も直線的な勾配を保ったまま破壊に至る実験が多かった。一方、水セメント比が 50%、65%の試験体は、圧縮強度到達時に破壊せず、ひずみの増加に伴う強度の低下を計測できた実験が多かった。圧縮強度到達時に試験体が破壊する理由は載荷フレームの剛性が比較的小さいためである。しかし、水セメント比が大きいコンクリートのように圧縮強度到達後の応力低下勾配が緩やかである場合は、強度の低下を計測できたと考えられる。設定温度が 500℃以上になると、全ての実験において加力時に試験体から亀裂音が発生し、応力-ひずみ曲線は全体的に緩やかな勾配を描いた。表 3.3 に、これらの応力-ひずみ曲線から得た各試験体の圧縮強度、弾性係数および圧縮強度時ひずみを示す。以降では、これらの高温時力学的特性に及ぼす水分の影響について考察する。

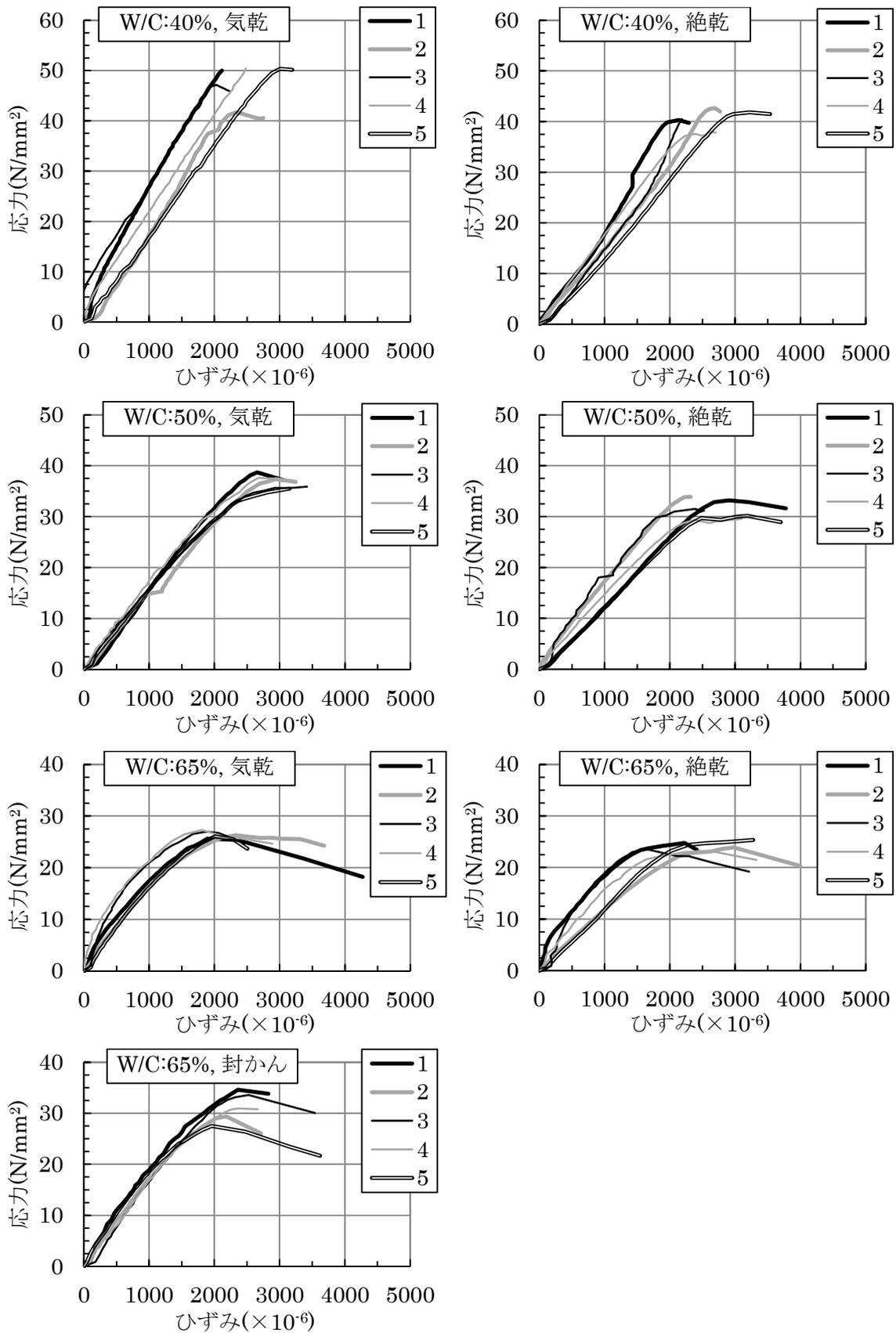


図 3.6 (1) 応力-ひずみ曲線 (常温)

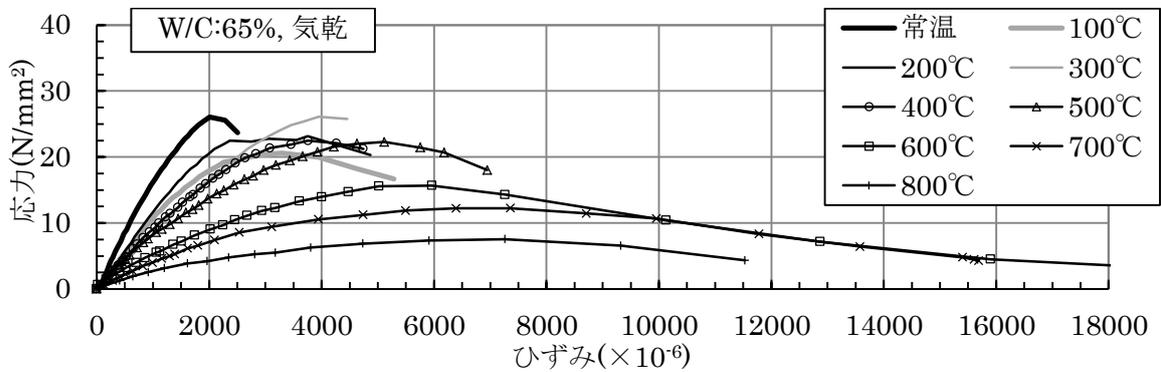
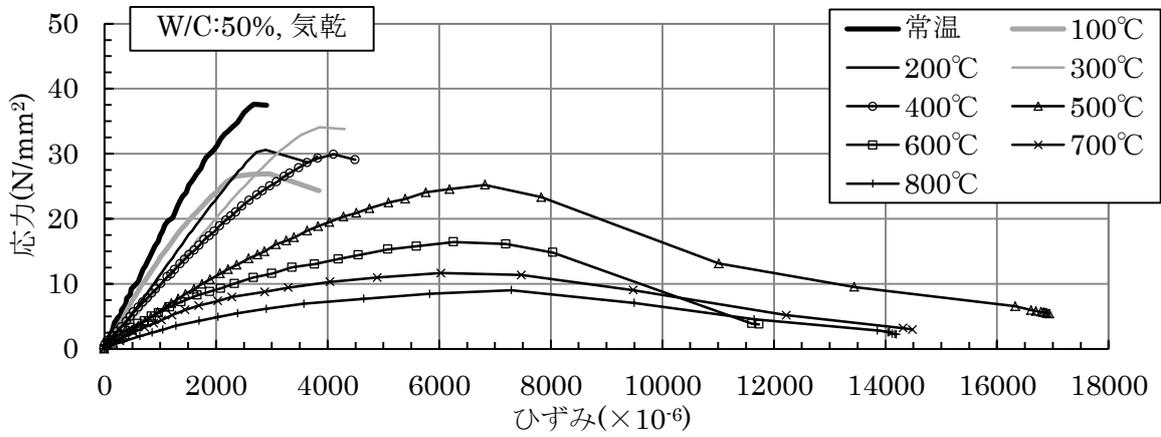
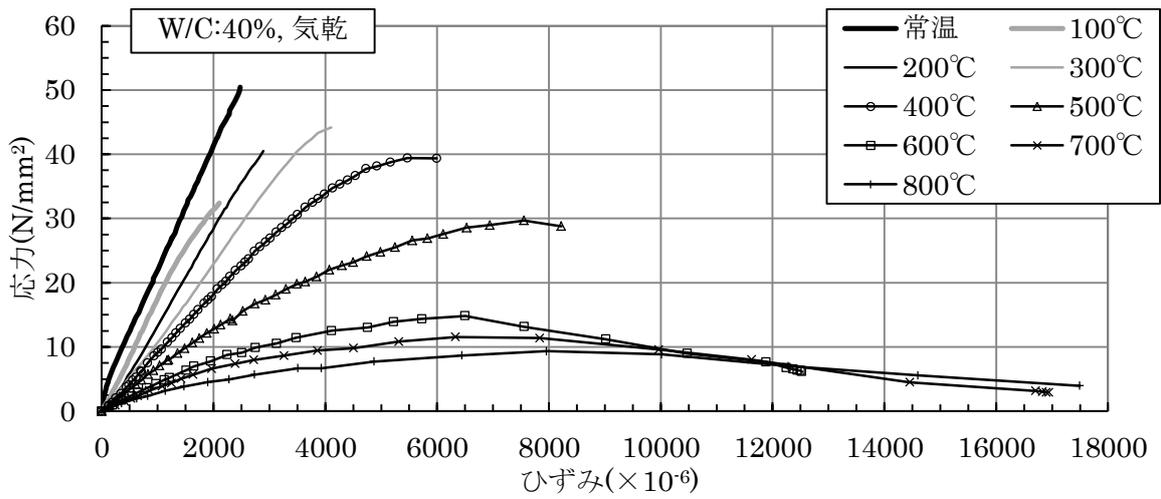


図 3.6(2) 応力-ひずみ曲線 (常温~800°C, 気乾試験体)

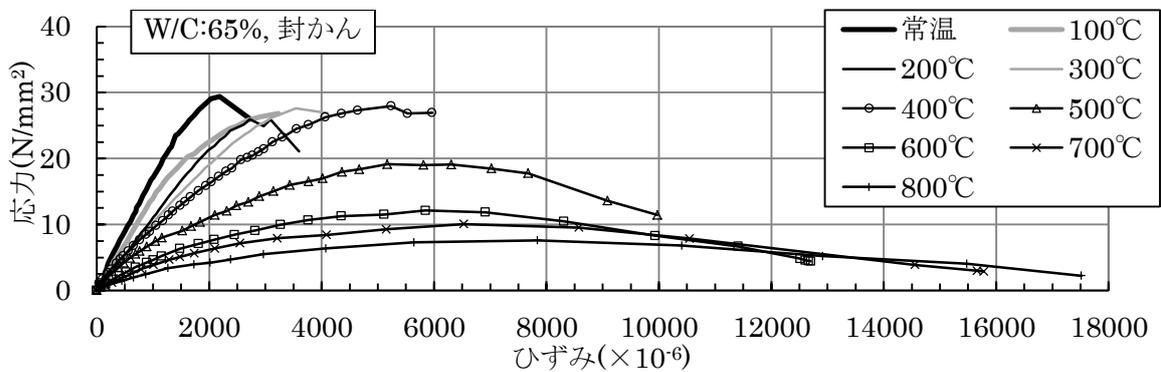


図 3.6(3) 応力-ひずみ曲線 (常温~800°C, 封かん試験体)

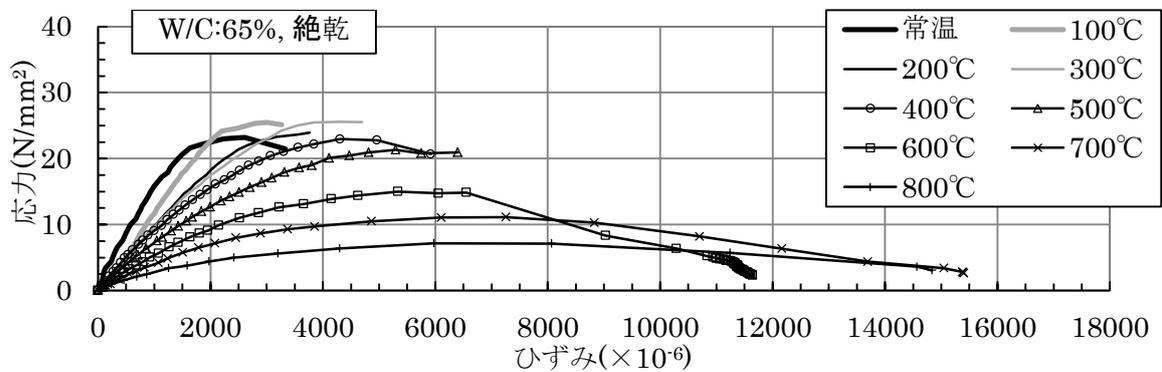
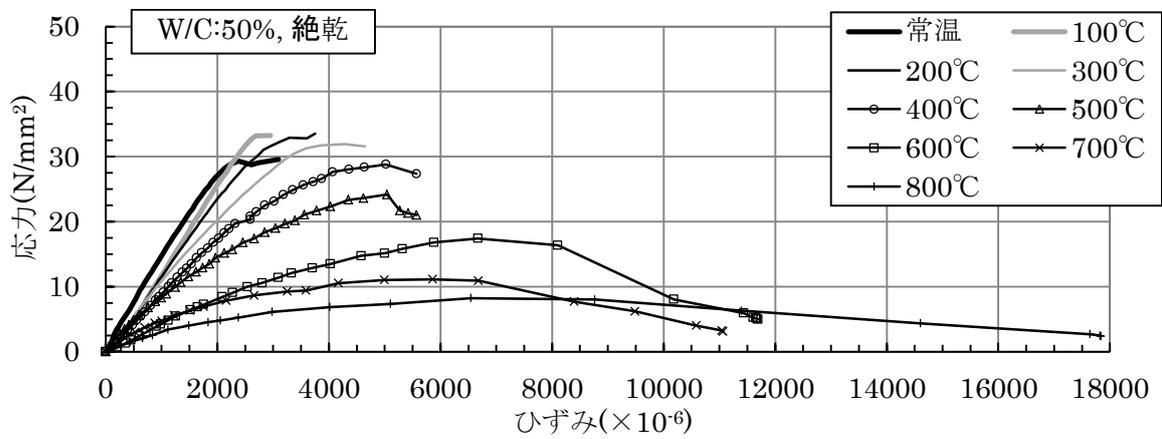
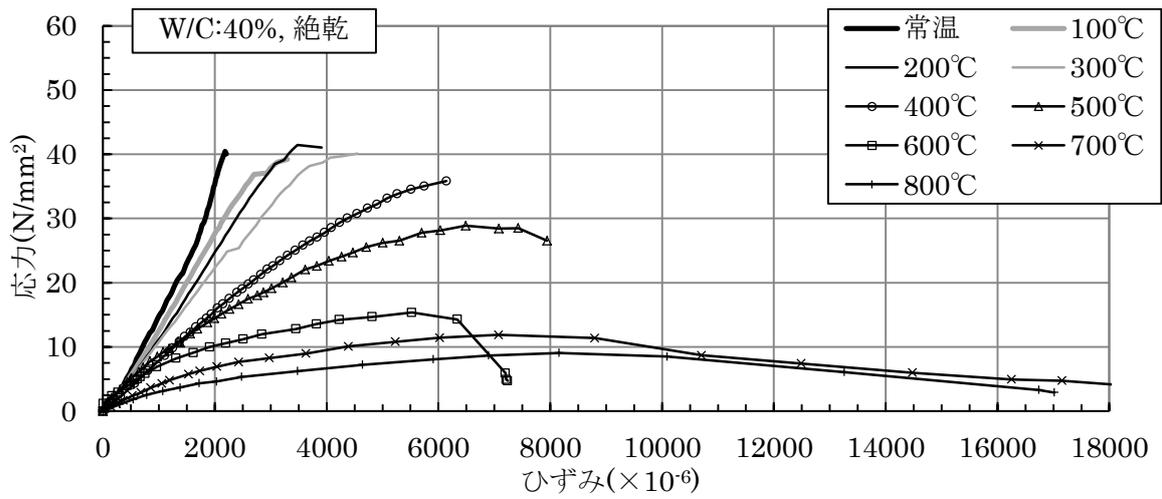


図 3.6(4) 応力-ひずみ曲線(常温~800°C, 絶乾試験体)

表 3.3 圧縮強度，弾性係数および圧縮強度時ひずみ

	温度 (°C)	W/C : 40%		W/C : 50%		W/C : 65%		
		気乾	絶乾	気乾	絶乾	気乾	絶乾	封かん
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	常温	50.0	40.3	(38.7)	33.2	(25.6)	24.8	(34.6)
		(41.7)	(42.7)	37.4	(33.9)	26.3	23.9	29.4
		47.1	40.5	35.9	31.5	27.0	23.6	33.6
		(50.5)	(38.0)	37.6	(29.5)	(27.3)	(23.2)	30.9
		50.4	41.8	(35.5)	30.1	26.1	(25.3)	(27.5)
	平均*	49.2	40.9	37.0	31.6	26.5	24.1	31.3
	100	32.4	39.2	26.9	33.3	20.6	25.5	26.8
	200	40.5	41.5	30.6	33.5	23.2	23.9	26.0
	300	44.2	40.1	34.1	31.9	26.1	25.6	27.6
	400	39.4	35.8	29.9	28.8	22.5	22.9	28.0
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	常温	(29.9)	16.3	(18.1)	(12.7)	20.6	25.8	(22.8)
		19.5	14.7	16.9	17.2	(16.4)	(11.4)	17.6
		24.6	16.9	(15.5)	(20.5)	(38.7)	(28.4)	19.8
		20.6	(18.9)	16.9	14.2	33.9	13.8	(15.4)
		(16.8)	(13.7)	15.9	12.8	17.8	11.7	19.0
	平均*	20.0	15.9	16.6	14.8	19.2	17.1	18.8
	100	18.0	13.8	15.3	13.3	11.1	13.8	14.1
	200	14.5	12.0	11.4	13.3	12.2	10.2	11.6
	300	11.1	11.2	10.3	11.1	8.9	10.3	10.7
	400	9.6	8.0	9.3	9.2	8.1	8.9	8.4
圧縮強度 時ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	常温	2113.3	(2132.8)	(2653.0)	2906.1	1890.8	2223.3	2361.9
		2339.8	2690.8	2941.6	(2319.2)	(2325.3)	2980.0	2184.2
		(2026.8)	2182.1	(3420.4)	2390.7	1870.8	(1626.5)	(2521.8)
		2479.9	2617.6	2676.7	3098.1	(1808.2)	2611.1	2355.9
		(3010.0)	(3221.6)	3148.6	(3701.0)	2006.6	(3277.8)	(1961.4)
	平均*	2311.0	2496.8	2922.3	2798.3	1922.7	2604.8	2300.7
	100	2105.4	3297.7	2959.3	2954.5	3297.7	3002.7	3233.3
	200	2890.0	3480.7	2887.6	3751.7	3753.3	3766.7	2726.1
	300	4103.0	4549.1	3856.8	4278.1	3944.9	4303.3	3542.2
	400	5469.8	6143.2	4110.1	5023.6	3760.0	4306.2	5237.5
500	7555.3	6488.7	6822.4	5043.3	5116.4	5294.1	5169.9	
600	6503.3	5523.3	6259.2	6670.0	5963.3	5336.7	5849.0	
700	6330.5	7074.1	6032.0	5860.0	7357.4	7255.5	6528.5	
800	7957.3	8159.7	6528.5	6545.4	6528.5	5973.5	7843.3	

\*常温の平均は，最大・最小値(括弧つき)と測定不良値(灰色)を除いて算出した。

## 3.6 圧縮強度

### 3.6.1 養生条件の影響

圧縮強度の測定結果を図 3.7 に示す。常温時圧縮強度は 5 体の結果から最大・最小値を除いたデータの平均値である。100℃において、気乾試験体（65A, 50A, 40A）の圧縮強度は低下し、常温時からの変化が小さい絶乾試験体（65D, 50D, 40D）の圧縮強度を下回った。この挙動は、右田ら<sup>14)</sup>の研究（水セメント比:32.6%, 粗骨材: 硬質砂岩）でも報告されている。また、封かん試験体（65S）の圧縮強度も 100℃で低下した。200℃と 300℃において、気乾試験体の圧縮強度は大きく回復する一方、絶乾試験体と封かん試験体の圧縮強度は殆ど変化しなかった。400℃になると気乾試験体と絶乾試験体の強度差は小さくなり、700℃で全ての試験体の圧縮強度はほぼ同じになった。

図 3.8 に実験時の重量減少率（実験前の重量に対する重量減少の割合）と温度の関係および各試験体の含水率を示す。100℃では、気乾試験体と封かん試験体の重量変化率が含水率に達していないことから、蒸発性水分の蒸発が活発に行われている状態で実験が行われたと推測される。この蒸発によって水分が逸散することでセメント水和物は収縮する一方、骨材は温度上昇に伴い膨張する。そのため、コンクリート内部には自己歪応力が発生し、微細ひび割れが生じると考えられている<sup>1),6)</sup>。これに加えて、蒸発によって水分がセメントゲル内を移動することで、ゲル粒子間表面力が低下するため、気乾試験体と封かん試験体の強度は低下したと考えられる。一方、さらに温度が上昇すると、蒸発性水分の蒸発が落ち着くと共に、試験体から発生する高温蒸気が未水和セメント粒子の水和を促進させる<sup>1),6)</sup>。これにより、気乾試験体の圧縮強度は 200℃と 300℃において大きく回復したと考えられる。封かん試験体の場合、発生する高温蒸気は気乾試験体よりも多いものの、200℃と 300℃で強度の回復は殆ど見られなかった。これは、封かん養生時に水和反応が促進され、強度回復に必要な未水和セメント粒子が気乾試験体よりも少なくなったためと推測される。絶乾試験体の場合、300℃までの重量減少が小さいことから、水分の蒸発による圧縮強度への影響は小さかったと推測される。

水セメント比ごとの常温時圧縮強度に対する高温時圧縮強度の割合（以下、強度残存率が他の試験体よりも大きくなった。また、気乾試験体と封かん試験体を比較すると、封かん試験体の方が強度低下の要因となる蒸発性水分の蒸発は多いにもかかわらず（図 3.8 参照）、強度残存率の低下は小さかった。この結果は予想外であり、この現象の解明は今後の課題である。また、400℃から 500℃にかけて、封かん試験体の強度残存率の低下は気乾試験体よりも顕著であった。封かん試験体は、養生時に水和反応が促進されるため、水酸化カルシウムなどのセメント水和物量が気乾試験体よりも多く、約 450℃で始まる水酸化カルシウムの分解<sup>19)</sup>の影響を受けやすい。このことが、400℃から 500℃にかけて封かん試験体の強度残存率の低下が顕著になった要因と考えられる。

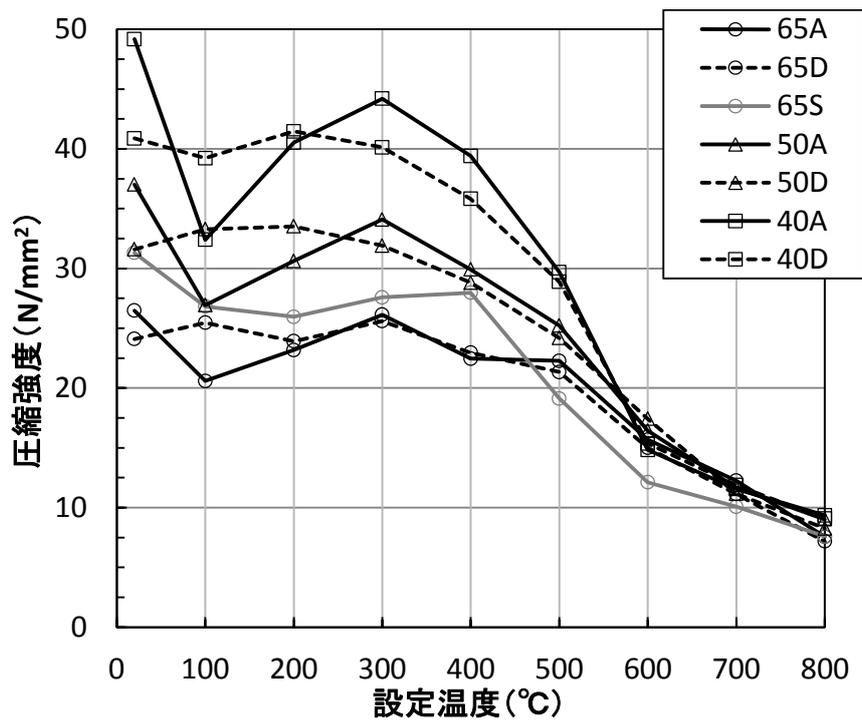


図 3.7 圧縮強度

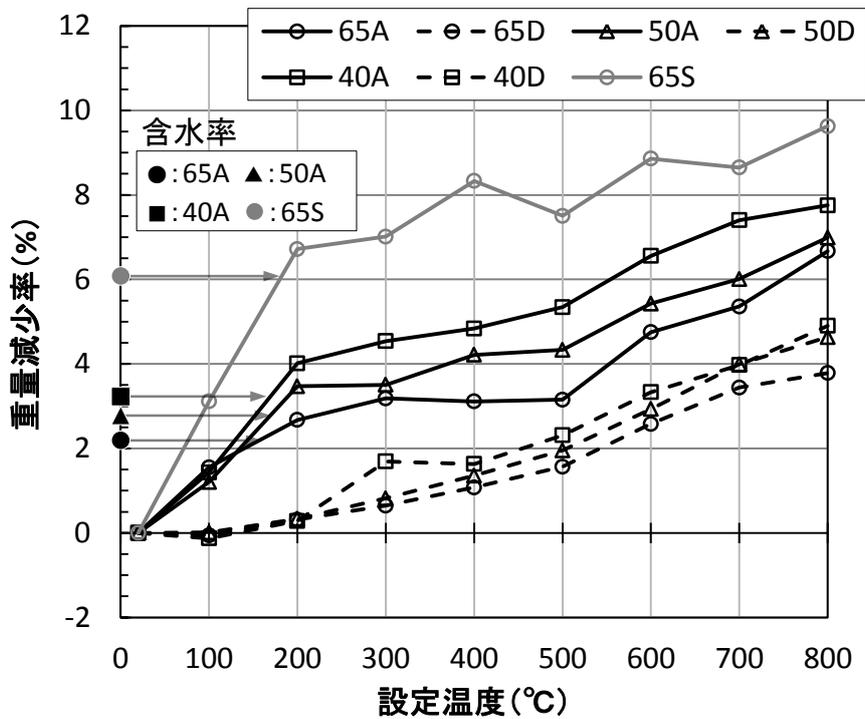


図 3.8 実験時の重量減少率

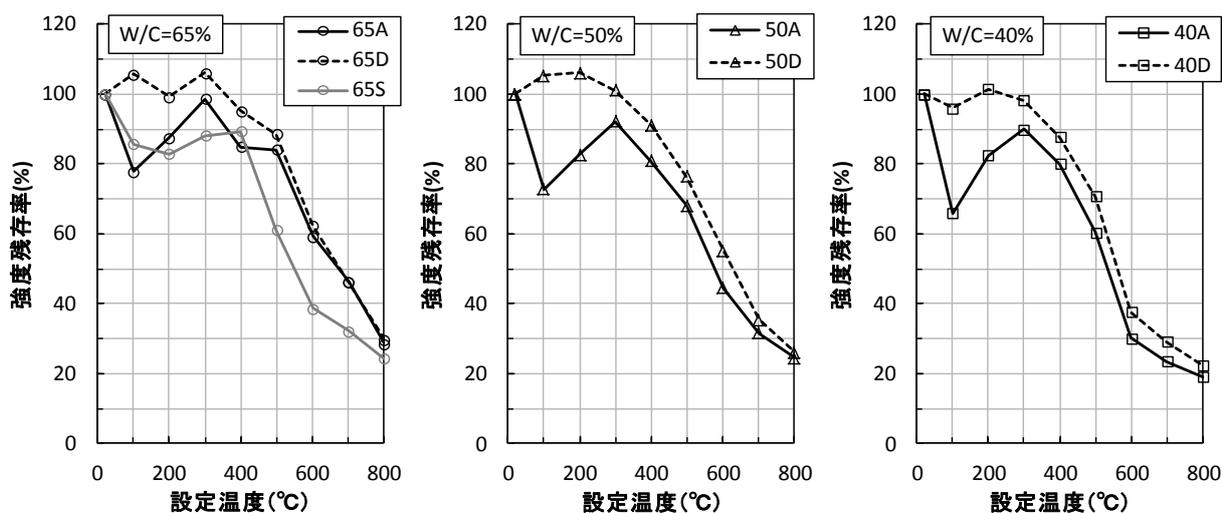


図 3.9 水セメント比ごとの強度残存率

### 3.6.2 水セメント比の影響

図 3.7 に示した気乾試験体の圧縮強度を水セメント比ごとに比較すると、500°Cまでは水セメント比が小さい試験体ほど圧縮強度が大きくなった。一方、600°C以上では水セメント比による影響はほとんど見られなくなり、試験体の圧縮強度は全て同程度となった。また、絶乾試験体も気乾試験体と同様な傾向を示した。

気乾試験体と絶乾試験体の強度残存率を図 3.10 に示す。水セメント比が強度残存率に及ぼす影響は、気乾試験体、絶乾試験体共に 400°Cから 600°Cにかけて顕著に現れ、安部ら<sup>2)</sup>の報告と同様に、水セメント比が小さい試験体ほど強度残存率は小さくなった。これは、水セメント比が小さく、より緻密で多くのセメント水和物を有する試験体ほど、この温度域で発生する水酸化カルシウムやけい酸カルシウム水和物 (C-S-H) といったセメント水和物の分解<sup>19)</sup>の影響を受けやすいためと考えられる。そして、セメント水和物の分解の進行に伴い、コンクリートの圧縮強度を決定するセメント水和物の緻密さが損なわれるため、600°C以上で水セメント比による影響が見られなくなると考えられる。

本研究の強度残存率を、文献 7)で報告した高強度コンクリート(水結合材比:18%, 24%, 35%, 粗骨材:硬質砂岩)の結果と併せて図 3.11 に示す。水セメント比(水結合材比)間の強度残存率の差は、文献 7)よりも本研究の方が大きくなっている。このことから、高温時圧縮強度に及ぼす水セメント比の影響は、水結合材比 35%以下の高強度コンクリートよりも水セメント比 40~65%のコンクリートにおいて顕著に現れることが推測される。水セメント比が 40%未満になると、調合中のセメント量を増やしても未水和セメント粒子が増えるばかりで、セメント水和物量は殆ど変わらない<sup>21)</sup>。そのため、各水セメント比の試験体が含有するセメント水和物量の違いは文献 7)よりも本研究の方が大きくなる。このことが、本研究において水セメント比による影響が顕著に現れた原因と考えられる。

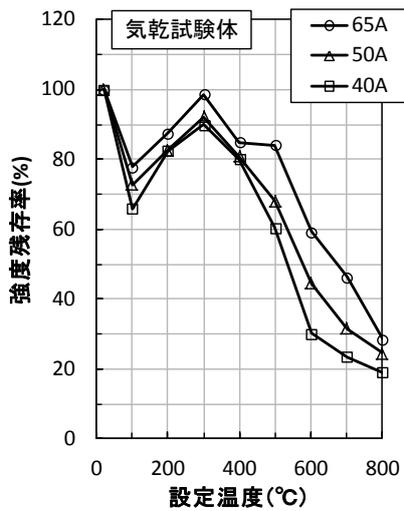


図 3.10 養生条件ごとの強度残存率

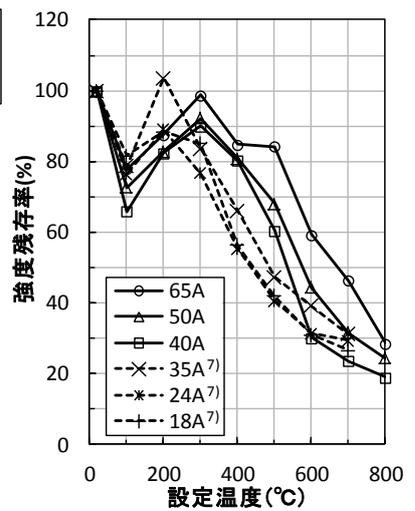
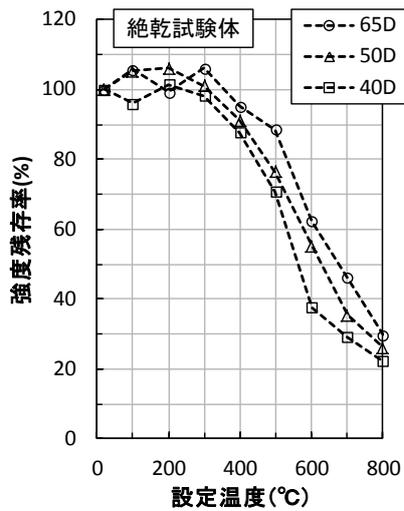


図 3.11 高強度コンクリートとの強度残存率の比較

### 3.7 弾性係数および圧縮強度時ひずみ

弾性係数の測定結果を図 3.12、圧縮強度時ひずみの測定結果を図 3.13 に示す。常温時の弾性係数および圧縮強度時ひずみは 5 体の結果から最大・最小値および測定不良値を除いたデータの平均値である。なお、一部の実験では載荷開始直後の変位測定が安定しなかった。そのため、全ての実験結果について、常温から 600°C までの弾性係数は応力が 3MPa から圧縮強度の 1/3 までの間の割線弾性係数とし、700°C と 800°C の弾性係数は圧縮強度の 1/3 までにおける割線弾性係数とした。

高温実験では変位の測定が比較的難しく、本実験における弾性係数および圧縮強度時ひずみの違いは、試験体間の違いのみならず、実験条件のばらつきが若干含まれる。そのことを考慮しても、図 3.12 と図 3.13 に示すように、養生条件および水セメント比が弾性係数と圧縮強度時ひずみに及ぼす影響は明確には見られなかった。なお、弾性係数が温度上昇に概ね比例して低下する現象、圧縮強度時ひずみが温度上昇に概ね比例して増加する現象は、既往の研究結果と同様であった。

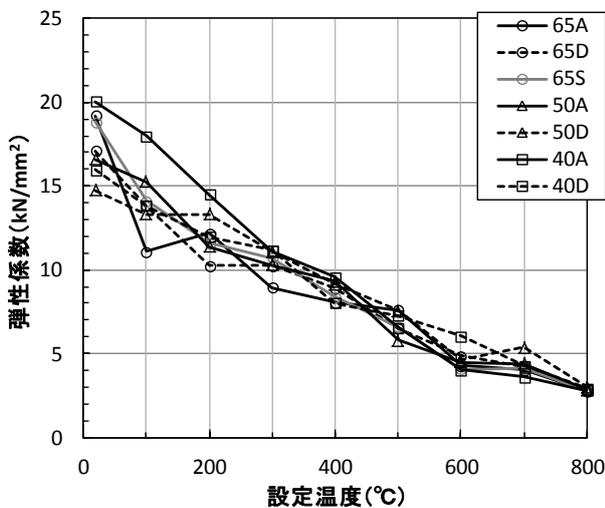


図 3.12 弾性係数

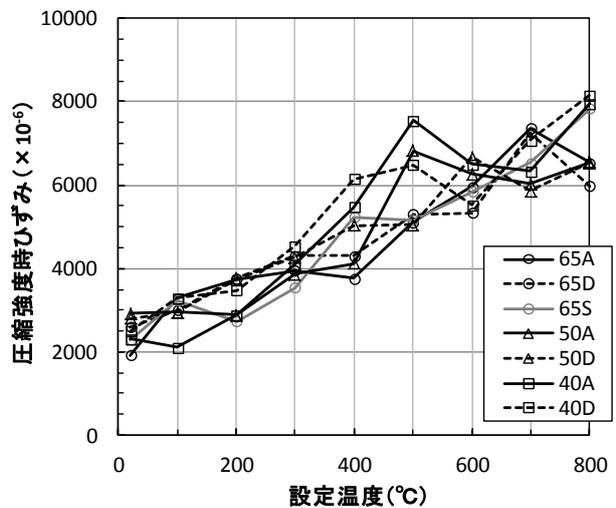


図 3.13 圧縮強度時ひずみ

### 3.8 まとめ

本章では、水セメント比および養生条件が高温時力学的特性に及ぼす影響を定常温度圧縮実験の結果から検討した。実験から得られた知見を以下にまとめる。

- ・蒸発性水分が高温時圧縮強度に及ぼす影響は、300°C以下の温度で明確に現れた。特に100°Cにおいて、気乾試験体の圧縮強度は低下したが、絶乾試験体の圧縮強度は常温時と同程度であった。また、水セメント比65%では封かん試験体の圧縮強度も低下した。
- ・封かん試験体（水セメント比65%）は、400°Cから500°Cにかけての強度低下が顕著であった。
- ・40%～65%の範囲の水セメント比が高温時圧縮強度に及ぼす影響は400°Cから600°Cにかけて顕著に現れ、水セメント比が小さいほど強度残存率が小さくなった。600°C以上の圧縮強度は、水セメント比によらず全て同程度であった。
- ・水結合材比が強度残存率に与える影響は、文献7)の高強度コンクリート（水結合材比18%, 24%, 35%）よりも本研究のコンクリート（水セメント比40%, 50%, 65%）において顕著に表れた。
- ・養生条件あるいは水セメント比が弾性係数と圧縮強度時ひずみに及ぼす明確な影響は見られなかった。

### 第3章の参考文献

- 1) 古村福次郎: 高温におけるコンクリートの力学的性質に関する研究 その2, 日本建築学会論文報告集, 第173号, pp.17-24 1970.7
- 2) 安部武雄, 古村福次郎, 戸祭邦之, 黒羽健嗣, 小久保勲: 高温における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp.163-168, 1999.1
- 3) 一瀬賢一, 長尾覚博, 川口徹: 高温加熱下における高強度コンクリートの力学的性質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.1105-1110, 1999.6
- 4) 丹羽博則, 長尾覚博, 江戸宏彰, 上杉英樹, 齋藤光: 20°C~600°Cまでの高温載荷加熱を受けるコンクリートのひずみ挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.249-250, 1999.9
- 5) 常世田昌寿, 豊田康二, 織茂俊泰, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 松戸正士, 中込昭, 平島岳夫, 上杉英樹: 普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.149-154, 2002.3
- 6) 一瀬賢一, 長尾覚博, 川口徹: 高温加熱状態における高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, pp.23-28, 2002.7
- 7) 豊田康二, 山下平祐, 石田良平, 近藤悟, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 井上超, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究, その1.定常温度下における高温圧縮試験, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.367-374, 2003.3
- 8) 篠原幸一, 山下平祐, 豊田康二, 安部武雄, 平島岳夫, 上杉英樹: 高強度コンクリートの高温下における力学的性質に関する実験的研究-粗骨材寸法の影響-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.173-174, 2003.9
- 9) 宮本圭一, 安部武雄: 高温における高強度コンクリートの力学的特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第574号, pp.227-234, 2003.12.
- 10) 安部武雄, 大塚貴弘, 小林裕, 道越真太郎: 高温における普通強度コンクリートの力学的特性, 日本建築学会構造系論文集, 第615号, pp.7-13, 2007.5
- 11) 道越真太郎, 小林裕, 黒岩秀介: 圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第621号, pp.169-174, 2007.11
- 12) 松戸正士, 西田浩和, 大塚貴弘, 平島岳夫, 安部武雄: 高温加熱時における高強度コンクリートの力学的特性について 高強度コンクリートの耐火性に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第624号, pp.341-347, 2008.2
- 13) 加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰, 黒岩秀介, 陣内浩: 100N/mm<sup>2</sup>級高強度コンクリートの熱間・冷間圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.13-14, 2011.8

- 14) 右田周平, 平島岳夫, 前田孝一: 高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維および水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1126-1131, 2012.1
- 15) 抱憲誓, 西村光太, 宮本圭一, 澤田祥平, 門馬隆弘: 700°Cまでの高温に曝されたコンクリートの力学特性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.101-102, 2013.8
- 16) 日本建築学会 編: 構造材料の耐火性ガイドブック, 丸善, 2009.3
- 17) D. R. Lankard, D. L. Birkimer, F. F. Fondriest, M. J. Snyder: Effects of Moisture Content on the Structural Properties of Portland Cement Concrete Exposed to Temperatures up to 500F, Temperature and Concrete, Paper SP25-3, pp.59-102, 1971
- 18) Anderberg Y. and Thelendersson S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature 2. Experimental Investigation and Material Behaviour Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 19) U. シュナイダー著, 森永繁, 山崎庸行, 林章二訳: コンクリートの熱的性質, 技報堂, 1983.12
- 20) Carlos Castillo, A. J. Durrani: Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, pp.47-53, 1990
- 21) A. M. Neville: Properties of Concrete, Person Education Limited, 2002
- 22) L. T. Phan, N. J. Carino: Code Provision for High Strength Concrete Strength-Temperature Relationship at Elevated Temperatures, Materials and Structures, Vol.36, pp.91-98, 2003.3
- 23) 兼城莉乃, 豊田康二, 平島岳夫: 高強度コンクリートの高温時の力学的特性 その1 加熱速度の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.181-182, 2008.7

第4章 荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響	
4.1 はじめに	・ ・ ・ ・ ・ 54
4.2 全ひずみ実験の概要	・ ・ ・ ・ ・ 55
4.3 全ひずみ・熱膨張ひずみと温度の関係	・ ・ ・ ・ ・ 59
4.4 荷時熱ひずみ	・ ・ ・ ・ ・ 62
4.4.1 養生条件の影響	
4.4.2 水セメント比の影響	
4.4.3 応力レベルの影響	
4.5 荷時熱ひずみと重量減少率の関係	・ ・ ・ ・ ・ 71
4.6 荷時熱ひずみの数式化	・ ・ ・ ・ ・ 74
4.7 まとめ	・ ・ ・ ・ ・ 77
第4章の参考文献	・ ・ ・ ・ ・ 78

#### 4.1 はじめに

本章では、養生条件および水セメント比が異なるコンクリート試験体について、一定圧縮応力下で加熱されるコンクリートの全ひずみを測定する実験（以下、全ひずみ実験とする）を実施し、実験結果から得られる載荷時熱ひずみに及ぼすコンクリート中の水分の影響を検討する。また、第2章で得た試験体の重量減少と載荷時熱ひずみの関係を定量化するとともに、両者の関係の数式化を試みる。

なお、本研究では、Khouryらが提案した載荷時熱ひずみ(LITS)モデル<sup>1)</sup>(表1.3参照)に基づき検討を行う。載荷時熱ひずみモデルが他の過渡ひずみモデルや遷移クリープモデルと異なる点は、応力ひずみと遷移ひずみ(温度が遷移状態にある場合のみに発生するひずみ)を分けずに扱う点である。コンクリート系構造の火災応答解析に用いる場合は、応力ひずみを分けたモデルの方が扱いやすい。一方、全ひずみ実験時のように、加力された状態で加熱された場合に生じる高温時応力ひずみの測定は困難であり、報告されている研究の数も限られているため、全ひずみから応力ひずみを適切に分けることは難しいと考えられる。そのため、本研究では載荷時熱ひずみモデルを採用した。

#### 4.2 全ひずみ実験の概要

表 4.1 に示すように、全ひずみ実験の実験条件は、水セメント比、養生条件、応力レベルとした。載荷応力  $\sigma$  は水セメント比毎に設定し、気乾試験体の常温時圧縮強度  $\sigma_b$  (表 4.1) に応力レベルをかけたものとした。試験体の加熱は、1.5°C/分の速度で 800°C までとした。なお、1.5°C/分の加熱速度は、火災時における鉄筋コンクリート部材のコア部分における昇温速度を想定したものである。IS0834 標準加熱曲線による加熱を受ける鉄筋コンクリート柱の内部温度測定結果<sup>2)</sup>を図 4.1 に示す。図から分かるように、主筋より外側のかぶりコンクリート部分の昇温速度は比較的早く、2°C/分以上であるのに対し、かぶり厚が 60mm 以上確保されている主筋部分の昇温速度は概ね 1°C~2°C/分で変動している。全ひずみ実験は、実験条件毎に 1 体ずつ、計 28 体実施した。

表 4.1 全ひずみ実験の実験条件

W/C	養生条件(試験体名)	応力レベル $\sigma/\sigma_b$	加熱温度・加熱速度
65%	気中養生(65A)	0.1・0.3・0.5・0.7 ----- 常温時圧縮強度 $\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> ): 26.5 (W/C=65%) 37.0 (W/C=50%) 49.2 (W/C=40%)	常温~800°C・ 1.5°C/分
	事前乾燥(65D)		
	封かん養生(65S)		
50%	気中養生(50A)		
	事前乾燥(50D)		
40%	気中養生(40A)		
	事前乾燥(40D)		

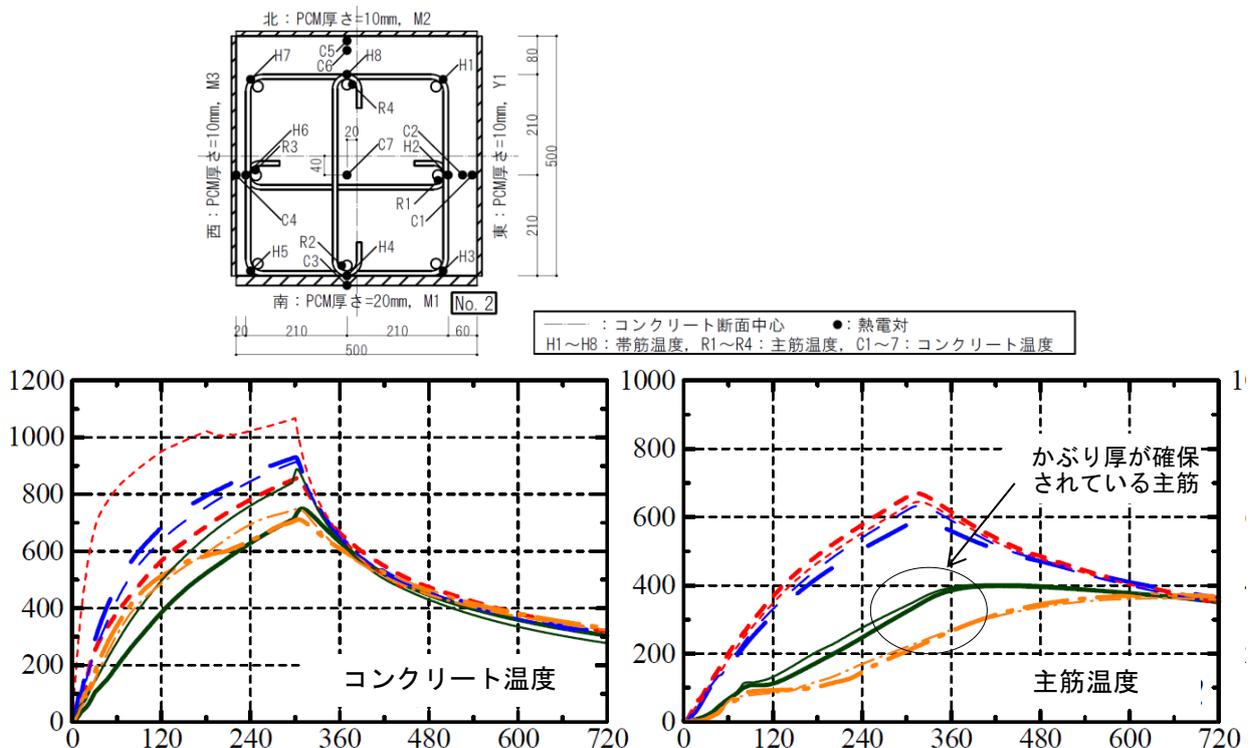


図 4.1 IS0834 標準加熱曲線による加熱を受ける RC 柱の断面内温度測定結果

全ひずみ実験で使用した実験装置は第 3 章の定常温度圧縮実験で使用したものと同じである。全ひずみ実験における試験体内部温度測定位置を図 4.2 に示す。全ひずみ実験では、熱電対の埋め込みが実験結果へ影響しないよう、試験体表面温度（表面から深さ 6mm の位置で測定）のみを測定した。試験体の加熱は、試験体に設定応力レベルに相当する荷重を載荷した直後から開始し、試験体の端部における表面温度（図 4.2 中の  $T_1, T_2$ ）が  $1.5^\circ\text{C}/\text{分}$  で昇温するように電気炉の加熱制御を行った。そして、試験体への載荷荷重を一定に保ったまま、端部における表面温度（図 4.2 中の  $T_3, T_4$ ）の平均が  $800^\circ\text{C}$  に達するか、試験体が破壊するまで加熱を継続し、その間に生じる試験体の上・下端部間の鉛直相対変位を測定した。全ての全ひずみ実験において、端部における表面温度（ $T_3, T_4$ ）の加熱速度は  $1.5^\circ\text{C}/\text{分}$  で概ね制御できた。また、各実験における試験体内部の温度差の最大は  $46^\circ\text{C}\sim 73^\circ\text{C}$  であった。全ひずみ実験時における試験体内部温度の分布状況を確認するため、全ひずみ実験と同じ加熱条件で試験体の加熱を行い、図 4.2 中の  $T_1\sim T_{14}$  の測定を行った。測定は水セメント比 65% の気乾試験体・絶乾試験体・封かん試験体について行った。封かん試験体の半径方向および軸方向における温度分布の測定結果を図 4.3 および図 4.4 にそれぞれ示す。試験体の半径方向においては、表面から中心に向かって温度がやや低くなるが、試験体表面と中心（表面から深さ 37.5mm の位置で測定）の温度差は概ね  $20^\circ\text{C}$  以下で推移し、 $30^\circ\text{C}$  以上になることはなかった（図 4.3）。一方、軸方向においては、中央部は端部より温度が低くなり、その温度差の最大は約  $60^\circ\text{C}$  と大きかった（図 4.4）。本実験装置では、電気炉内で加熱された試験体両端部の加力鋼材からの熱伝導により試験体を加熱するため、軸方向の試験体内部温度差が大きくなる。また、昇温過程では軸方向の温度分布は非線形な関係になるため、端部と中央部の中間の温度（ $T_7, T_8$ ）は中央部の温度（ $T_5, T_6$ ）と同程度になった（図 4.5）。気乾試験体・絶乾試験体でも同様の傾向が見られた。以上の測定結果から、試験体の半径方向の温度分布は一様とみなし、試験体内部温度を代表する「試験体温度」は表面温度の平均値とした。また、軸方向における非線形な温度分布を考慮し、表面温度の平均値は、上端部、下端部および中央部 2 点の測定値から算出した（式 4.1）。

$$T = (T_3 + T_4 + T_5 + T_6) / 4 \quad \dots (4.1)$$

$T$ : 全ひずみ実験での試験体温度 ( $^\circ\text{C}$ ),

$T_3, T_4, T_5, T_6$ : 試験体表面温度 (図 4.2) ( $^\circ\text{C}$ )

図 4.5 に、全ひずみ実験での試験体温度の測定結果を示す。図には、重量減少測定実験での試験体温度の測定結果も併せて示す。全ひずみ実験および重量減少測定実験では、試験体温度と時間の関係に大きな差は見られないことから、両実験において試験体は概ね同様に加熱されたと想定される。

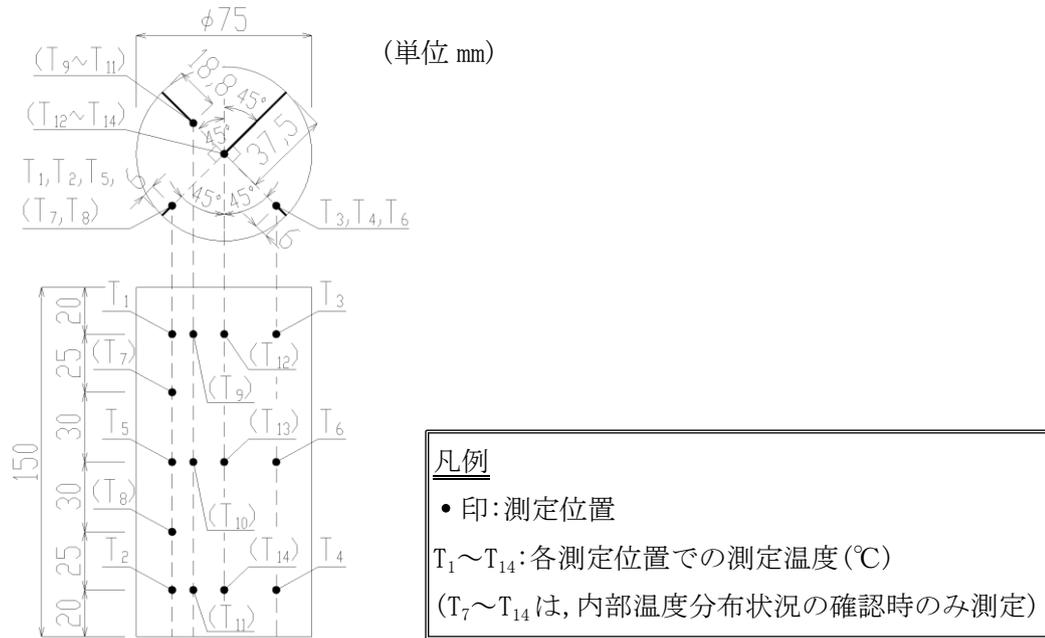


図 4.2 試験体内部温度測定位置

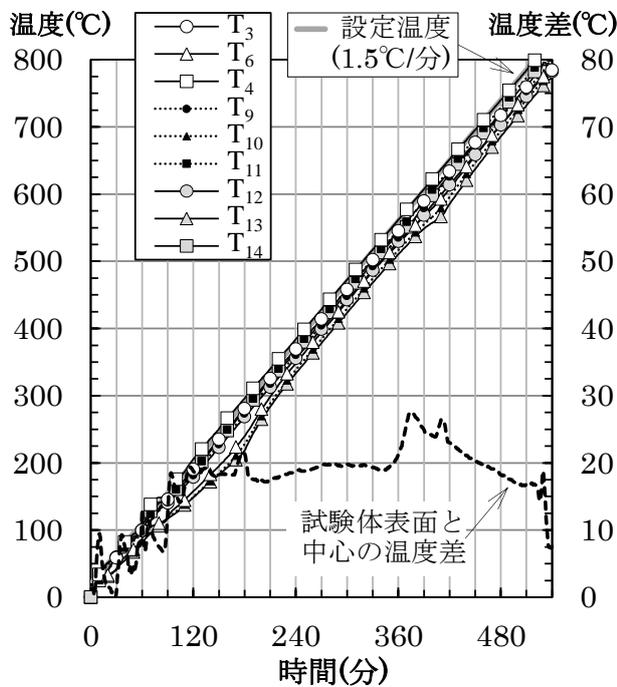


図 4.3 試験体内部温度と時間の関係 (半径方向)

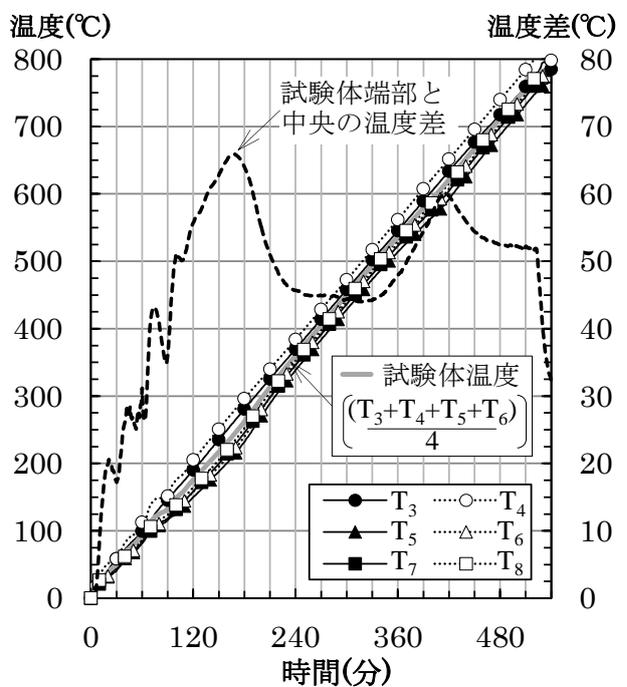


図 4.4 試験体内部温度と時間の関係 (軸方向)

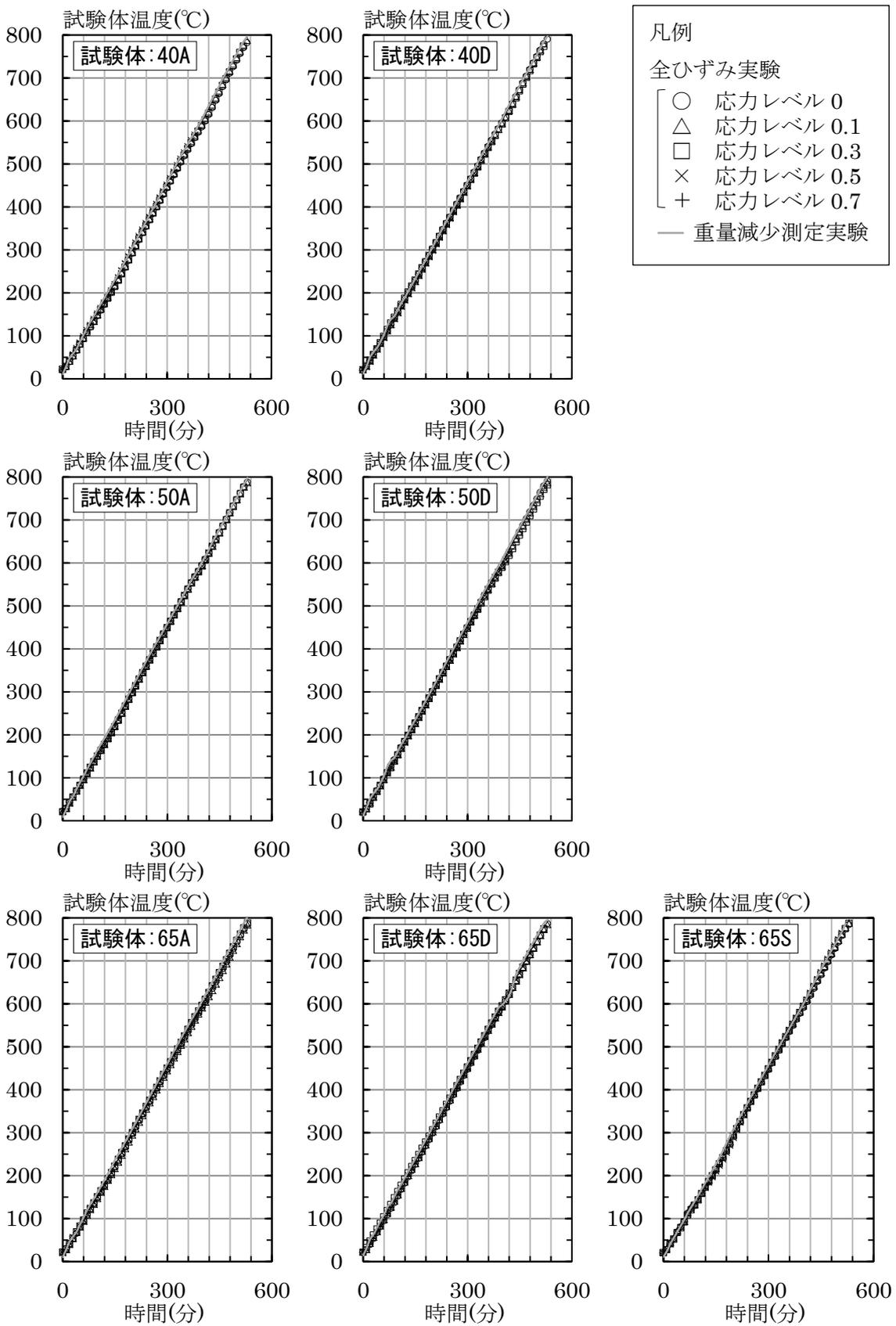


図 4.5 全ひずみ実験・重量減少測定実験における試験体温度と時間の関係

### 4.3 全ひずみ・熱膨張ひずみと温度の関係

全ひずみと熱膨張ひずみを比較するため、設定温度 800°C の定常温度圧縮実験 (3 章参照) での加力前の加熱過程 (1.5°C/分) から得た熱膨張ひずみと試験体温度の関係を図 4.6 に示す。熱膨張ひずみは、温度に対して非線形に増加するが、600°C を超えると増加の勾配が緩やかになり、800°C で約 15000 ( $\times 10^{-6}$ ) のひずみとなった。この傾向は、Eurocode<sup>3)</sup> における熱膨張ひずみの提案値と概ね一致した (図 4.6)。試験体の養生条件および水セメント比が熱膨張ひずみへ及ぼす影響は見られなかった。

応力レベル 0~0.7 の全ひずみ実験から得た全ひずみと試験体温度の関係を図 4.7 に示す。なお、図の縦軸は膨張ひずみを正、収縮ひずみを負として表している。また、载荷時熱ひずみの影響を分かりやすくするため、初期応力ひずみは差引いて示した。応力レベル 0 の実験で膨張側に発生する全ひずみは応力レベルの増加に伴い減少し、応力レベル=0.7 の実験では概ね 0 もしくは収縮側に増加する結果となった。これは、応力レベルの増加に伴い载荷時熱ひずみが増大し、熱膨張ひずみを打消す程のひずみが生じたことを意味する。応力レベル 0.5 と 0.7 の実験では 800°C に到達する前に試験体が破壊した。次節では、この全ひずみから熱膨張ひずみを差引くことで算出した载荷時熱ひずみについて考察する。

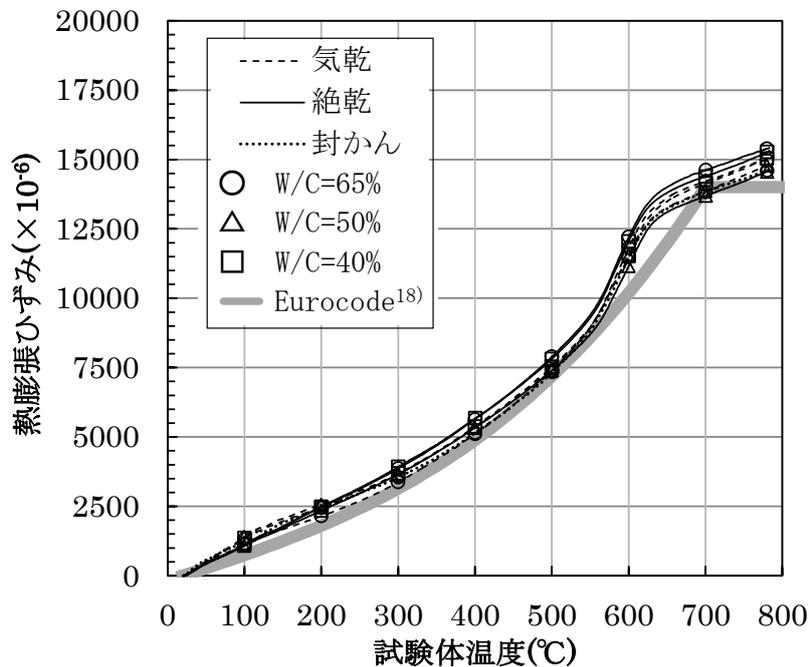
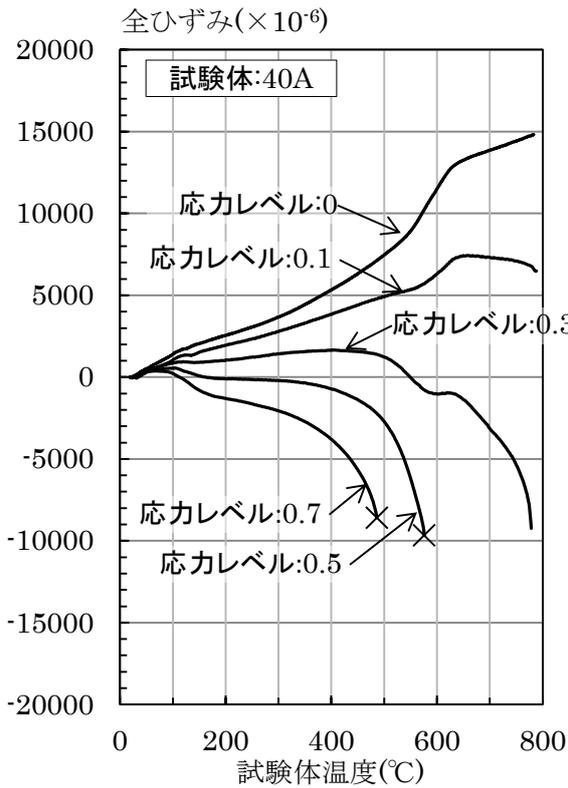
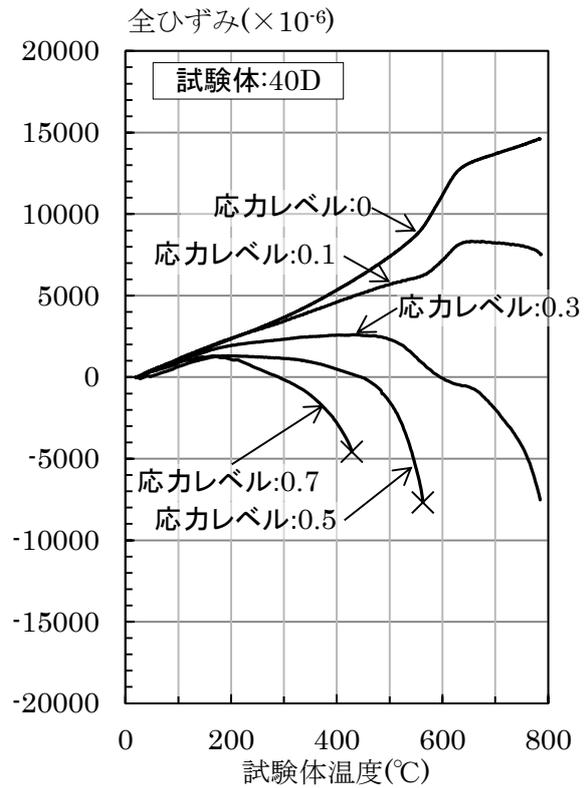


図 4.6 熱膨張ひずみと試験体温度の関係

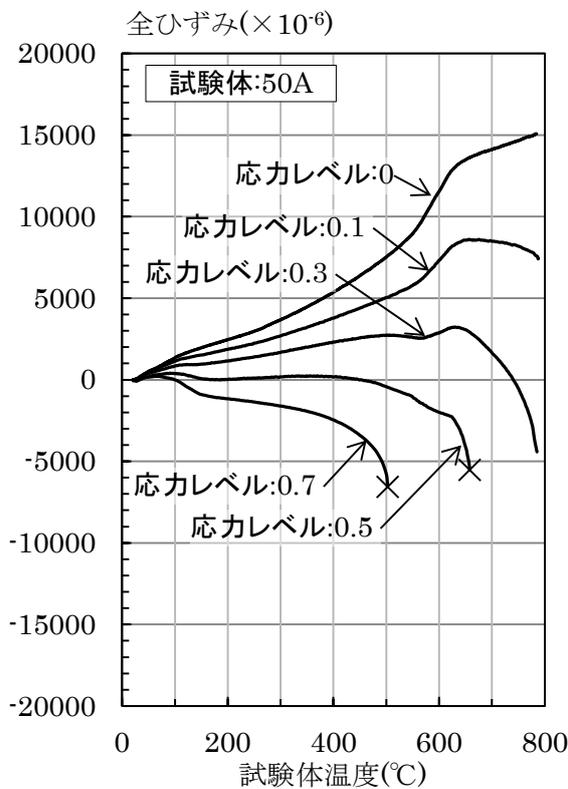


(a) 気乾試験体

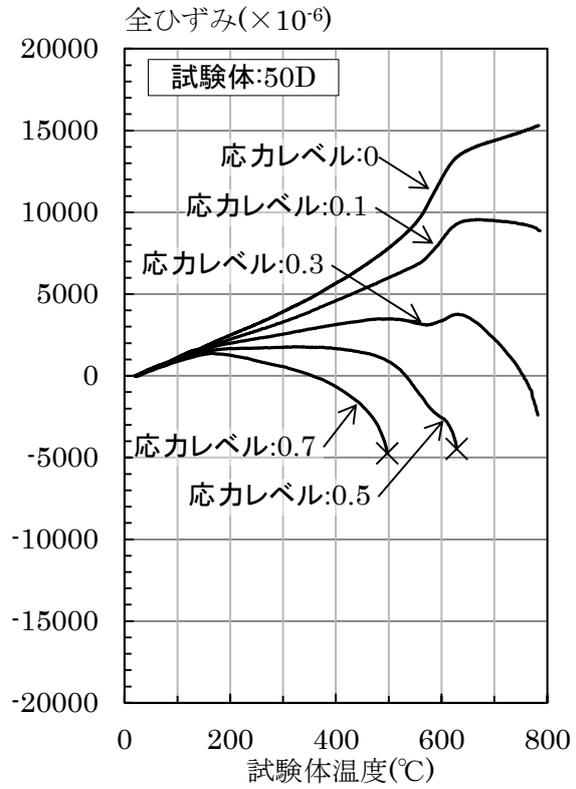


(b) 絶乾試験体

図 4.7(1) 全ひずみと試験体温度の関係(水セメント比: 40%)



(a) 気乾試験体



(b) 絶乾試験体

図 4.7(2) 全ひずみと試験体温度の関係(水セメント比: 50%)

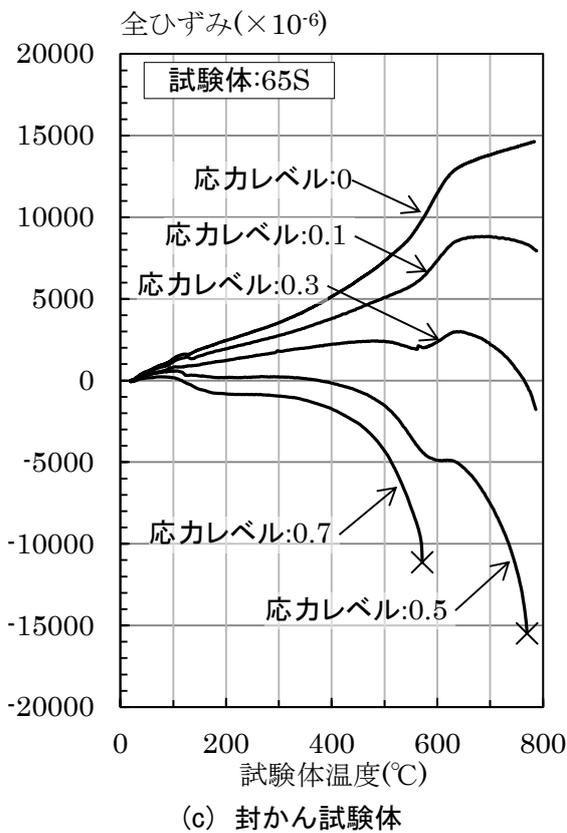
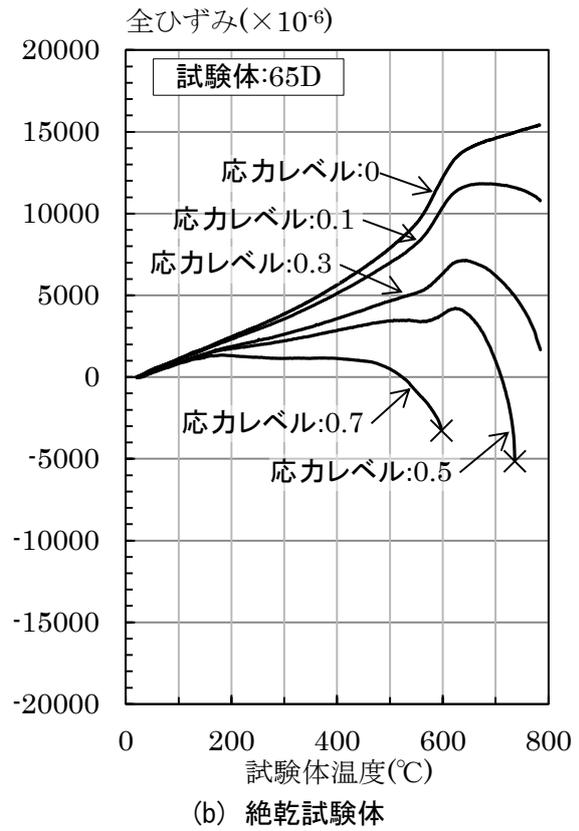
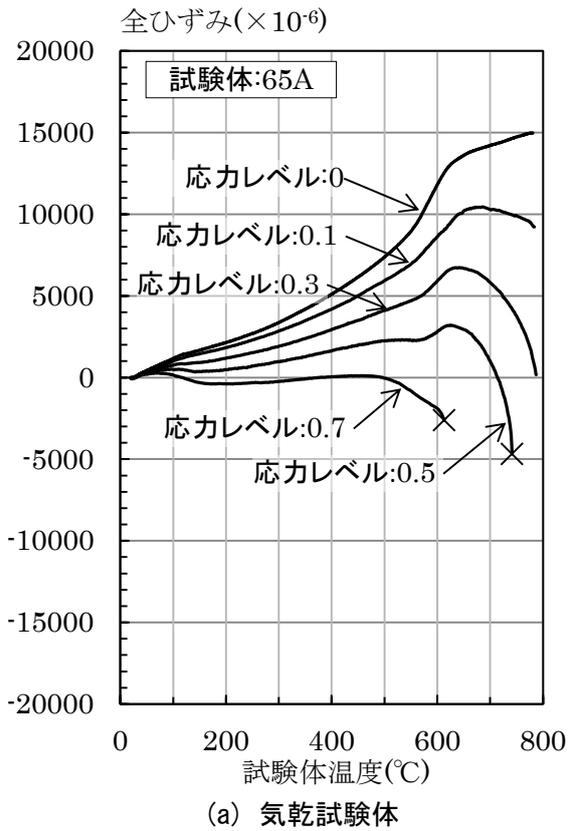


図 4.7(3) 全ひずみと試験体温度の関係(水セメント比: 65%)

#### 4.4 載荷時熱ひずみ

##### 4.4.1 養生条件の影響

載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件の影響を図 4.8 に示す。蒸発性水分の蒸発が載荷時熱ひずみに及ぼす影響は、 $100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ において顕著に表れた。気乾試験体では、蒸発性水分の蒸発が活発に行われる約  $100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ で載荷時熱ひずみが顕著に増加した。一方、絶乾試験体では、約  $200^{\circ}\text{C}$ まで載荷時熱ひずみはほとんど発生しなかった。気乾試験体の蒸発が終了する  $200^{\circ}\text{C}$ 以降、両試験体の差は一定、もしくは小さくなった。同様の傾向は高強度コンクリート ( $W/C=18\%\sim 35\%$ )に関する既往の研究でも報告されている<sup>1),4),5)</sup>。また、文献 5)と同様、両試験体の差は応力レベルが大きくなるほど増加し、応力レベル=0.7の実験では最大で約  $2500(\times 10^{-6})$ となった。 $100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ で気乾試験体の載荷時熱ひずみの増加が顕著になるのは、水分の蒸発に伴いコンクリートの乾燥収縮が発生するためである<sup>1)</sup>。また、応力レベルが大きくなると差が増加するのは、乾燥クリープが発生するためだと考えられる。気乾試験体のように水分の移動(蒸発)がある状態で生じるクリープひずみ(乾燥クリープ)は、絶乾試験体のように水分の移動がない状態で生じる場合よりも増大することが知られている<sup>6)</sup>。

封かん試験体(65W)と気乾試験体(65A)の違いは、気乾試験体の水分蒸発が終了する  $200^{\circ}\text{C}$ 以降に表れ、封かん試験体の載荷時熱ひずみが気乾試験体よりも増加した。両試験体の差は応力レベルが大きくなるほど増加し、応力レベル 0.7の実験では約  $9000(\times 10^{-6})$ に達した。文献 1)では、湿潤試験体 (initially moist specimen) の載荷時熱ひずみは気乾試験体と同様であることが報告されている。本報の封かん試験体と文献 1)の湿潤試験体は、共に気乾試験体と比べて含水率が高い。しかし、 $250^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ において、本報の封かん試験体は気乾試験体 (65A) より重量減少率の増加が大きいのにに対し、文献 1)の湿潤試験体と気乾試験体は重量減少率の増加が同程度であることが報告されている<sup>7)</sup> (2.7.2 節参照)。このことから、 $250^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ でのセメント水和物の脱水量の違いが載荷時熱ひずみに大きな影響を及ぼしたと考えられる。脱水量が異なると、脱水に伴い生じるクリープひずみ(脱水クリープ<sup>8)</sup>)も変化するため影響が表れると考えられる。

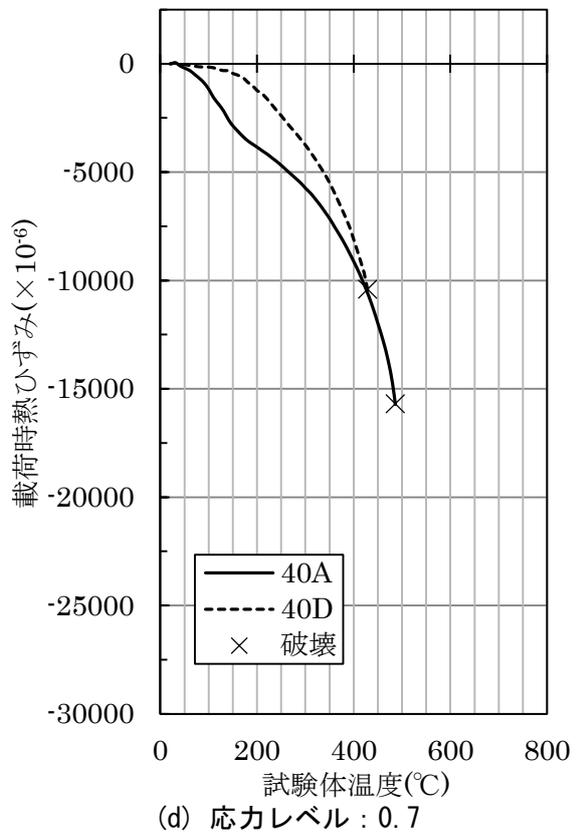
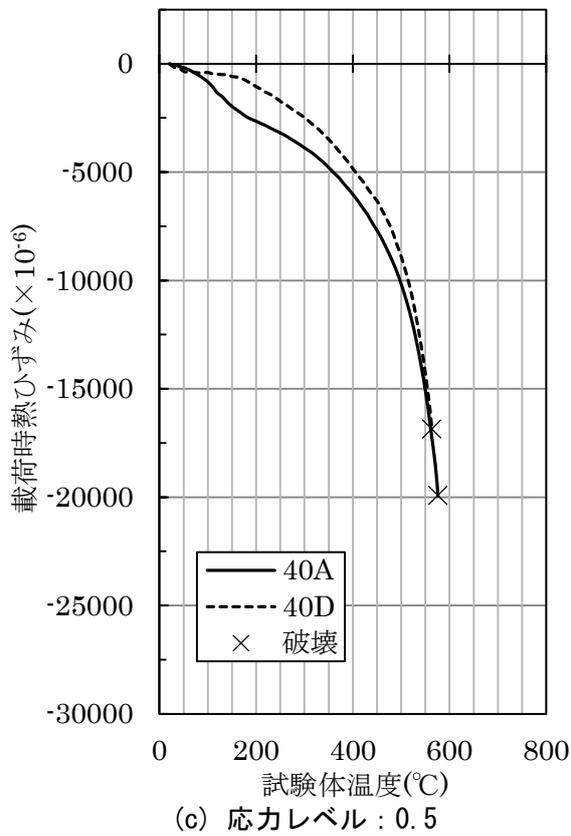
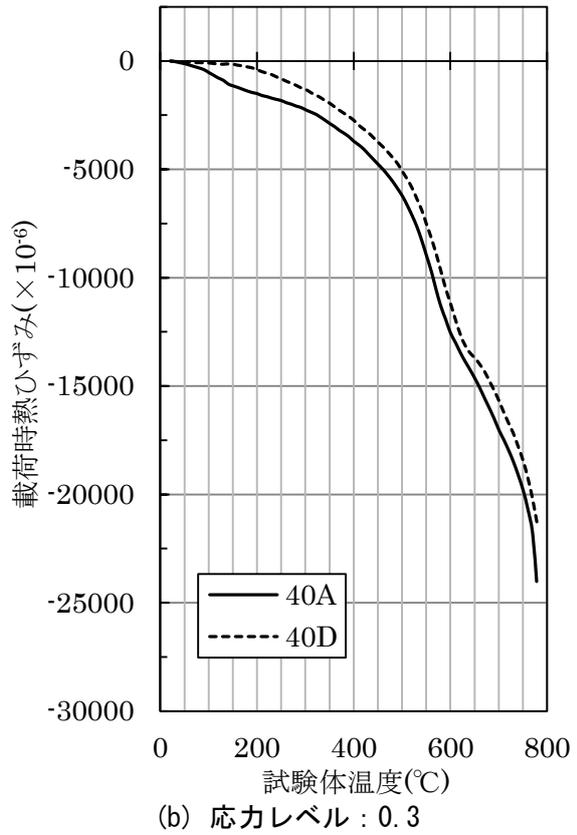
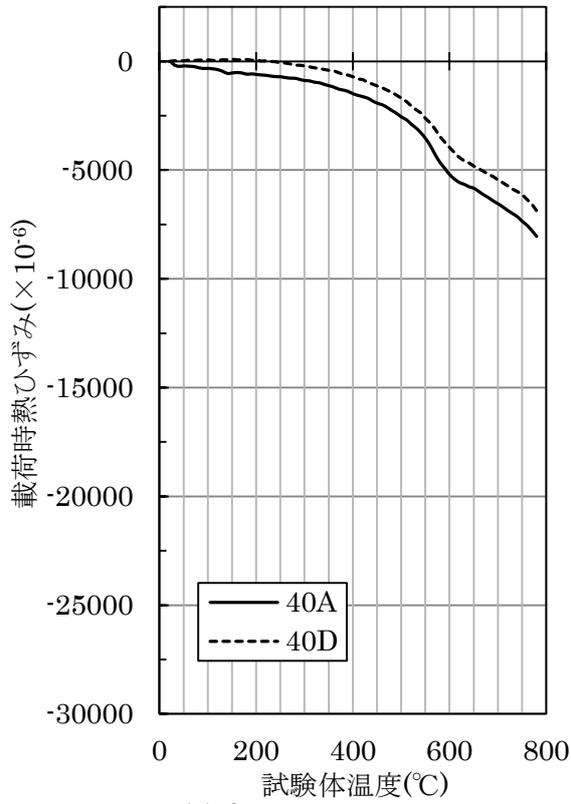


図 4.8(1) 載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件の影響(水セメント比 : 40%)

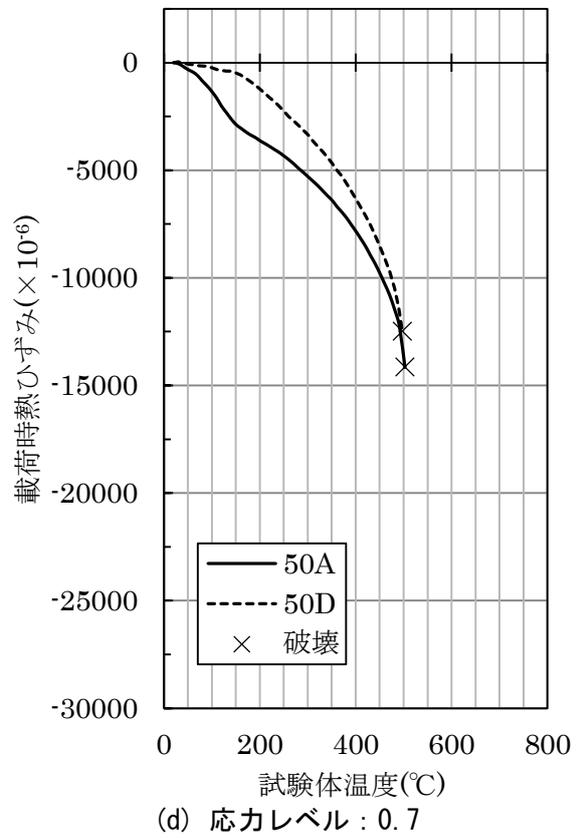
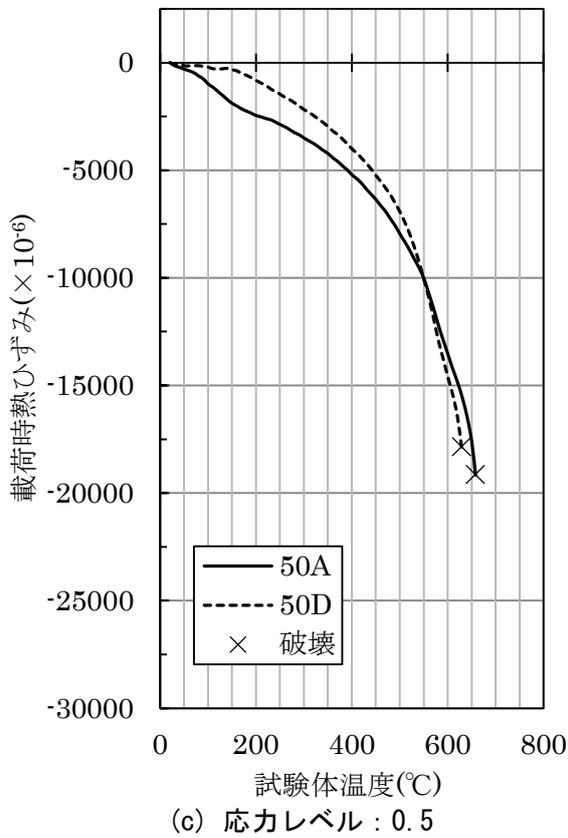
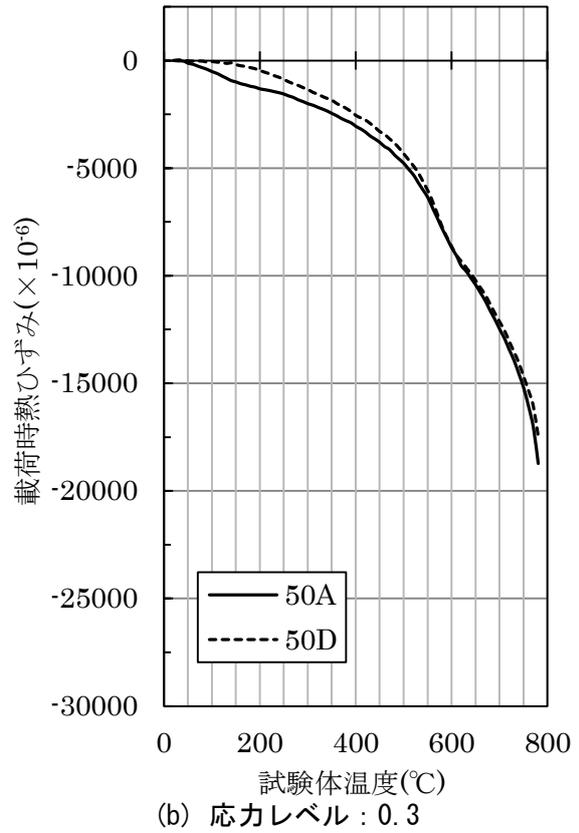
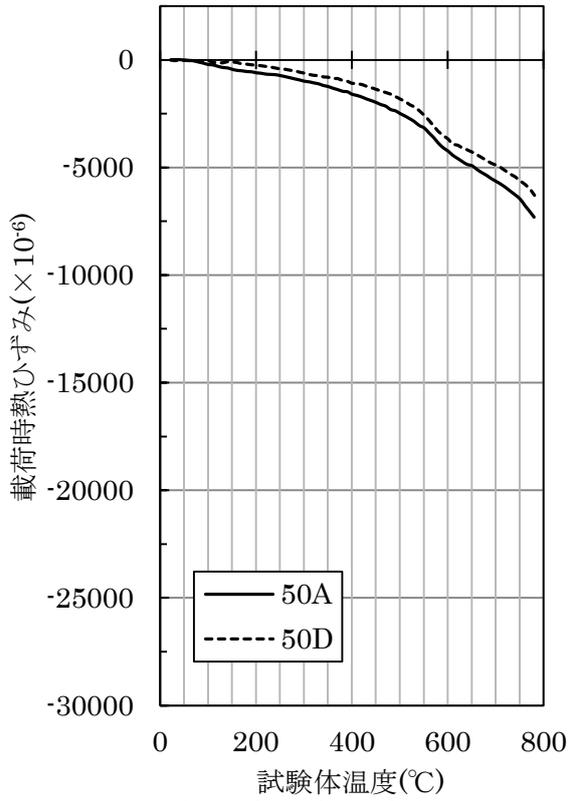


図 4.8(2) 載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件の影響(水セメント比 : 50%)

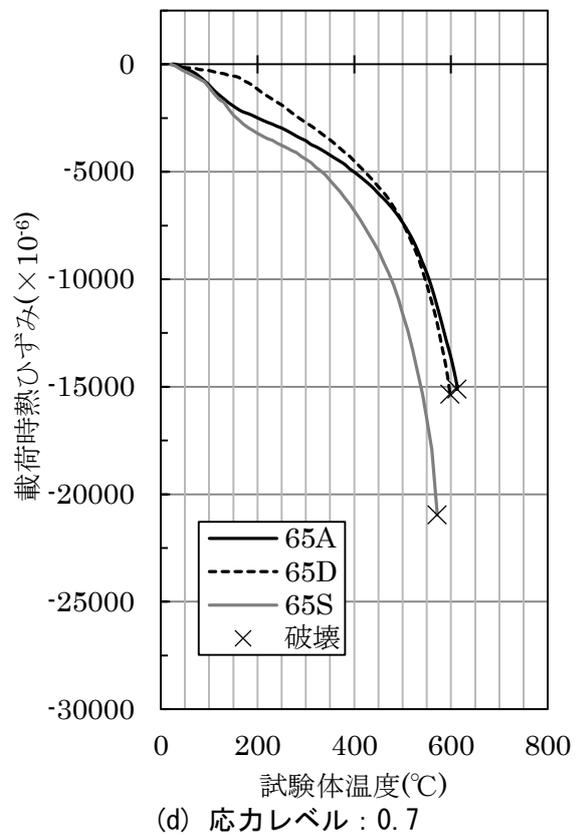
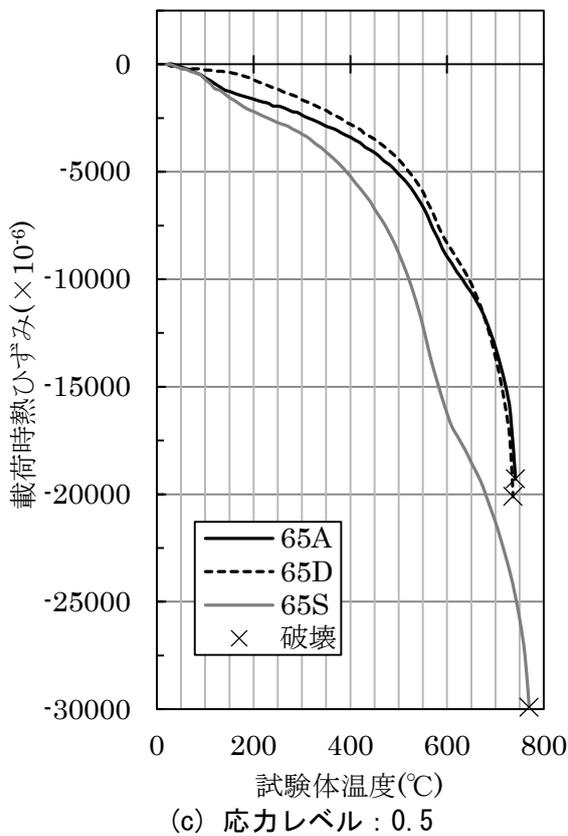
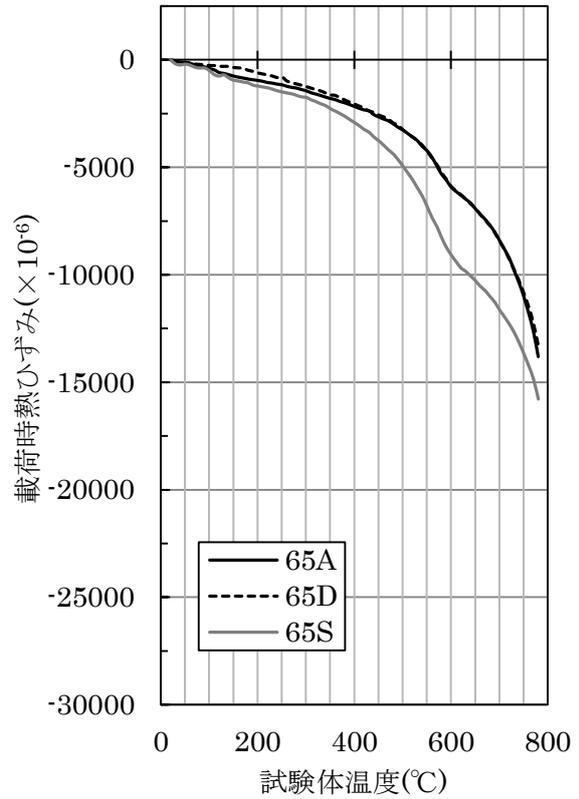
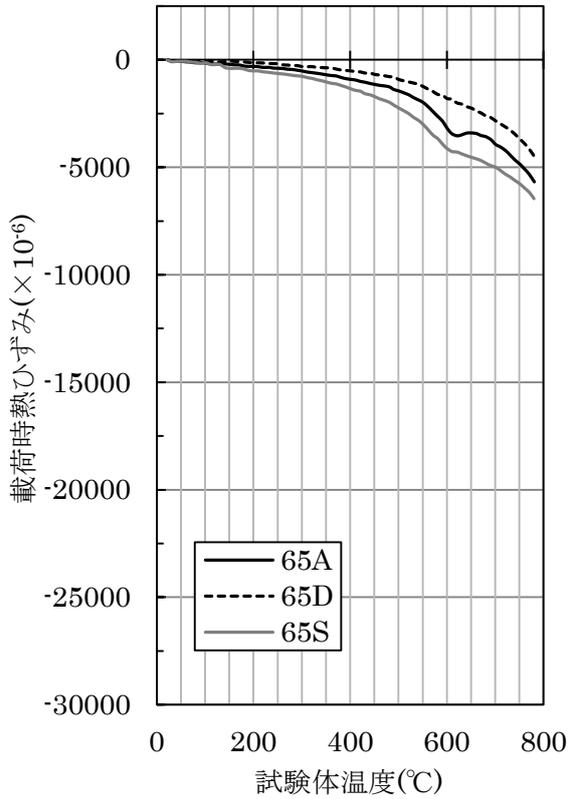
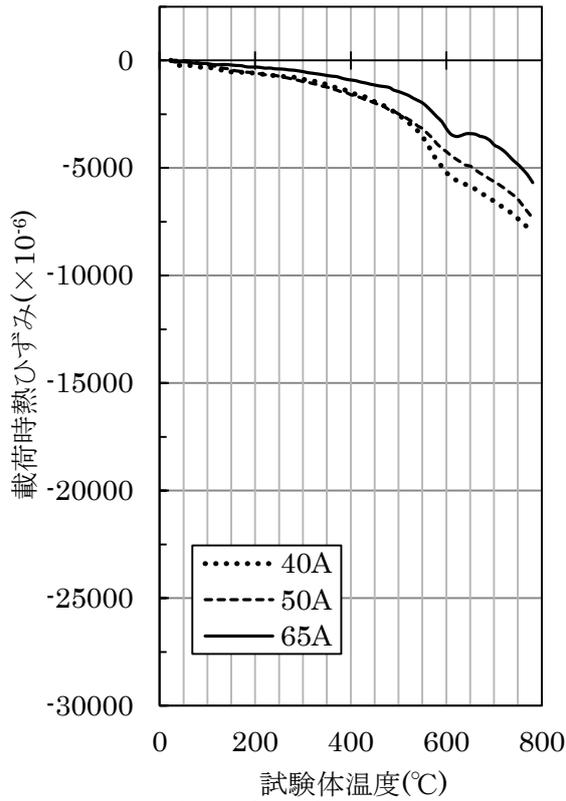


図 4.8(3) 載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件の影響(水セメント比 : 65%)

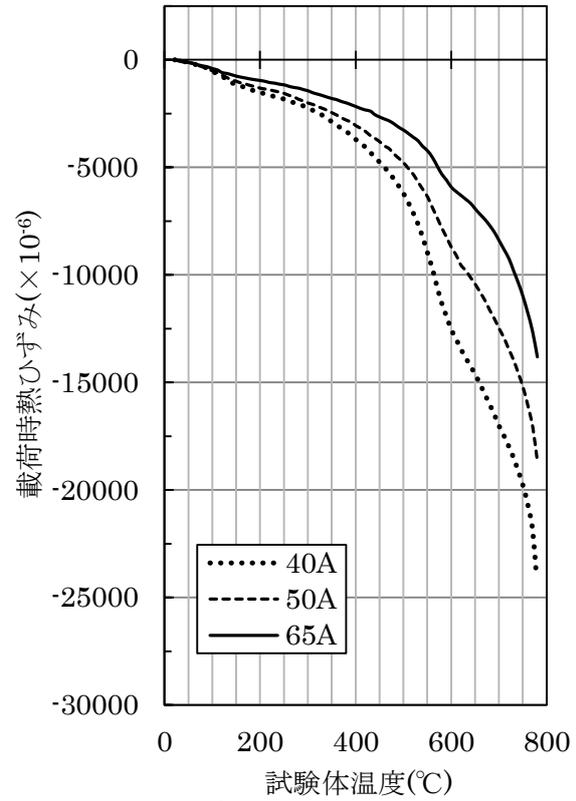
#### 4.4.2 水セメント比の影響

載荷時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響を図 4.9 に示す。水セメント比の違いによる影響は、気乾試験体、絶乾試験体共に、セメント水和物の脱水が始まる 200°C程度から顕著に表れた。試験体の水セメント比が小さいほど載荷時熱ひずみが大きくなる傾向がみられ、応力レベル 0.3 の実験で比べると、65A と 40A の差は 800°Cで約 10000( $\times 10^{-6}$ )に達した。水セメント比の違いによる差は応力レベルが大きくなるほど増加した。また、応力レベル 0.5 と 0.7 における試験体の破壊温度は、水セメント比が小さい試験体ほど低くなる傾向が見られた。文献 9)では、水セメント比による影響は 300°C以上で大きくなることが報告されている。そして、この要因として有効応力（高温時強度に対する載荷応力の比）の変化などが挙げられている。本研究においても、水セメント比が小さい試験体ほど高温時強度残存率の低下が大きいため、温度上昇に伴い高温時圧縮強度に対する載荷応力の割合が大きくなる。これにより載荷時熱ひずみ中の塑性ひずみが増大し、破壊温度も低下したと考えられる。ただし、水セメント比の違いによる強度残存率の低下が顕著になるのは 400°Cを超えてからである（3.6.2 節参照）。そのため、より低い温度範囲（200°C～400°C）では、試験体間の脱水量の違い（2.7.2 節参照）によりクリープひずみの発生量に変化することで、載荷時熱ひずみの差が表れたと考えられる。

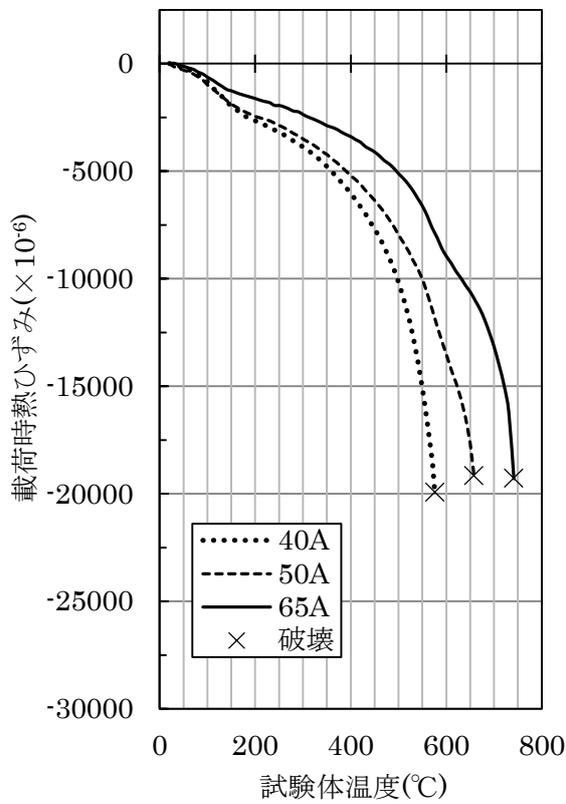
水セメント比が本報よりも小さい場合に生じる影響を検討するため、図 4.10 に示すように、水結合材比（W/B）が 35%以下のコンクリートの載荷時熱ひずみ測定結果<sup>5)</sup>との比較を行った。既報<sup>5)</sup>では、水結合材比（W/B）が 18%・24%・35%、粗骨材が本報と同種の硬質砂岩であるコンクリート試験体について、本報と同じ実験装置を用いて載荷時熱ひずみの測定を行っている。150°C以降、既報では本報よりも載荷時熱ひずみが大きくなっているが、水結合材比の違いによる影響は明確でない。試験体間の水セメント比の差は本報よりも既報の方が大きいにもかかわらず、水セメント比の違いによるひずみの差は本報（約 8000( $\times 10^{-6}$ ））の方が既報（約 6000( $\times 10^{-6}$ ））よりも大きくなった。既報の試験体については、試験体間における脱水量の差が小さいことが報告されている<sup>10)</sup>。これは、水セメント比が 38%未満になると、調合中のセメント量を増やしてもセメント水和物量はほとんど変わらないためと考えられる<sup>11)</sup>。また、高温時強度残存率に及ぼす水結合材比の影響が小さいことも報告されている<sup>12)</sup>。これらの要因により、既報では水結合材比による載荷時熱ひずみへの影響が小さくなったと考えられる。以上より、水セメント比が及ぼす影響は、水セメント比が 40%以上のコンクリートに対してより顕著に表れることが確認された。



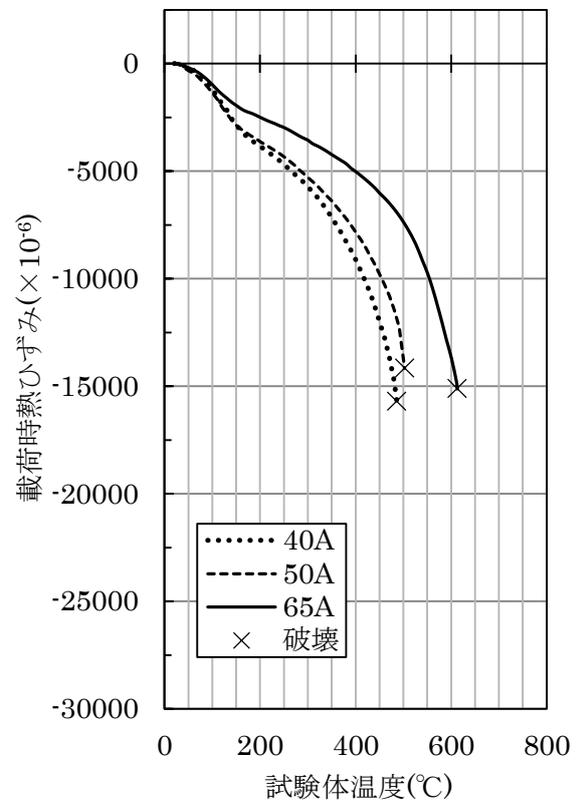
(a) 応力レベル : 0.1



(b) 応力レベル : 0.3

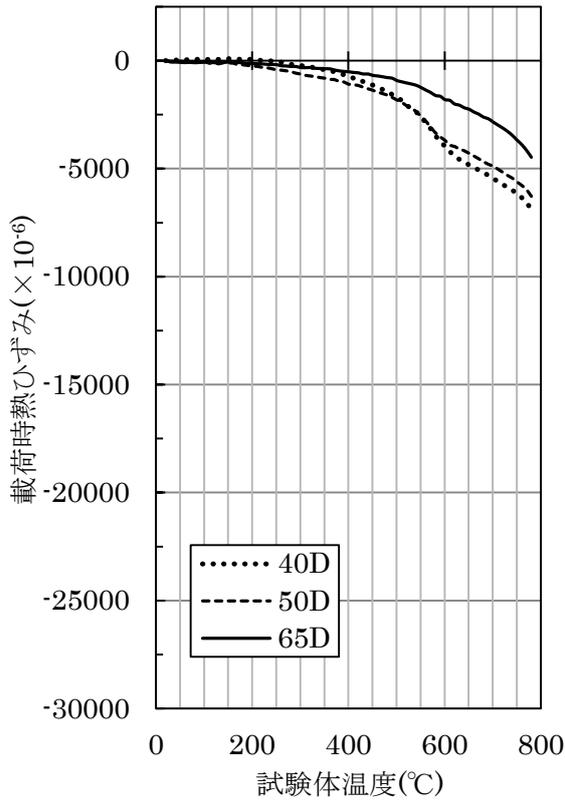


(c) 応力レベル : 0.5

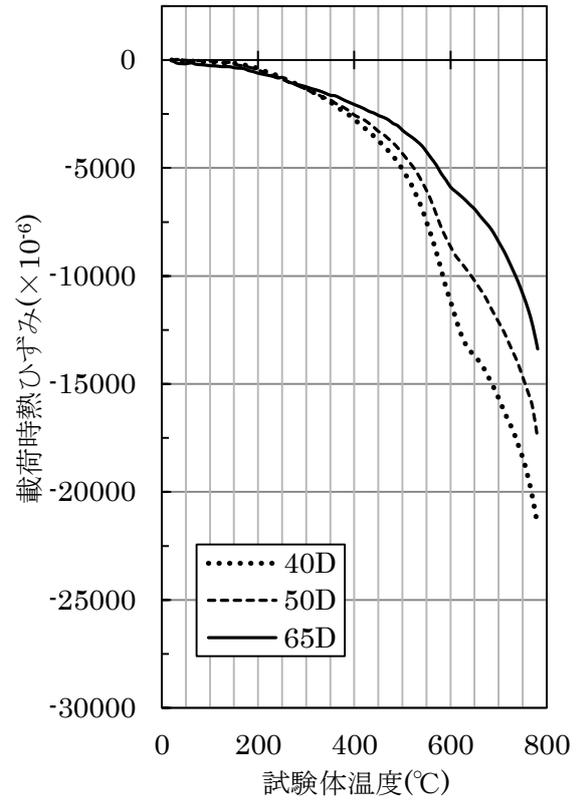


(d) 応力レベル : 0.7

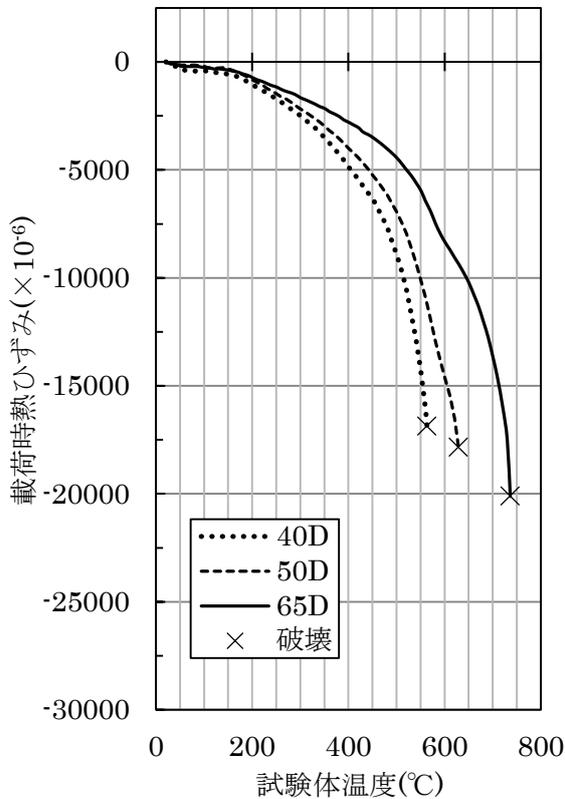
図 4.9(1) 載荷時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響(気乾試験体)



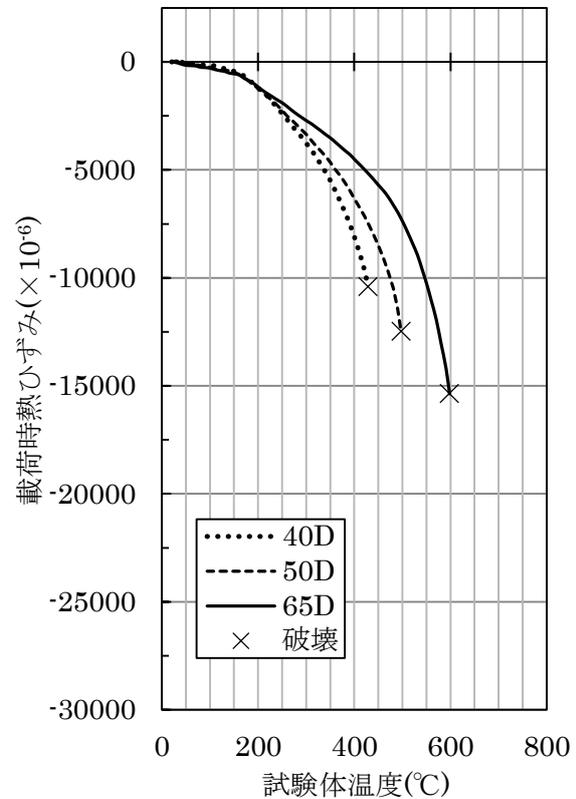
(a) 応力レベル : 0.1



(b) 応力レベル : 0.3

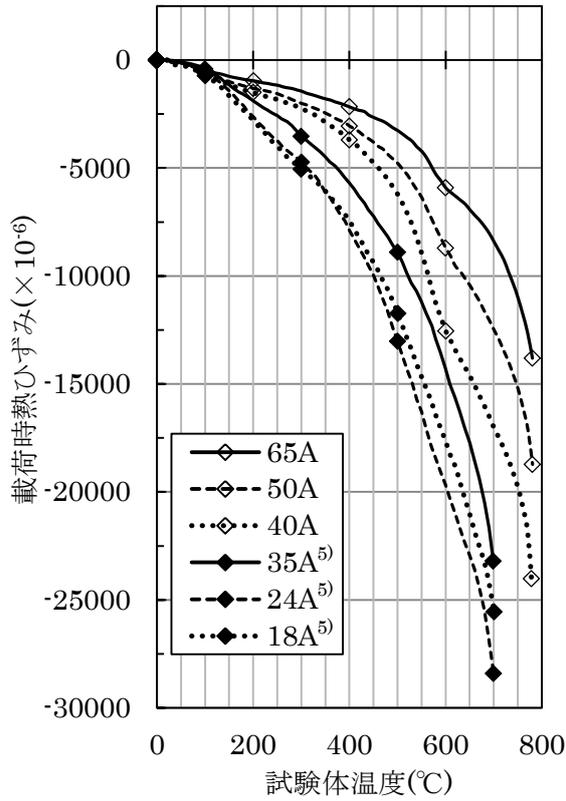


(c) 応力レベル : 0.5

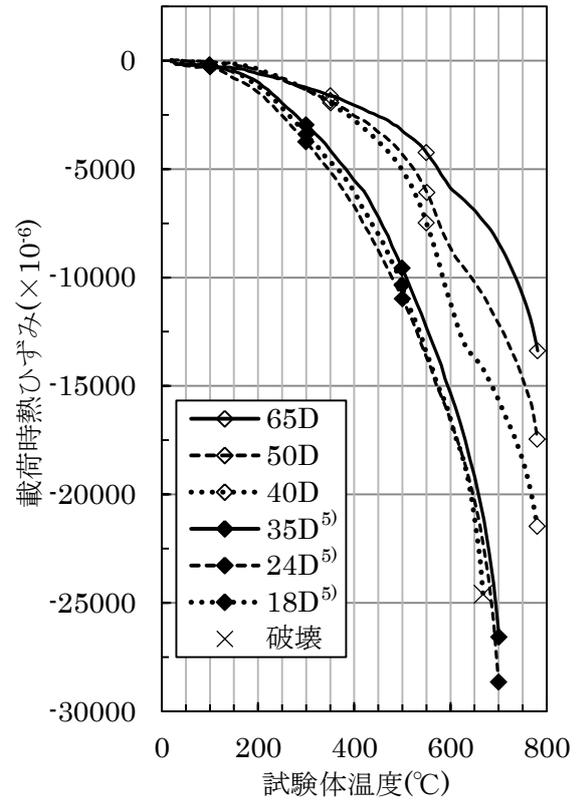


(d) 応力レベル : 0.7

図 4.9(2) 載荷時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響(絶乾試験体)



(a) 気乾試験体・応力レベル 0.3



(b) 絶乾試験体・応力レベル 0.3

図 4.10 載荷時熱ひずみに及ぼす水セメント比の影響(既報<sup>5)</sup>との比較)

#### 4.4.3 応力レベルの影響

載荷時熱ひずみと応力レベルの関係を図 4.11 に示す。全ての実験条件において、載荷時熱ひずみは応力レベルに概ね比例する傾向がみられた。既往の研究<sup>1),13)</sup>において、応力レベル 0.4 以下では、載荷時熱ひずみは応力レベルに比例することが報告されている。本研究では、塑性ひずみの影響が大きくなる応力レベル 0.5, さらにコンクリートの短期許容応力に相当する応力レベル 0.7 でも、載荷時熱ひずみは応力レベルに概ね比例することが分かった。

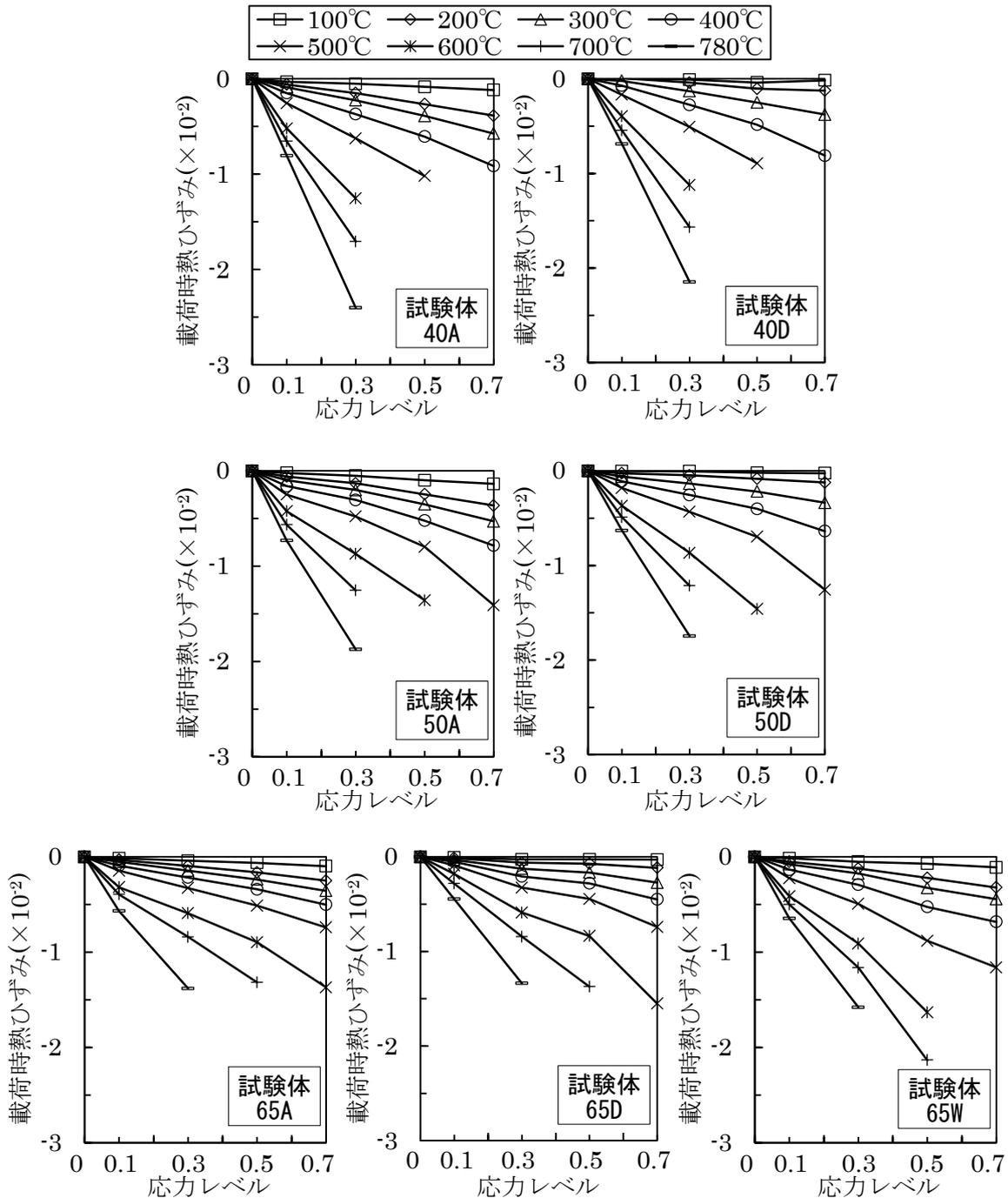
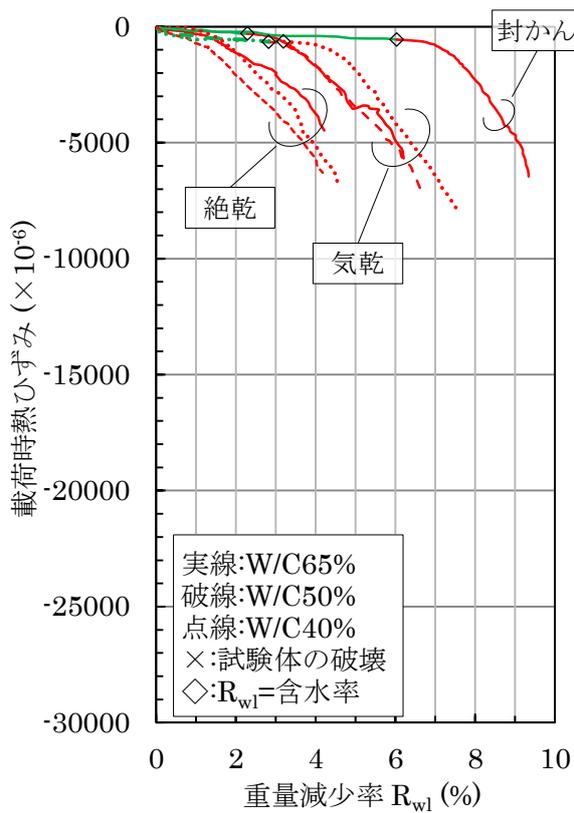


図 4.11 載荷時熱ひずみと応力レベルの関係

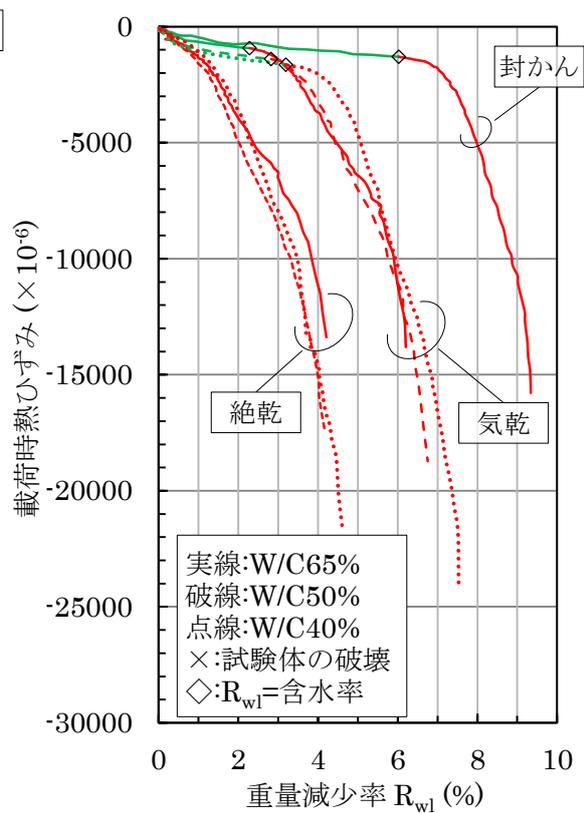
#### 4.5 載荷時熱ひずみと重量減少率の関係

図 4.5 に示したように、全ひずみ実験と重量減少測定実験では、同じ加熱速度で試験体の温度を制御することで、同様の試験体温度-時間関係を得ることができた。そのため、両実験において試験体は同様に加熱されているとみなし、両実験から得た載荷時熱ひずみと試験体温度の関係（図 4.8）および重量減少率と試験体温度の関係（図 2.10）から、試験体温度をパラメータとすることで、図 4.12 に示す載荷時熱ひずみと重量減少率の関係を得た。また、図 4.13 に、載荷時熱ひずみを重量減少率もしくは試験体温度で表した場合の関係について比較する。載荷時熱ひずみは、温度上昇に伴う弾性係数低下により生じる弾性ひずみやひび割れの増加などにより生じる塑性ひずみ、蒸発性水分の蒸発やセメント水和物の脱水に伴い生じるクリープひずみなどを含む収縮ひずみである。そして 450°C 以下では、載荷時熱ひずみと温度の関係は骨材や調合の違いによる影響を受けず、養生条件による影響も 250°C 以降は生じないことが報告されている<sup>14)</sup>。一方、本研究では 450°C 以下においても、水セメント比による影響が現れ、また、封かん試験体と気乾試験体の違いが 200°C 以降に現れた。一方、載荷時熱ひずみと重量減少率の関係では養生条件毎に 3 種類の曲線が描かれた。同じ養生条件で比較すると、水セメント比の違いによる載荷時熱ひずみの差は 4500( $\times 10^{-6}$ ) 以下であり、載荷時熱ひずみと温度の関係における差（約 10000( $\times 10^{-6}$ )) の半分以下となった。

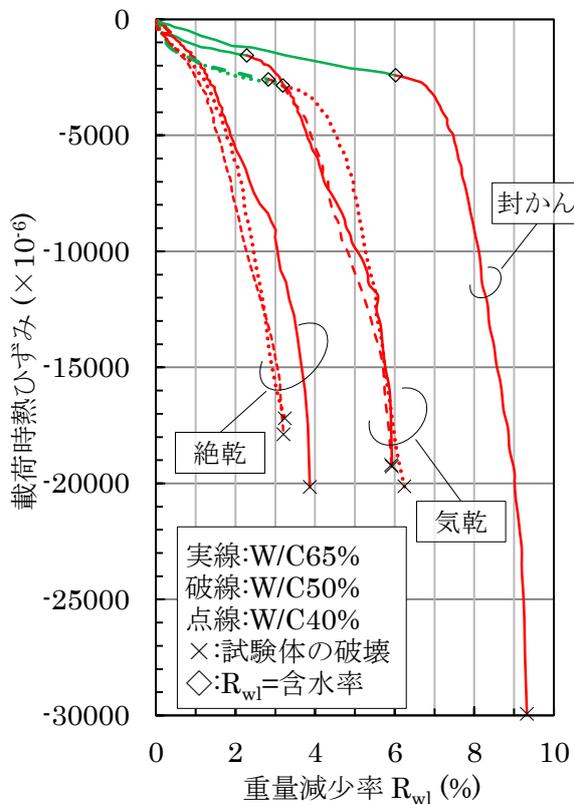
図 4.12 に示すように、気乾試験体および封かん試験体では、重量減少率が各試験体の含水率（表 2.3）に到達するまで、載荷時熱ひずみの増加は比較的小さい。この載荷時熱ひずみの大部分は蒸発性水分の蒸発に伴い生じる乾燥クリープと考えられる。一方、各試験体の重量減少率が含水率を超えると、載荷時熱ひずみは重量減少率の増加に伴い急激に増加することが分かった。載荷時熱ひずみの大部分はセメント水和物の脱水および分解に伴うクリープであると考えられる。蒸発性水分を含まない絶乾試験体の載荷時熱ひずみも大部分は脱水・分解に伴うクリープであり、重量減少率の増加に伴い急増した。図 4.14 に、重量減少率が含水率に到達する前に発生した載荷時熱ひずみ（以降、 $LITS_{ev}$  と称す）と重量減少率の関係を示す。また、重量減少率が含水率に到達した後に発生した載荷時熱ひずみ（以降、 $LITS_{dh}$  と称す）と重量減少率  $R_{wl,dh}$  ( $=R_{wl}-\text{含水率}$ ) の関係も併せて示す。絶乾試験体の載荷時熱ひずみは全て  $LITS_{dh}$  とした。 $LITS_{dh}$  は  $LITS_{ev}$  の 10 倍以上の大きさとなることから、載荷時熱ひずみはセメント水和物の脱水や分解に伴い大きく増大するひずみであることが分かった。これは、既往の研究における指摘と一致する<sup>14),15)</sup>。 $LITS_{dh}$  と重量減少率の関係は、養生条件および水セメント比によらず概ね同様であり、1 つの曲線に概ね収められた。これより、載荷時熱ひずみを重量減少率との関係で表すことで、試験体の水セメント比や養生条件の違いによる影響を包含した関係を得られることが分かった。



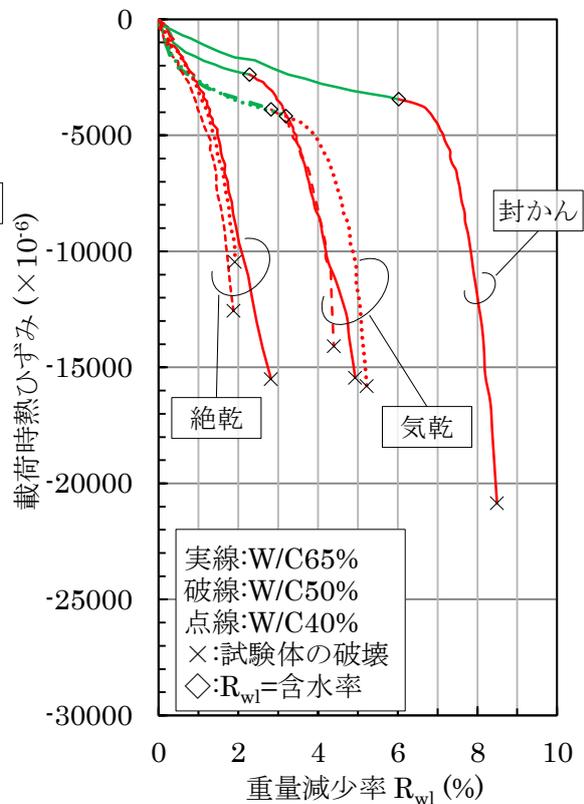
(a) 応力レベル 0.1



(b) 応力レベル 0.3

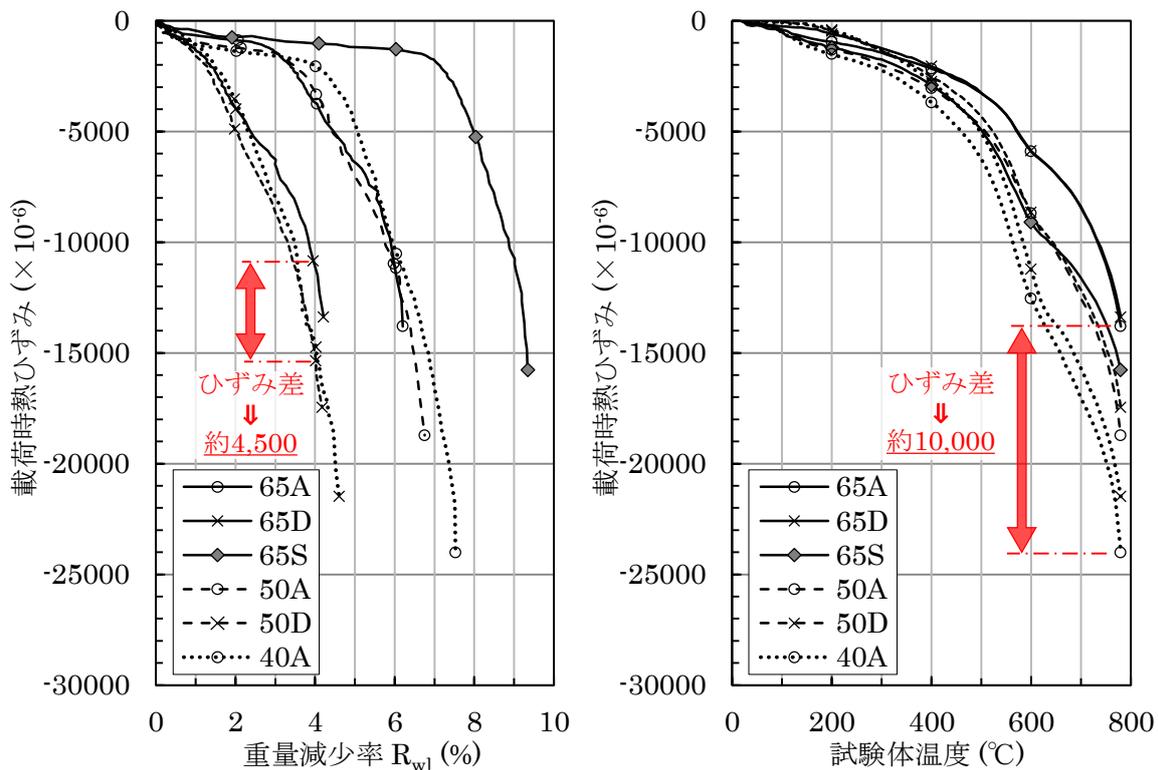


(c) 応力レベル 0.5



(d) 応力レベル 0.7

図 4.12 載荷時熱ひずみと重量減少率の関係



(a) 載荷時熱ひずみと重量減少率の関係 (b) 載荷時熱ひずみと温度の関係

図 4.13 異なる要因との載荷時熱ひずみの関係の比較

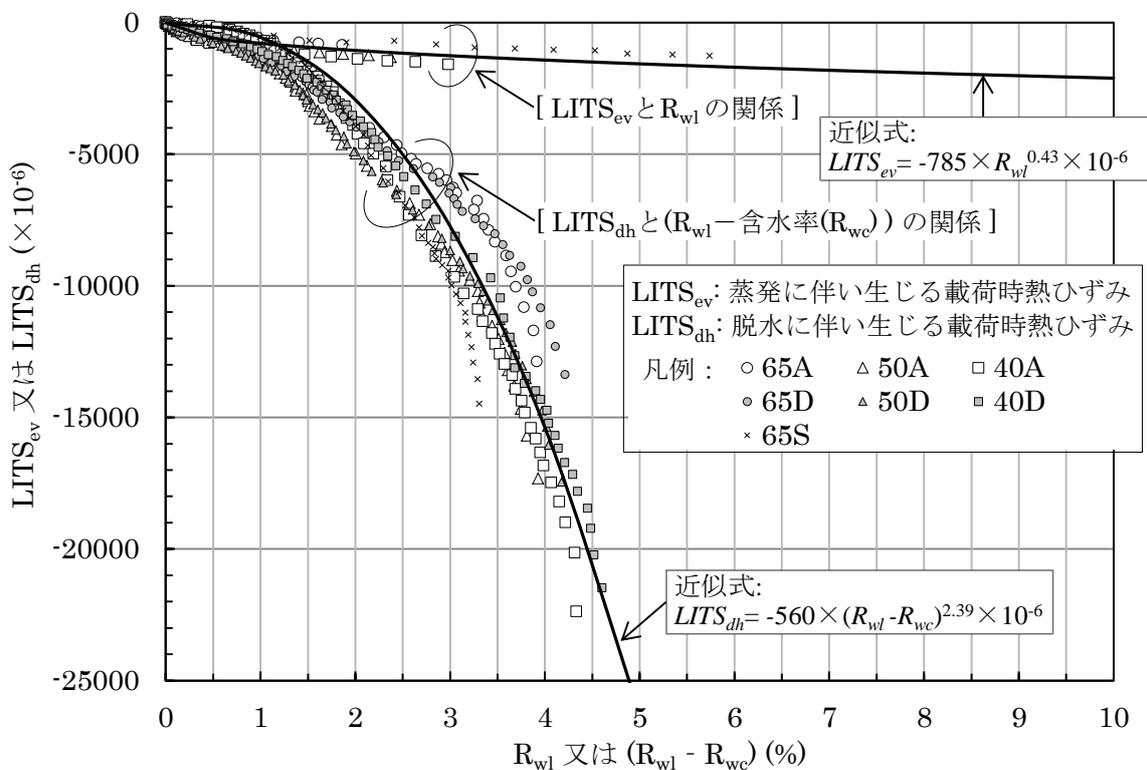


図 4.14 蒸発・脱水に伴い生じる載荷時熱ひずみと重量減少率の関係

#### 4.6 荷時熱ひずみの数式化

荷時熱ひずみが応力レベルと比例関係にあることに着目した Terro は、各応力レベルでの荷時熱ひずみを応力レベル 0.3 の値で標準化することを提案している<sup>6)</sup>。図 4.15 に、応力レベル 0.3 の値で割ることで標準化した荷時熱ひずみと応力レベルの関係を、重量減少率の値ごとに示す。なお、ばらつきが大きくなるため、 $-1000(\times 10^{-6})$ 以下の荷時熱ひずみは標準化の対象としなかった。標準化した荷時熱ひずみと応力レベルの間には、概ね同一の勾配を持つ比例関係が見られた。これは、図 4.11 に示したように、養生条件や水セメント比によらず荷時熱ひずみと応力レベルは比例関係にあるためである。標準化した荷時熱ひずみを応力レベルの一次関数として近似することで(図 4.15)、各応力レベルでの荷時熱ひずみを、応力レベルと応力レベル 0.3 での荷時熱ひずみの関数として数式化した(式 4.2)。なお、応力レベル 0 での荷時熱ひずみを 0 にするため、図 4.15 中の近似式は、応力レベル 0.3 での値と原点を通る直線として定めた。

$$LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b) = 3.4 \cdot \sigma/\sigma_b \cdot LITS(R_{wb}, 0.3) \quad \dots (4.2)$$

$LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b)$  : 重量減少率= $R_{wb}$ , 応力レベル  $\sigma/\sigma_b$  での荷時熱ひずみ

次に、図 4.14 中の  $LITS_{ev}$  および  $LITS_{dh}$  を重量減少率の関数としてそれぞれ近似することで、応力レベル 0.3 での荷時熱ひずみの数式化を行った(式 4.3)。なお、式 4.3 中の定数は、 $LITS_{ev}$  および  $LITS_{dh}$  の平均値をそれぞれ近似できるように決定した。

$$LITS(R_{wb}, 0.3) = -785 \times R_{wl}^{0.43} \times 10^{-6} \quad [R_{wl} \leq R_{wc} \text{ の場合}]$$

$$LITS(R_{wb}, 0.3) = (-785 \times R_{wc}^{0.43} - 560 \times (R_{wl} - R_{wc})^{2.39}) \times 10^{-6} \quad [R_{wl} > R_{wc} \text{ の場合}] \quad \dots (4.3)$$

図 4.16 に、式 4.2 および式 4.3 を用いて算出した荷時熱ひずみの値と実験値の比較を示す。応力レベル 0.1 と 0.3 では、実験結果と算出値は概ね一致する結果となった。一方、応力レベル 0.7 では、算出値が実験値よりも小さくなるケースが見られた。これは図 4.15 中の近似式が、応力レベル 0.7 では実験値を小さく見積もるためである。

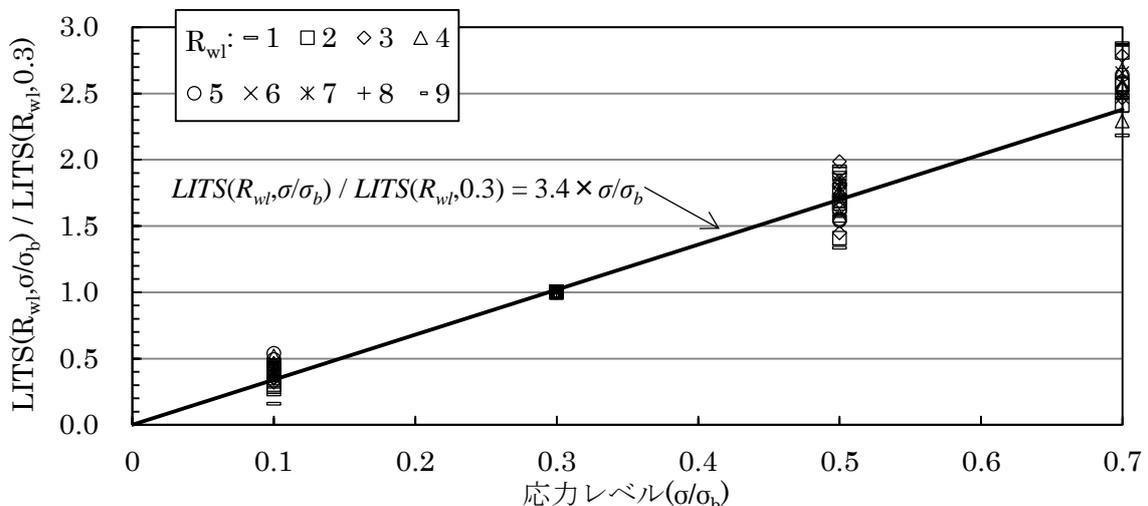
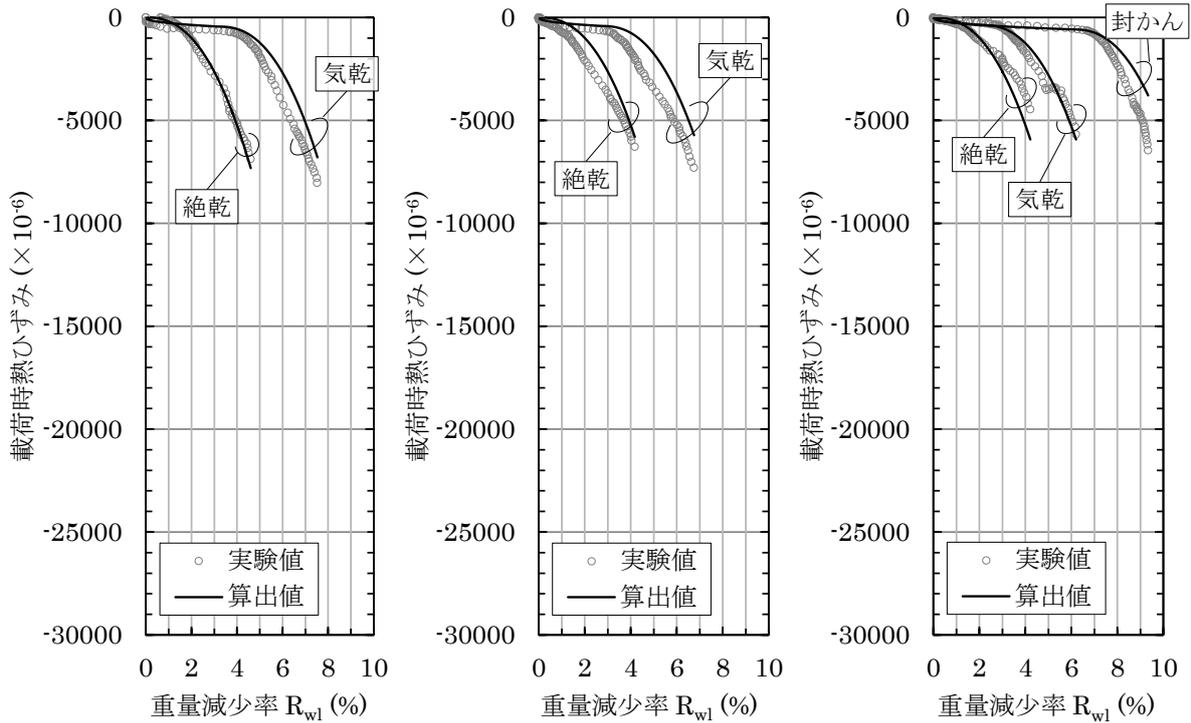
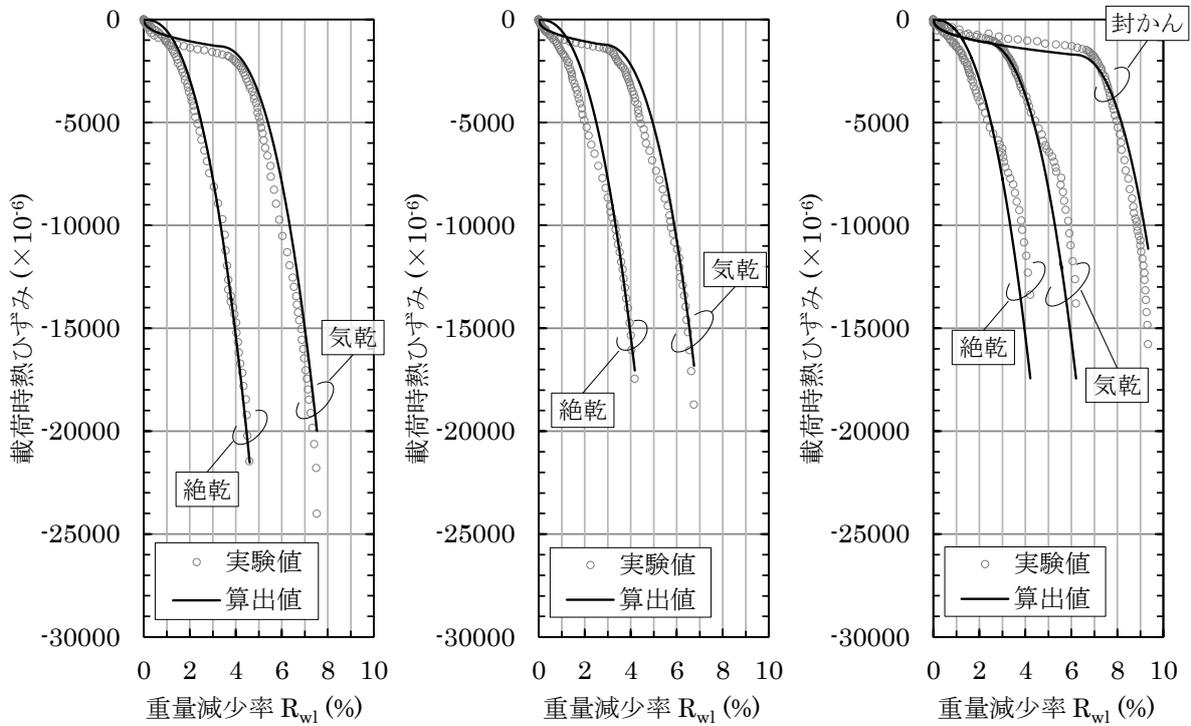


図 4.15 標準化した荷時熱ひずみと応力レベルの関係



(a) 水セメント比 0.4      (b) 水セメント比 0.5      (c) 水セメント比 0.65

図 4.16(1)  载荷時熱ひずみの実験値と算出値の比較(応力レベル 0.1)



(a) 水セメント比 0.4      (b) 水セメント比 0.5      (c) 水セメント比 0.65

図 4.16(2)  载荷時熱ひずみの実験値と算出値の比較(応力レベル 0.3)

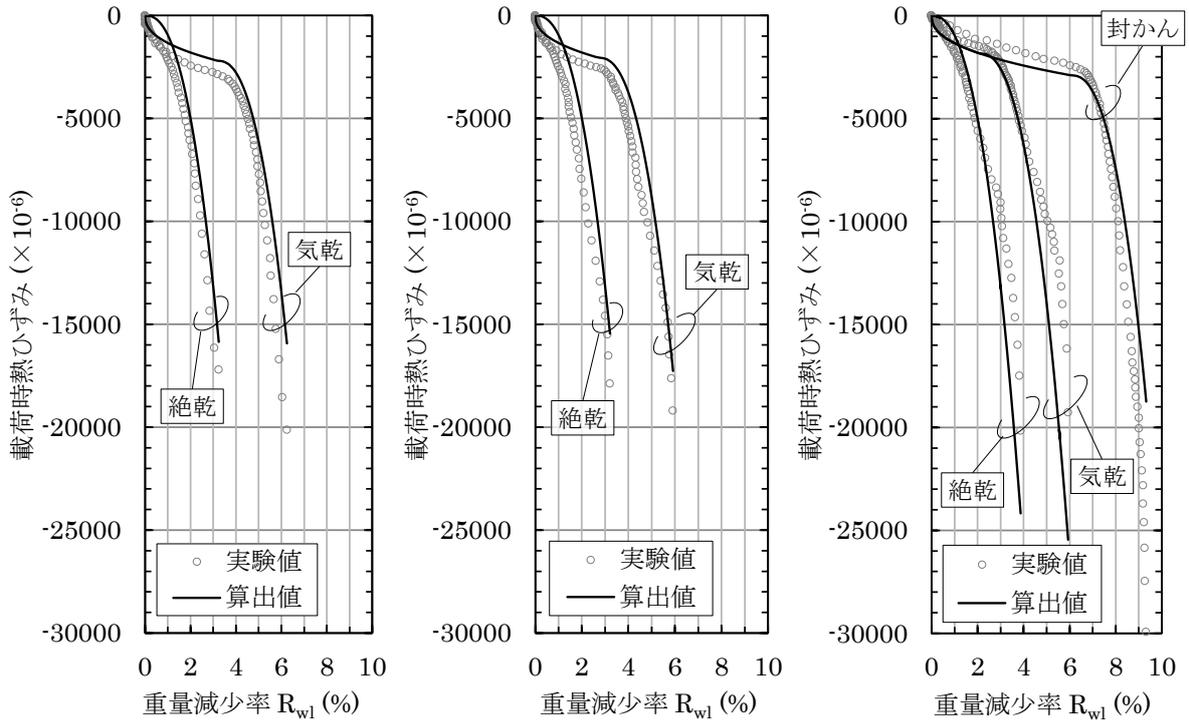


図 4.16(3)  载荷時熱ひずみの実験値と算出値の比較(応力レベル 0.5)

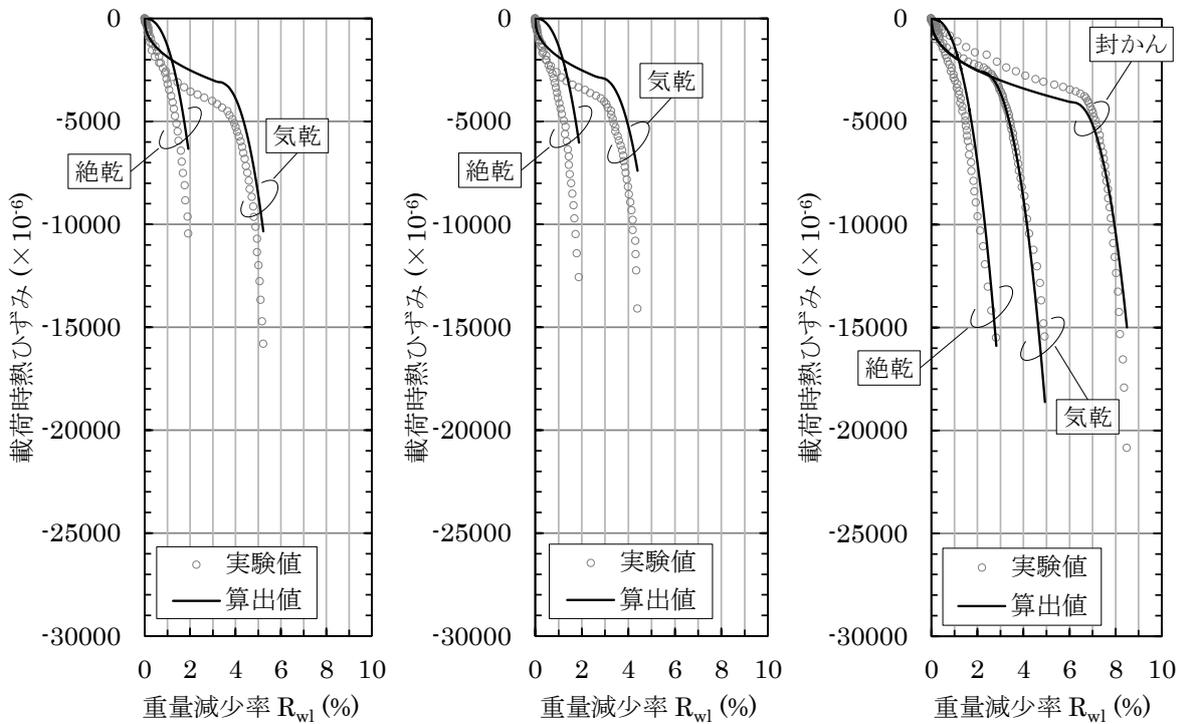


図 4.16(4)  载荷時熱ひずみの実験値と算出値の比較(応力レベル 0.7)

#### 4.7 まとめ

本章では、コンクリートの養生条件および水セメント比が荷重時熱ひずみに及ぼす影響を、加熱速度 1.5°C/分の全ひずみ実験によって検討した。また、実験から得た荷重時熱ひずみと、2章の重量減少測定実験から得た試験体の重量減少率の関係を数式化した。以下に本研究から得られた知見を示す。

- ・コンクリート中の蒸発性水分の蒸発が荷重時熱ひずみに及ぼす影響は、100°C～200°Cにおいて顕著であった。
- ・水セメント比が 65%の封かん試験体の荷重時熱ひずみは、200°C以降、同じ水セメント比の気乾試験体よりも大きかった。
- ・水セメント比の違いによる荷重時熱ひずみへの影響は、200°C程度から表れ、水セメント比が小さくなると荷重時熱ひずみは大きくなった。
- ・応力レベルが 0.1～0.7 の範囲で、荷重時熱ひずみは、養生条件や水セメント比によらず応力レベルに比例して増加した。
- ・荷重時熱ひずみへの影響は、蒸発性水分の蒸発よりも、200°Cから始まるセメント水和物の脱水および分解による方が著しく大きかった。
- ・以上の結果を踏まえ、荷重時熱ひずみを、試験体の重量減少率を要因とした式で表し、従来とは異なる数式モデルを提案した。

#### 第4章の参考文献

- 1) Gavriel A. Koury, Brian N. Grainger, Patrick J.E. Sullivan: Strain of concrete during first heating to 600°C under load, Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.133, pp.195-215, 1985.12
- 2) 松戸正士, 森田武, 遊佐秀逸, 野口貴文, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 道越真太郎, 起橋孝徳, 唐沢智之, 中瀬博一, 加藤雅樹: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した鉄筋コンクリート造柱試験体の耐火実験: その2 軸方向変位および部材温度測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集材料施工, pp.1121-1122, 2012
- 3) Eurocode 2: Design of concrete structures Part1-2: General rules- Structural fire design, The European Standard EN1992-1-2, p.26, 2004
- 4) 右田周平, 平島岳夫, 前田孝一: 高強度コンクリートの高温時力学的特性に及ぼすポリプロピレン繊維および水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1126-1131, 2012
- 5) 山下平祐, 平島岳夫, 吉田徹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その4.コンクリートの高温時全体ひずみに与える水分の影響-, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.1-7, 2015
- 6) Z.P. Bazant, J.C. Chern: Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism, Materials and Structures, Vol.18, No.103, pp. 1-20, 1985
- 7) Gavriel A. Koury, Brian N. Grainger, Patrick J.E. Sullivan: Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.132, pp.131-144, 1985.9
- 8) Hassen Sabeur, Fekri Meftah: Dehydration creep of concrete at high temperatures, Materials and Structures, pp.17-30, 2008
- 9) Jin Tao, Xian Liu, Yong Yuan, Luc Taerwe: Transient strain of self-compacting concrete loaded in compression heated to 700°C, Materials and Structures, pp.191-201, 2013
- 10) 吉田徹, 山下平祐, 平島岳夫: 火災加熱を受けるコンクリートの重量減少, 日本建築学会大会学術講演梗概集 防火, pp.67-68, 2015.9
- 11) A. M. Neville: Properties of Concrete, Person Education Limited, 2002
- 12) 豊田康二, 山下平祐, 石田良平, 近藤悟, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 井上超, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究, その1.定常温度下における高温圧縮試験, 構造工学論文集, Vol49B, pp.367-374, 2003.3

- 13) Jean-Christophe Mindeguia, Izabela Hager, Pierre Pimienta, Helene Carre, Christian La Borderie: Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, pp.40-52, 2013
- 14) Schneider U.: Concrete at High Temperatures – A general Review, *Fire Safety Journal*, 1988, 13, No1, pp.55-68
- 15) D. Gawin, F. Pesavento, B.A.Schrefler: Modelling of deformation of high strength concrete at elevated temperatures, *Materials and Structures*, pp.218-236, 2004
- 16) Mohamad J. Terro: Numerical Modeling of the Behavior of Concrete Structures in Fire, *ACI Structural Journal*, pp.183-193, 1998

## 第 5 章 結論

5.1 研究の成果 . . . . . 81

5.2 今後の課題 . . . . . 82

## 5.1 研究の成果

本研究では、第1章で以下の目的を掲げた。

### (1) コンクリートの荷重時熱ひずみに及ぼす水分の影響に関する検討

知見が不足している、水セメント比が40%以上のコンクリートの荷重時熱ひずみに及ぼす水分の影響を定量的に把握するため、全ひずみ実験と重量減少測定実験を、試験体の養生条件（気中養生、105℃での事前乾燥、封かん養生）と水セメント比（40%、50%、65%）を実験条件として実施する。

### (2) 水分の影響を包括的に評価できる荷重時熱ひずみモデルの提案

荷重時熱ひずみと試験体の重量減少率の関係を検討し、従来の温度に基づく数式モデルとは異なり、セメント水和物の脱水・分解反応に基づくことで水分の影響を包括的に評価できる、荷重時熱ひずみの数式モデルを提案する。

本研究で得られた主要な成果を以下に示す。

第2章「試験体の諸元」では、本研究で使用する試験体の含水率を含む諸元を示すと共に、全ひずみ実験と同じ加熱速度で800℃まで加熱した際に生じる重量減少を定量化した。

- ・セメント水和物の脱水による重量減少は250℃～500℃にかけて表れ、その減少量は、試験体が含有するセメント水和物の量に依存することを明らかにした。

第3章「応力ひずみ関係に及ぼす水分の影響」では、本研究で使用する試験体の高温時における力学的特性を把握すると共に、高温時力学的特性に及ぼす水分の影響に関する知見を蓄積した。

- ・100℃におけるコンクリートの圧縮強度の低下は、蒸発性水分の蒸発により生じることを明確に示した。
- ・600℃以上になると、水セメント比によらずコンクリートの圧縮強度は同等になるため、常温時強度の大きいコンクリートほど高温時における強度残存率は小さくなることを明らかにした。

第4章「荷重時熱ひずみに及ぼす水分の影響」では、荷重時熱ひずみに及ぼす水分の影響を全ひずみ実験の実施によって検討した。また、荷重時熱ひずみと重量減少率の関係を数式化した。

- ・荷重時熱ひずみは、蒸発性水分の蒸発よりも、セメント水和物の脱水・分解反応に大き

く依存する収縮ひずみであることを明らかにした。

- 載荷時熱ひずみが応力度に概ね比例する現象が、コンクリートの短期許容応力に相当する応力レベル 0.7 の範囲まで確認された。
- 載荷時熱ひずみと試験体の重量減少率の関係は、試験体の養生条件や水セメント比によらない、水分の影響を包含した関係になることが分かった。この関係に基づき、水分の影響を包括的に評価できる載荷時熱ひずみの数式モデルを以下のように提案した。

$$LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b) = 3.4 \cdot \sigma/\sigma_b \cdot LITS(R_{wb}, 0.3)$$

$$LITS(R_{wb}, 0.3) = -785 \times R_{wl}^{0.43} \times 10^{-6} \quad [R_{wl} \leq R_{wc} \text{ の場合}]$$

$$LITS(R_{wb}, 0.3) = (-785 \times R_{wc}^{0.43} - 560 \times (R_{wl} - R_{wc})^{2.39}) \times 10^{-6} \quad [R_{wl} > R_{wc} \text{ の場合}]$$

$R_{wl}$  : 重量減少率(重量減少の初期重量に対する百分率),  $R_{wc}$  : 含水率(%)

$\sigma$  : 載荷応力(N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_b$  : 常温時圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),

$LITS(R_{wb}, \sigma/\sigma_b)$  : 重量減少率= $R_{wb}$ , 応力レベル  $\sigma/\sigma_b$  における載荷時熱ひずみ

## 5.2 今後の課題

本研究における今後の課題を以下に示す。

- (1) 本研究で提案した載荷時熱ひずみの数式モデルの妥当性について、より詳細な検討を行う必要がある。そのため、本研究の一環で実施した変位拘束実験（試験体の変位を拘束した状態で全ひずみ実験と同じ加熱を行った際に生じる熱応力を測定する実験）について、提案数式モデルを用いた熱応力解析を行い、実験結果と解析値の比較分析を行う。

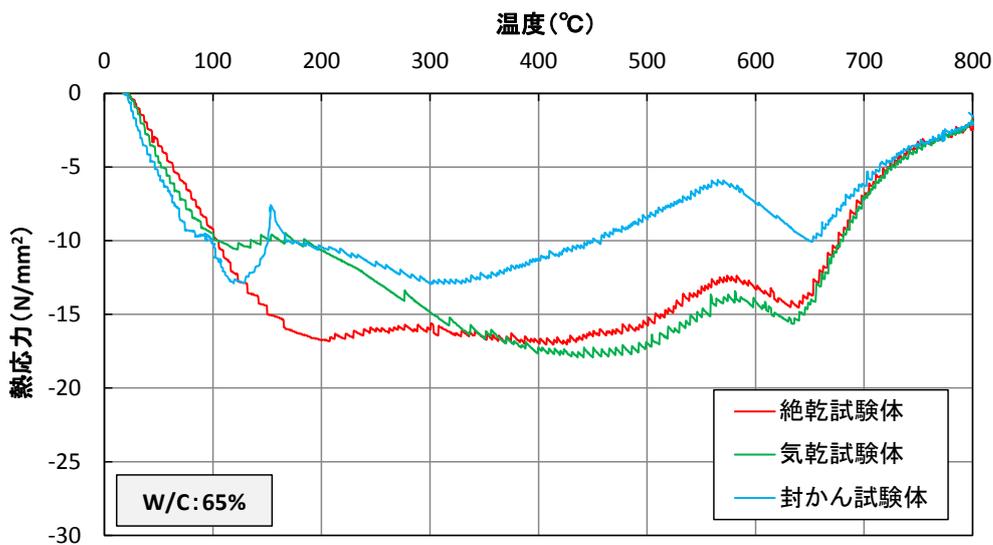


図 5.1 変位拘束実験の実験結果（水セメント比：65%）

(2)本研究で提案した数式モデルを、より汎用的なものとするためには、以下の検討が必要である。

- ・水セメント比が40%未満のコンクリートへの適用性。
- ・加熱速度が異なる条件下で生じる荷重時熱ひずみへの適用性。
- ・試験体の温度と重量減少率の関係の数式モデル化。

(3)本研究では、水セメント比65%の封かん試験体と気乾試験体では、高温時応力ひずみ関係、荷重時熱ひずみ、および試験体重量減少の結果に大きな差が見られるという、既往の研究とは異なる知見が得られた。養生方法の違いが及ぼす影響のメカニズムについては、水セメント比が異なるコンクリートについても封かん試験体の実験を行うなど、より詳細な検討が必要である。



資料編 実験データシート

- ・重量減少測定実験 . . . . . 資 2～資 15
- ・定常温度圧縮実験 . . . . . 資 16～資 112
- ・温度分布測定実験 . . . . . 資 113～資 115
- ・全ひずみ測定実験 . . . . . 資 116～資 145

・実験データシートに関する説明

ここに示す実験データシートは、実験手順が把握できるように、各実験の計測データ（重量減少、荷重、変位、試験体温度）を1頁毎にまとめたものである。各実験の実験方法については、本編に示す。

- ・重量減少測定実験の実験方法：2.7.1 重量減少測定実験 (p.24)
- ・定常温度圧縮実験の実験方法：3.3 実験装置 (p.35), 3.4 実験方法 (p.38)
- ・温度分布測定実験, 全ひずみ測定実験の実験方法：  
3.3 実験装置 (p.35), 4.2 全ひずみ実験の概要 (p.49)

なお、実験前後の試験体重量は電子天秤で測定したものである。また、試験体温度の凡例は、以下の様に示した。

- ・  $T_3(6, 20)$ 
  - ↑ 測定位置 (試験体上端からの距離)
  - ↑ 測定位置 (試験体表面からの深さ)
  - ↑ 測定位置番号(図 2.8, 図 3.4, 図 4.2 参照)

実験名：W-40A-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/23

重量測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：420日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.5×150.0mm  
 重量：[実験前] 1519.0gf  
 [実験後] 1405.0gf

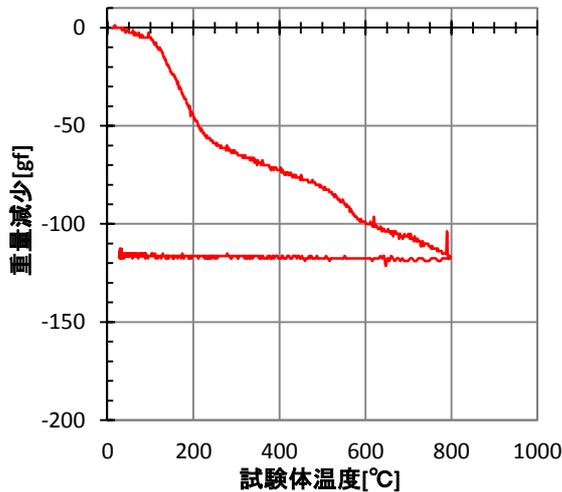
重量減少率  
 7.50%

温度測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：420日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×150.0mm  
 重量：[実験前] 1515.0gf  
 [実験後] 1397.0gf

重量減少率  
 7.79%

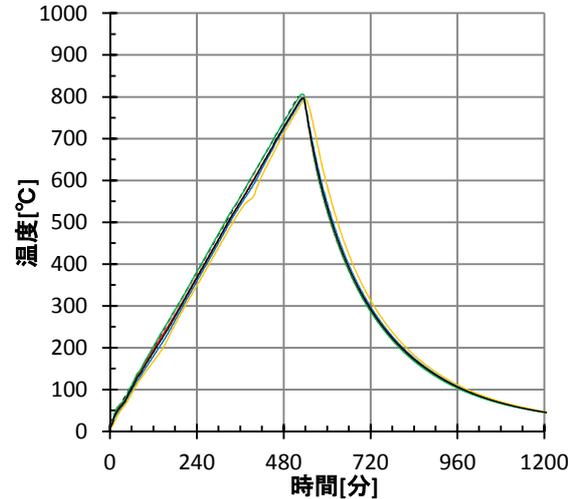
重量減少—温度 関係

— 重量減少



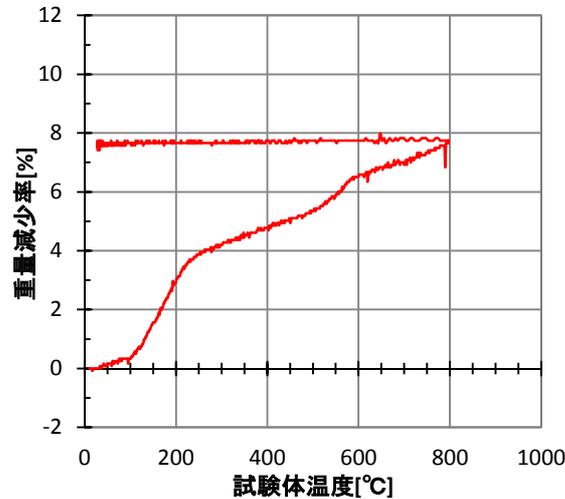
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



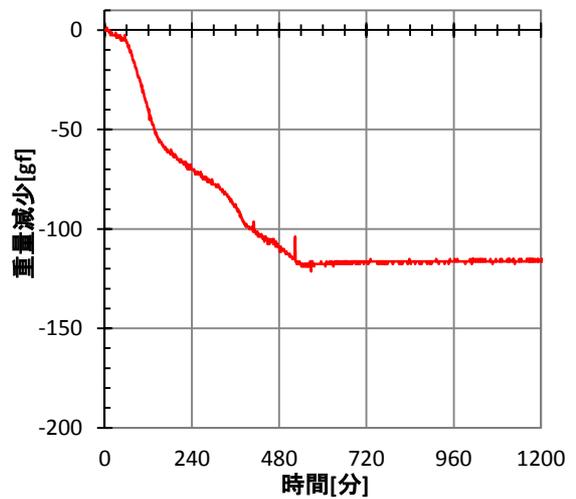
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



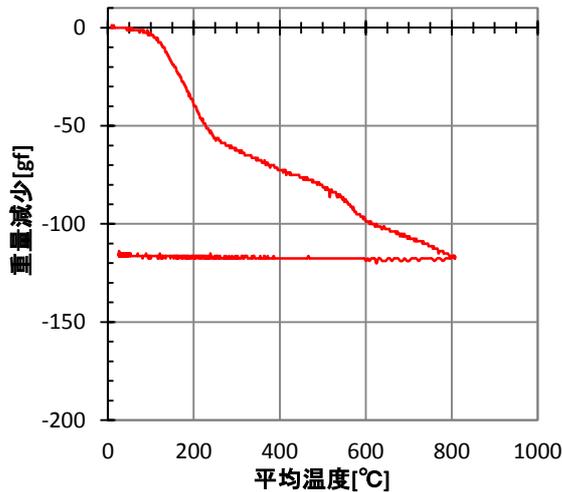
実験名：W-40A-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/20

重量測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：417日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.9×150.5mm  
 重量：[実験前] 1518.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1398.5gf (7.90%)

温度測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：417日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.2×147.9mm  
 重量：[実験前] 1506.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1392.5gf (7.54%)

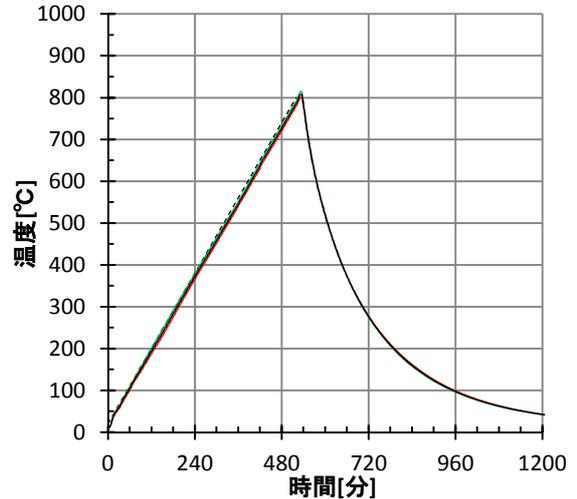
重量減少—温度 関係

— 重量減少



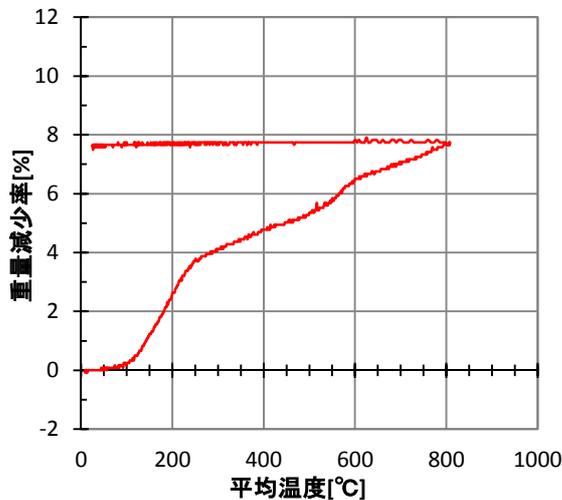
温度—時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(37.5, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_5$  の平均), --- 設定温度



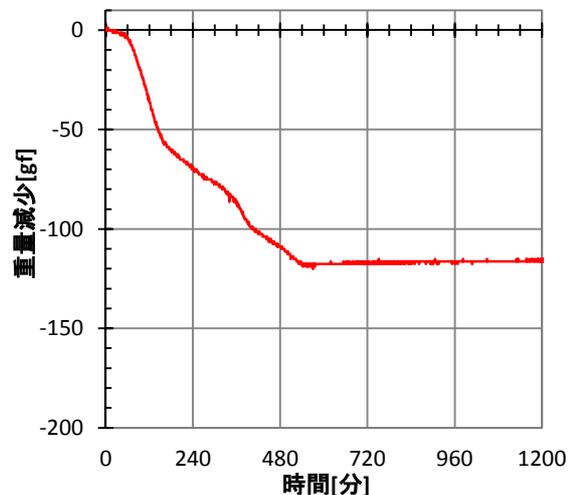
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



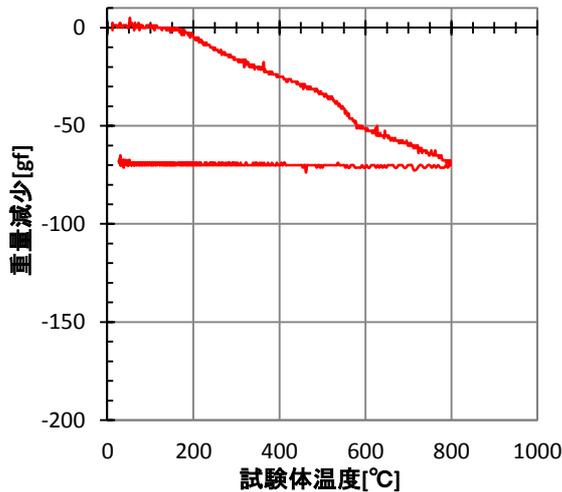
実験名：W-40D-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/24

重量測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：421日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.9×150.3mm  
 重量：[実験前] 1473.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1401.5gf (4.85%)

温度測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：421日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.9×150.3mm  
 重量：[実験前] 1471.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1401.0gf (4.76%)

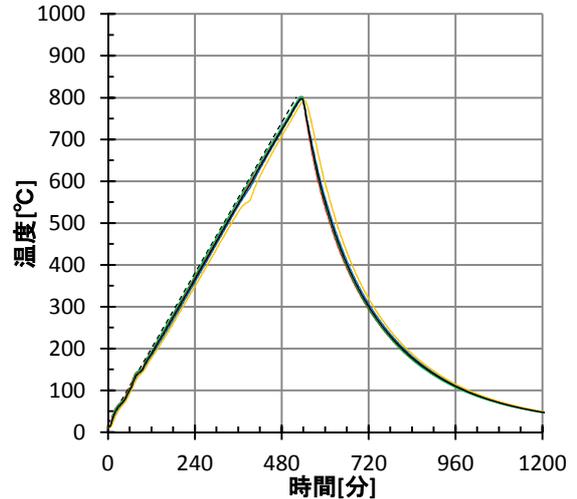
重量減少—温度 関係

— 重量減少



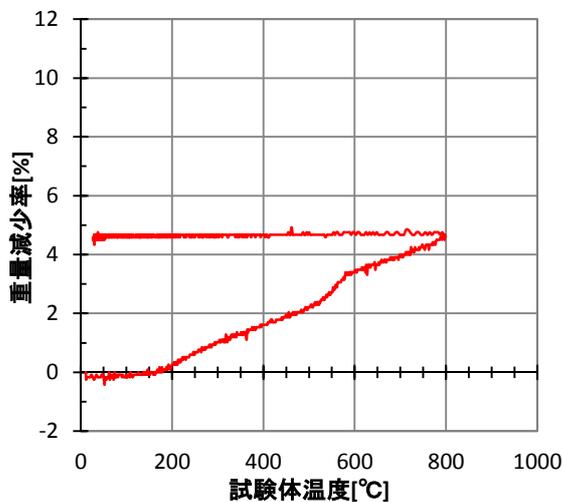
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



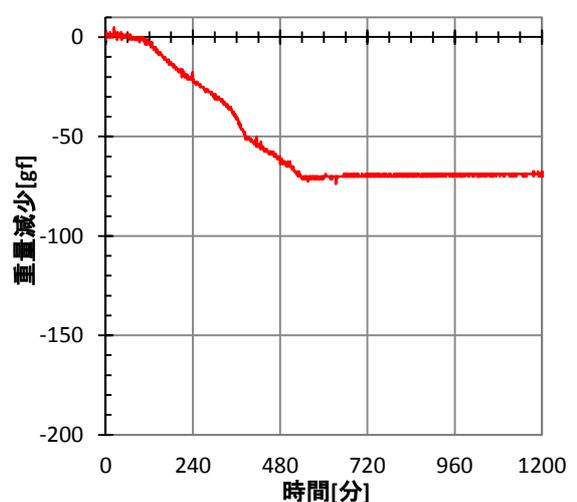
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-40D-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/12

重量測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：409日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.2×148.2mm  
 重量：[実験前] 1460.5gf  
 [実験後] 1389.0gf

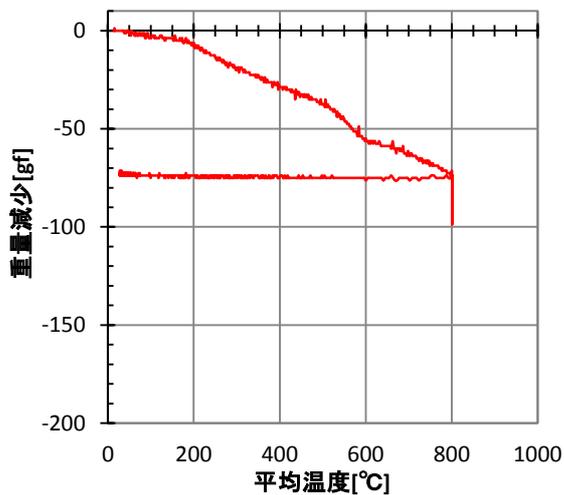
重量減少率  
 4.90%

温度測定用試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：409日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.5×150.7mm  
 重量：[実験前] 1479.5gf  
 [実験後] 1409.0gf

重量減少率  
 4.77%

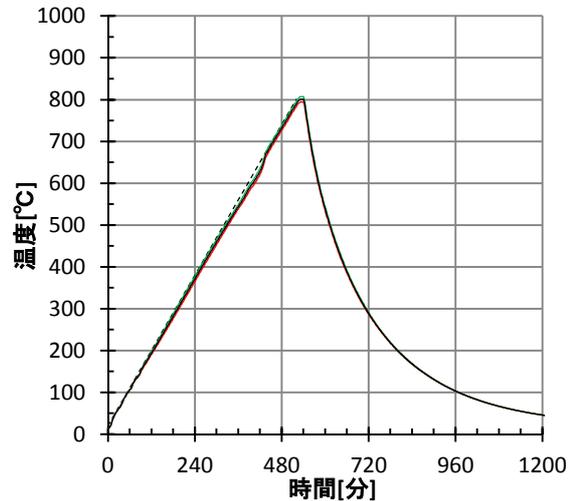
重量減少—温度 関係

— 重量減少



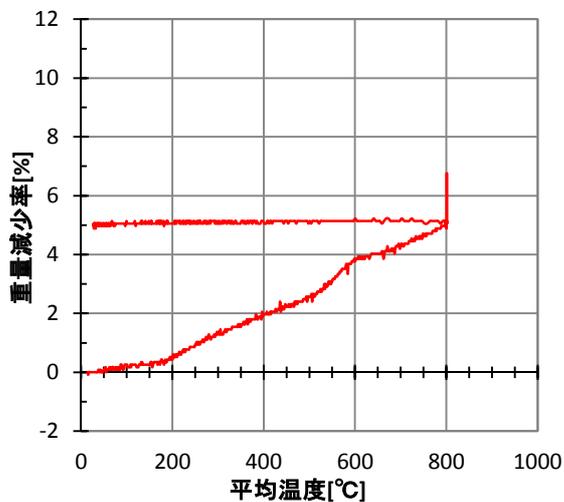
温度—時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(37.5, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_5$  の平均), --- 設定温度



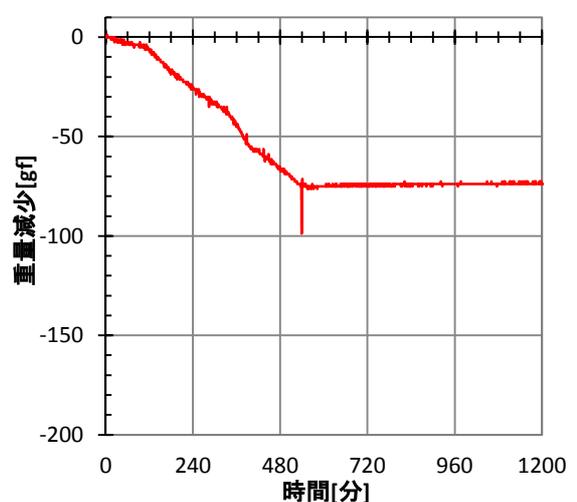
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-50A-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/20

重量測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：417日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×150.2mm  
 重量：[実験前] 1496.5gf  
 [実験後] 1391.5gf

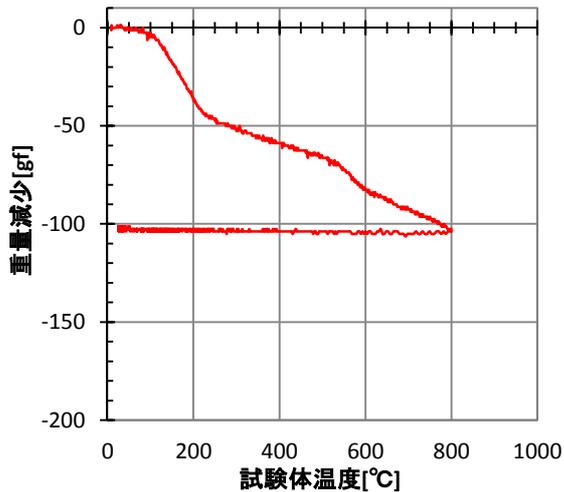
重量減少率  
 7.02%

温度測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：417日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.9×150.3mm  
 重量：[実験前] 1488.0gf  
 [実験後] 1382.0gf

重量減少率  
 7.12%

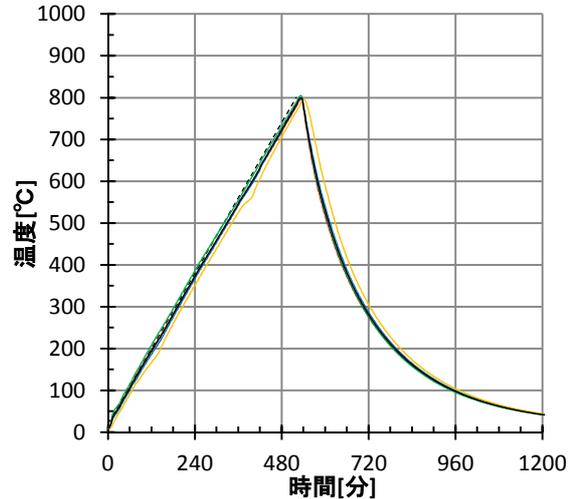
重量減少—温度 関係

— 重量減少



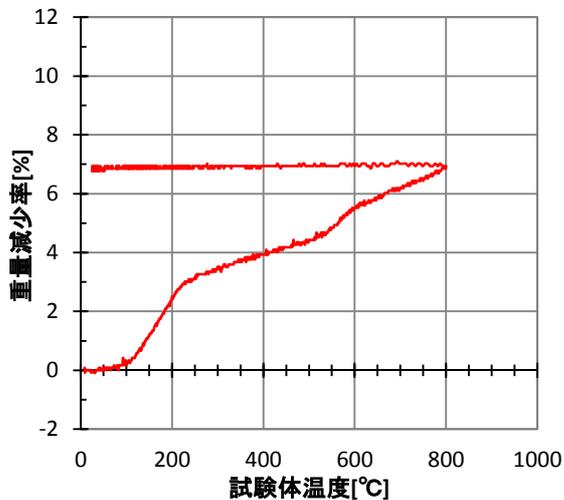
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



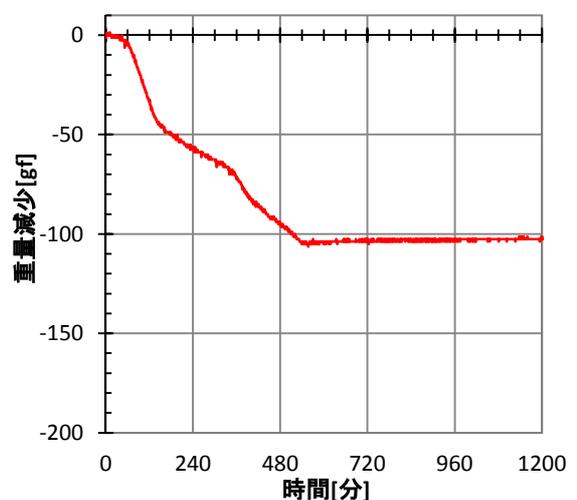
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-50A-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/9

※本実験では、実験中に重量測定用試験体が回転してしまい、重量減少を適切に測定できなかった。本実験後に試験体の吊り方を改良したことにより、その後の実験では適切な重量減少測定ができた。

重量測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：406日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.5×150.2mm  
 重量：[実験前] 1497.0gf  
 [実験後] 1392.5gf

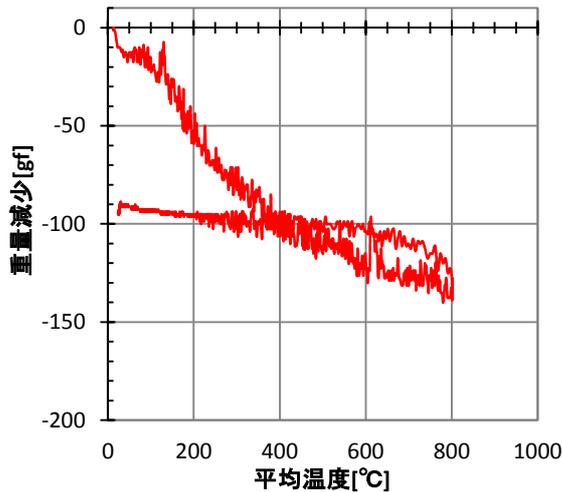
重量減少率  
 6.98%

温度測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：406日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.9×149.2mm  
 重量：[実験前] 1500.5gf  
 [実験後] 1395.5gf

重量減少率  
 7.00%

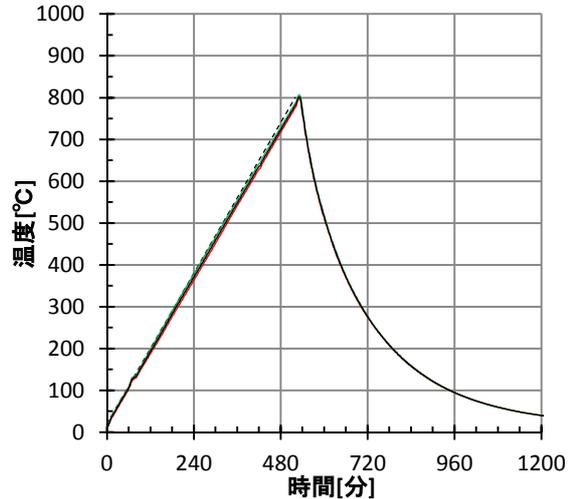
重量減少—温度 関係

— 重量減少



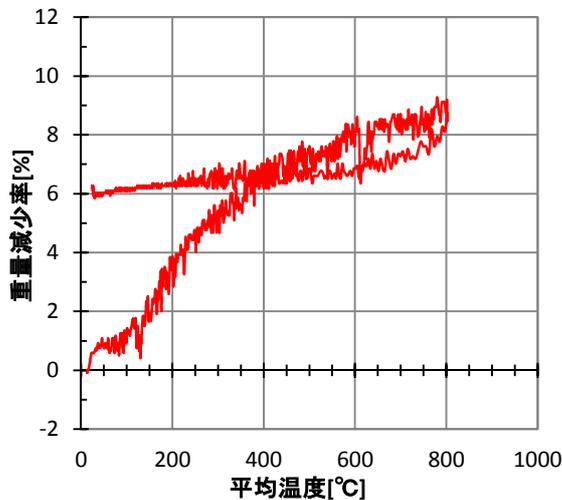
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



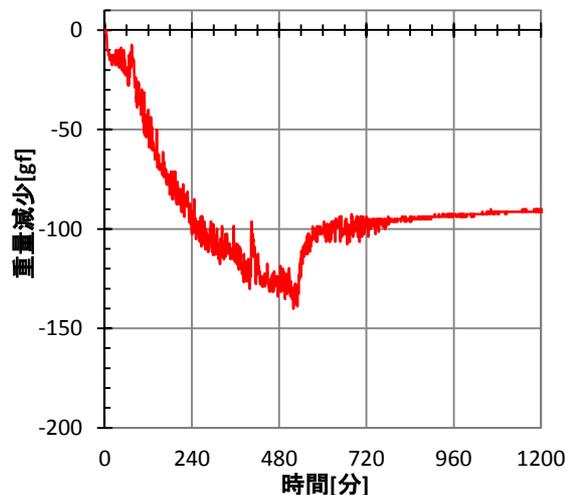
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率(重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-50D-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/11

重量測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：408日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.1×149.5mm  
 重量：[実験前] 1466.0gf  
 [実験後] 1396.0gf

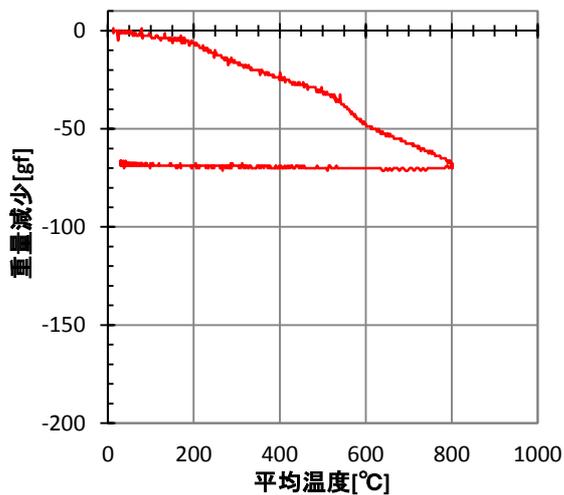
重量減少率  
 4.77%

温度測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：408日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×148.7mm  
 重量：[実験前] 1430.0gf  
 [実験後] 1366.5gf

重量減少率  
 4.44%

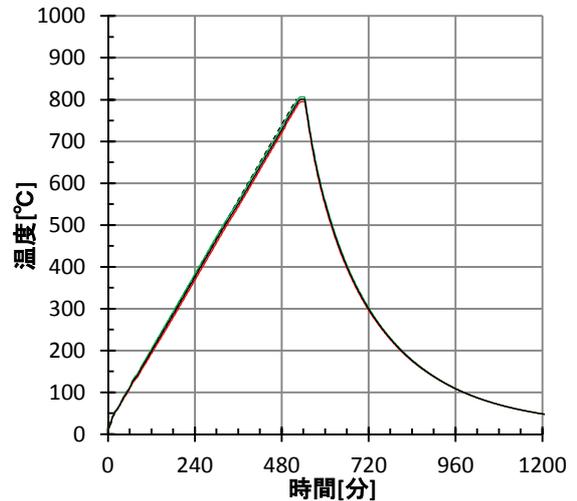
重量減少—温度 関係

— 重量減少



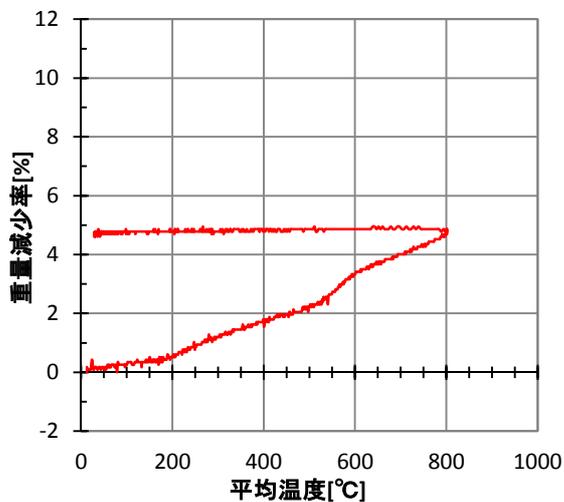
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



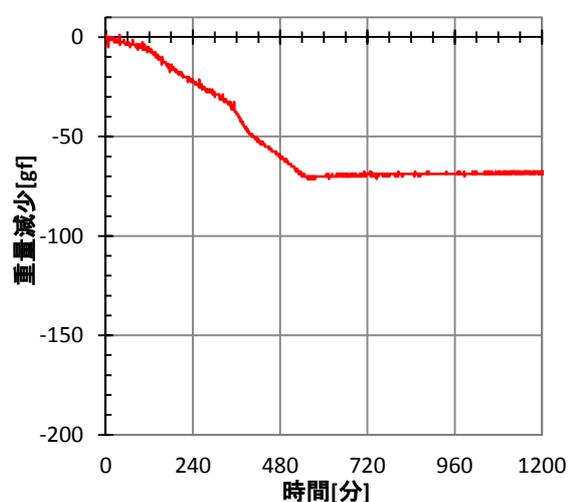
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-50D-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/24

重量測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：421日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×149.6mm  
 重量：[実験前] 1450.0gf  
 [実験後] 1384.5gf

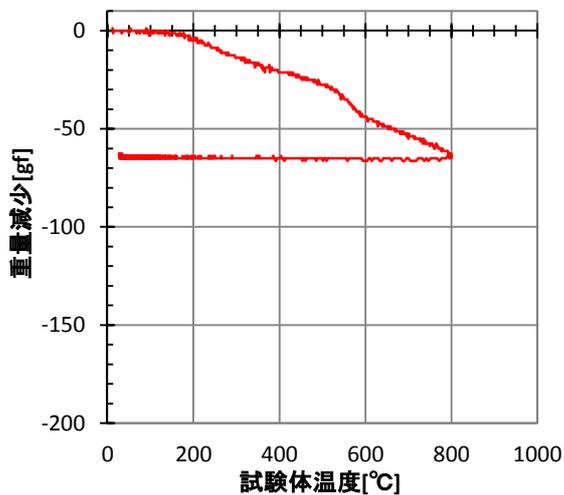
重量減少率  
 4.52%

温度測定用試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：421日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×149.1mm  
 重量：[実験前] 1479.5gf  
 [実験後] 1409.0gf

重量減少率  
 4.77%

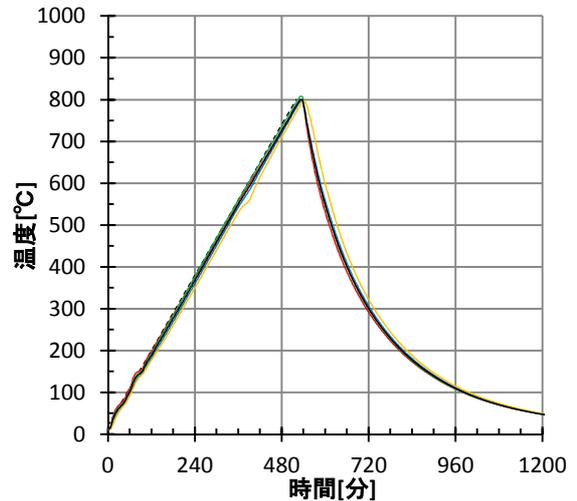
重量減少—温度 関係

— 重量減少



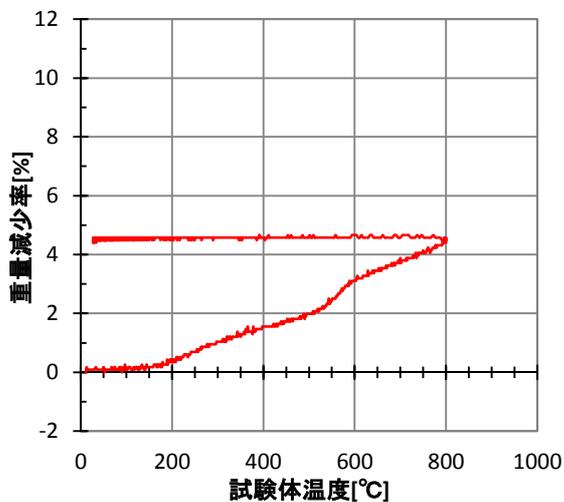
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



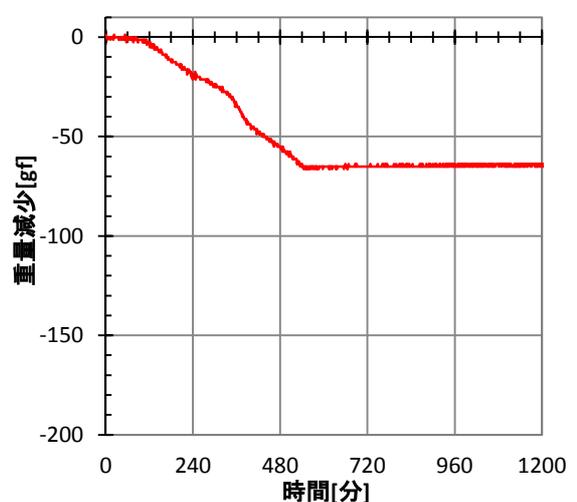
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-65A-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/9

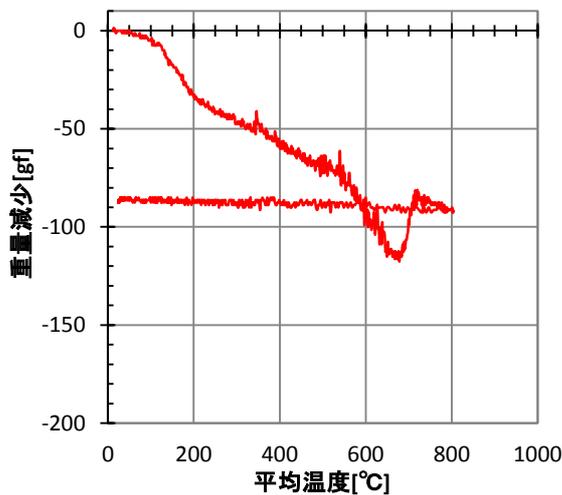
※本実験では、実験中に重量測定用試験体が回転してしまい、重量減少を適切に測定できなかった。本実験後に試験体の吊り方を改良したことにより、その後の実験では適切な重量減少測定ができた。

重量測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：411日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×151.5mm  
 重量：[実験前] 1490.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1400.0gf (6.04%)

温度測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：411日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.8×149.9mm  
 重量：[実験前] 1472.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1383.5gf (6.01%)

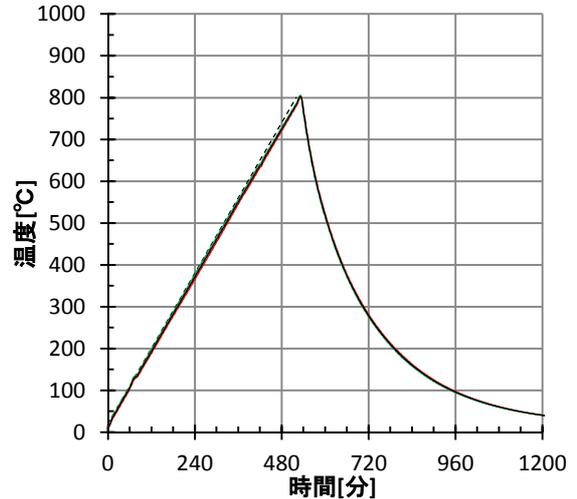
重量減少—温度 関係

— 重量減少



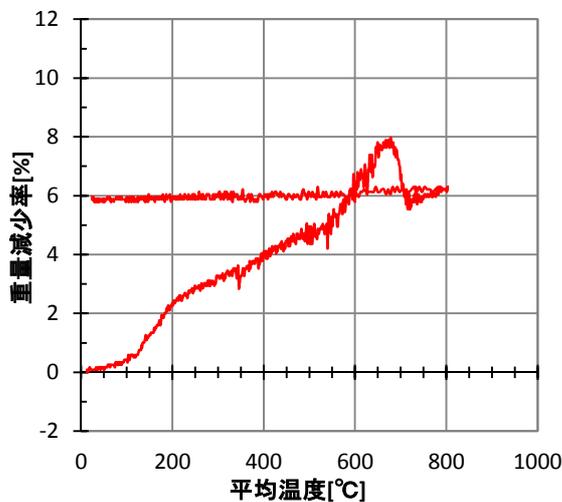
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



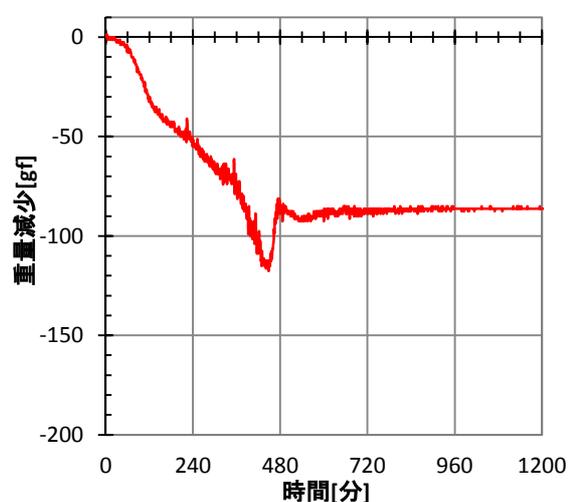
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率(重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



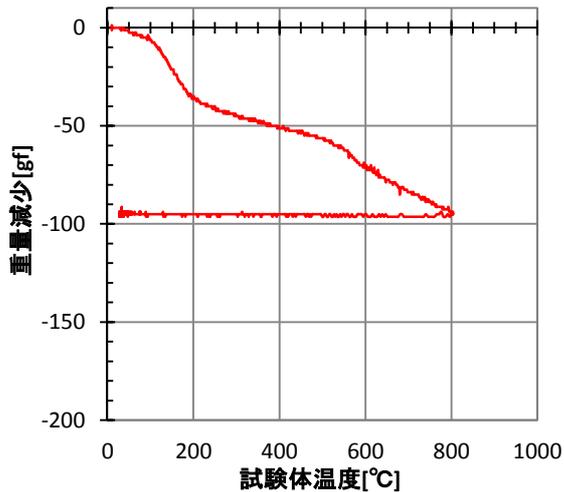
実験名：W-65A-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/23

重量測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：425 日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×150.2mm  
 重量：[実験前] 1476.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1383.0gf (6.30%)

温度測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：425 日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.9×149.7mm  
 重量：[実験前] 1465.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1375.0gf (6.14%)

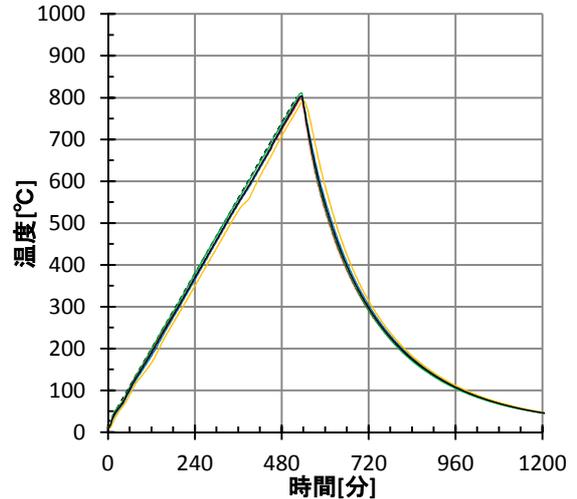
重量減少—温度 関係

— 重量減少



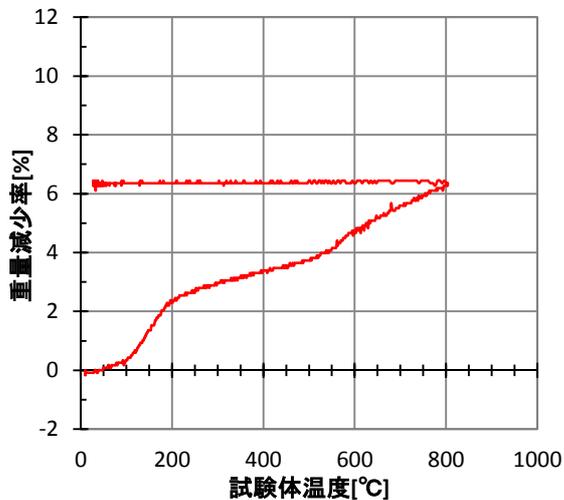
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



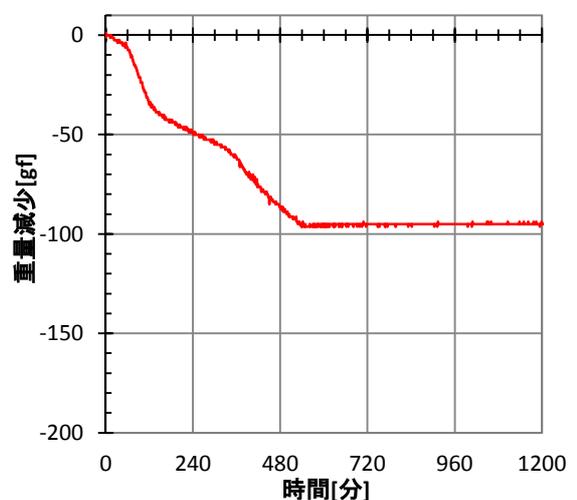
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



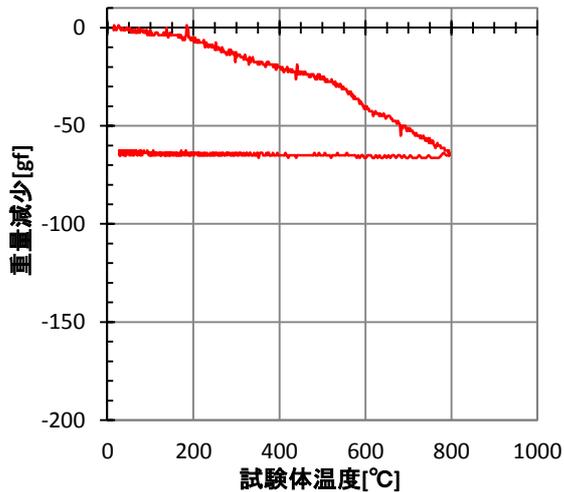
実験名：W-65D-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/12

重量測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：414 日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.3×150.9mm  
 重量：[実験前] 1454.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1394.0gf (4.16%)

温度測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：414 日 試験体番号：—  
 寸法：φ74.8×149.2mm  
 重量：[実験前] 1443.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1384.5gf (4.05%)

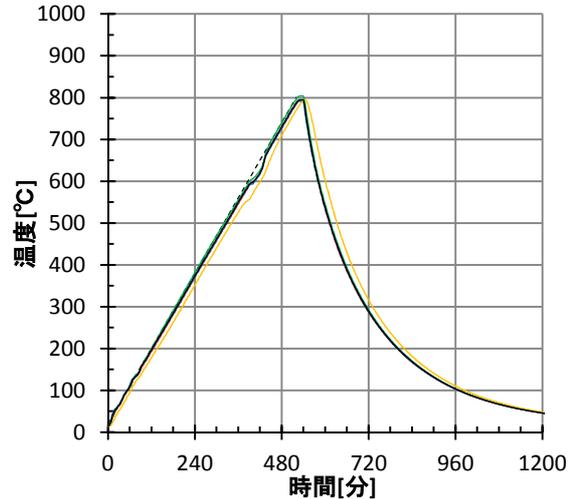
重量減少—温度 関係

— 重量減少



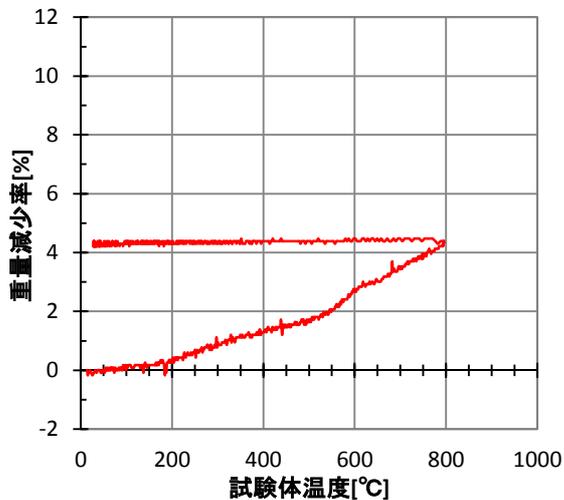
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



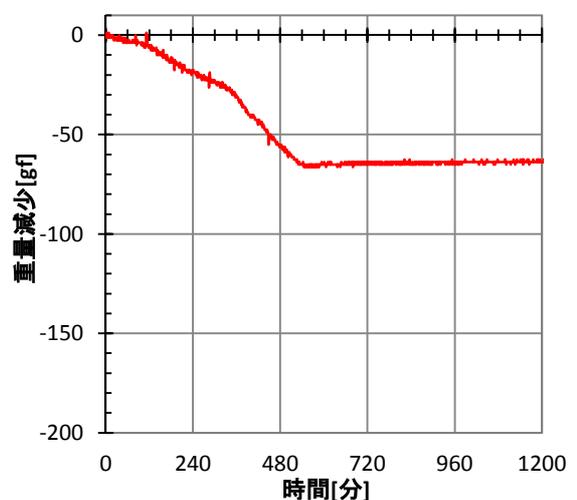
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：W-65D-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/11

重量測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：413日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×149.1mm  
 重量：[実験前] 1449.0gf  
 [実験後] 1393.0gf

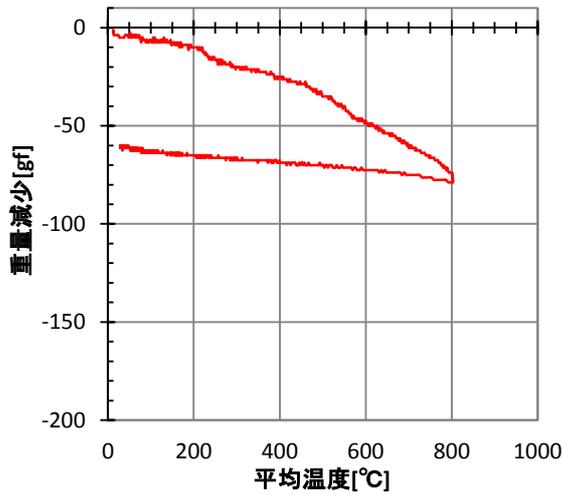
重量減少率  
 3.86%

温度測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：413日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.2×150.2mm  
 重量：[実験前] 1458.5gf  
 [実験後] 1399.5gf

重量減少率  
 4.05%

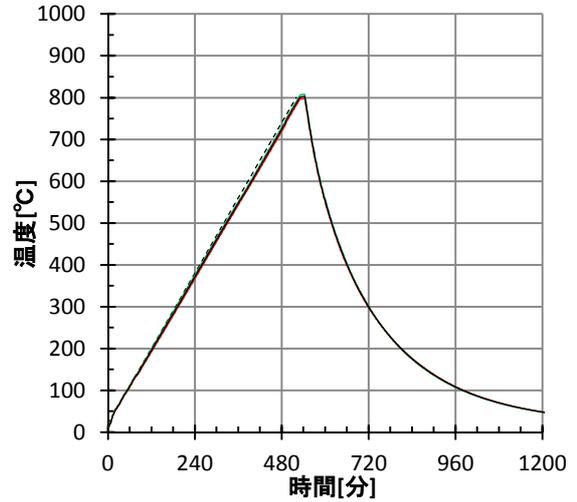
重量減少—温度 関係

— 重量減少



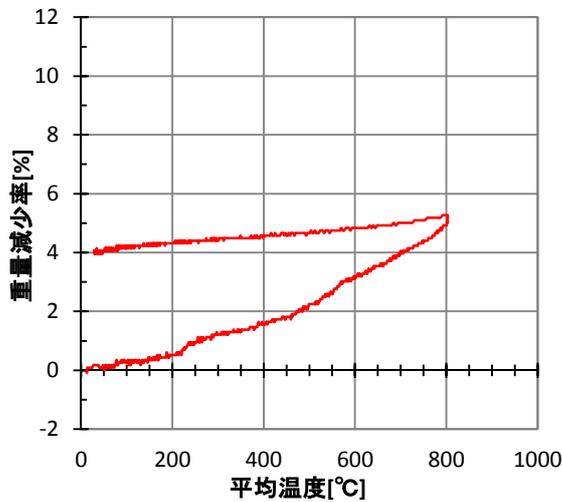
温度—時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(37.5, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_5$  の平均), --- 設定温度



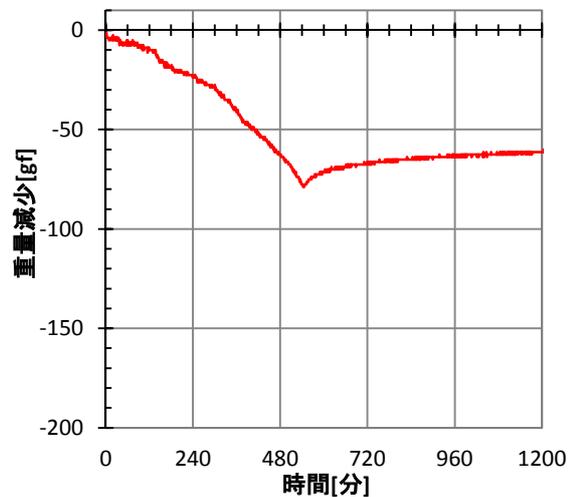
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



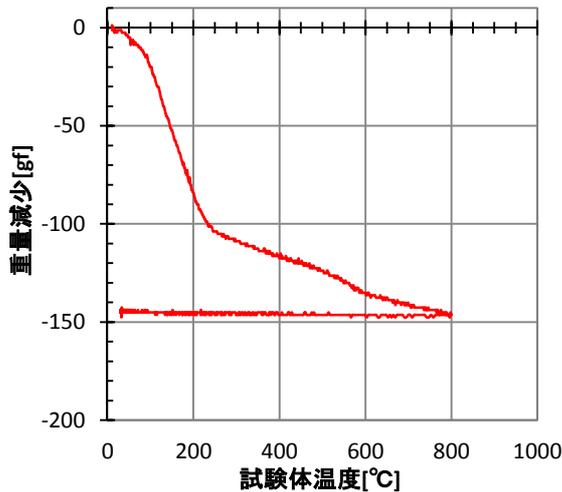
実験名：W-65S-1 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/21

重量測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：423 日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.4×149.4mm  
 重量：[実験前] 1535.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1390.0gf (9.45%)

温度測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：423 日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.1×150.5mm  
 重量：[実験前] 1537.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1390.5gf (9.53%)

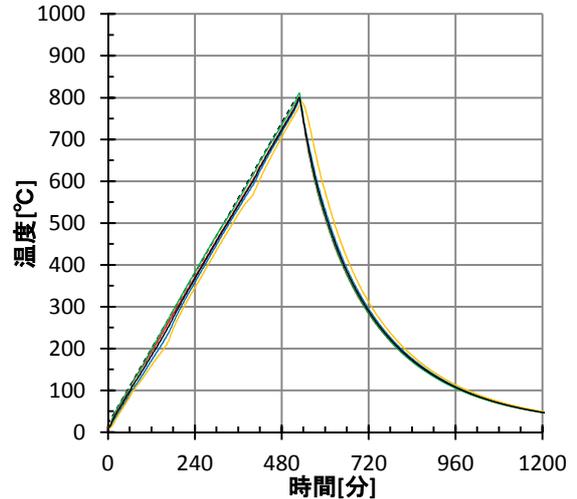
重量減少—温度 関係

— 重量減少



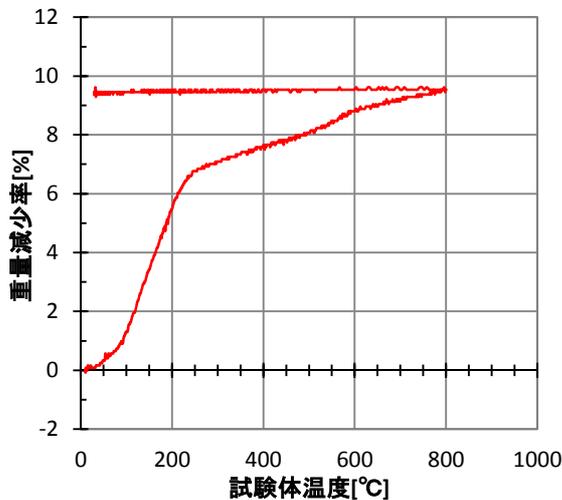
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



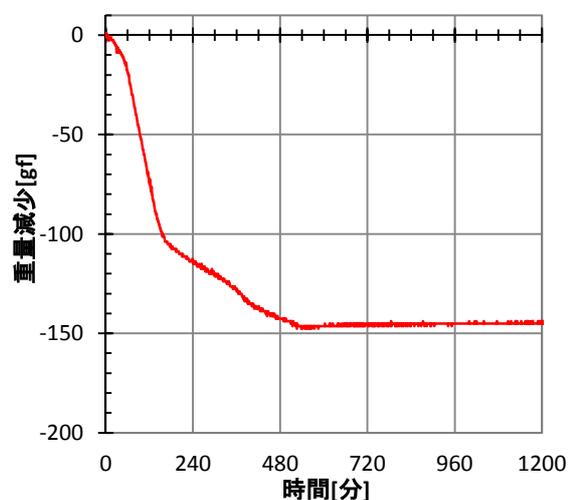
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



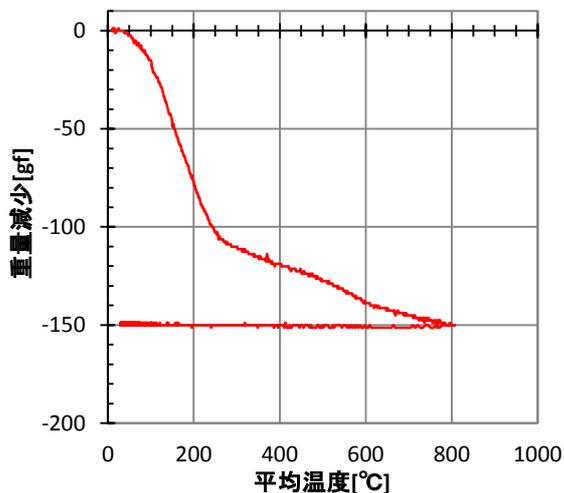
実験名：W-65S-2 [重量減少測定実験]  
 実施日：2014/12/21

重量測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：423 日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.1×151.2mm  
 重量：[実験前] 1538.5gf (重量減少率)  
 [実験後] 1387.0gf (9.85%)

温度測定用試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：423 日 試験体番号：—  
 寸法：φ75.0×150.7mm  
 重量：[実験前] 1529.5gf (重量減少率)  
 [実験後] 1378.5gf (9.87%)

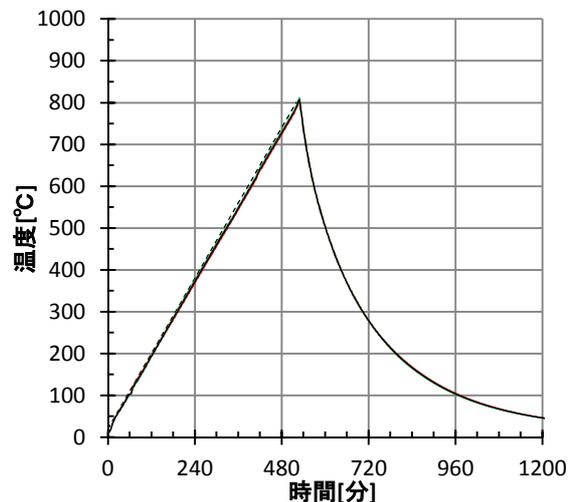
重量減少—温度 関係

— 重量減少



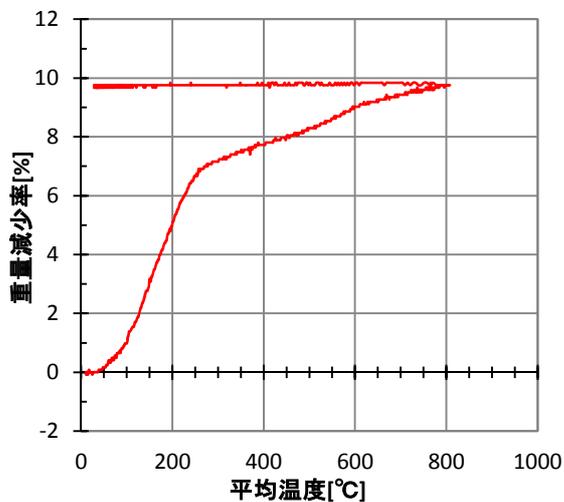
温度—時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(37.5, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>5</sub>の平均), --- 設定温度



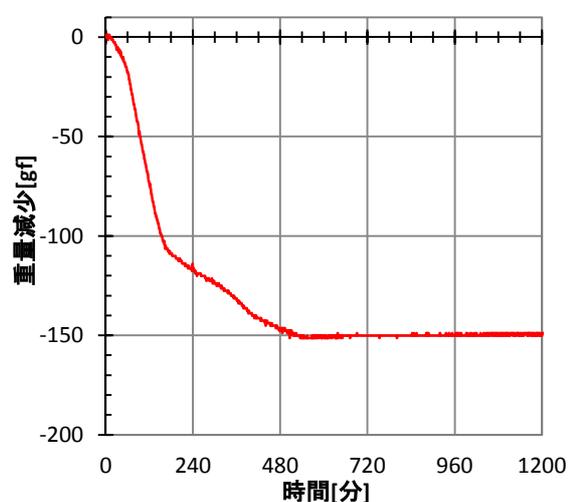
重量減少率—温度 関係

— 重量減少率 (重量減少/初期重量)



重量減少—時間 関係

— 重量減少



実験名：C-40A-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/24

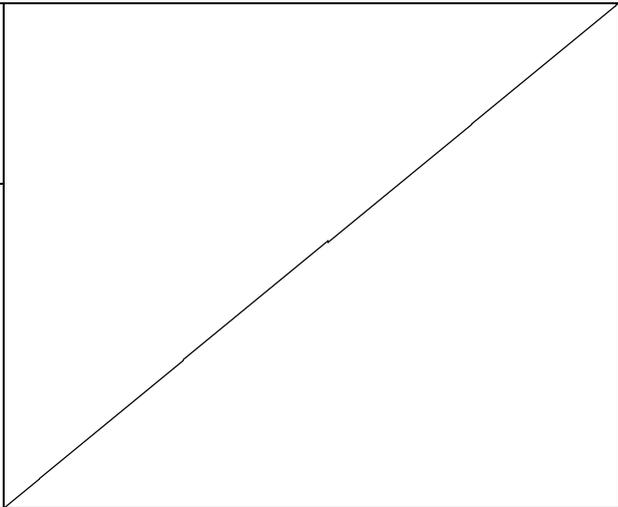
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：207日 試験体番号：40-4  
 寸法：φ74.7×150.0mm  
 重量：[実験前] 1525.3gf  
 [実験後] —



[実験前]

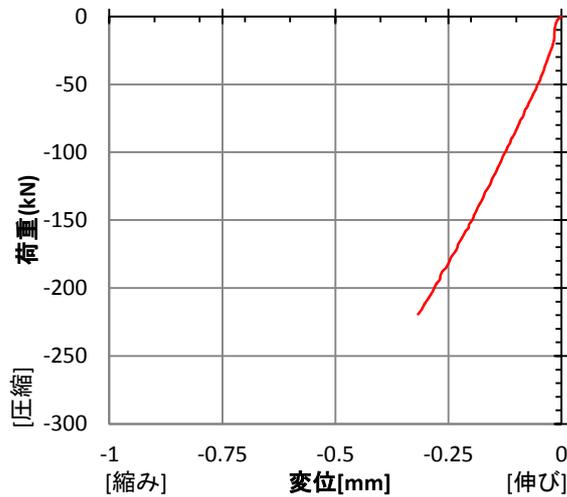


[実験後]



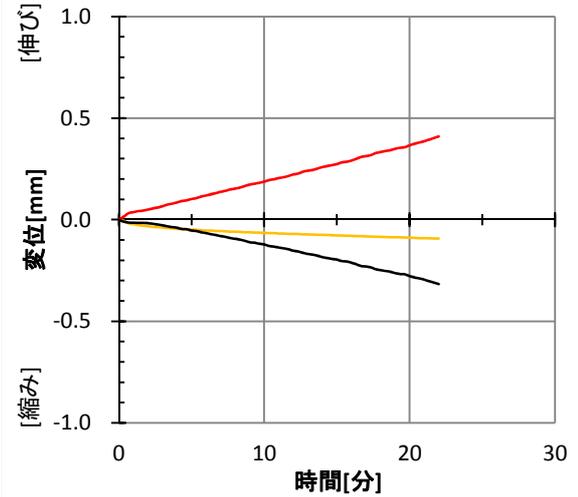
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



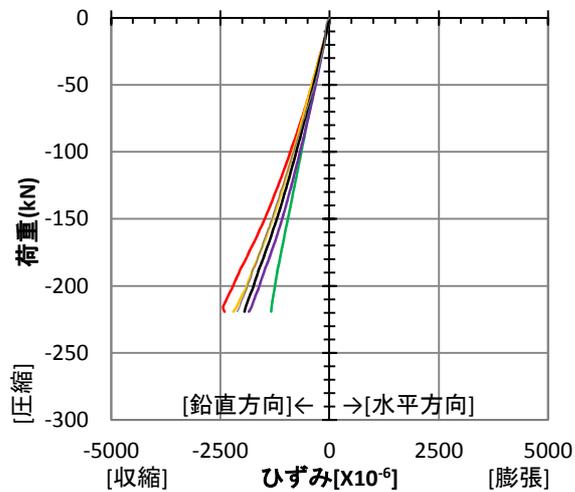
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



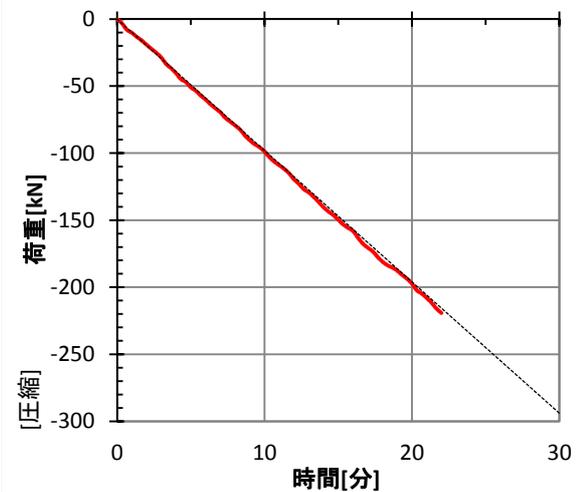
荷重-ひずみ 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/27

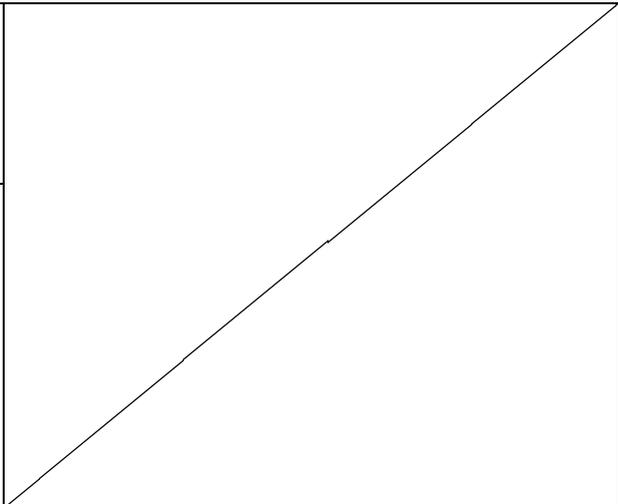
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：210日 試験体番号：40-5  
 寸法：φ74.9×149.8mm  
 重量：[実験前] 1517.7gf  
 [実験後] —



[実験前]

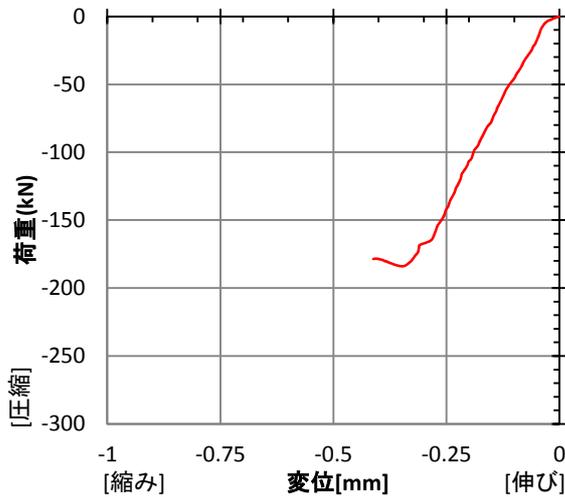


[実験後]



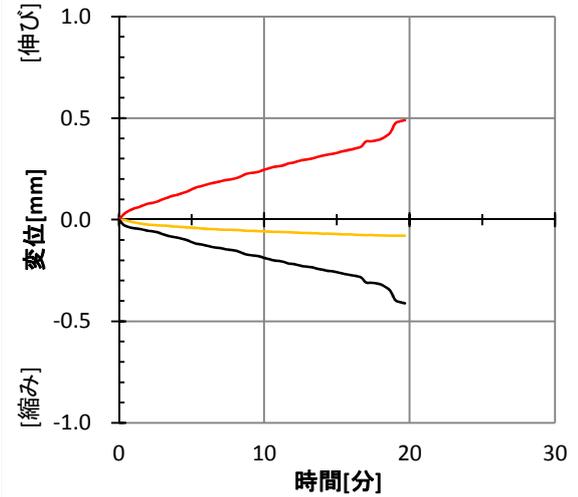
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



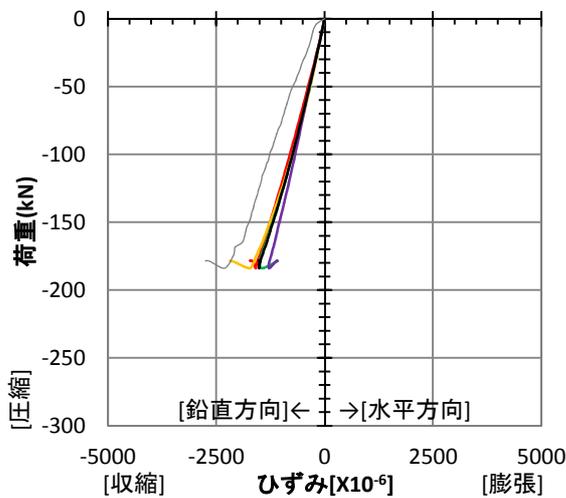
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



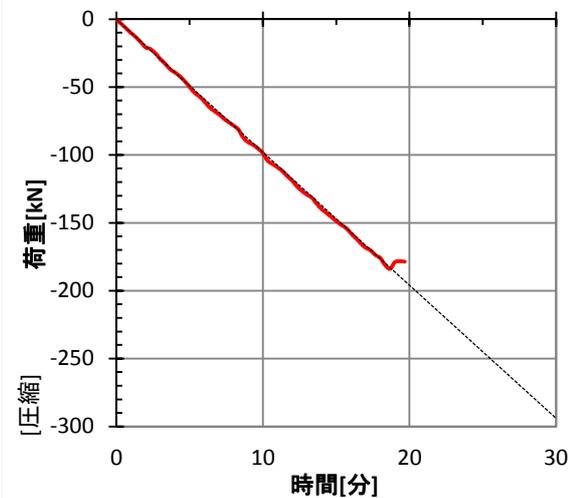
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-20-3 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/18

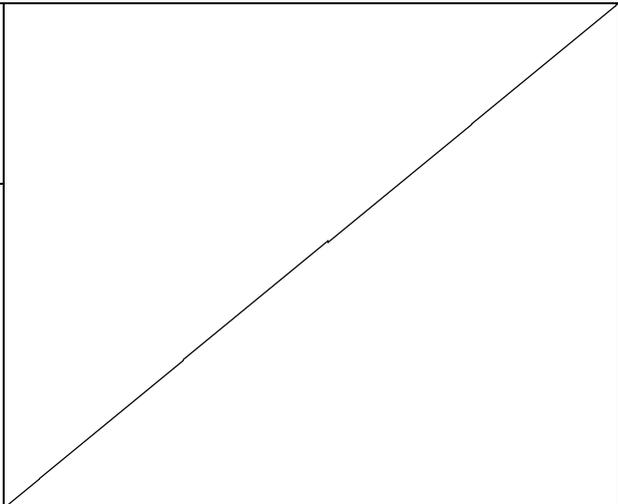
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：232日 試験体番号：40-8  
 寸法：φ75.0×149.5mm  
 重量：[実験前] 1510.6gf  
 [実験後] —



[実験前]

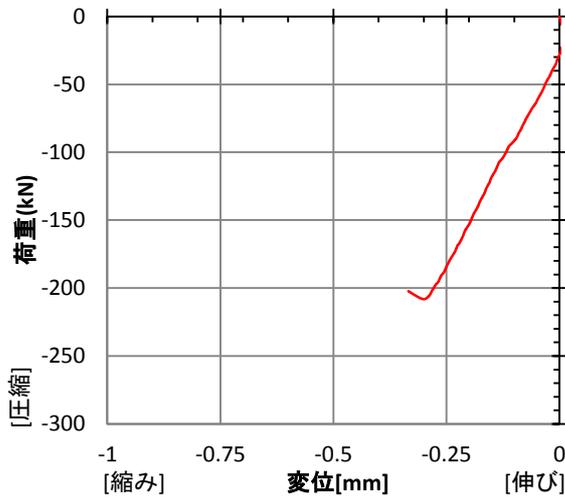


[実験後]



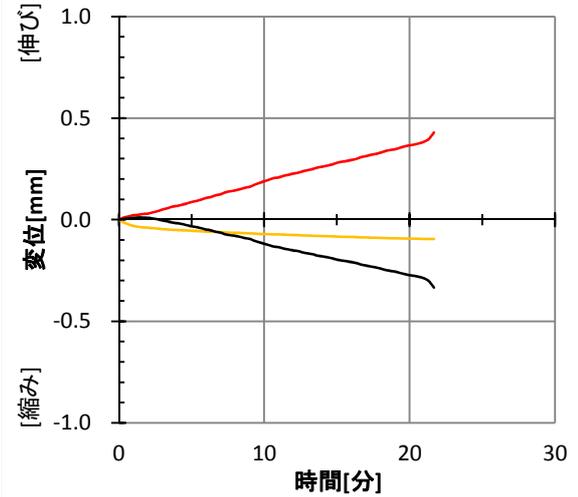
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



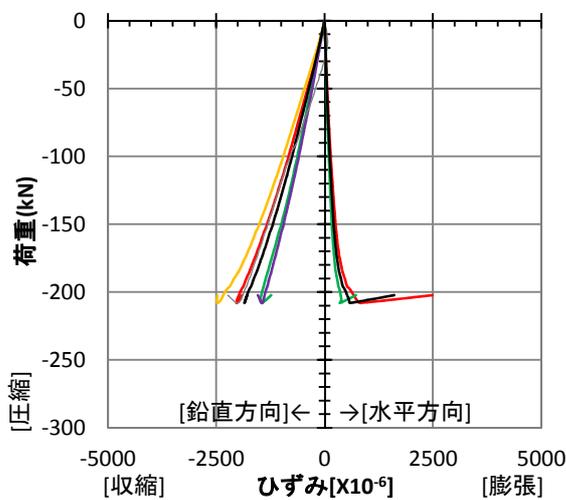
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



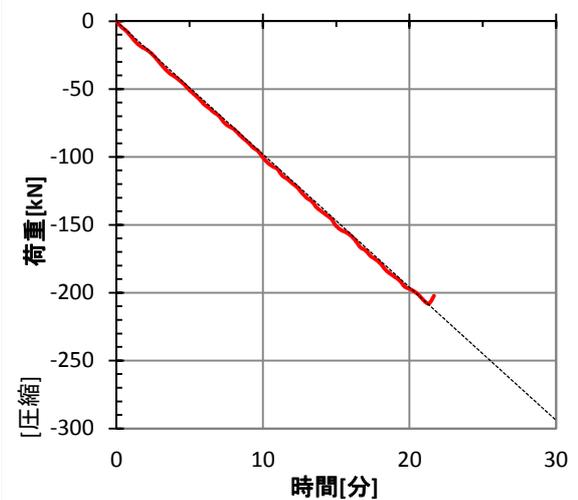
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-20-4 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/7/26

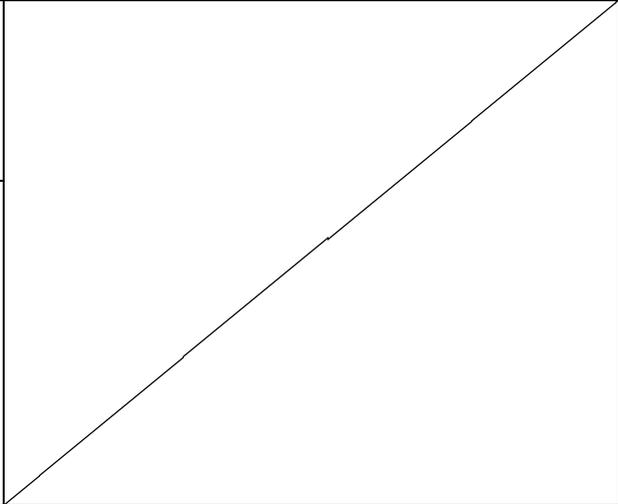
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：270日 試験体番号：40-9  
 寸法：φ74.8×149.6mm  
 重量：[実験前] 1520.3gf  
 [実験後] —



[実験前]

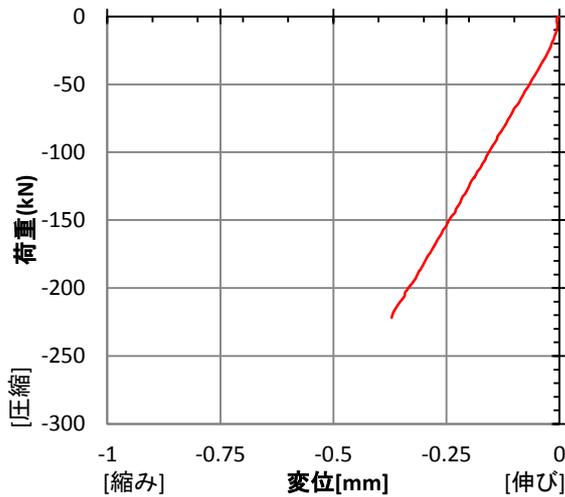


[実験後]



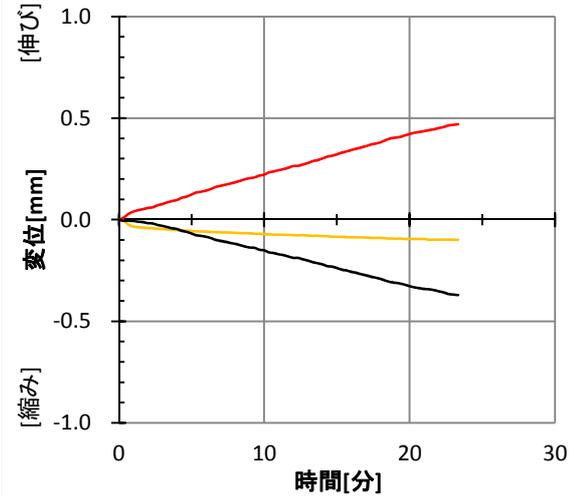
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



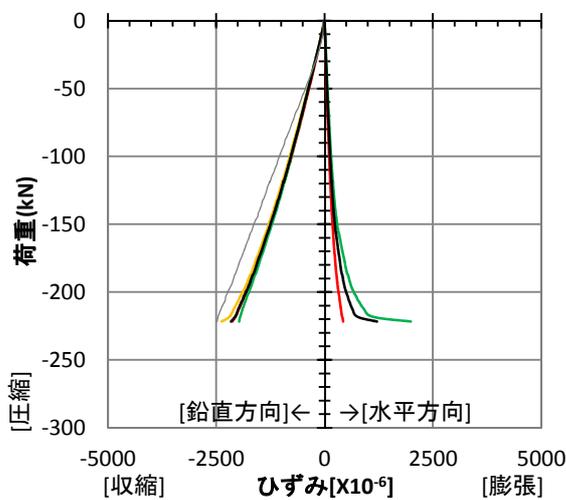
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



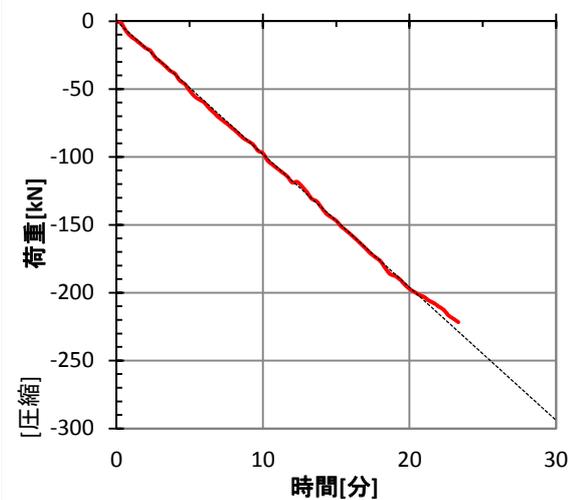
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/3

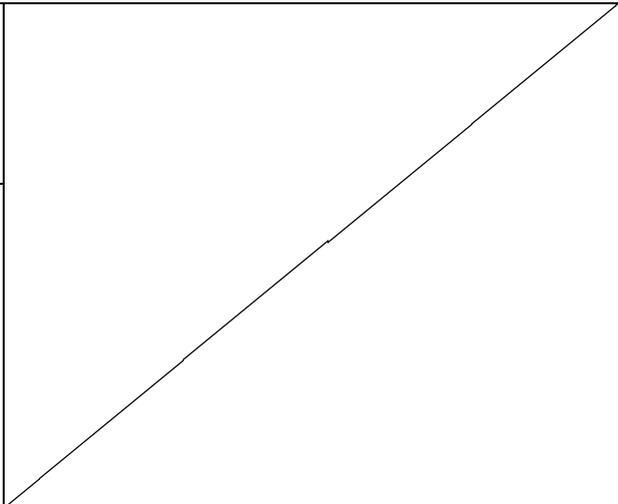
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：278日 試験体番号：40-12  
 寸法：φ75.2×150.0mm  
 重量：[実験前] 1531.3gf  
 [実験後] —



[実験前]

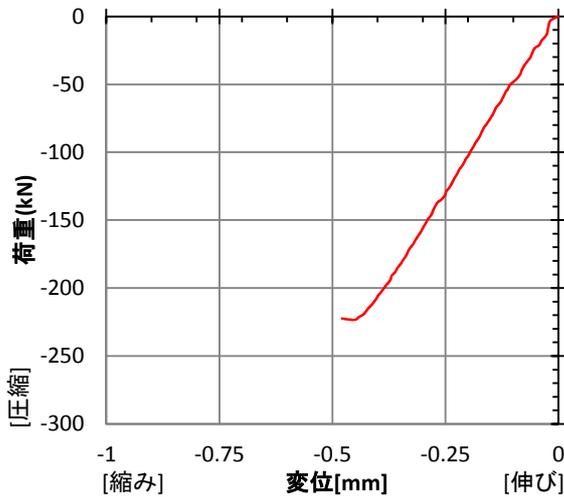


[実験後]



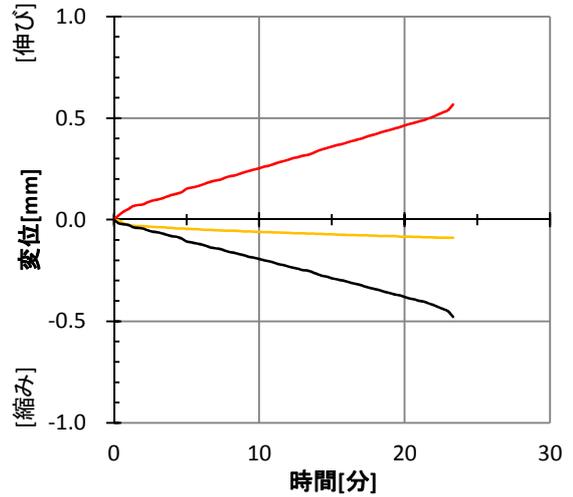
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



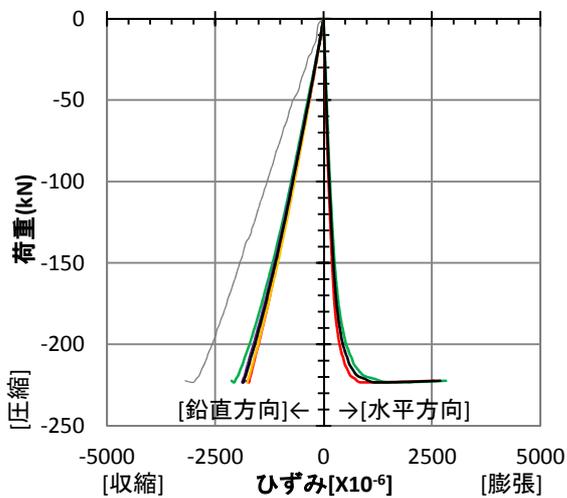
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



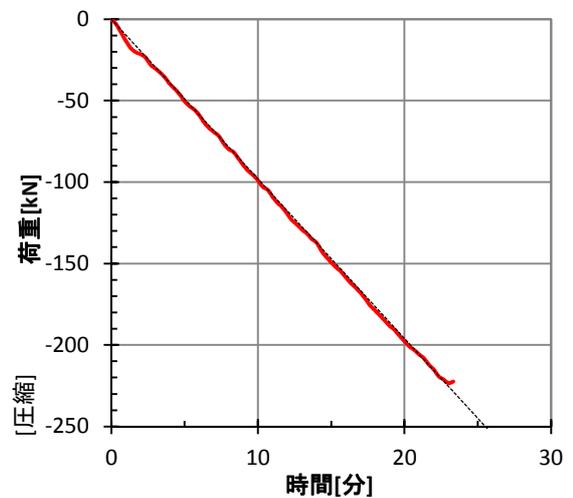
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/24

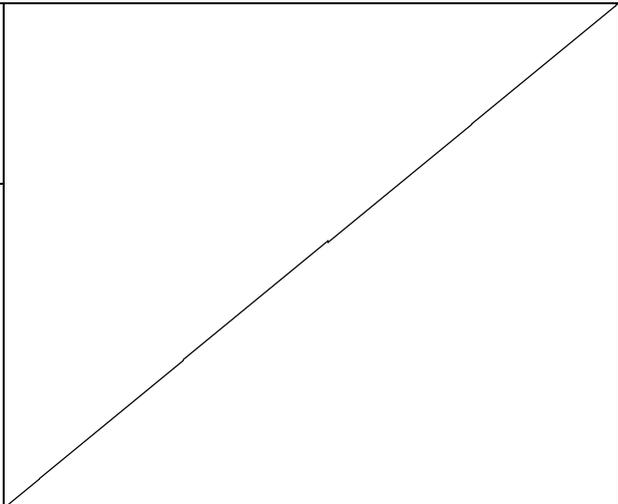
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：207日 試験体番号：40-1  
 寸法：φ74.9×149.8mm  
 重量：[実験前] 1463.6gf  
 [実験後] —



[実験前]

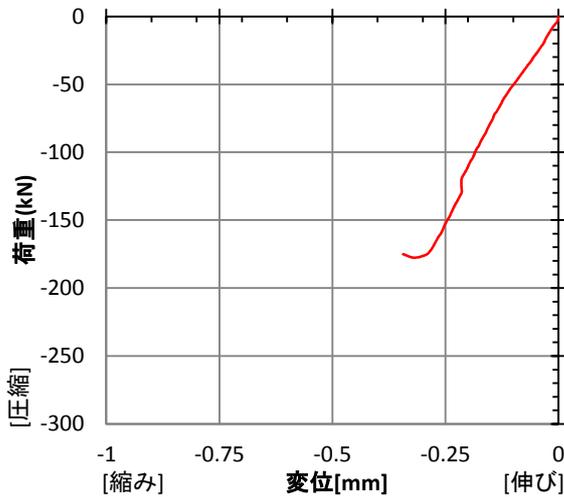


[実験後]



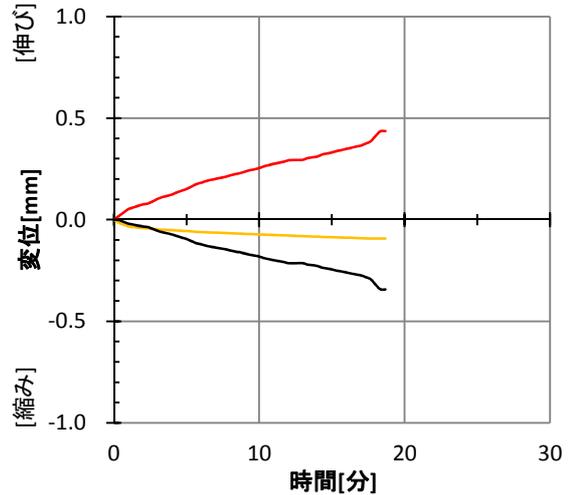
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



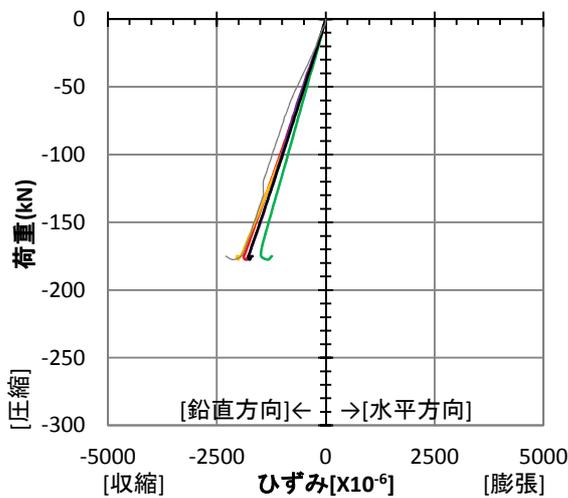
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



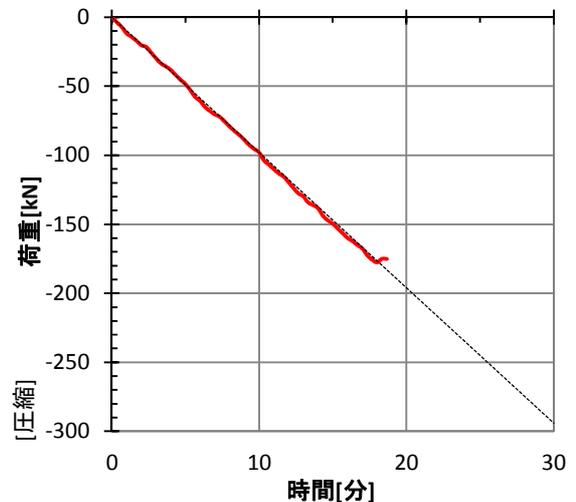
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/24

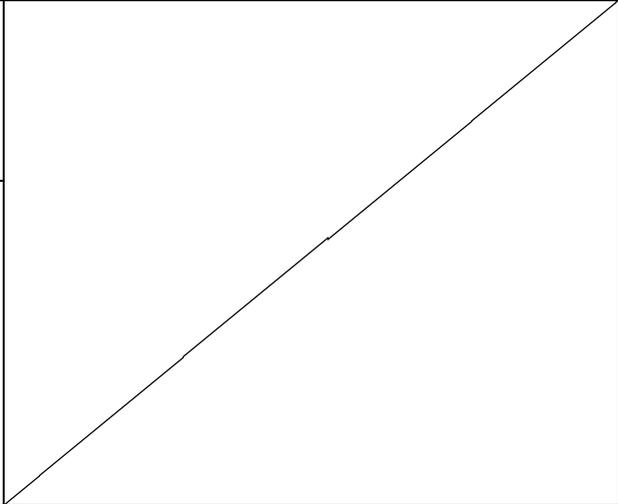
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：207日 試験体番号：40-2  
 寸法：φ75.3×150.7mm  
 重量：[実験前] 1478.2gf  
 [実験後] —



[実験前]

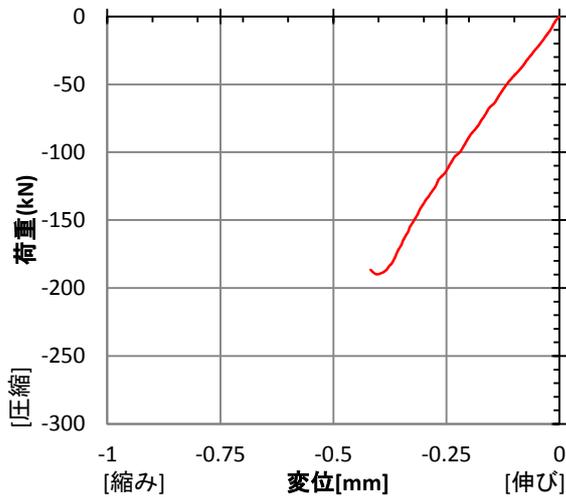


[実験後]



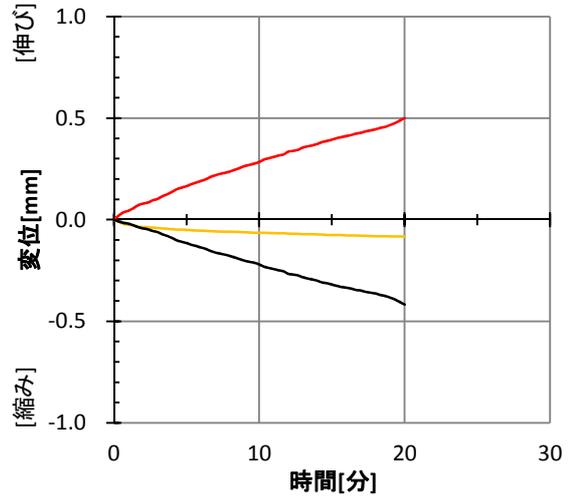
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



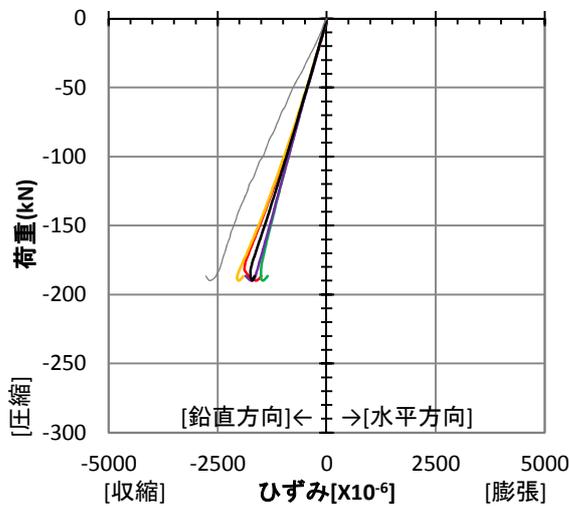
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



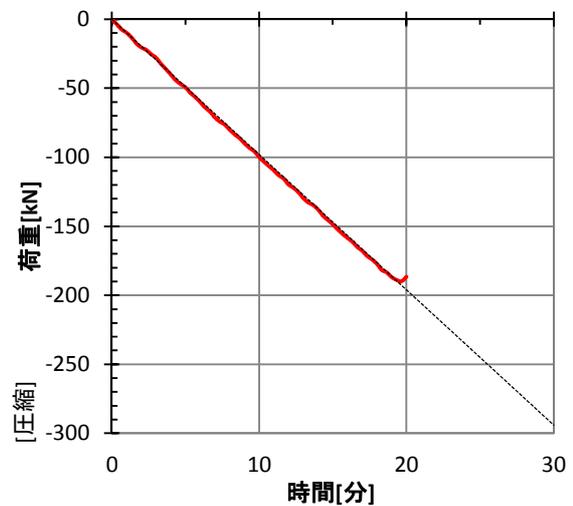
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-20-3 [常温温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/15

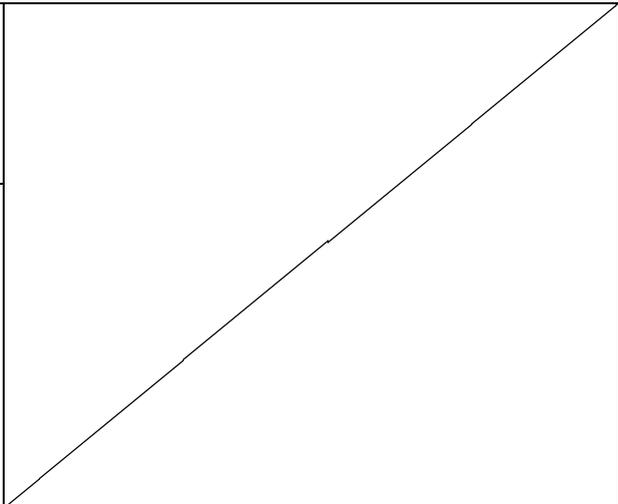
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：229日 試験体番号：40-3  
 寸法：φ75.2×149.4mm  
 重量：[実験前] 1487.8gf  
 [実験後] —



[実験前]

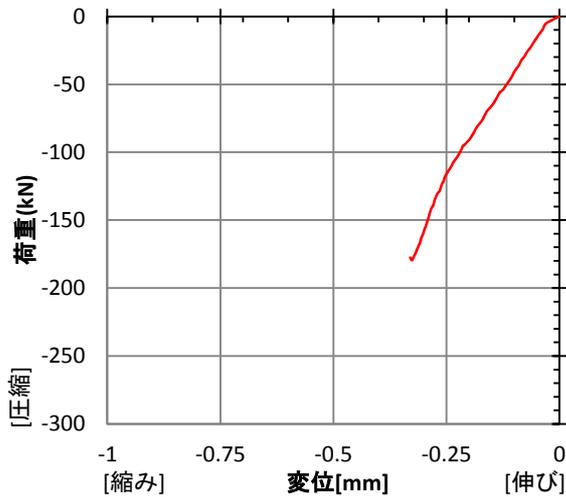


[実験後]



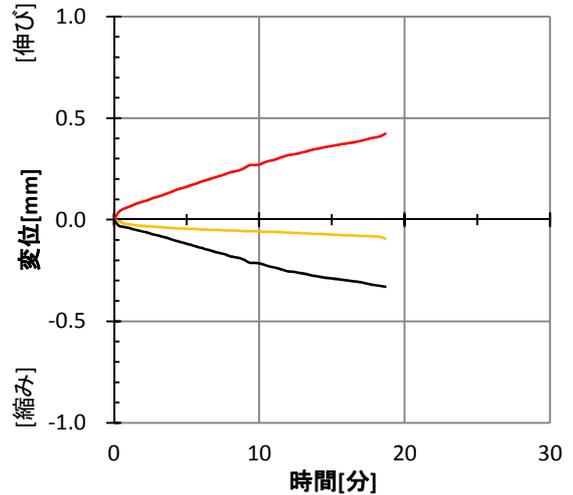
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



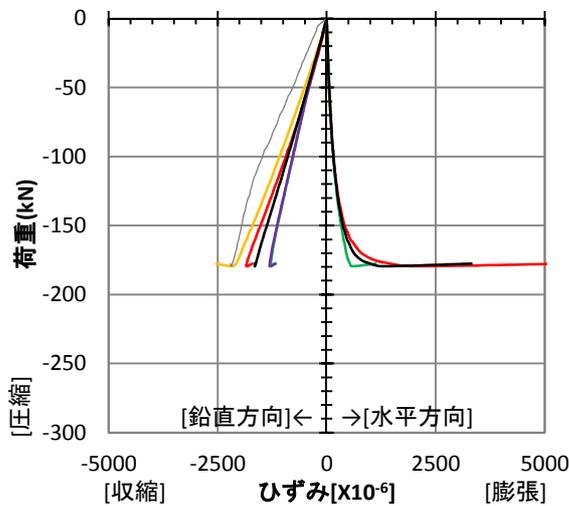
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



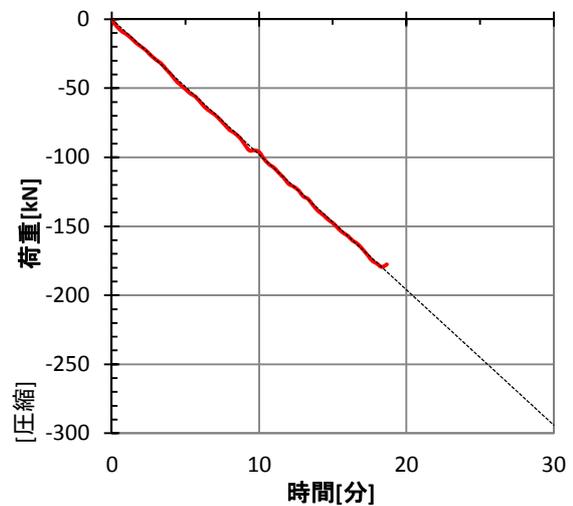
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-20-4 [常温温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/7/20

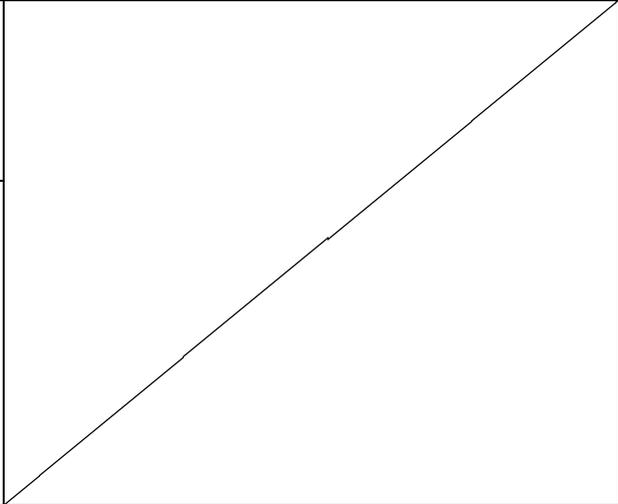
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：264日 試験体番号：40-6  
 寸法：φ75.0×150.9mm  
 重量：[実験前] 1471.9gf  
 [実験後] —



[実験前]

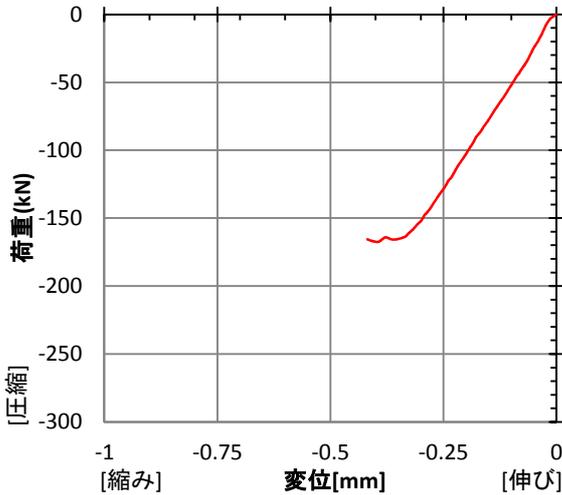


[実験後]



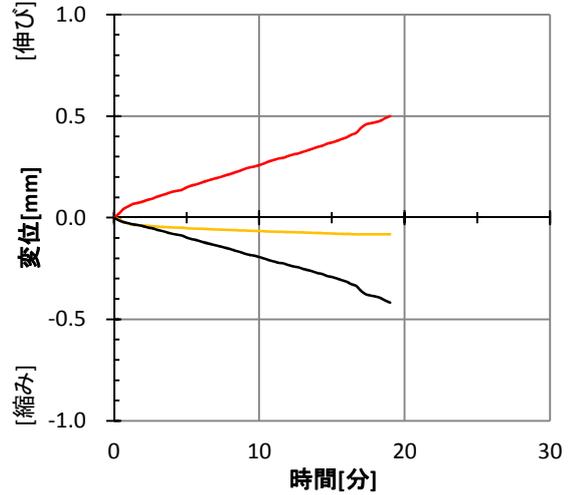
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



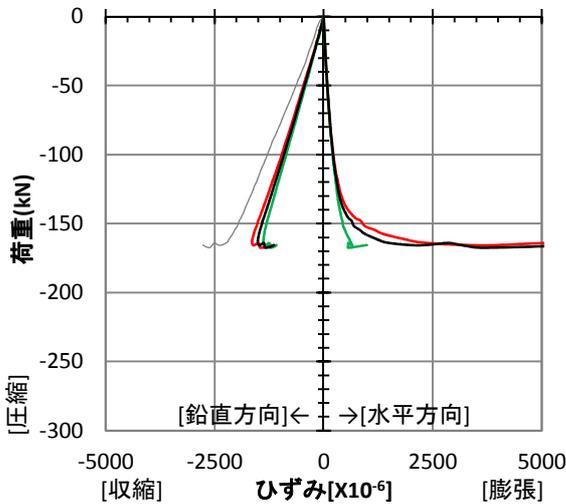
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



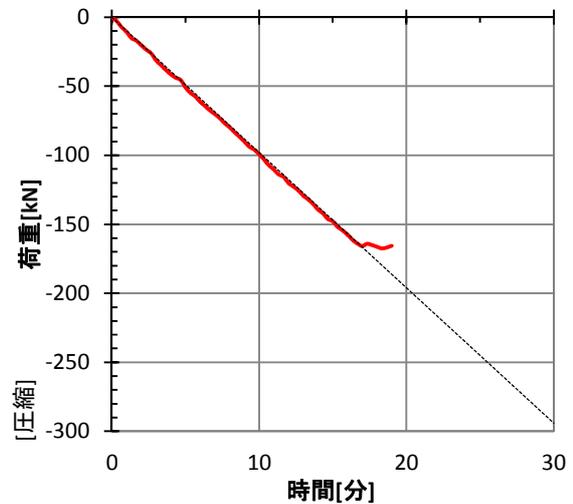
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/11

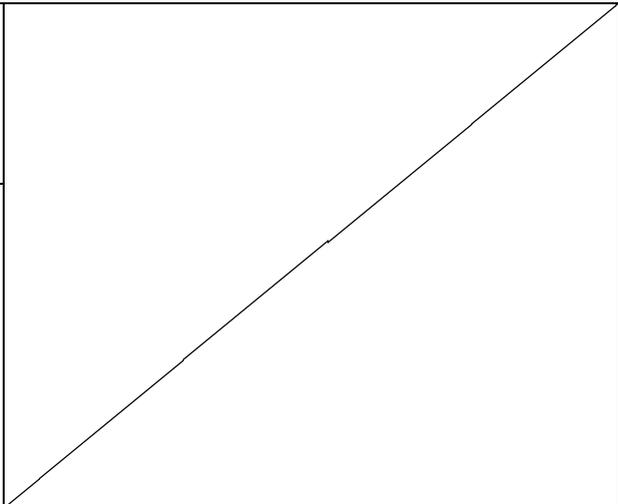
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：286日 試験体番号：40-11  
 寸法：φ75.1×150.7mm  
 重量：[実験前] 1483.2gf  
 [実験後] —



[実験前]

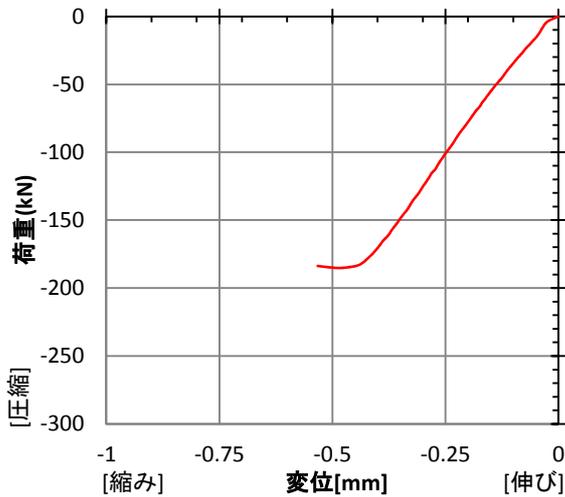


[実験後]



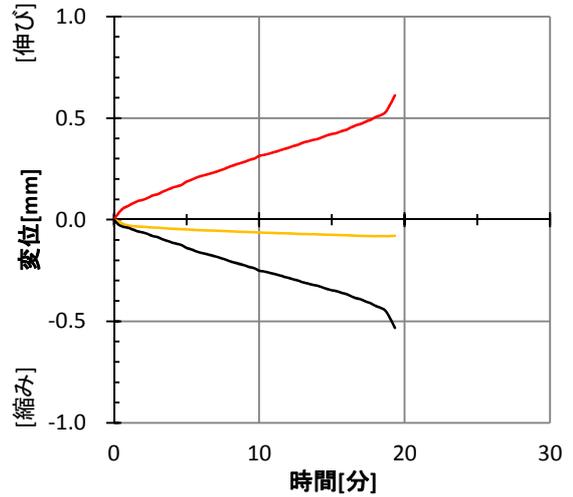
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



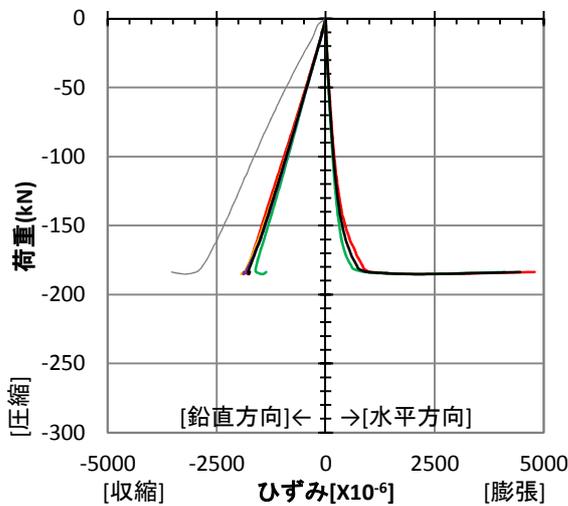
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



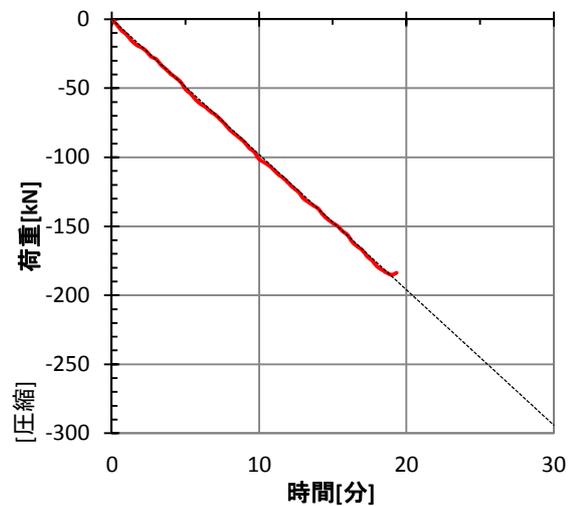
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40S-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2015/1/22

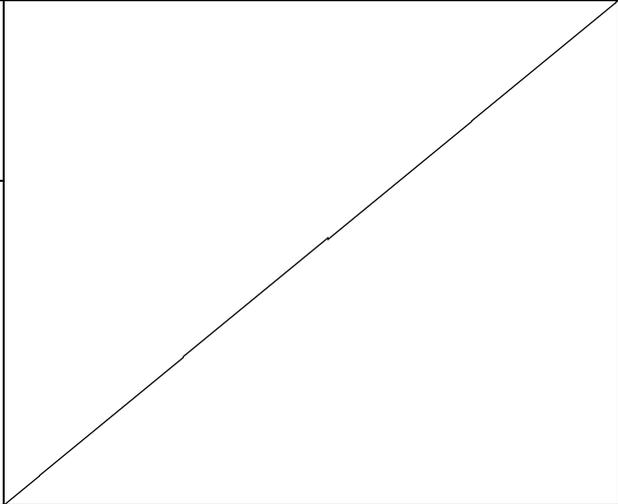
試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 封かん  
 材齢：450日 試験体番号：40-39  
 寸法：φ75.1×150.0mm  
 重量：[実験前] 1639.2gf  
 [実験後] —



[実験前]

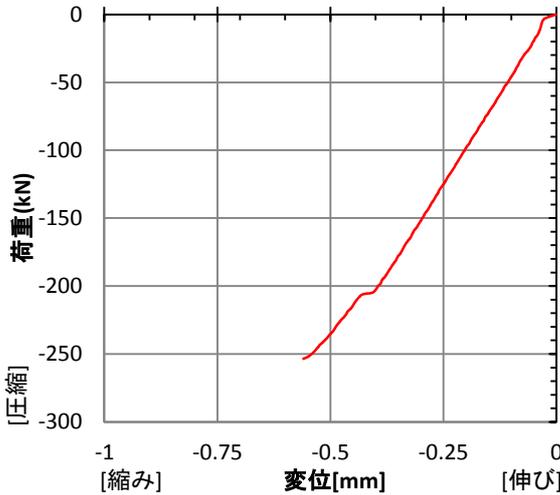


[実験後]



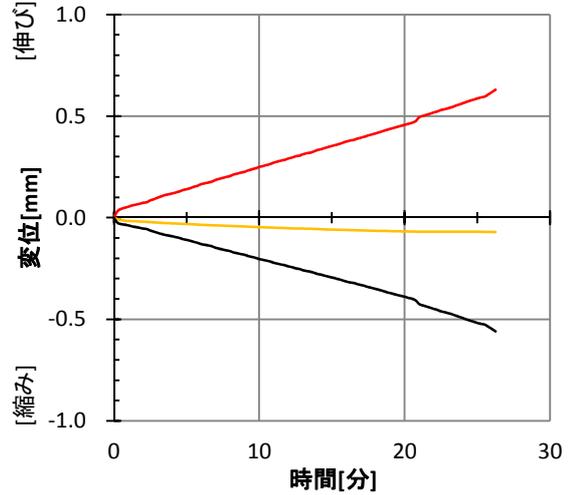
荷重-変形 関係

—変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



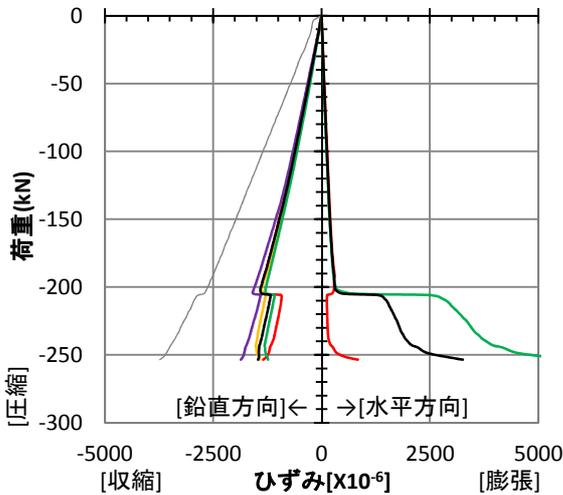
変位-時間 関係

—上側変位計, —下側変位計  
 —変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



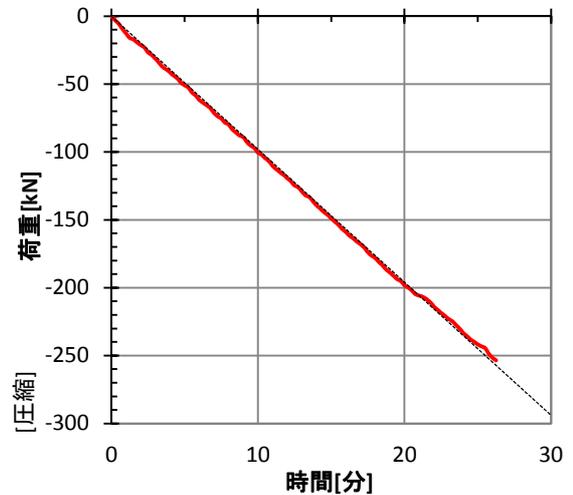
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] —東面, —西面, —南面, —北面, —平均  
 [変位計] —変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

—実験時の荷重, ---設定荷重



実験名：C-50A-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/10

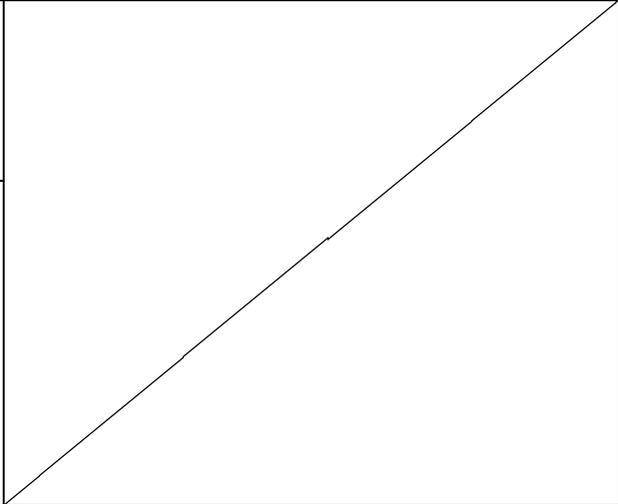
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：193日 試験体番号：50-4  
 寸法：φ75.0×148.7mm  
 重量：[実験前] 1488.4gf  
 [実験後] —



[実験前]

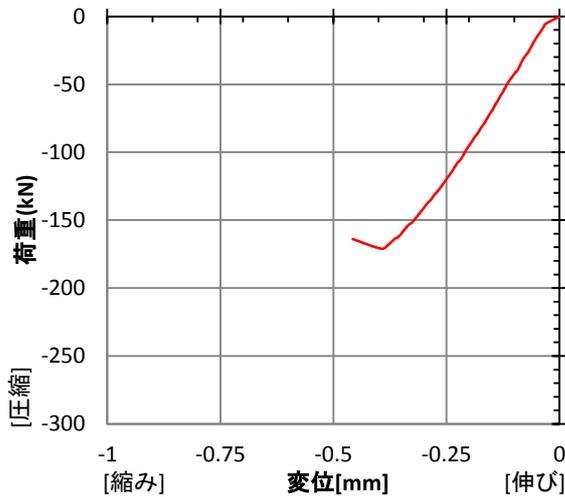


[実験後]



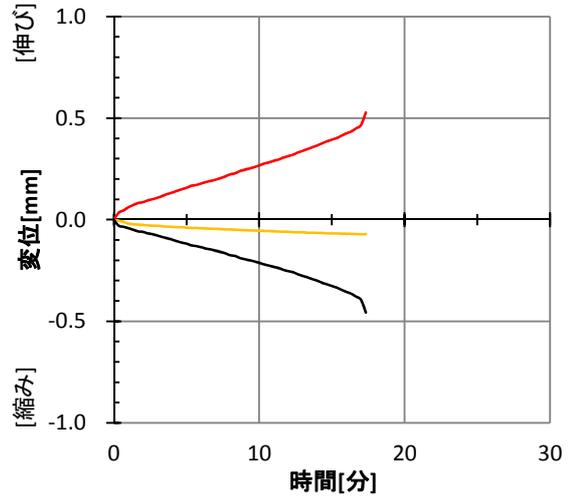
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



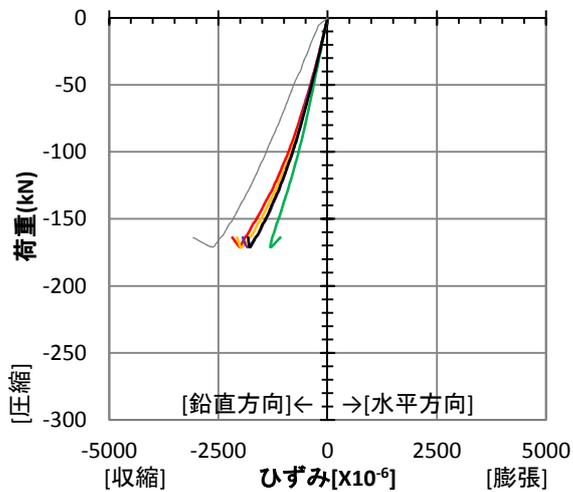
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



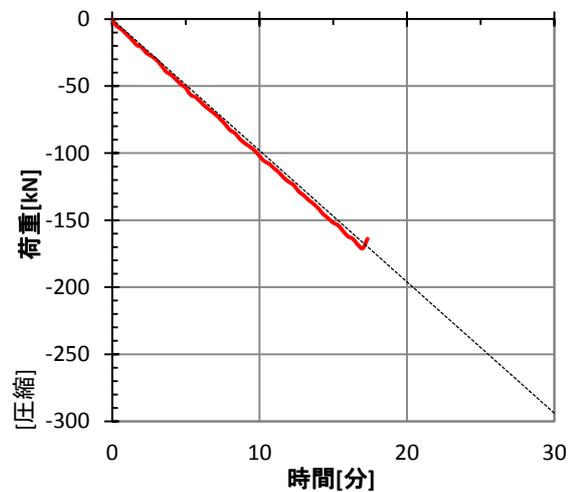
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/27

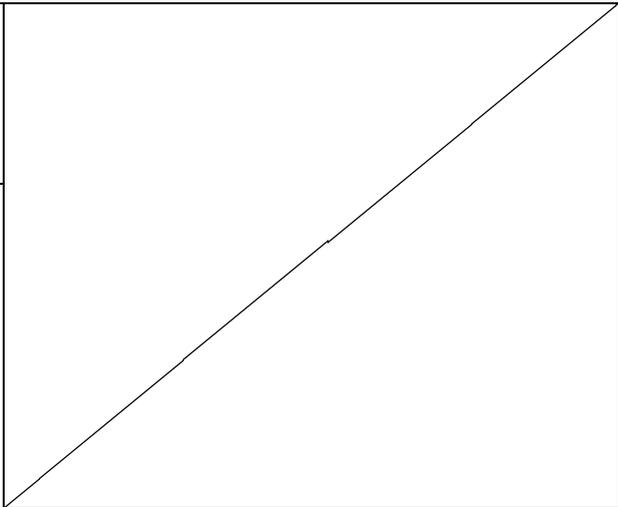
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：210日 試験体番号：50-5  
 寸法：φ75.0×150.6mm  
 重量：[実験前] 1508.8gf  
 [実験後] —



[実験前]

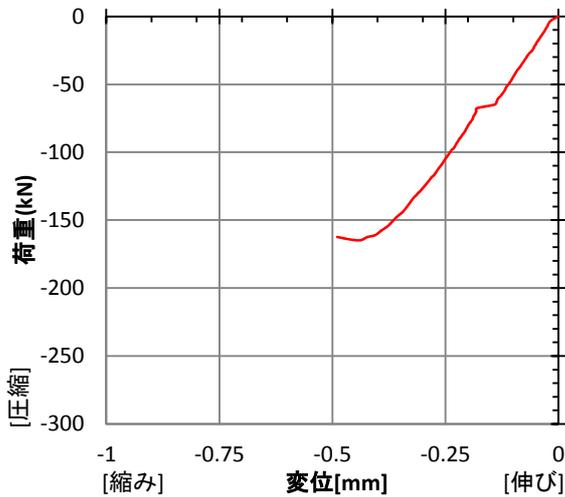


[実験後]



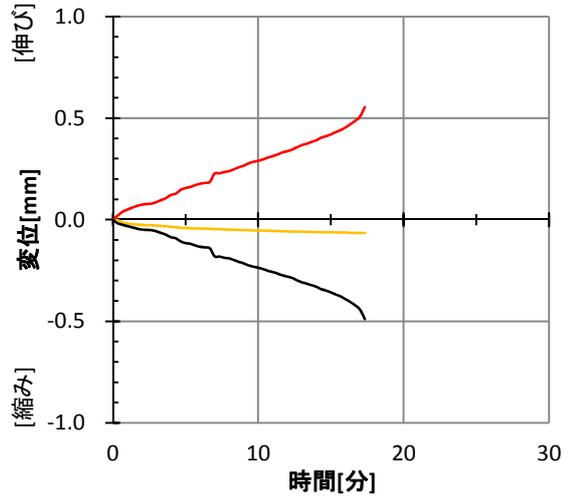
荷重-変形 関係

—変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



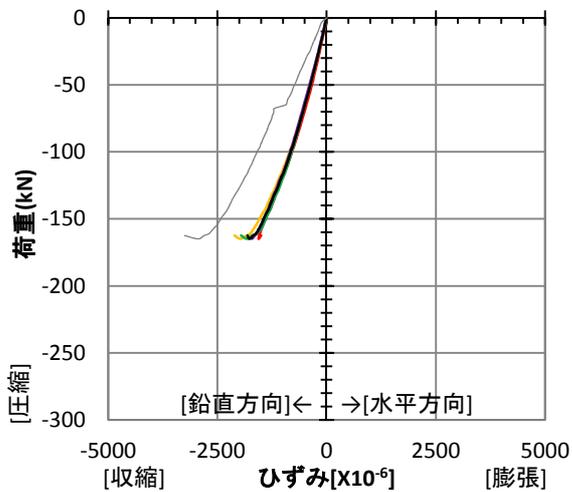
変位-時間 関係

—上側変位計, —下側変位計  
 —変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



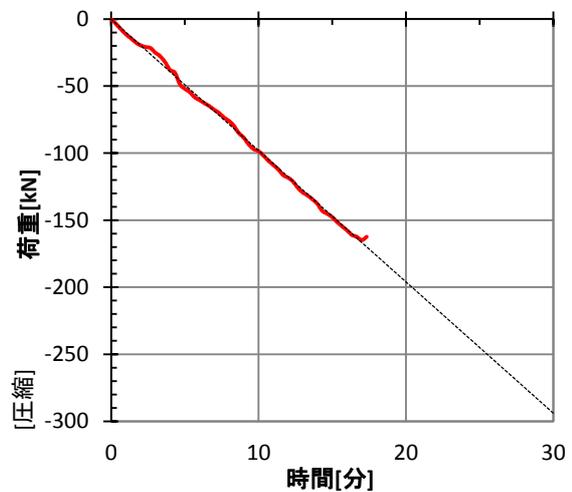
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] —東面, —西面, —南面, —北面, —平均  
 [変位計] —変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

—実験時の荷重, ---設定荷重



実験名：C-50A-20-3 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/17

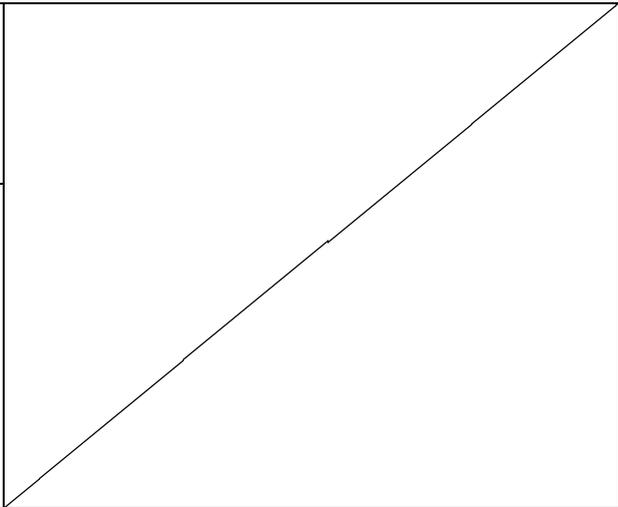
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：231日 試験体番号：50-8  
 寸法：φ75.0×151.3mm  
 重量：[実験前] 1518.0gf  
 [実験後] —



[実験前]

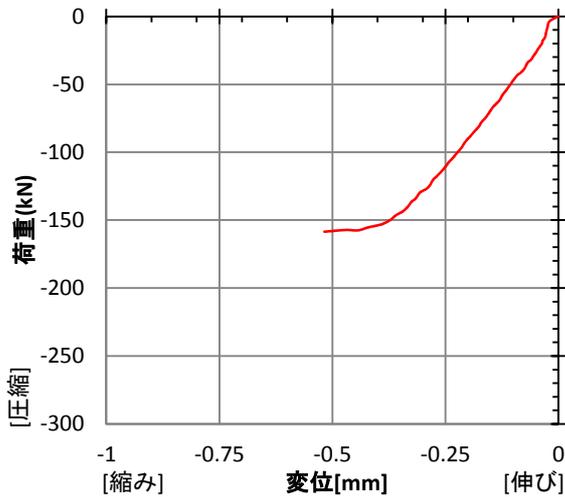


[実験後]



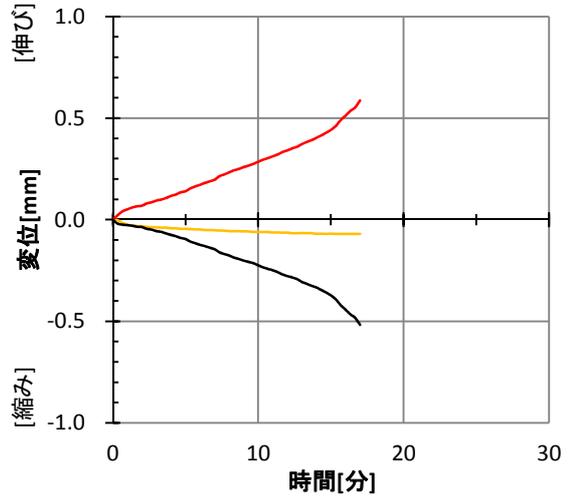
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



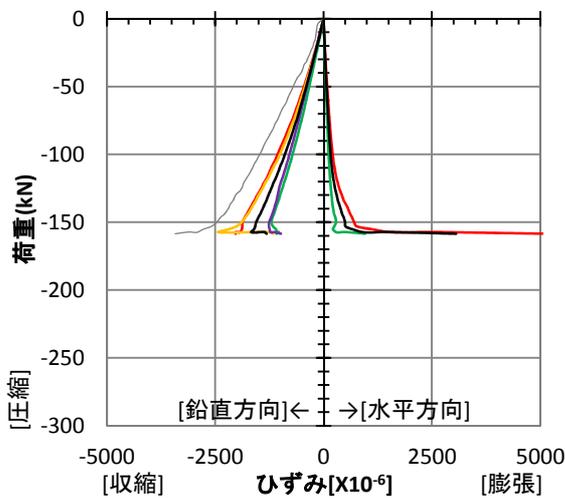
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



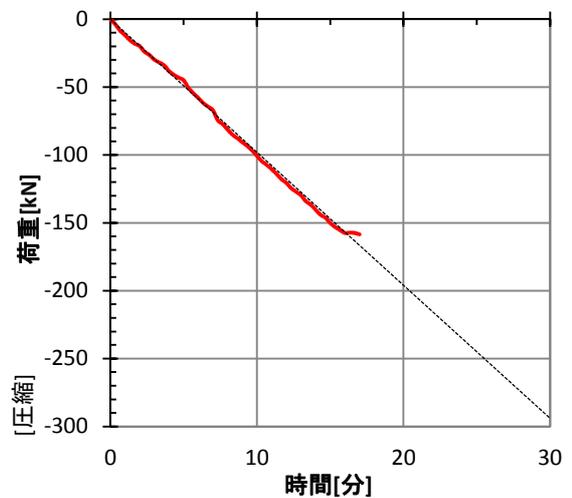
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-20-4 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/7/26

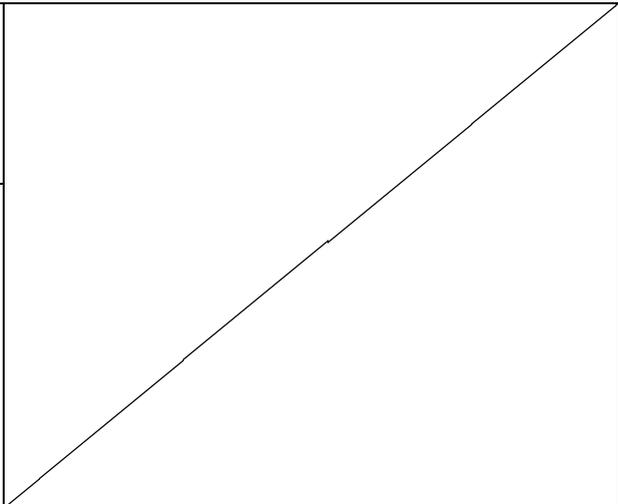
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：270日 試験体番号：50-9  
 寸法：φ75.0×150.0mm  
 重量：[実験前] 1499.1gf  
 [実験後] —



[実験前]

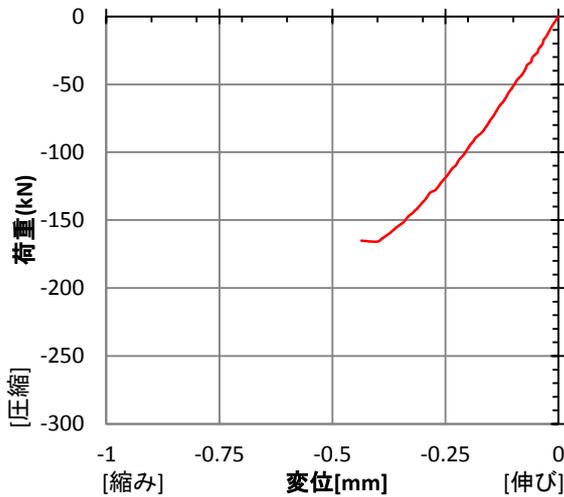


[実験後]



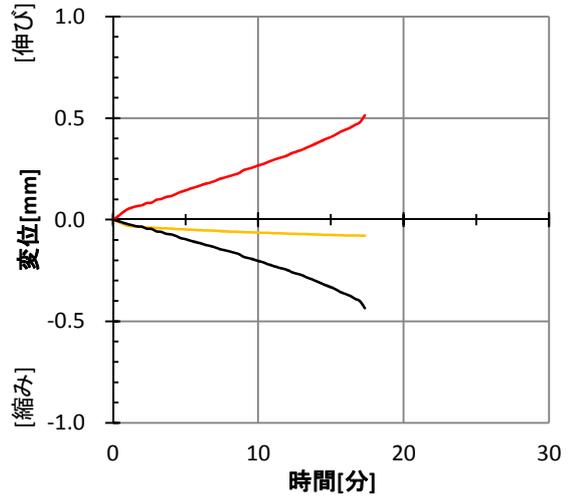
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



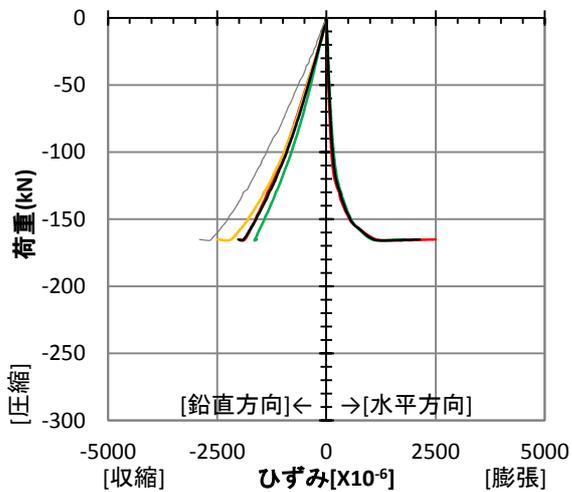
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



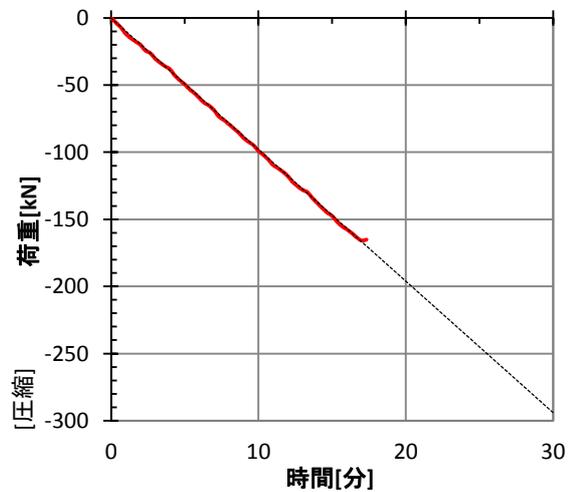
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/3

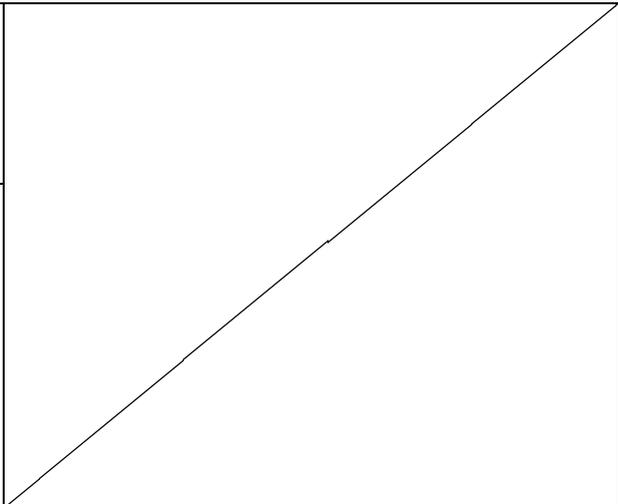
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：278日 試験体番号：50-12  
 寸法：φ74.9×150.7mm  
 重量：[実験前] 1507.8gf  
 [実験後] —



[実験前]

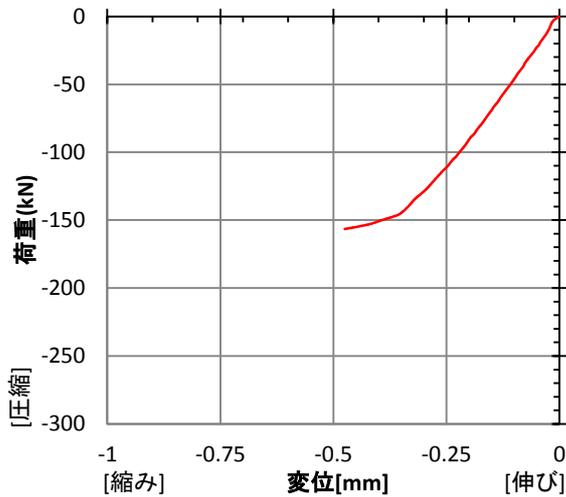


[実験後]



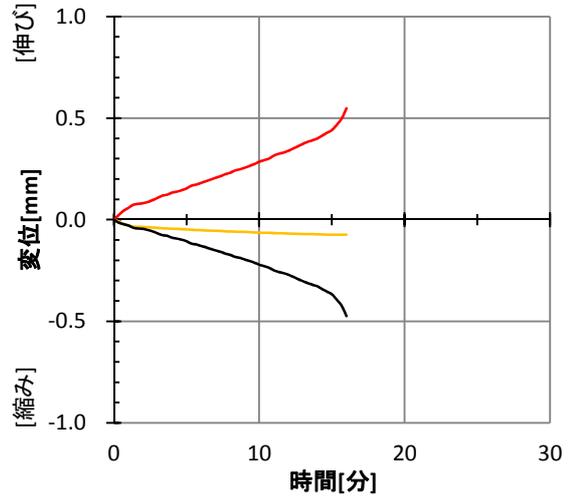
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



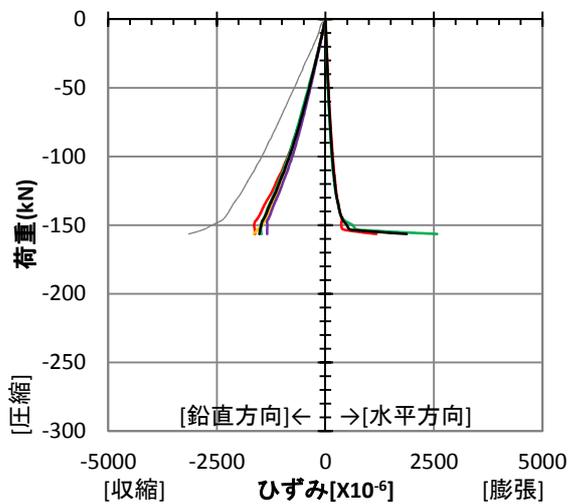
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



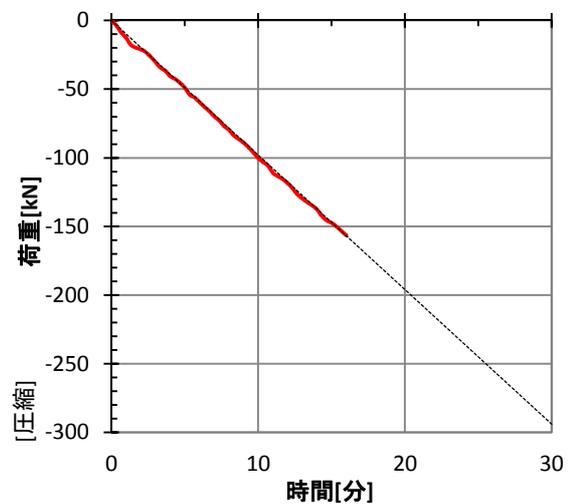
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/24

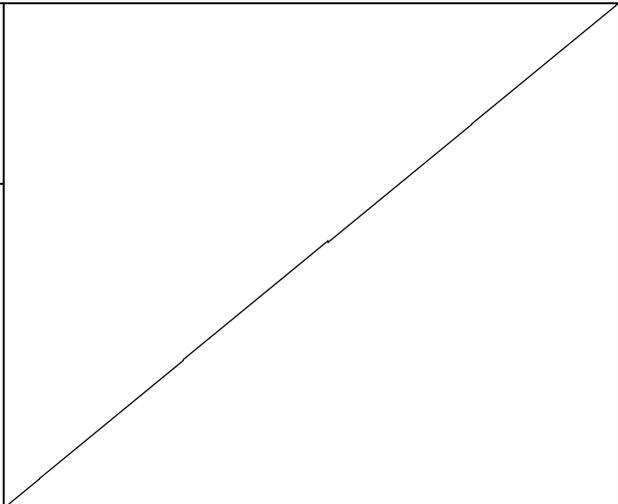
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：207日 試験体番号：50-1  
 寸法：φ75.0×150.2mm  
 重量：[実験前] 1456.7gf  
 [実験後] —



[実験前]

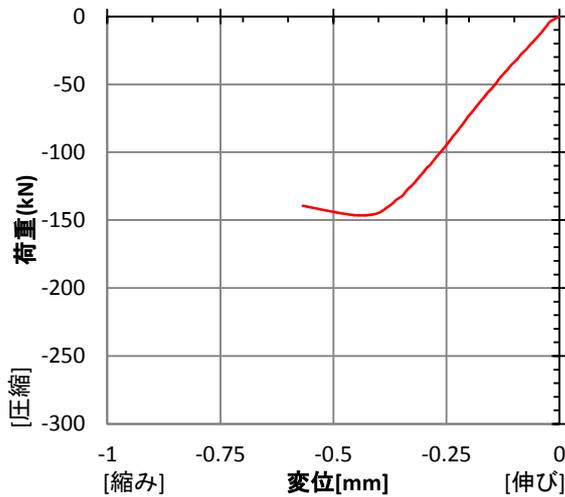


[実験後]



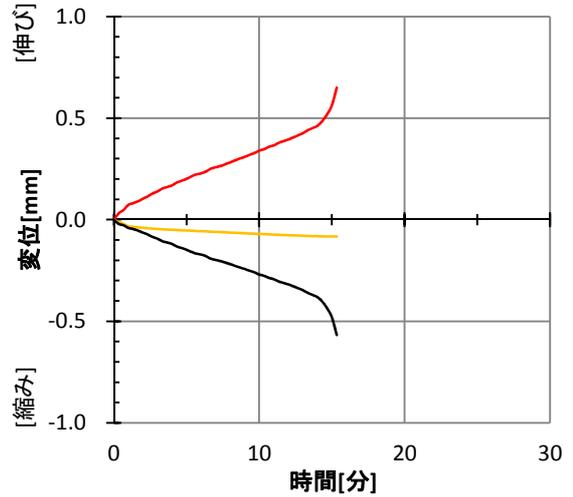
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



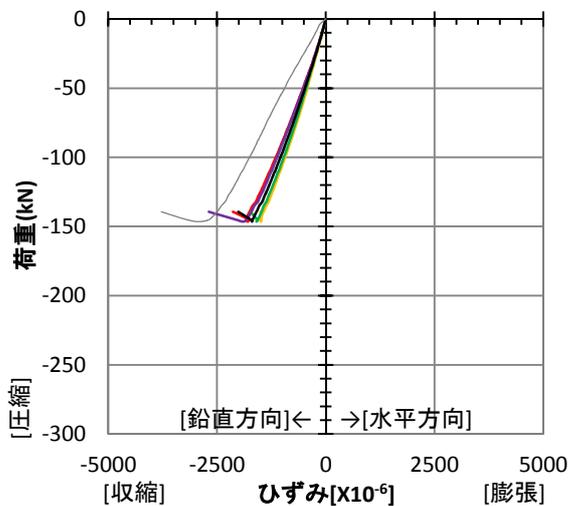
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



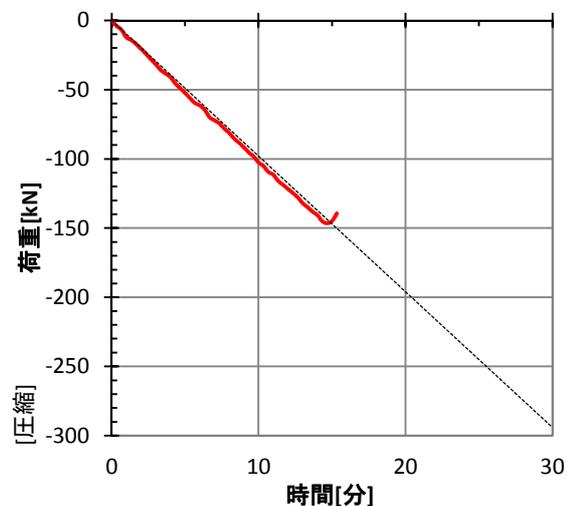
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/24

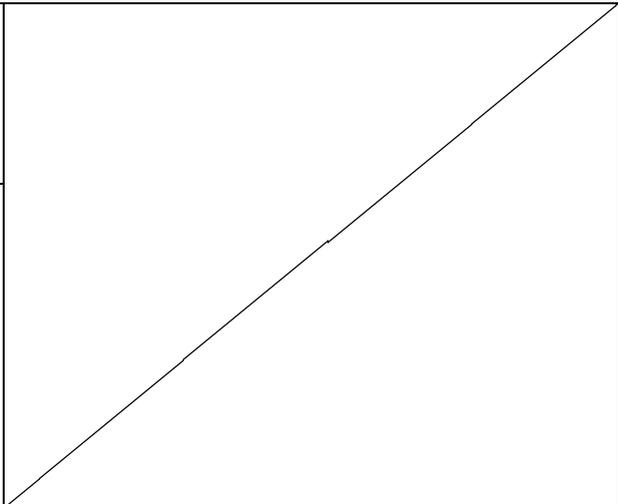
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：207日 試験体番号：50-2  
 寸法：φ75.0×150.7mm  
 重量：[実験前] 1462.3gf  
 [実験後] —



[実験前]

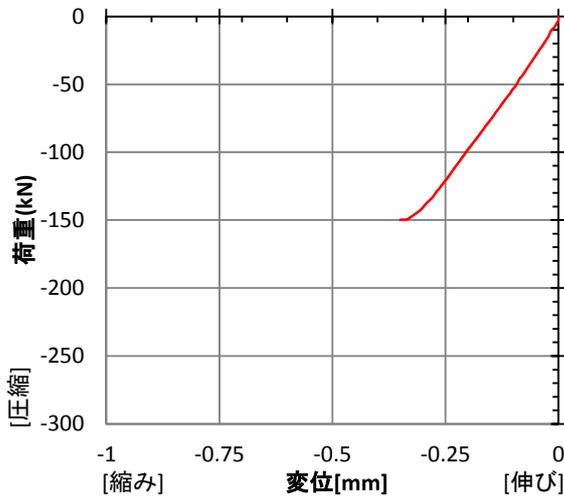


[実験後]



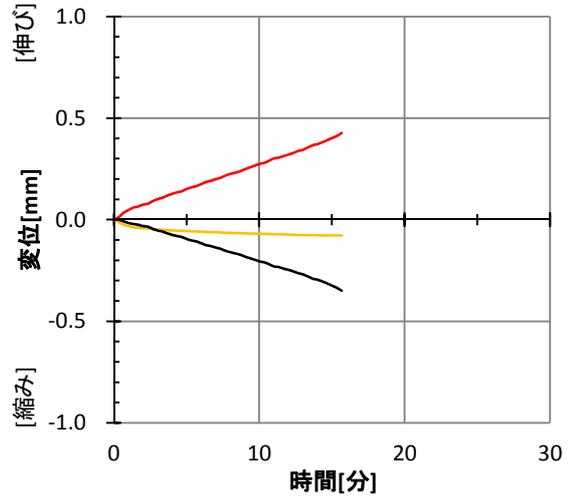
荷重-変形 関係

—変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



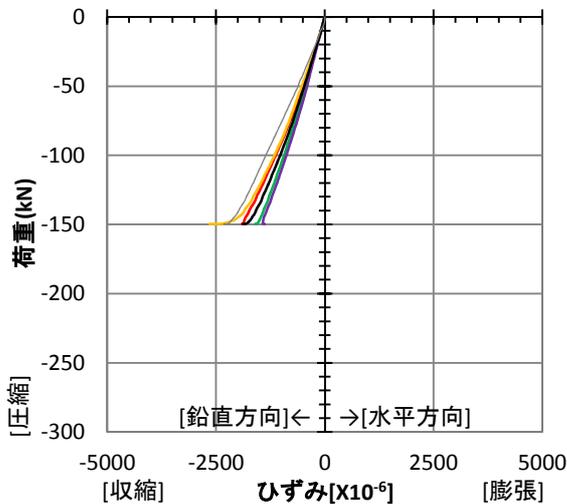
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 —変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



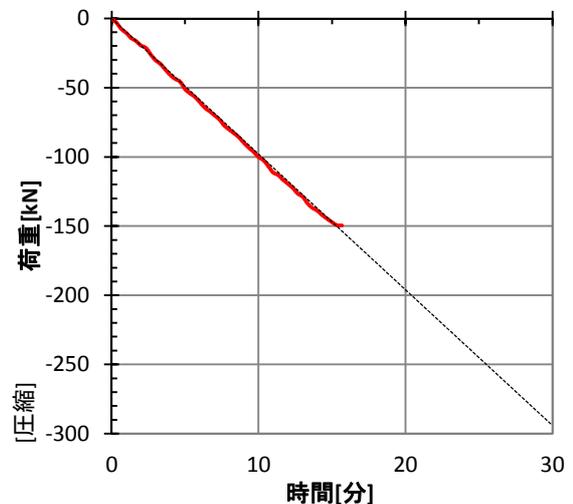
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] —変形(= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-20-3 [常温温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/15

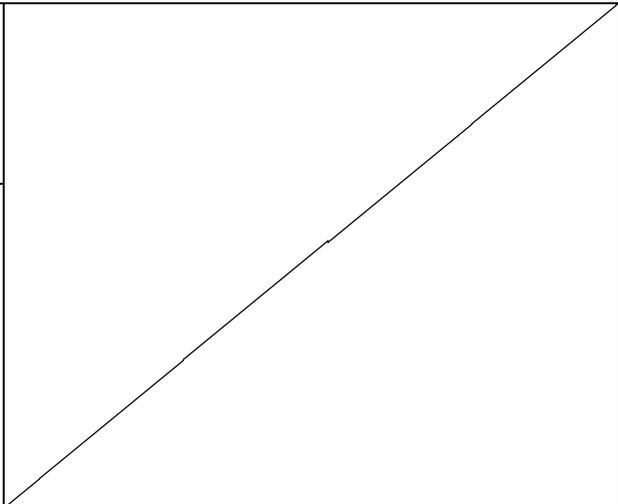
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：229日 試験体番号：50-3  
 寸法：φ75.0×148.7mm  
 重量：[実験前] 1450.4gf  
 [実験後] —



[実験前]

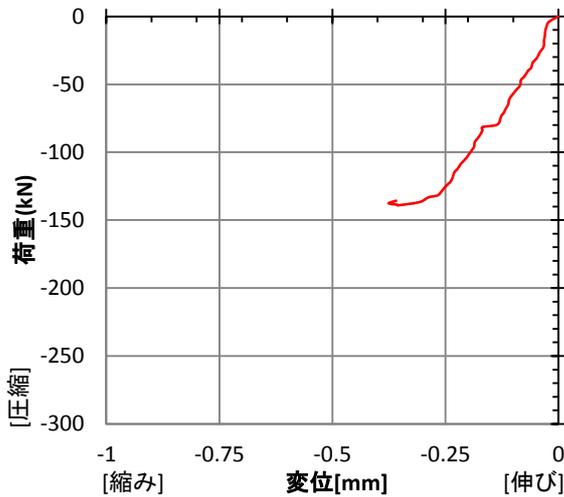


[実験後]



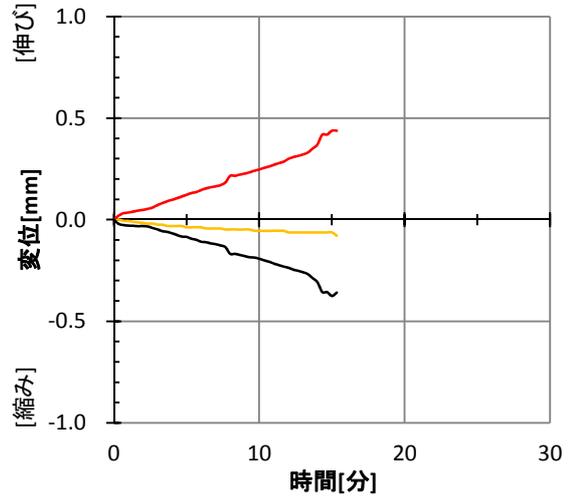
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



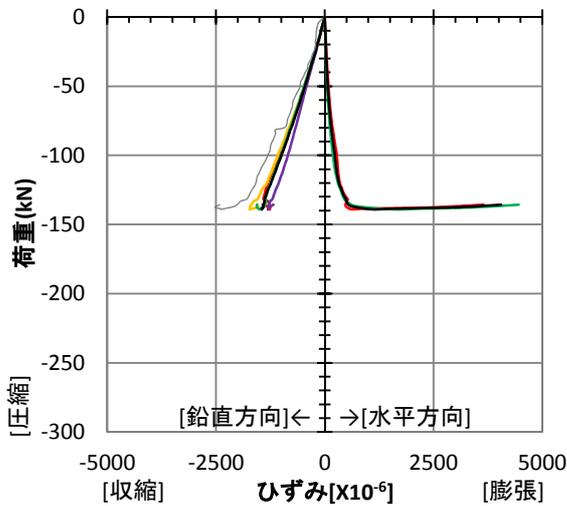
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



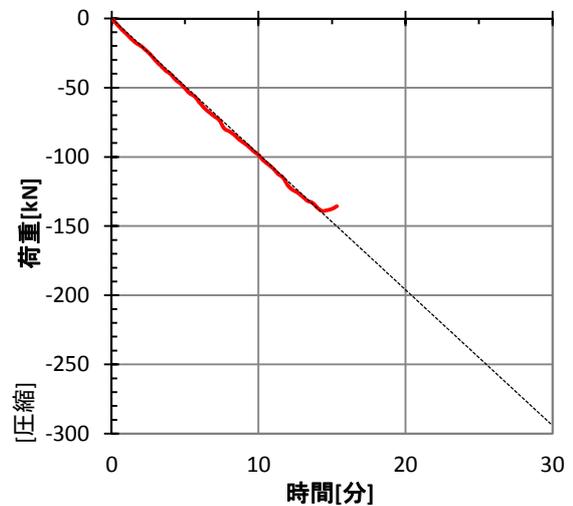
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-20-4 [常温温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/7/20

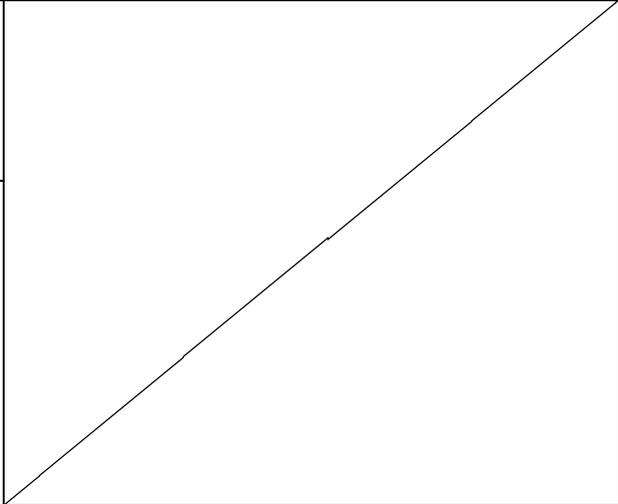
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：264日 試験体番号：50-7  
 寸法：φ74.9×150.9mm  
 重量：[実験前] 1469.6gf  
 [実験後] —



[実験前]

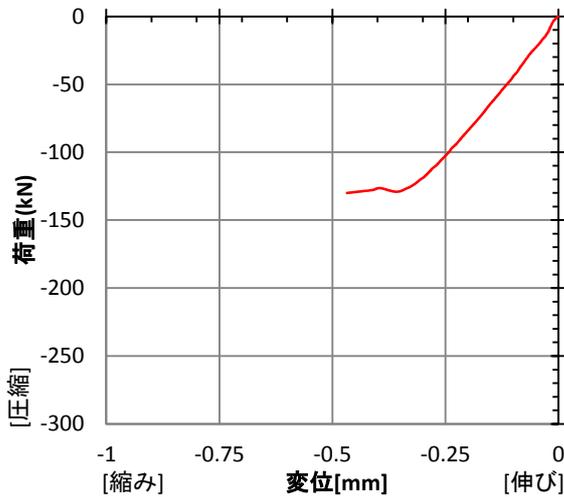


[実験後]



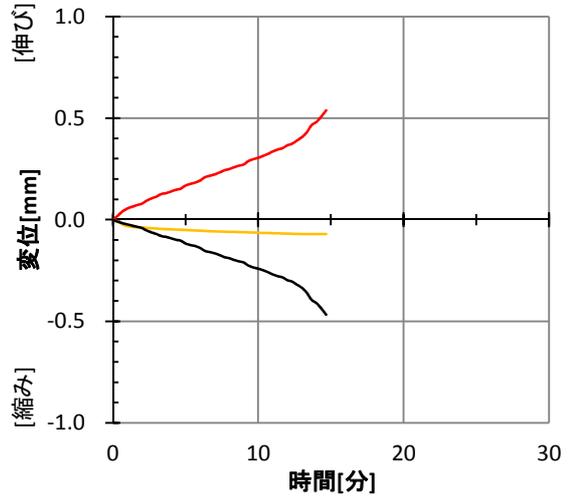
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



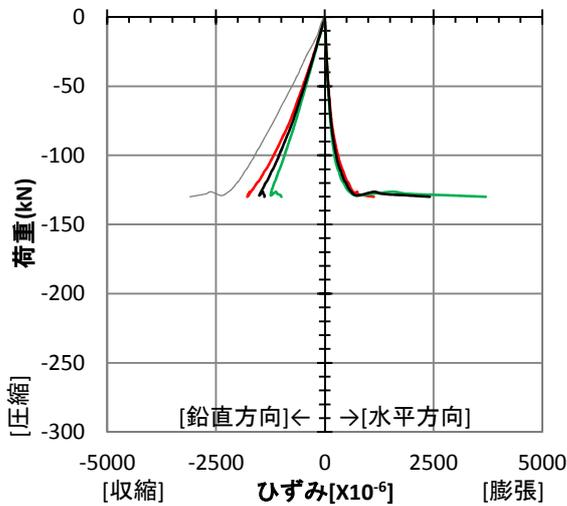
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



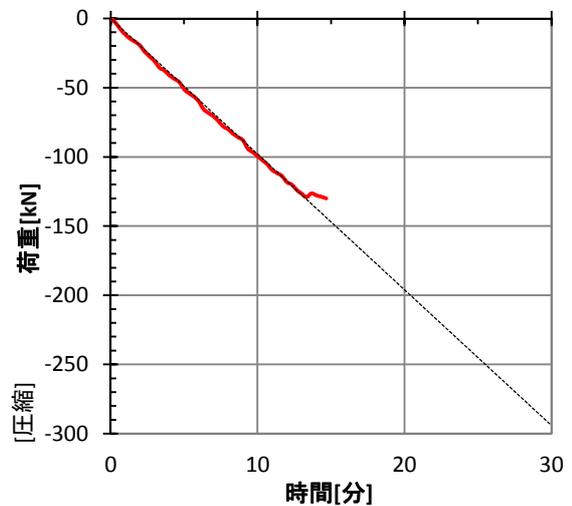
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/11

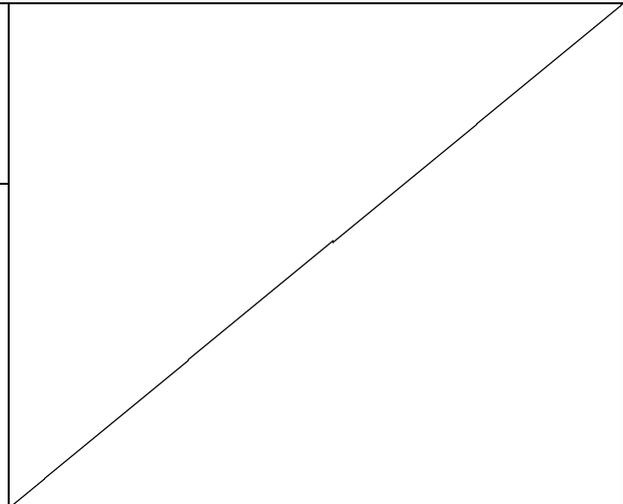
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：286日 試験体番号：50-11  
 寸法：φ74.9×150.5mm  
 重量：[実験前] 1454.8gf  
 [実験後] —



[実験前]

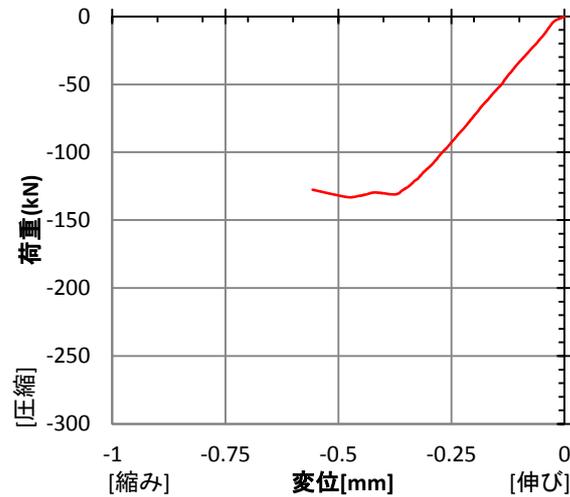


[実験後]



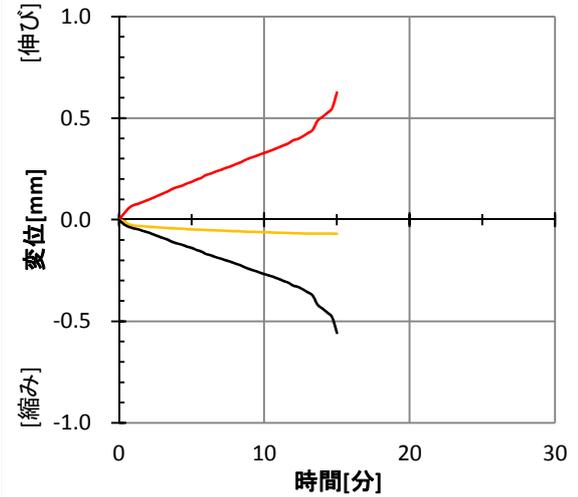
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



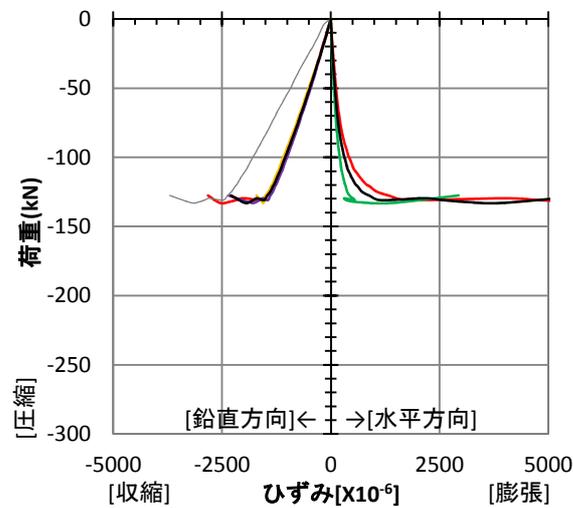
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



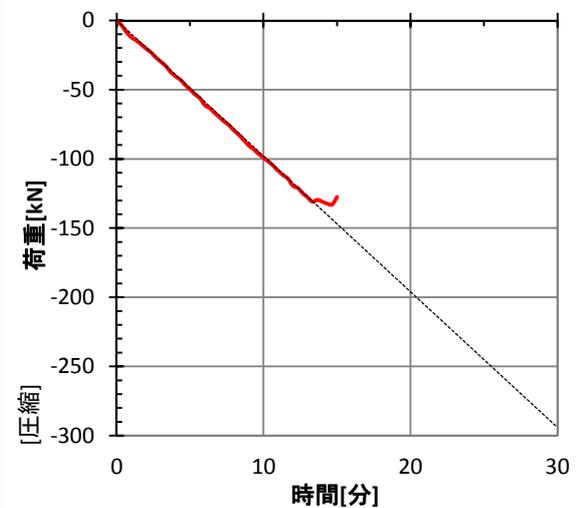
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50S-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2015/1/22

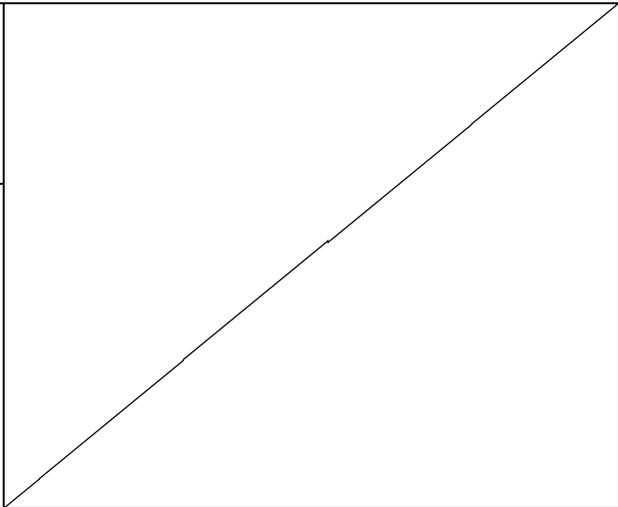
試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 封かん  
 材齢：450日 試験体番号：50-40  
 寸法：φ75.0×150.9mm  
 重量：[実験前] 1635.9gf  
 [実験後] —



[実験前]

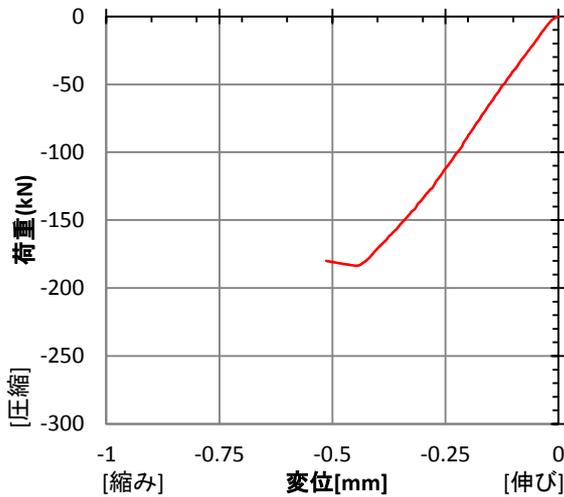


[実験後]



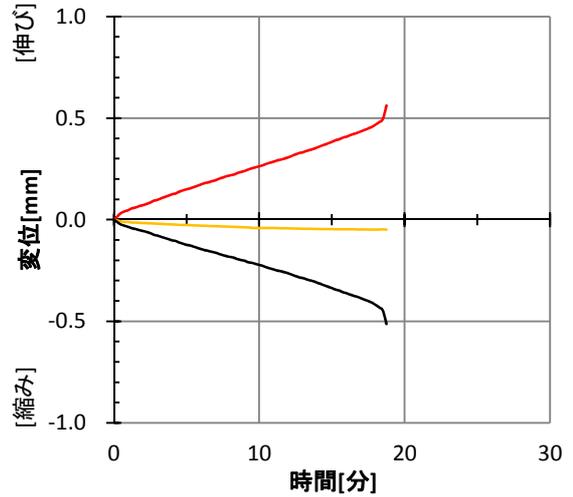
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



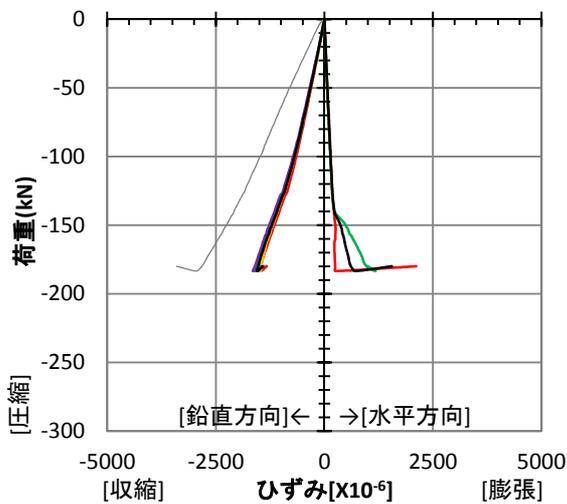
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



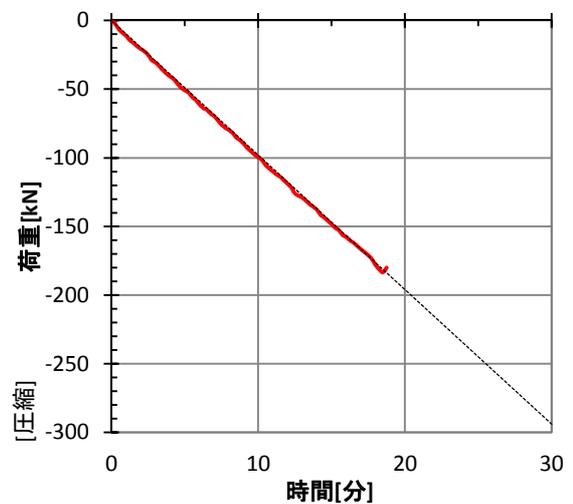
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/17

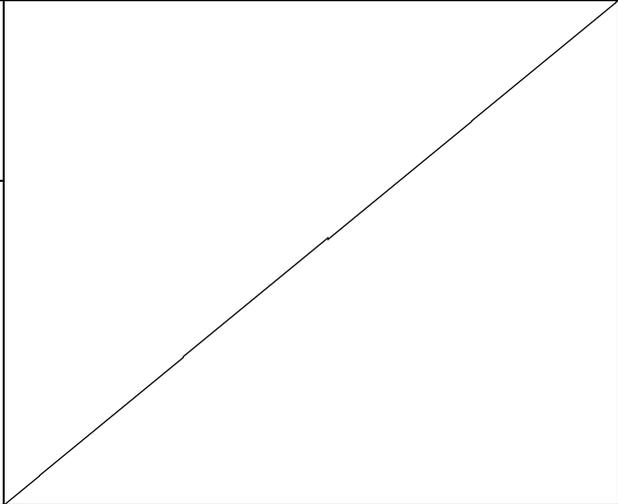
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：205日 試験体番号：65-7  
 寸法：φ74.9×150.2mm  
 重量：[実験前] 1476.5gf  
 [実験後] —



[実験前]

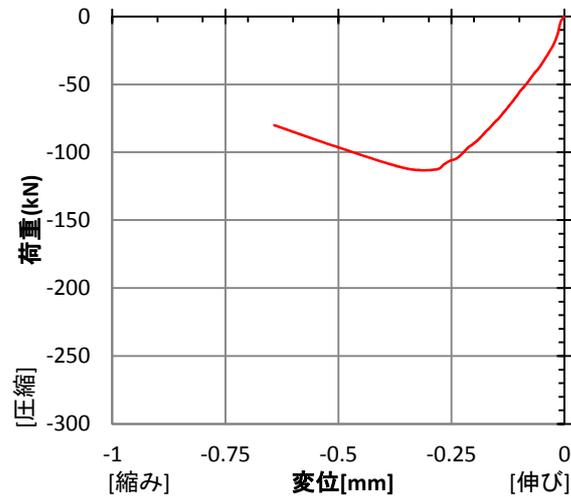


[実験後]



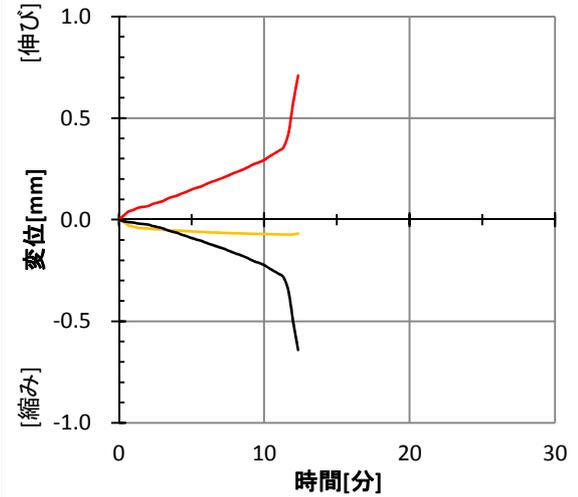
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



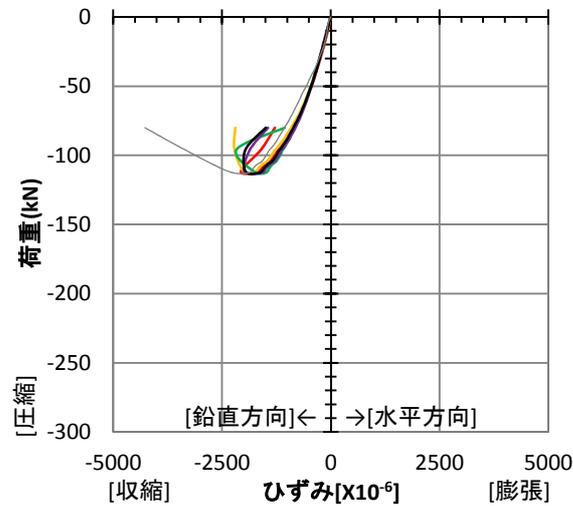
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



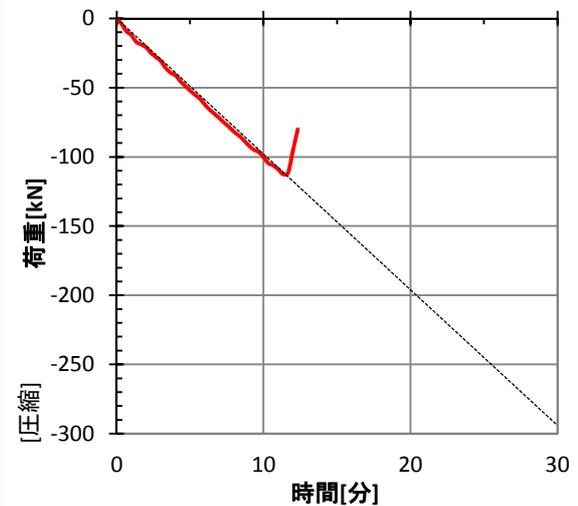
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/17

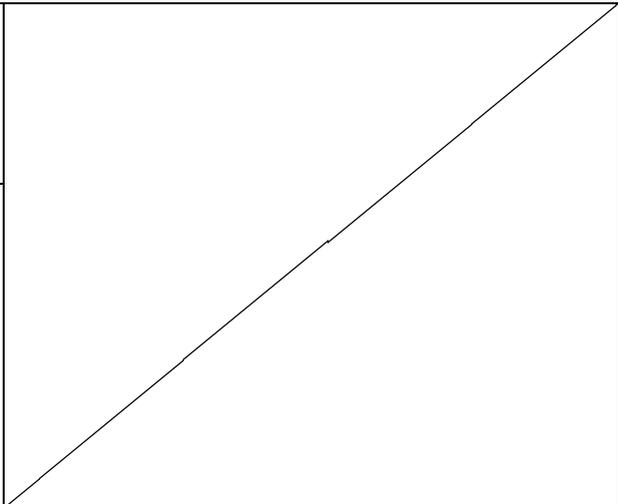
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：205日 試験体番号：65-8  
 寸法：φ75.0×150.3mm  
 重量：[実験前] 1477.4gf  
 [実験後] —



[実験前]

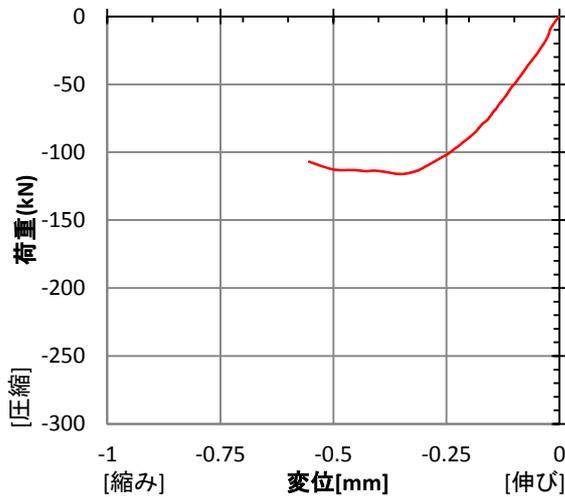


[実験後]



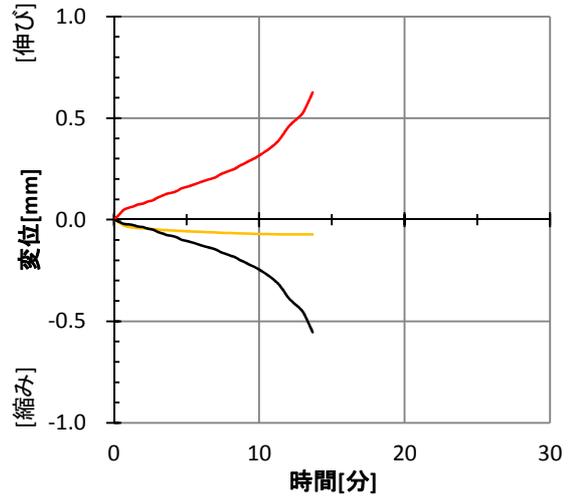
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



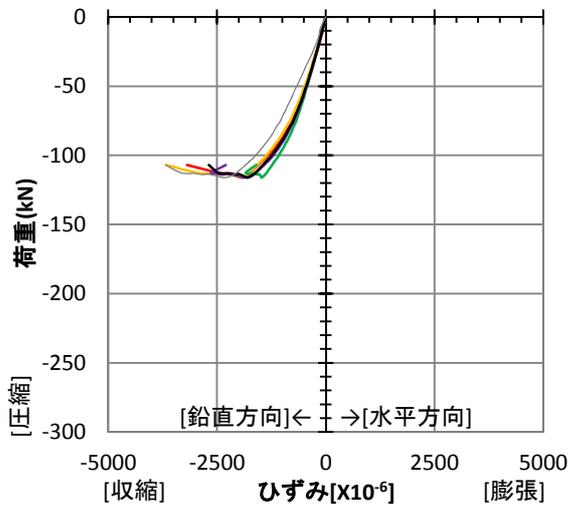
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



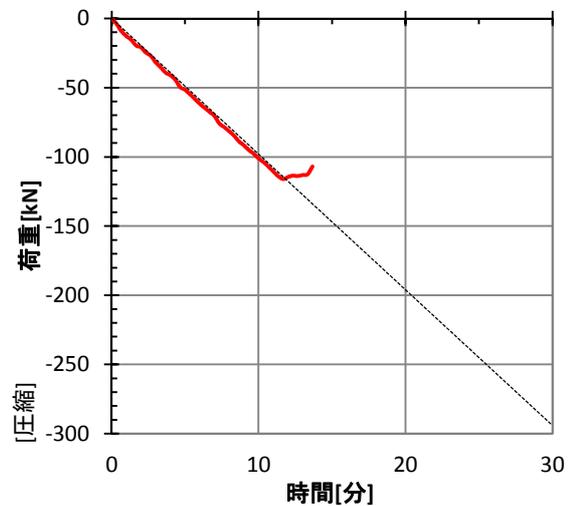
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-20-3 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/16

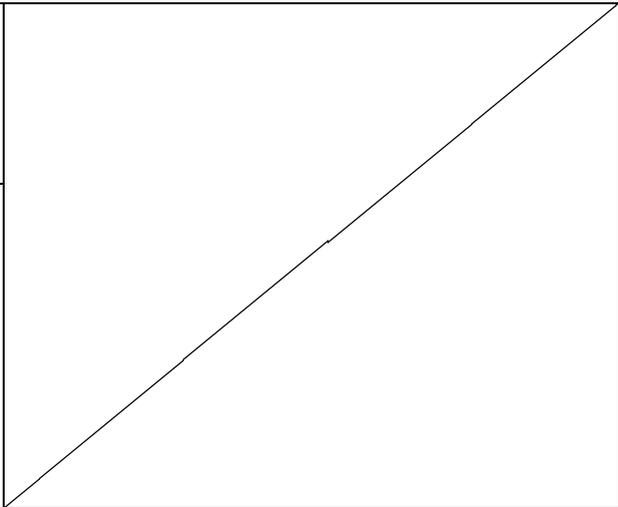
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：235 日 試験体番号：65-14  
 寸法：φ75.0×148.6mm  
 重量：[実験前] 1457.4gf  
 [実験後] —



[実験前]

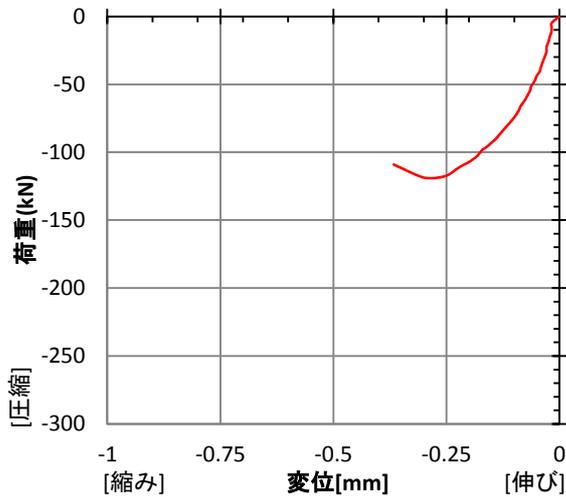


[実験後]



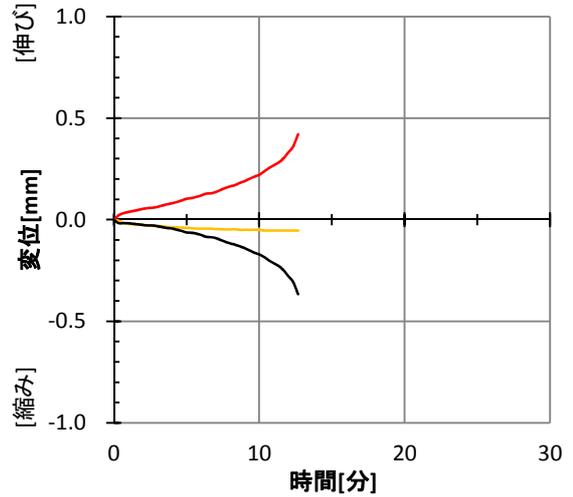
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



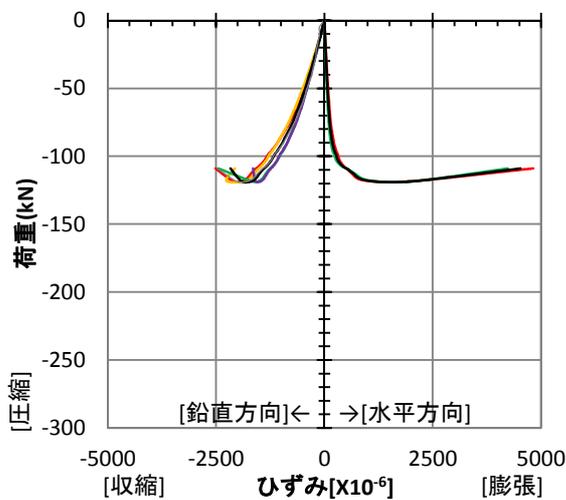
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



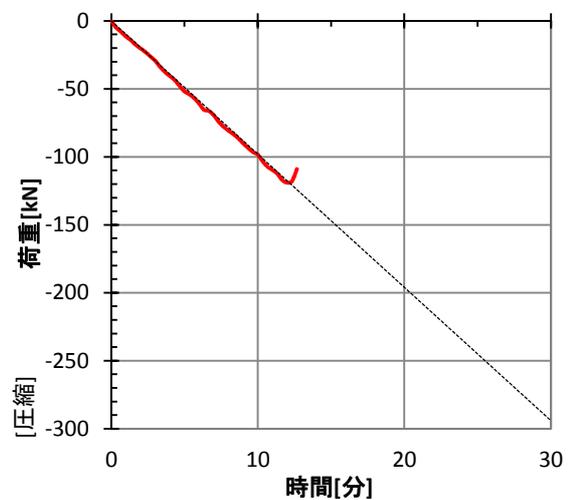
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-20-4 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/7/26

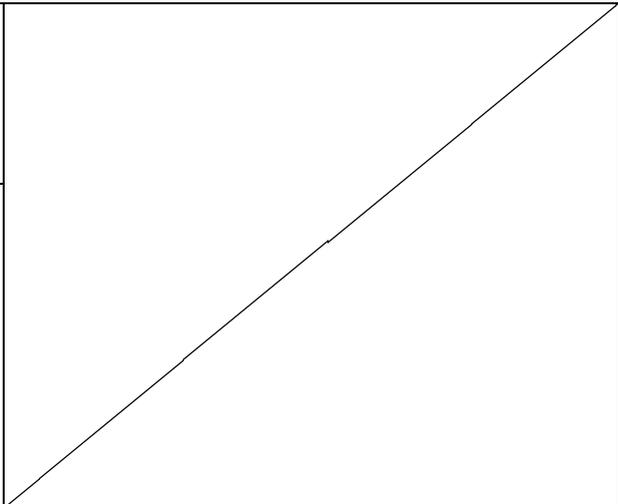
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：275 日 試験体番号：65-16  
 寸法：φ74.9×149.6mm  
 重量：[実験前] 1476.0gf  
 [実験後] —



[実験前]

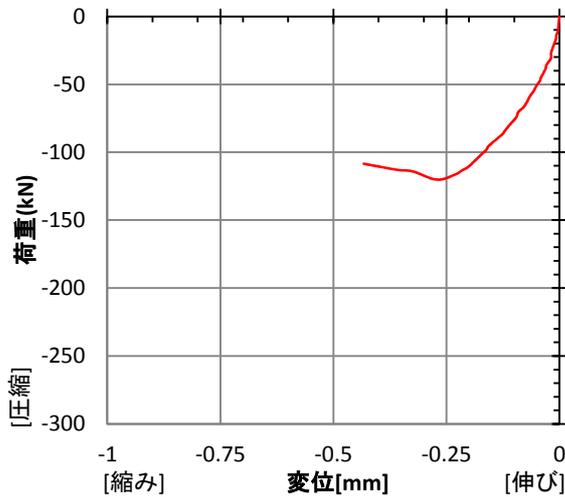


[実験後]



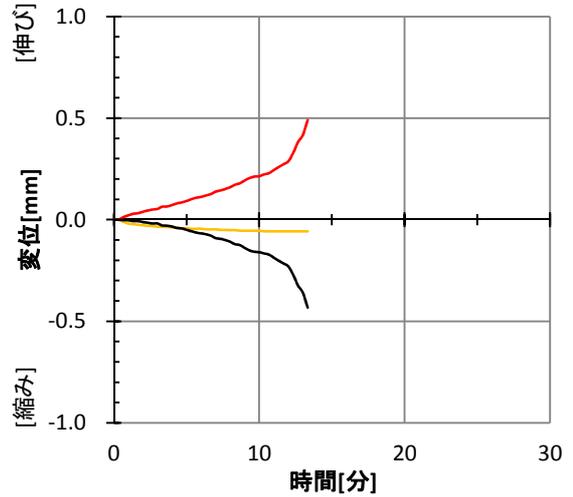
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



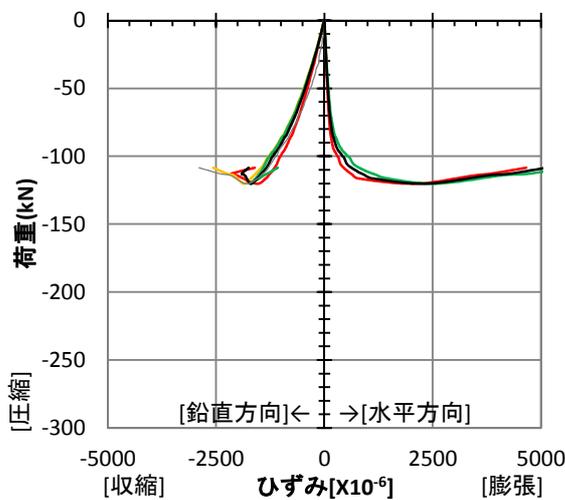
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



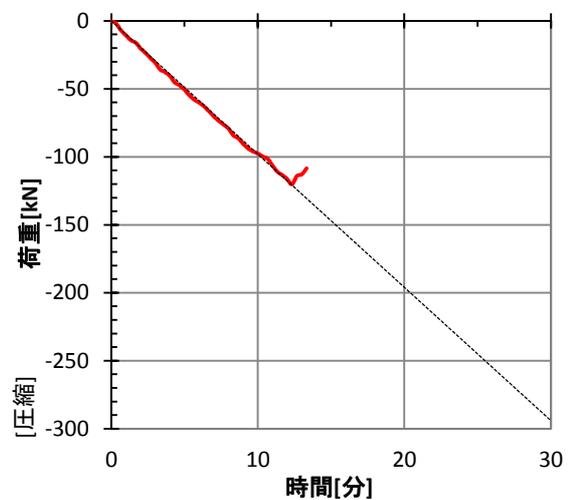
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/3

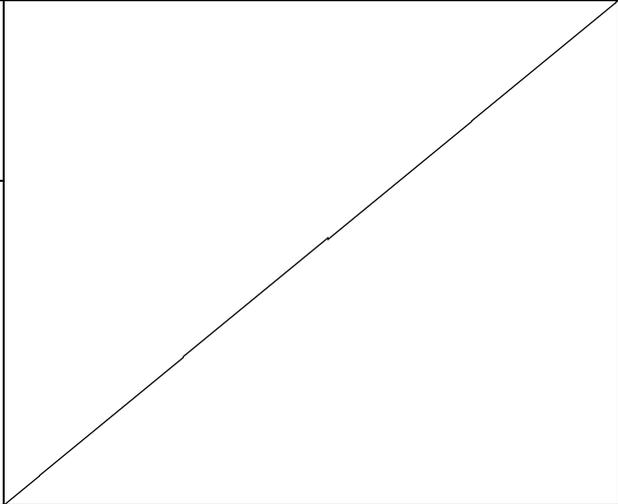
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：283 日 試験体番号：65-19  
 寸法：φ74.9×151.0mm  
 重量：[実験前] 1482.9gf  
 [実験後] —



[実験前]

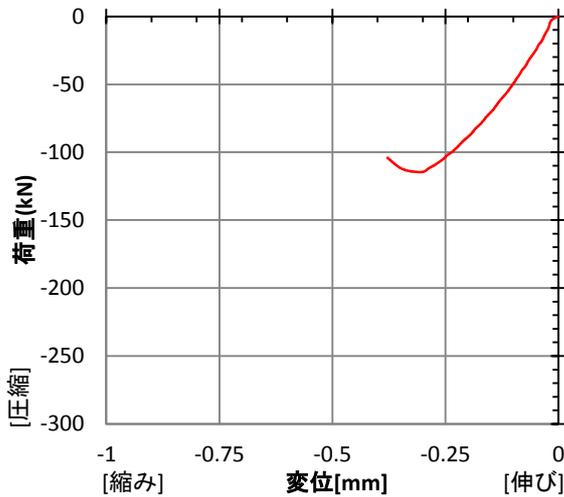


[実験後]



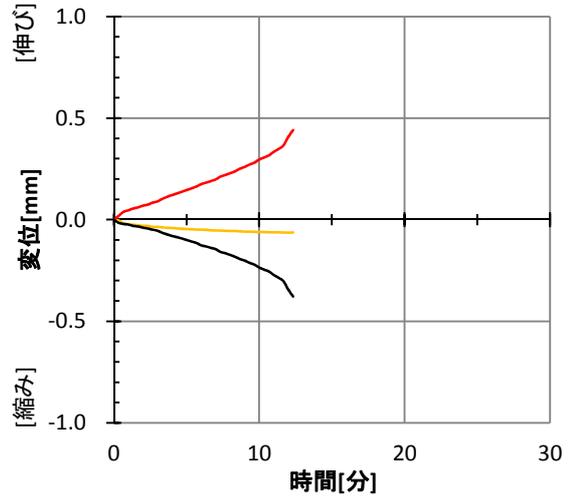
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



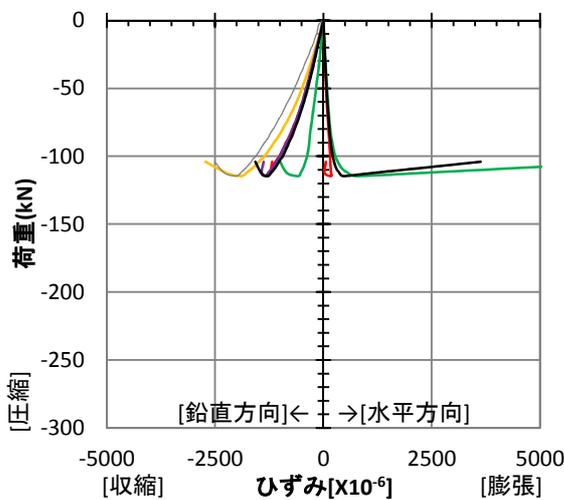
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



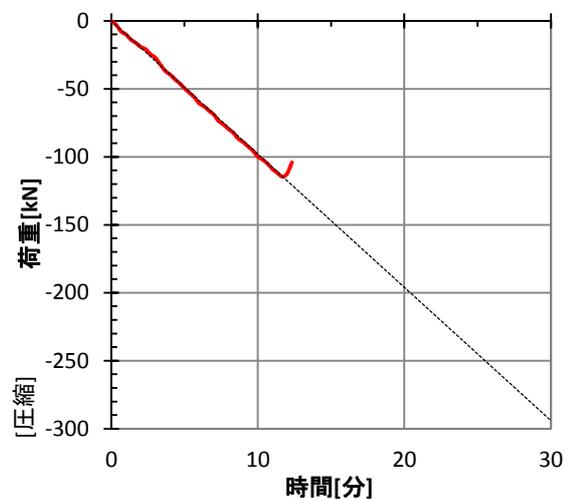
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/17

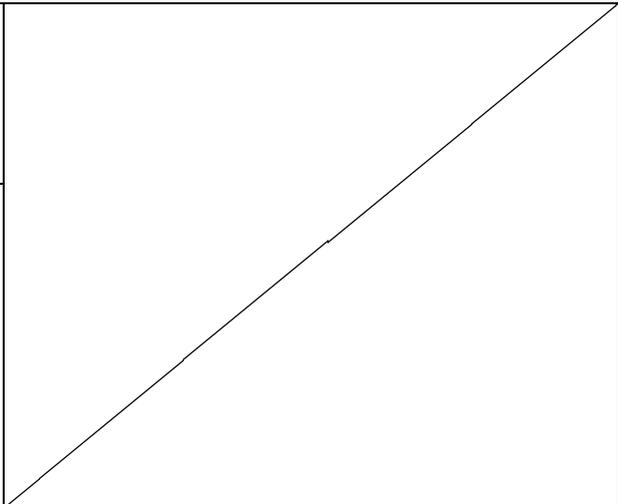
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：205 日 試験体番号：65-1  
 寸法：φ75.0×149.1mm  
 重量：[実験前] 1427.6gf  
 [実験後] —



[実験前]

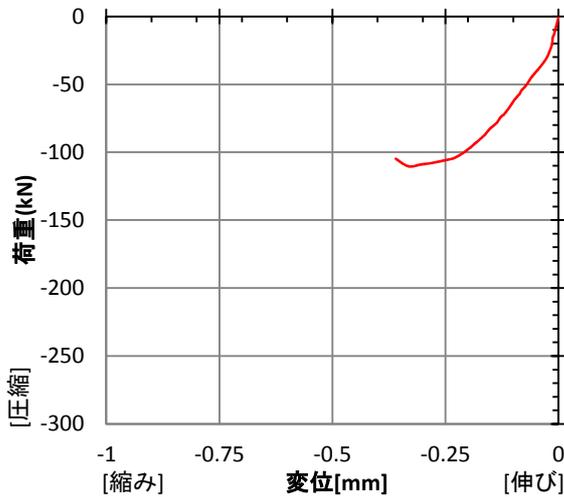


[実験後]



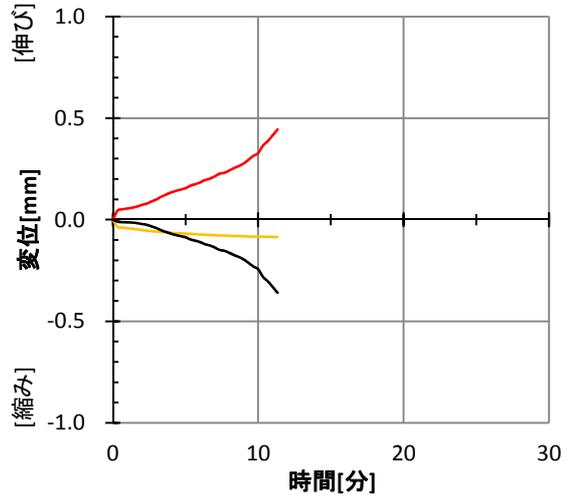
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



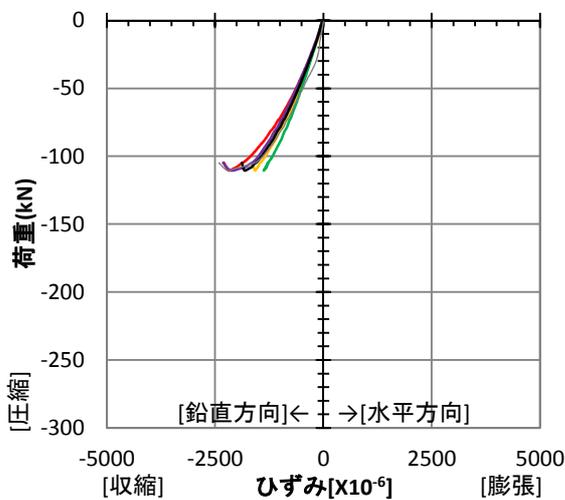
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



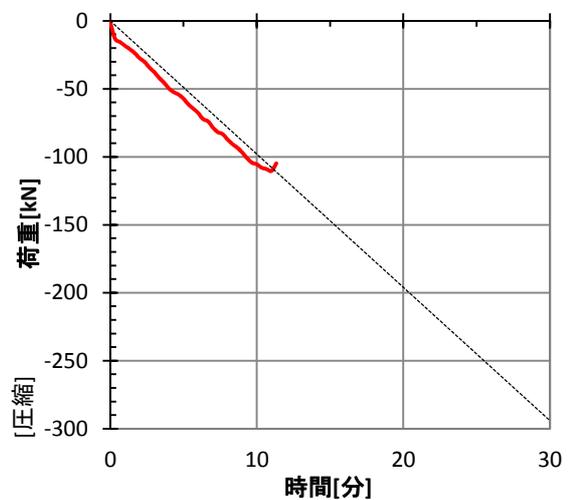
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/5/17

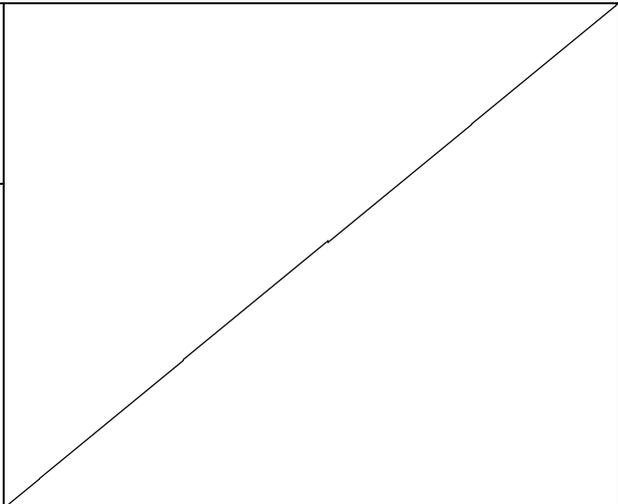
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：205日 試験体番号：65-2  
 寸法：φ75.2×150.0mm  
 重量：[実験前] 1447.1gf  
 [実験後] —



[実験前]

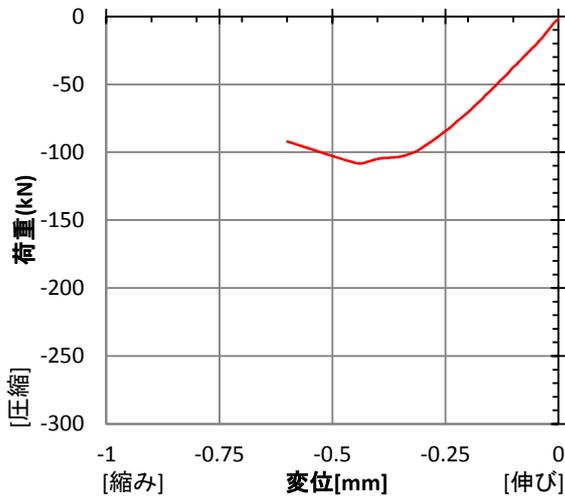


[実験後]



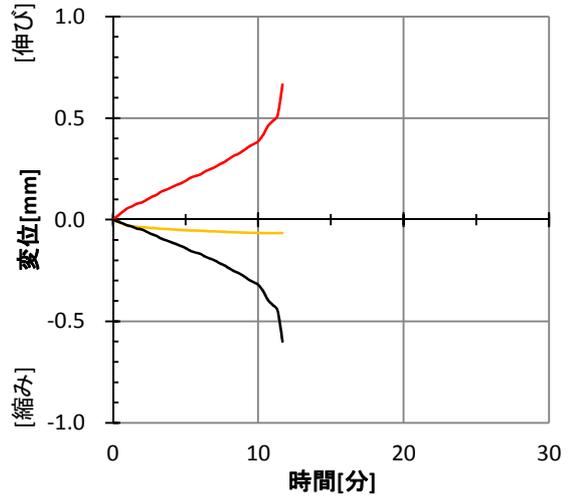
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



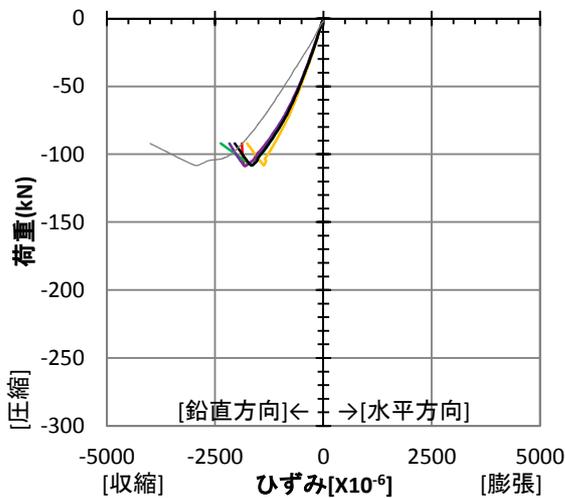
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



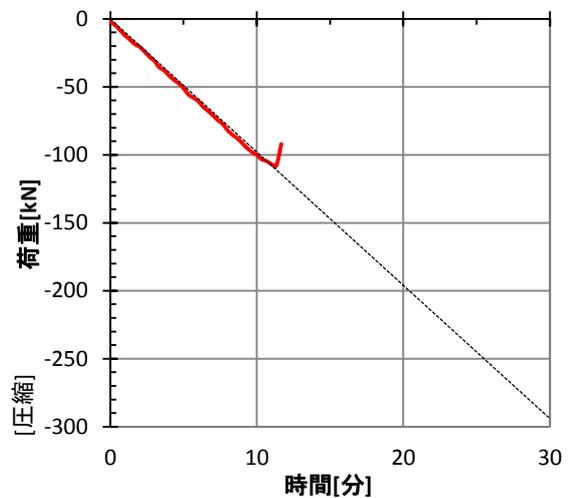
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-20-3 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/15

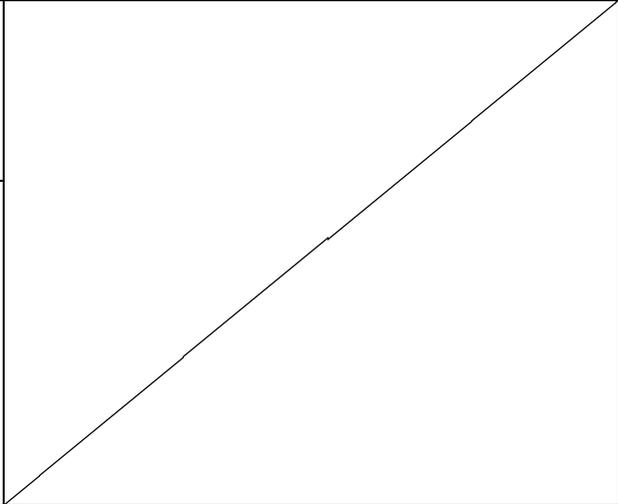
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：234 日 試験体番号：65-3  
 寸法：φ75.0×149.4mm  
 重量：[実験前] 1447.9gf  
 [実験後] —



[実験前]

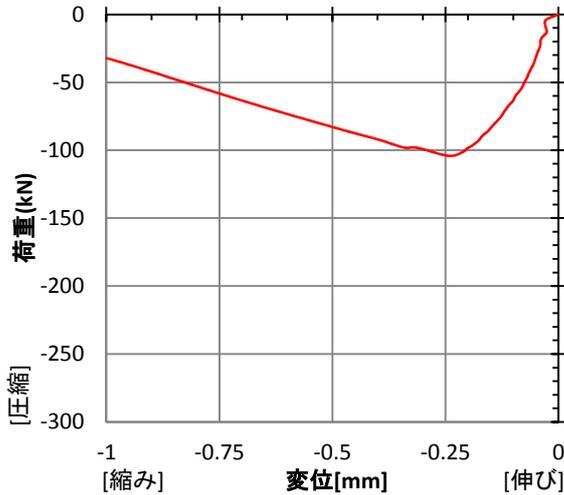


[実験後]



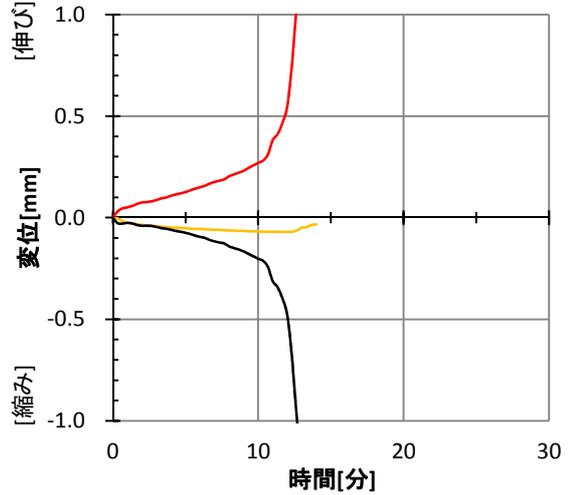
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



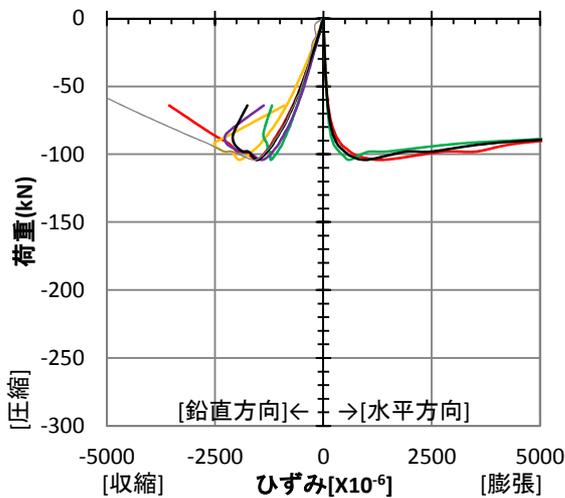
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



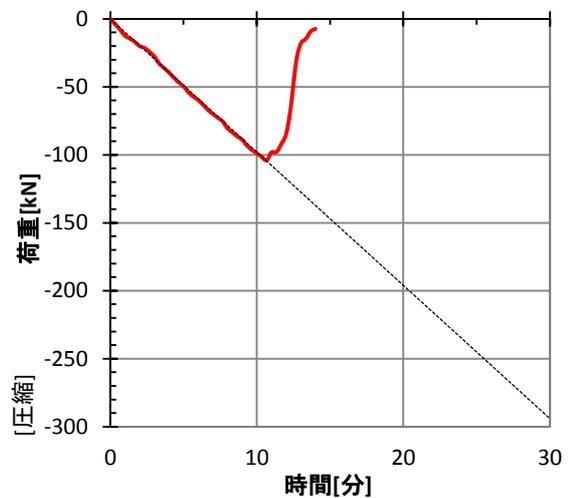
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-20-4 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/7/20

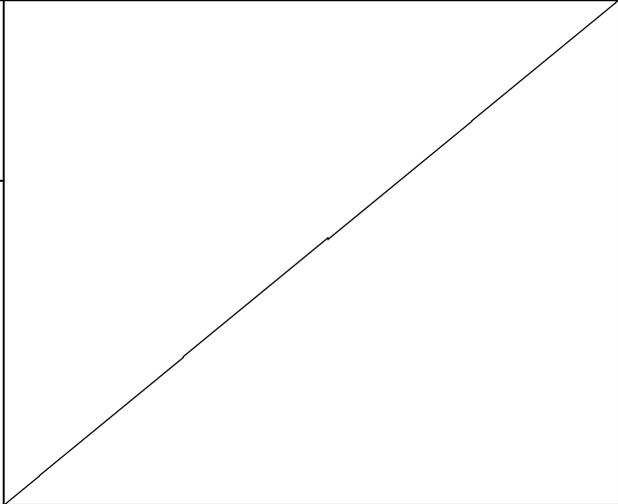
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：269日 試験体番号：65-12  
 寸法：φ74.9×150.7mm  
 重量：[実験前] 1460.3gf  
 [実験後] —



[実験前]

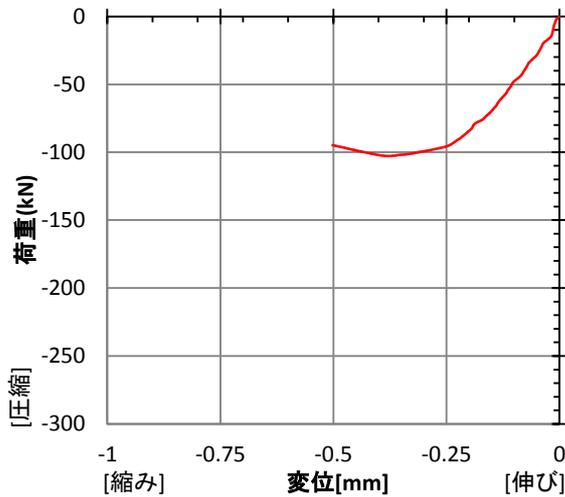


[実験後]



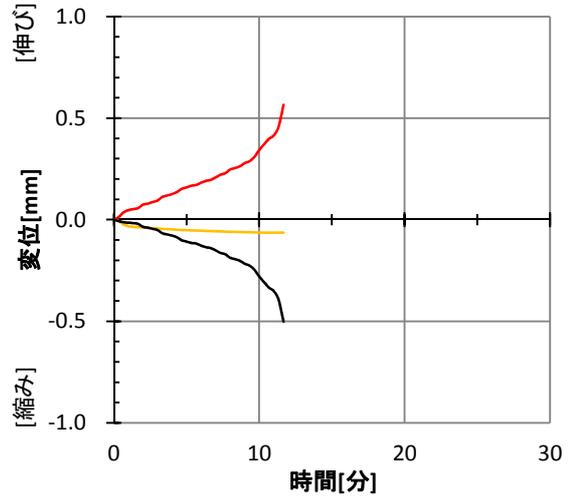
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



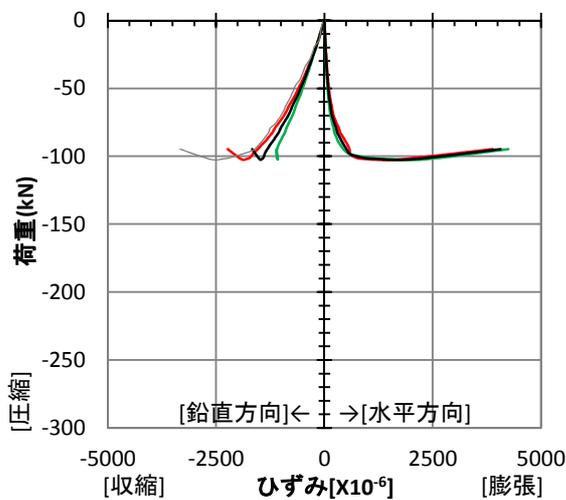
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



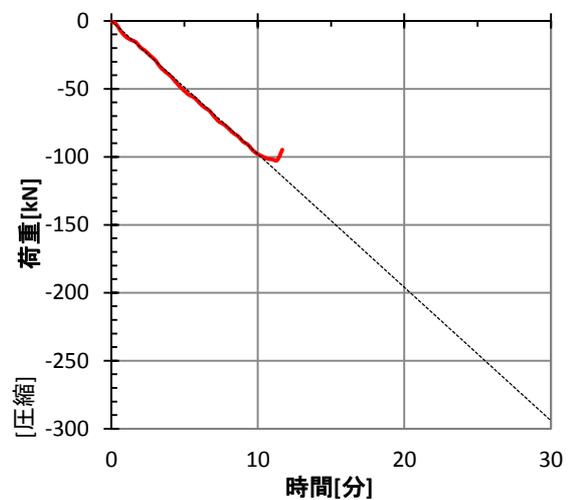
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/11

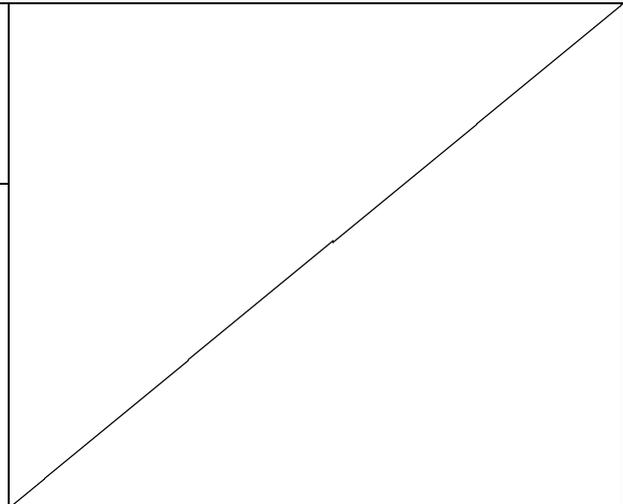
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：291日 試験体番号：65-18  
 寸法：φ75.1×150.1mm  
 重量：[実験前] 1453.3gf  
 [実験後] —



[実験前]

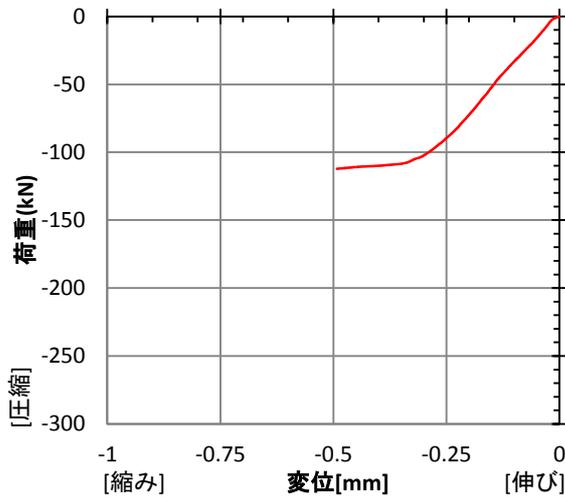


[実験後]



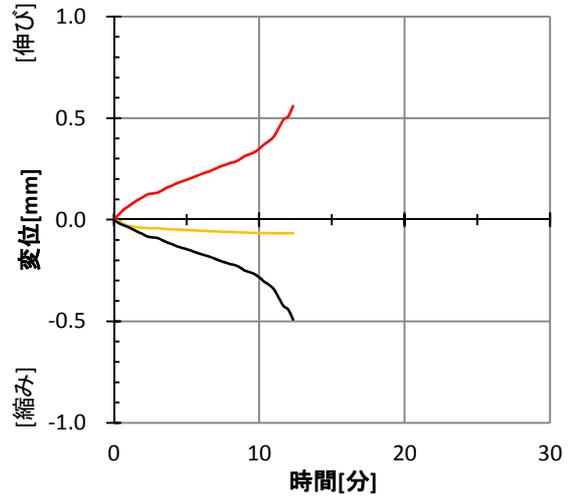
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



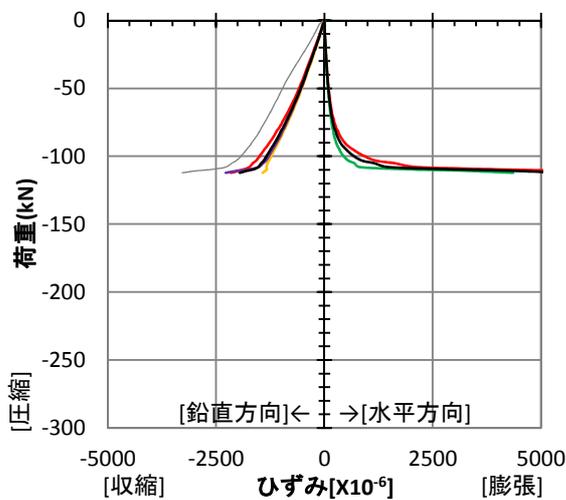
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



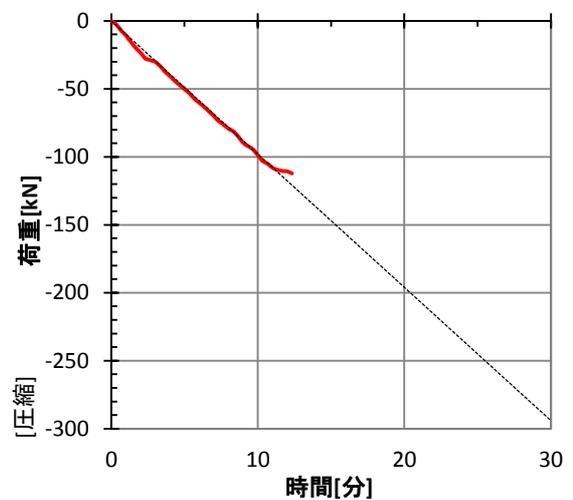
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-20-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/2

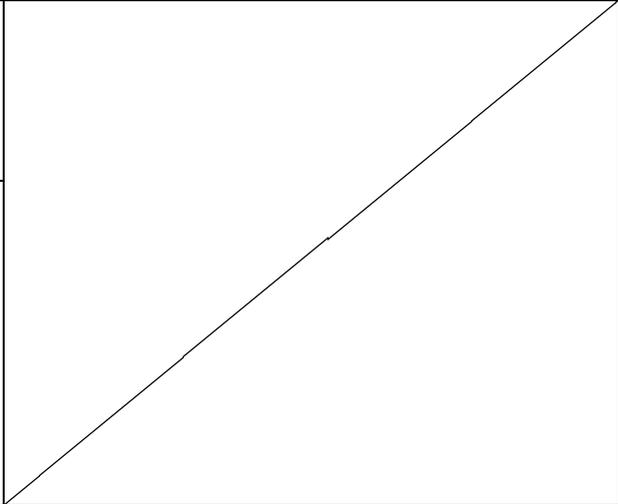
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：221日 試験体番号：65-10  
 寸法：φ75.0×150.3mm  
 重量：[実験前] 1501.6gf  
 [実験後] —



[実験前]

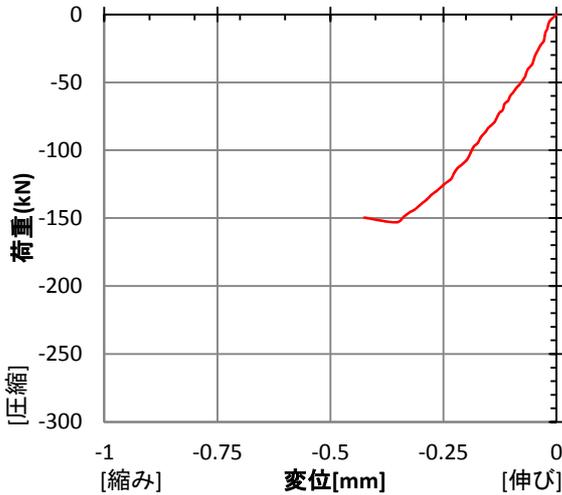


[実験後]



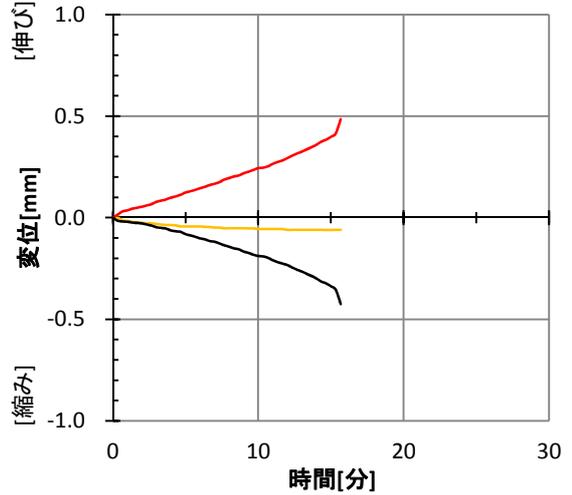
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



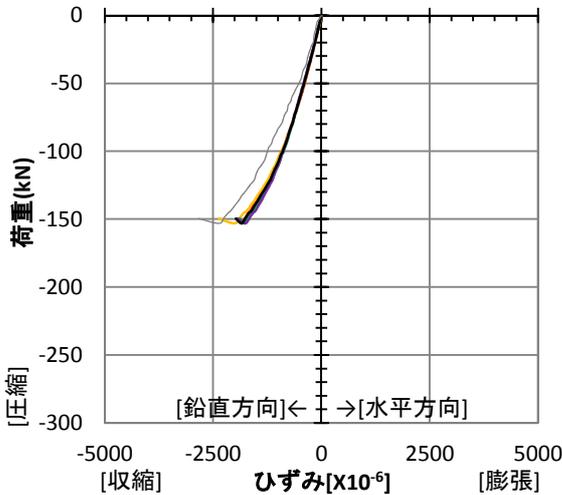
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



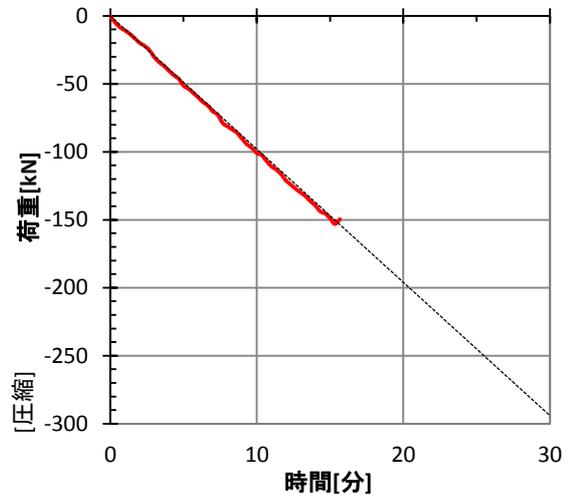
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-20-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/3

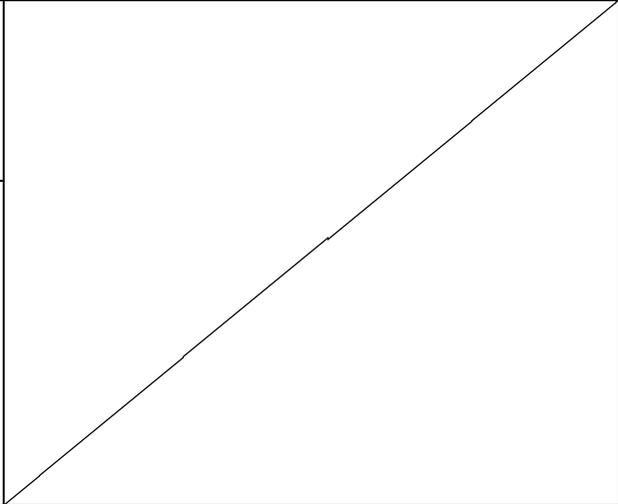
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：222日 試験体番号：65-11  
 寸法：φ75.0×150.4mm  
 重量：[実験前] 1512.9gf  
 [実験後] —



[実験前]

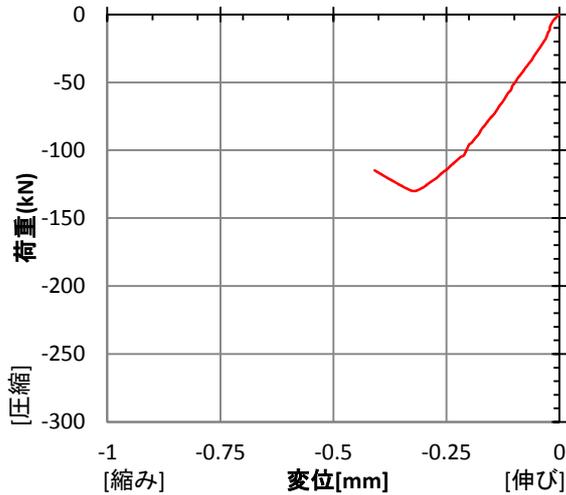


[実験後]



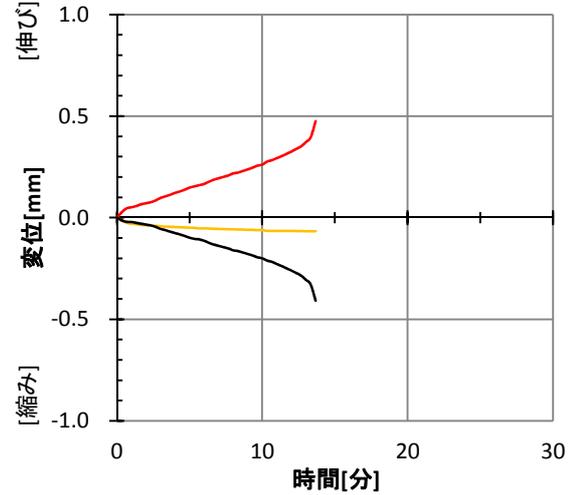
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



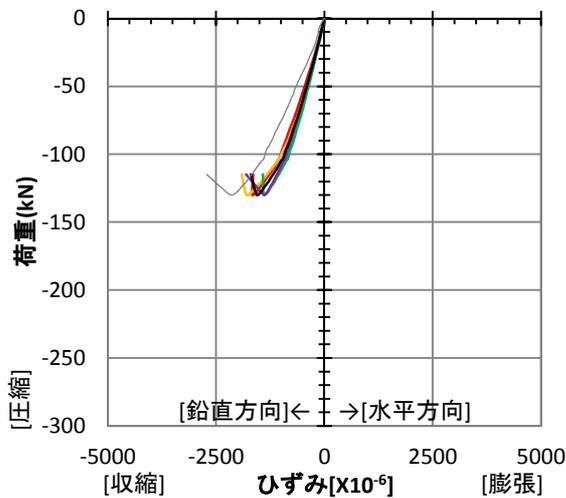
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



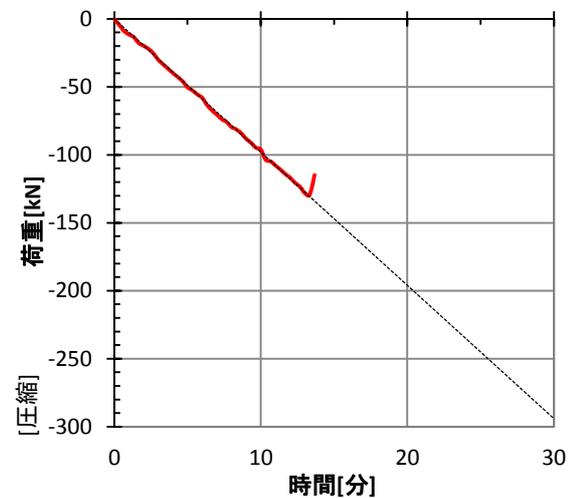
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-20-3 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/6/27

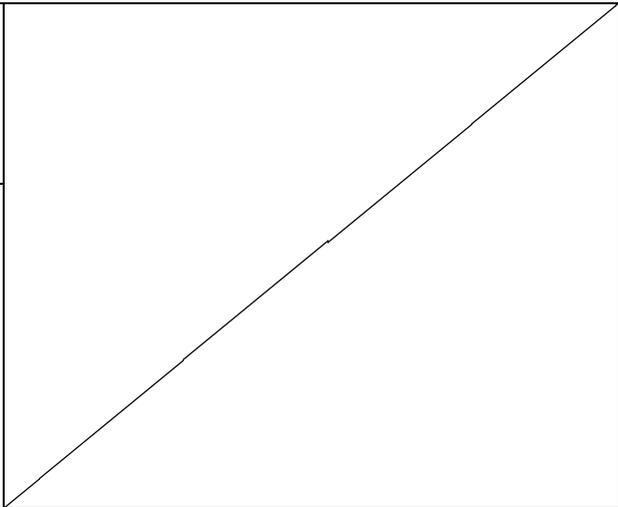
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：246日 試験体番号：65-15  
 寸法：φ75.1×148.9mm  
 重量：[実験前] 1521.6gf  
 [実験後] —



[実験前]

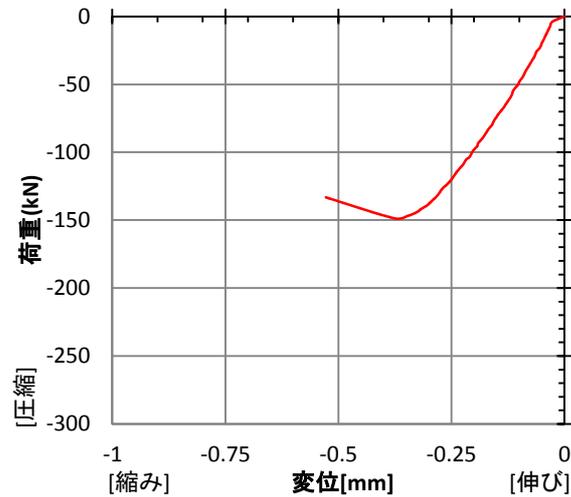


[実験後]



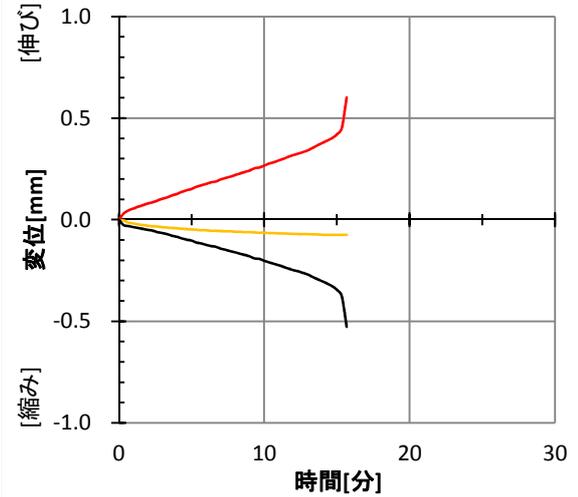
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



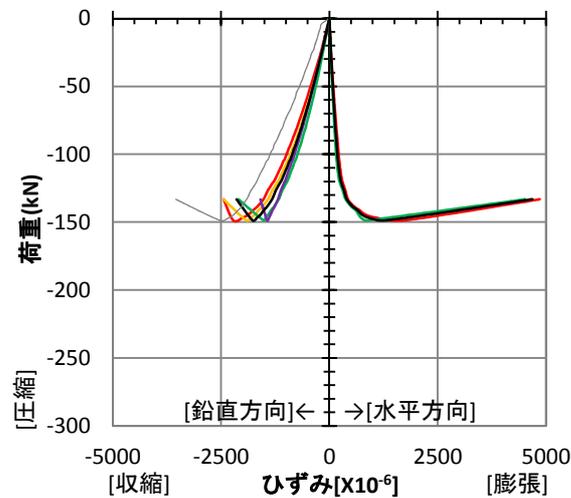
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



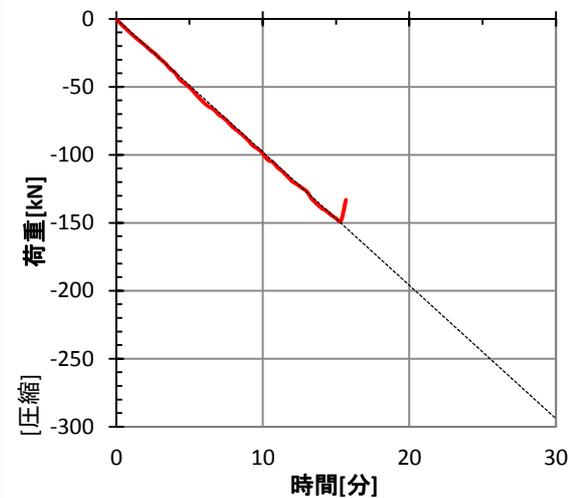
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-20-4 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/3

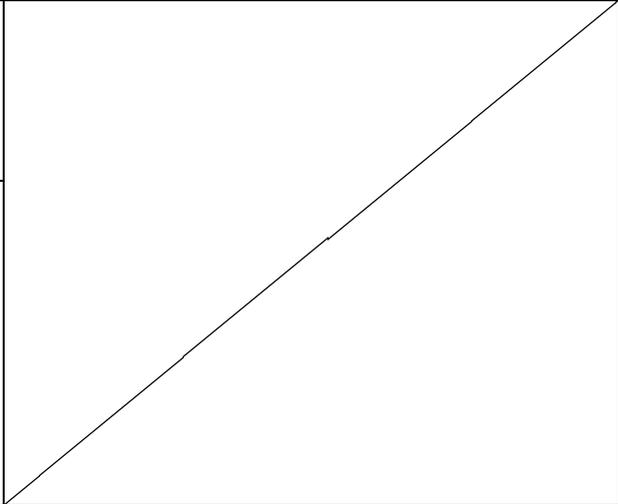
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：283 日 試験体番号：65-20  
 寸法：φ75.1×150.9mm  
 重量：[実験前] 1531.8gf  
 [実験後] —



[実験前]

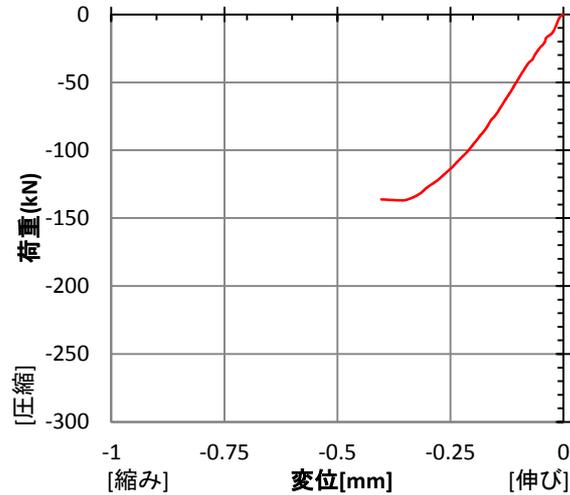


[実験後]



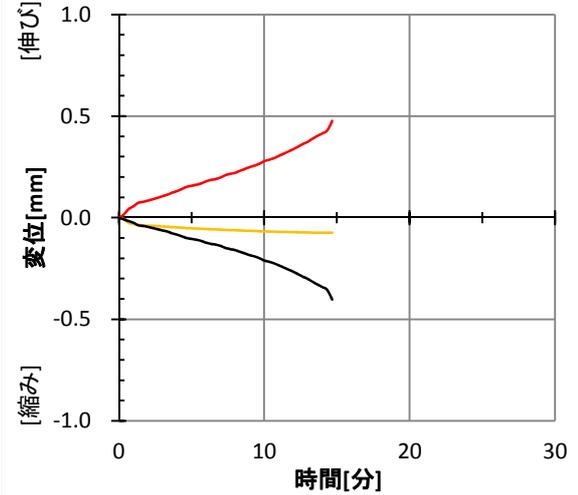
荷重-変形 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



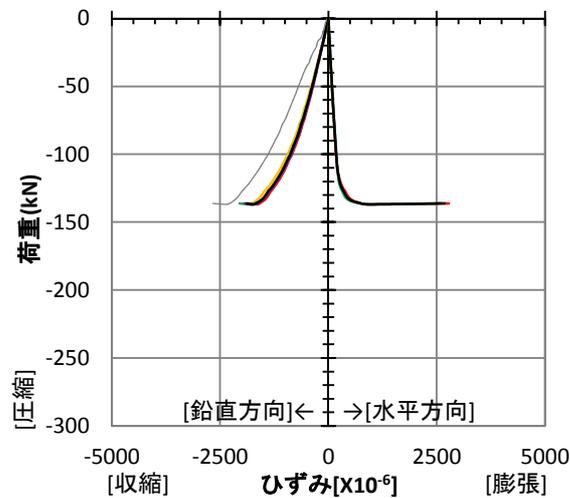
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側) - 上側)



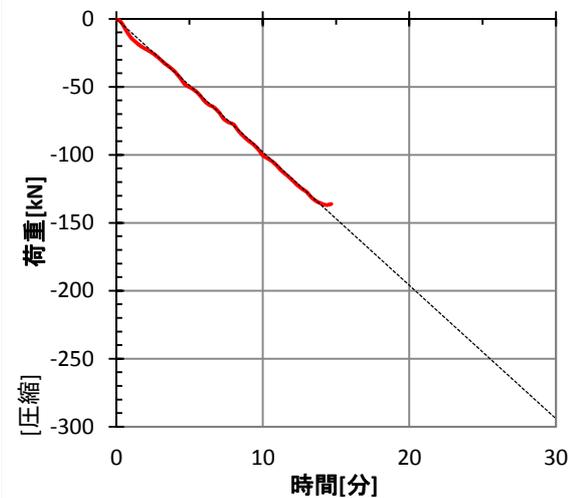
ひずみ-荷重 関係

[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-20-5 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：室温  
 実施日：2014/8/4

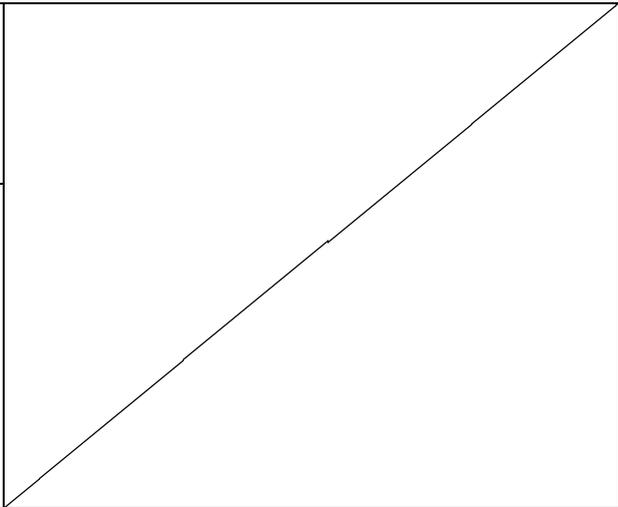
試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：284日 試験体番号：65-21  
 寸法：φ75.1×150.4mm  
 重量：[実験前] 1525.9gf  
 [実験後] —



[実験前]

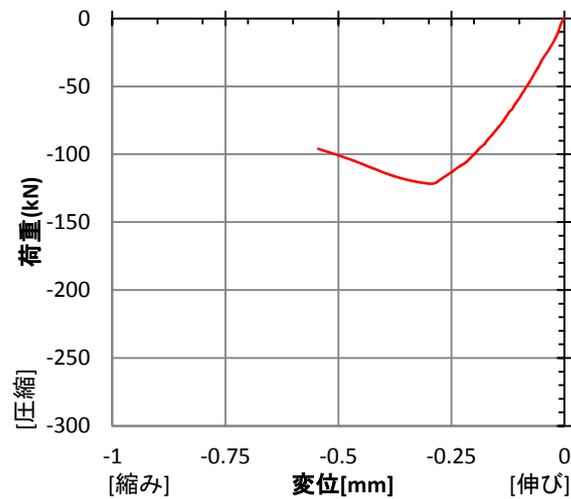


[実験後]



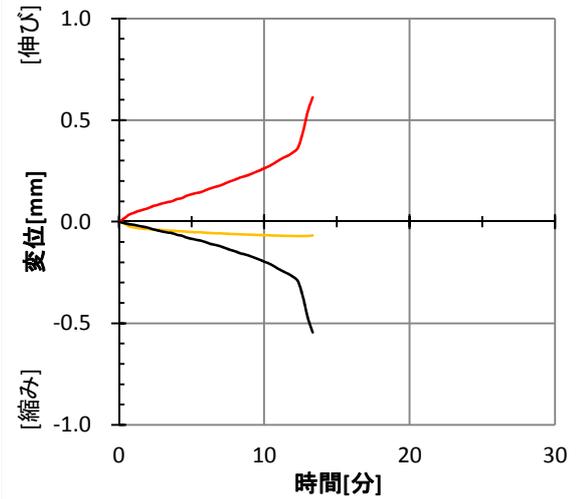
荷重-変形 関係

— 変形



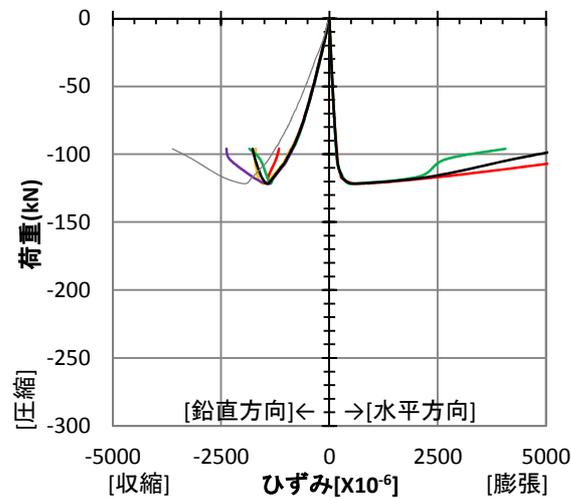
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



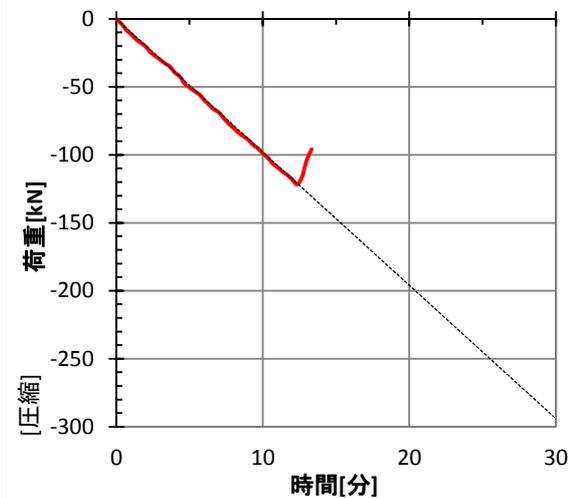
ひずみ-荷重 関係

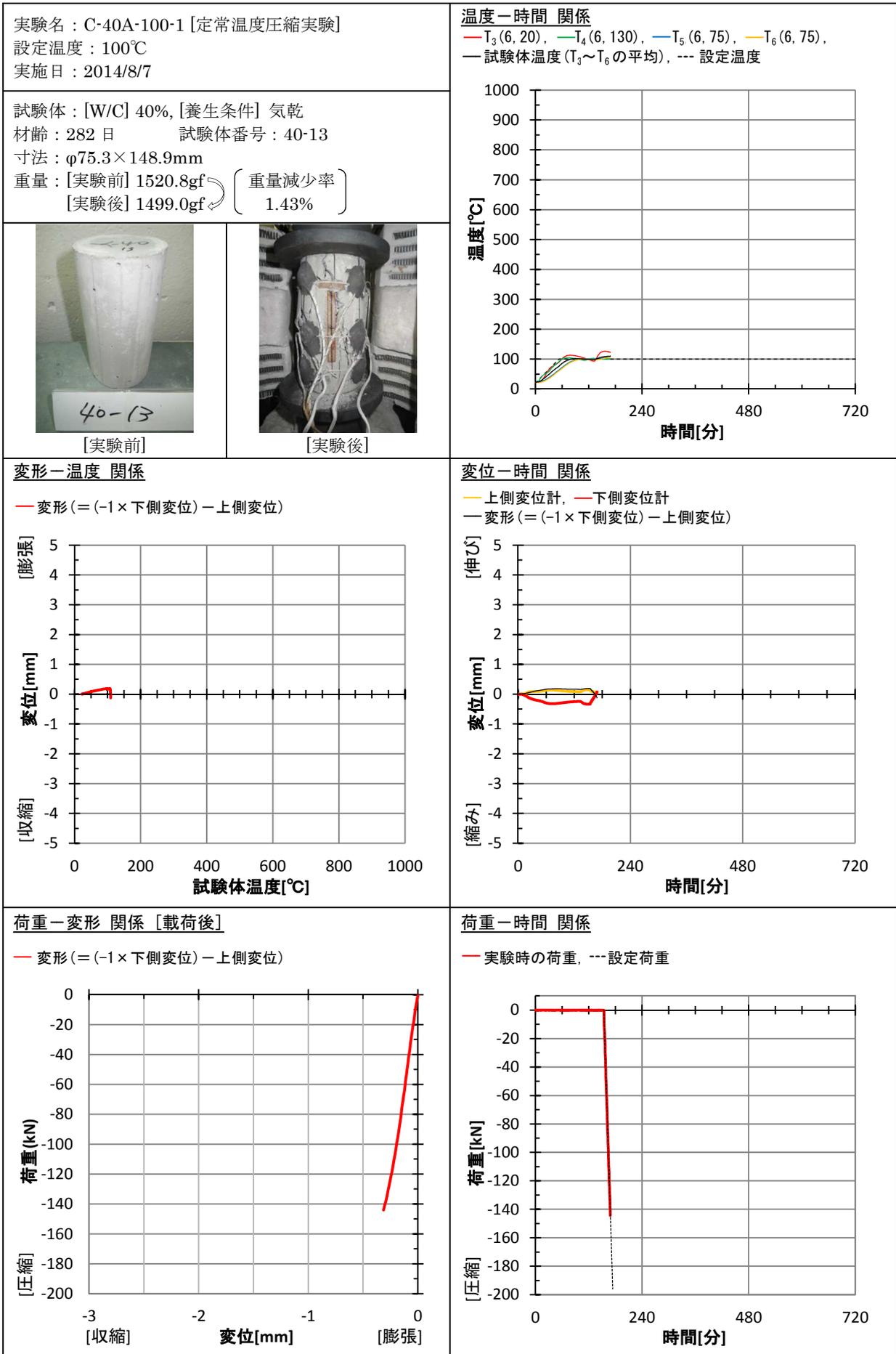
[ひずみゲージ] — 東面, — 西面, — 南面, — 北面, — 平均  
 [変位計] — 変形

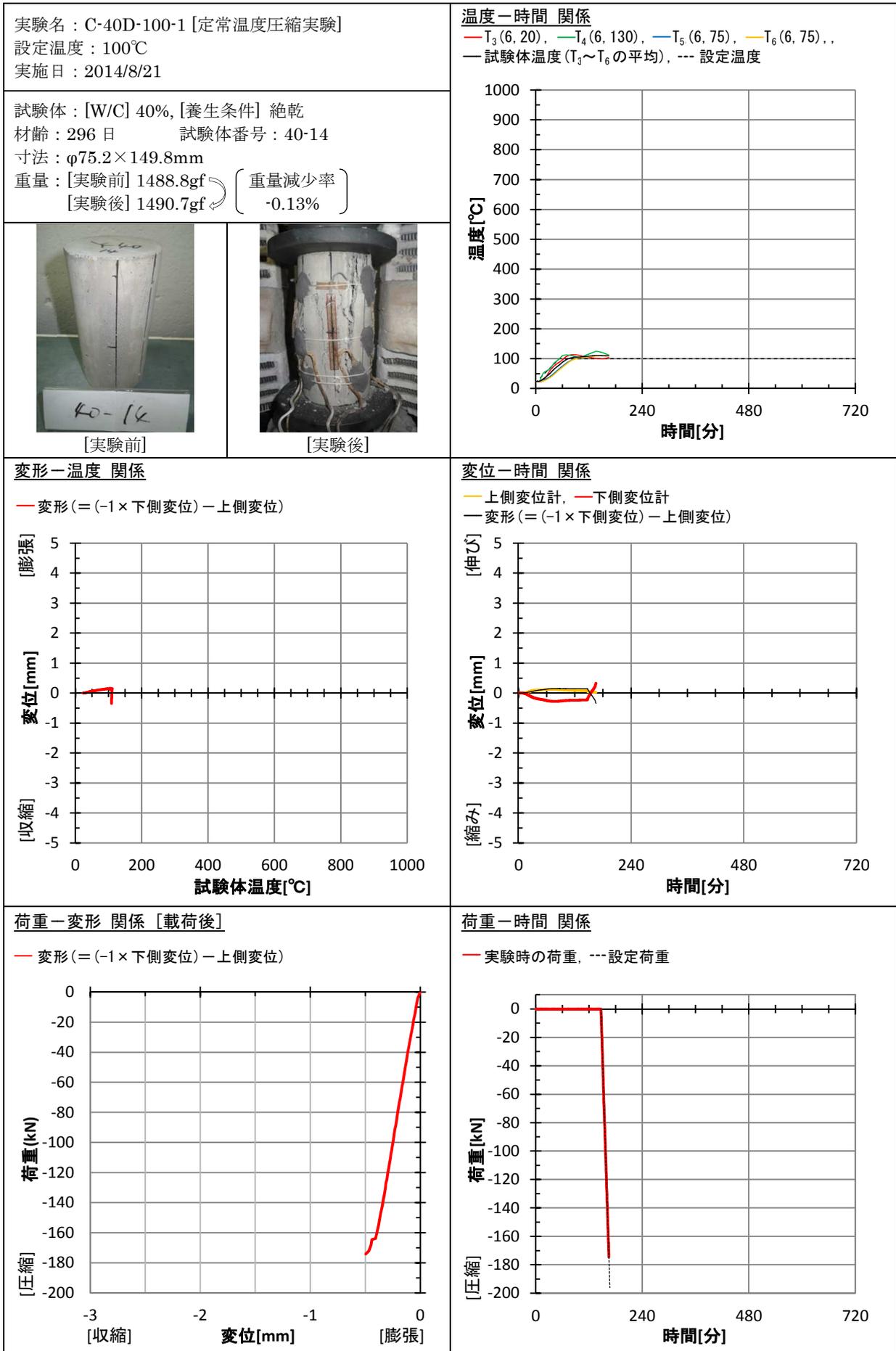


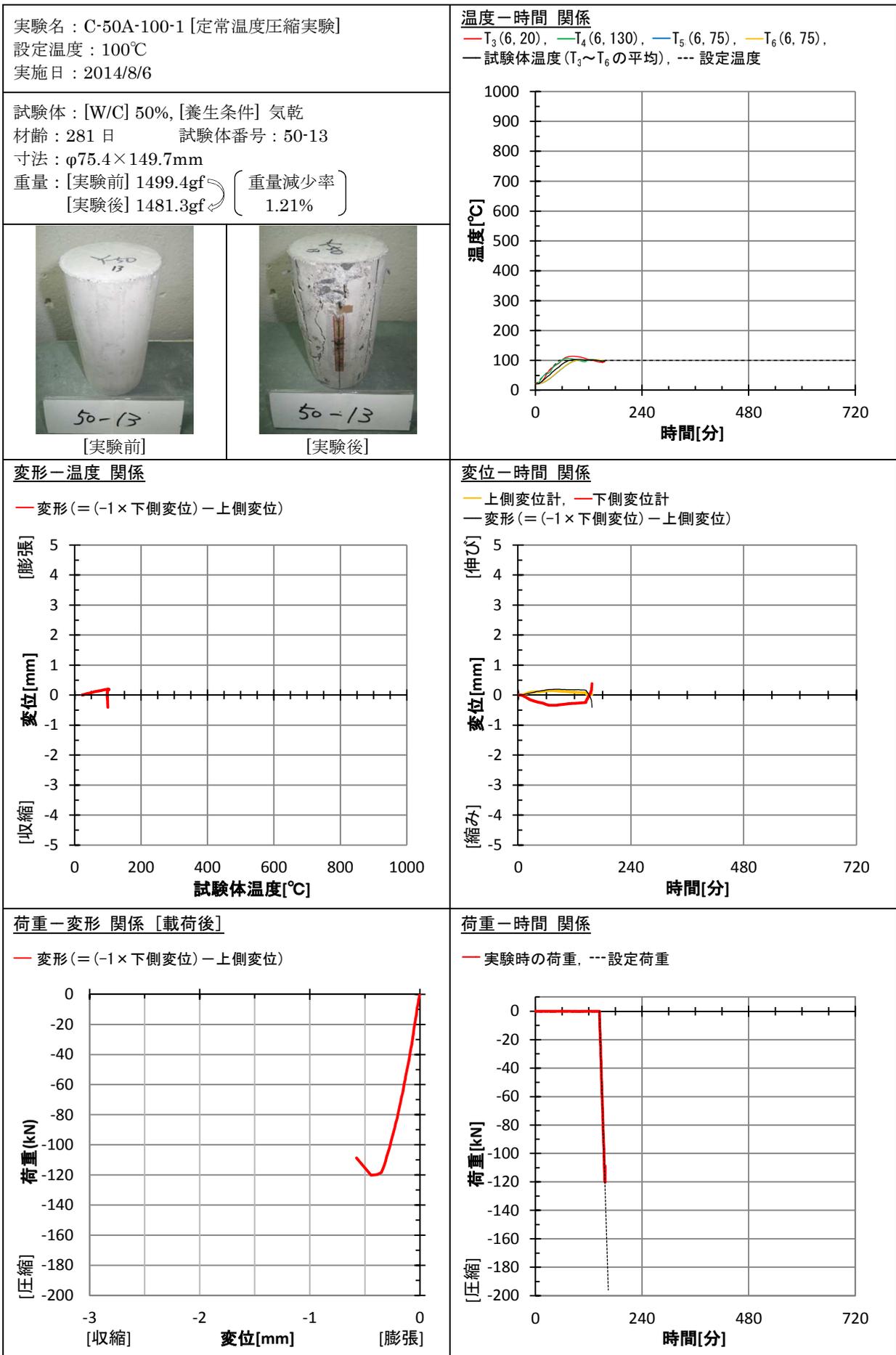
荷重-時間 関係

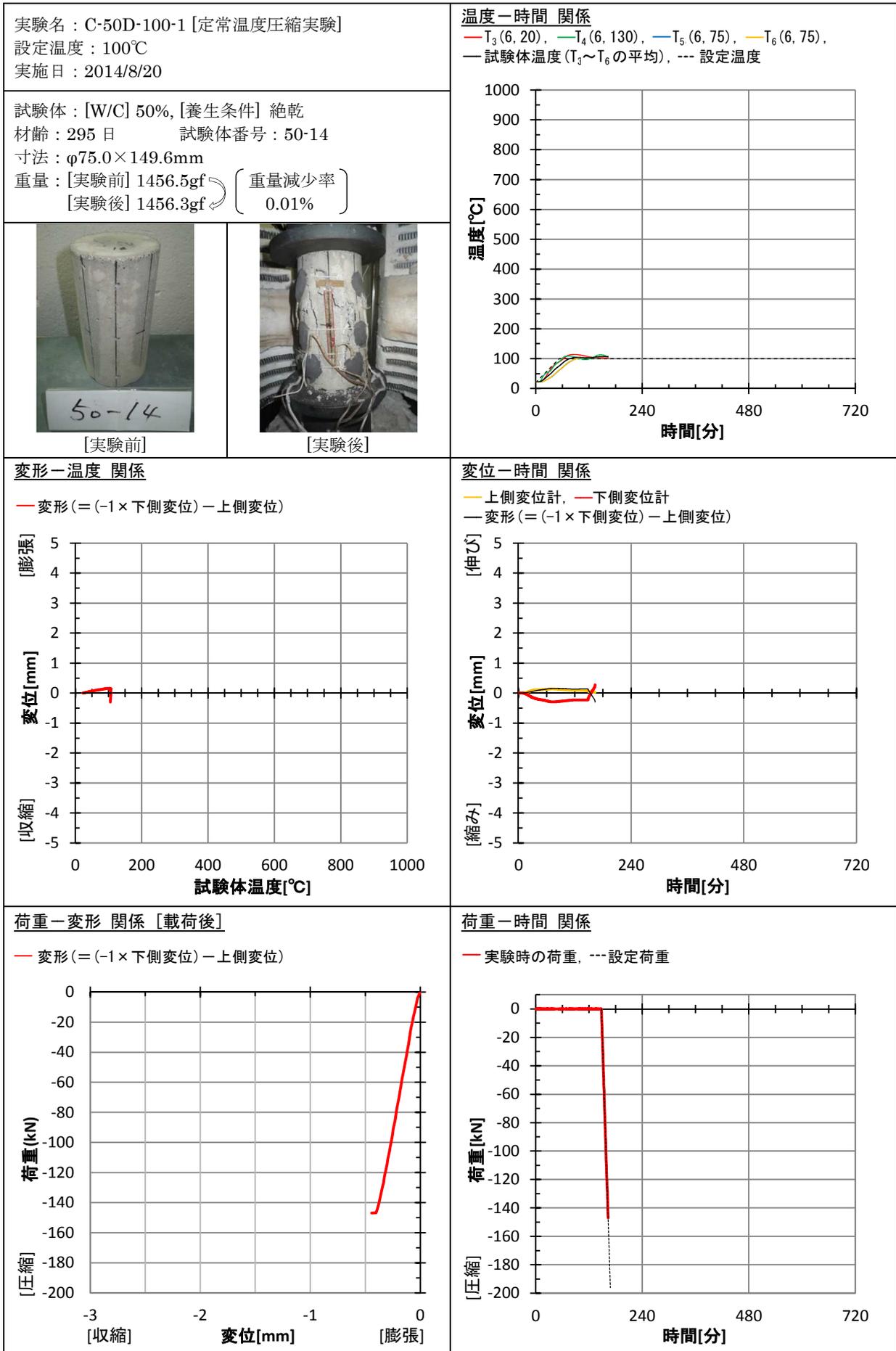
— 実験時の荷重, --- 設定荷重

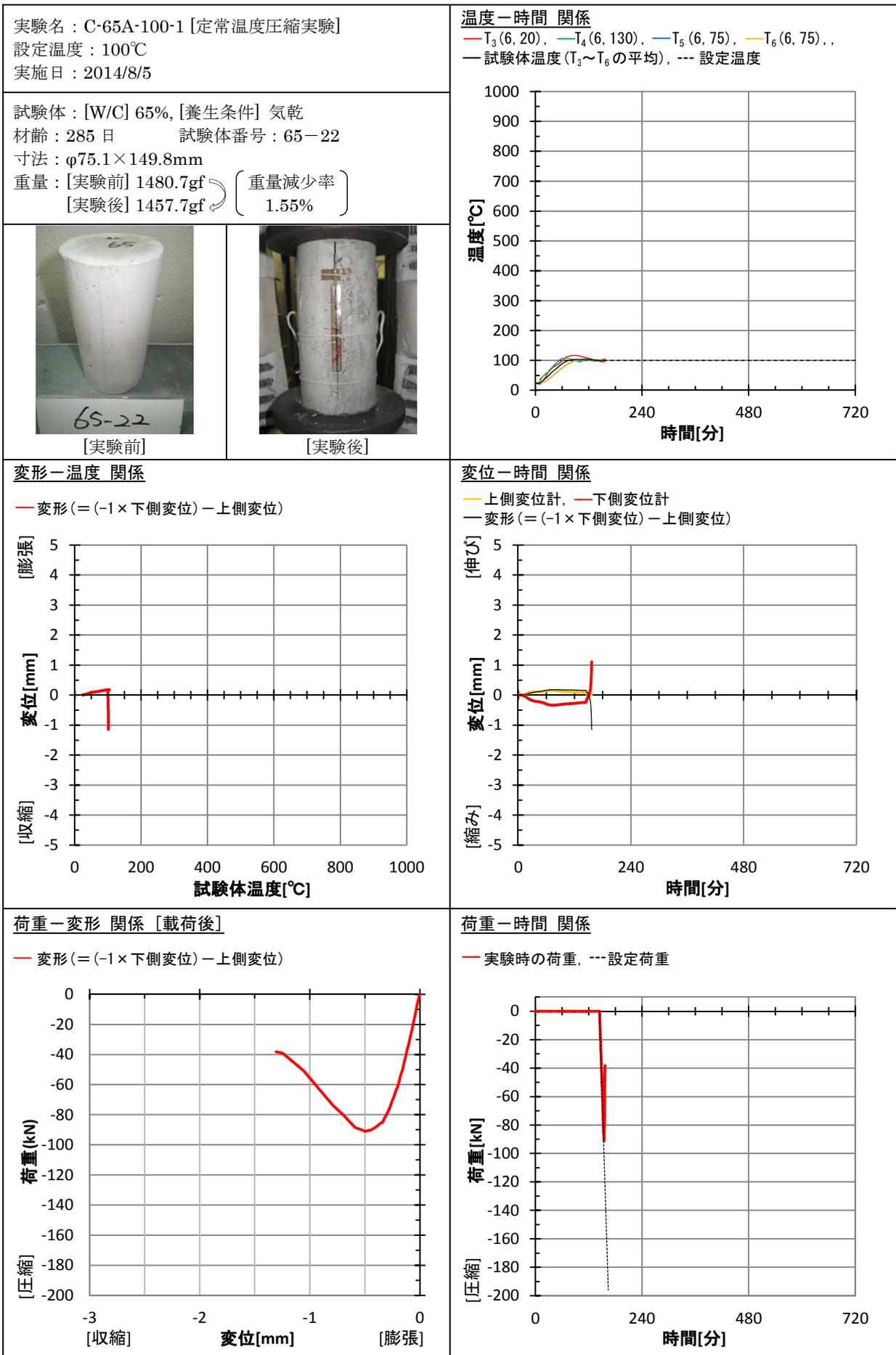


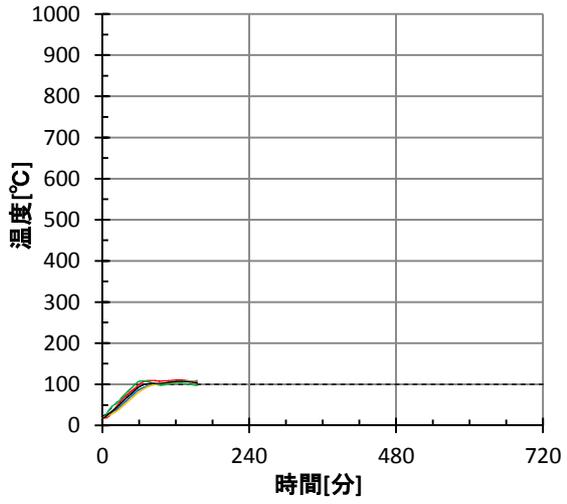
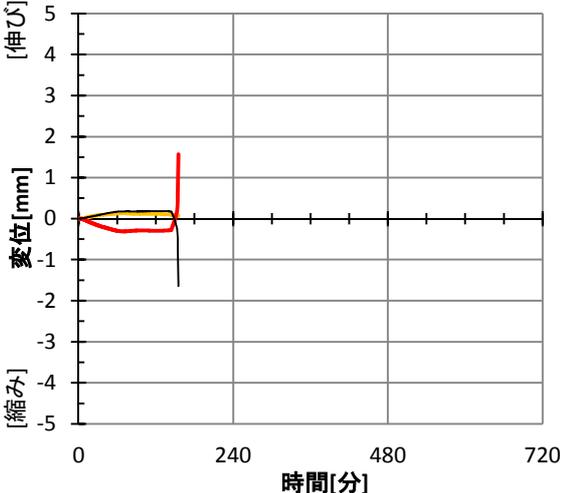
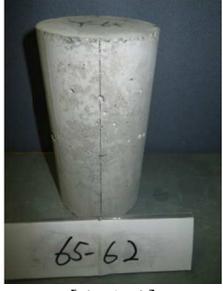
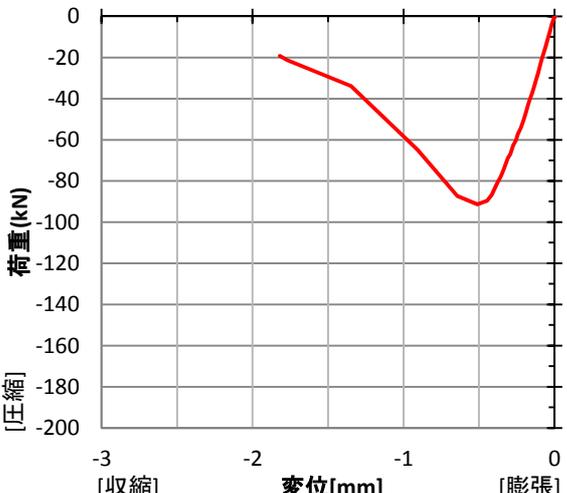
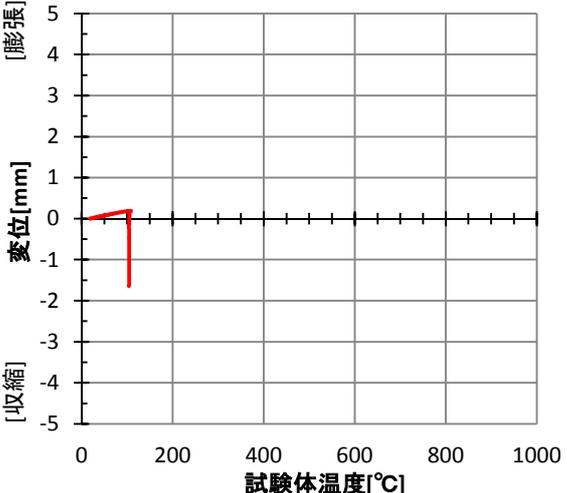
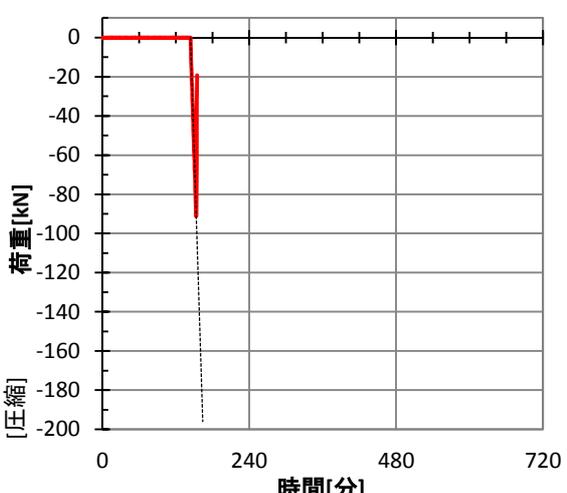


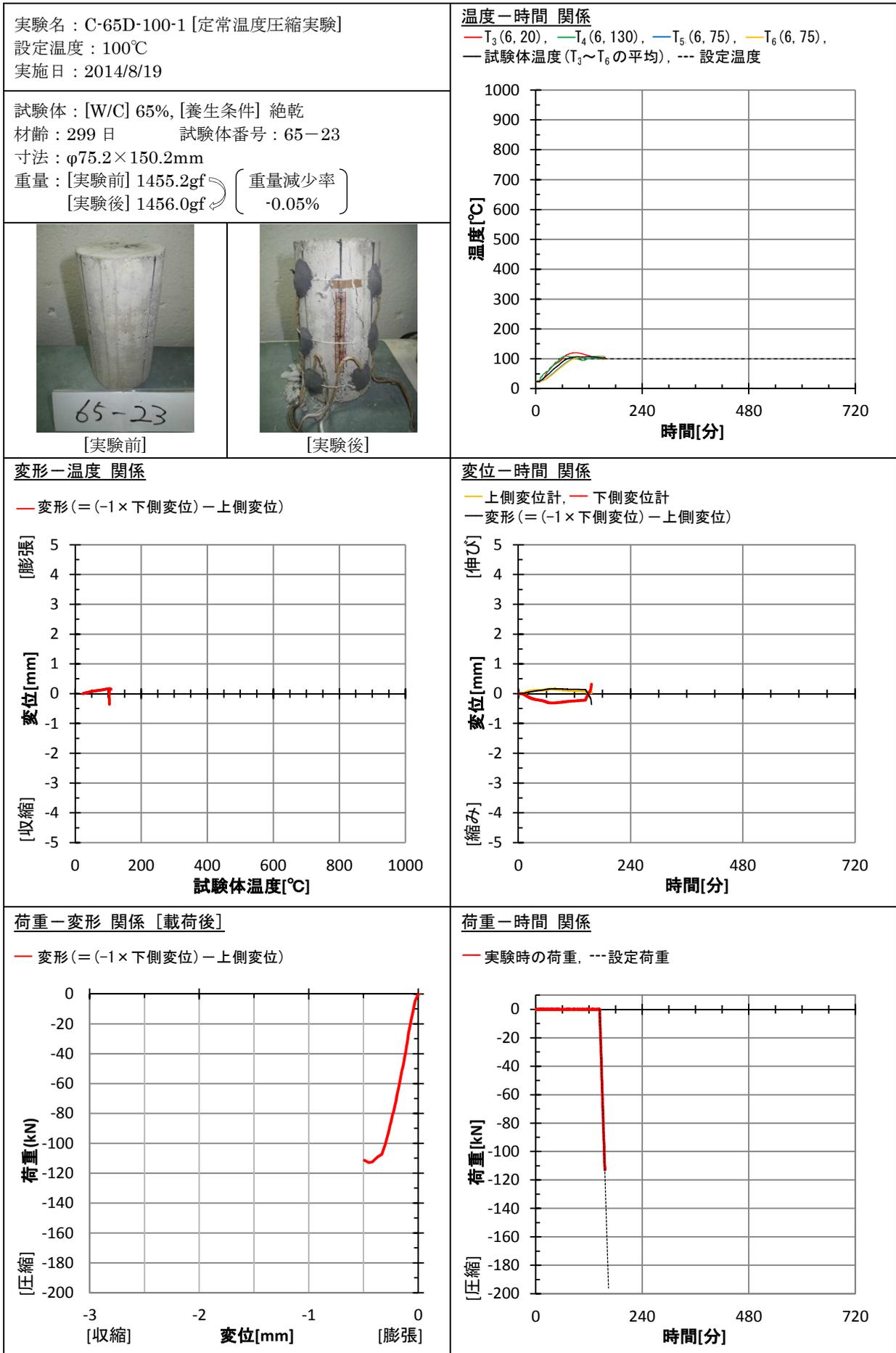


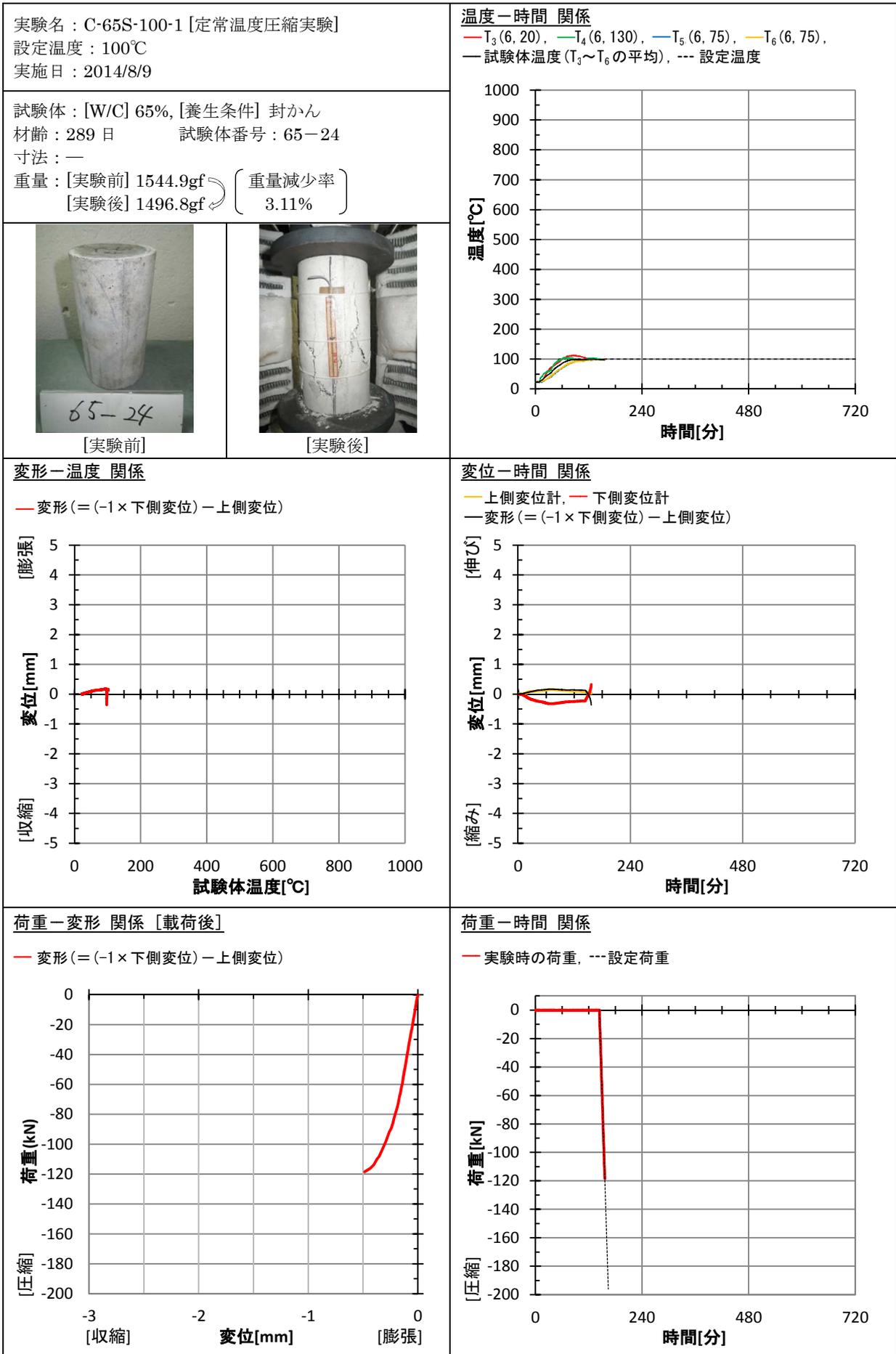






<p>実験名：C-65A-100-2 [定常温度圧縮実験]          設定温度：100℃          実施日：2015/1/30</p>	<p><b>温度-時間 関係</b>          — <math>T_3(6, 20)</math>, — <math>T_4(6, 130)</math>, — <math>T_5(6, 75)</math>, — <math>T_6(6, 75)</math>,          — 試験体温度 (<math>T_3 \sim T_6</math> の平均), --- 設定温度</p> 
<p>試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾          材齢：463 日      試験体番号：65-62          寸法：φ75.2×149.8mm          重量：[実験前] 1481.5gf      (重量減少率)                    [実験後] 1466.7gf      (1.00%)</p>	<p><b>変位-時間 関係</b>          — 上側変位計, — 下側変位計          — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)</p> 
 <p>[実験前]</p>  <p>[実験後]</p>	<p><b>荷重-変形 関係 [載荷後]</b>          — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)</p> 
<p><b>変形-温度 関係</b>          — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-時間 関係</b>          — 実験時の荷重, --- 設定荷重</p> 





実験名：C-40A-200-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：200℃  
 実施日：2014/8/14

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：289日 試験体番号：40-15  
 寸法：φ75.1×150.0mm  
 重量：[実験前] 1531.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1470.0gf (4.01%)



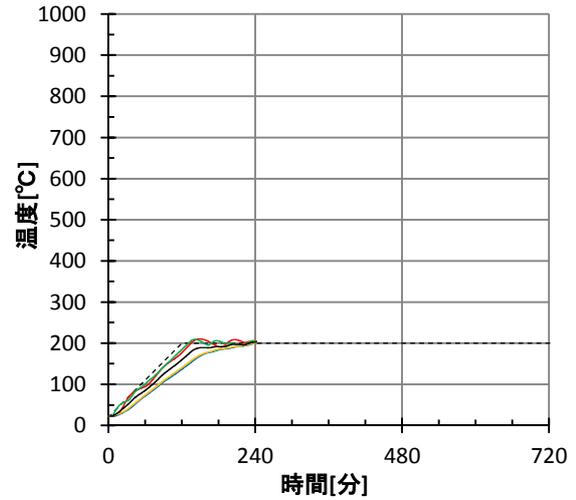
[実験前]



[実験後]

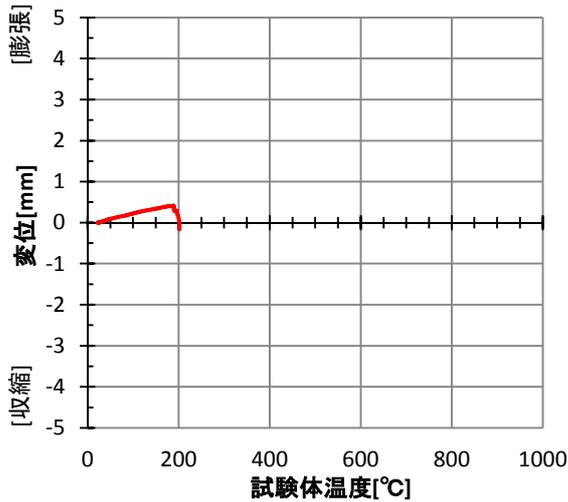
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



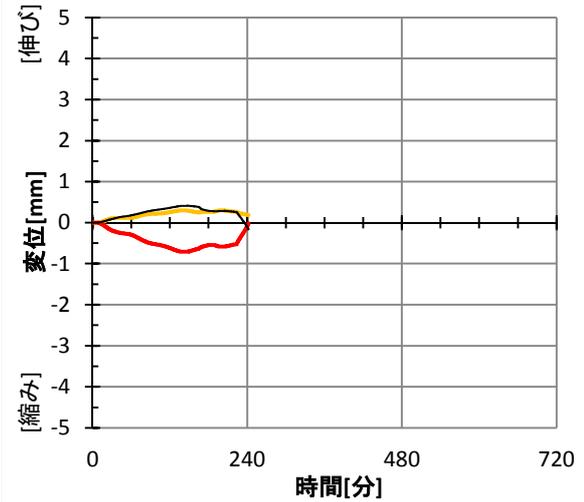
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



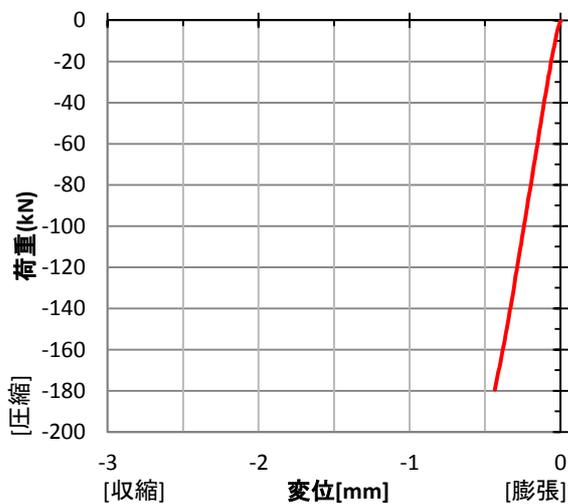
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



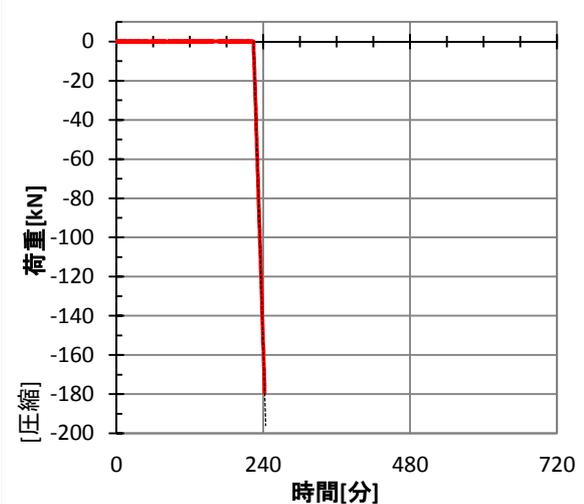
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-200-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：200℃  
 実施日：2014/8/28

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：303日 試験体番号：40-16  
 寸法：φ74.9×150.4mm  
 重量：[実験前] 1476.6gf (重量減少率)  
           [実験後] 1472.4gf (0.28%)



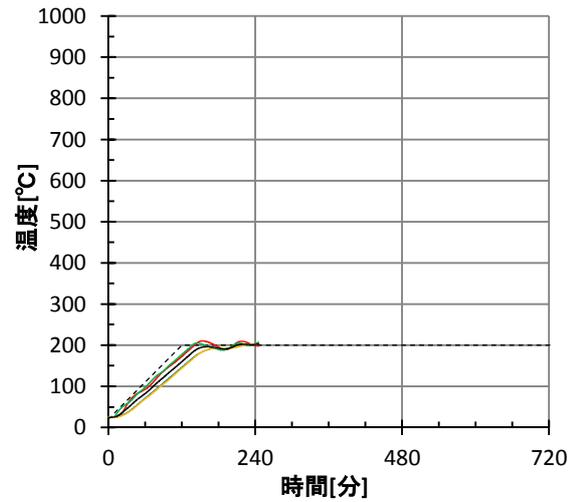
[実験前]



[実験後]

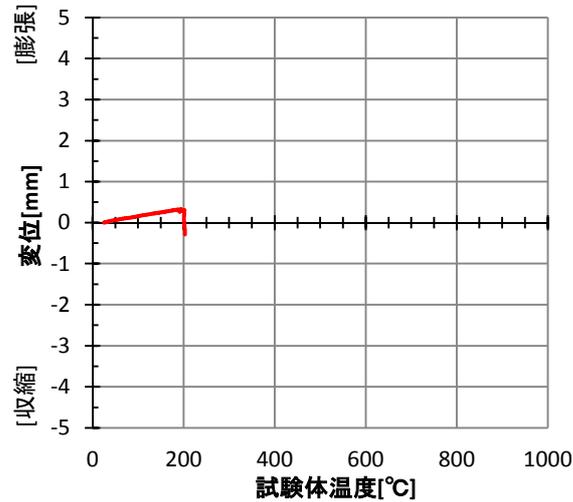
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



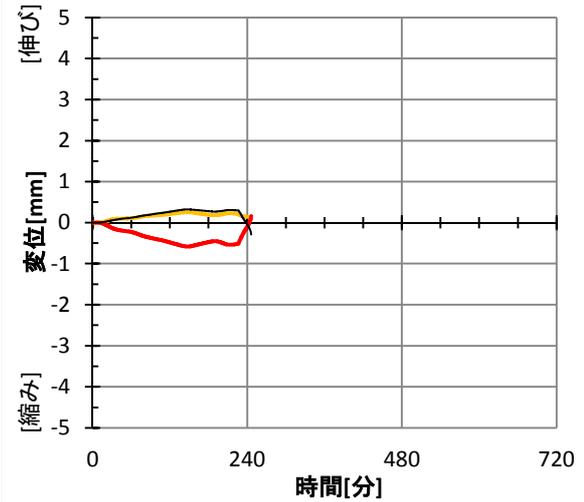
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



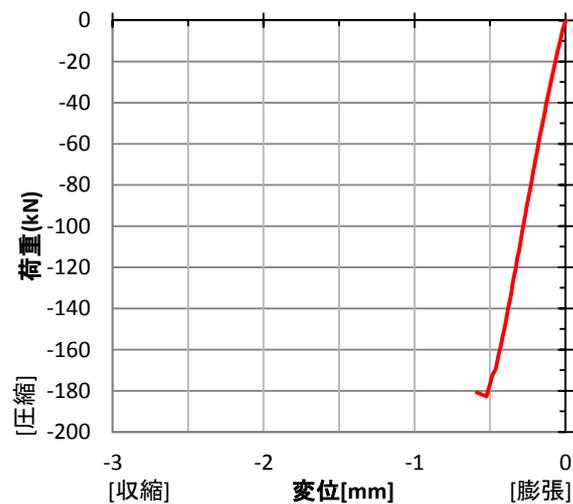
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



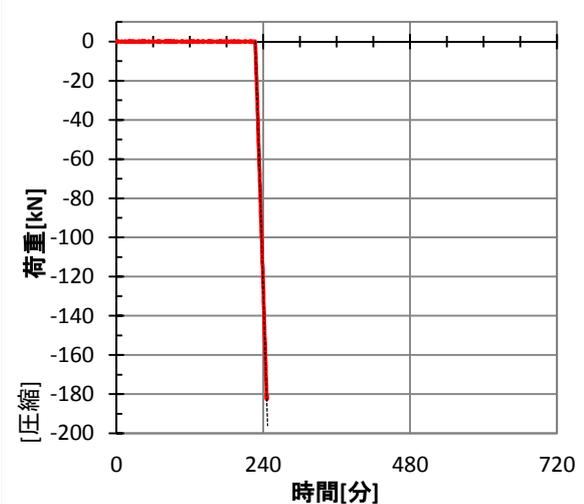
荷重-変形 関係 [載荷後]

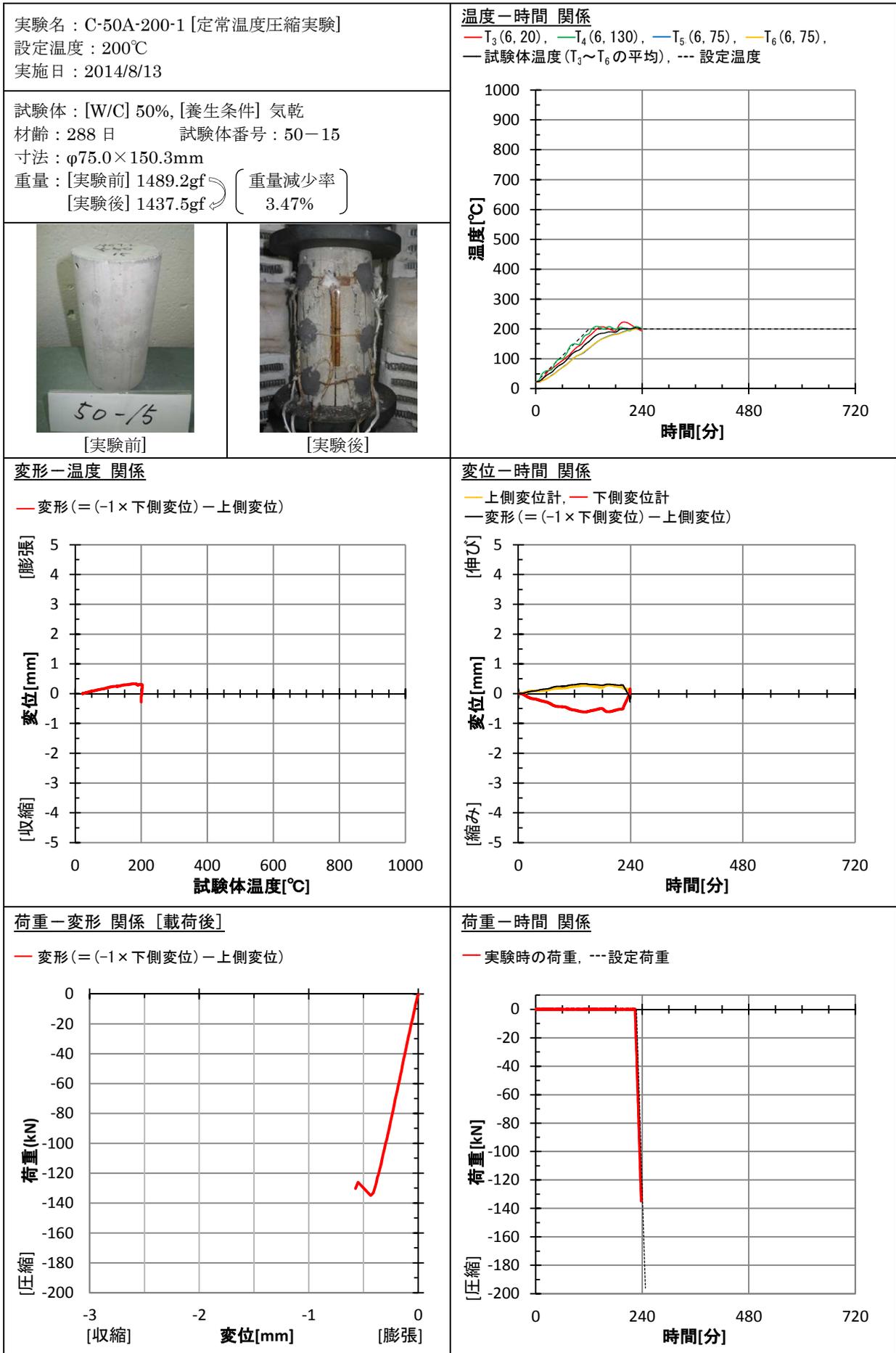
— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重





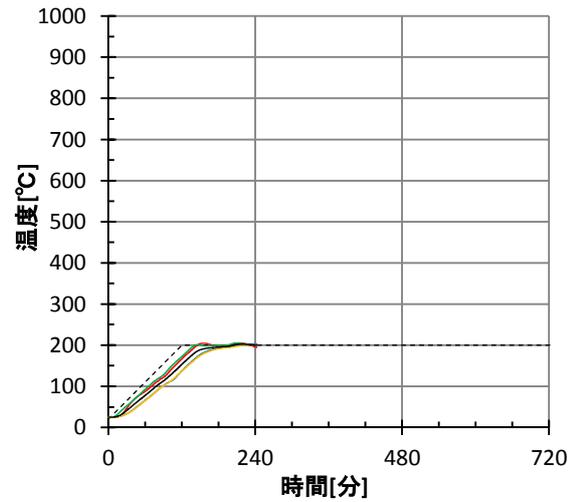
実験名：C-50D-200-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：200℃  
 実施日：2014/8/27

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：302日 試験体番号：50-16  
 寸法：φ74.9×149.8mm  
 重量：[実験前] 1446.3gf (重量減少率)  
           [実験後] 1441.5gf (0.33%)



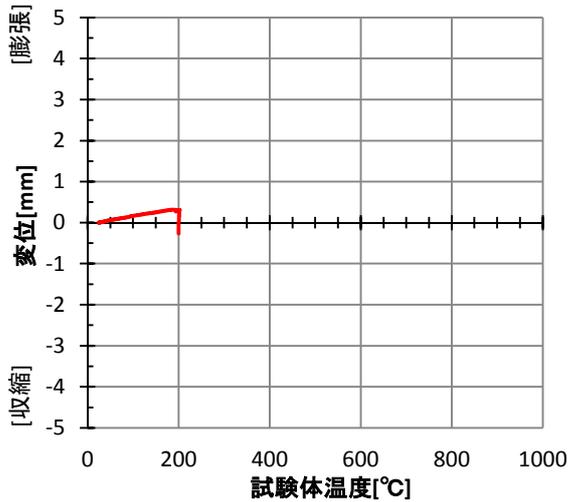
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



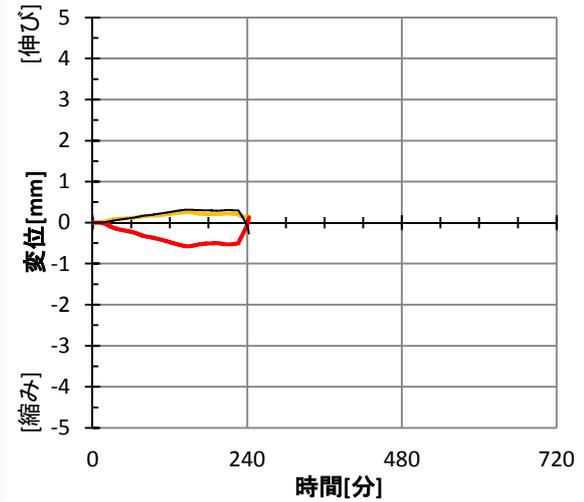
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



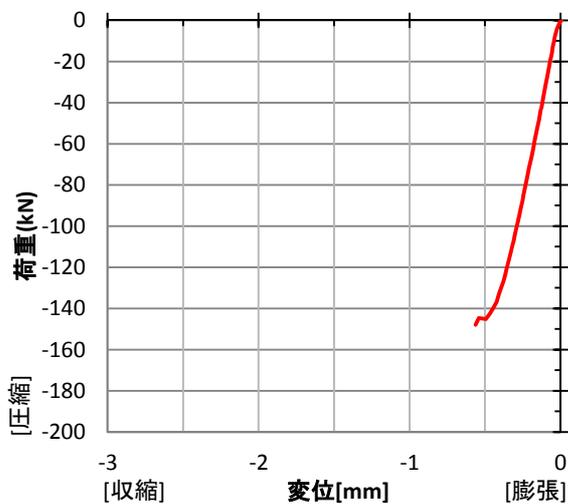
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



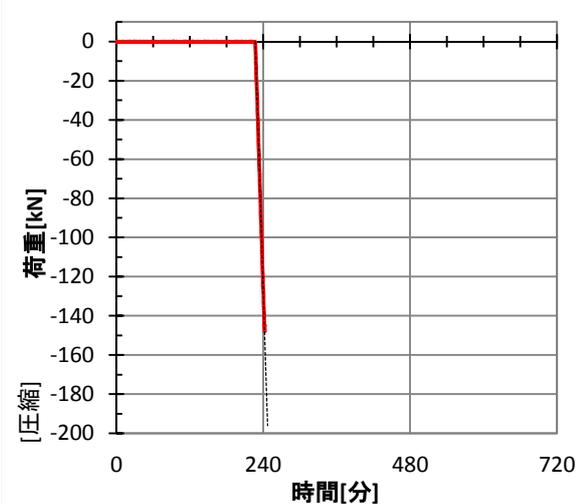
荷重-変形 関係 [載荷後]

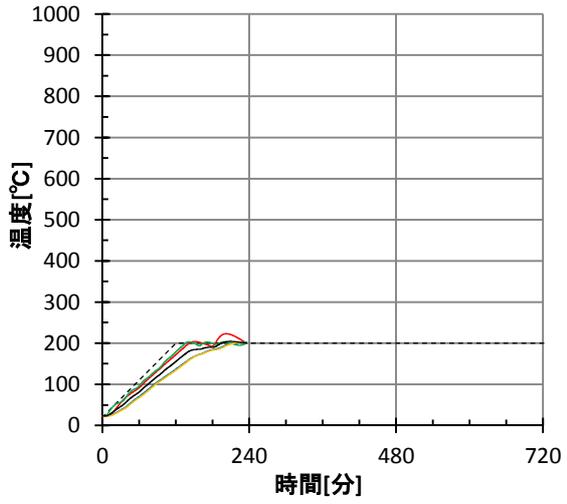
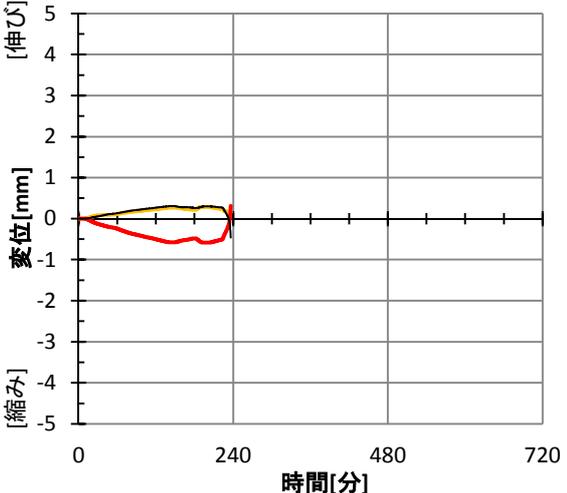
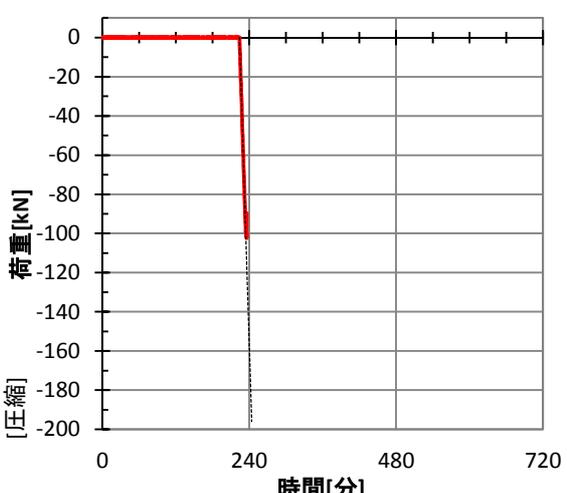
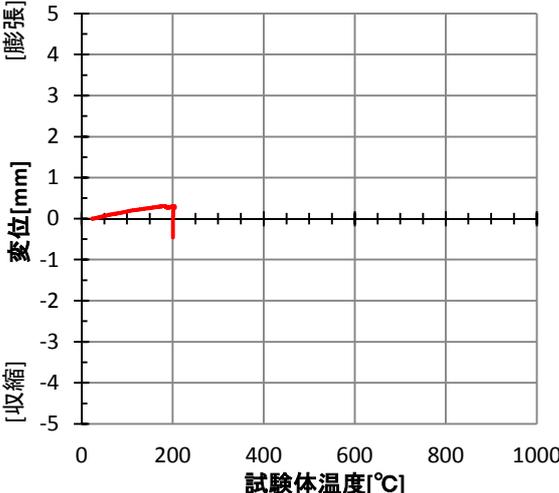
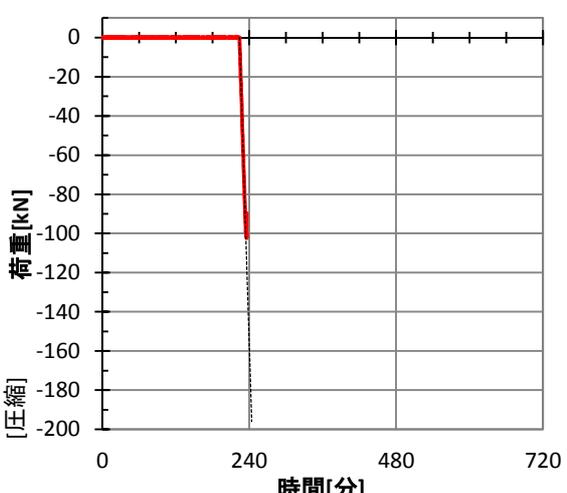
— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)

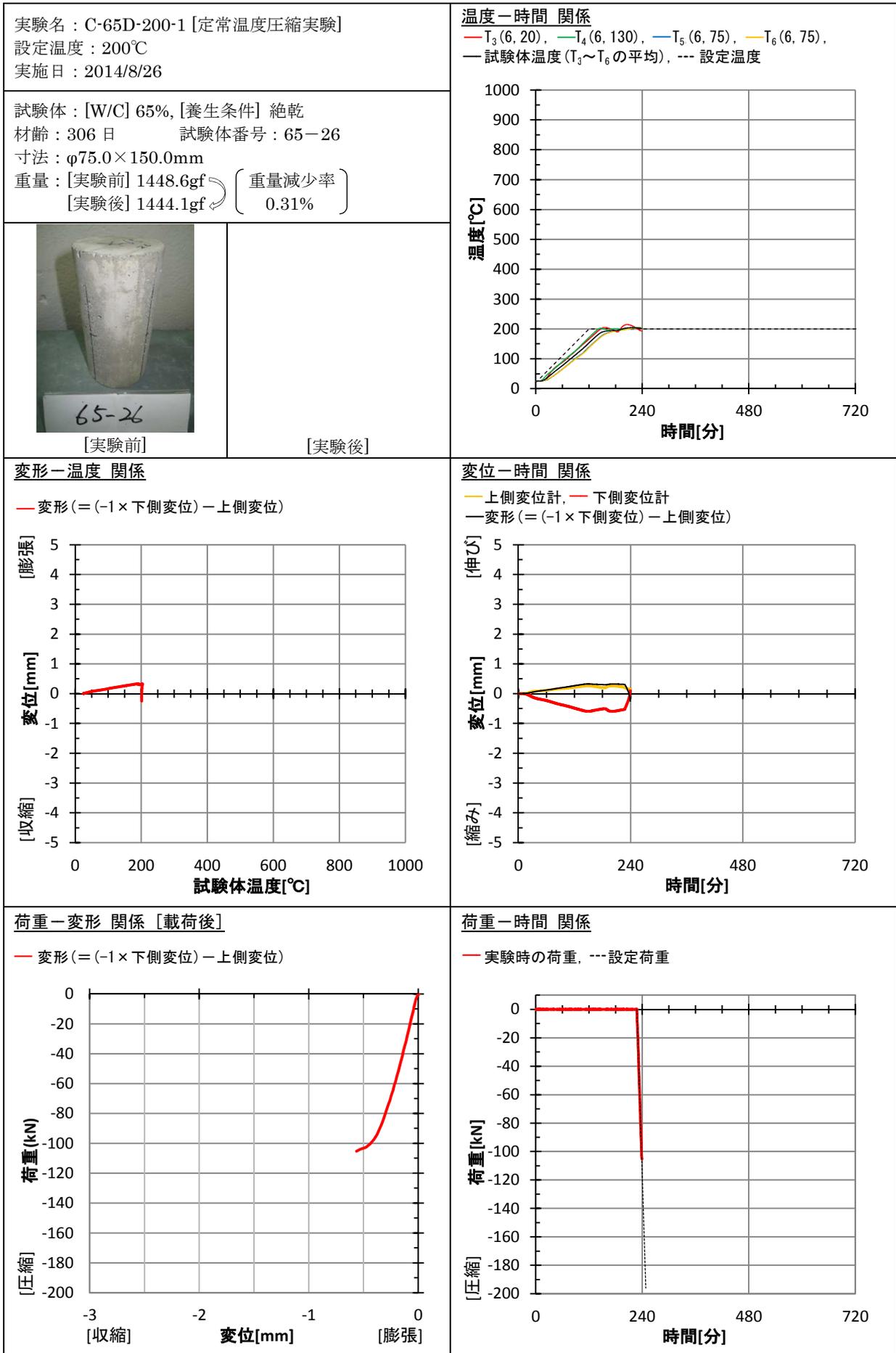


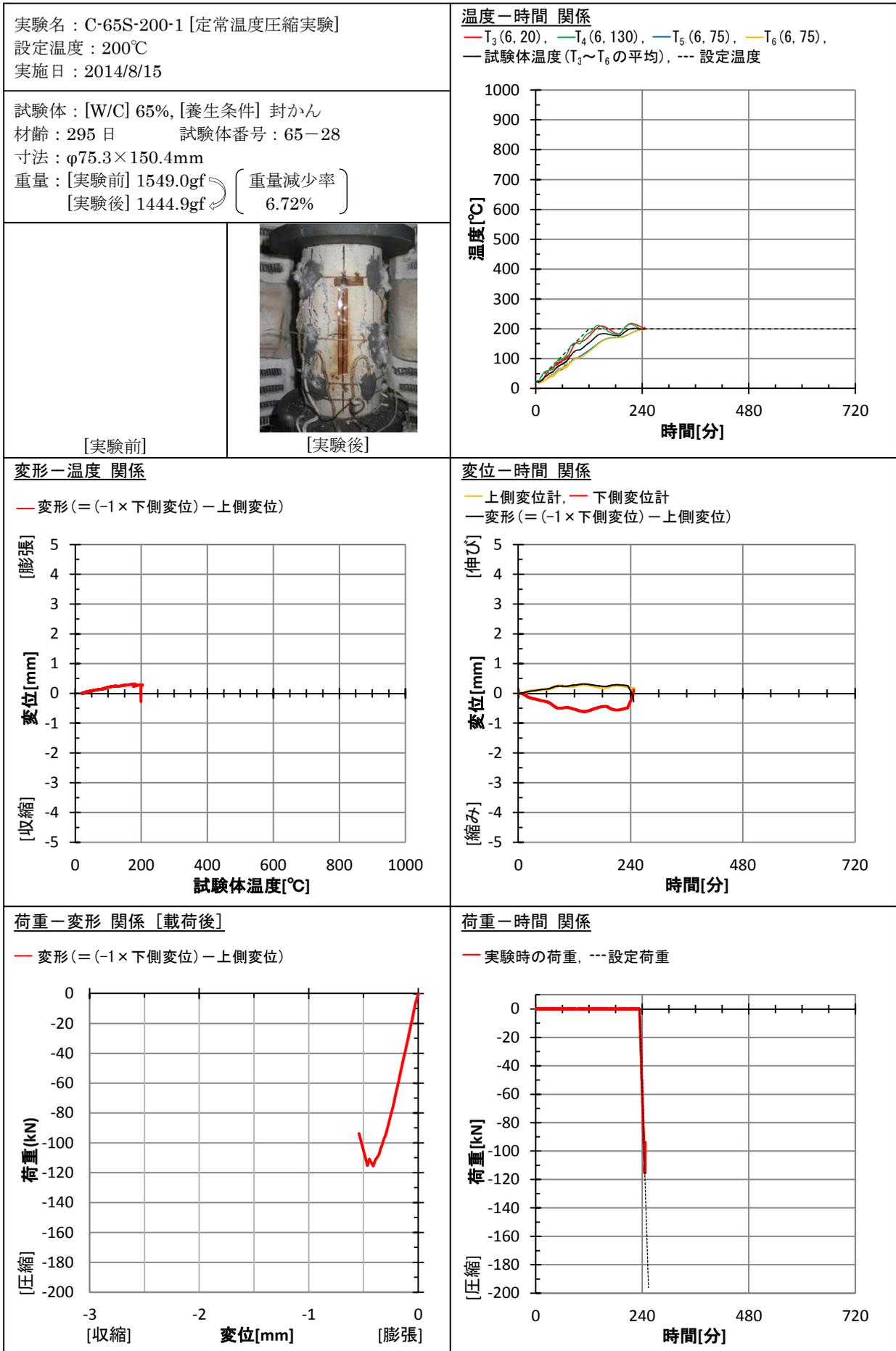
荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



<p>実験名：C-65A-200-1 [定常温度圧縮実験]          設定温度：200℃          実施日：2014/8/12</p>	<p><b>温度-時間 関係</b>          — <math>T_3(6, 20)</math>, — <math>T_4(6, 130)</math>, — <math>T_5(6, 75)</math>, — <math>T_6(6, 75)</math>,          — 試験体温度 (<math>T_3 \sim T_6</math> の平均), --- 設定温度</p> 
<p>試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾          材齢：292日 試験体番号：65-25          寸法：φ75.0×150.0mm          重量：[実験前] 1472.6gf (重量減少率)                    [実験後] 1433.2gf (2.67%)</p>	<p><b>変位-時間 関係</b>          — 上側変位計, — 下側変位計          — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)</p> 
 <p>[実験前]</p>  <p>[実験後]</p>	<p><b>荷重-変形 関係 [載荷後]</b>          — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)</p> 
<p><b>変形-温度 関係</b>          — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-時間 関係</b>          — 実験時の荷重, --- 設定荷重</p> 





実験名：C-40A-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2014/9/5

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：311日 試験体番号：40-19  
 寸法：φ75.1×150.5mm  
 重量：[実験前] 1521.9gf (重量減少率)  
 [実験後] 1452.8gf (4.54%)



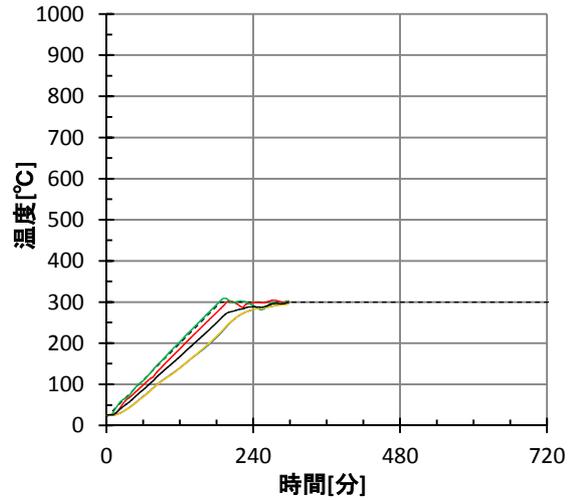
[実験前]



[実験後]

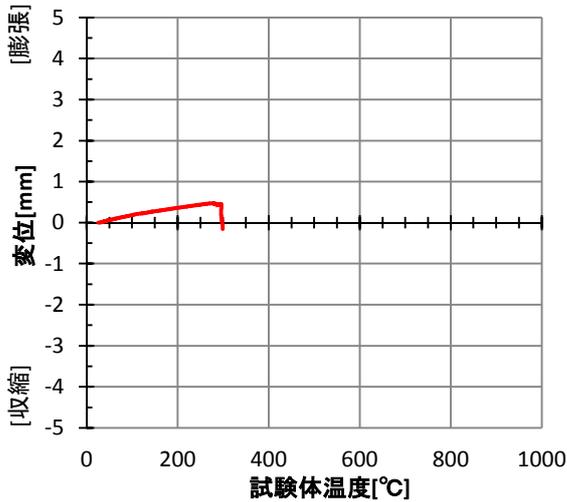
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



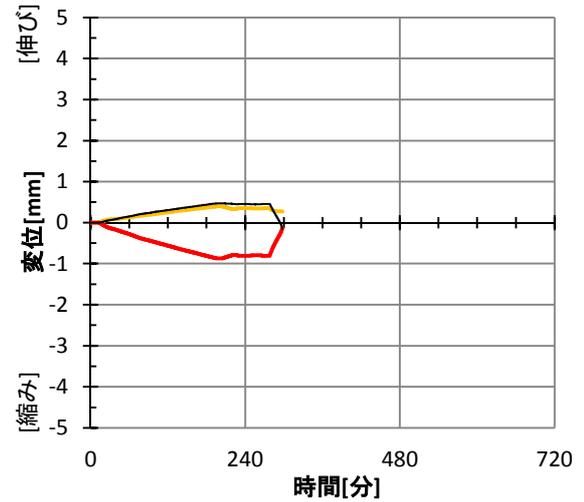
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



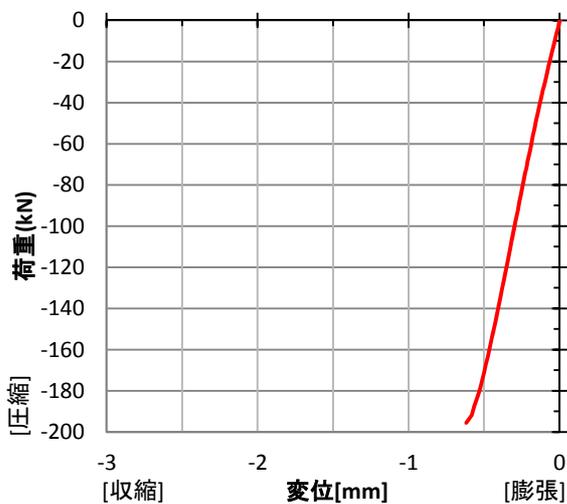
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



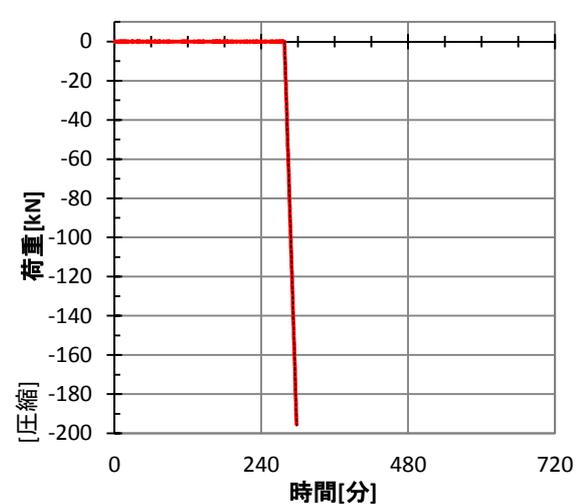
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2014/9/1

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：307日 試験体番号：40-17  
 寸法：φ74.8×150.8mm  
 重量：[実験前] 1476.8gf (重量減少率)  
           [実験後] 1451.8gf (1.69%)



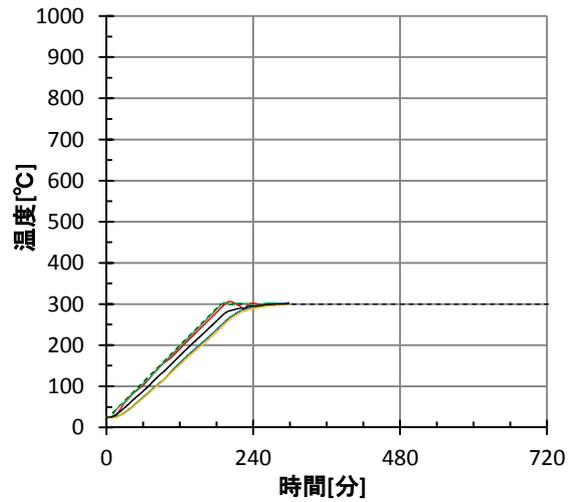
[実験前]



[実験後]

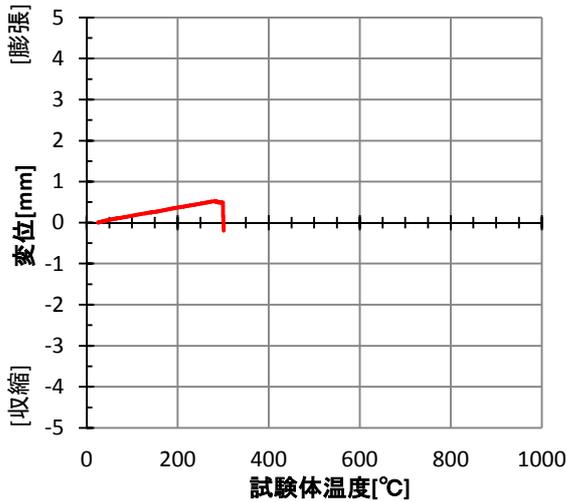
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



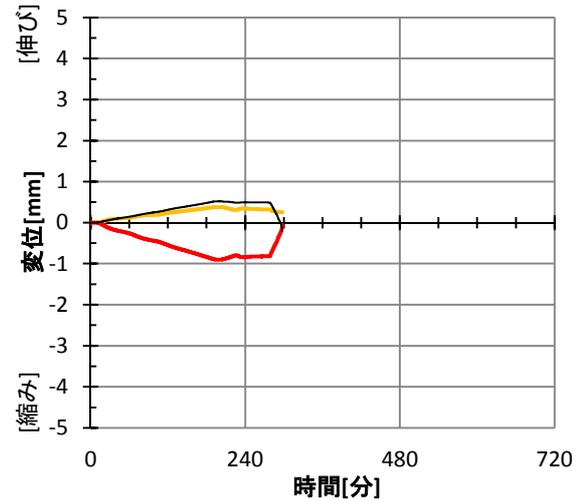
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



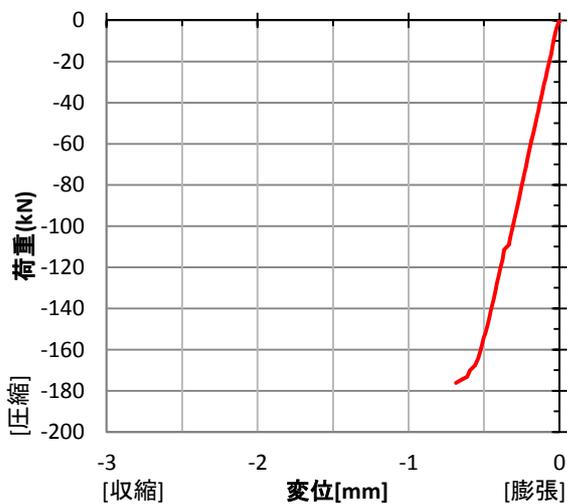
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



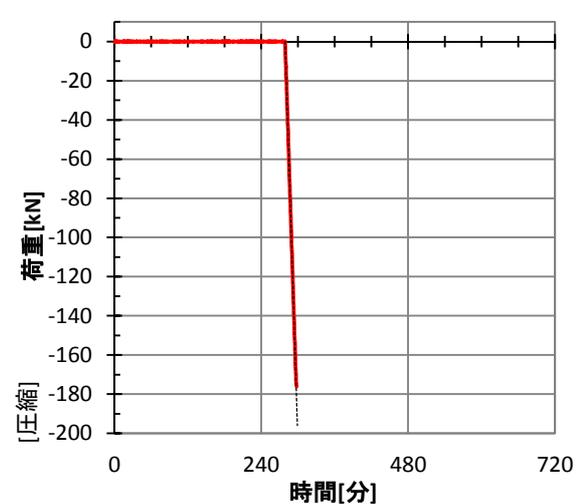
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2014/9/4

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：310日 試験体番号：50-19  
 寸法：φ75.0×148.7mm  
 重量：[実験前] 1482.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1430.5gf (3.51%)



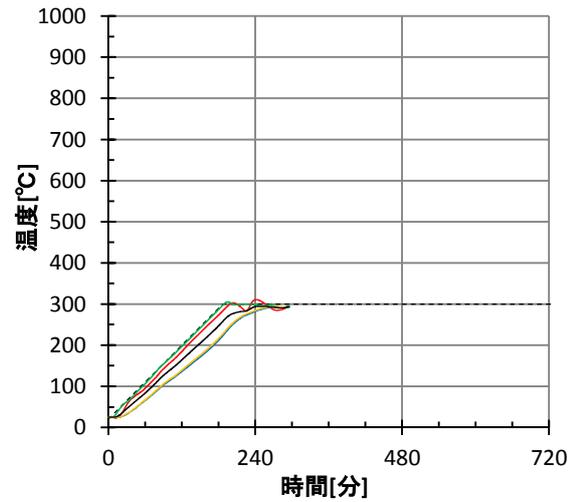
[実験前]



[実験後]

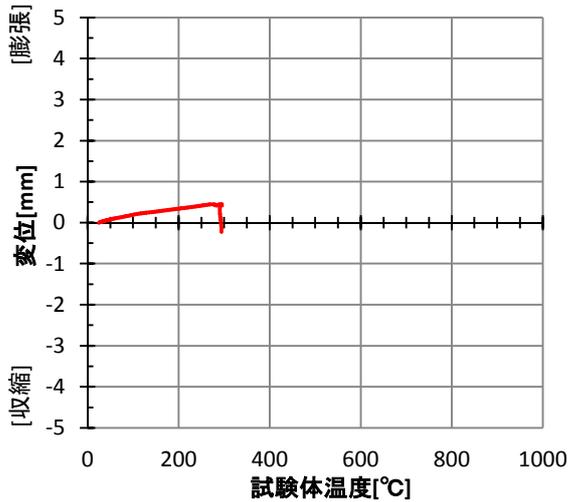
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



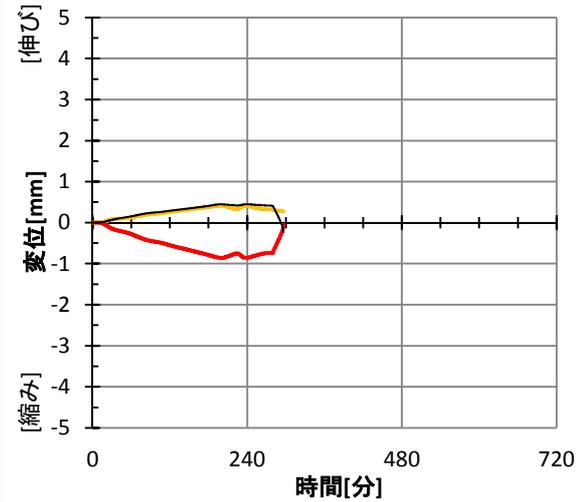
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



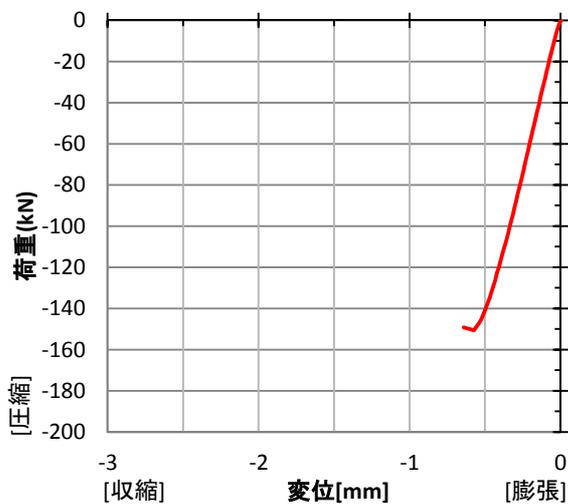
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



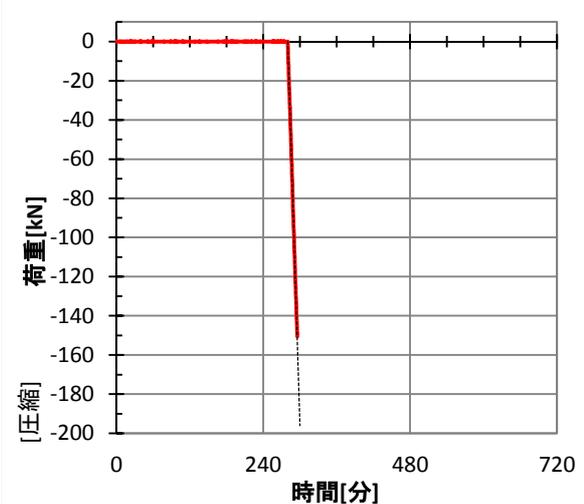
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300°C  
 実施日：2014/8/31

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：306日 試験体番号：50-17  
 寸法：φ75.0×148.7mm  
 重量：[実験前] 1458.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1446.4gf (0.82%)



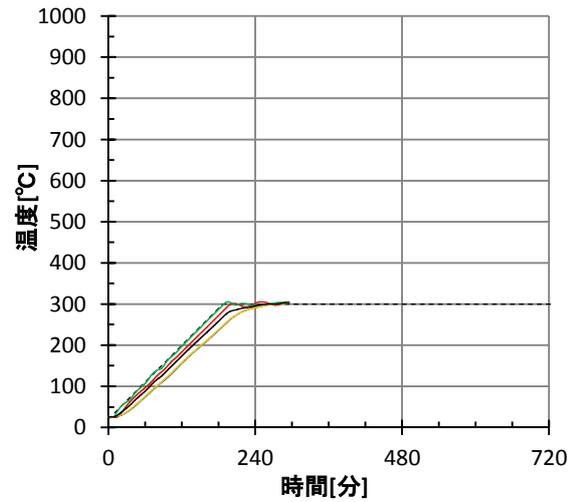
[実験前]



[実験後]

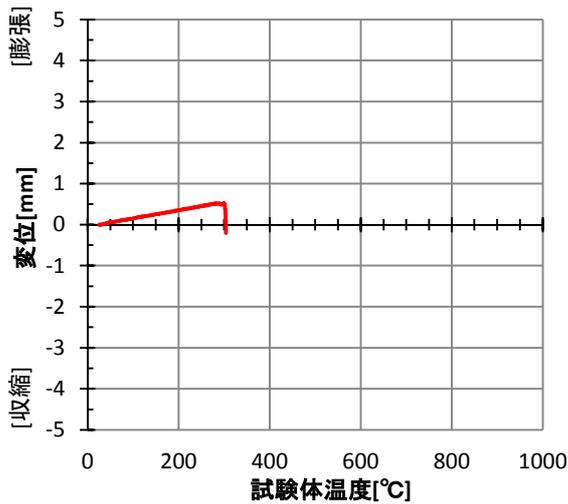
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



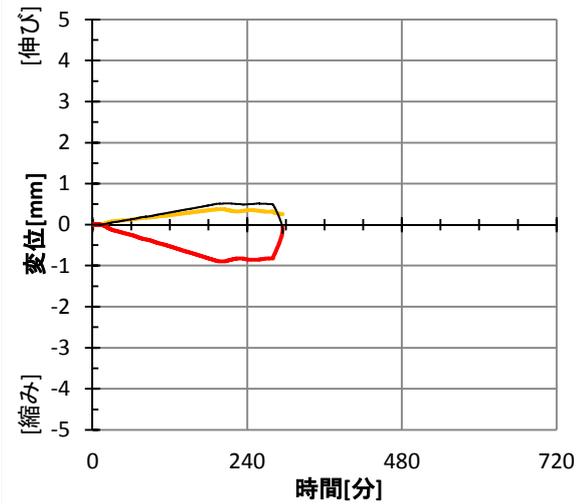
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



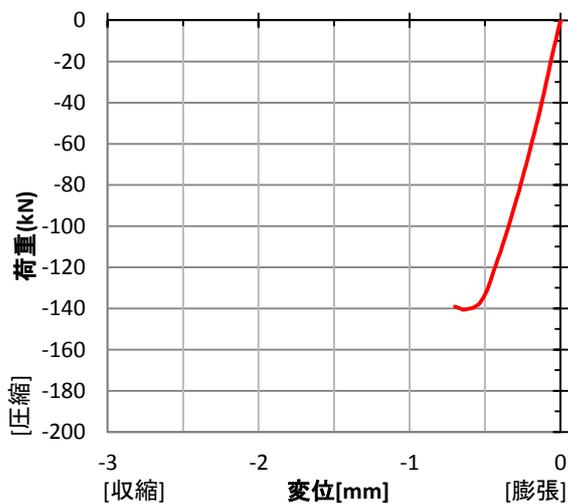
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



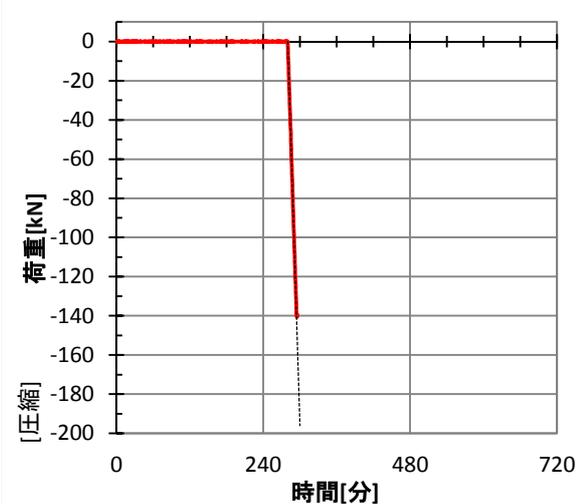
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2014/9/2

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：313日 試験体番号：65-30  
 寸法：φ75.0×150.7mm  
 重量：[実験前] 1471.9gf (重量減少率)  
           [実験後] 1425.0gf (3.18%)



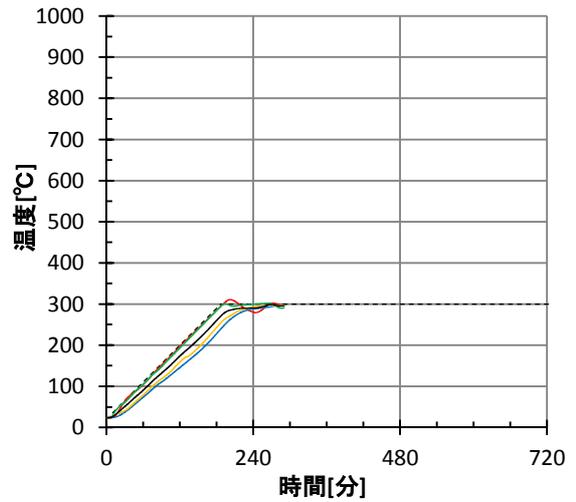
[実験前]



[実験後]

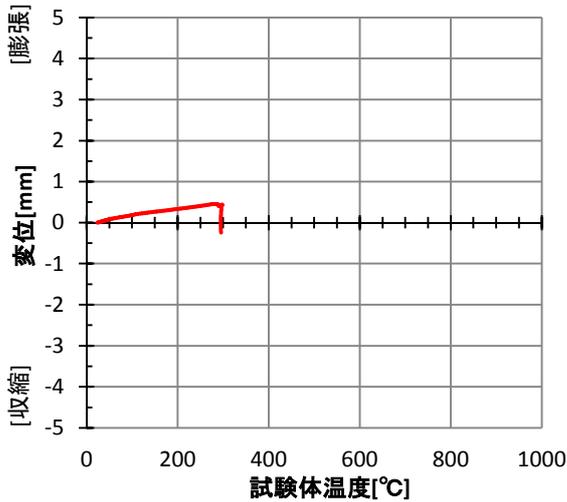
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



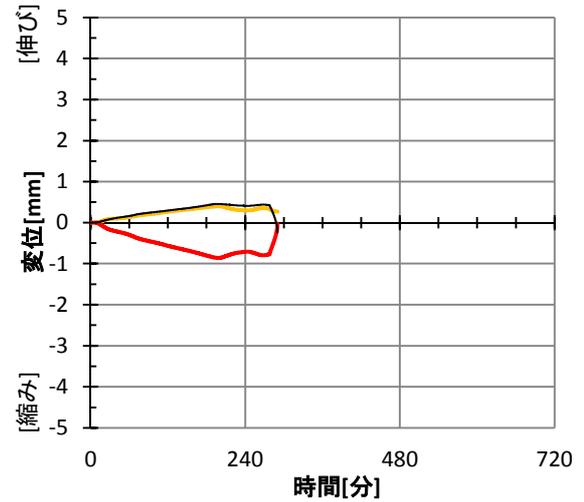
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



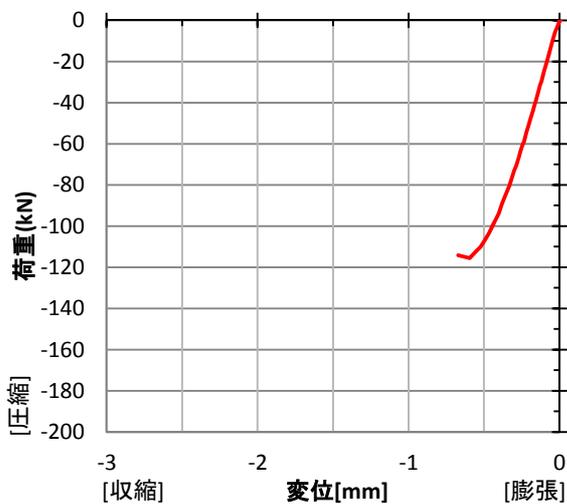
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



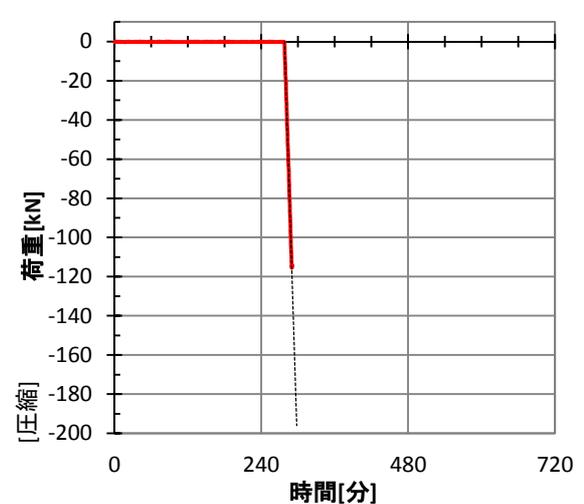
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2014/8/29

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：309日 試験体番号：65-27  
 寸法：φ75.0×150.0mm  
 重量：[実験前] 1448.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1439.4gf (0.65%)



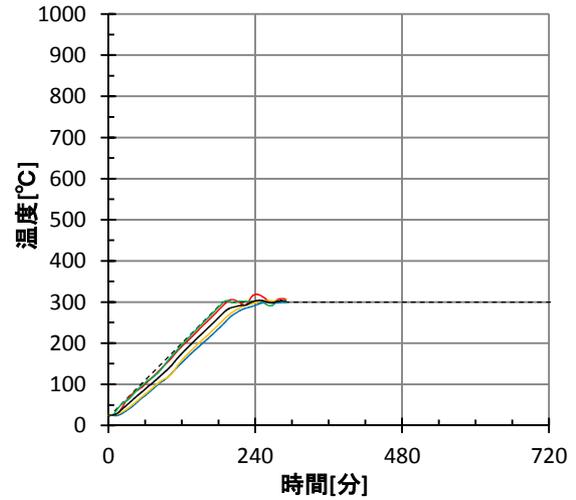
[実験前]



[実験後]

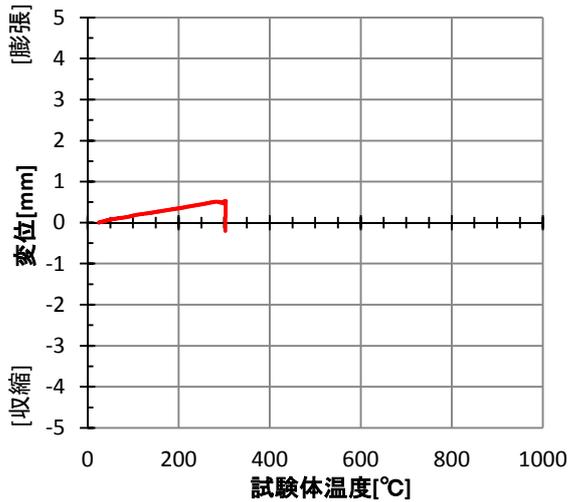
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



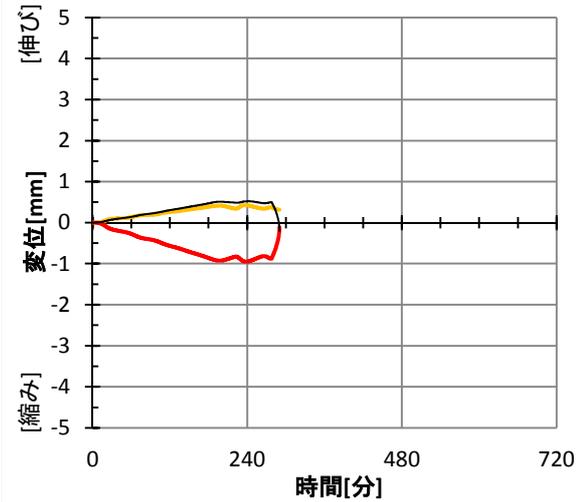
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



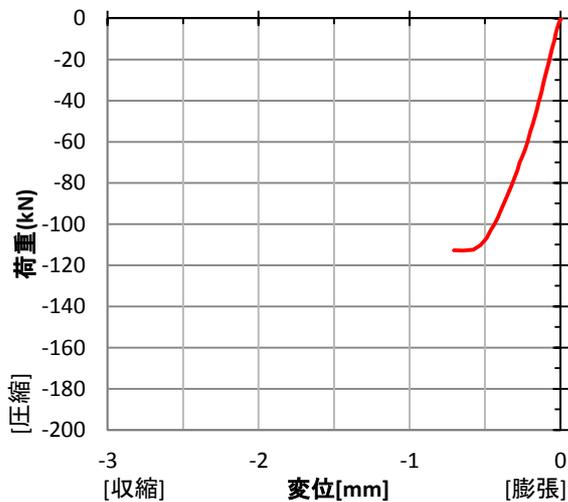
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



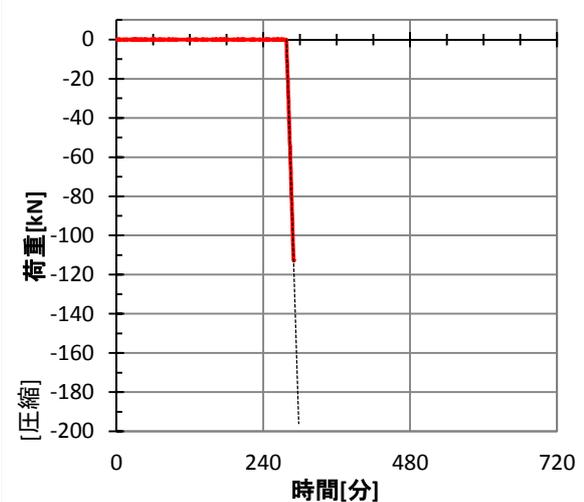
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-300-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2014/9/7

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：318日 試験体番号：65-32  
 寸法：φ75.2×150.3mm  
 重量：[実験前] 1525.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1420.2gf (6.90%)



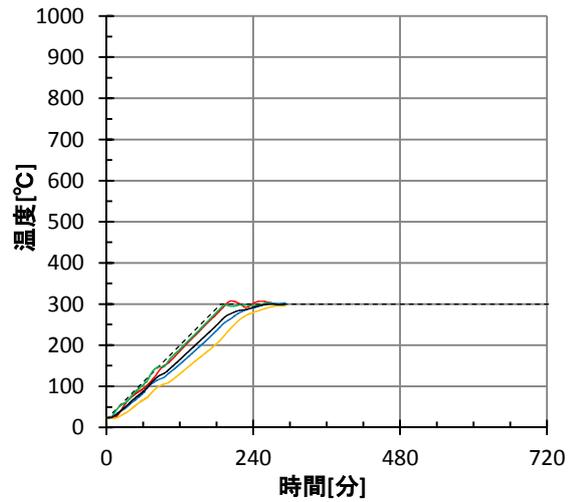
[実験前]



[実験後]

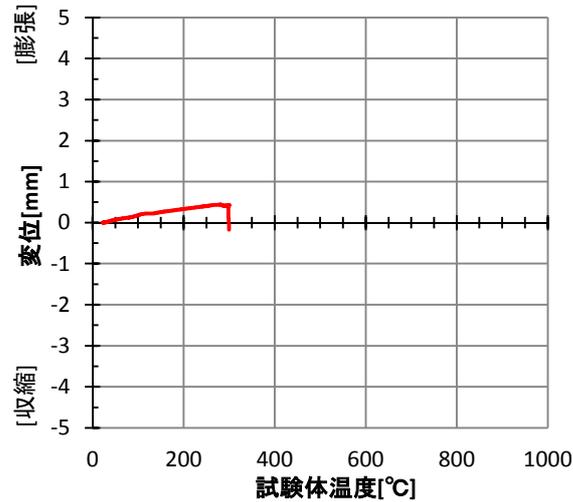
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



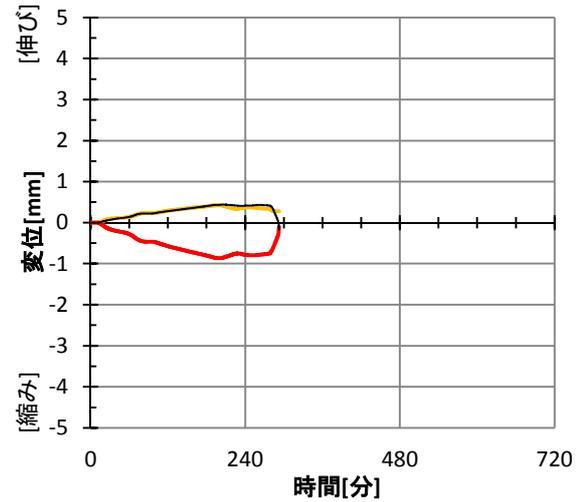
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



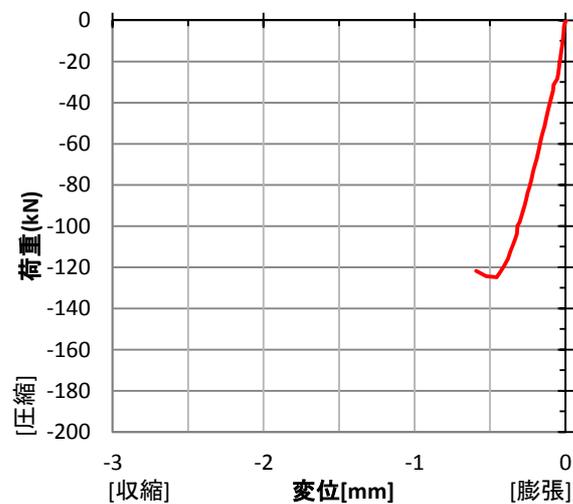
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



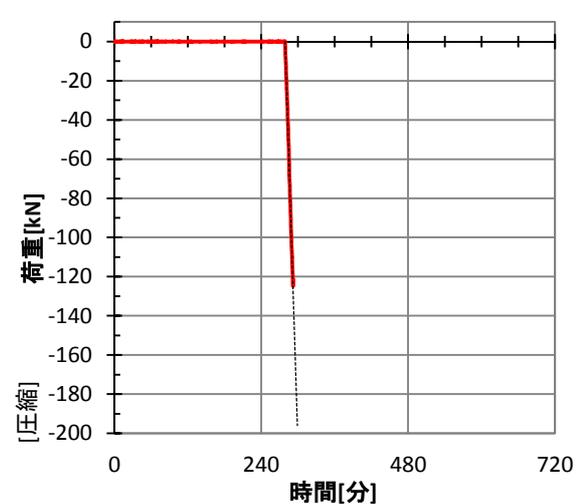
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-300-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：300℃  
 実施日：2015/1/28

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：461日 試験体番号：65-65  
 寸法：φ75.1×149.2mm  
 重量：[実験前] 1515.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1409.2gf (7.01%)



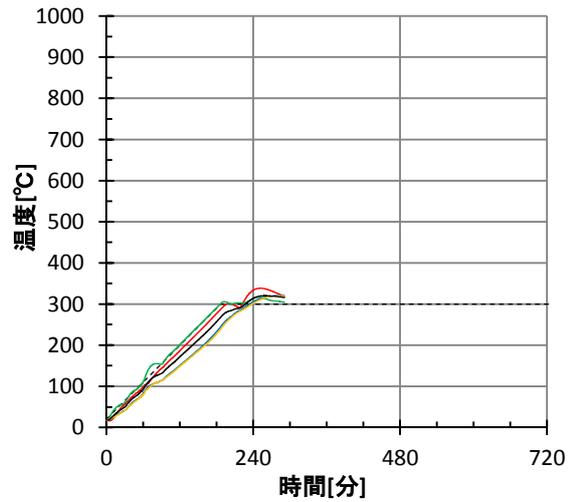
[実験前]



[実験後]

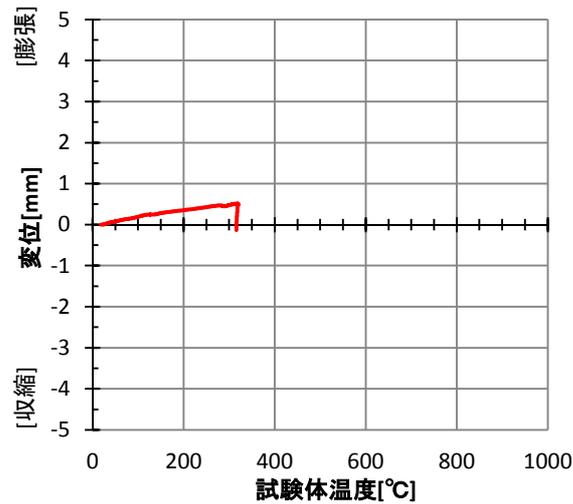
温度-時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(6, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



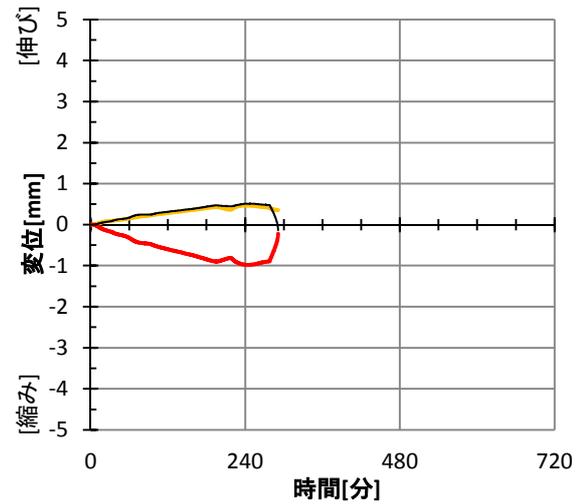
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



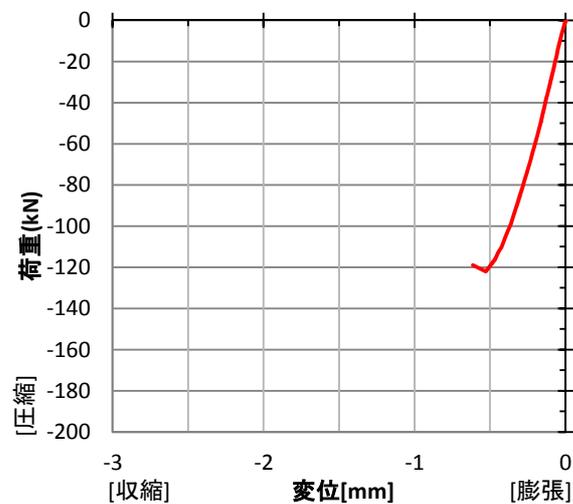
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



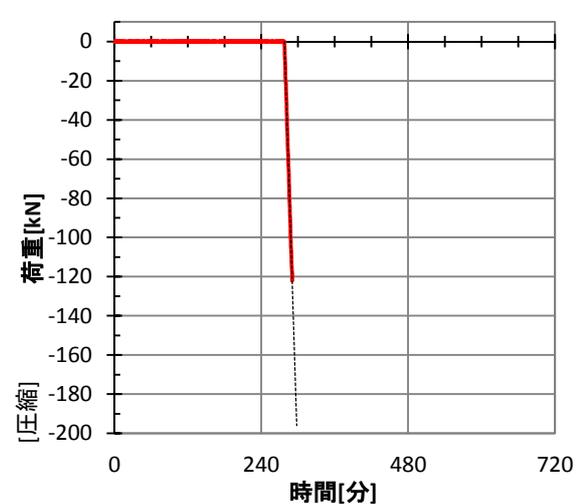
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-400-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：400℃  
 実施日：2014/9/18

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：324日 試験体番号：40-21  
 寸法：φ74.9×149.0mm  
 重量：[実験前] 1504.9gf (重量減少率)  
           [実験後] 1432.1gf (4.84%)



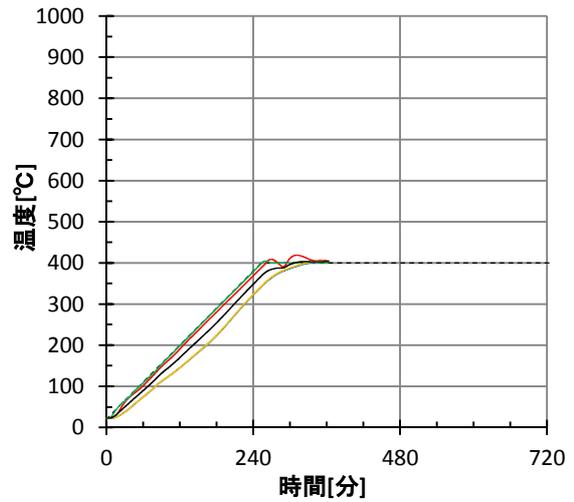
[実験前]



[実験後]

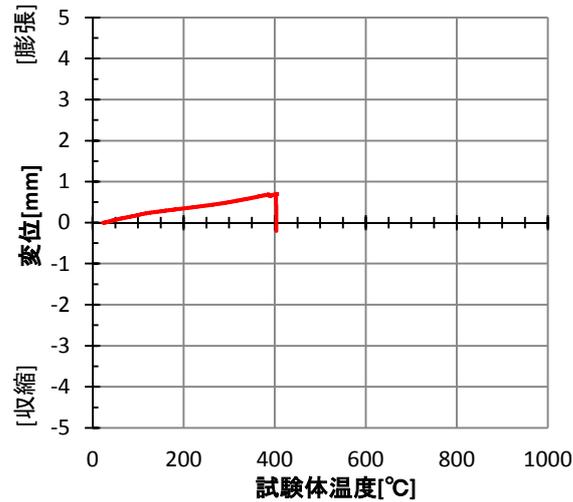
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



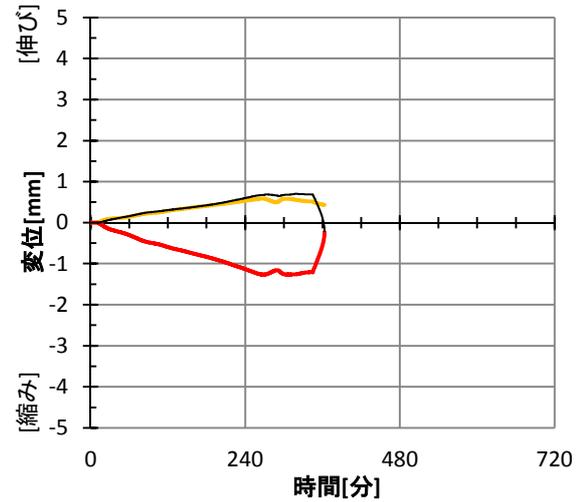
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



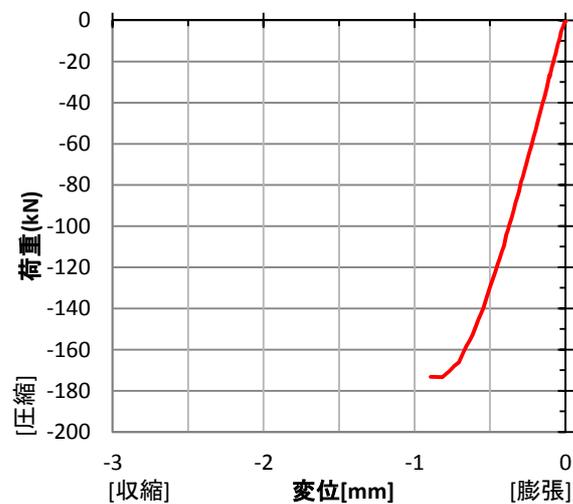
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



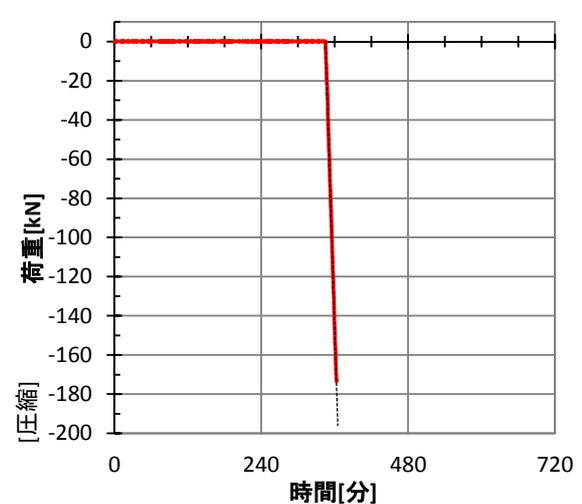
荷重-変形 関係 [載荷後]

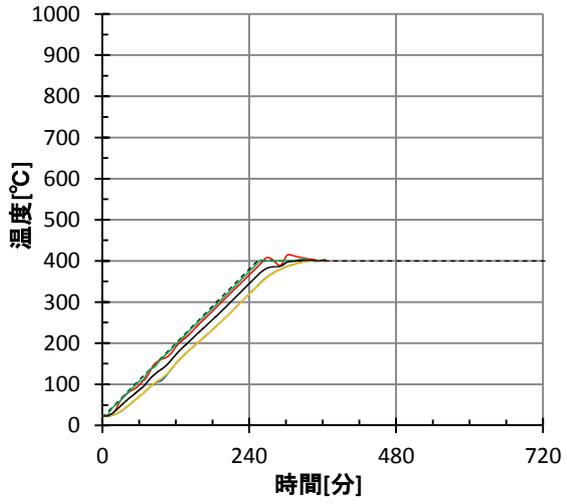
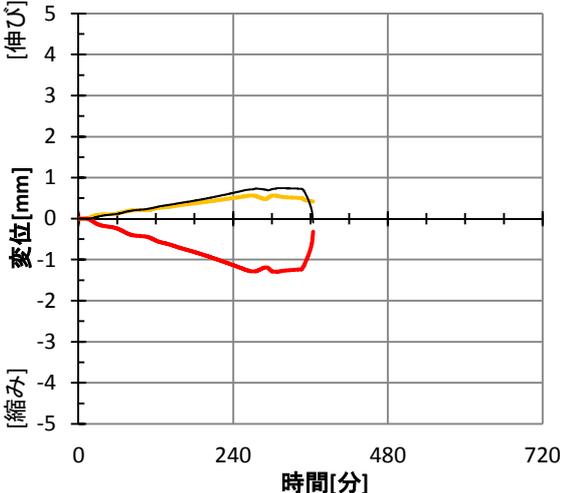
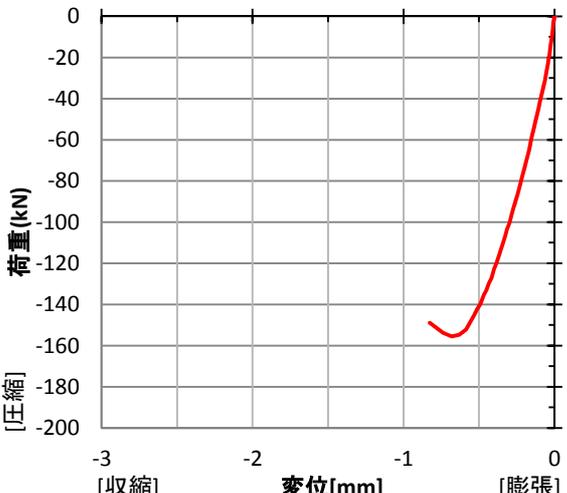
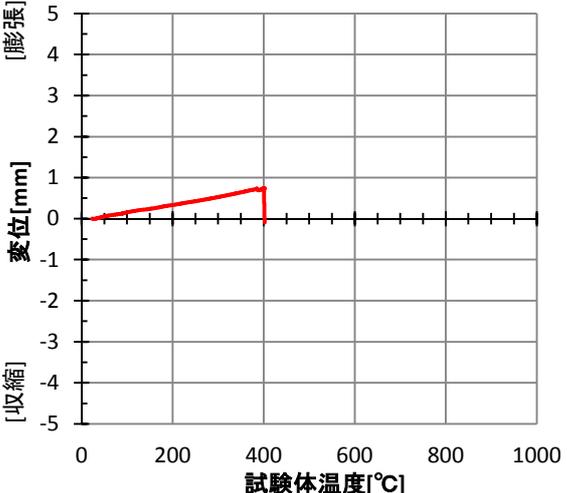
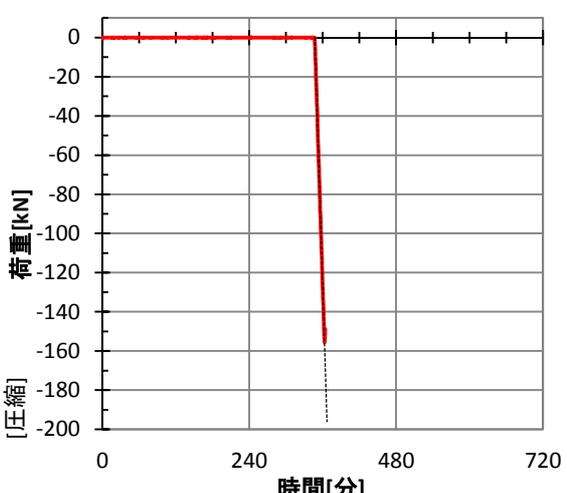
— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



<p>実験名：C-40D-400-1 [定常温度圧縮実験]          設定温度：400℃          実施日：2014/9/12</p>	<p><b>温度-時間 関係</b>          — <math>T_3(6, 20)</math>, — <math>T_4(6, 130)</math>, — <math>T_5(6, 75)</math>, — <math>T_6(6, 75)</math>,          — 試験体温度 (<math>T_3 \sim T_6</math> の平均), --- 設定温度</p> 
<p>試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾          材齢：318日 試験体番号：40-18          寸法：φ75.0×150.4mm          重量：[実験前] 1481.4gf (重量減少率)                    [実験後] 1457.2gf (1.63%)</p>	<p><b>変位-時間 関係</b>          — 上側変位計, — 下側変位計          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
 <p>[実験前]</p>  <p>[実験後]</p>	<p><b>荷重-変形 関係 [載荷後]</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
<p><b>変形-温度 関係</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-時間 関係</b>          — 実験時の荷重, --- 設定荷重</p> 

実験名：C-40D-400-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：400℃  
 実施日：2015/2/5

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：464日 試験体番号：40-40  
 寸法：φ75.0×148.7mm  
 重量：[実験前] 1472.3gf (重量減少率)  
 [実験後] 1447.5gf (1.68%)



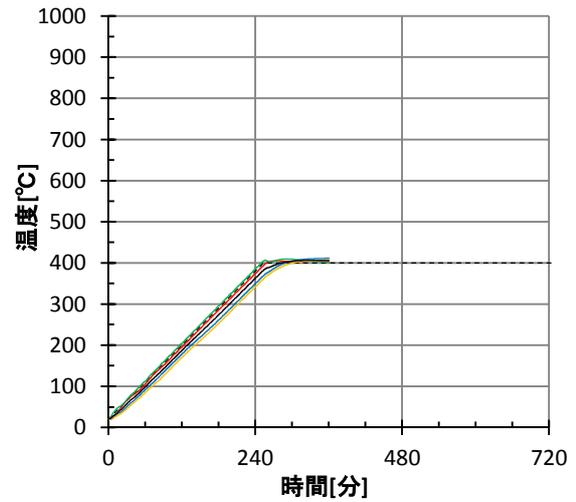
[実験前]



[実験後]

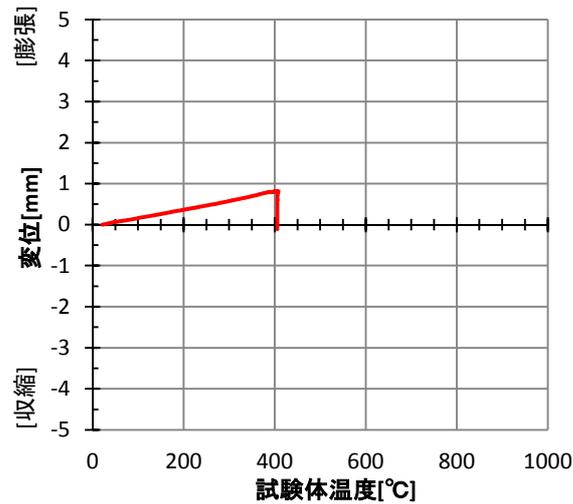
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



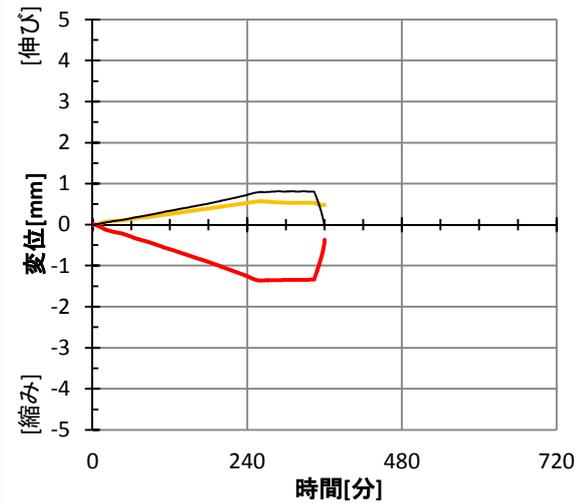
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



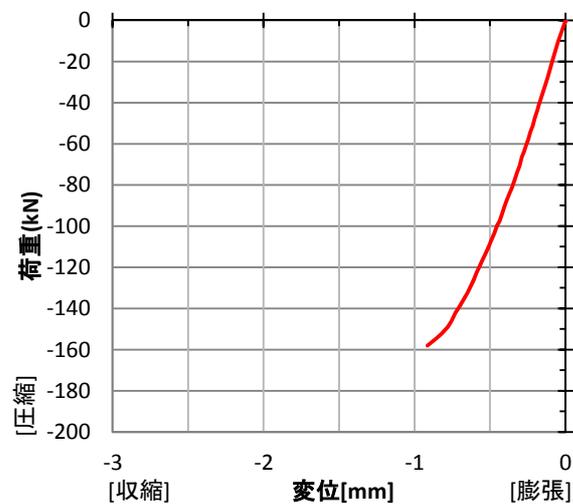
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



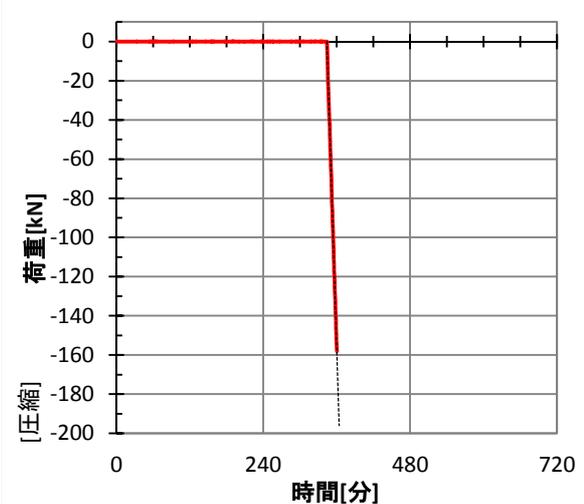
荷重-変形 関係 [載荷後]

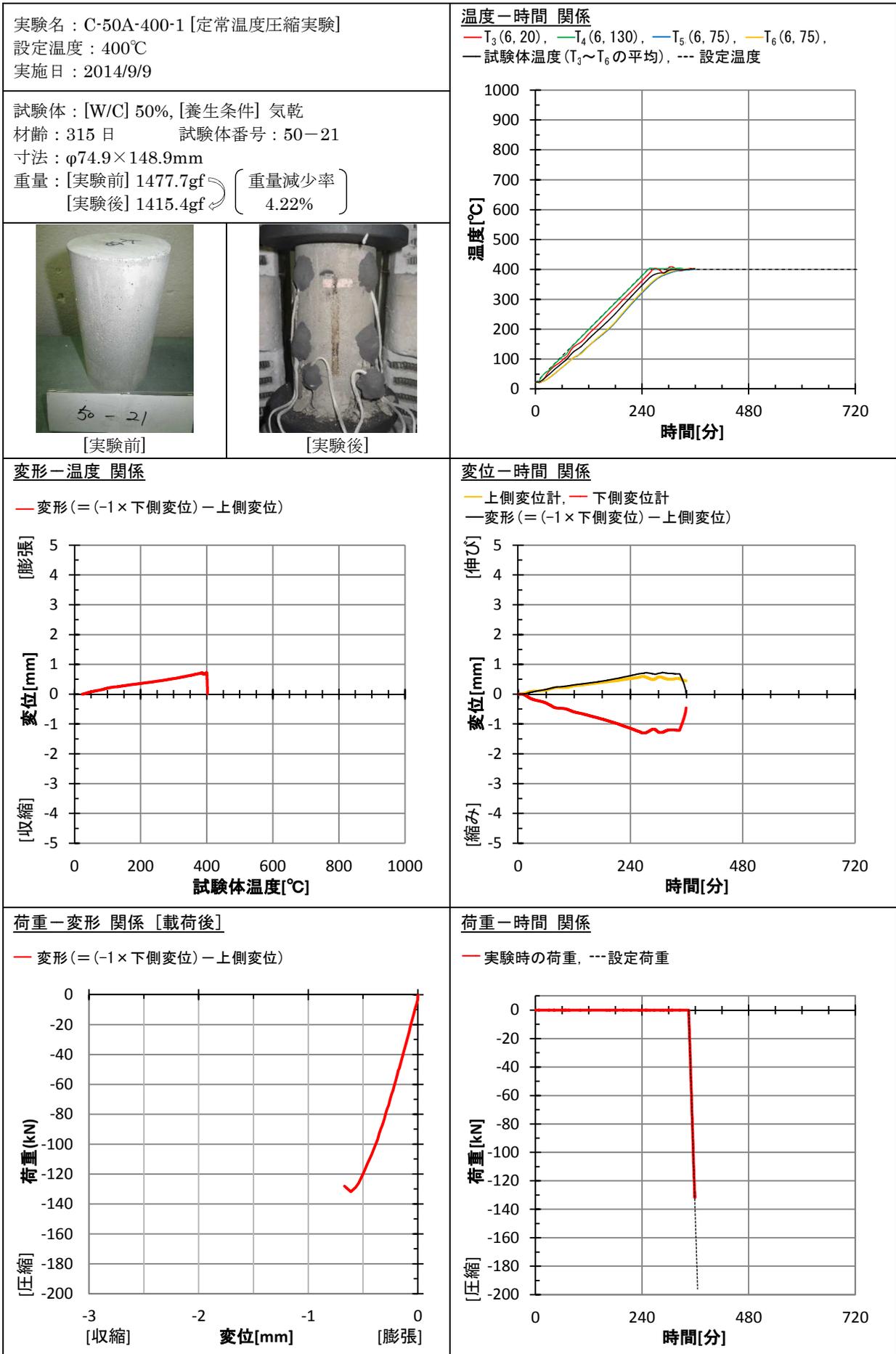
— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)

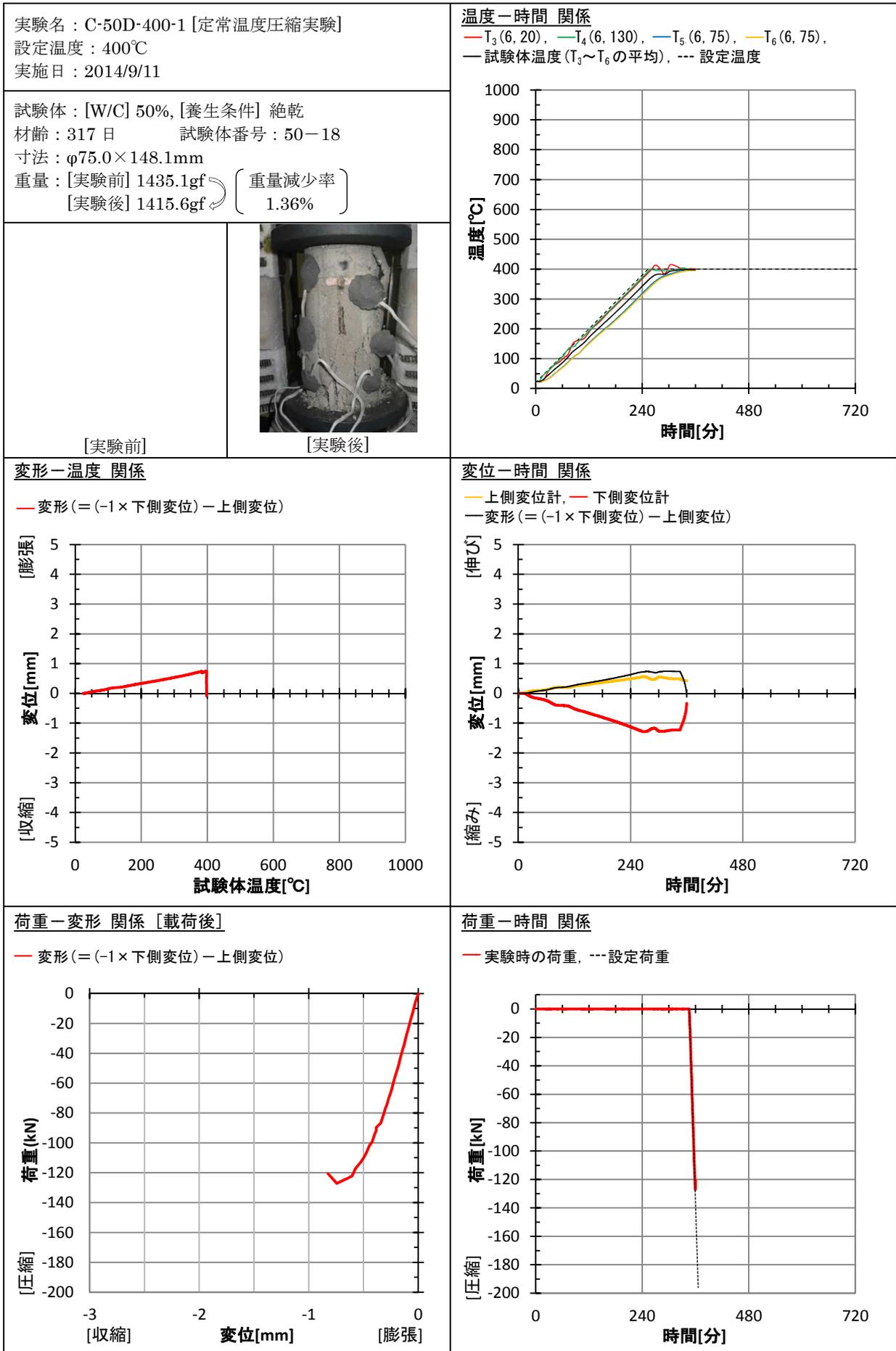


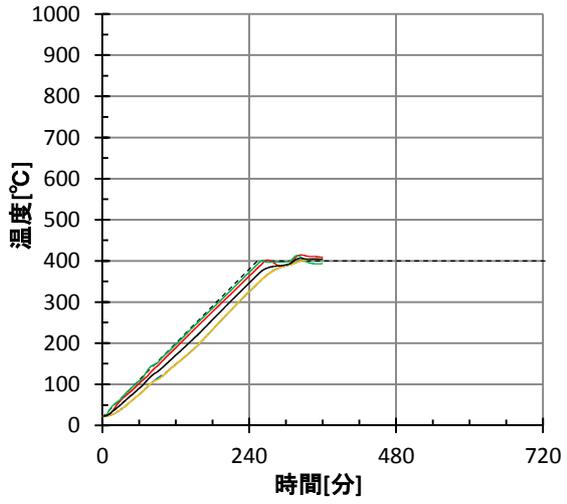
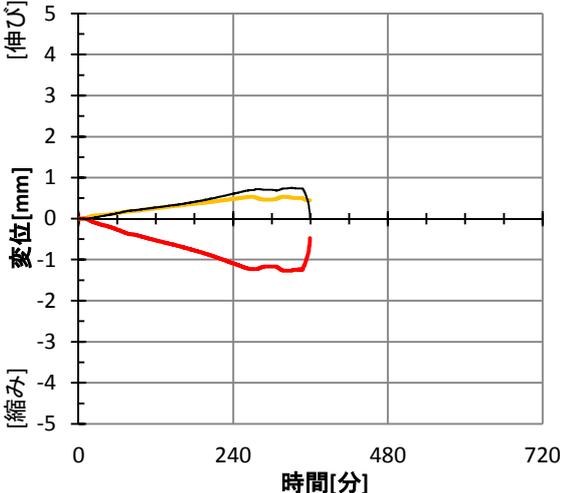
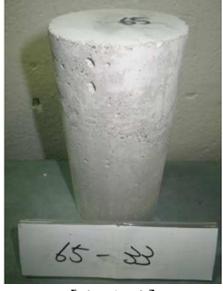
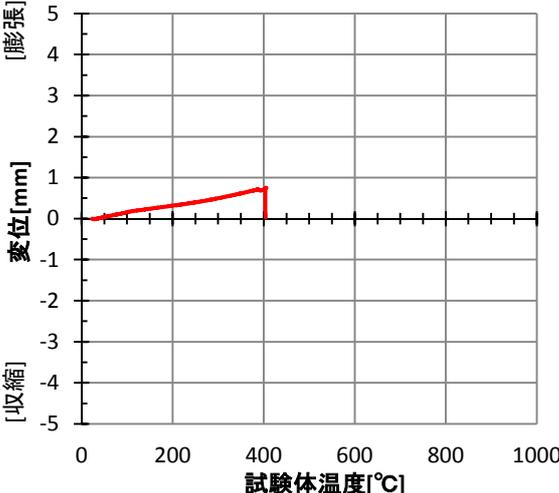
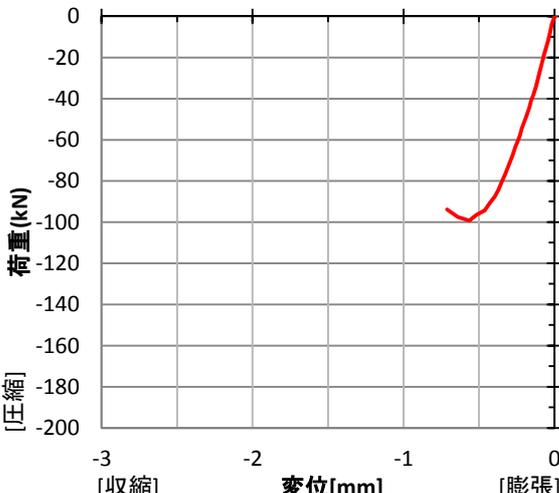
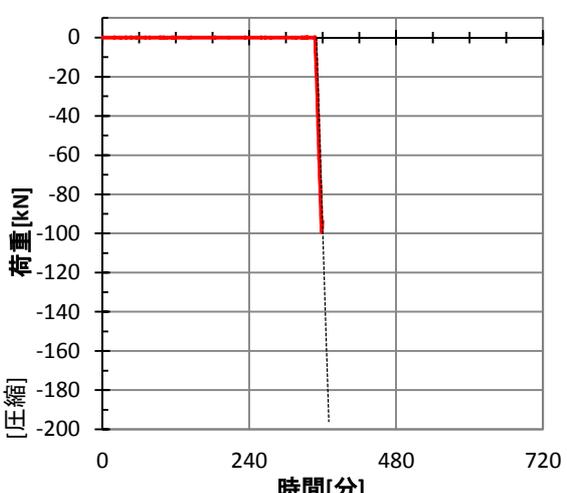
荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重







<p>実験名：C-65A-400-1 [定常温度圧縮実験]          設定温度：400℃          実施日：2014/9/8</p>	<p><b>温度-時間 関係</b>          — <math>T_3</math> (6, 20), — <math>T_4</math> (6, 130), — <math>T_5</math> (6, 75), — <math>T_6</math> (6, 75),          — 試験体温度 (<math>T_3 \sim T_6</math> の平均), --- 設定温度</p> 
<p>試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾          材齢：319日 試験体番号：65-33          寸法：—          重量：[実験前] 1490.4gf (重量減少率) [実験後] 1444.0gf (3.11%)</p>	<p><b>変形-時間 関係</b>          — 上側変位計, — 下側変位計          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
 <p>[実験前]</p>  <p>[実験後]</p>	<p><b>変形-温度 関係</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
<p><b>変形-温度 関係 [载荷後]</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-時間 関係</b>          — 実験時の荷重, --- 設定荷重</p> 

実験名：C-65D-400-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：400℃  
 実施日：2014/9/10

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：321日 試験体番号：65-29  
 寸法：φ74.9×149.9mm  
 重量：[実験前] 1430.8gf (重量減少率)  
           [実験後] 1415.4gf (1.08%)



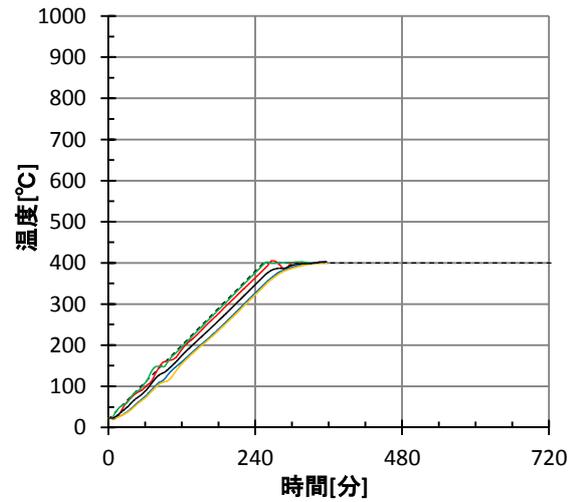
[実験前]



[実験後]

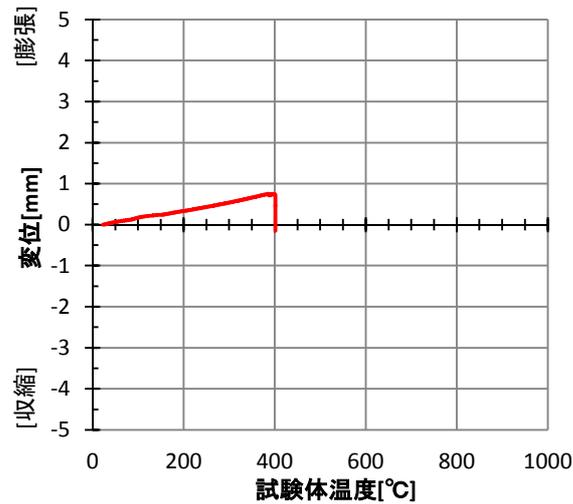
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



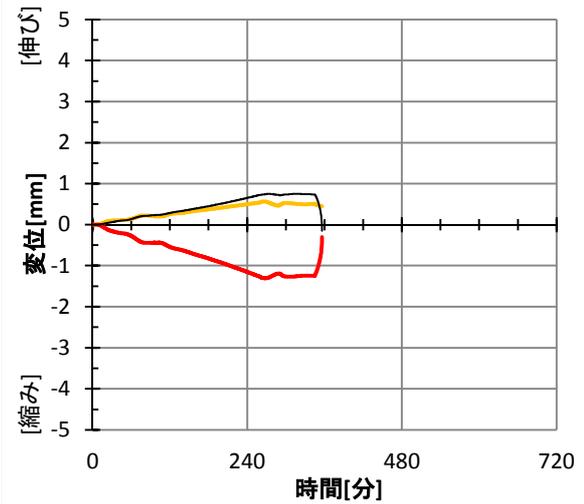
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



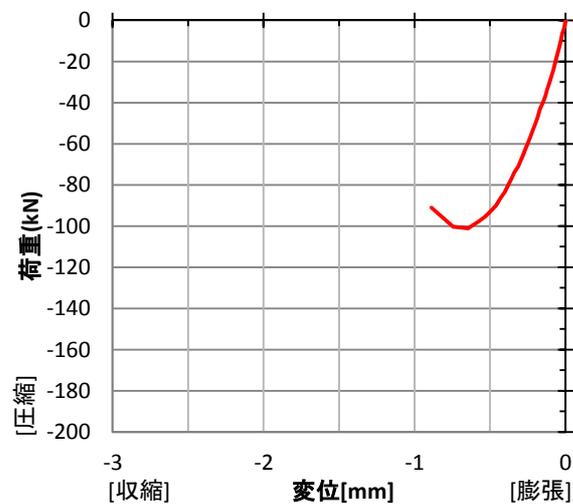
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



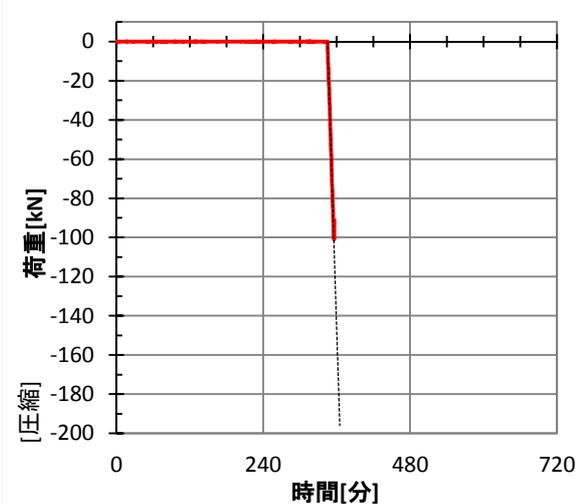
荷重-変形 関係 [載荷後]

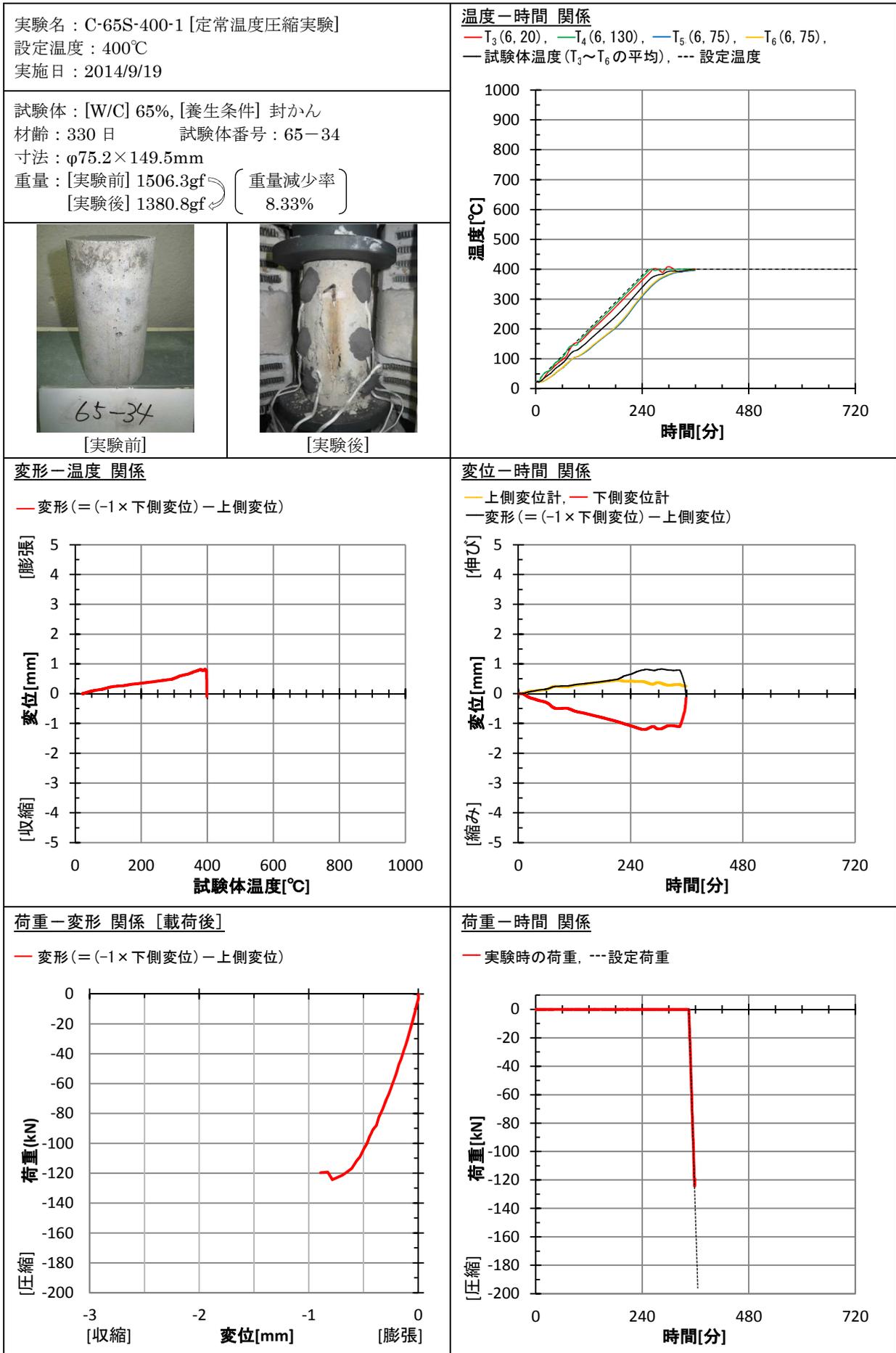
— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重





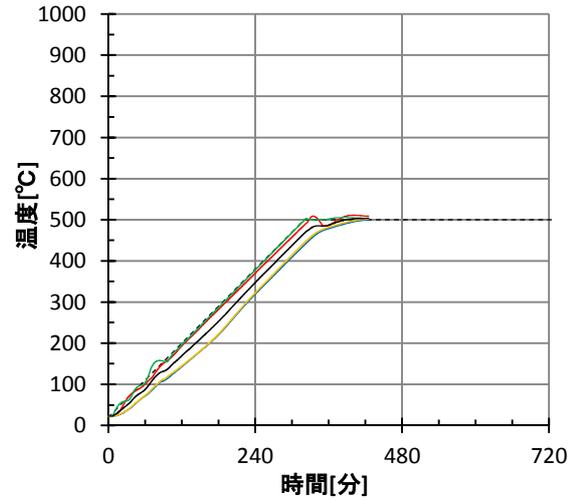
実験名：C-40A-500-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：500℃  
 実施日：2014/9/29

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：335日 試験体番号：40-10  
 寸法：φ74.9×149.3mm  
 重量：[実験前] 1510.2gf (重量減少率)  
           [実験後] 1429.5gf (3.03%)



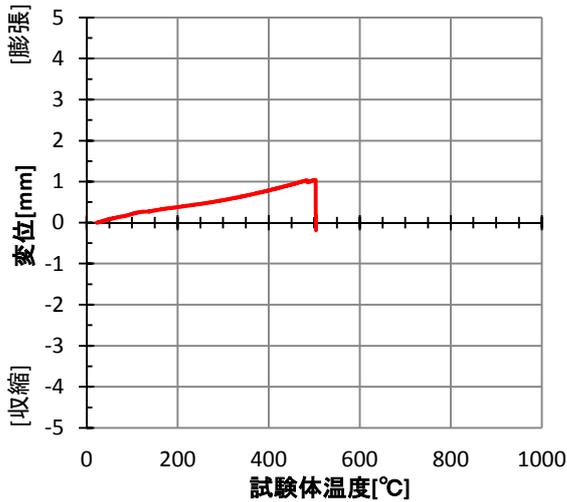
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



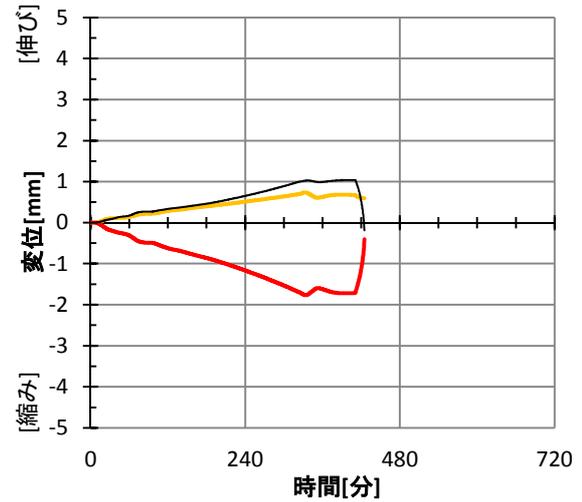
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



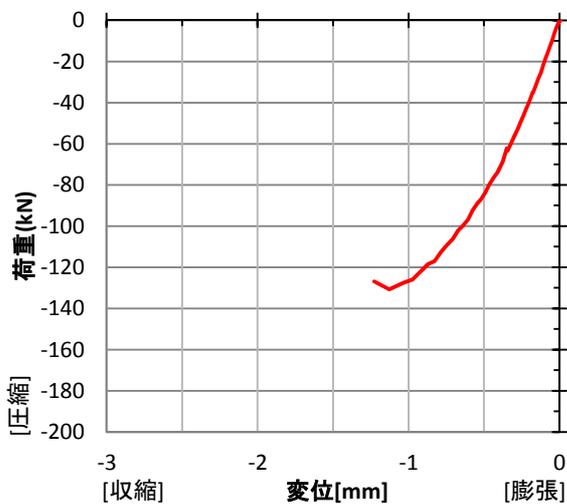
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



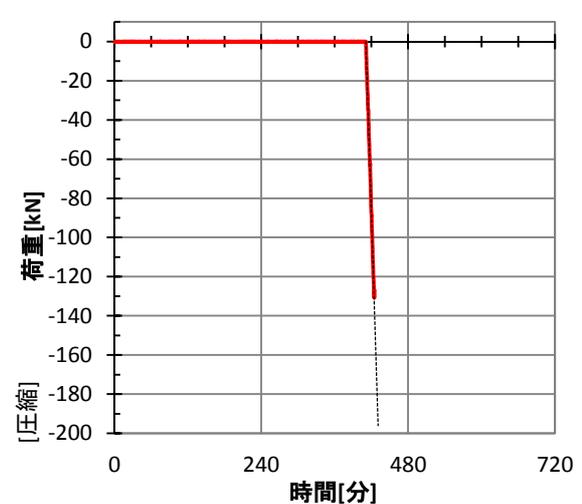
荷重-変形 関係 [載荷後]

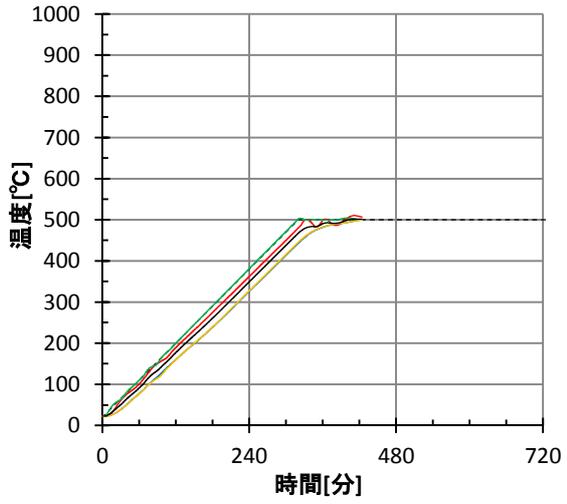
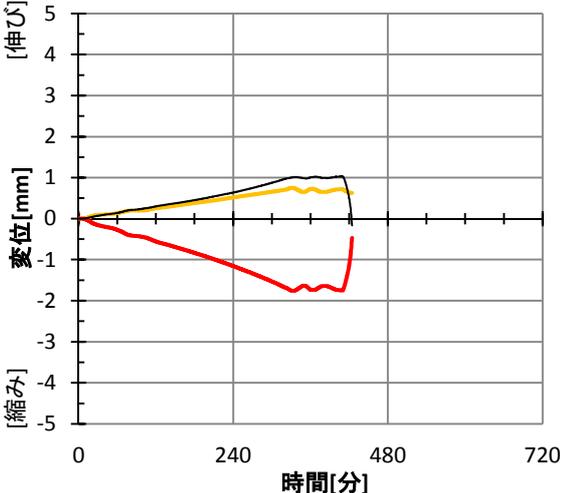
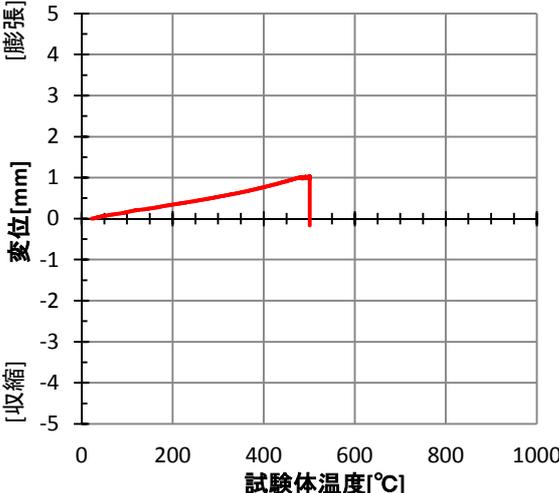
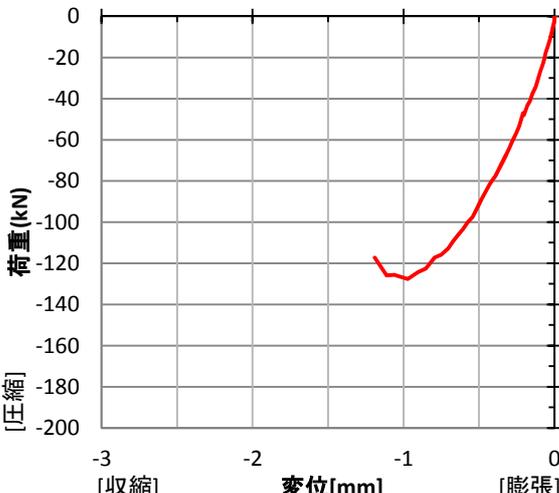
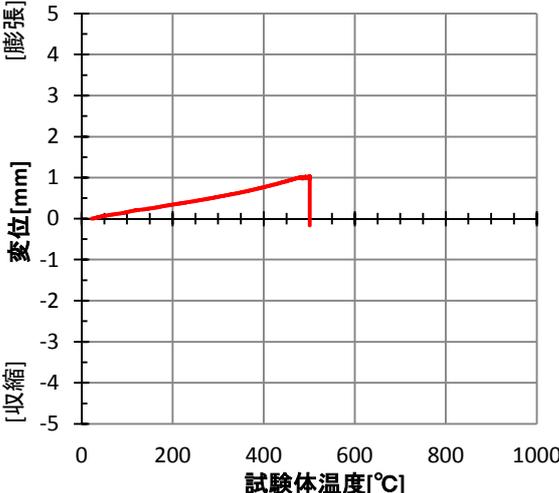
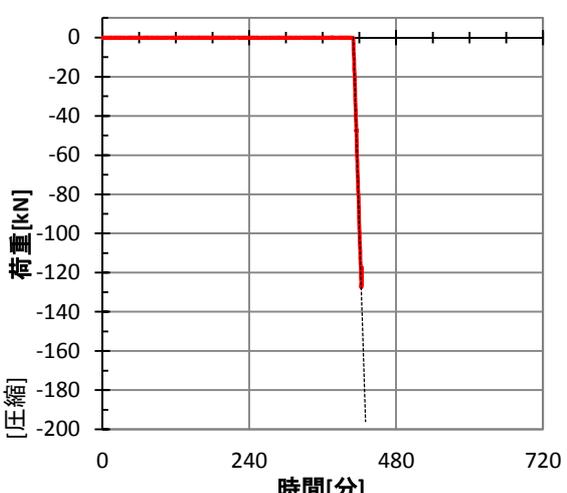
— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



<p>実験名：C-40D-500-1 [定常温度圧縮実験]          設定温度：500℃          実施日：2014/9/22</p>	<p><b>温度-時間 関係</b>          — <math>T_3(6, 20)</math>, — <math>T_4(6, 130)</math>, — <math>T_5(6, 75)</math>, — <math>T_6(6, 75)</math>,          — 試験体温度 (<math>T_3 \sim T_6</math> の平均), --- 設定温度</p> 
<p>試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾          材齢：328日 試験体番号：40-20          寸法：φ75.0×149.8mm          重量：[実験前] 1471.4gf (重量減少率) [実験後] 1437.4gf (2.31%)</p>	<p><b>変位-時間 関係</b>          — 上側変位計, — 下側変位計          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
<p>変形-温度 関係          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-変形 関係 [載荷後]</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
<p>変形-温度 関係          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-時間 関係</b>          — 実験時の荷重, --- 設定荷重</p> 

実験名：C-50A-500-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：500℃  
 実施日：2014/9/28

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：334日 試験体番号：50-10  
 寸法：φ74.9×150.7mm  
 重量：[実験前] 1511.7gf (重量減少率)  
 [実験後] 1446.2gf (4.33%)



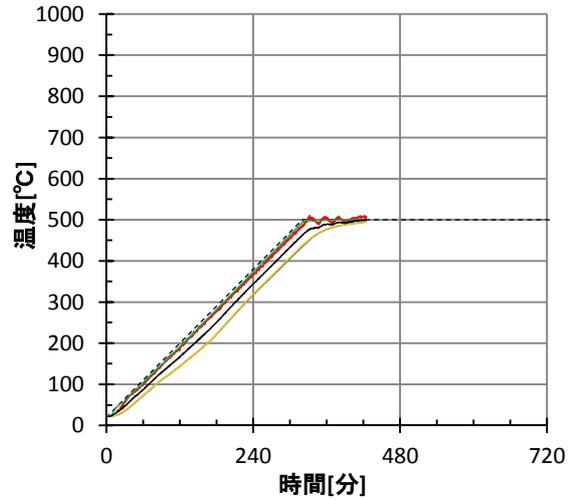
[実験前]



[実験後]

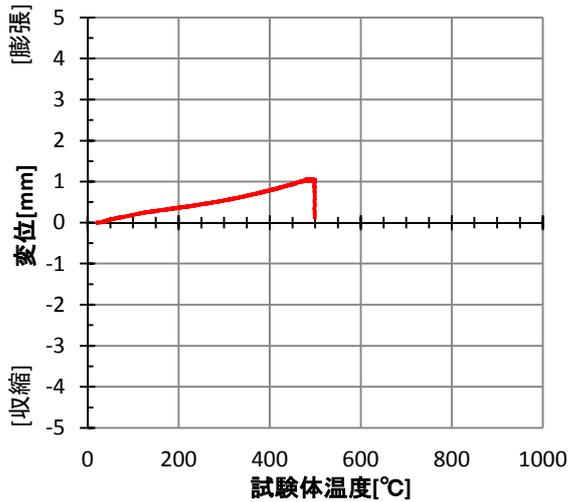
温度-時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(6, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



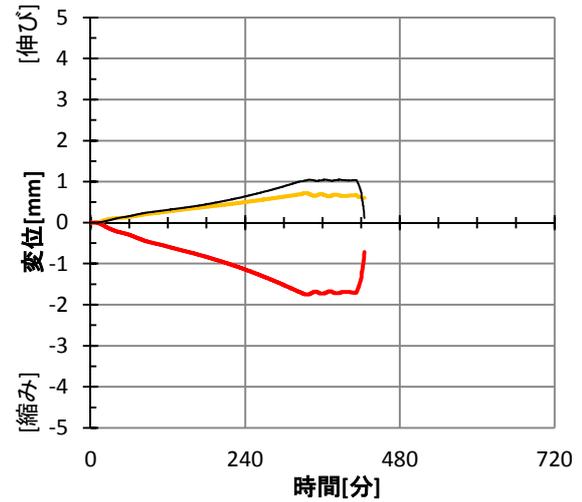
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



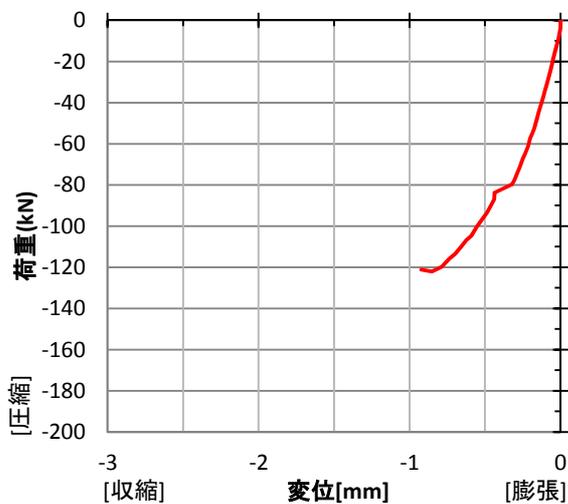
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



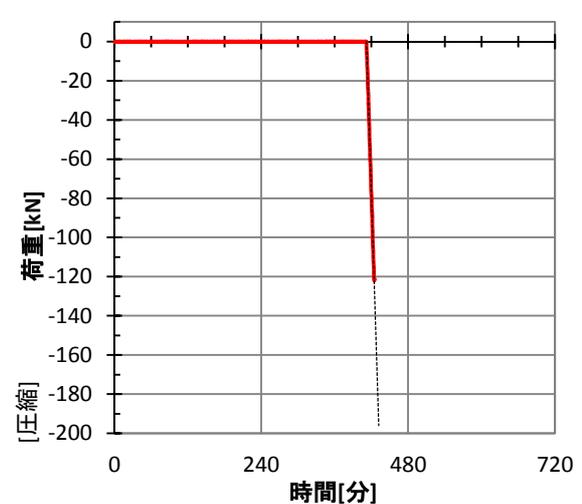
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



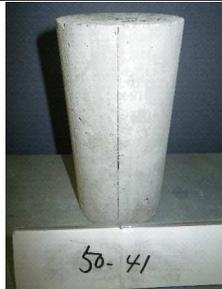
荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-500-2 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：500℃  
 実施日：2015/1/26

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：454日 試験体番号：50-41  
 寸法：φ75.0×149.8mm  
 重量：[実験前] 1511.7gf (重量減少率)  
           [実験後] 1446.2gf (4.33%)



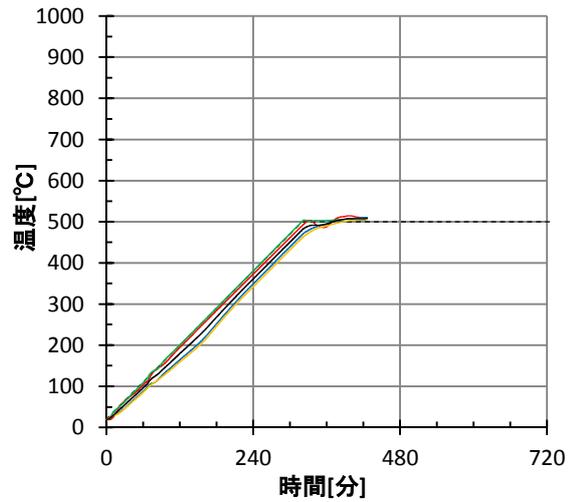
[実験前]



[実験後]

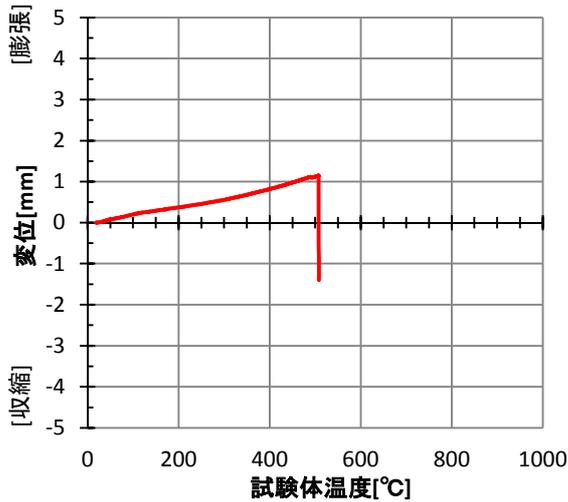
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



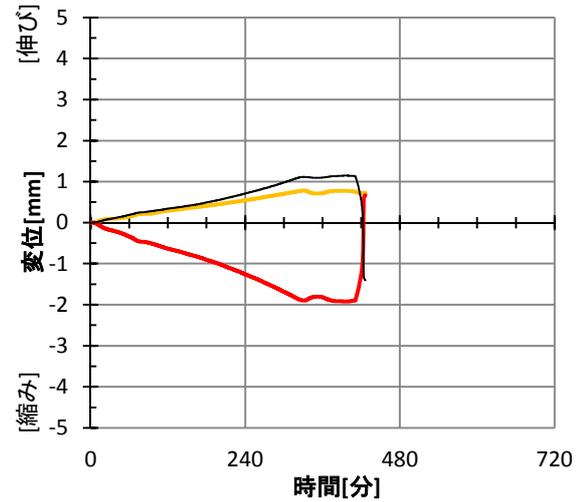
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



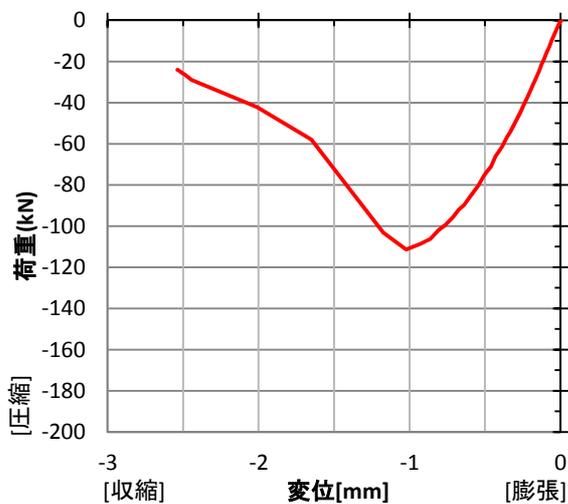
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



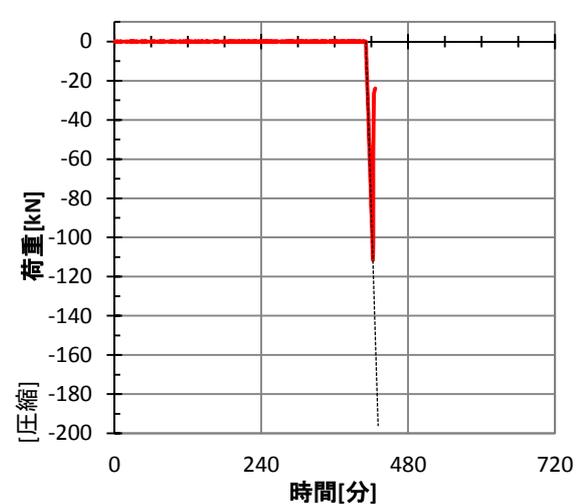
荷重-変形 関係 [載荷後]

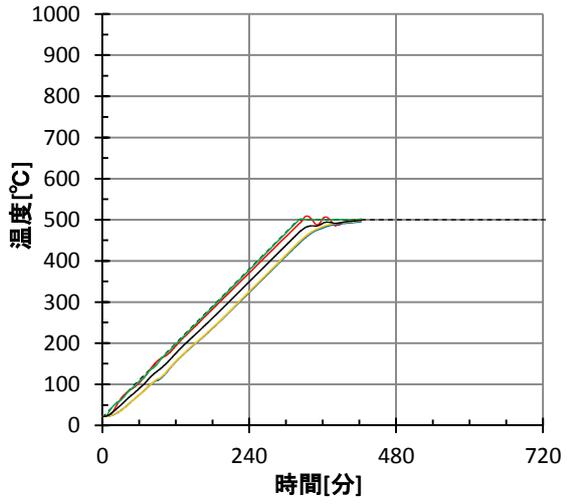
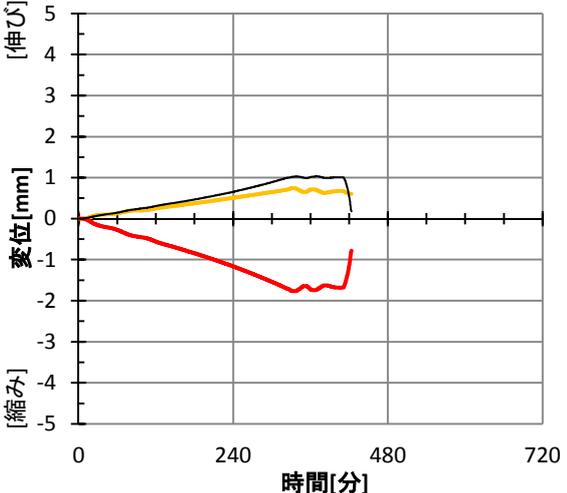
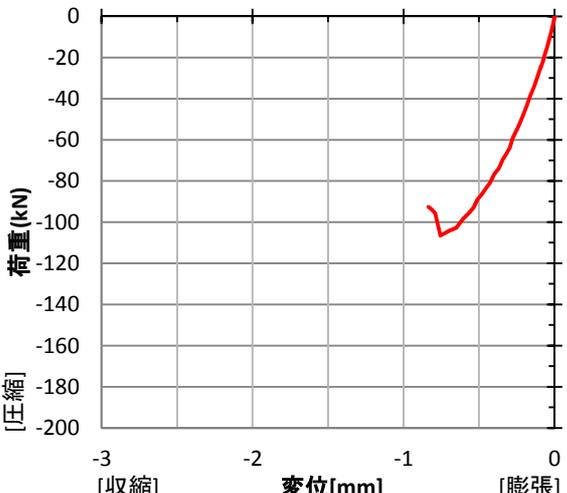
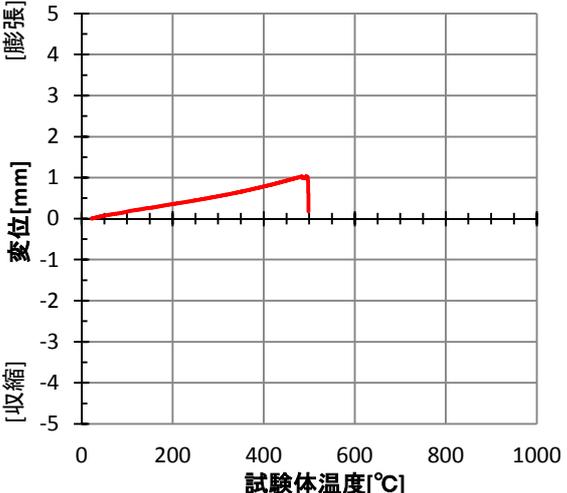
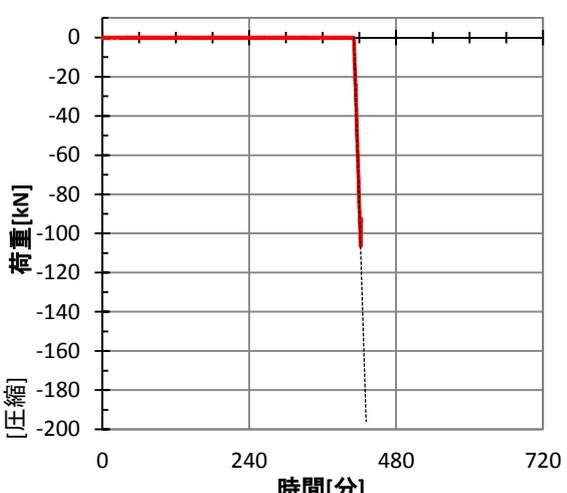
— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



<p>実験名：C-50D-500-1 [定常温度圧縮実験]          設定温度：500℃          実施日：2014/9/21</p>	<p><b>温度-時間 関係</b>          — <math>T_3</math> (6, 20), — <math>T_4</math> (6, 130), — <math>T_5</math> (6, 75), — <math>T_6</math> (6, 75),          — 試験体温度 (<math>T_3 \sim T_6</math> の平均), --- 設定温度</p> 
<p>試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾          材齢：327日 試験体番号：50-20          寸法：φ74.9×150.0mm          重量：[実験前] 1453.7gf (重量減少率) [実験後] 1425.3gf (1.95%)</p>	<p><b>変位-時間 関係</b>          — 上側変位計, — 下側変位計          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
 <p>[実験前]</p>  <p>[実験後]</p>	<p><b>荷重-変形 関係 [載荷後]</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 
<p><b>変形-温度 関係</b>          — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)</p> 	<p><b>荷重-時間 関係</b>          — 実験時の荷重, --- 設定荷重</p> 

実験名：C-65A-500-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：500℃  
 実施日：2014/9/23

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：334日 試験体番号：65-17  
 寸法：φ75.2×150.4mm  
 重量：[実験前] 1499.7gf (重量減少率)  
           [実験後] 1452.4gf (3.15%)



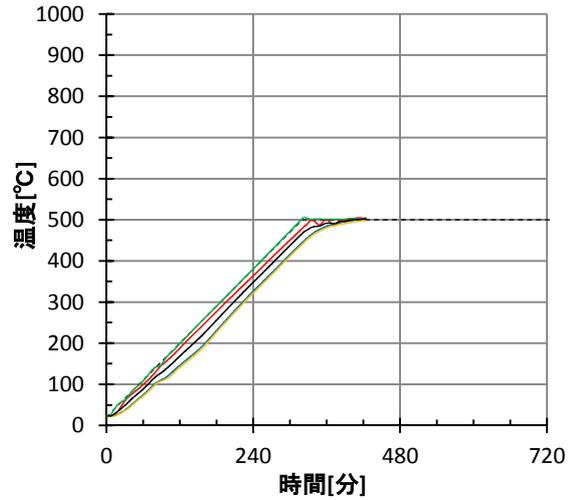
[実験前]



[実験後]

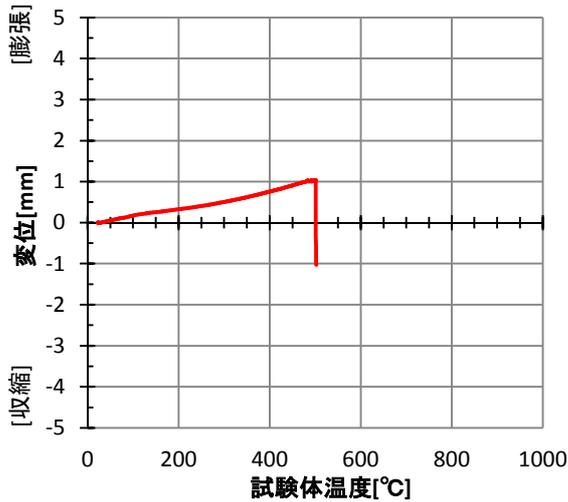
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



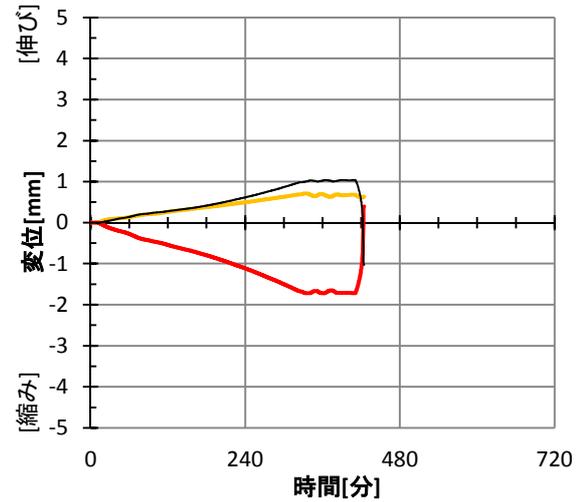
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



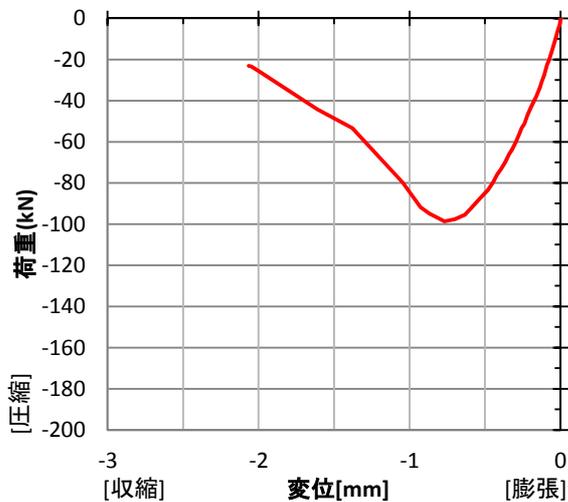
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



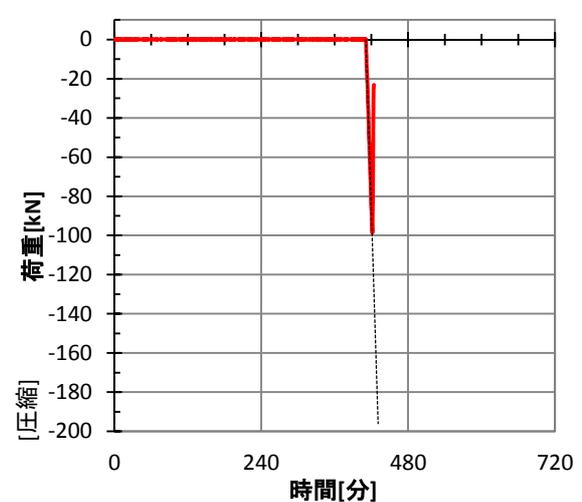
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-500-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：500℃  
 実施日：2014/9/20

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：331日 試験体番号：65-31  
 寸法：φ74.9×149.6mm  
 重量：[実験前] 1447.6gf (重量減少率)  
 [実験後] 1424.9gf (1.57%)



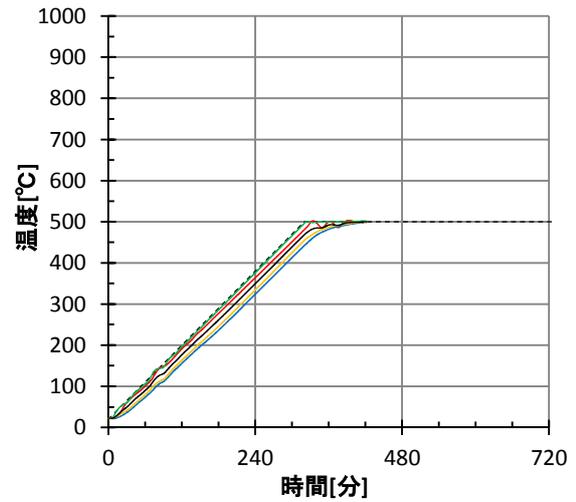
[実験前]



[実験後]

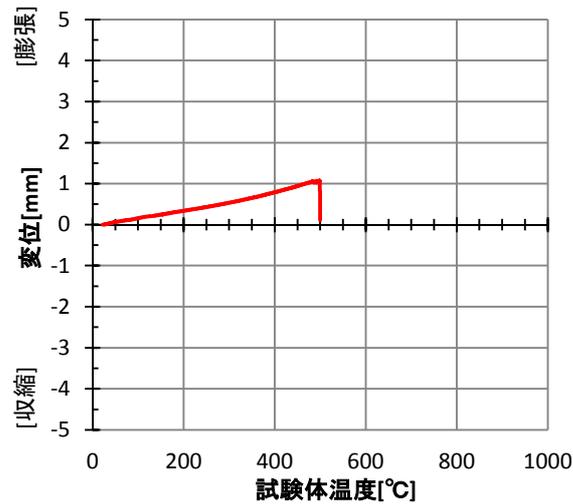
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



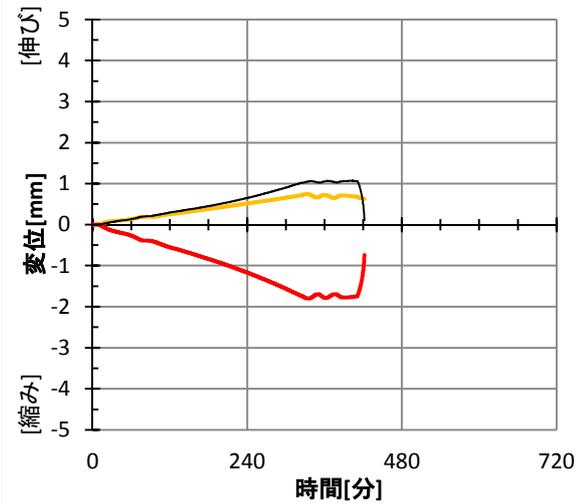
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



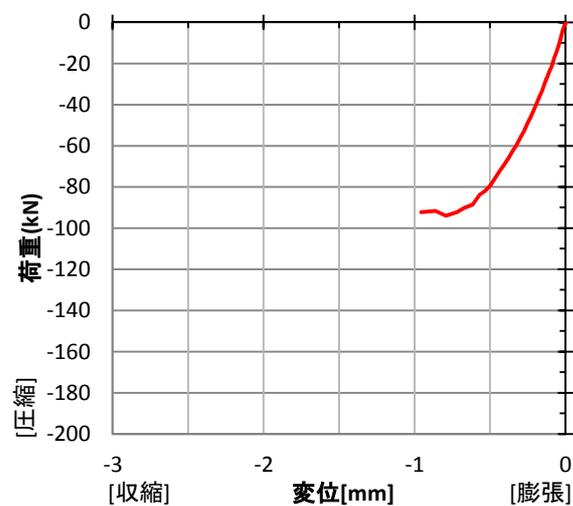
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



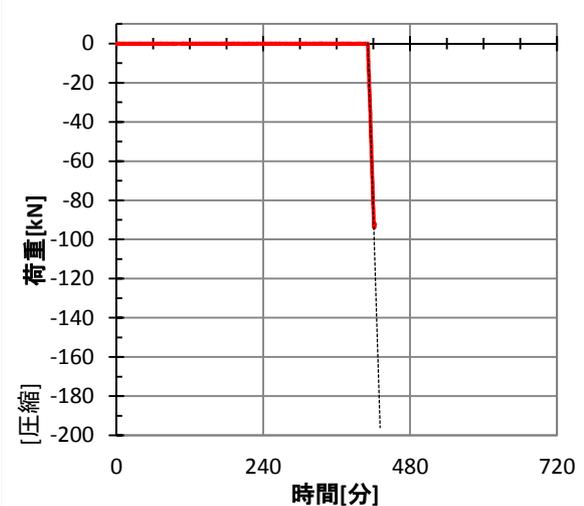
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-500-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：500℃  
 実施日：2014/9/30

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：341日 試験体番号：65-36  
 寸法：φ75.1×150.1mm  
 重量：[実験前] 1542.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1426.3gf (7.50%)



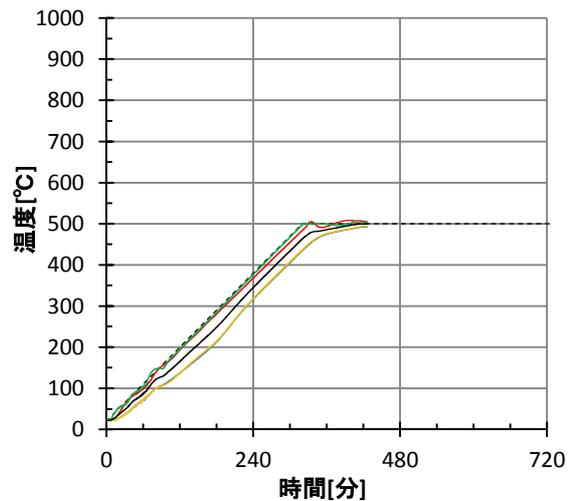
[実験前]



[実験後]

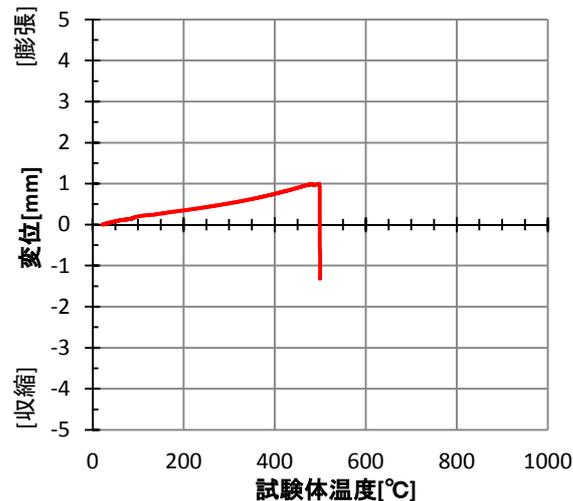
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



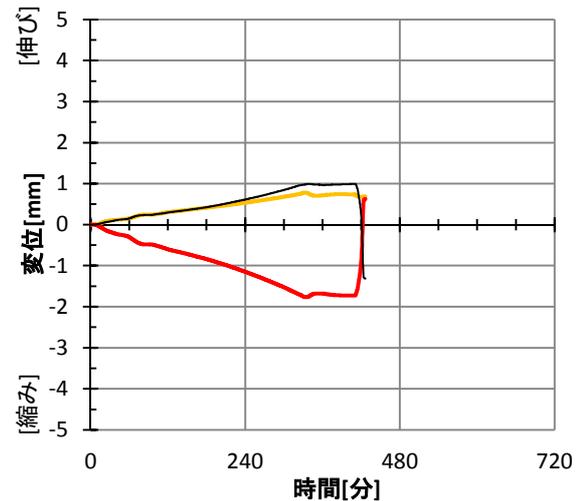
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



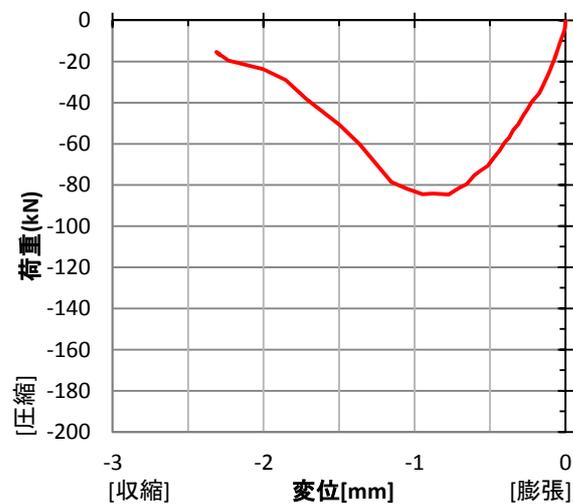
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



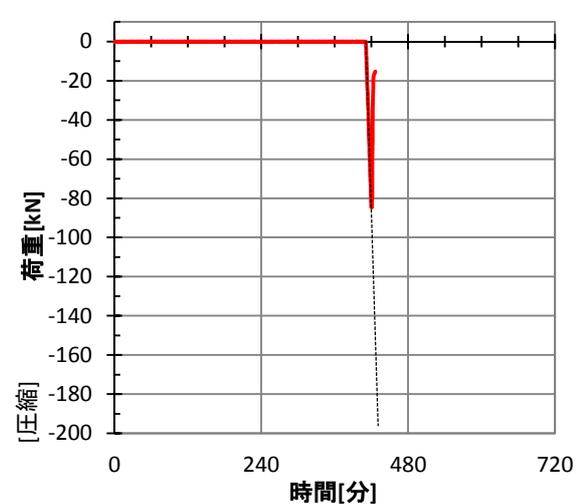
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/5

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：341日 試験体番号：40-23  
 寸法：φ75.0×151.0mm  
 重量：[実験前] 1522.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1422.7gf (6.56%)



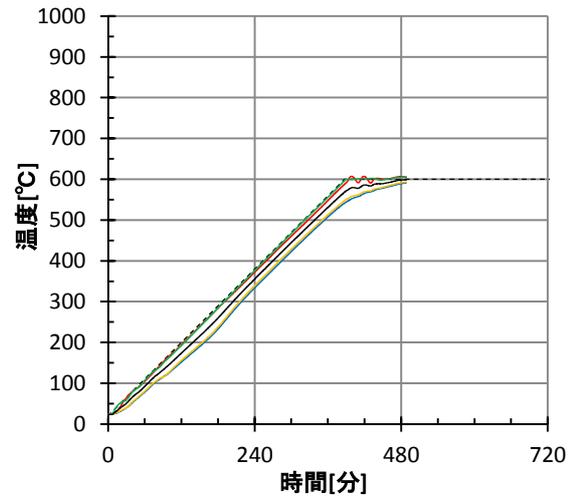
[実験前]



[実験後]

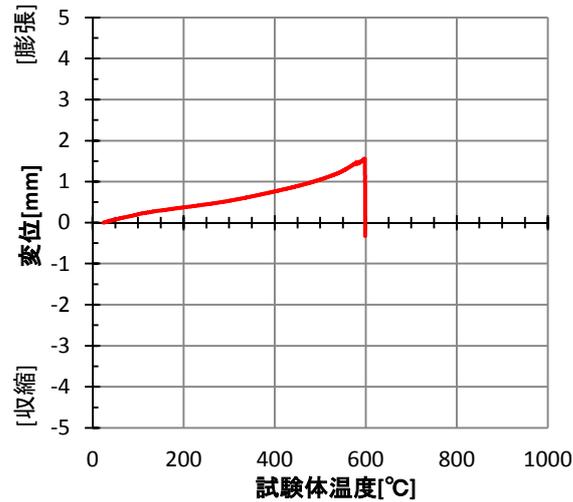
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



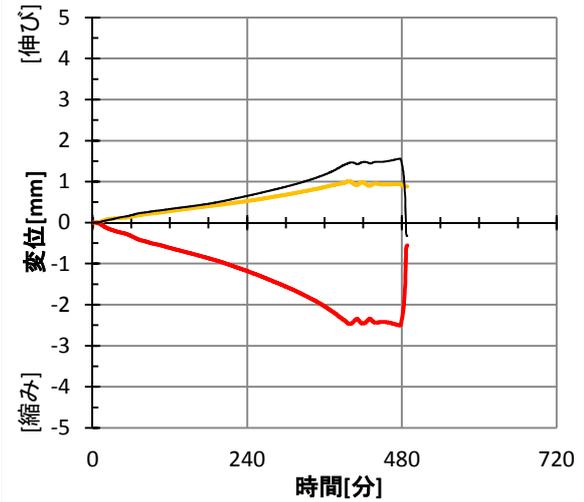
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



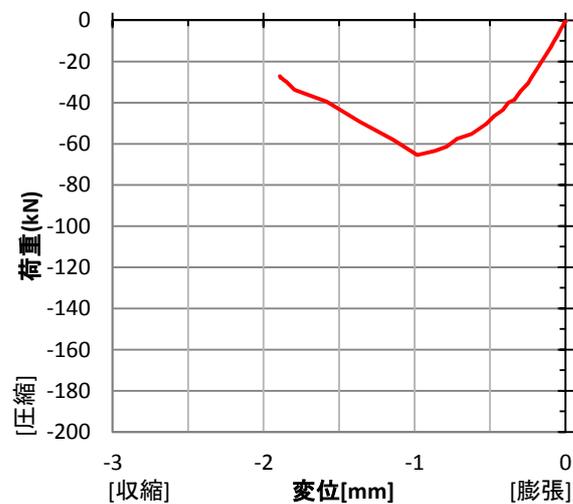
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



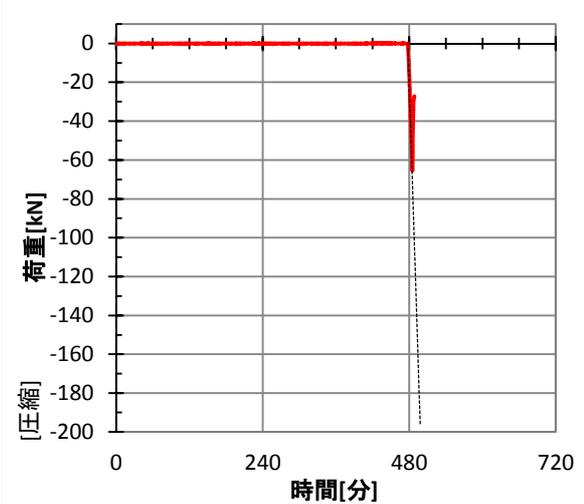
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/8

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：344日 試験体番号：40-22  
 寸法：φ75.2×150.0mm  
 重量：[実験前] 1480.4gf (重量減少率)  
 [実験後] 1431.1gf (3.33%)



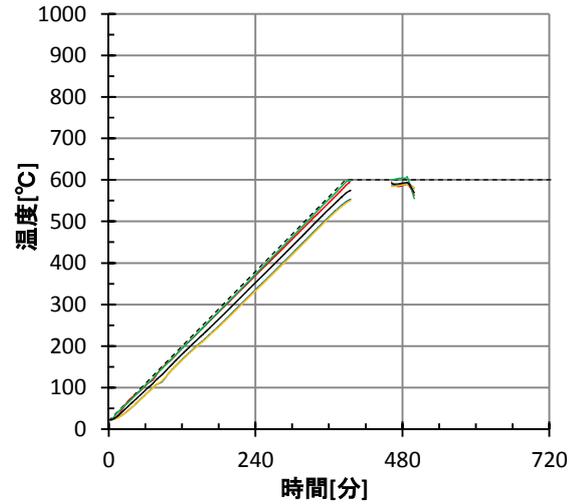
[実験前]



[実験後]

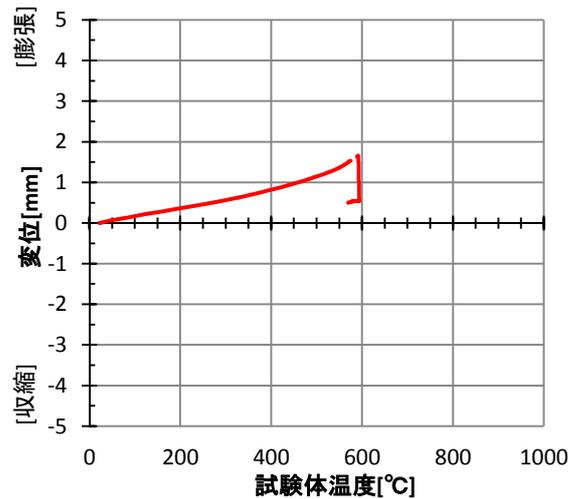
温度-時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(6, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



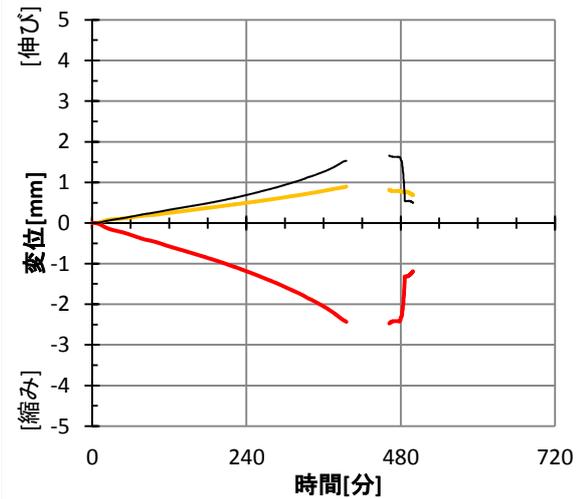
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



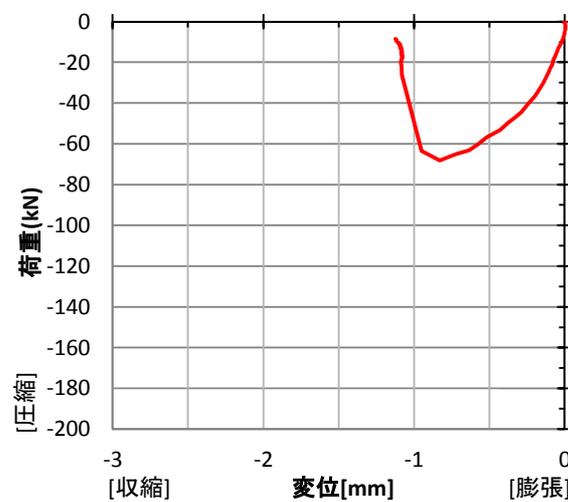
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



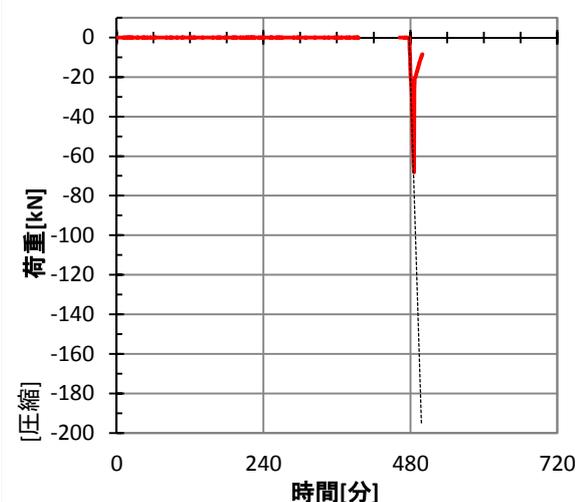
荷重-変形 関係 [载荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/2

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：338日 試験体番号：50-23  
 寸法：φ74.8×148.9mm  
 重量：[実験前] 1476.1gf (重量減少率)  
           [実験後] 1396.0gf (5.43%)



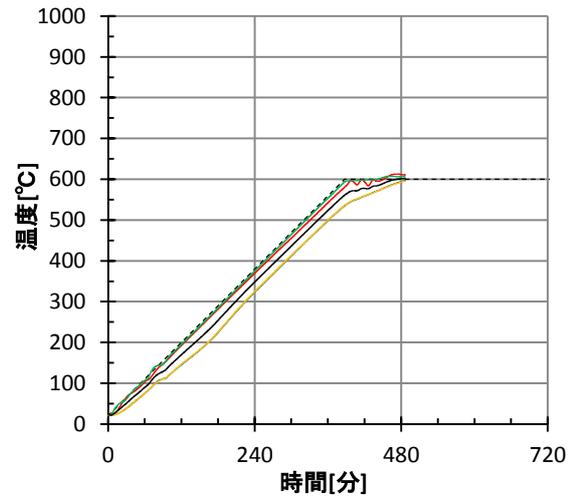
[実験前]



[実験後]

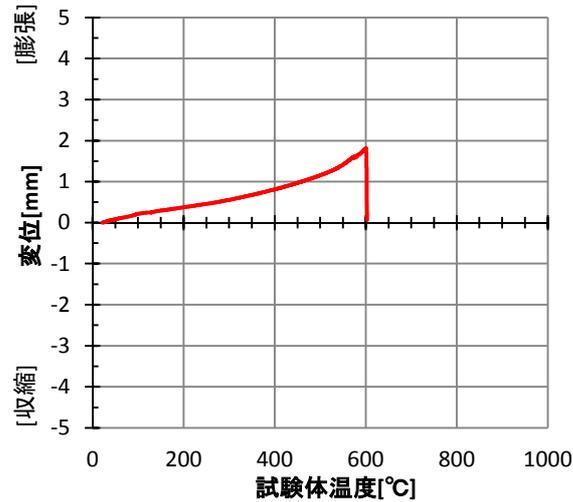
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



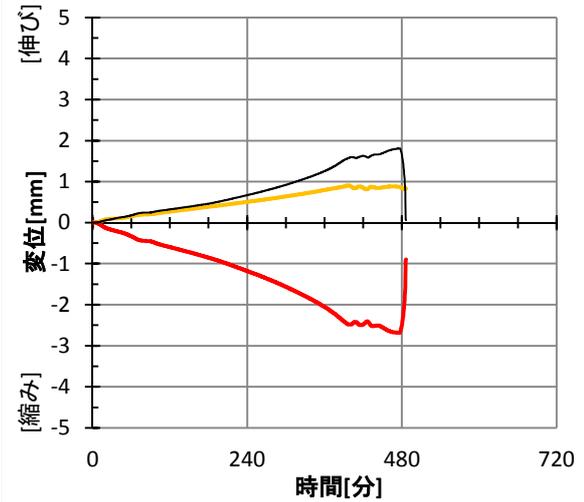
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



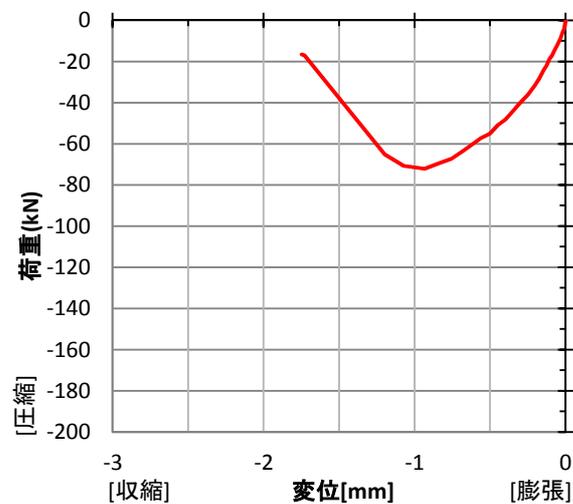
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



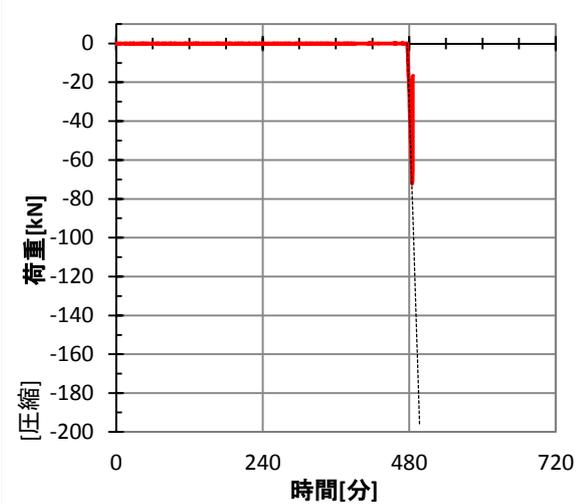
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50D-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/7

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：343日 試験体番号：50-22  
 寸法：φ75.0×148.8mm  
 重量：[実験前] 1452.5gf (重量減少率)  
 [実験後] 1409.9gf (2.93%)



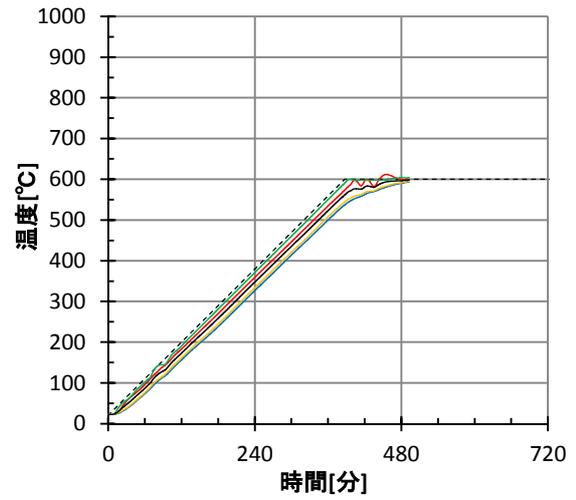
[実験前]



[実験後]

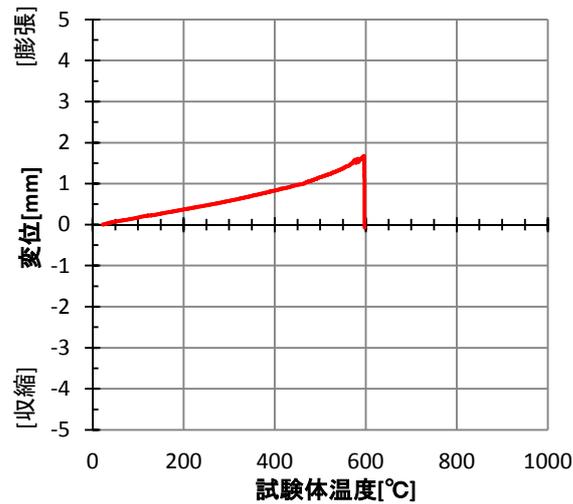
温度-時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(6, 75)$ ,  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



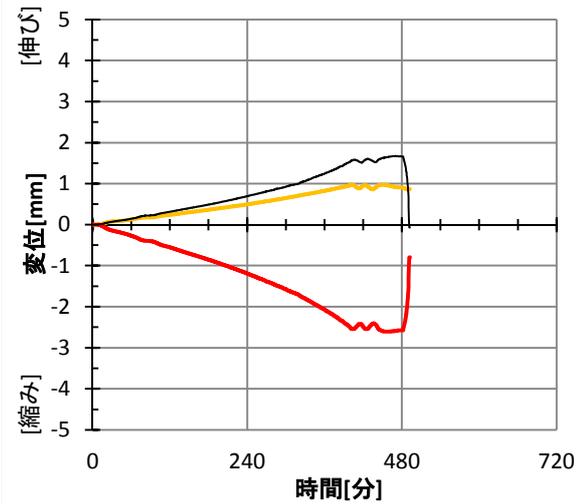
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



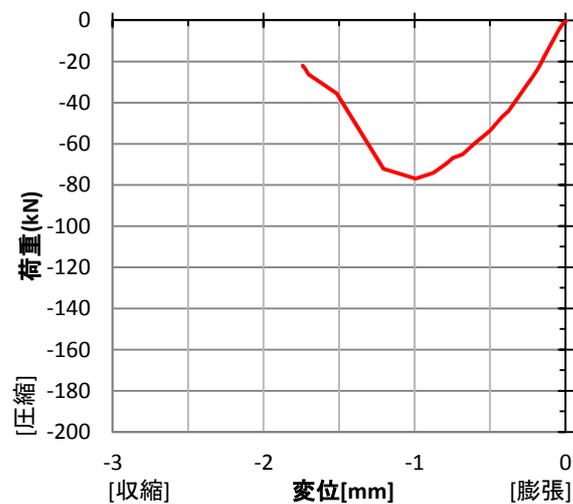
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



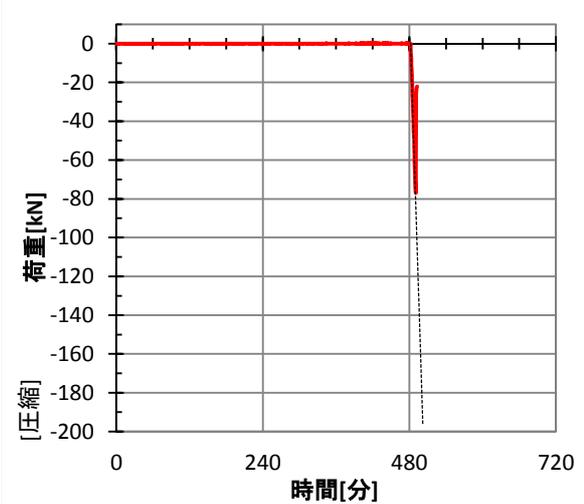
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/1

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：342日 試験体番号：65-37  
 寸法：φ74.9×150.0mm  
 重量：[実験前] 1473.7gf (重量減少率)  
           [実験後] 1403.7gf (4.75%)



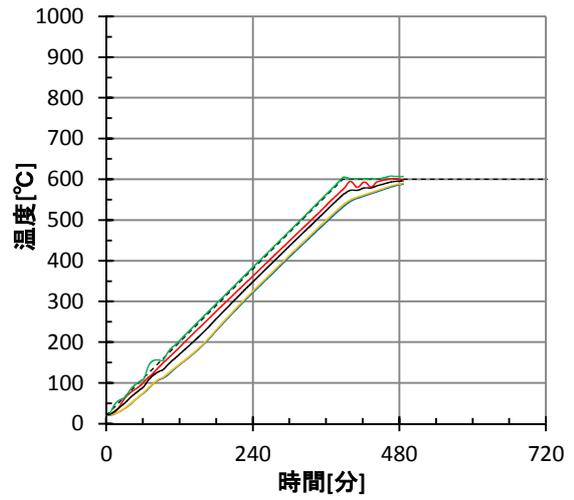
[実験前]



[実験後]

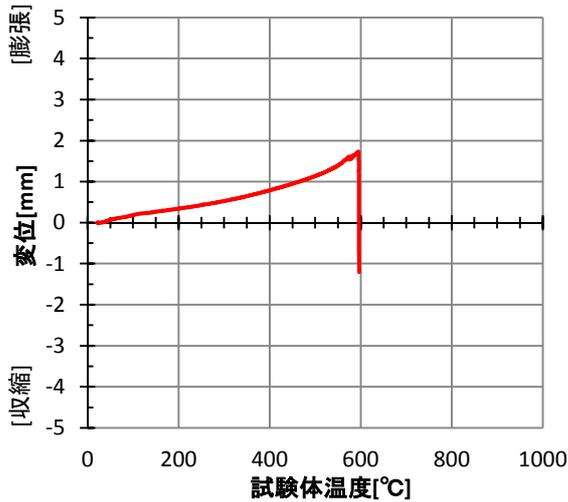
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



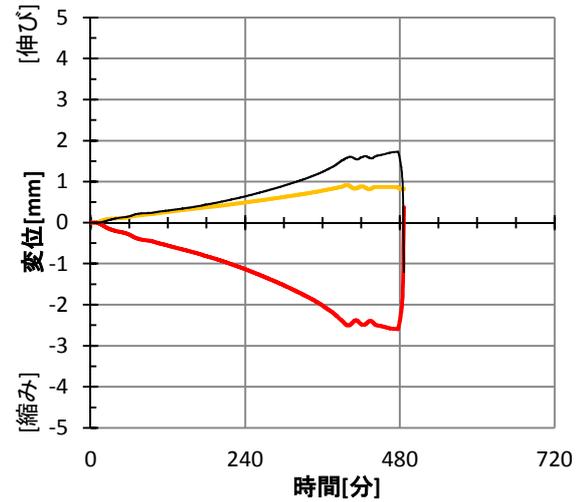
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



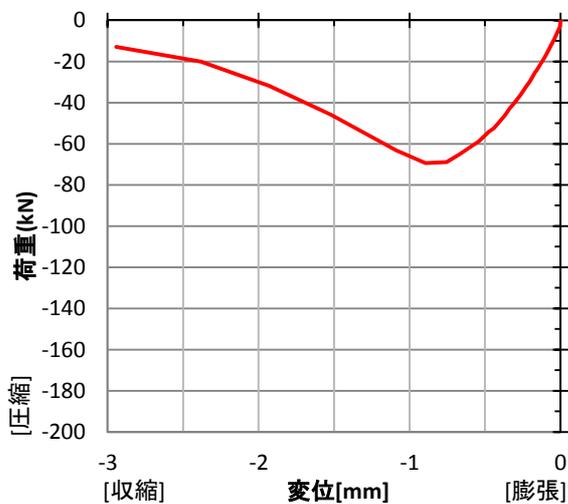
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



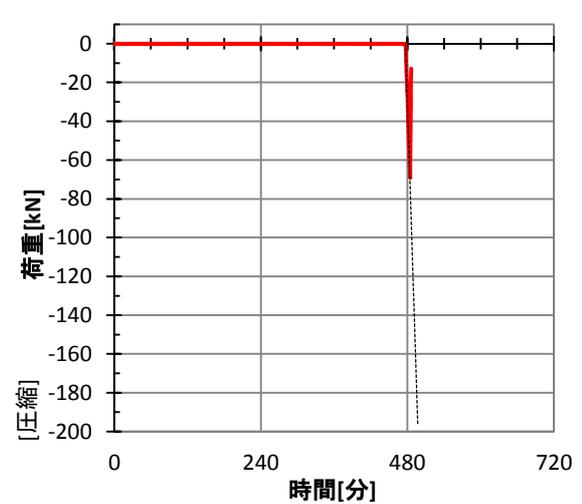
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



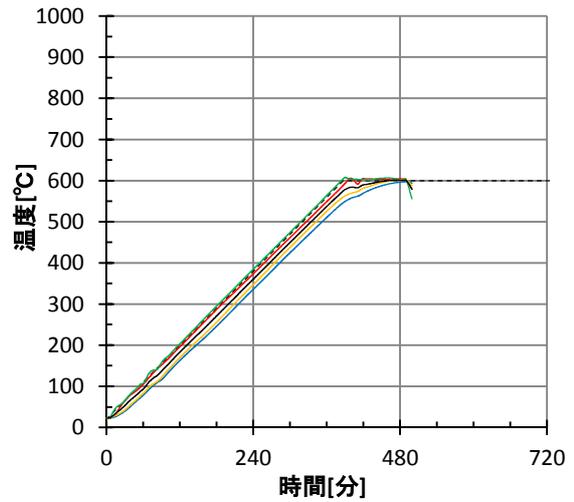
実験名：C-65D-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/6

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：347日 試験体番号：65-35  
 寸法：φ74.9×150.0mm  
 重量：[実験前] 1449.9gf (重量減少率)  
 [実験後] 1412.5gf (2.58%)



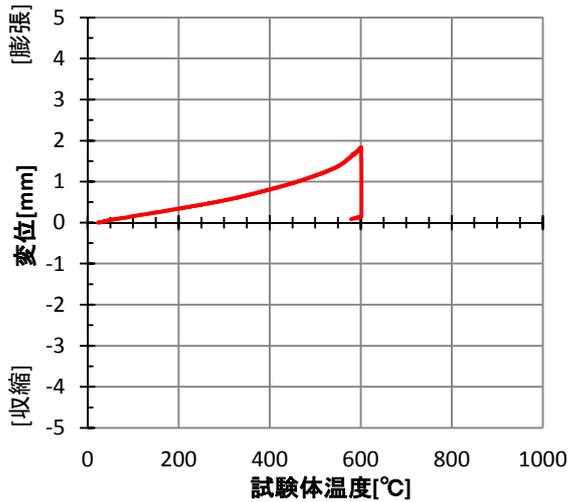
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



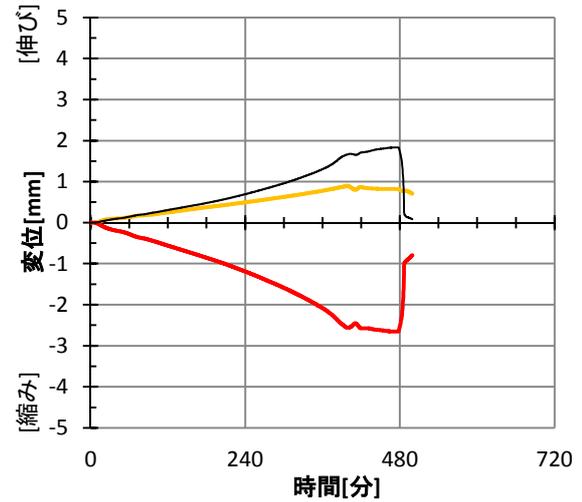
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



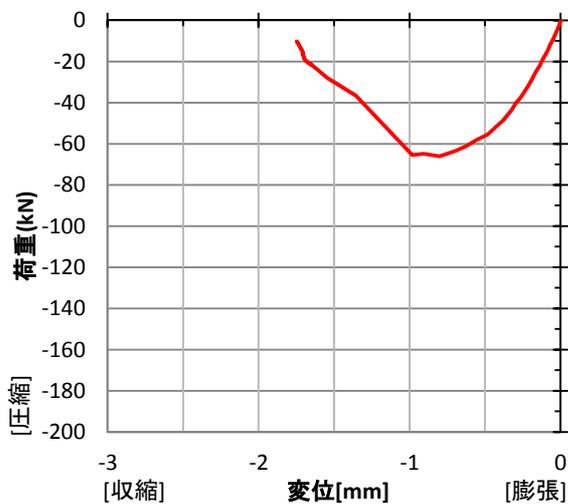
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



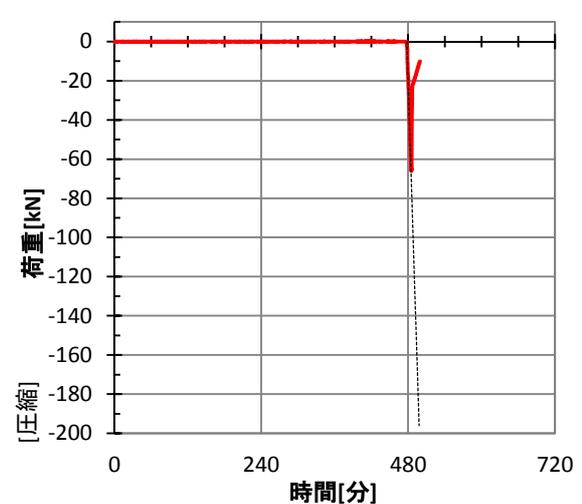
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-600-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：600℃  
 実施日：2014/10/9

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：350日 試験体番号：65-41  
 寸法：φ75.0×149.0mm  
 重量：[実験前] 1507.8gf (重量減少率)  
           [実験後] 1374.2gf (8.86%)



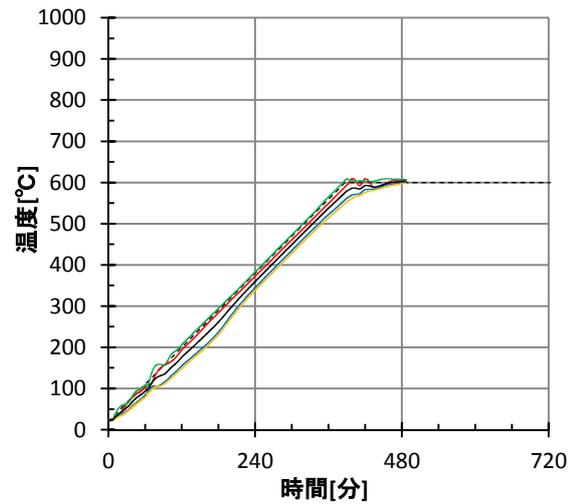
[実験前]



[実験後]

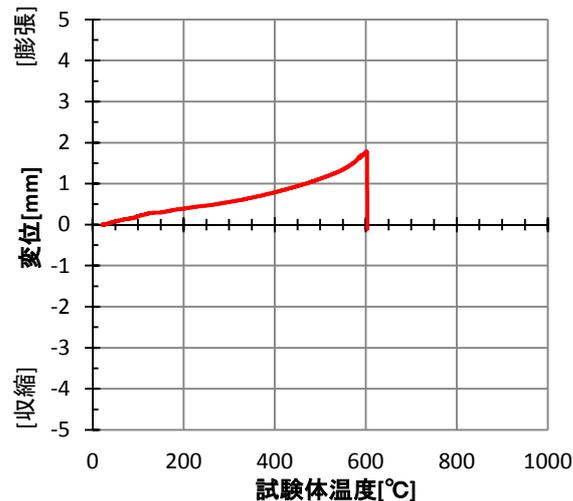
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



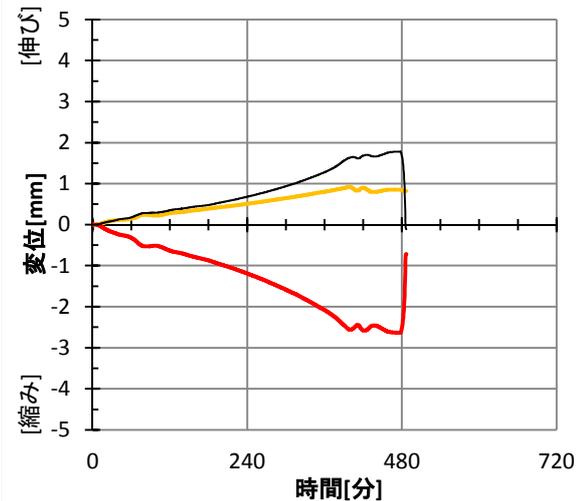
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



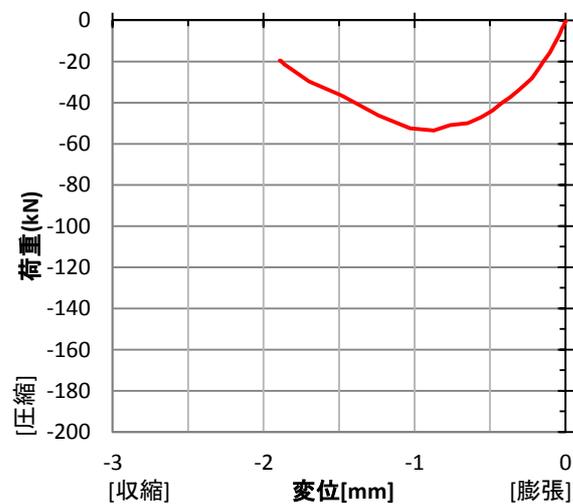
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



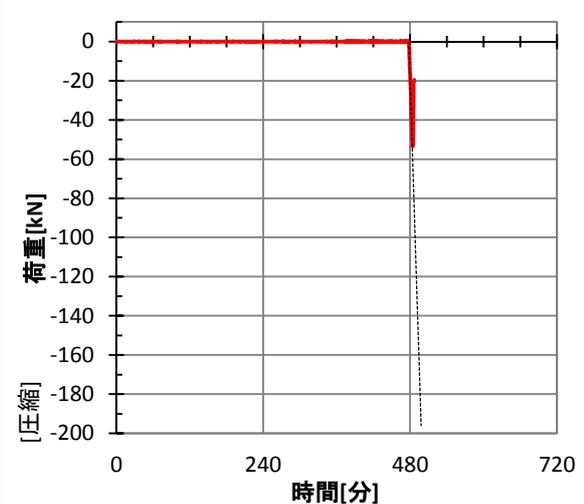
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/28

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：364日 試験体番号：40-27  
 寸法：φ74.9×150.7mm  
 重量：[実験前] 1524.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1411.2gf (7.40%)



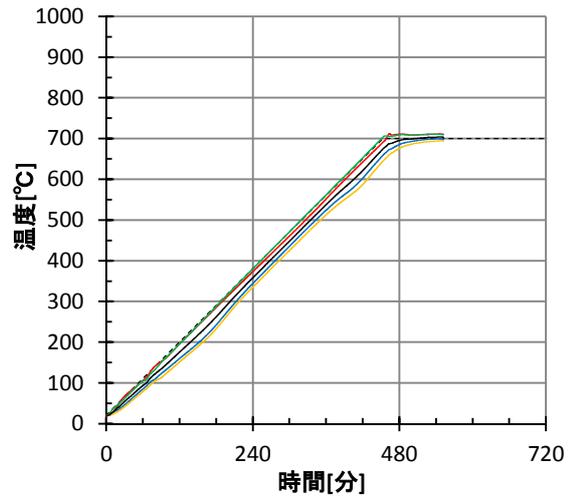
[実験前]



[実験後]

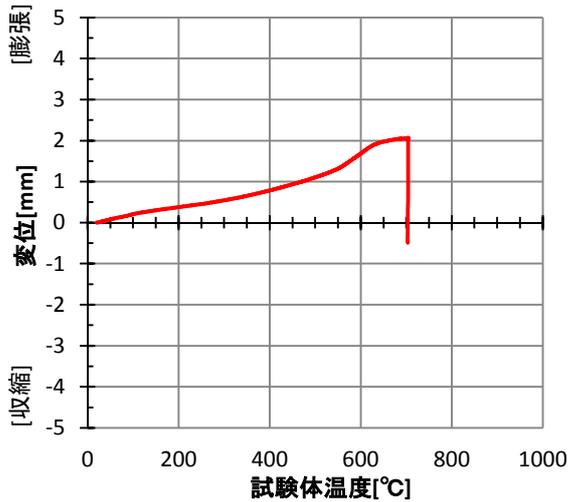
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



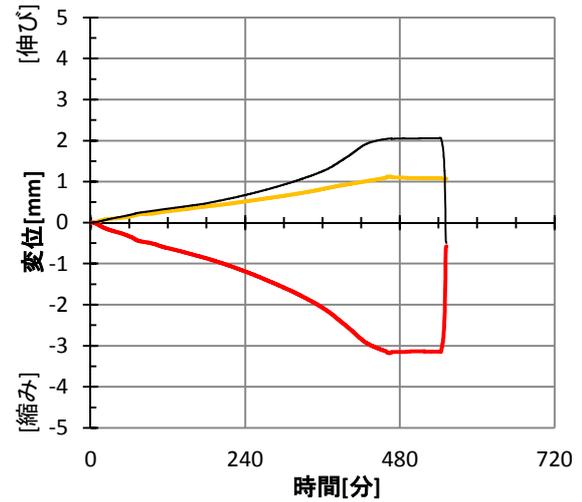
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



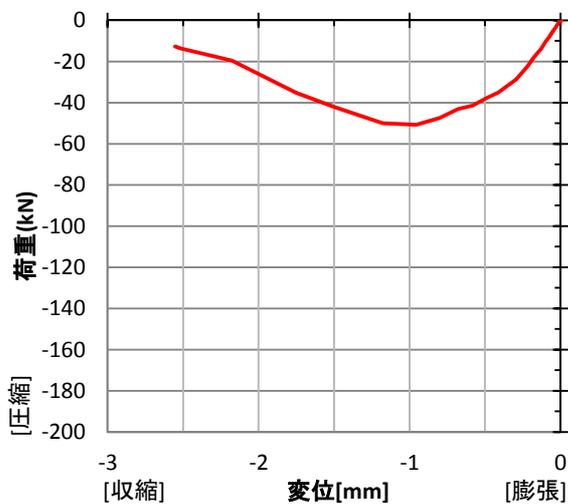
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



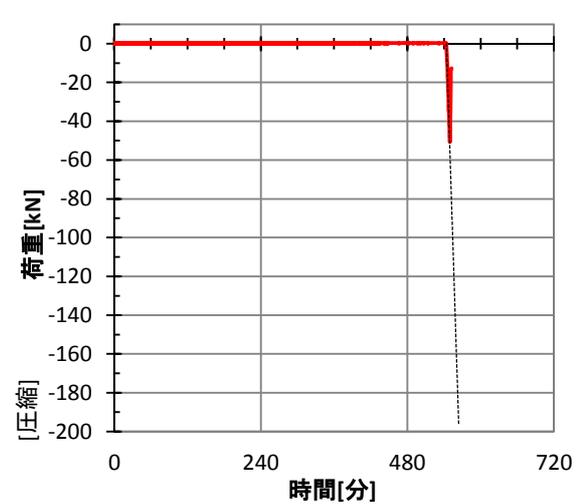
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/18

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：354日 試験体番号：40-24  
 寸法：φ75.0×149.7mm  
 重量：[実験前] 1469.9gf (重量減少率)  
           [実験後] 1411.5gf (3.97%)



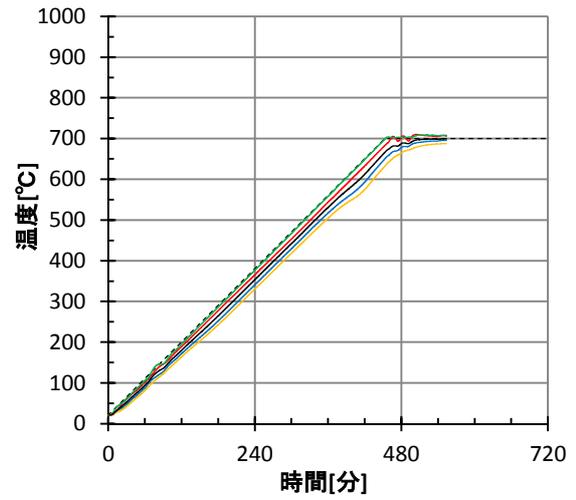
[実験前]



[実験後]

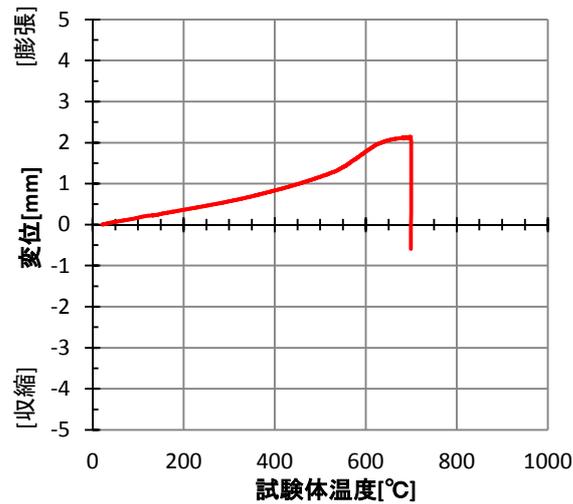
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



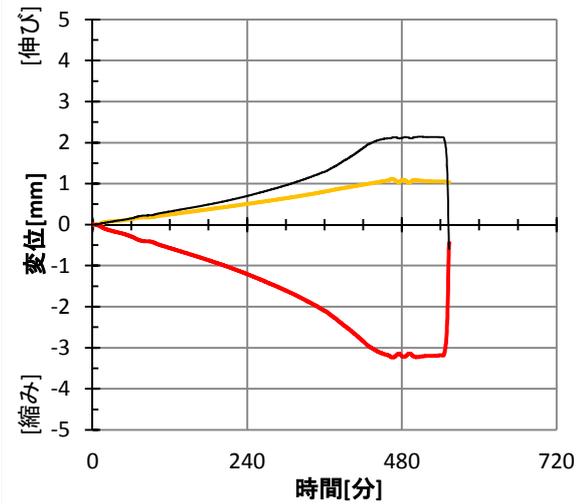
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



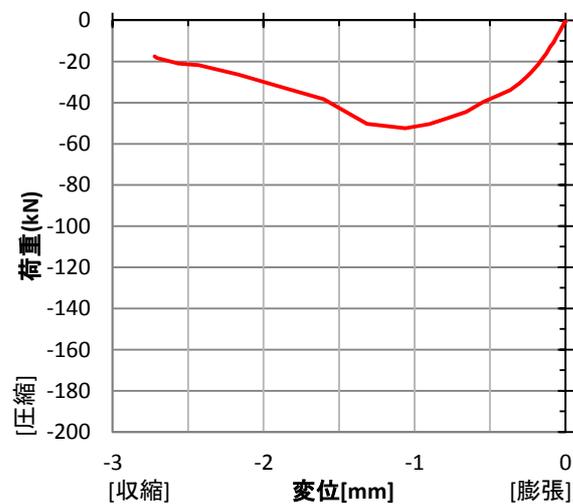
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



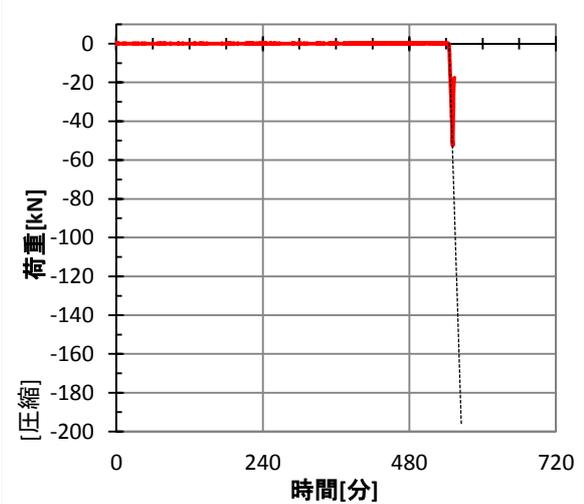
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/21

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：357日 試験体番号：50-27  
 寸法：φ75.0×150.2mm  
 重量：[実験前] 1501.1gf (重量減少率) [実験後] 1410.9gf (6.01%)



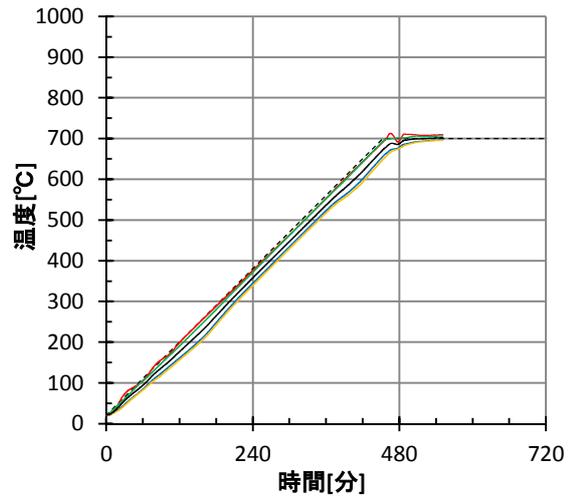
[実験前]



[実験後]

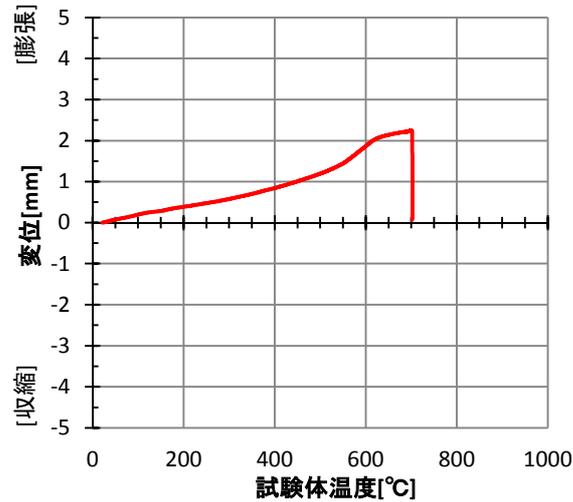
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



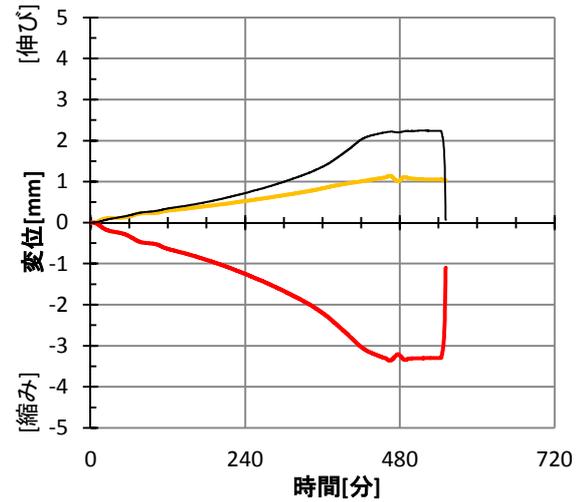
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



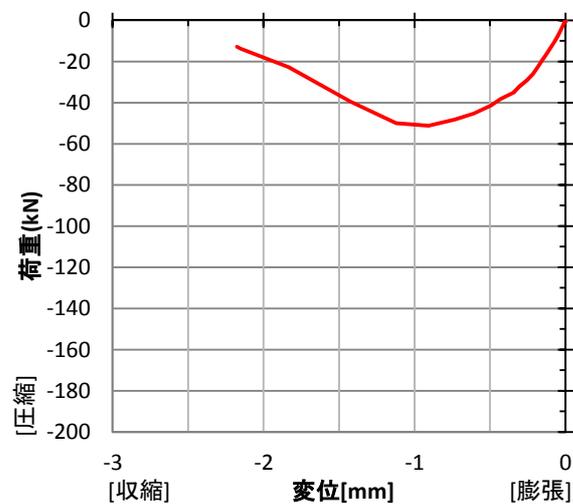
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



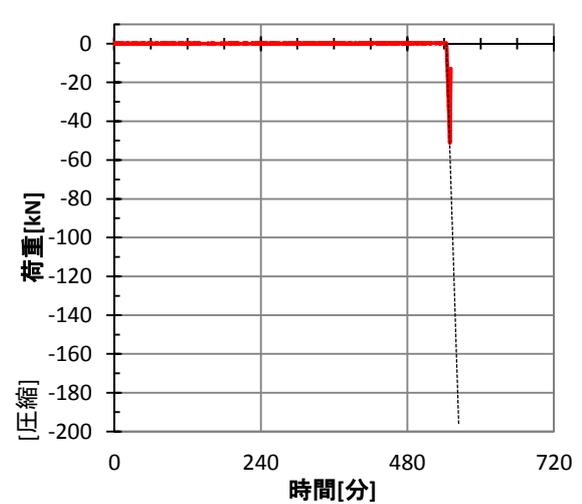
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



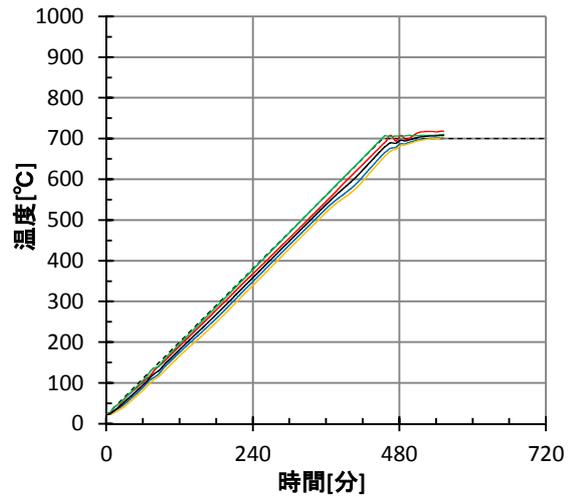
実験名：C-50D-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/17

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：353日 試験体番号：50-24  
 寸法：φ75.0×150.0mm  
 重量：[実験前] 1443.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1385.8gf (3.99%)



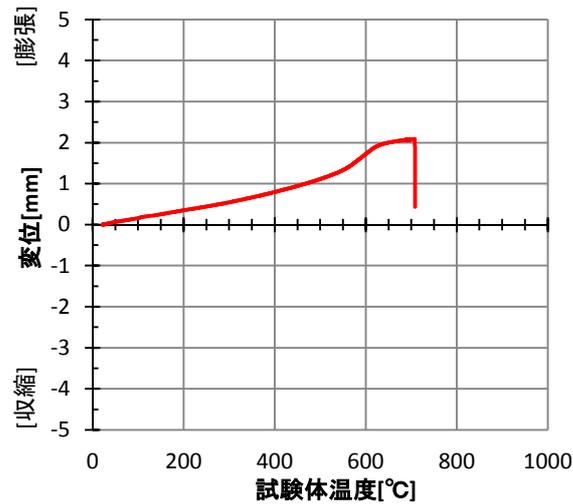
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



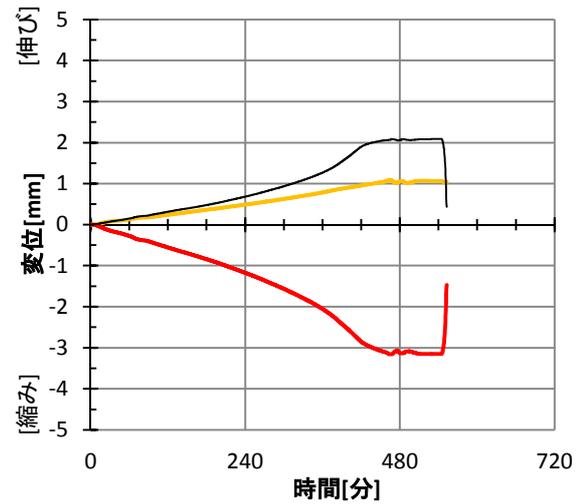
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



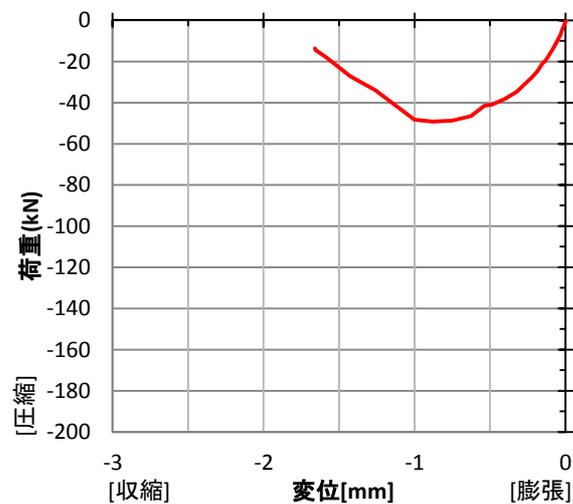
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



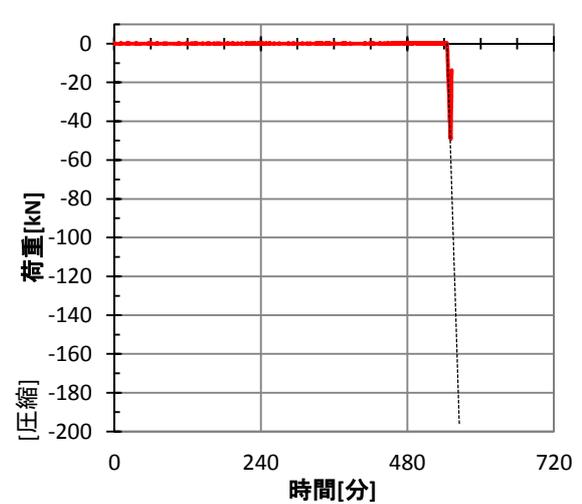
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65A-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/11

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：352日 試験体番号：65-42  
 寸法：φ75.6×150.8mm  
 重量：[実験前] 1521.1gf (重量減少率)  
           [実験後] 1439.6gf (5.36%)



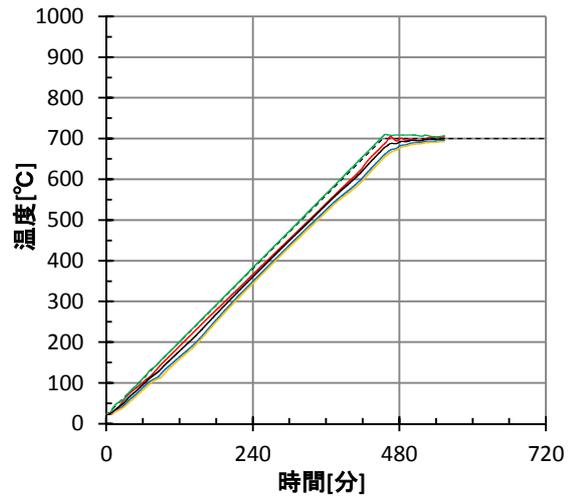
[実験前]



[実験後]

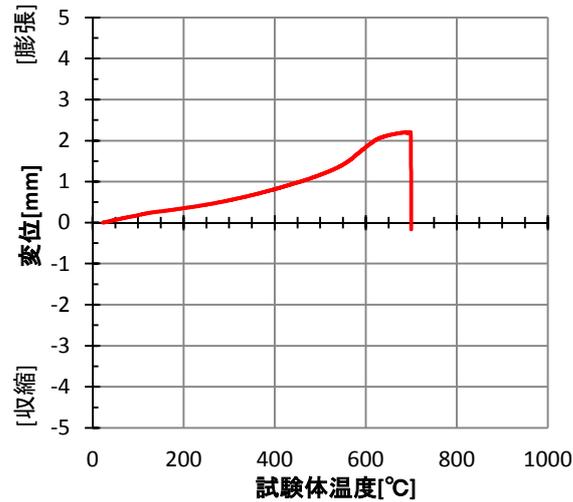
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



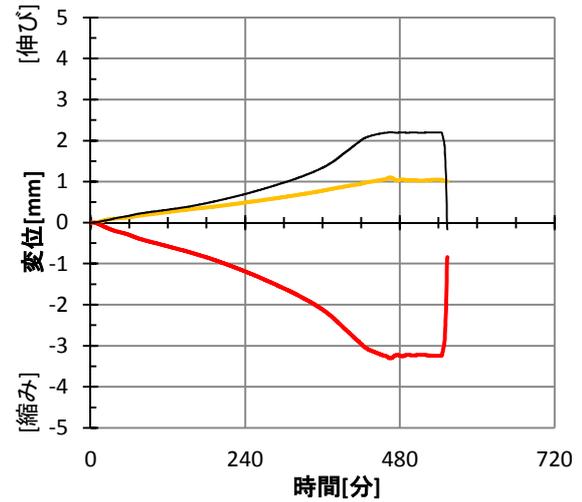
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



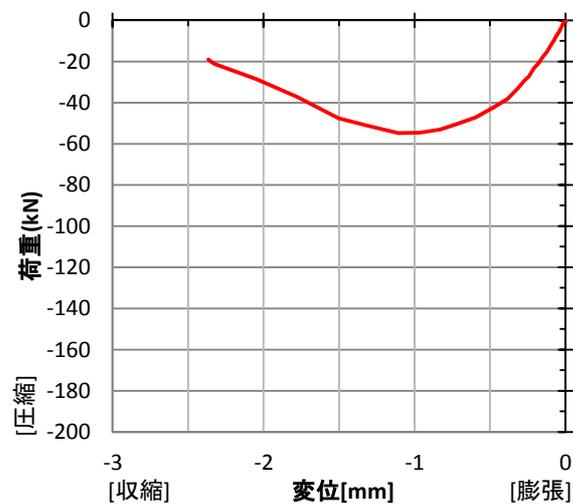
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



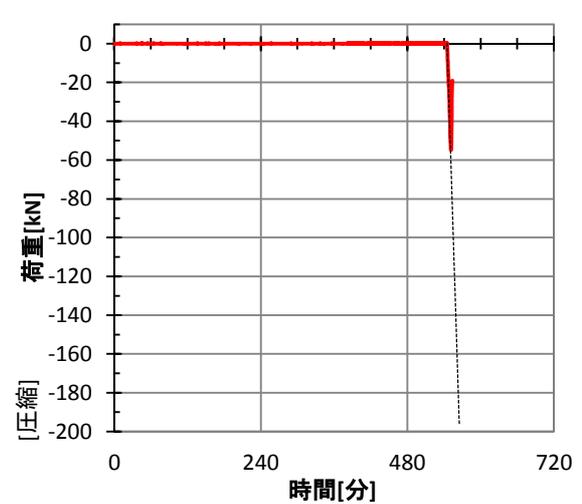
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/15

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：356日 試験体番号：65-38  
 寸法：φ74.9×150.3mm  
 重量：[実験前] 1444.9gf (重量減少率)  
 [実験後] 1395.2gf (3.44%)



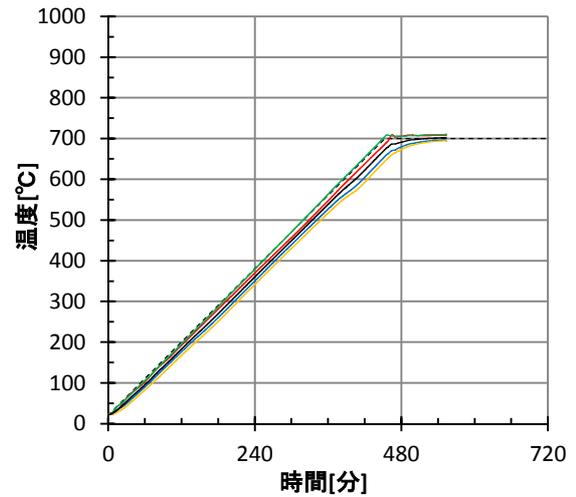
[実験前]



[実験後]

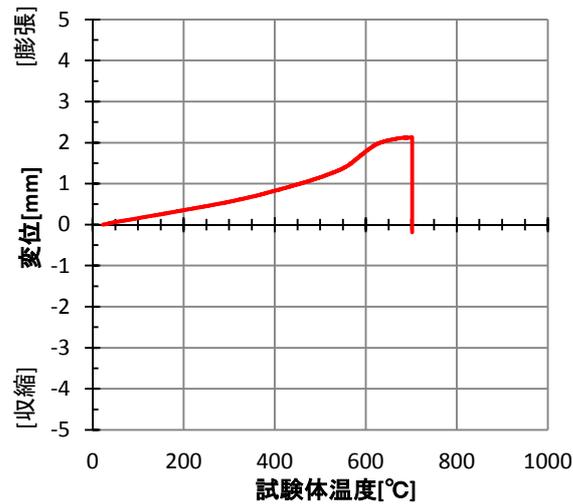
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



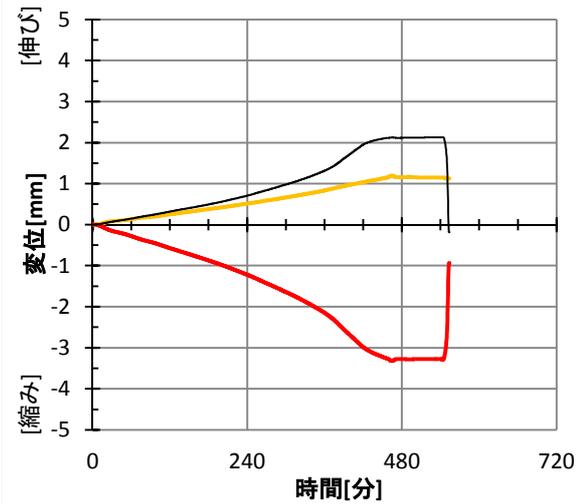
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



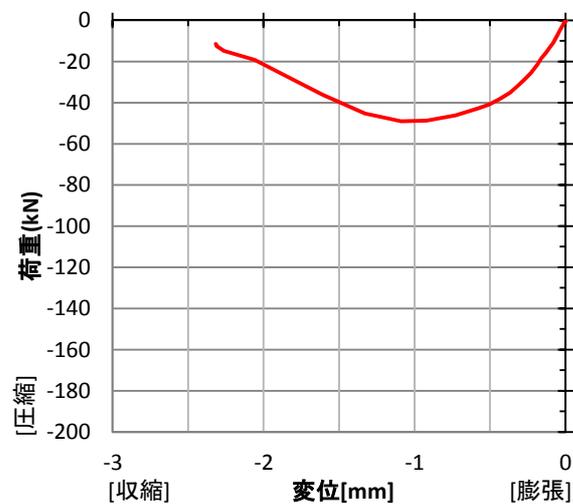
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



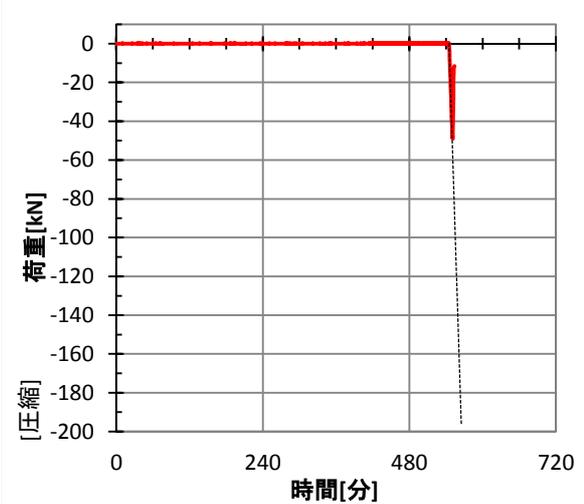
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-700-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：700℃  
 実施日：2014/10/31

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：372日 試験体番号：65-48  
 寸法：φ75.0×150.8mm  
 重量：[実験前] 1531.7gf (重量減少率)  
 [実験後] 1399.2gf (8.65%)



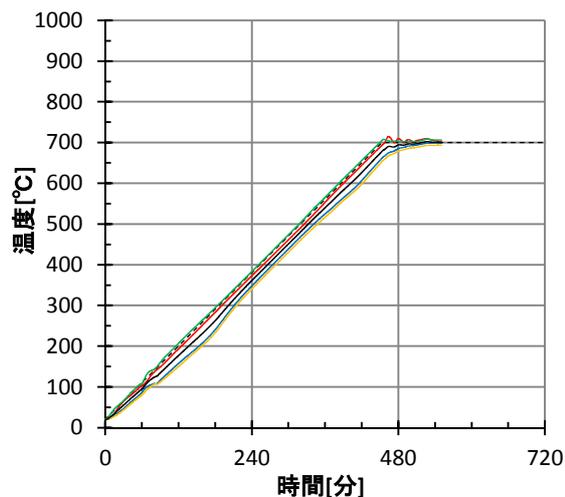
[実験前]



[実験後]

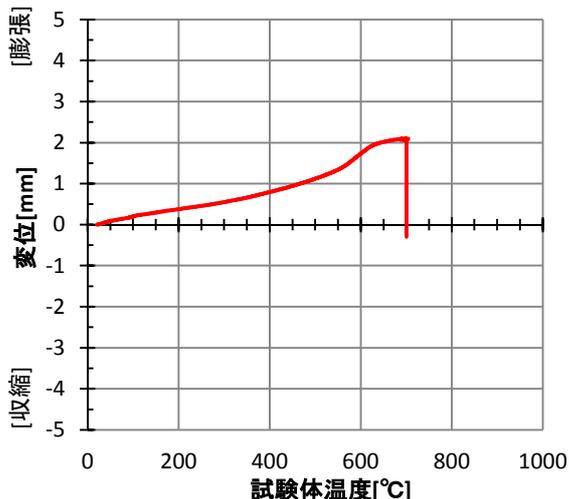
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



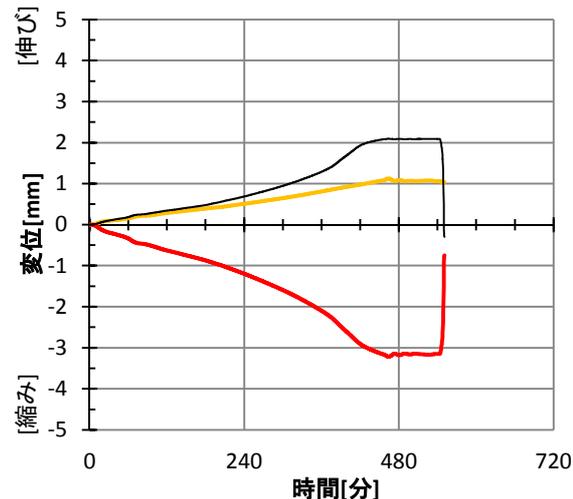
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



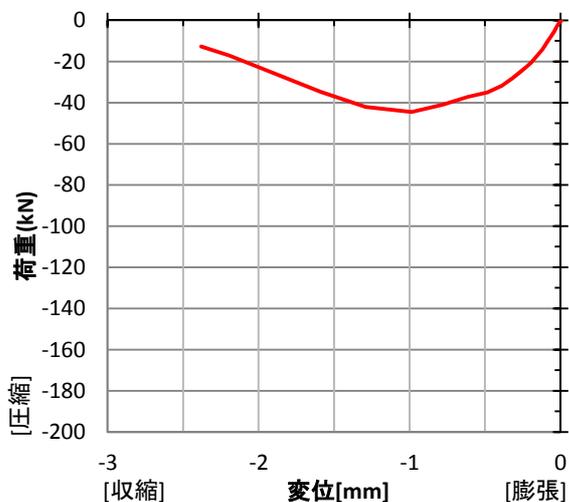
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



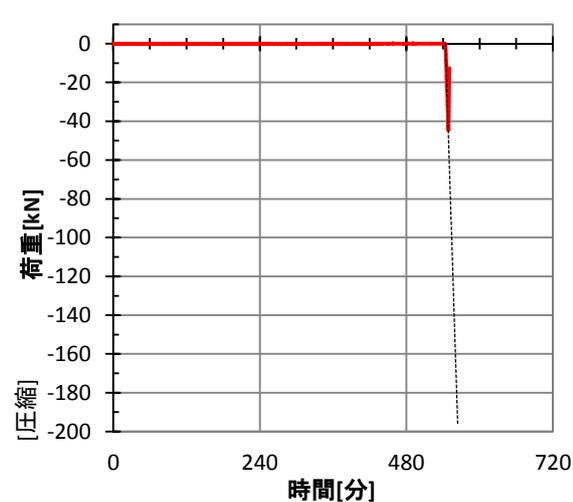
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40A-800-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：800℃  
 実施日：2014/11/26

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：393日 試験体番号：40-33  
 寸法：φ75.0×149.8mm  
 重量：[実験前] 1516.5gf (重量減少率)  
           [実験後] 1398.9gf (7.75%)



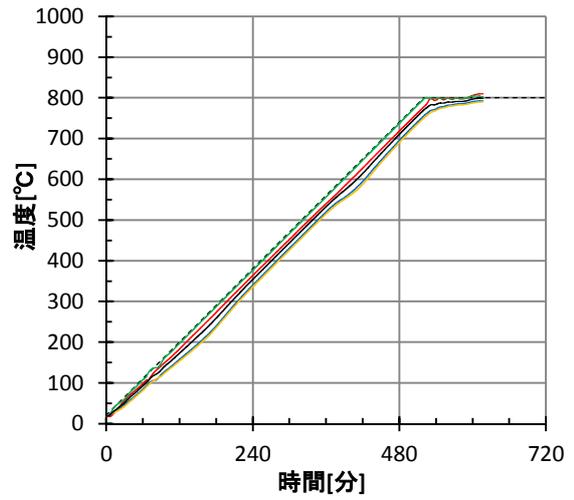
[実験前]



[実験後]

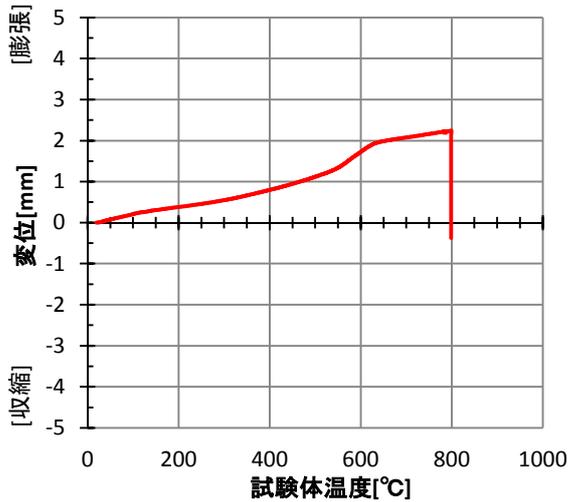
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



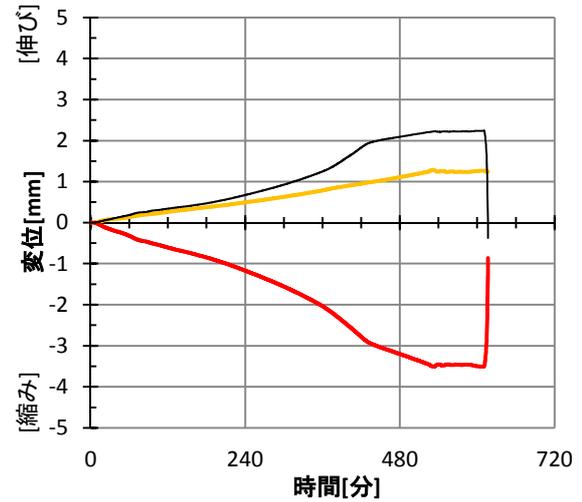
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



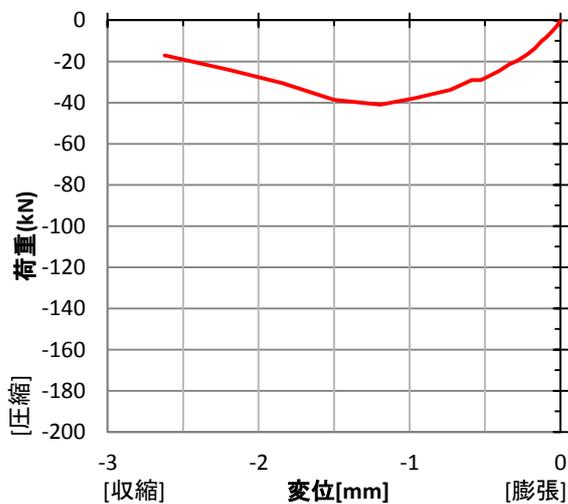
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



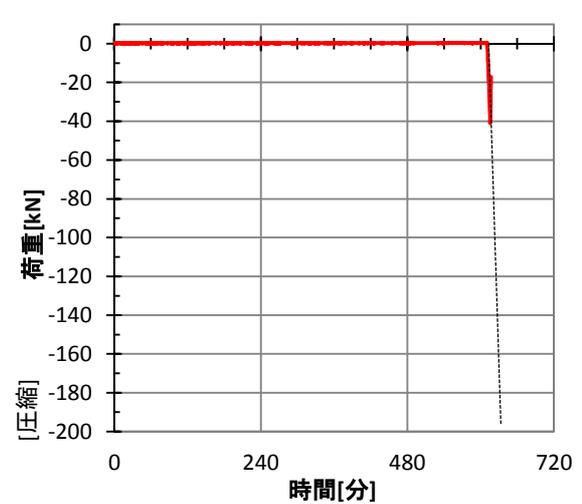
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-40D-800-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：800℃  
 実施日：2014/11/13

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：380日 試験体番号：40-31  
 寸法：φ75.1×149.7mm  
 重量：[実験前] 1470.2gf (重量減少率)  
 [実験後] 1398.1gf (4.90%)



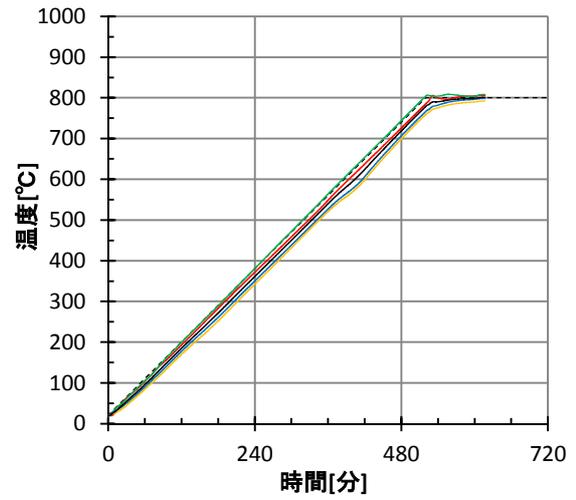
[実験前]



[実験後]

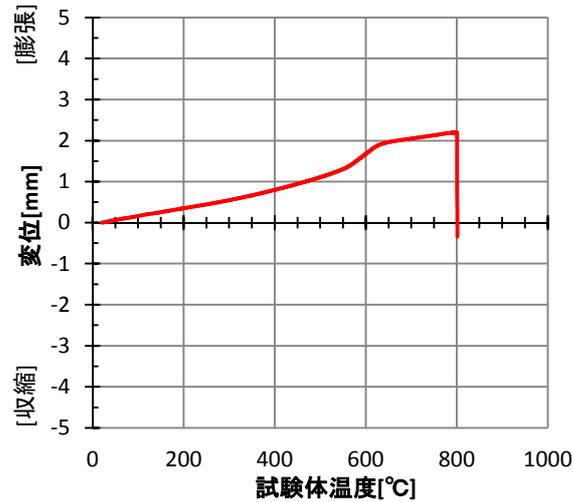
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



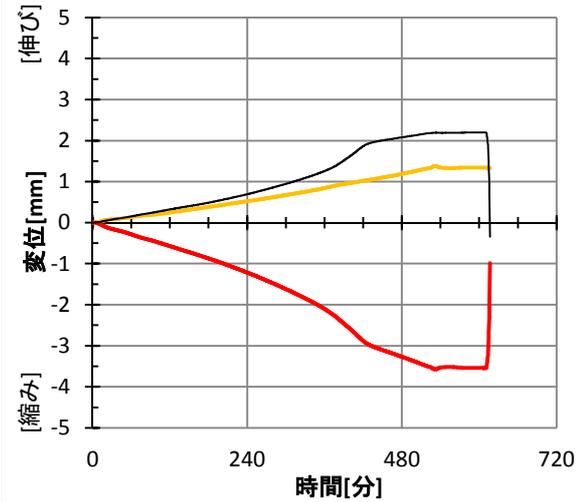
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



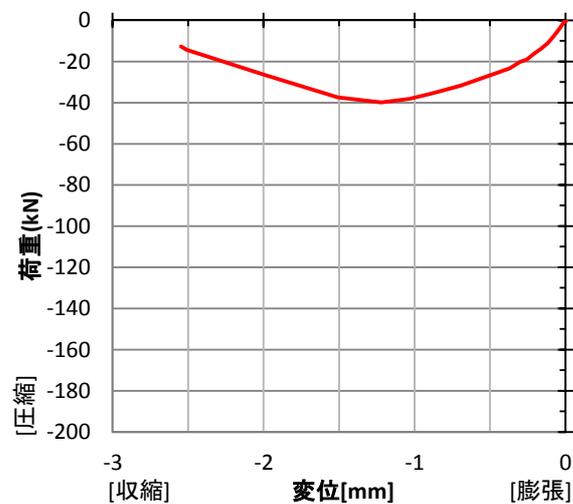
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



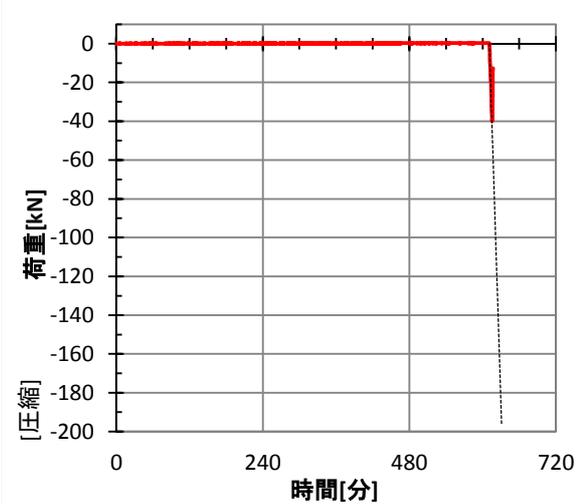
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-50A-800-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：800℃  
 実施日：2014/11/6

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：373日 試験体番号：50-33  
 寸法：φ75.5×150.3mm  
 重量：[実験前] 1514.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1408.5gf (6.99%)



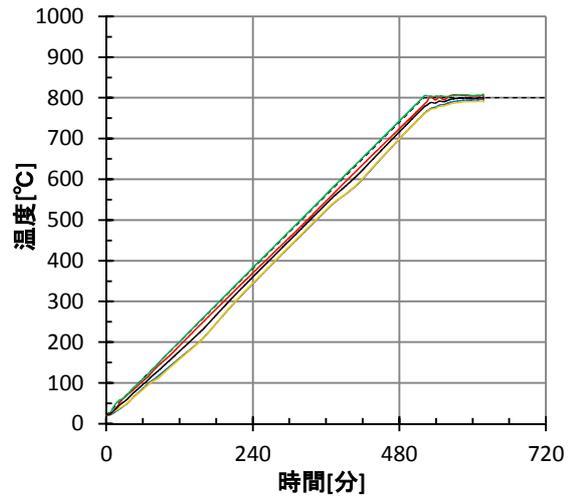
[実験前]



[実験後]

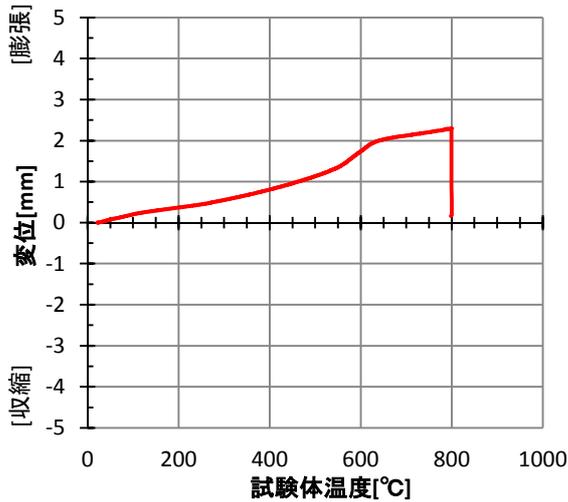
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



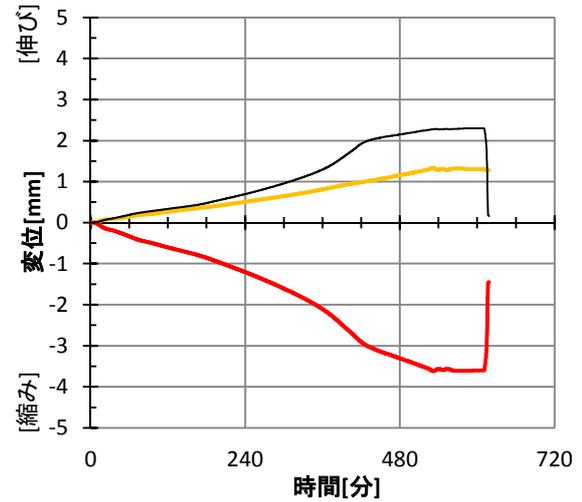
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



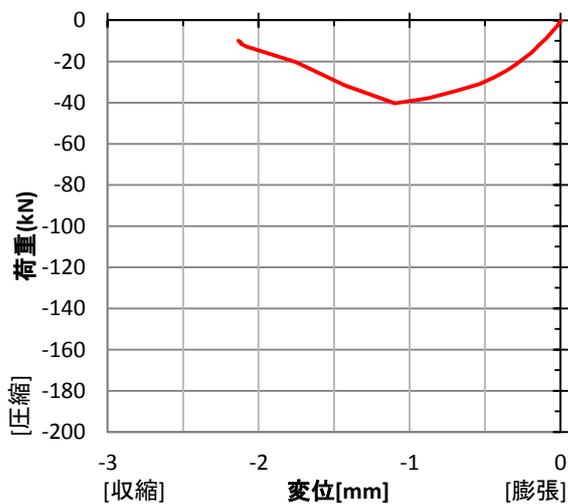
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



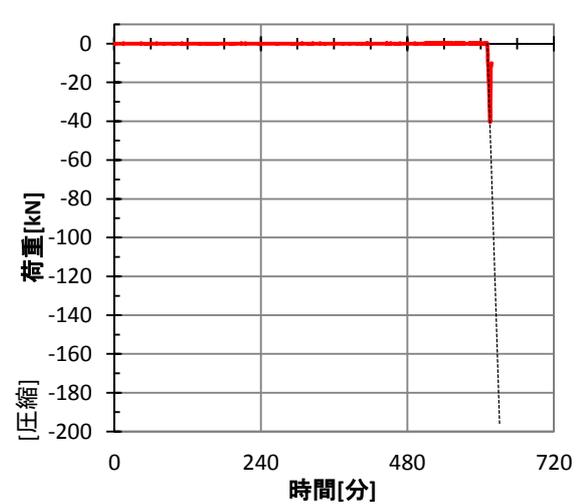
荷重-変形 関係 [載荷後]

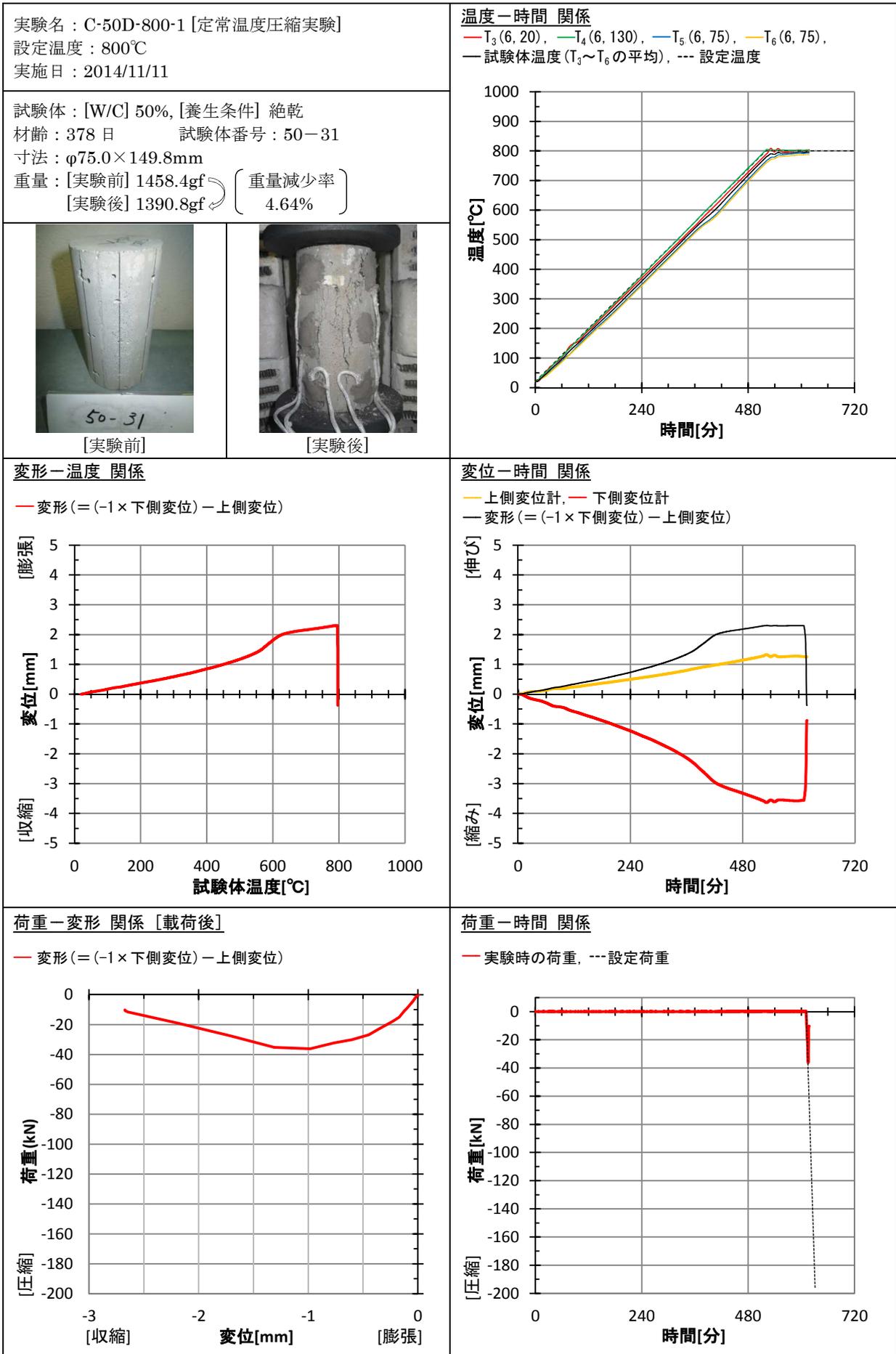
— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重





実験名：C-65A-800-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：800℃  
 実施日：2014/11/5

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：377日 試験体番号：65-51  
 寸法：φ74.9×150.7mm  
 重量：[実験前] 1485.6gf (重量減少率)  
           [実験後] 1386.5gf (6.67%)



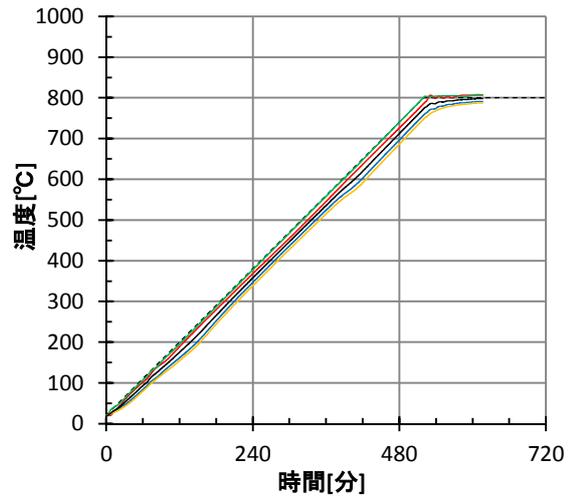
[実験前]



[実験後]

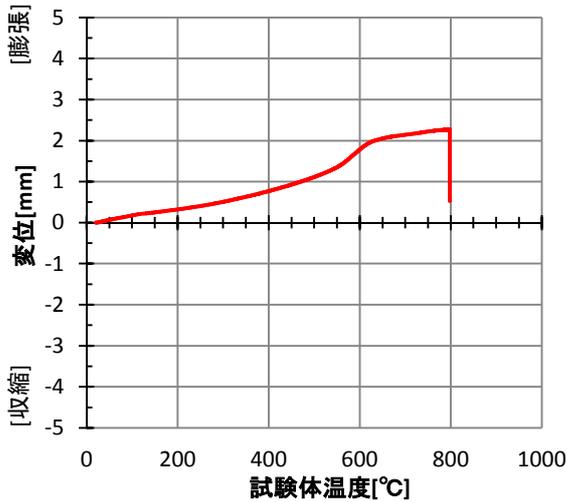
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



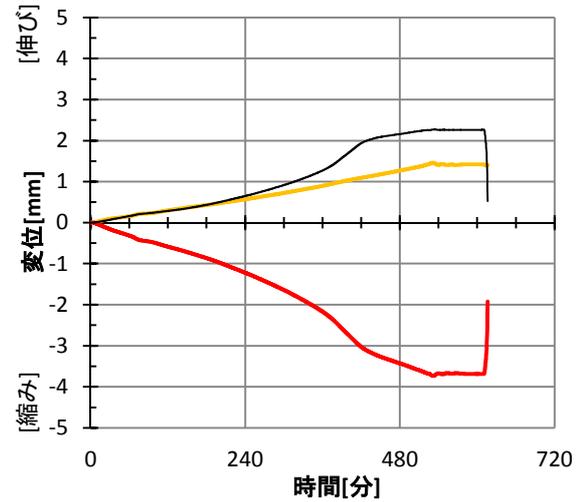
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



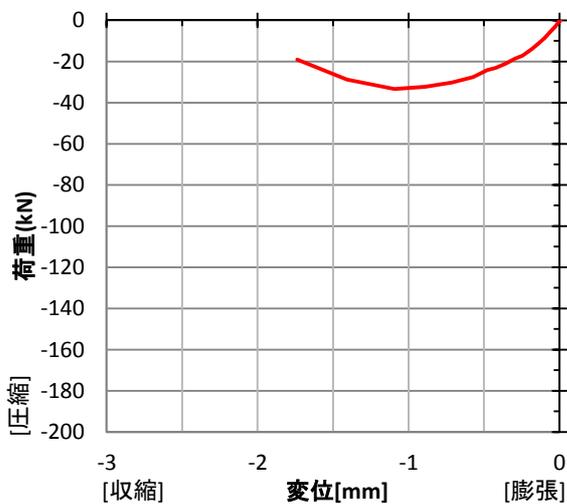
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



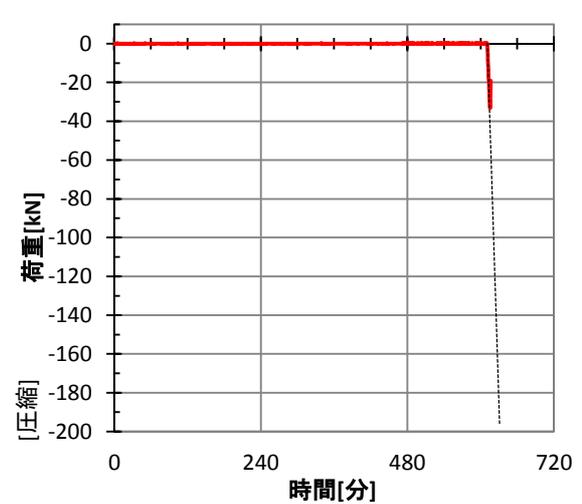
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65D-800-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：800℃  
 実施日：2014/11/10

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：382日 試験体番号：65-47  
 寸法：φ74.9×151.0mm  
 重量：[実験前] 1442.1gf (重量減少率)  
           [実験後] 1387.5gf (3.79%)



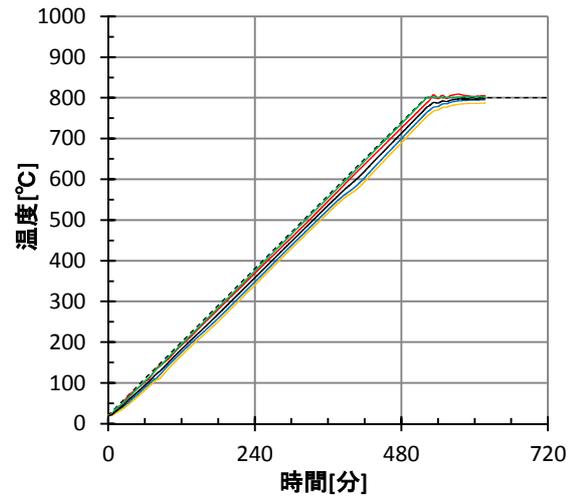
[実験前]



[実験後]

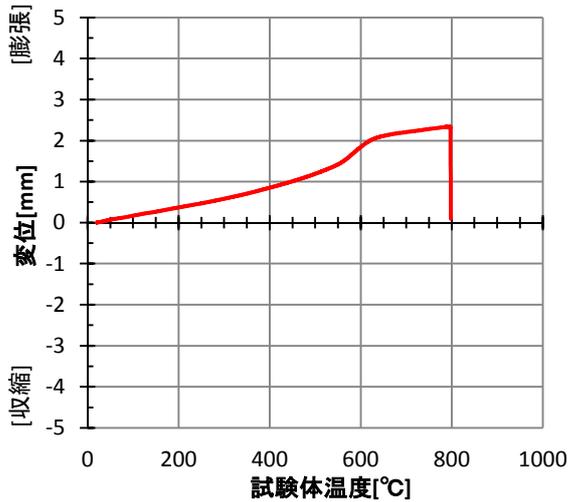
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



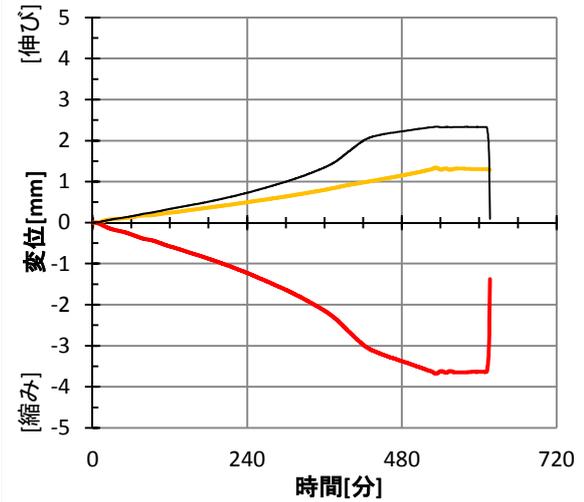
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



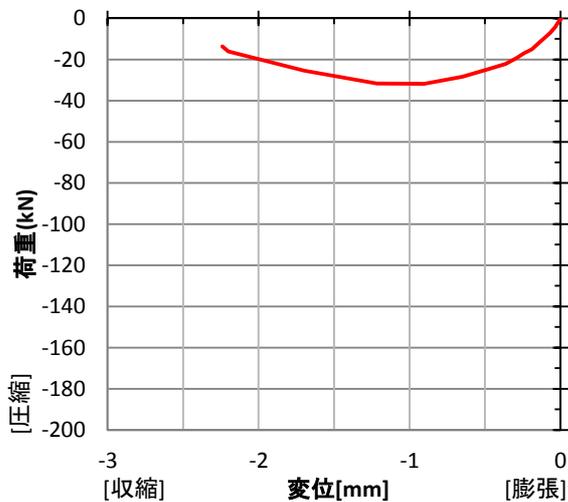
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



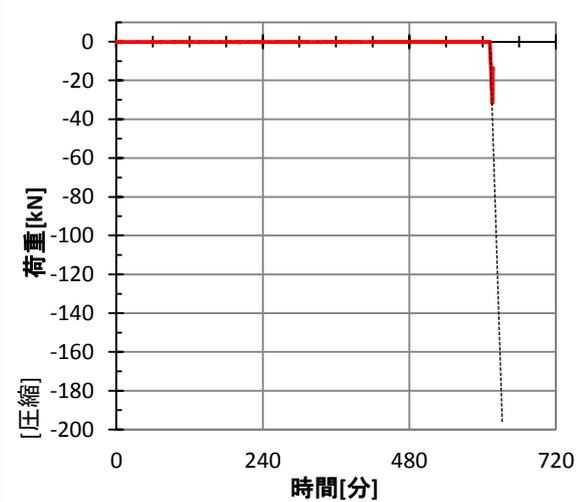
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：C-65S-800-1 [定常温度圧縮実験]  
 設定温度：800℃  
 実施日：2014/11/25

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：397日 試験体番号：65-60  
 寸法：φ75.2×149.3mm  
 重量：[実験前] 1524.6gf (重量減少率)  
           [実験後] 1377.8gf (9.63%)



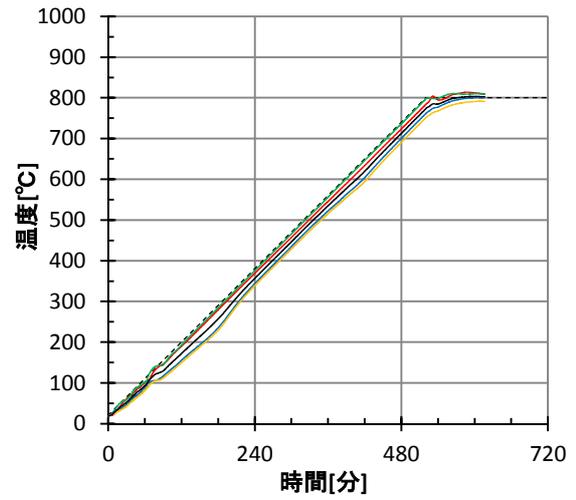
[実験前]



[実験後]

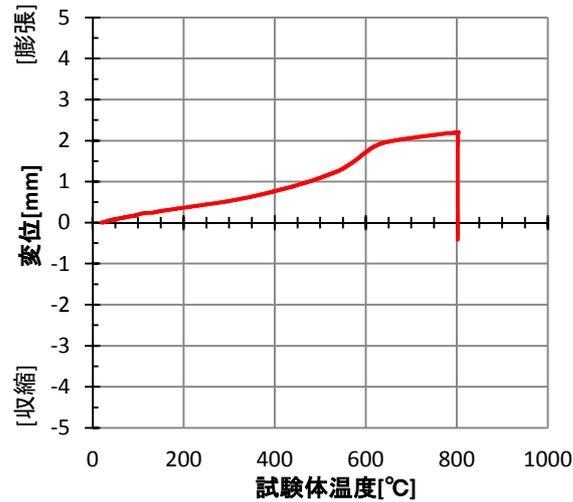
温度-時間 関係

—  $T_3$  (6, 20), —  $T_4$  (6, 130), —  $T_5$  (6, 75), —  $T_6$  (6, 75),  
 — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), --- 設定温度



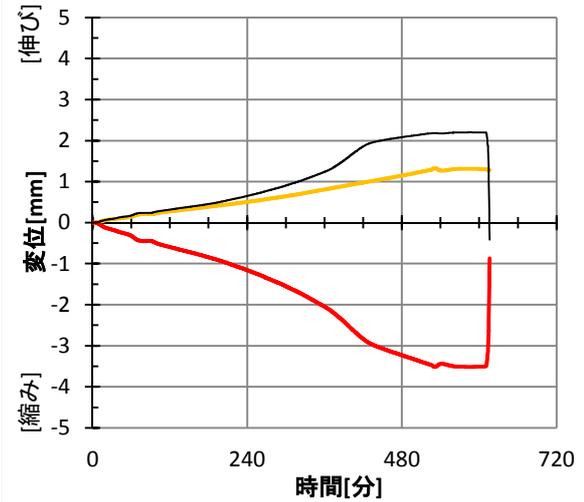
変形-温度 関係

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



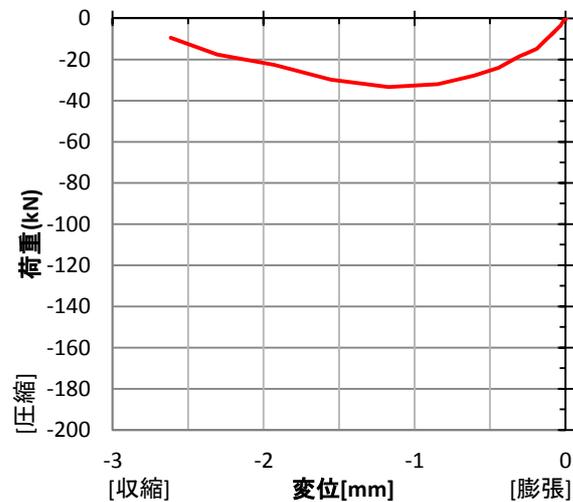
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



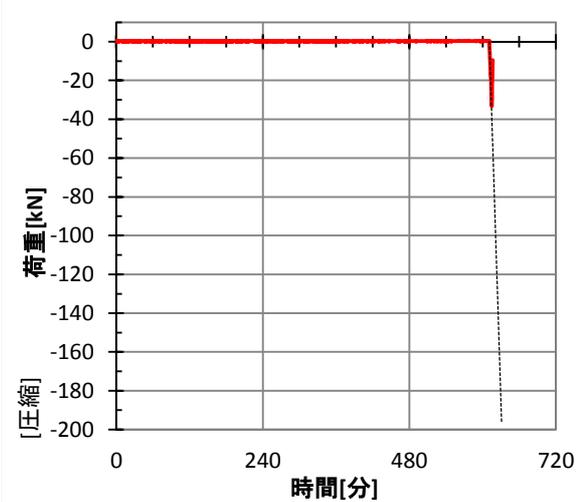
荷重-変形 関係 [載荷後]

— 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重

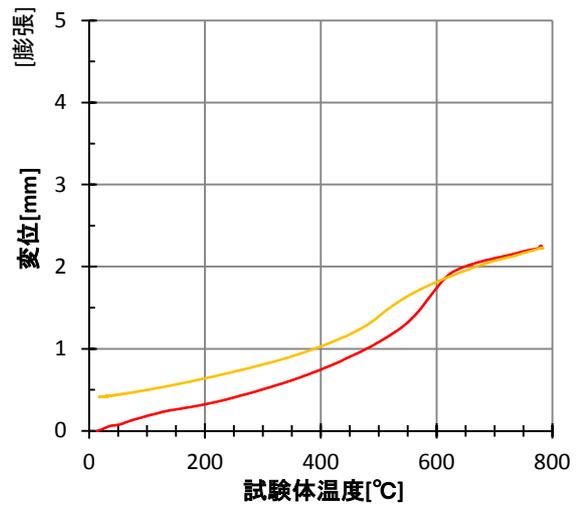


実験名：TD-65A-1 [温度分布測定実験]  
 実施日：2015/2/2

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：466日 試験体番号：65-63  
 寸法：φ74.9×150.4mm  
 重量：[実験前] 1472.6gf (重量減少率)  
           [実験後] 1377.8gf (6.44%)

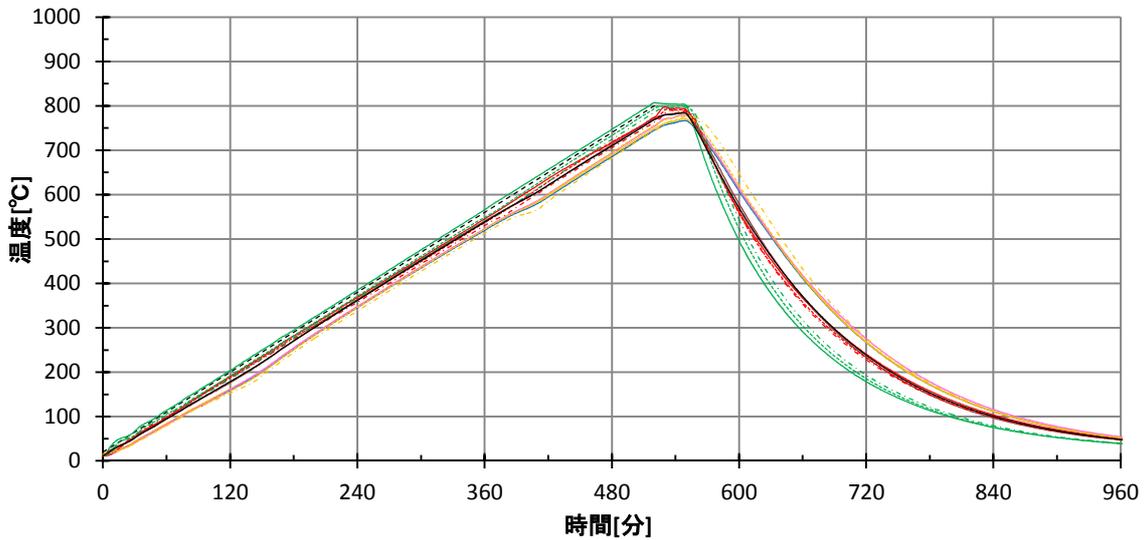


変形-温度 関係  
 —加熱時, —放冷時



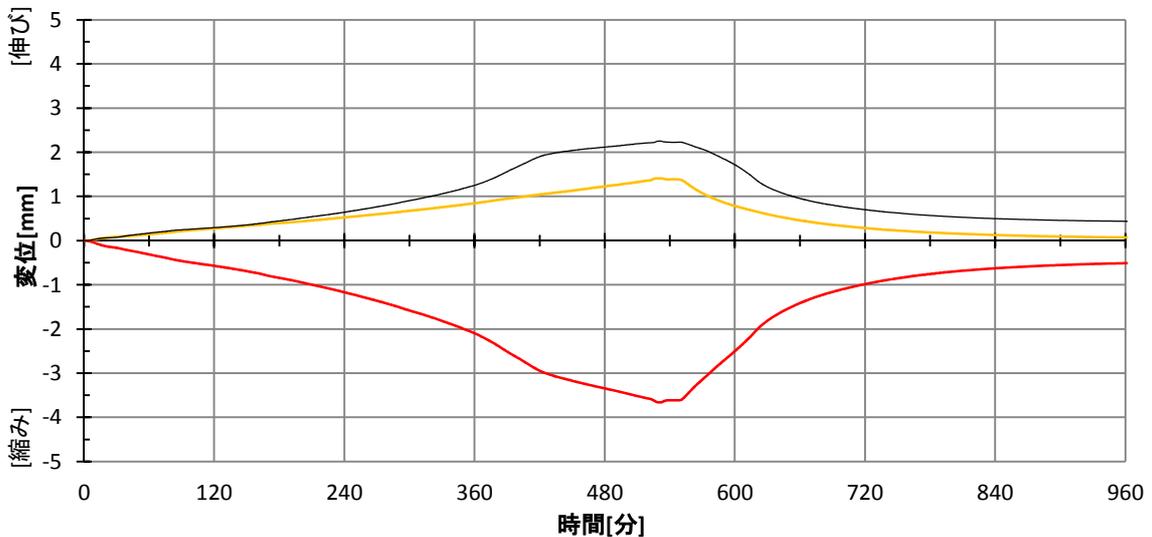
温度-時間 関係

— $T_3(6, 20)$ , — $T_4(6, 130)$ , — $T_5(6, 75)$ , — $T_6(6, 75)$ , — $T_7(6, 45)$ , — $T_8(6, 105)$ ,  
 - - - $T_9(18.8, 20)$ , - - - $T_{10}(18.8, 75)$ , - - - $T_{11}(18.8, 130)$ , - - - $T_{12}(37.5, 20)$ , - - - $T_{13}(37.5, 75)$ ,  
 - - - $T_{14}(37.5, 130)$ , — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), - - - 設定温度



変位-時間 関係

—上側変位計, —下側変位計, 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位)



実験名：TD-65D-1 [温度分布測定実験]  
 実施日：2015/2/6

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：470日 試験体番号：65-64  
 寸法：φ75.0×149.7mm  
 重量：[実験前] 1442.6gf (重量減少率)  
 [実験後] 1389.0gf (3.72%)

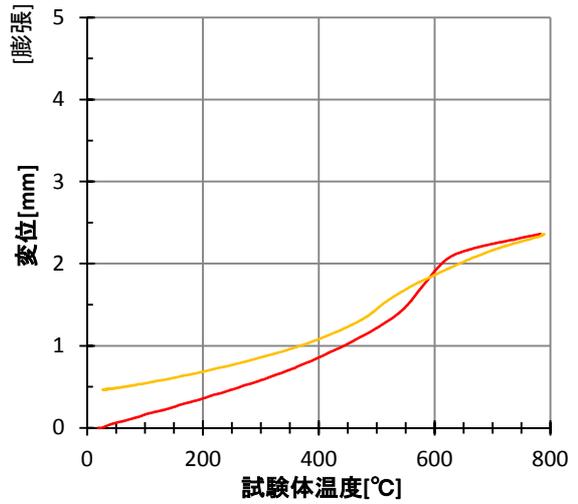


[実験前]



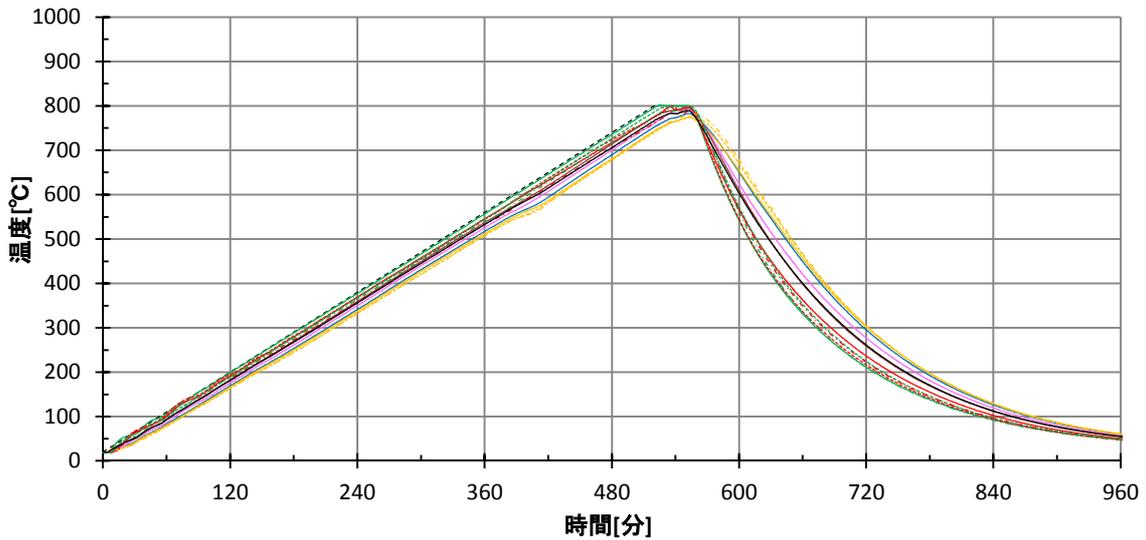
[実験後]

変形-温度 関係  
 [鉛直方向] — 加熱時, — 放冷時



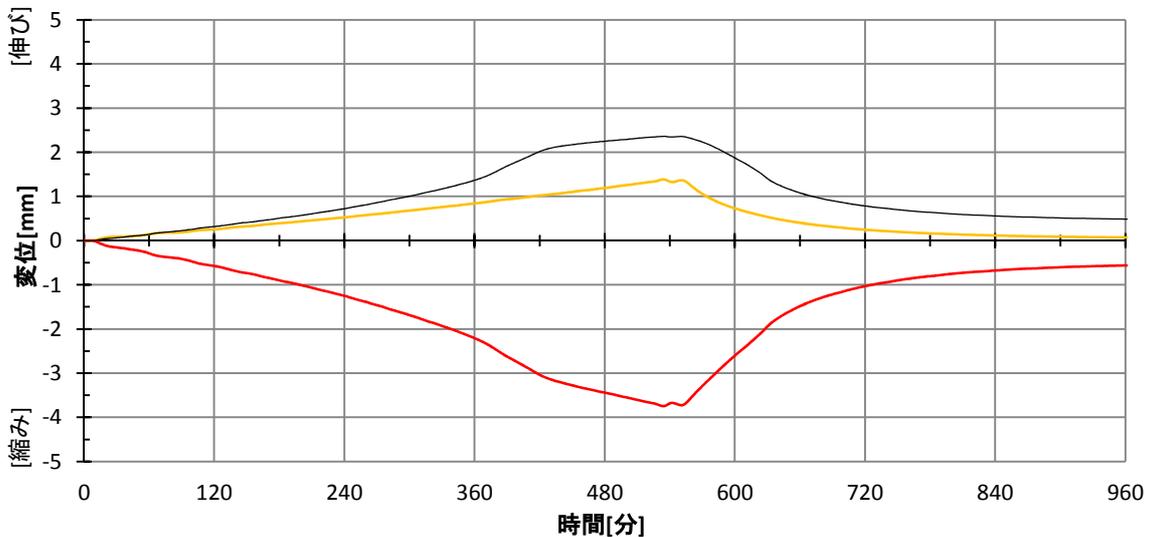
温度-時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(6, 75)$ , —  $T_7(6, 45)$ , —  $T_8(6, 105)$ ,  
 - - -  $T_9(18.8, 20)$ , - - -  $T_{10}(18.8, 75)$ , - - -  $T_{11}(18.8, 130)$ , - - -  $T_{12}(37.5, 20)$ , - - -  $T_{13}(37.5, 75)$ ,  
 - - -  $T_{14}(37.5, 130)$ , — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), - - - 設定温度



変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計, — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



実験名：TD-65S-1 [温度分布測定実験]  
 実施日：2015/2/4

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：468日 試験体番号：65-67  
 寸法：—  
 重量：[実験前] 1520.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1379.2gf (9.29%)

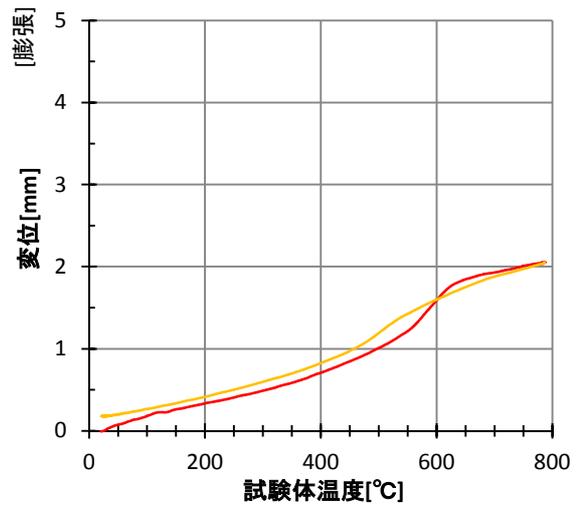


[実験前]



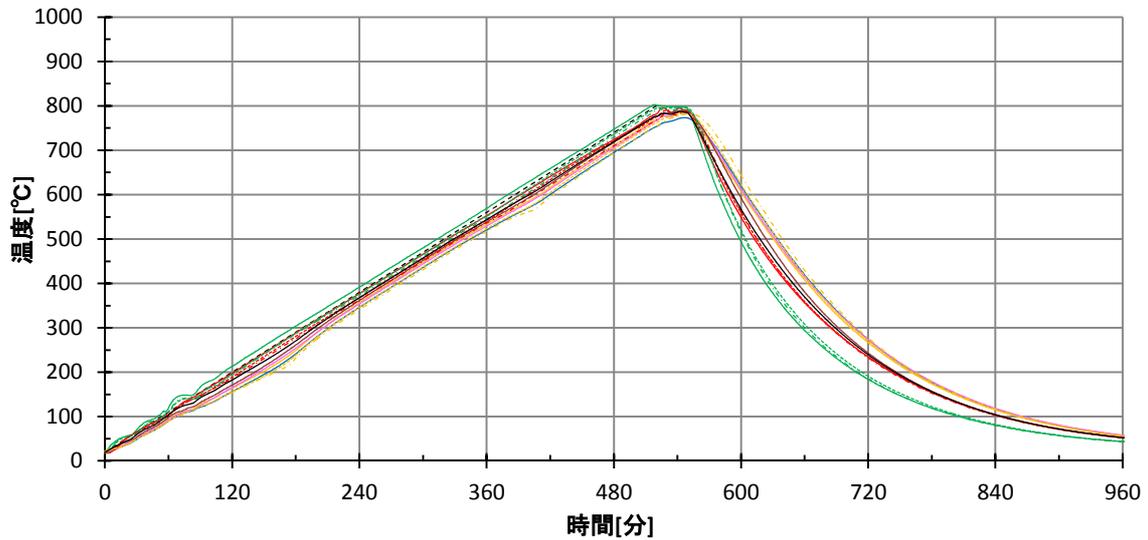
[実験後]

変形-温度 関係  
 [鉛直方向] — 加熱時, — 放冷時



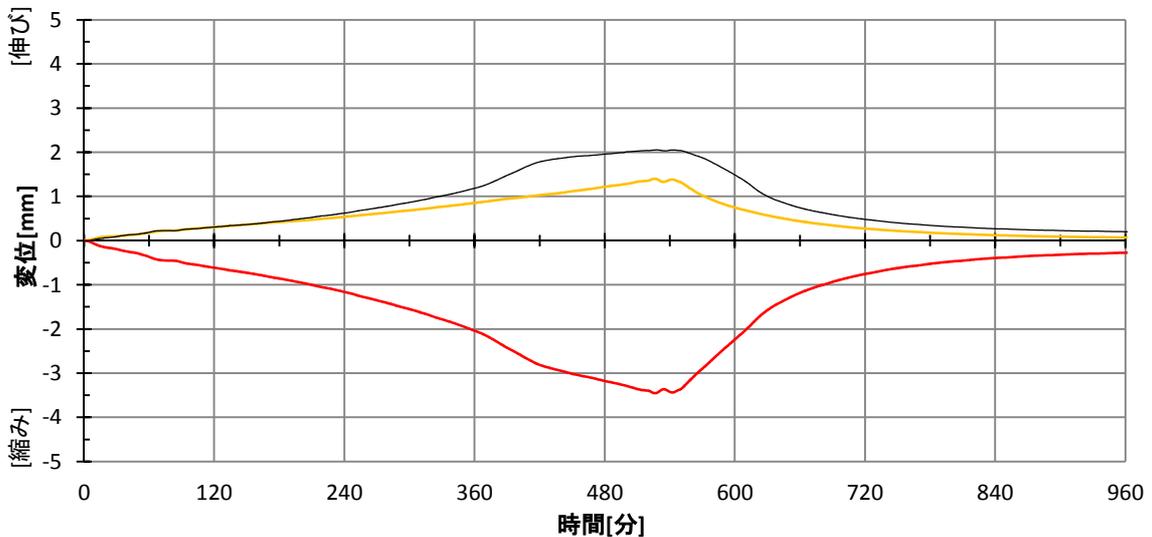
温度-時間 関係

—  $T_3(6, 20)$ , —  $T_4(6, 130)$ , —  $T_5(6, 75)$ , —  $T_6(6, 75)$ , —  $T_7(6, 45)$ , —  $T_8(6, 105)$ ,  
 - - -  $T_9(18.8, 20)$ , - - -  $T_{10}(18.8, 75)$ , - - -  $T_{11}(18.8, 130)$ , - - -  $T_{12}(37.5, 20)$ , - - -  $T_{13}(37.5, 75)$ ,  
 - - -  $T_{14}(37.5, 130)$ , — 試験体温度 ( $T_3 \sim T_6$  の平均), - - - 設定温度



変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計, — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)

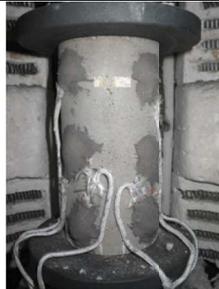


実験名：T-40A-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 4.92N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/14

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：350日 試験体番号：40-25  
 寸法：φ75.0×148.5mm  
 重量：[実験前] 1508.2gf (重量減少率)  
 [実験後] 1394.9gf (7.51%)



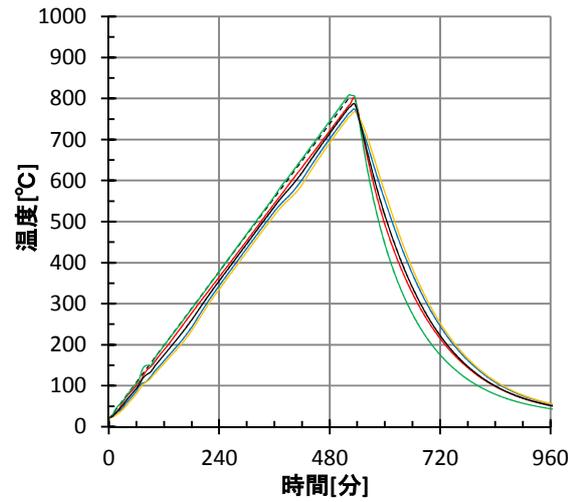
[実験前]



[実験後]

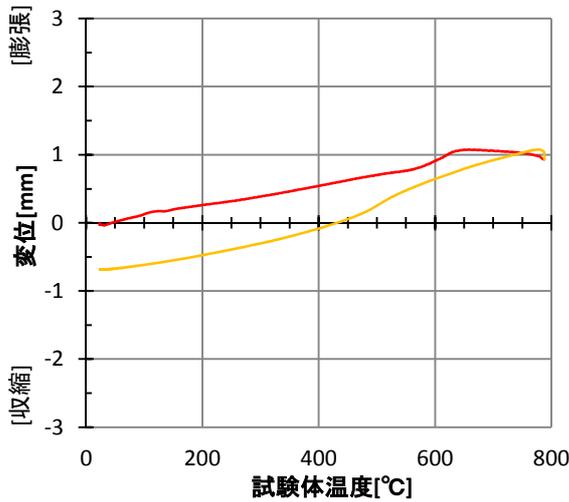
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



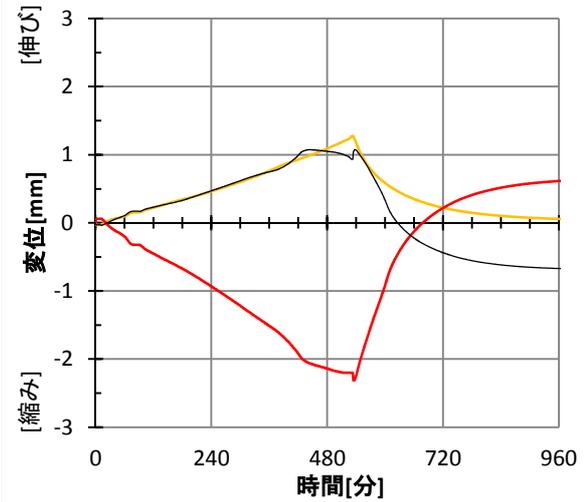
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



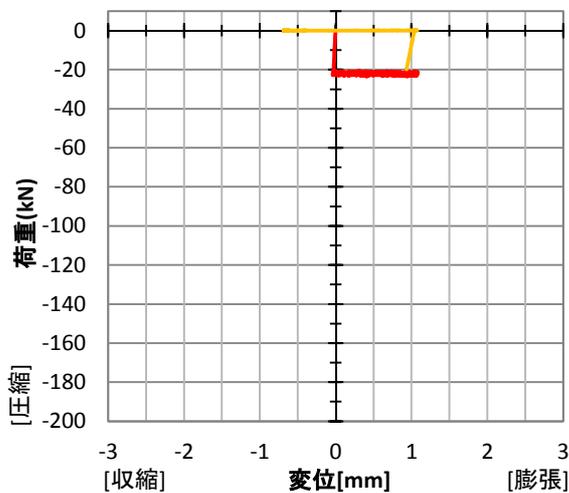
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



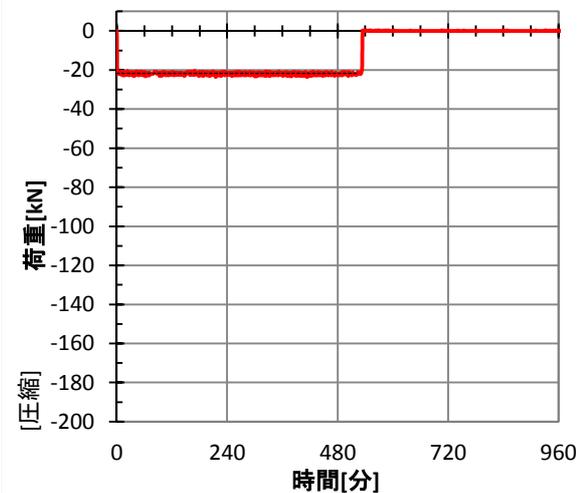
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40D-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 4.92N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/25

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：361日 試験体番号：40-26  
 寸法：φ75.2×148.4mm  
 重量：[実験前] 1470.3gf (重量減少率)  
 [実験後] 1409.4gf (4.14%)



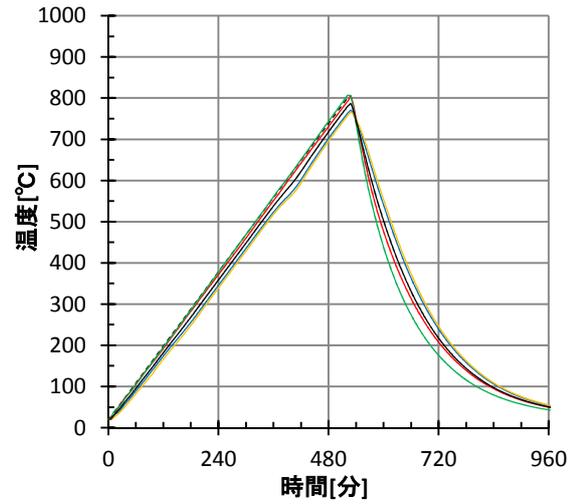
[実験前]



[実験後]

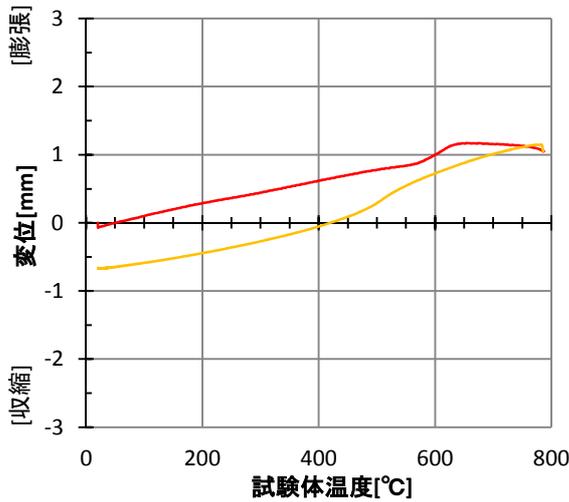
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



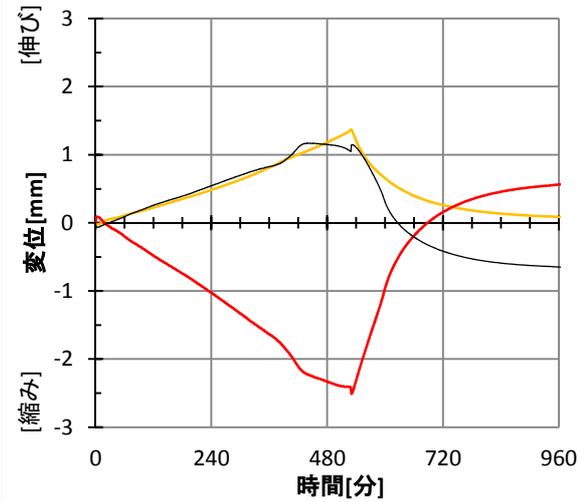
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



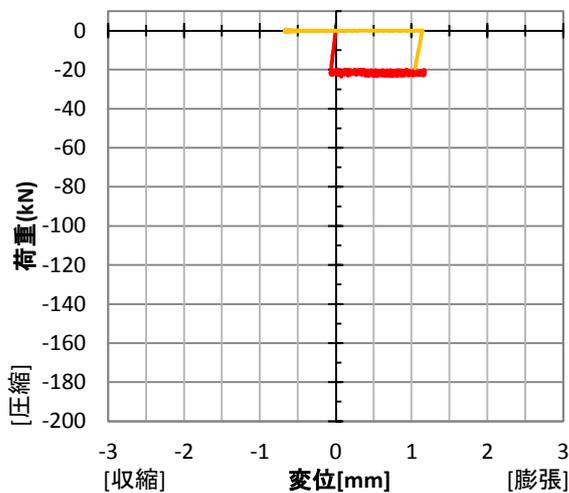
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



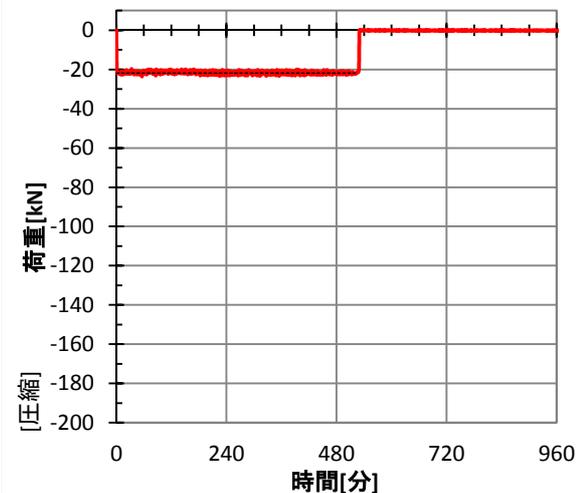
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-50A-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 3.70N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/12

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：348日 試験体番号：50-25  
 寸法：φ75.1×150.4mm  
 重量：[実験前] 1500.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1397.6gf (6.83%)



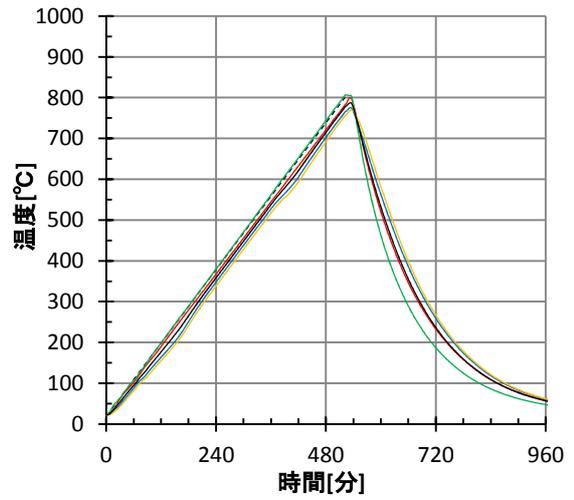
[実験前]



[実験後]

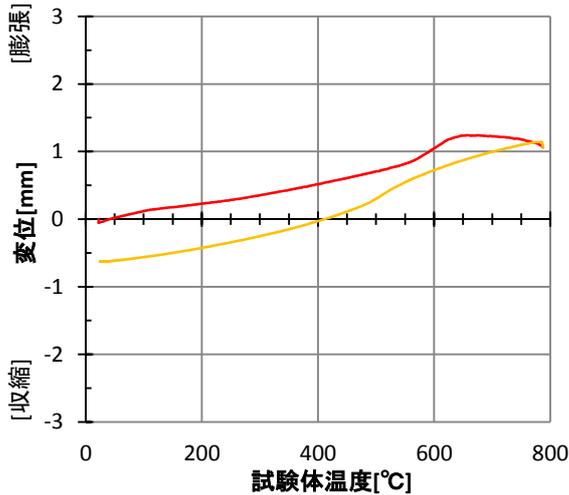
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



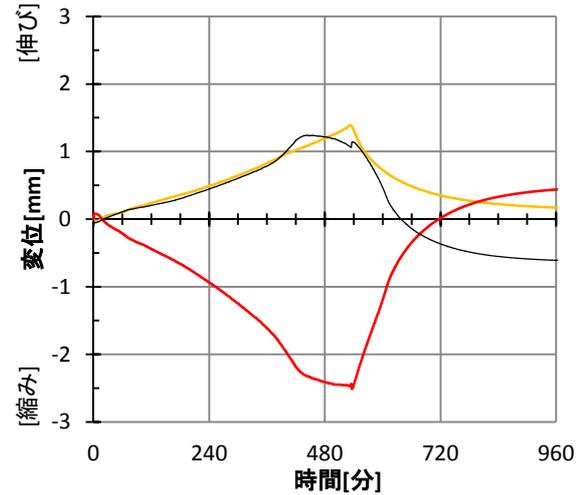
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



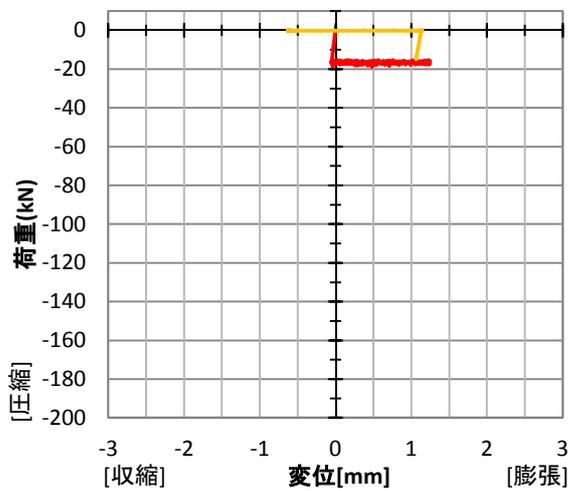
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



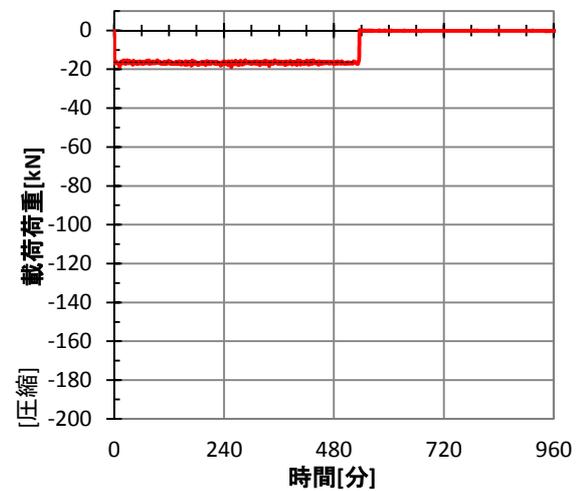
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-50D-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 3.70N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/23

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：359日 試験体番号：50-26  
 寸法：φ75.2×148.8mm  
 重量：[実験前] 1458.5gf (重量減少率)  
 [実験後] 1399.0gf (4.08%)



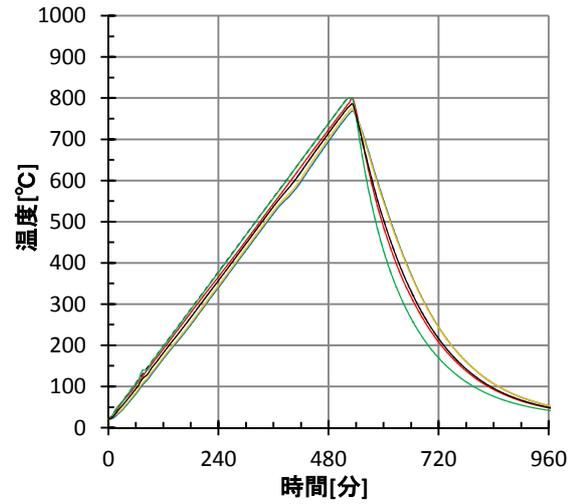
[実験前]



[実験後]

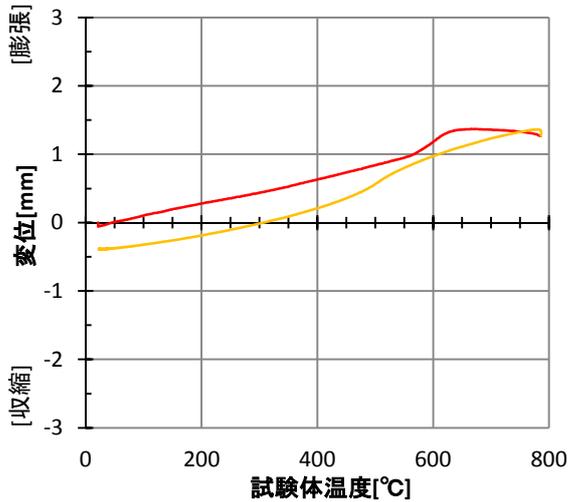
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



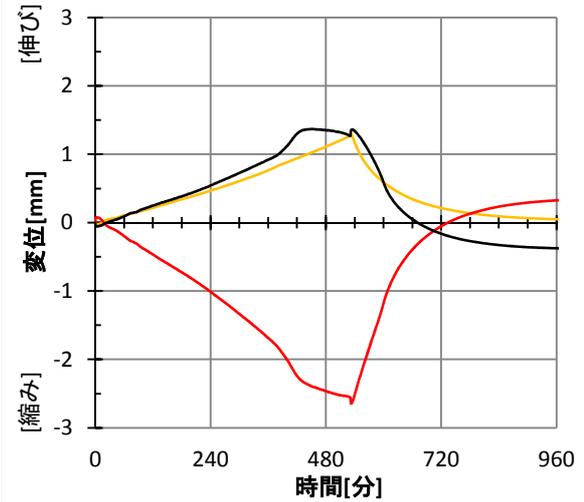
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



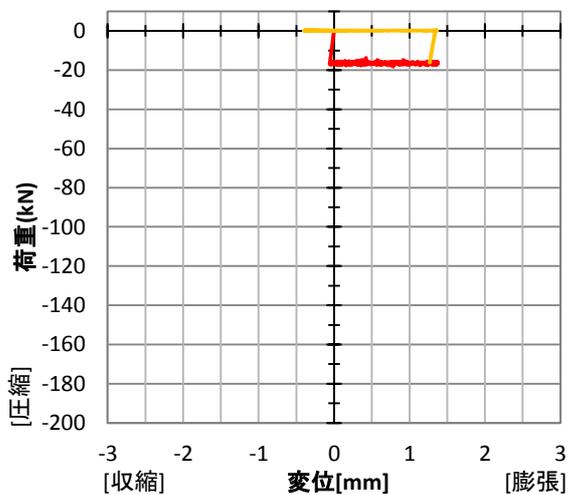
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



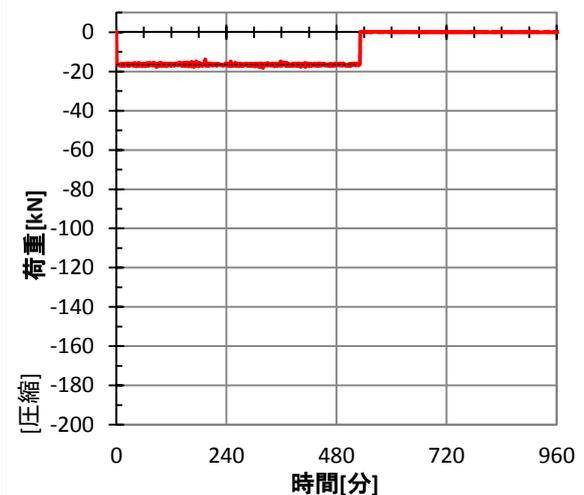
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65A-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 2.65N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/9

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：350日 試験体番号：65-39  
 寸法：φ75.0×149.9mm  
 重量：[実験前] 1475.6gf (重量減少率)  
 [実験後] 1386.3gf (6.05%)



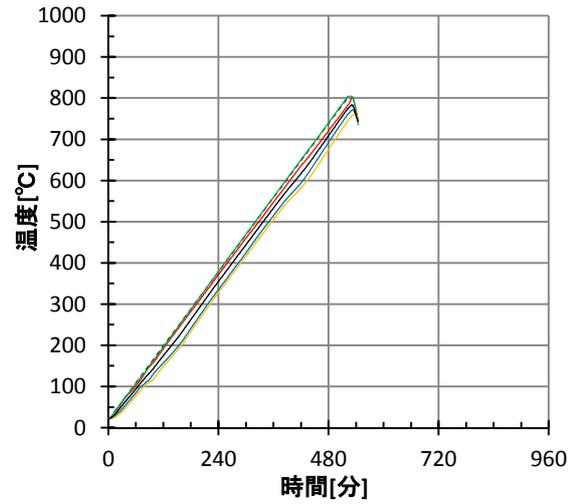
[実験前]



[実験後]

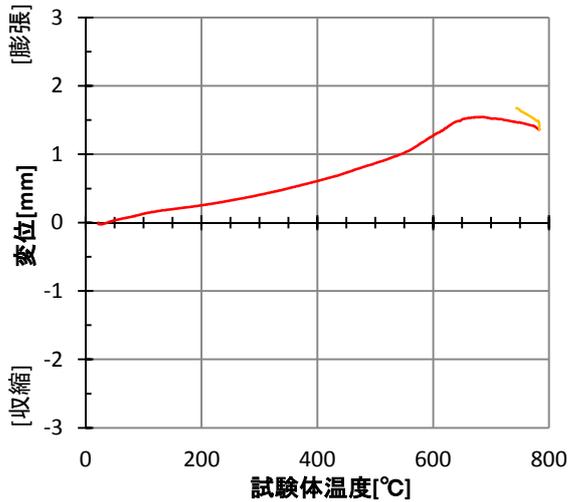
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



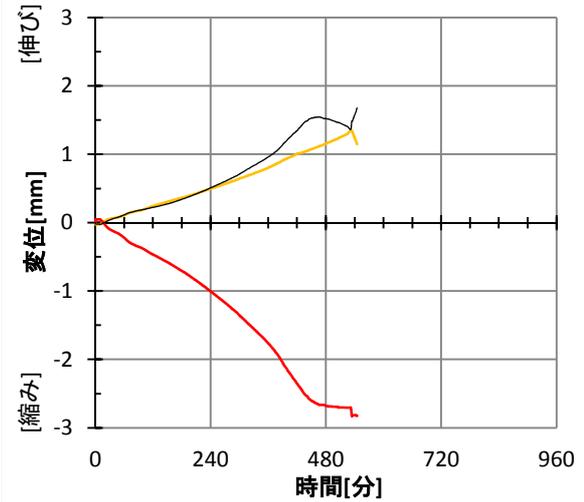
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



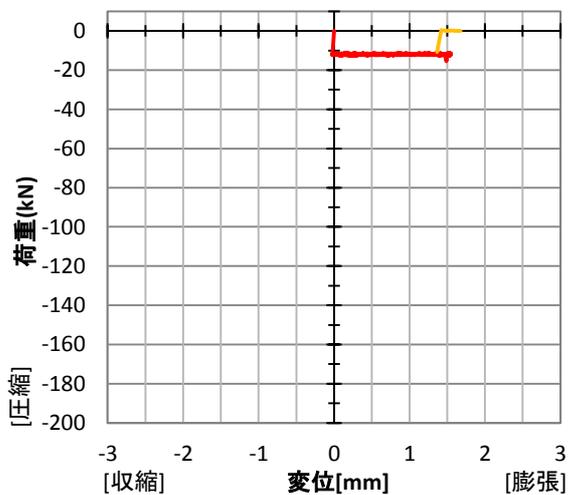
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



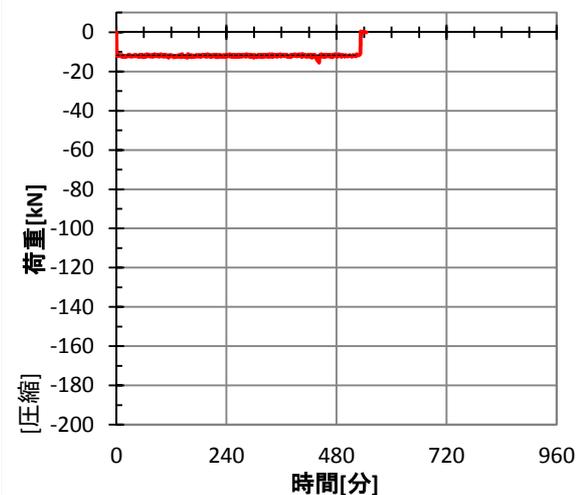
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65D-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 2.65N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/22

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：363日 試験体番号：65-40  
 寸法：φ75.1×149.9mm  
 重量：[実験前] 1450.9gf (重量減少率)  
 [実験後] 1395.1gf (3.85%)



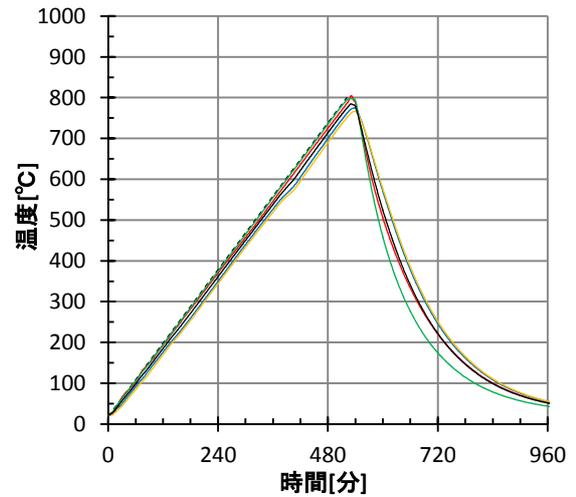
[実験前]



[実験後]

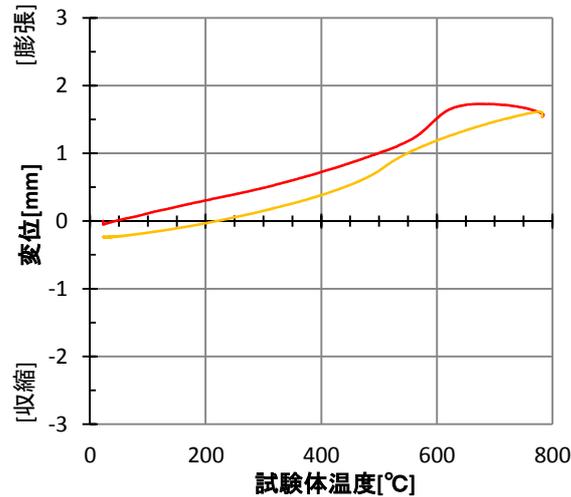
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



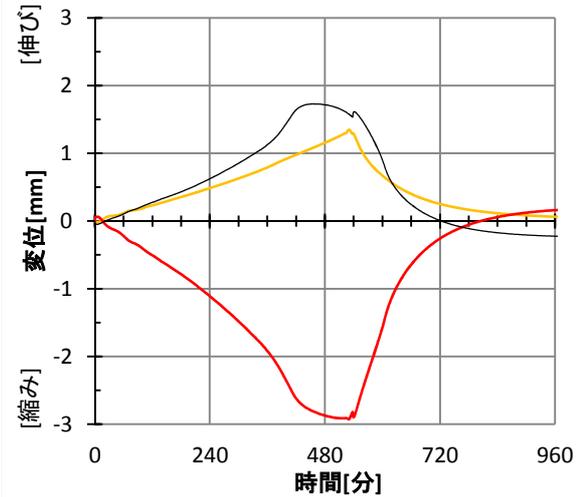
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



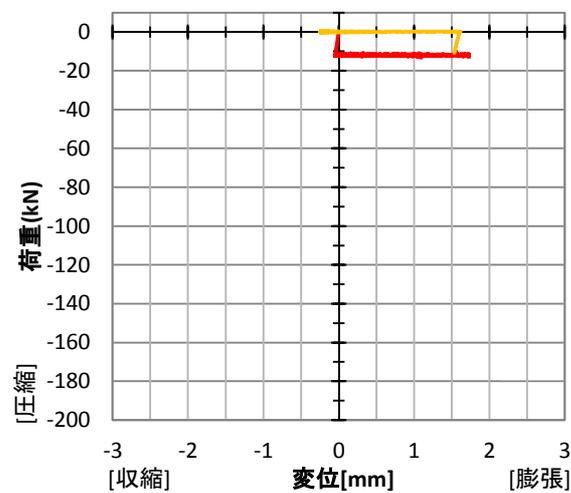
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



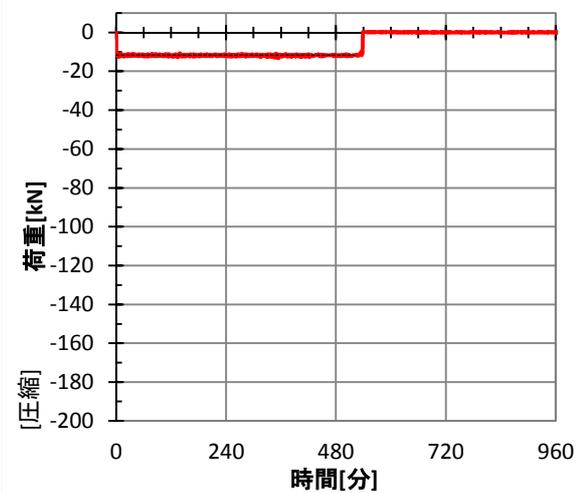
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65S-10-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.1 (設定応力 2.65N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/13

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：354日 試験体番号：65-44  
 寸法：φ75.4×150.0mm  
 重量：[実験前] 1544.8gf (重量減少率)  
 [実験後] 1399.4gf (9.41%)



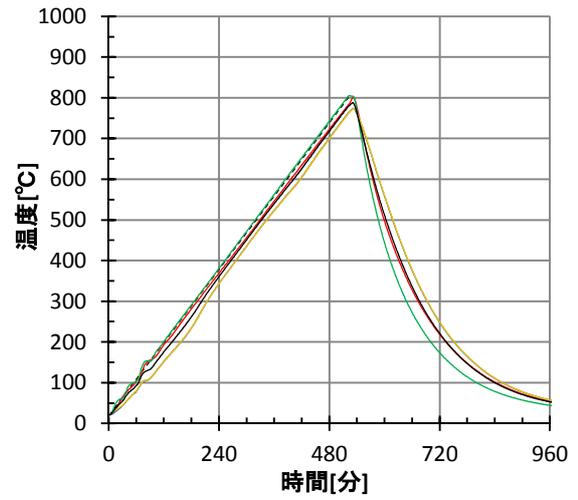
[実験前]



[実験後]

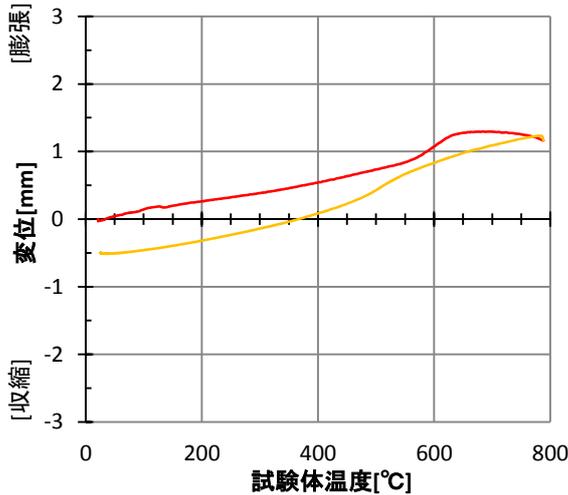
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



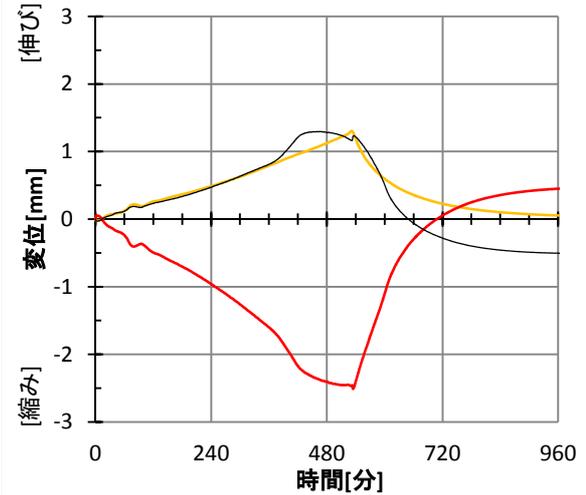
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



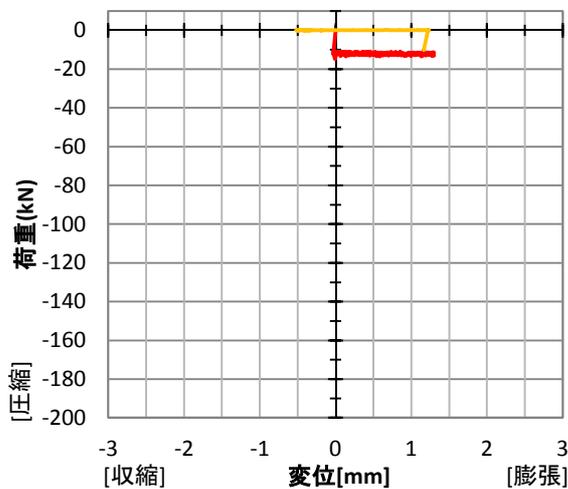
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



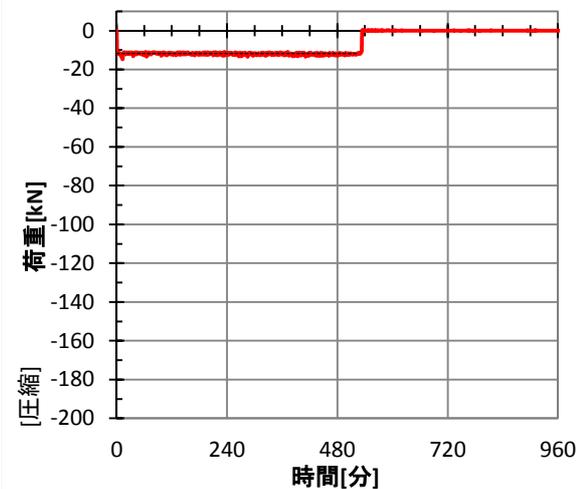
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40A-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 14.76N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/20

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：356日 試験体番号：40-29  
 寸法：φ75.6×149.1mm  
 重量：[実験前] 1531.1gf (重量減少率)  
           [実験後] 1416.2gf (7.50%)



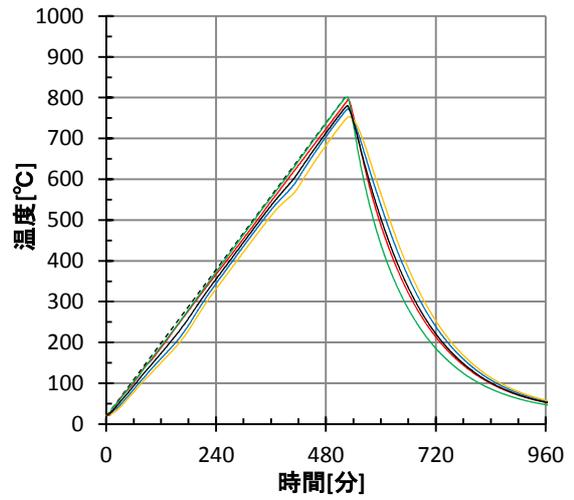
[実験前]



[実験後]

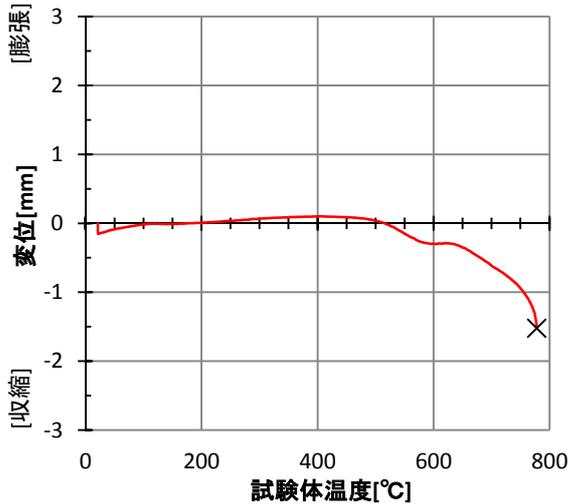
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



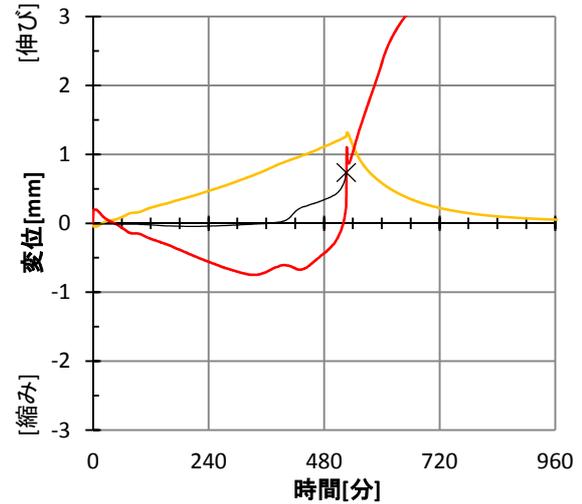
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



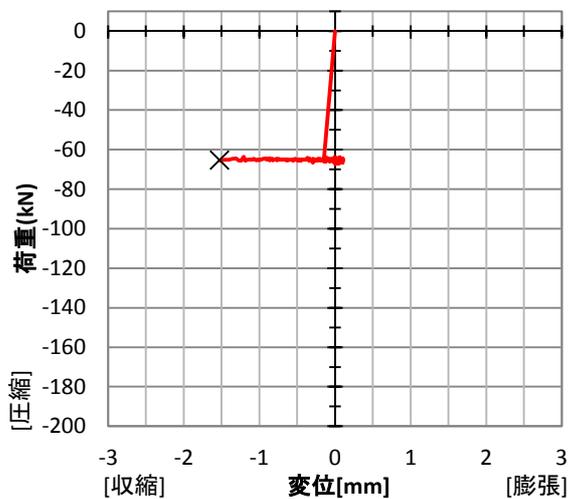
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



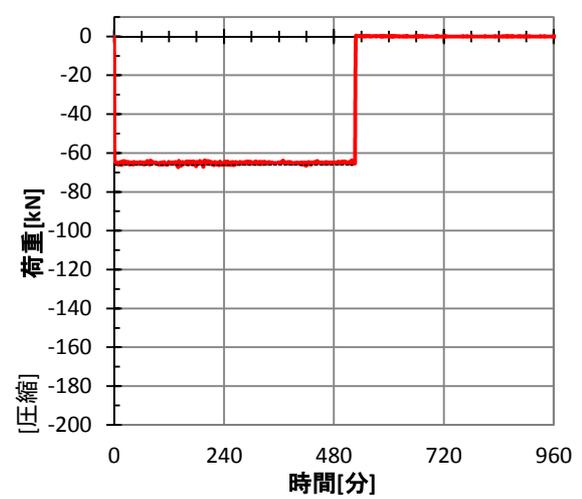
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



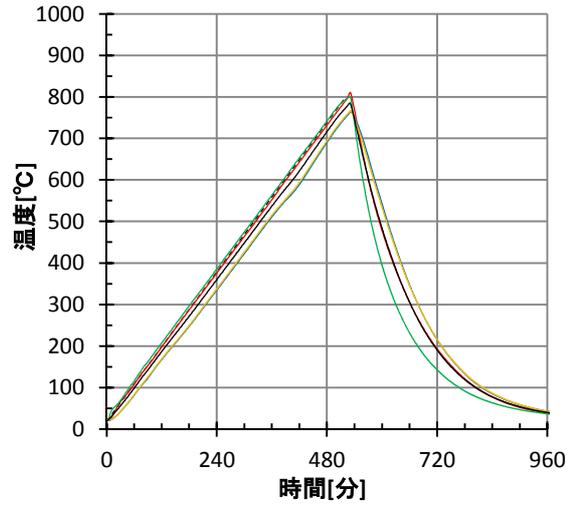
実験名：T-40D-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 14.76N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/30

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：366日 試験体番号：40-28  
 寸法：φ74.9×150.0mm  
 重量：[実験前] 1474.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1411.0gf (4.27%)



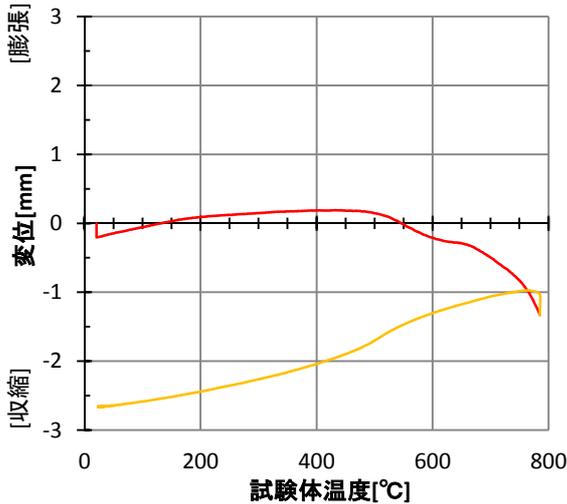
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



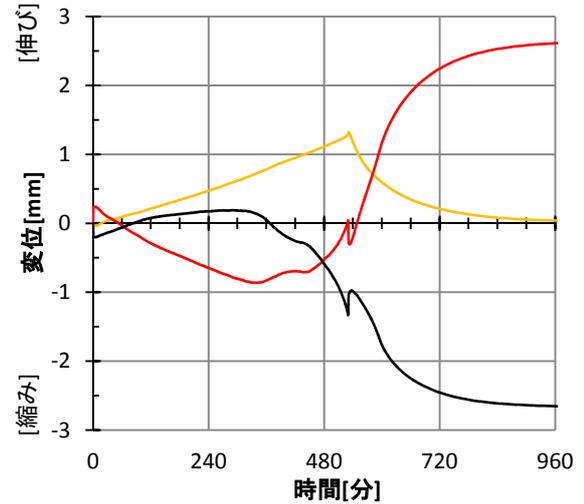
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



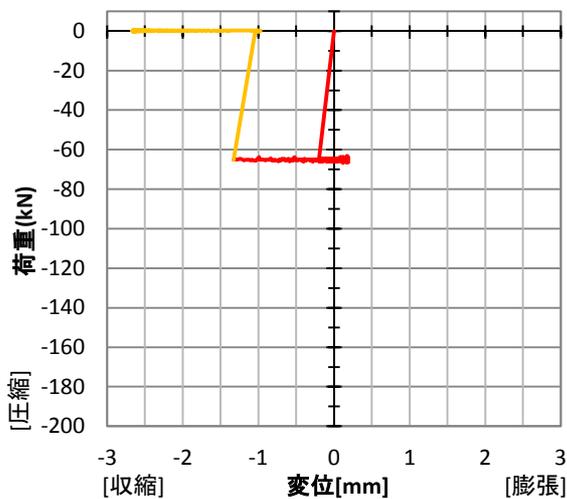
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



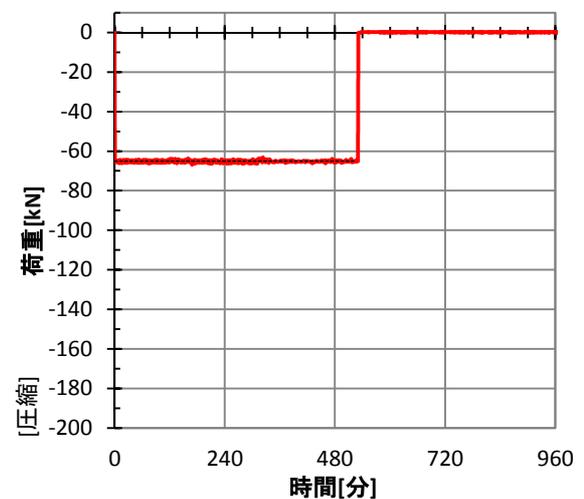
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-50A-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 11.10N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/19

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：355 日 試験体番号：50-29  
 寸法：φ75.0×148.4mm  
 重量：[実験前] 1486.0gf (重量減少率)  
           [実験後] 1391.4gf (6.37%)



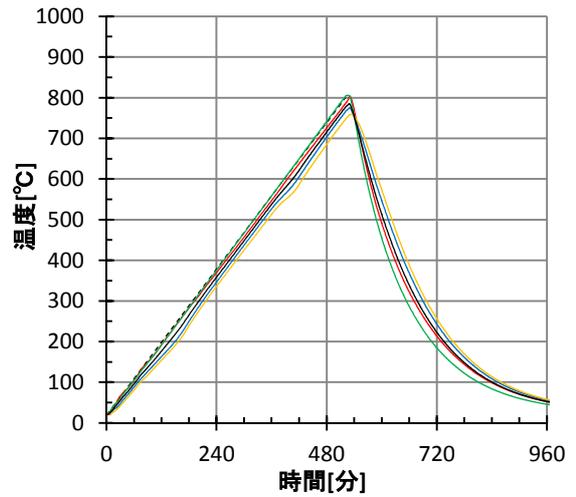
[実験前]



[実験後]

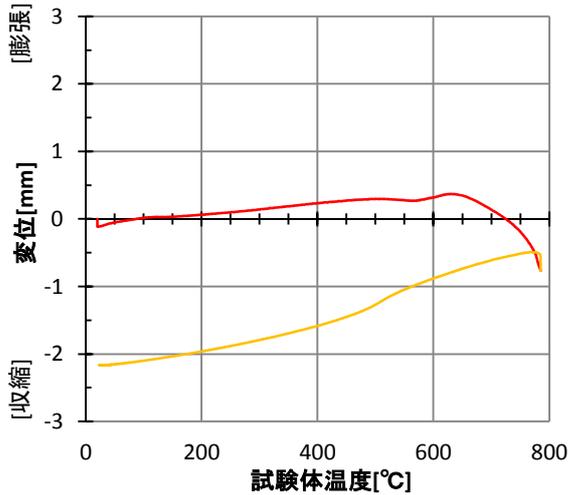
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



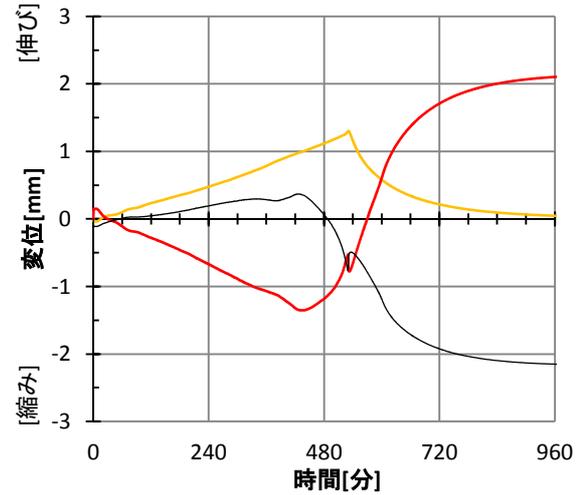
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



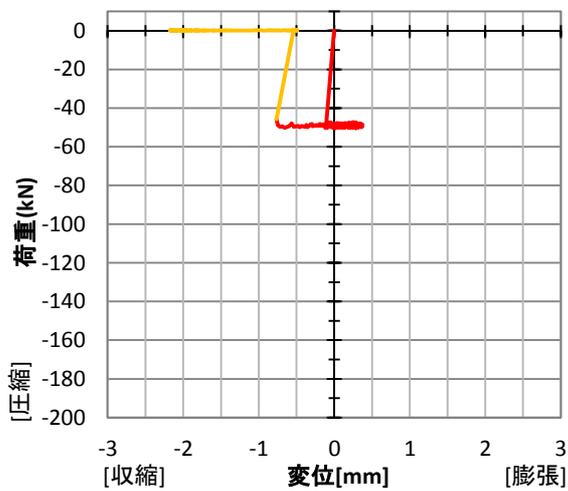
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



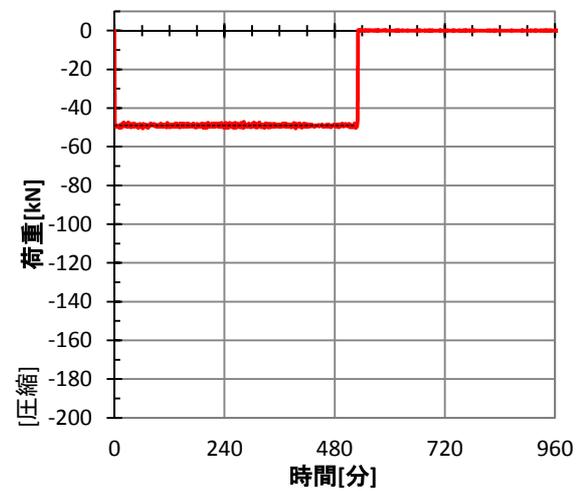
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-50D-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 11.10N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/24

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：391日 試験体番号：50-35  
 寸法：φ75.2×149.8mm  
 重量：[実験前] 1463.2gf (重量減少率)  
 [実験後] 1404.0gf (4.05%)



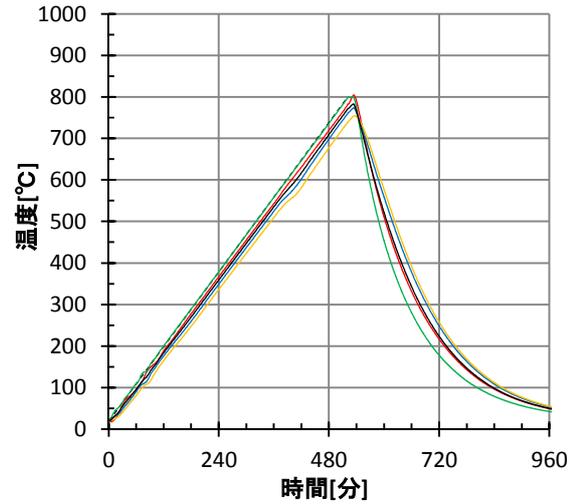
[実験前]



[実験後]

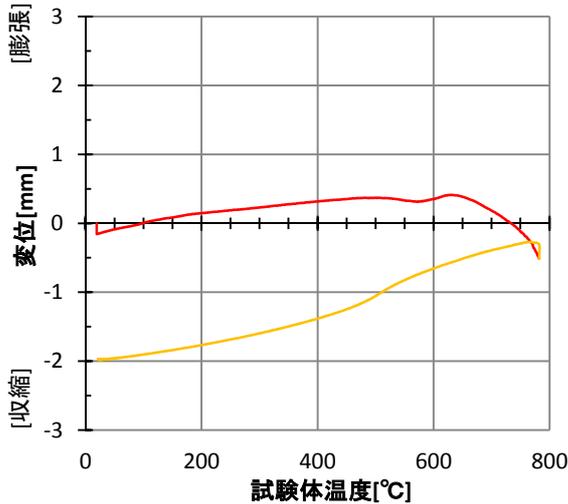
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



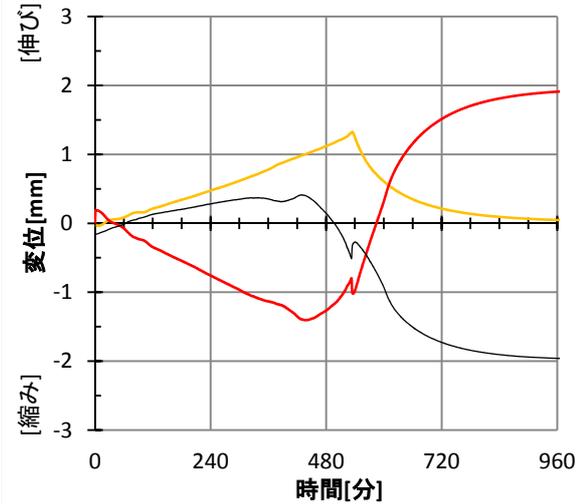
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



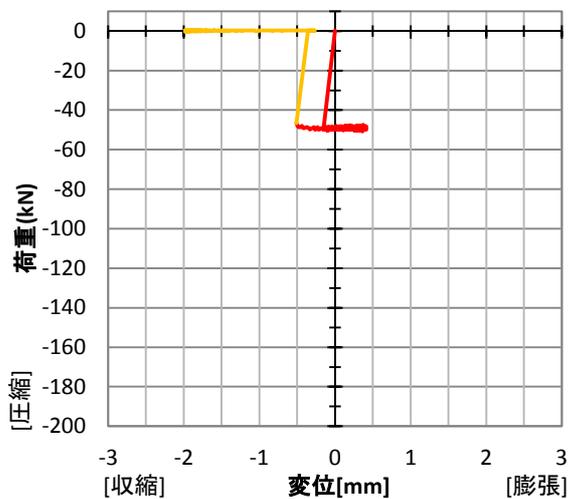
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



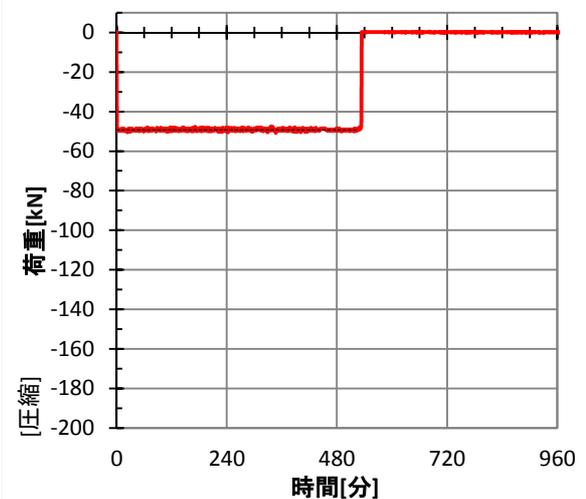
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65A-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 7.95N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/16

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：357日 試験体番号：65-45  
 寸法：φ75.0×150.7mm  
 重量：[実験前] 1488.8gf (重量減少率)  
 [実験後] 1401.1gf (5.89%)



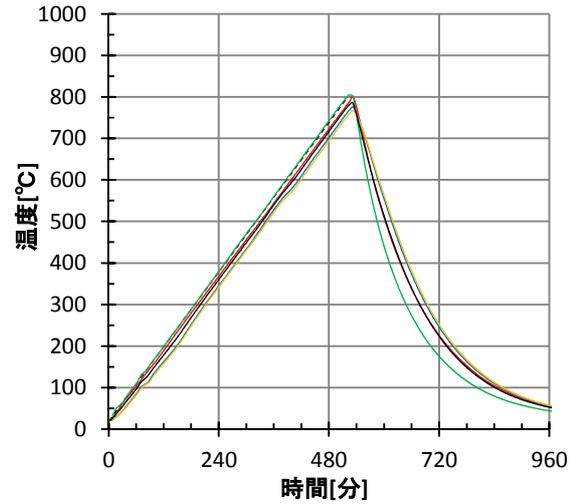
[実験前]



[実験後]

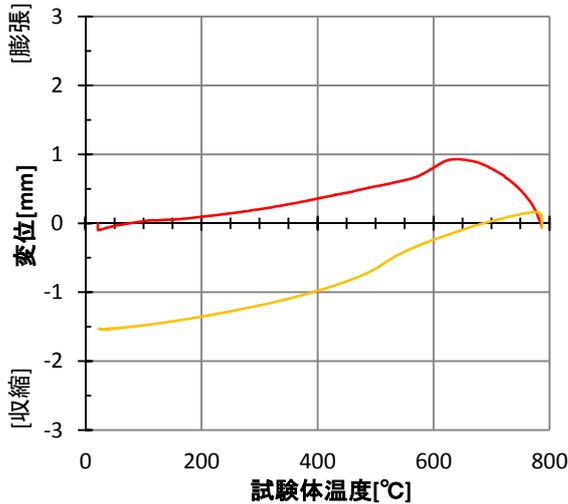
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



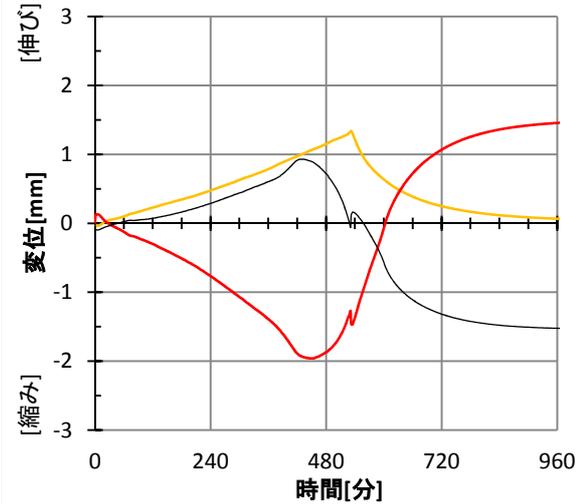
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



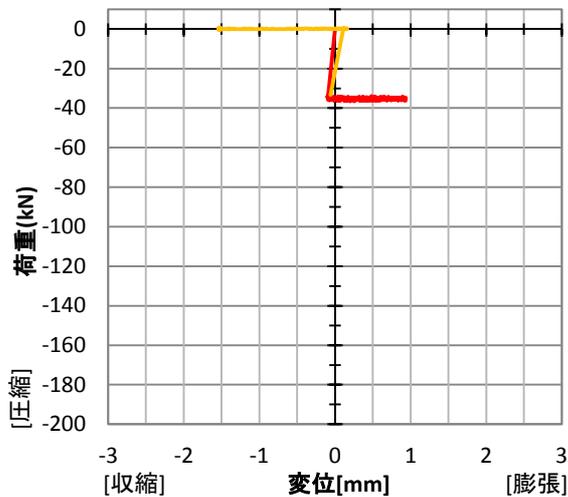
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



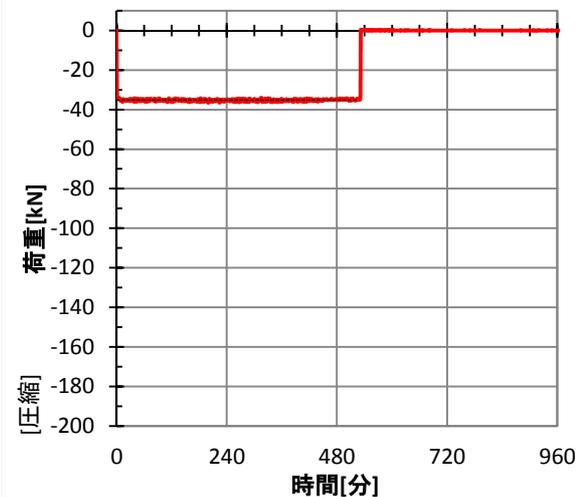
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65D-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 7.95N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/10/27

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：368日 試験体番号：65-43  
 寸法：φ75.2×149.6mm  
 重量：[実験前] 1455.9gf (重量減少率)  
 [実験後] 1401.8gf (3.72%)



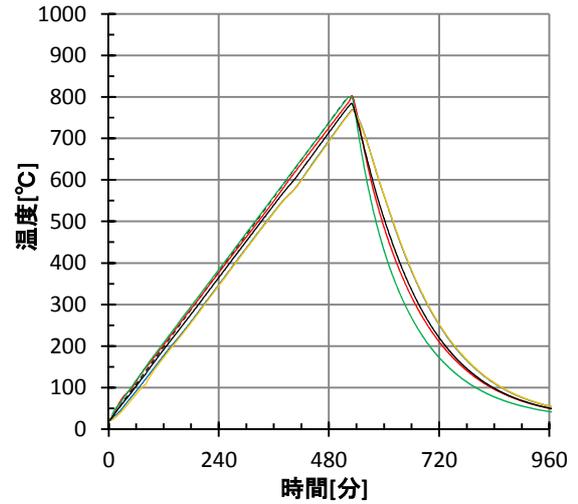
[実験前]



[実験後]

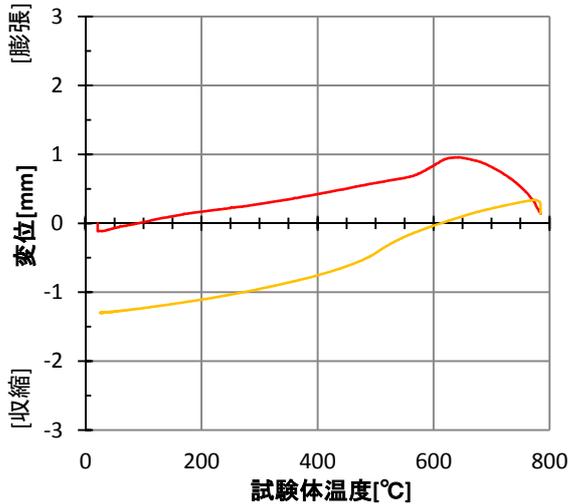
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



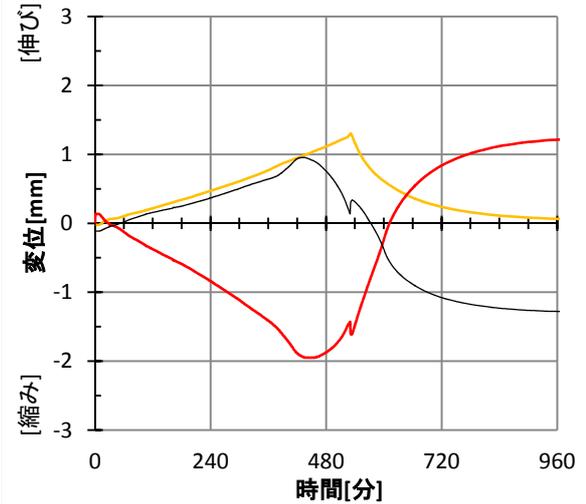
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



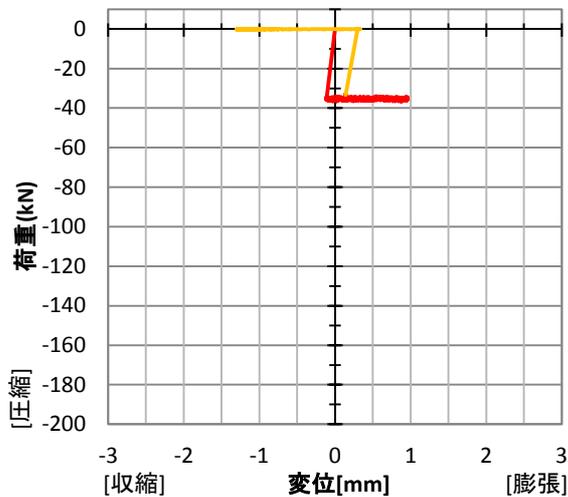
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



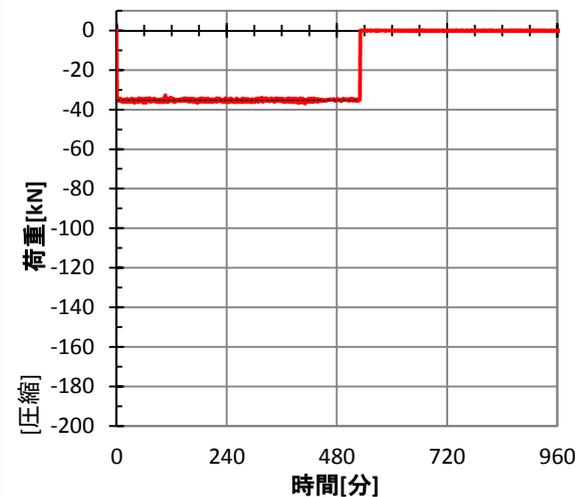
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65S-30-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.3 (設定応力 7.95N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/1

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：373日 試験体番号：65-50  
 寸法：φ75.0×148.8mm  
 重量：[実験前] 1507.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1364.8gf (9.44%)



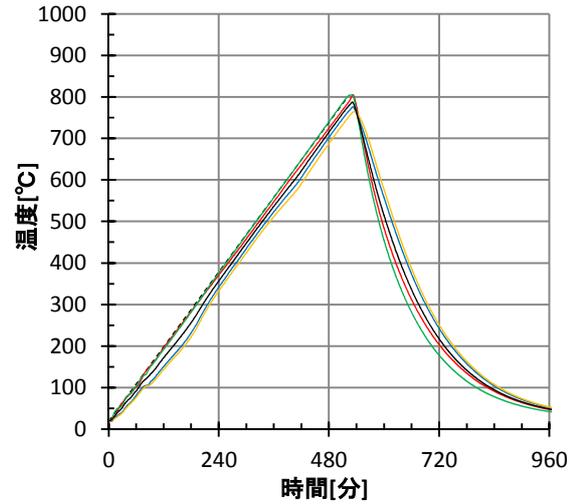
[実験前]



[実験後]

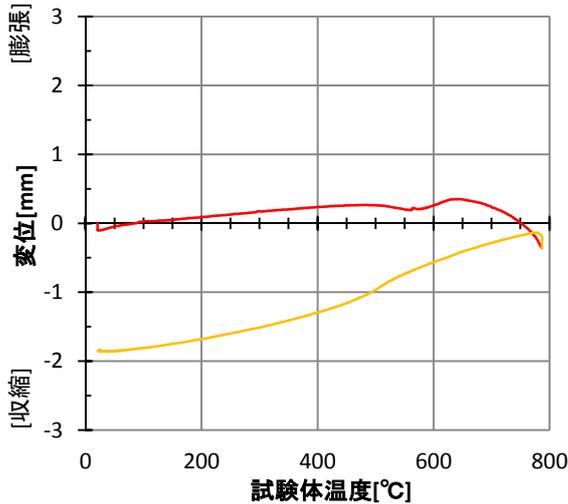
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



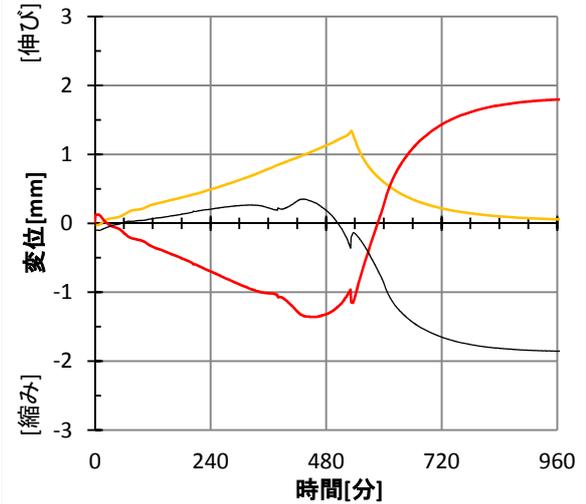
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



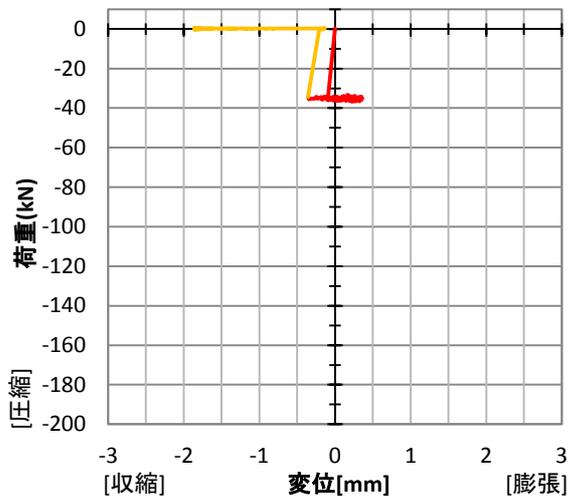
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位)



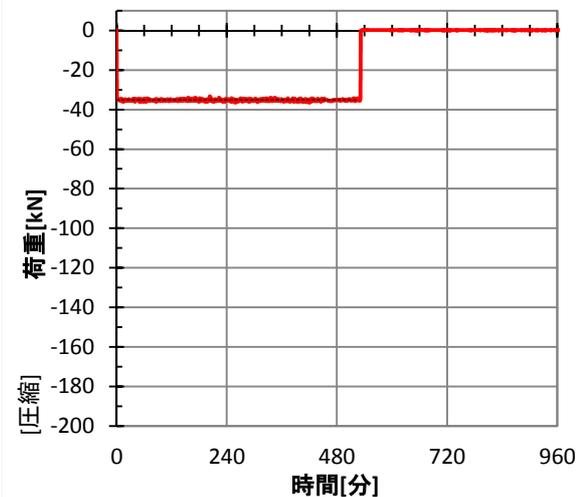
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, — 除荷→放冷



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40A-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 24.60N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/12

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：379日 試験体番号：40-34  
 寸法：φ75.2×150.0mm  
 重量：[実験前] 1534.3gf (重量減少率)  
           [実験後] 1442.7gf (5.97%)



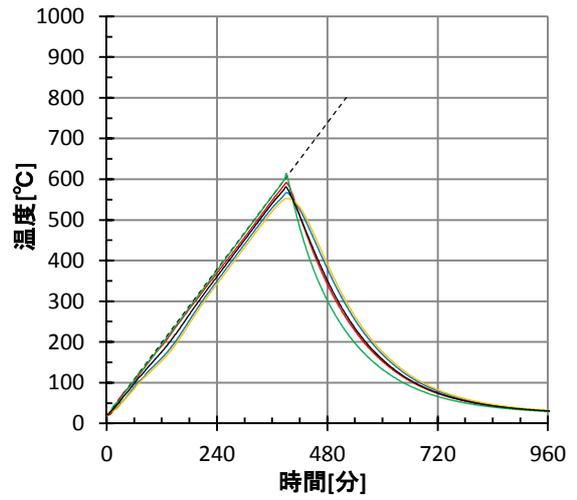
[実験前]



[実験後]

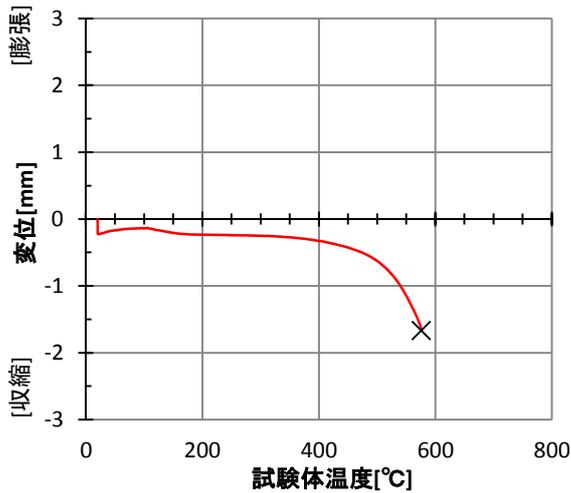
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



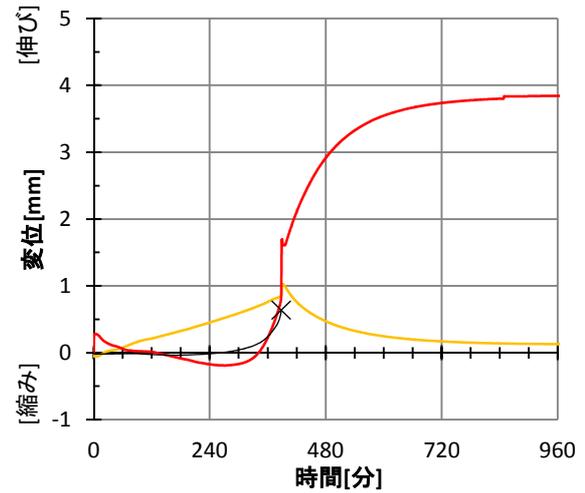
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



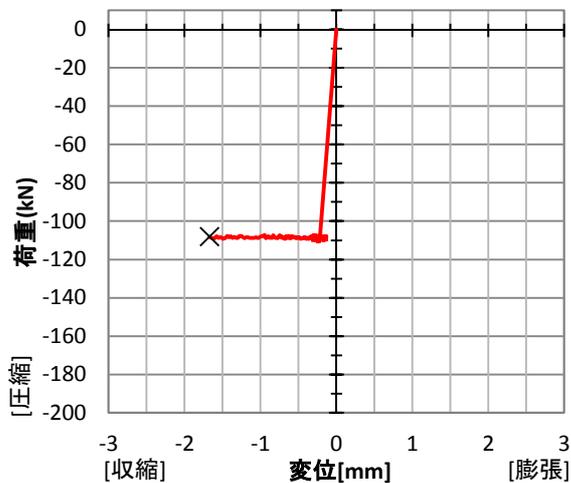
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位), × 破壊



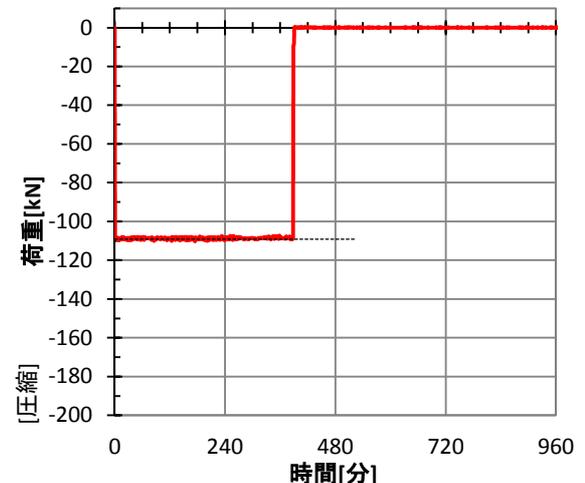
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40D-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 24.60N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/4

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：371日 試験体番号：40-30  
 寸法：φ75.1×149.3mm  
 重量：[実験前] 1467.7gf (重量減少率)  
 [実験後] 1420.6gf (3.21%)



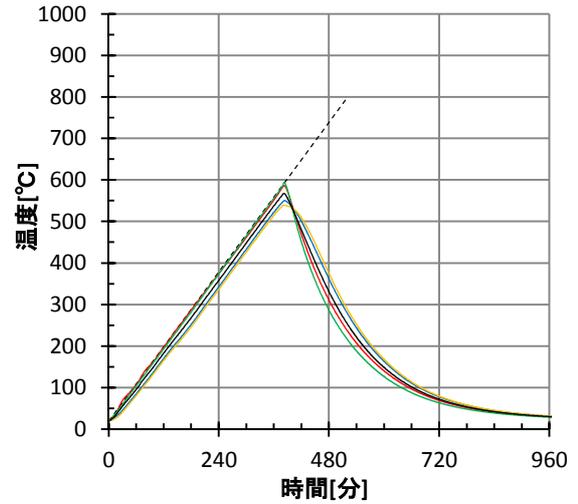
[実験前]



[実験後]

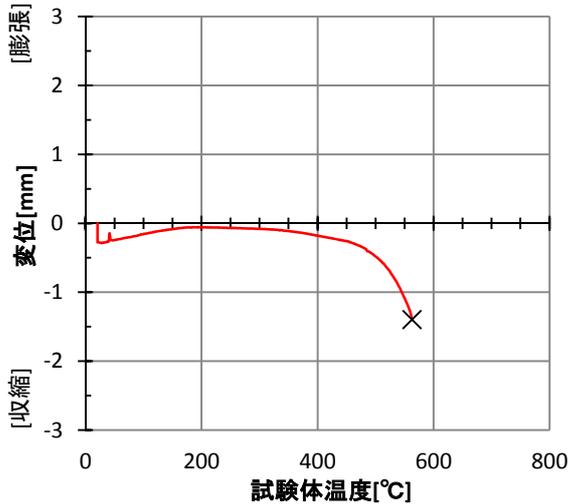
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



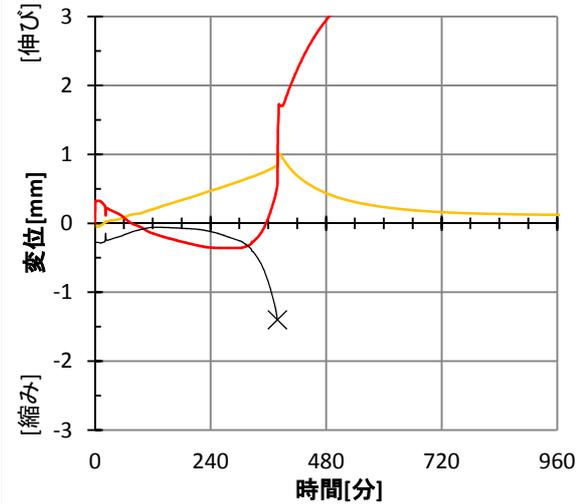
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



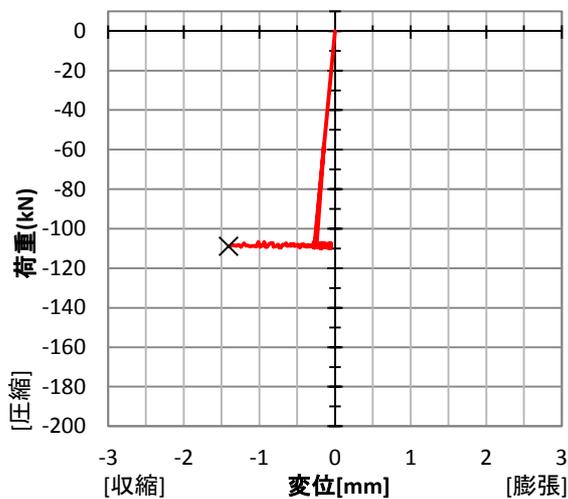
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



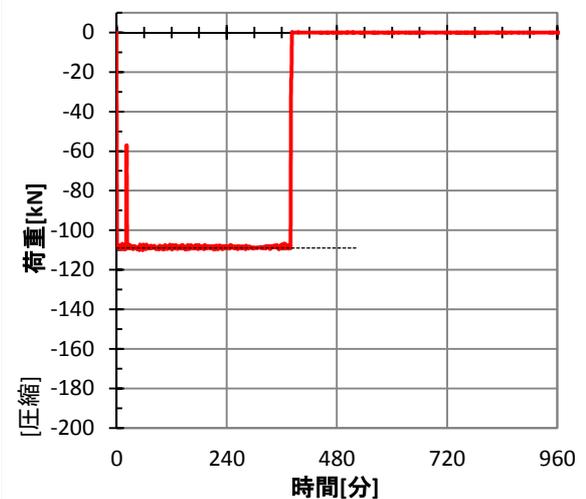
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-50A-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 18.50N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/9

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：376日 試験体番号：50-34  
 寸法：φ75.3×149.7mm  
 重量：[実験前] 1500.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1412.0gf (5.87%)



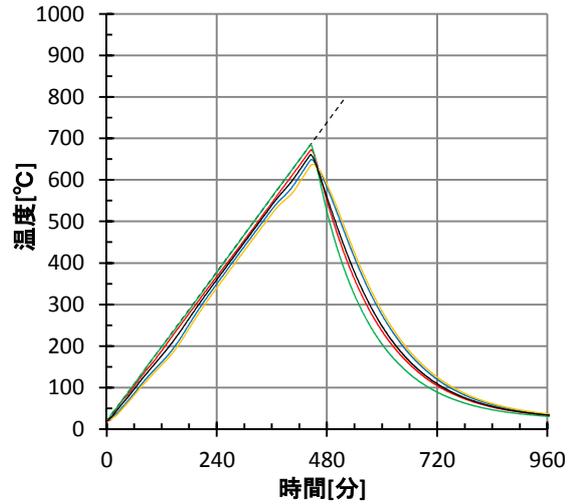
[実験前]



[実験後]

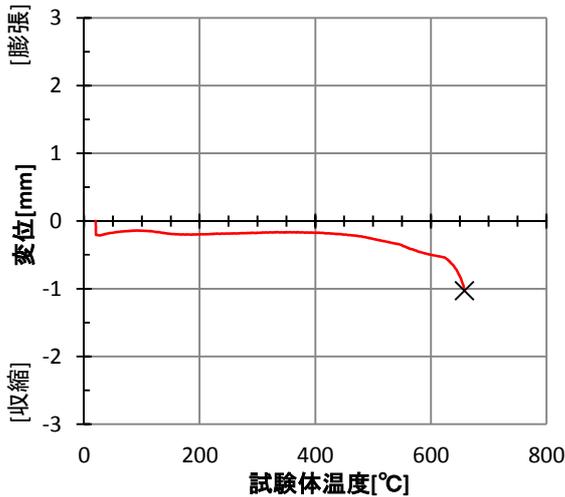
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



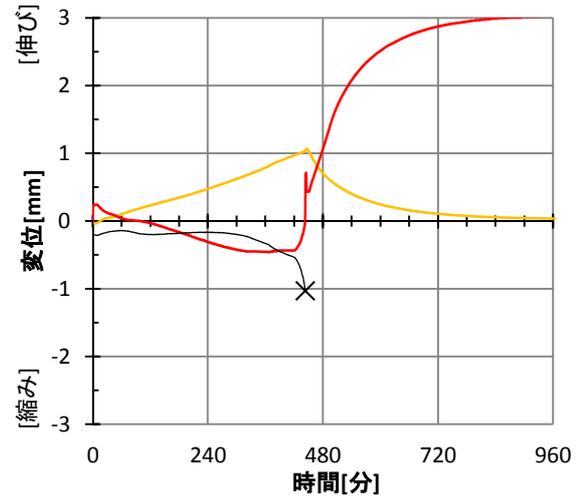
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



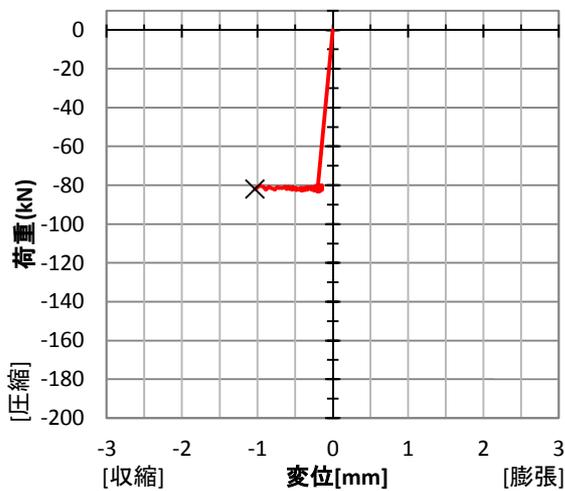
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位), × 破壊



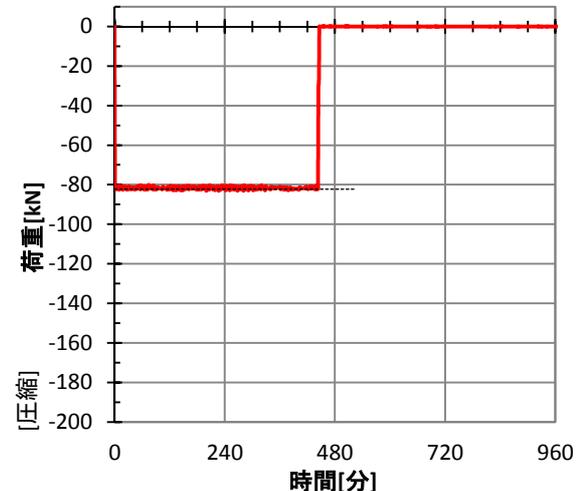
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



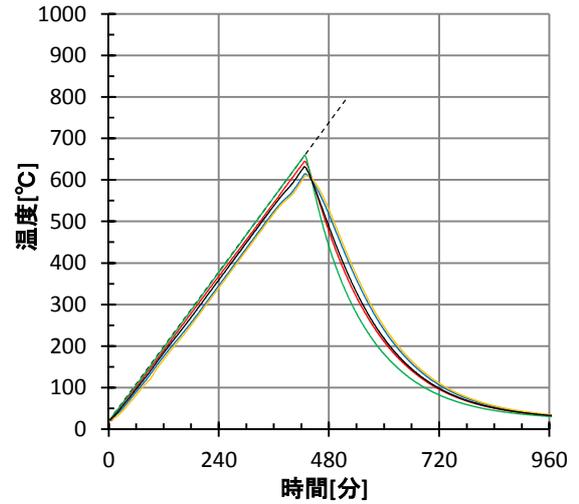
実験名：T-50D-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 18.50N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/3

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：370日 試験体番号：50-30  
 寸法：φ74.9×150.8mm  
 重量：[実験前] 1461.2gf (重量減少率)  
 [実験後] 1414.6gf (3.19%)



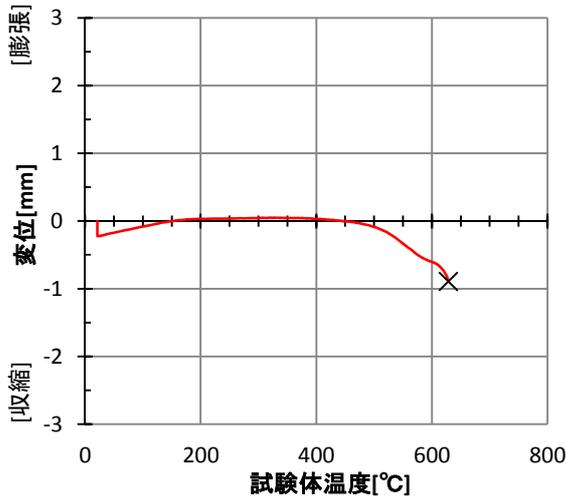
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), 設定温度



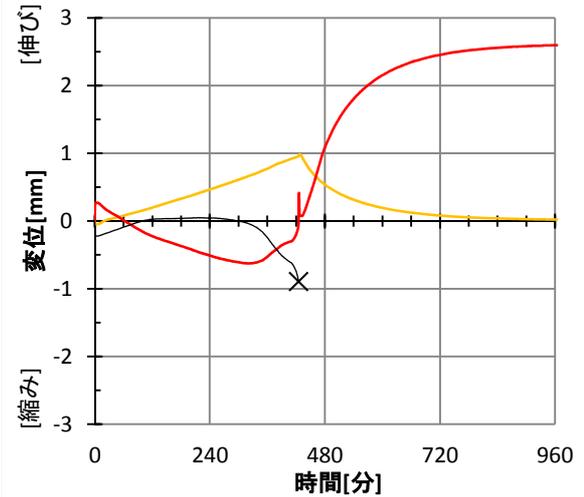
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



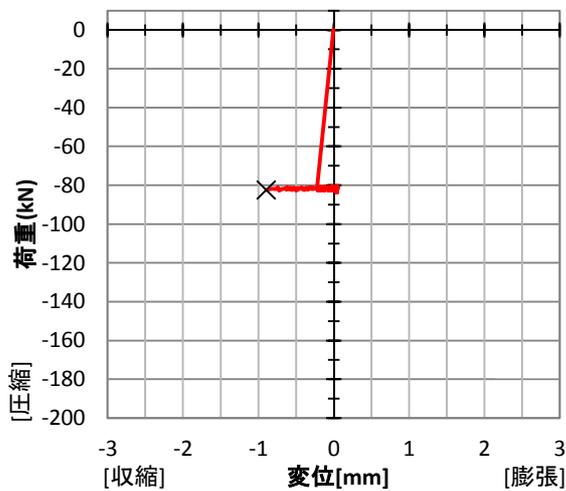
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



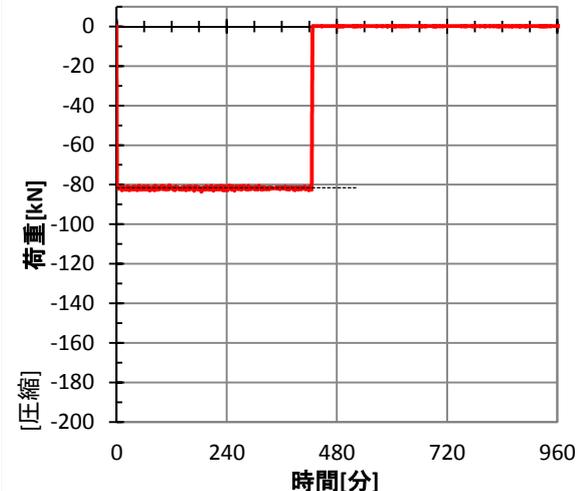
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, 設定荷重



実験名：T-65A-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 13.25N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/8

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：380日 試験体番号：65-52  
 寸法：φ75.4×149.4mm  
 重量：[実験前] 1489.1gf (重量減少率)  
           [実験後] 1410.8gf (5.26%)



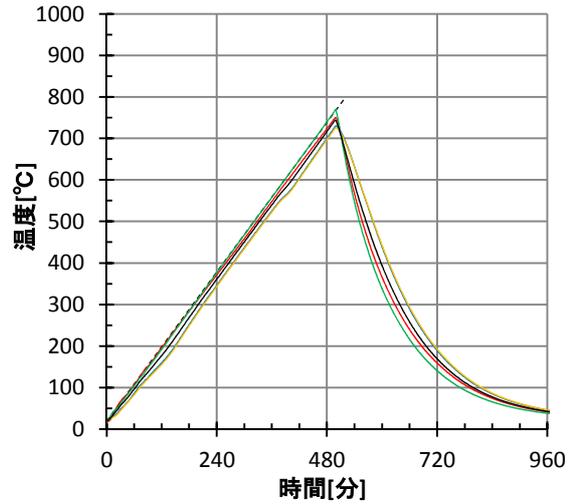
[実験前]



[実験後]

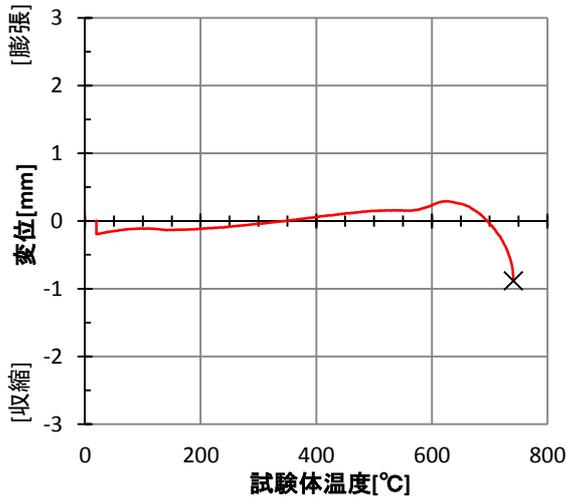
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



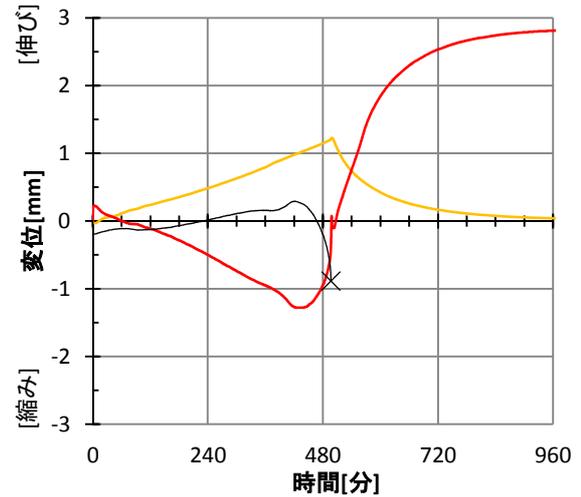
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



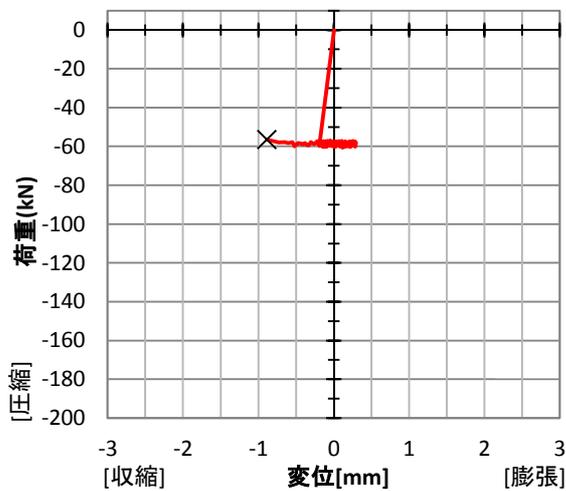
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



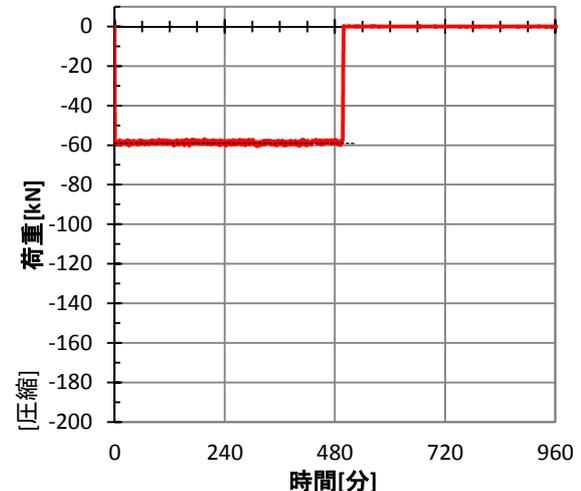
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65D-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 13.25N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/2

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：374日 試験体番号：65-46  
 寸法：φ75.3×148.6mm  
 重量：[実験前] 1460.5gf (重量減少率)  
 [実験後] 1412.3gf (3.30%)



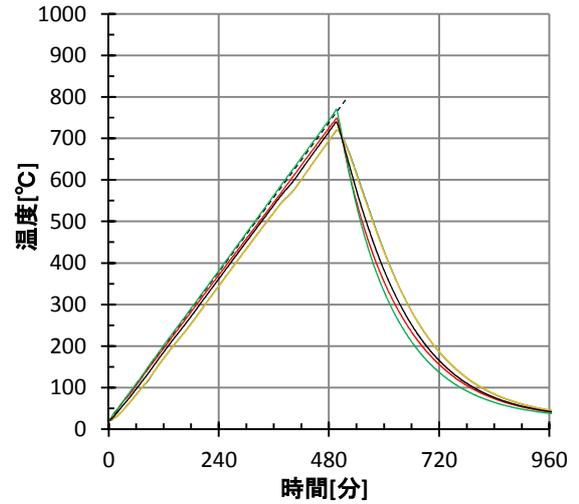
[実験前]



[実験後]

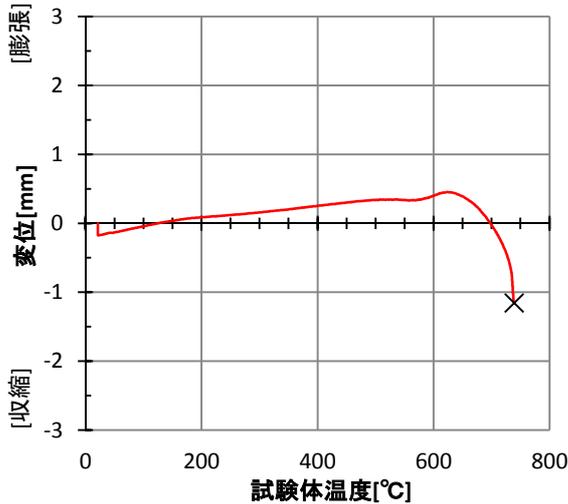
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



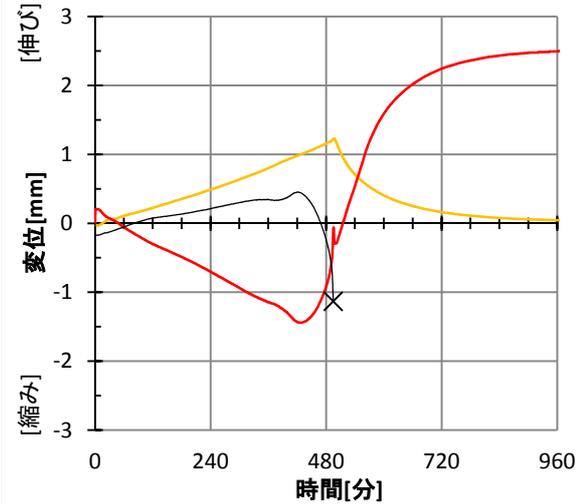
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



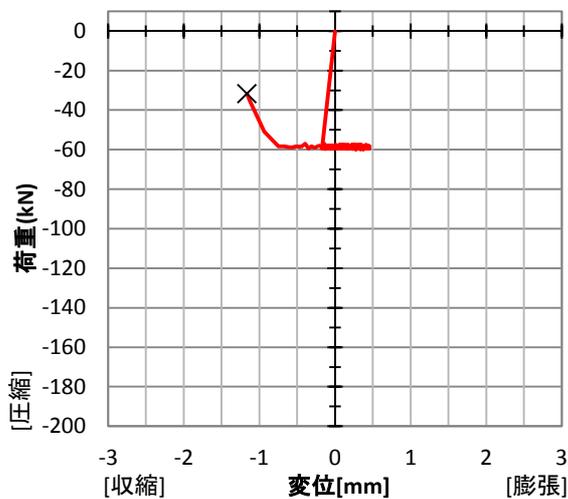
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



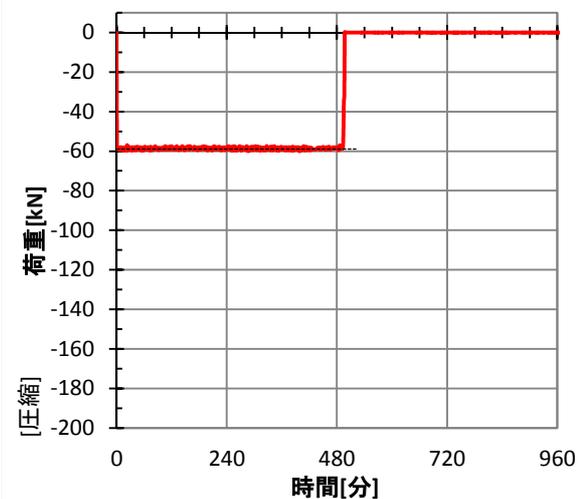
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65S-50-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.5 (設定応力 13.25N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2014/11/14

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：386日 試験体番号：65-53  
 寸法：φ75.3×149.3mm  
 重量：[実験前] 1508.6gf (重量減少率)  
           [実験後] 1347.8gf (10.67%)



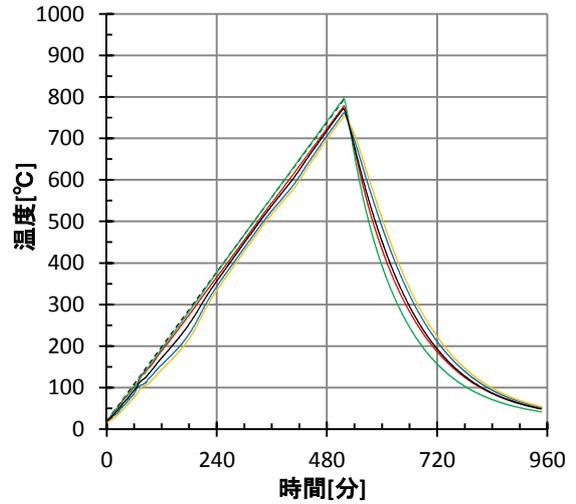
[実験前]



[実験後]

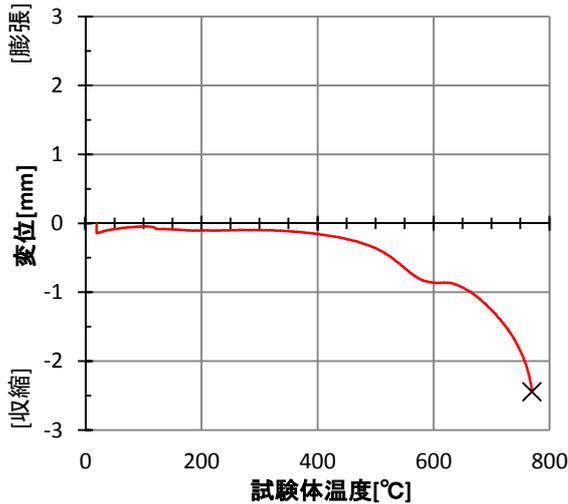
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



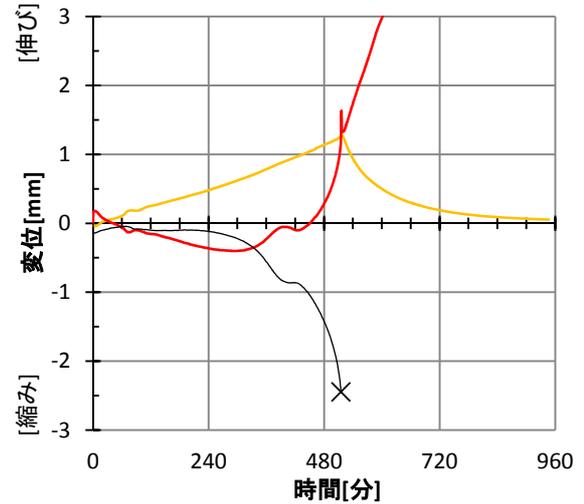
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



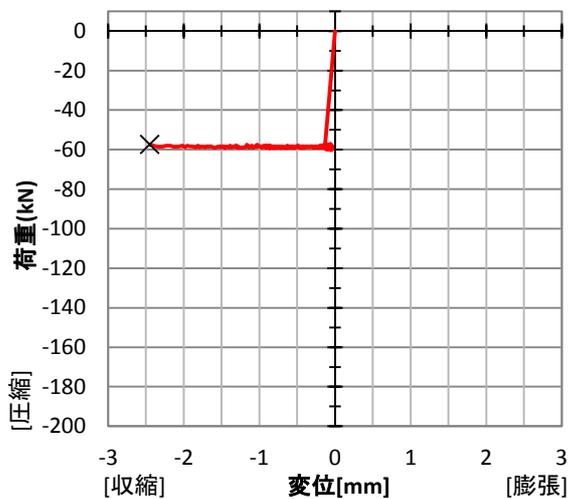
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



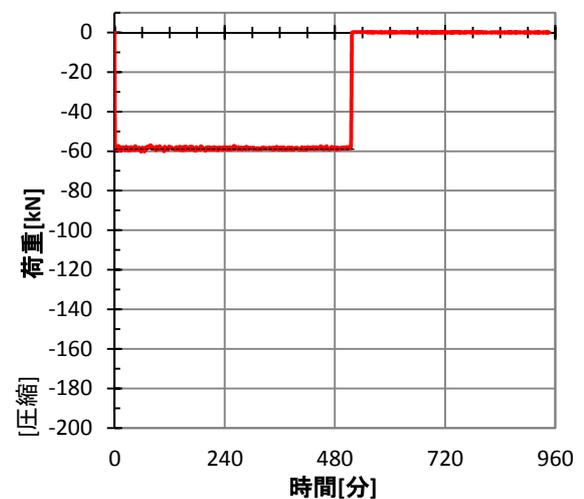
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40A-70-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 34.44N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/2/14

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 気乾  
 材齢：473日 試験体番号：40-43  
 寸法：φ75.5×148.5mm  
 重量：[実験前] 1528.1gf (重量減少率)  
           [実験後] 1447.9gf (5.25%)



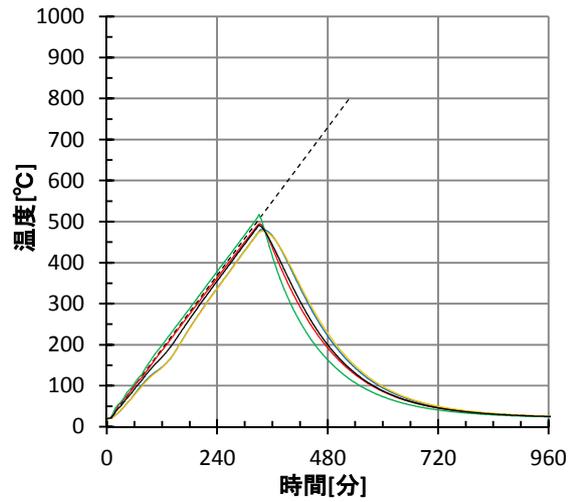
[実験前]



[実験後]

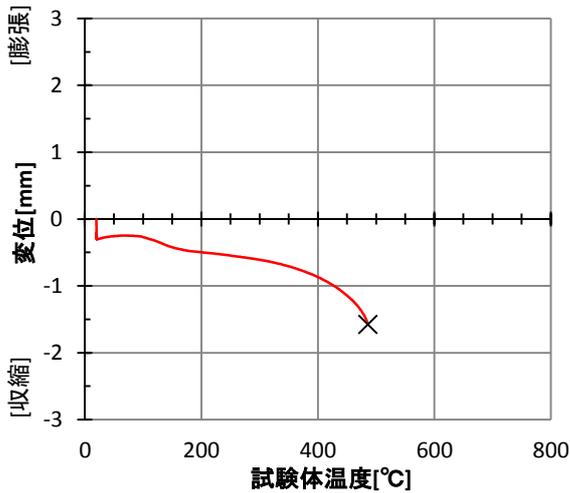
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



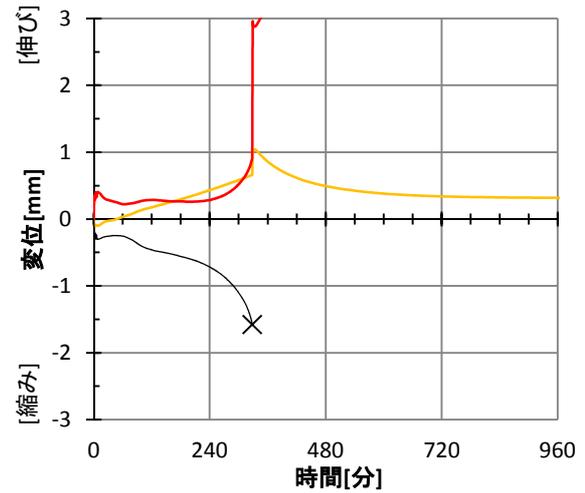
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



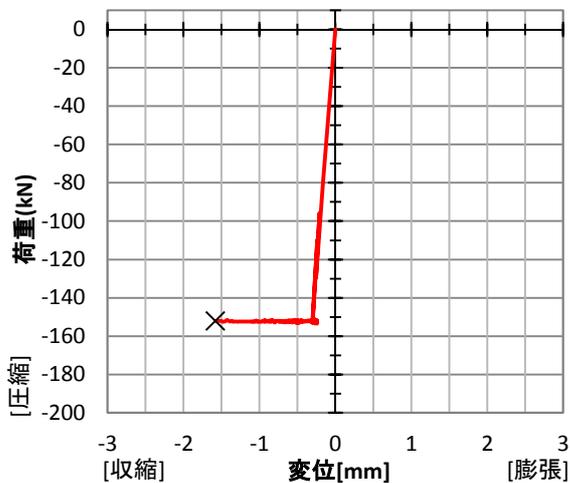
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1×下側変位) - 上側変位), × 破壊



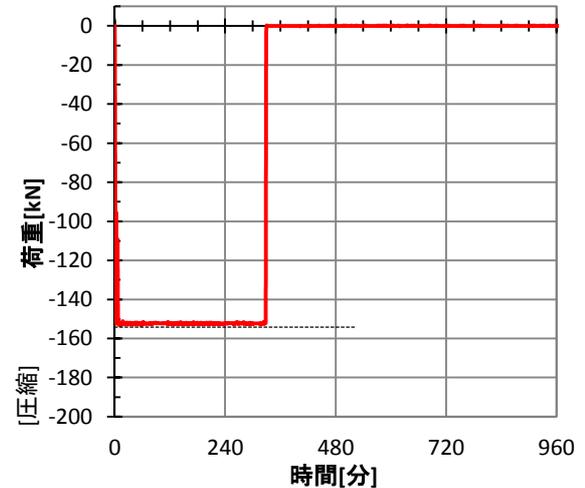
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40D-70-1[全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7（設定応力 34.44N/mm<sup>2</sup>）  
 実施日：2015/2/7

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：466日 試験体番号：40-42  
 寸法：φ75.0×148.9mm  
 重量：[実験前] 1458.0gf (重量減少率)  
 [実験後] 1450.1gf (0.54%)



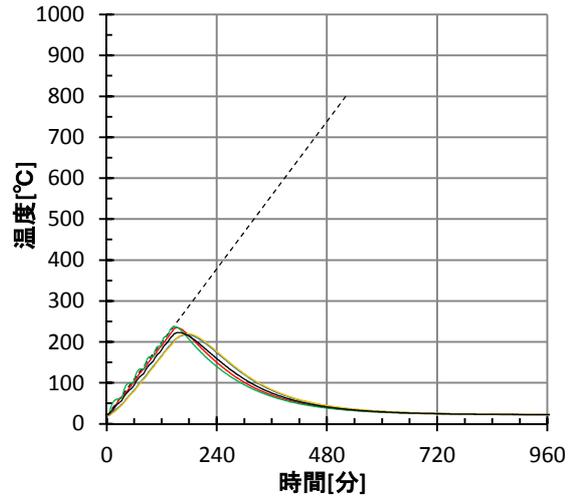
[実験前]



[実験後]

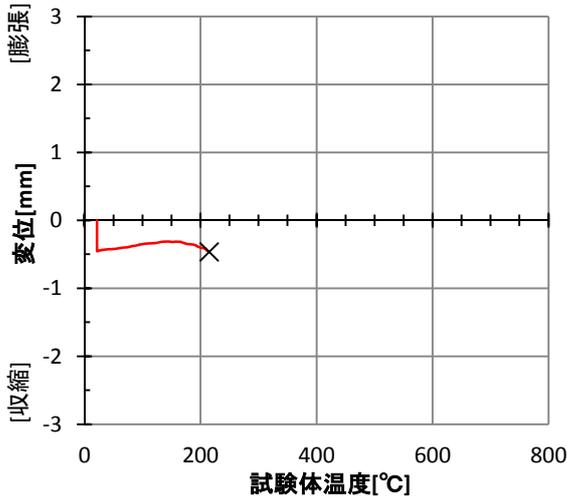
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



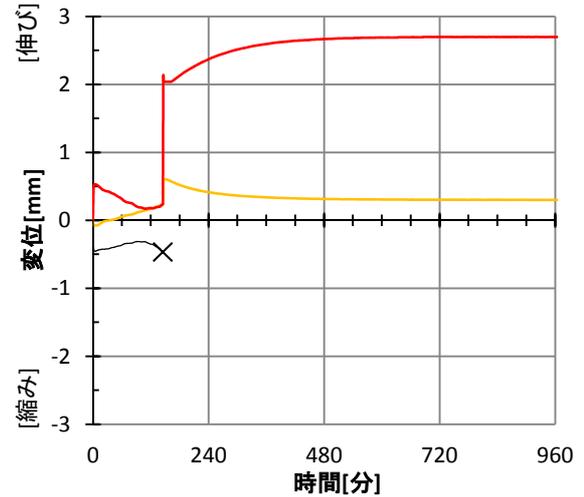
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



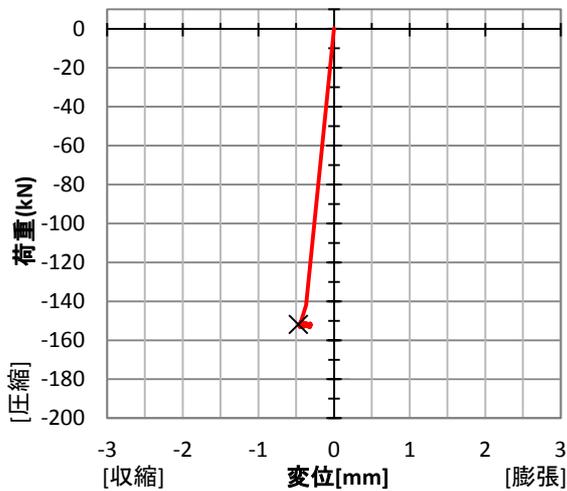
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



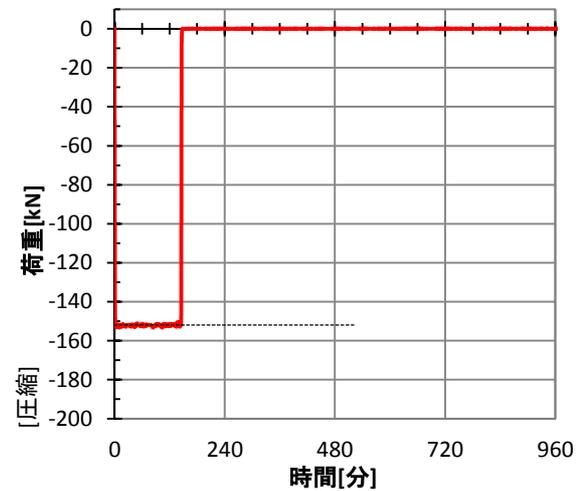
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-40D-70-2[全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7（設定応力 34.44N/mm<sup>2</sup>）  
 実施日：2015/2/10

試験体：[W/C] 40%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：469日 試験体番号：40-41  
 寸法：φ74.9×150.1mm  
 重量：[実験前] 1542.3gf (重量減少率)  
 [実験後] 1460.7gf (5.29%)



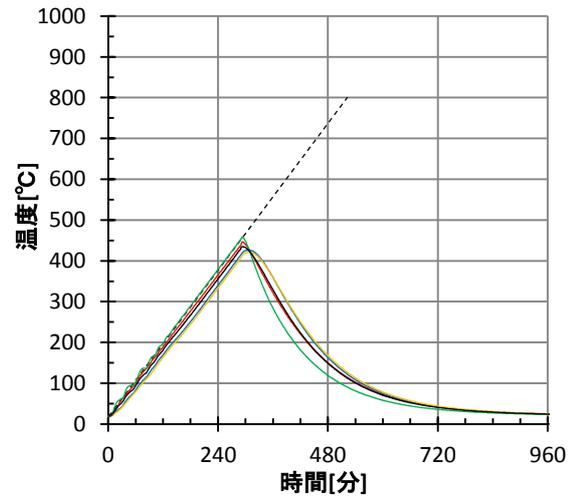
[実験前]



[実験後]

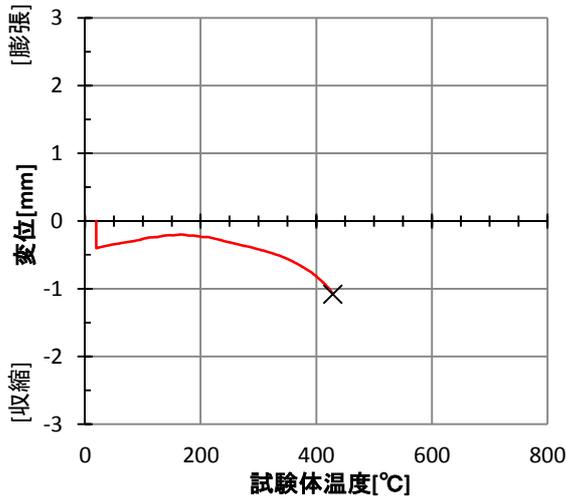
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



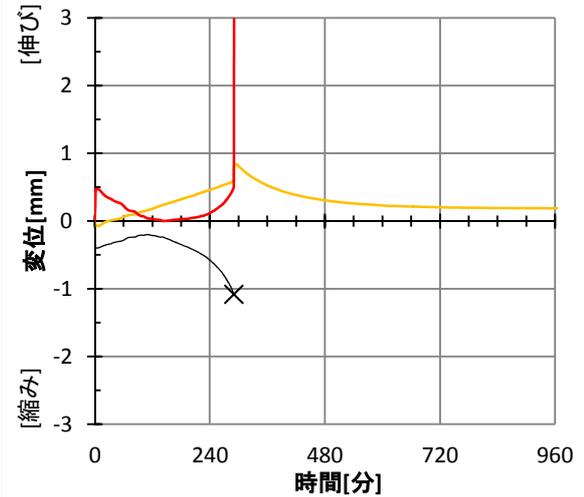
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



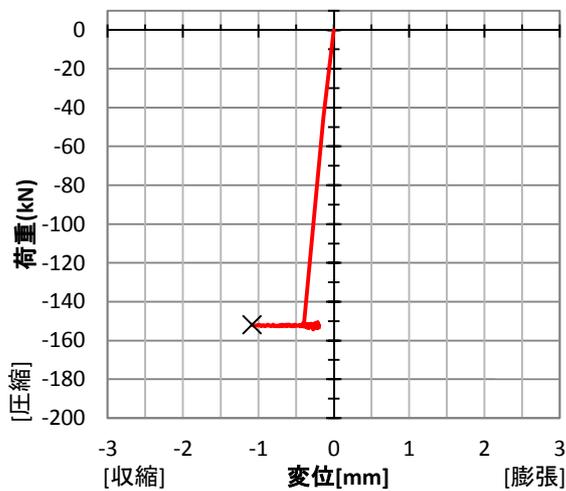
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



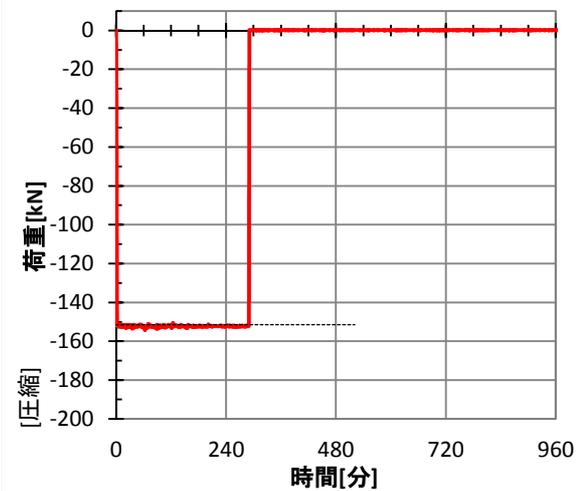
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



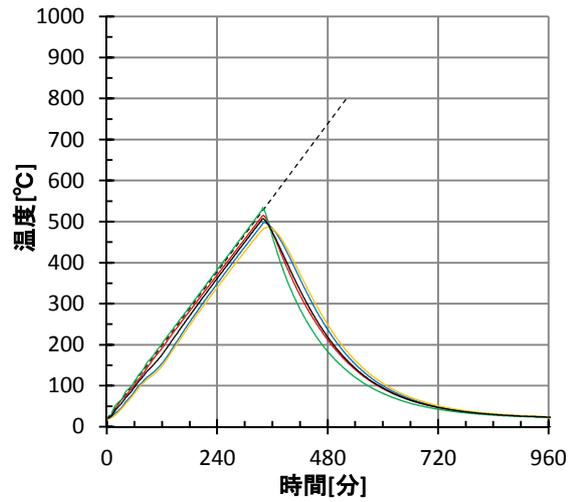
実験名：T-50A-70-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 25.90N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/2/15

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 気乾  
 材齢：474日 試験体番号：50-43  
 寸法：φ75.0×150.4mm  
 重量：[実験前] 1498.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1430.6gf (4.53%)



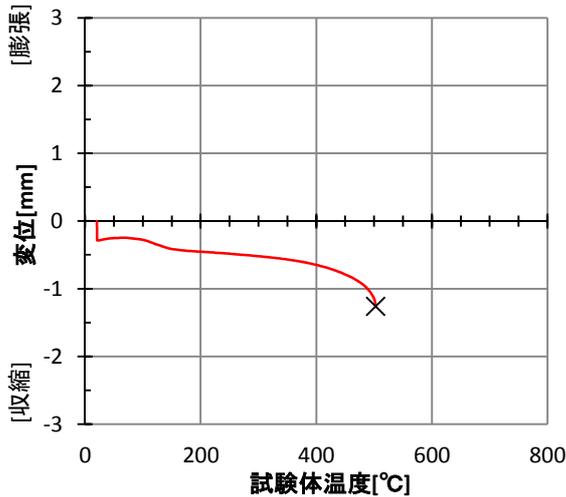
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



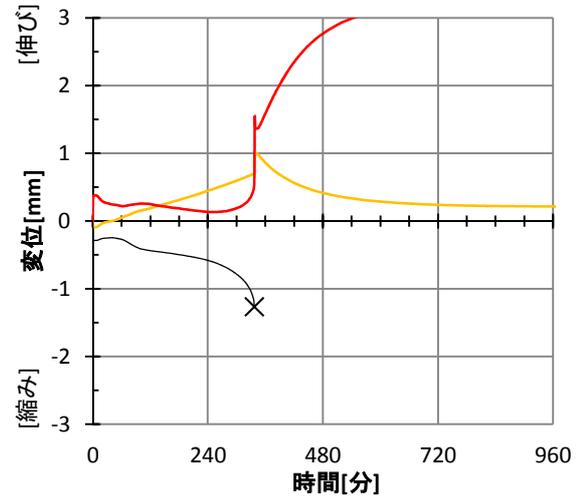
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



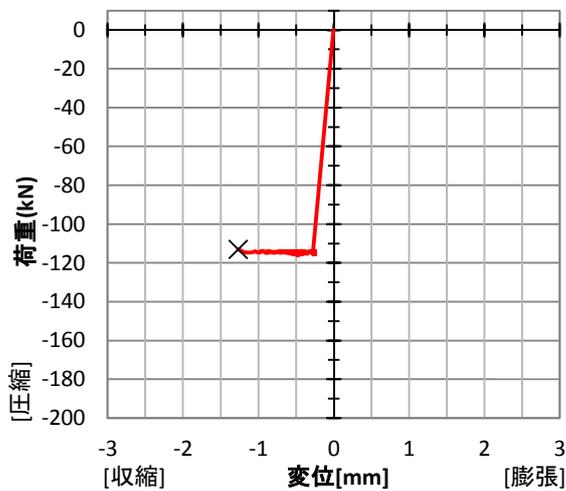
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



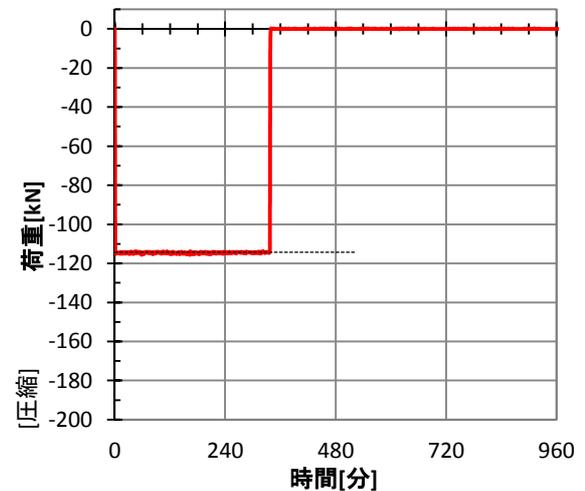
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-50D-70-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 25.90N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/2/9

試験体：[W/C] 50%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：468日 試験体番号：50-42  
 寸法：φ74.9×149.8mm  
 重量：[実験前] 1456.4gf (重量減少率)  
           [実験後] 1426.4gf (2.06%)



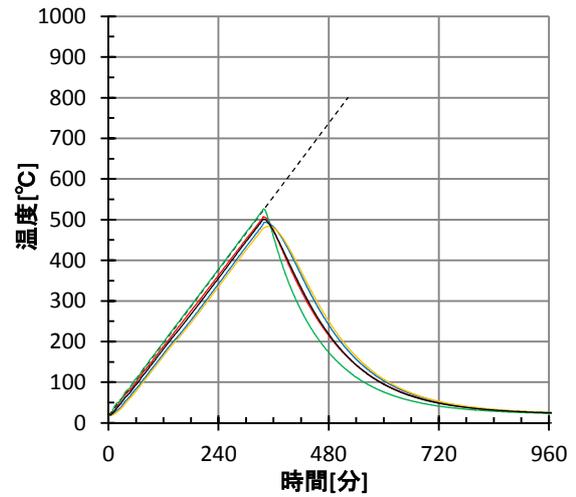
[実験前]



[実験後]

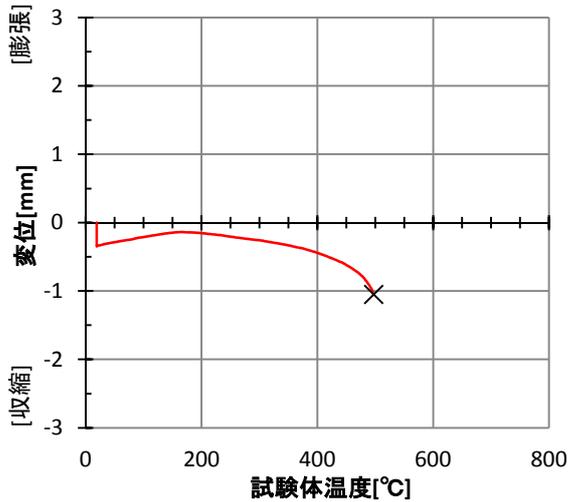
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



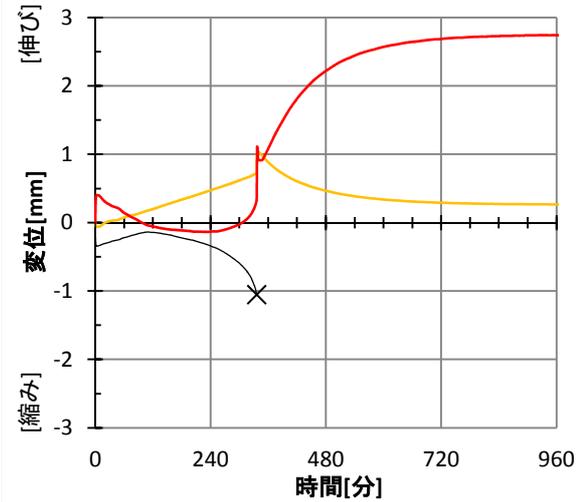
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



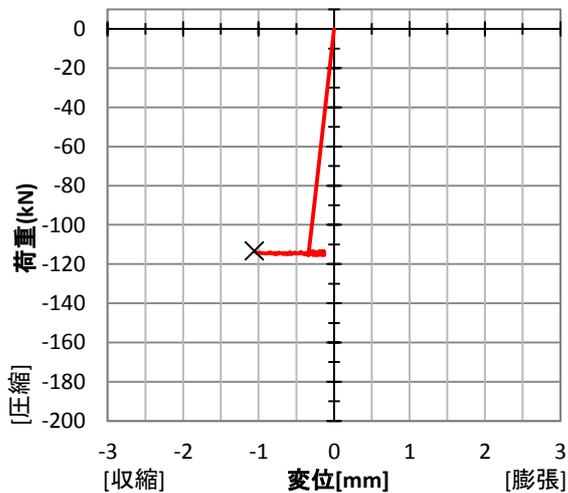
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



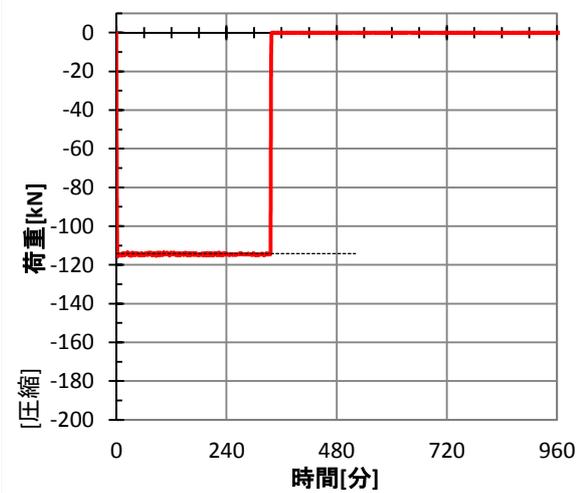
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65A-70-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 18.55N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/1/25

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：458日 試験体番号：65-61  
 寸法：φ75.0×150.8mm  
 重量：[実験前] 1476.4gf (重量減少率)  
 [実験後] 1455.9gf (1.39%)



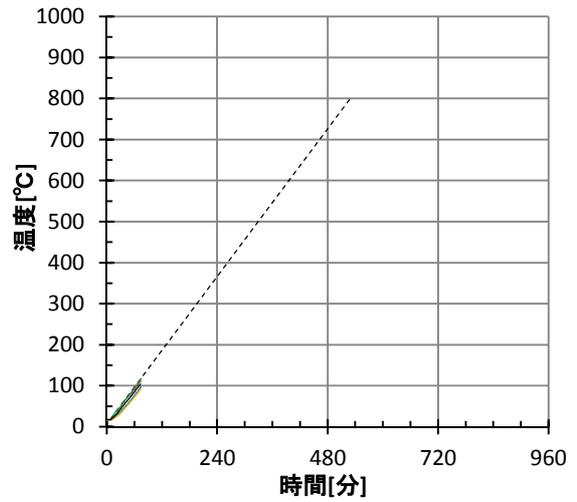
[実験前]



[実験後]

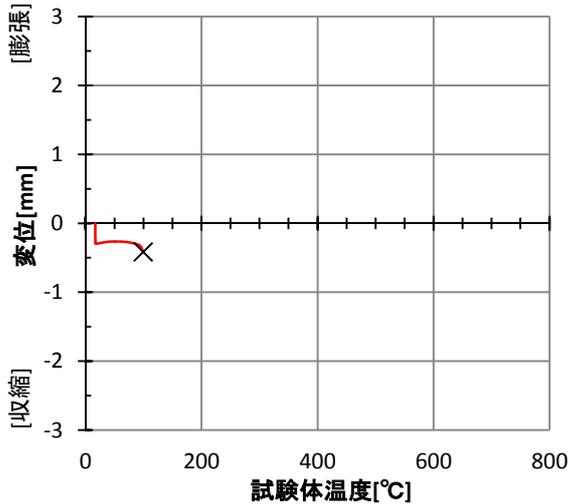
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



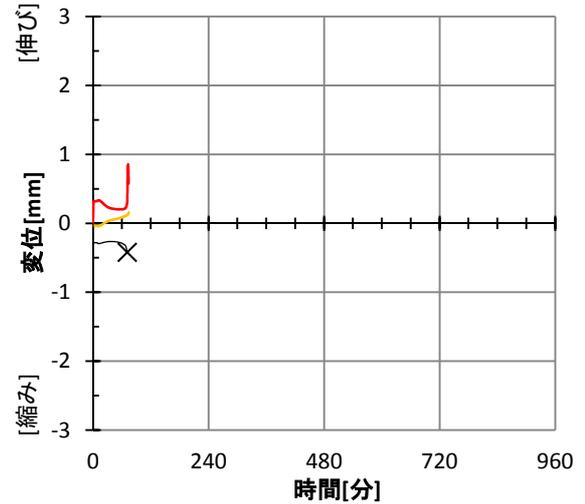
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



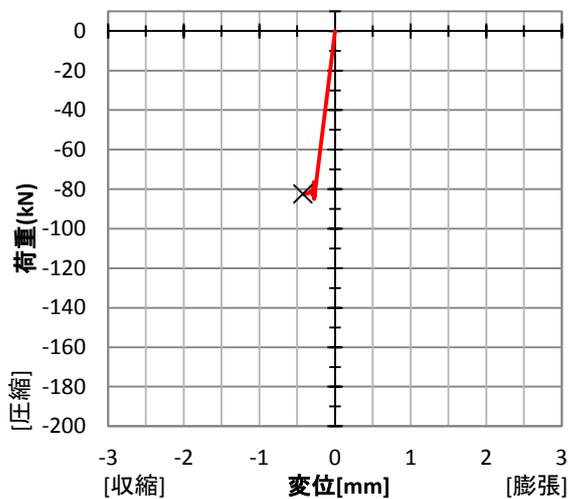
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



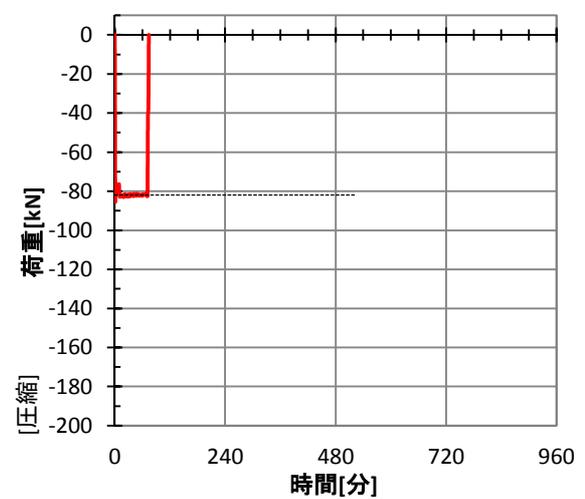
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65A-70-2 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 18.55N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/2/21

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 気乾  
 材齢：485日 試験体番号：65-69  
 寸法：φ74.9×151.0mm  
 重量：[実験前] 1482.2gf (重量減少率)  
 [実験後] 1416.0gf (4.47%)



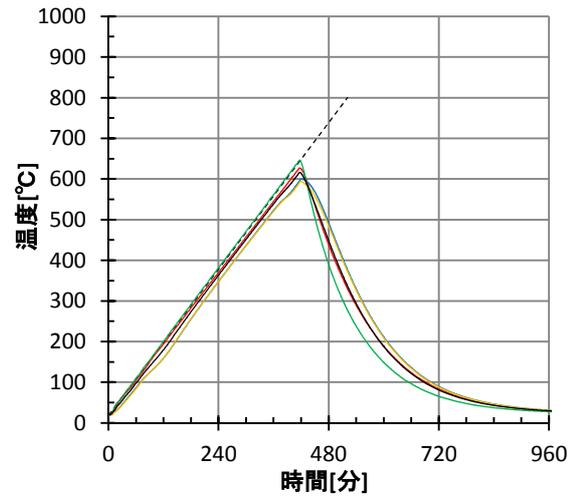
[実験前]



[実験後]

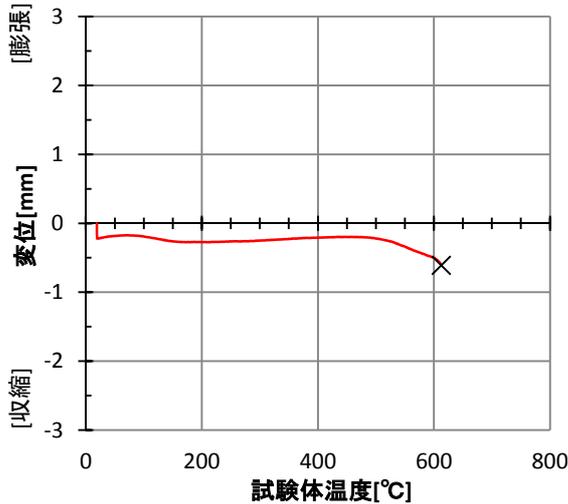
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



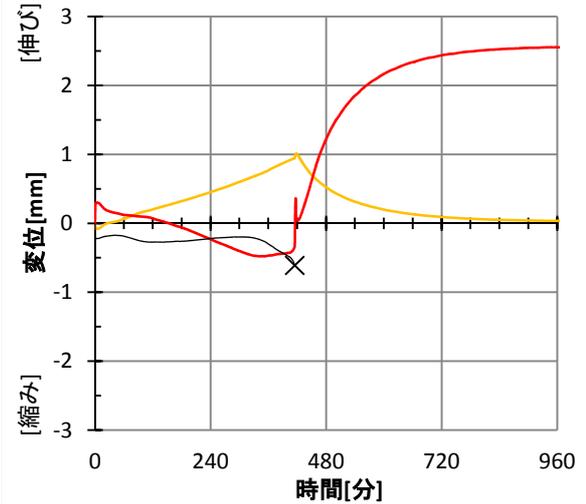
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



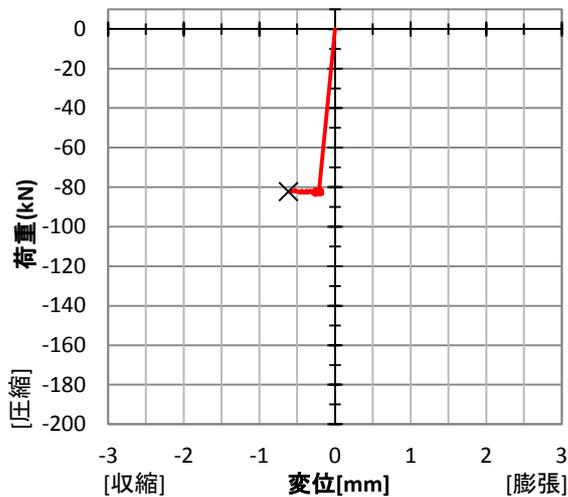
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



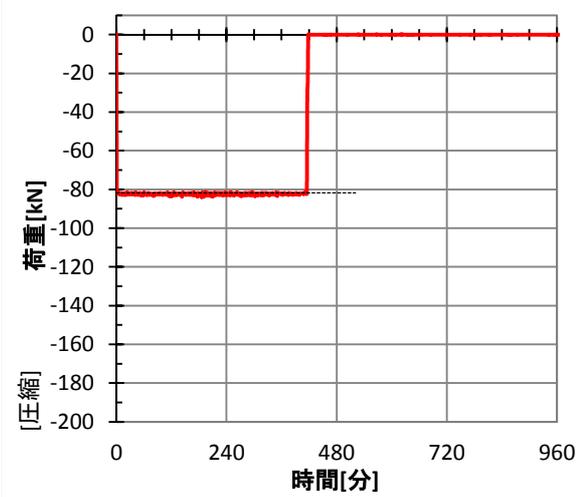
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65D-70-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 18.55N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/2/8

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 絶乾  
 材齢：472日 試験体番号：65-68  
 寸法：φ75.0×150.5mm  
 重量：[実験前] 1449.3gf (重量減少率)  
 [実験後] 1414.8gf (2.38%)



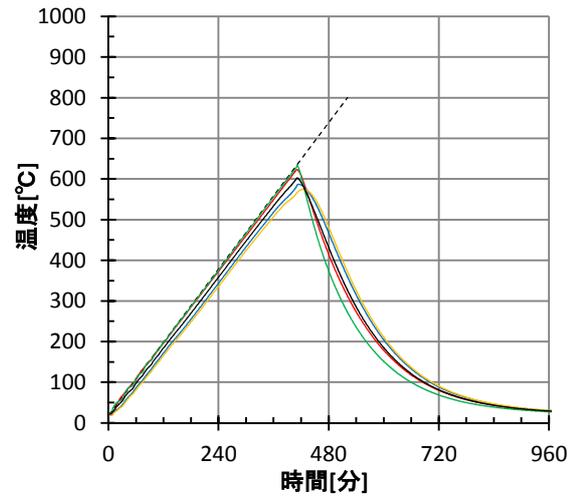
[実験前]



[実験後]

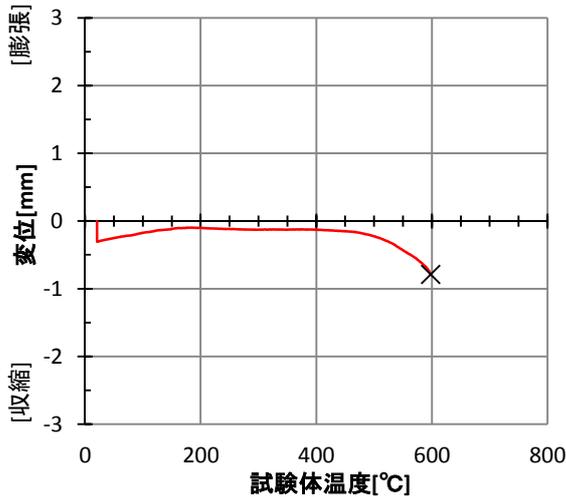
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



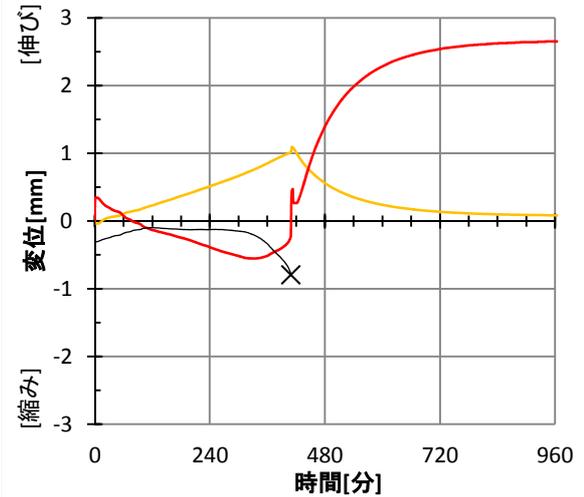
変形-温度 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



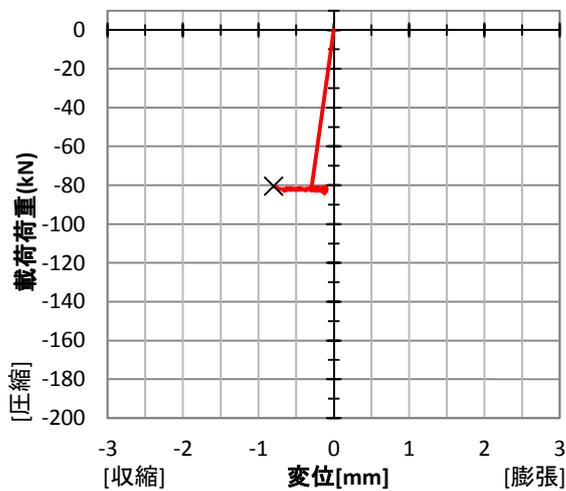
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



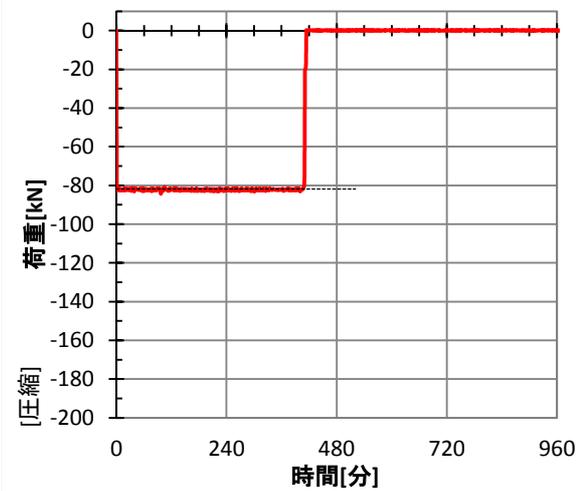
荷重-変形 関係

— 载荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重



実験名：T-65S-70-1 [全ひずみ実験]  
 応力レベル：0.7 (設定応力 18.55N/mm<sup>2</sup>)  
 実施日：2015/2/18

試験体：[W/C] 65%, [養生条件] 封かん  
 材齢：482日 試験体番号：65-71  
 寸法：φ75.1×150.0mm  
 重量：[実験前] 1525.8gf (重量減少率)  
           [実験後] 1397.8gf (8.39%)



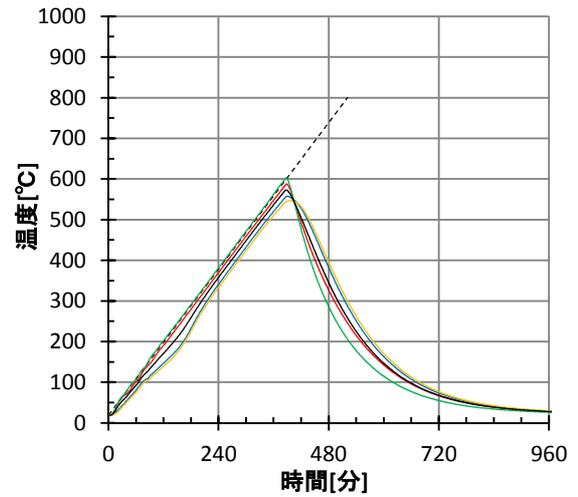
[実験前]



[実験後]

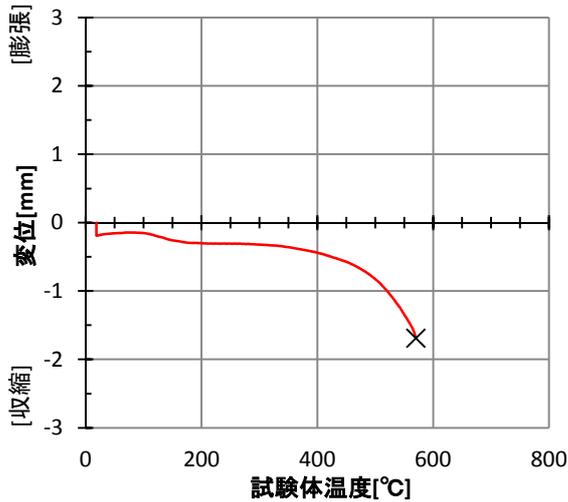
温度-時間 関係

— T<sub>3</sub>(6, 20), — T<sub>4</sub>(6, 130), — T<sub>5</sub>(6, 75), — T<sub>6</sub>(6, 75),  
 — 試験体温度 (T<sub>3</sub>~T<sub>6</sub>の平均), --- 設定温度



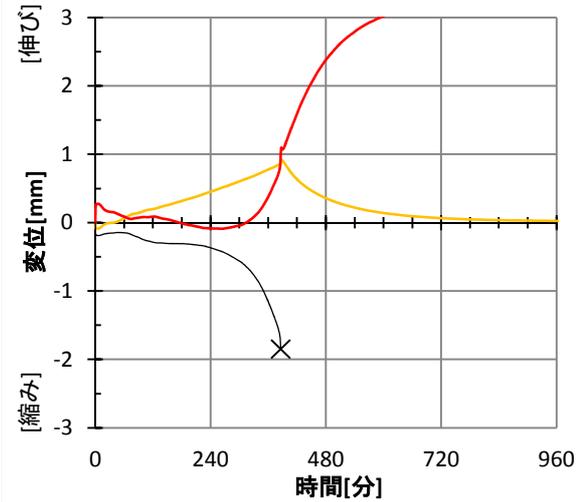
変形-温度 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



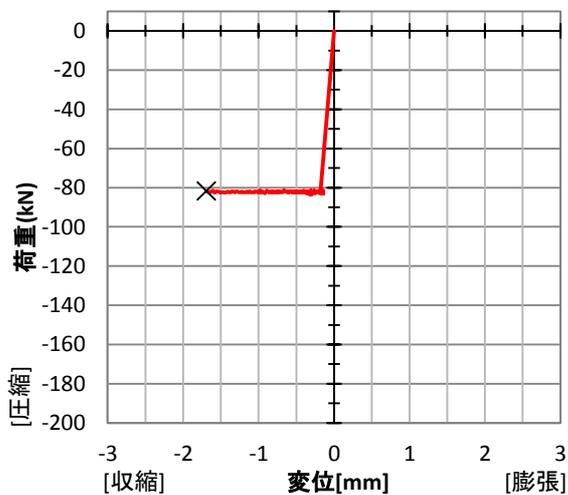
変位-時間 関係

— 上側変位計, — 下側変位計,  
 — 変形 (= (-1 × 下側変位) - 上側変位), × 破壊



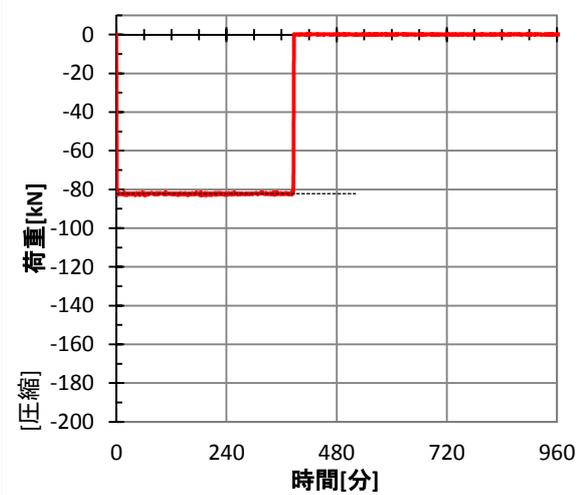
荷重-変形 関係

— 載荷→加熱, × 破壊



荷重-時間 関係

— 実験時の荷重, --- 設定荷重





## 謝辞

本論文は多くの方々からの厚意あるご指導とご協力により完成することができました。下記の皆様には、謹んで御礼を申し上げます。

本論文の審査にあたり、千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 高橋徹教授、同 中村友紀子准教授、同 前田孝一准教授、同 宗方淳教授には、ご多忙の中、審査委員をお引き受けいただき、今後の研究に大いに参考となる貴重な意見を頂きました。特に、前田先生には、コンクリート中の水分に着眼すること、重量減少実験が必要であることなど、研究計画の立案時から多くのご助言を頂きました。また、熱分析実験の実施にあたっては、千葉大学大学院工学研究科 共生応用化学専攻 大窪貴洋准教授に貴重なご助言とご協力を頂きました。

本実験は、当時千葉大学学部4年生の後藤暁氏（現 東京セキスイハイム(株)）に多大なる協力をいただき遂行されたものです。また、重量減少測定実験の実験方法は、当時千葉大学学部4年生の吉田徹氏（現 修士2年）、長谷川純希氏（現 (株)ワークポート）によって確立されたものです。さらに、重量減少測定実験の設計・製作においては、三生技研(株)の菅原鉄治氏にご尽力いただきました。

本論文の内容は、齋藤・中川・上杉・平島研究室の諸先輩方が積み重ねてきた研究成果に基づいています。特に、常世田昌寿博士（(一財)建材試験センター）、豊田康二博士（(一財)日本建築総合試験所）がまとめられた学位論文からは、実験方法から結果の分析まで多くの部分において参考にさせていただくとともに、大変重要な示唆を得ることができました。また、千葉大学耐火構造研究会の方々からは、研究の遂行および論文の作成にあたり、大変貴重なご意見をいただきました。

千葉大学名誉教授 上杉英樹先生には、小生が学部4年生として本論文に繋がる研究を始めた時から、研究の面に限らず終始暖かい激励と丁寧なご指導を頂きました。

千葉大学教授 平島岳夫先生には、研究の計画から論文の作成に至るまで、懇切丁寧なご指導を頂きました。さらに、自立した研究者としての研究の進め方や心構えなど、この3年間で先生から教えていただいたことは多岐にわたり、とても言葉では言い尽くせません。心より感謝いたしております。今後は一層精進し、研究者として活躍することでご恩に報いたいと思います。

最後に、(一財)建材試験センターからは、本研究に使用した試験体の製作を行っていた材料グループの方々を始め、研究の計画から実施、論文の作成まで全面的な支援を受けました。皆様のご協力とご理解なくしては、本論文の執筆は成し遂げられませんでした。改めて感謝を申し上げます。



## 発表論文

### 1. 本研究に関連する論文

1) 山下平祐, 常世田昌寿, 鈴木澄江, 白岩昌幸, 平島岳夫: コンクリートの高温時力学的特性に及ぼす養生条件と水セメント比の影響 コンクリートの高温時特性に及ぼす水分の影響 (その 1), 日本建築学会構造系論文集, 第 720 号, pp.385-393, 2016.2

2) 山下平祐, 平島岳夫, 吉田徹: 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 4.コンクリートの高温時全体ひずみに与える水分の影響-, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.1-7, 2015.3

3) Heisuke Yamashita, Toru Yoshida, Takeo Hirashima, Influence of Water Content on Total Strain of Super-high-strength Concrete under Elevated Temperature, Proceedings of the 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Tsukuba, 2015.10

上記 3 編に加え, 以下の論文を日本建築学会構造系論文集へ投稿中である。

(2016 年 1 月現在)

山下平祐, 吉田徹, 宍倉大樹, 常世田昌寿, 平島岳夫: コンクリートの載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件と水セメント比の影響 コンクリートの高温時特性に及ぼす水分の影響 (その 2)

## 2. その他の論文

- 1) 豊田康二, 山下平祐, 石田良平, 近藤悟, 菊田繁美, 高橋孝二, 井上超, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹 : 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 1. 定常温度下における高温圧縮試験-, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.367-374, 2003
- 2) 豊田康二, 山下平祐, 篠原幸一, 常世田昌寿, 平島岳夫, 前田孝一, 上杉英樹 : 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 2. 一定応力下において温度変化を伴う高温圧縮実験-, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.9-14, 2004
- 3) 常世田昌寿, 山下平祐, 豊田康二, 平島岳夫, 前田孝一, 上杉英樹 : 普通コンクリートの高温時ひずみに対する加熱速度の影響, 構造工学論文集 Vol.51B, pp.395-400, 2005
- 4) Takeo Hirashima, Koji Toyoda, Heisuke Yamashita, Masatoshi Tokyoda, Hideki Uesugi : Compression Tests of High-Strength Concrete Cylinders at Elevated Temperature, International Workshop, “Fire Design of Concrete Structures from Materials Modeling to Structural Performance”, University of Coimbra, Portugal, pp.47-58, 2007.11
- 5) Masatoshi Tokyoda, Heisuke Yamashita, Koji Toyoda, Takeo Hirashima, Hideki Uesugi : An Experimental Study of Transient Strain for a Concrete with Limestone Aggregate, International Workshop, “Fire Design of Concrete Structures from Materials Modeling to Structural Performance”, University of Coimbra, Portugal, pp.47-58, 2007.11
- 6) 山下平祐, 篠原幸一, 豊田康二, 常世田昌寿, 平島岳夫, 上杉英樹 : 火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究-その 3. 高温クリープ実験-, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.465-470, 2008
- 7) 豊田康二, 山下平祐, 常世田昌寿, 平島岳夫, 上杉英樹 : 火災加熱を受ける 100N/mm<sup>2</sup>級高強度コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 648 巻, pp.453-460, 2010
- 8) 森田武, 山下平祐, 別府万寿博, 鈴木誠 : 鉛直荷重を支持する鉄筋コンクリート造壁の火災時における変形挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 第 37 巻, pp.1009-1014, 2015
- 9) Takeshi Morita, Heisuke Yamashita, Masuhiro Beppu, Makoto Suzuki : A Study on Structural Behavior of Reinforced Concrete Walls Exposed to Hydrocarbon Fire under Vertical Load, 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Tsukuba, 2015.10
- 10) 山下平祐, 豊田康二, 常世田昌寿, 鈴木敏夫, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹 : 普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験

的研究（その 3. クリープひずみの定式化），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.31-32, 2002

11) 豊田康二, 山下平祐, 常世田昌寿, 鈴木敏夫, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 上杉英樹, 平島岳夫：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究（その 4. 過渡ひずみの定式化），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.33-34, 2002

12) 常世田昌寿, 豊田康二, 山下平祐, 鈴木敏夫, 菊田繁美, 高橋孝二, 堀昭夫, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究（その 5 過渡ひずみを含む構成則と検証実験），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.35-36, 2002

13) 平島岳夫, 常世田昌寿, 豊田康二, 山下平祐, 篠原幸一, 上杉英樹：高温加熱を受けるコンクリートの力学的特性に関する実験結果の比較－使用材料・調合の影響について，日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.135-138, 2003

14) 豊田康二, 山下平祐, 篠原幸一, 野中英, 近藤悟, 高橋孝二, 井上超, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学的特性に関する実験的研究（その 1. 超高強度コンクリートの熱膨張ひずみ），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.169-170, 2003

15) 山下平祐, 豊田康二, 篠原幸一, 野中英, 近藤悟, 高橋孝二, 井上超, 松戸正士, 中込昭, 吉田正友, 平島岳夫, 上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学的特性に関する実験的研究（その 2. 超高強度コンクリートの全体ひずみ），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.171-172, 2003

16) 篠原幸一, 山下平祐, 豊田康二, 安部武雄, 平島岳夫, 上杉英樹：高強度コンクリートの高温下における力学的性質に関する実験的研究（粗骨材寸法の影響），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.173-174, 2003

17) 篠原幸一, 山下平祐, 豊田康二, 平島岳夫, 上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学的特性に関する実験的研究（その 3. 定常状態における超高強度コンクリートのクリープひずみ），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp. 73-74, 2004

18) 山下平祐, 篠原幸一, 豊田康二, 平島岳夫, 上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学的特性に関する実験的研究（その 4. 超高強度コンクリートの過渡ひずみ），日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp. 75-76, 2004

19) 藤田大, 清峰俊太郎, 篠原幸一, 山下平祐, 平島岳夫, 上杉英樹：標準加熱を受ける高強度 RC 柱の熱変形解析，日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.89-90, 2004

20) 常世田昌寿, 山下平祐：拘束力を伴って 700°Cまで加熱されるコンクリートの熱間および冷間圧縮試験，日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 防火, pp.5-6, 2006

21) 山下平祐, 平島岳夫：載荷加熱を受ける高強度コンクリートのひずみに与える水分の影響，日本建築学会学術講演梗概集, 防火, pp.401-402, 2014

- 22) 山下平祐, 吉田徹, 平島岳夫 : 火災時におけるコンクリートの全体ひずみに与える水分の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.29-32, 2015
- 23) 吉田徹, 山下平祐, 平島岳夫 : 火災加熱を受けるコンクリートの重量減少, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.67-68, 2015
- 24) 山下平祐 : 高温時におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する考察, 安全工学シンポジウム 2009 講演予稿集, pp.222-225, 2009
- 25) 山下平祐, 常世田昌寿 : コンクリートの高温時特性, 安全工学シンポジウム 2010 講演予稿集, pp.214-217, 2010
- 26) 山下平祐, 吉田徹, 長谷川純希, 平島岳夫 : 載荷加熱を受ける高強度コンクリートのひずみに与える水分の影響, 安全工学シンポジウム 2014 講演予稿集, pp.374-377, 2014
- 27) 山下平祐, 常世田昌寿 : ユーロコードにおける耐火設計 (その 4) コンクリート・鋼複合構造物の耐火設計, 火災, Vol.55, No.4, pp.37-42, 2005

## 論文内容の要旨

### 火災加熱を受けるコンクリートの 載荷時熱ひずみに及ぼす水分の影響に関する実験的研究

山下 平祐

#### 1.研究の背景および目的

コンクリートが載荷されながら加熱を受ける際、熱膨張ひずみを打消す程大きな収縮ひずみが発生する。そのため、RC構造の火災応答解析においては、KhouryによってLITS（載荷時熱ひずみ）と定義されたこの収縮ひずみを考慮することが必要となる。応答解析のためのコンクリートに関する高温時ひずみ構成則の中では、載荷時熱ひずみはコンクリートの温度との関係で数式化されている。しかし、載荷時熱ひずみと温度の関係はコンクリート中の水分の影響を受けるため、水分条件（養生条件、水セメント比）の異なるコンクリートに温度を要因としたモデルを汎用的に適用することは難しい。一方、載荷時熱ひずみは加熱時におけるセメント水和物の物理的、化学的反応に伴い発生するため、載荷時熱ひずみをセメント水和物の脱水や分解で表すことができれば、両者の関係は水分の影響を包含した包括的なものになりえる。セメント水和物の脱水や分解は供試体の重量減少によって定量化できる。しかし、TGAから得た結果を用いたものを除くと、既往の研究において載荷時熱ひずみと供試体の重量の関係は検討されていない。本報では、全ひずみ実験から得られた結果を基に、載荷時熱ひずみに及ぼす養生条件および水セメント比の影響について検討する。また、水分条件の異なるコンクリートにも適用できる数式モデルを提案するため、載荷時熱ひずみと重量減少の関係について検討する。

#### 2.実験概要

実験条件は、コンクリート試験体の水セメント比（40%,50%,65%）と養生条件（絶乾（105°Cでの事前乾燥）、気乾、封かん）とした。絶乾試験体、気乾試験体、封かん試験体の含水率( $R_w$ )は、それぞれ0%, 2.7%, 6.1%だった。全ひずみ実験では、試験体に載荷した状態で1.5°C/分の加熱速度で800°Cまで加熱した。載荷時熱ひずみは、実験で計測された全ひずみから熱膨張ひずみを差引いて算出した。重量減少は、全ひずみ実験と同じ加熱速度による無載荷加熱実験により計測し、初期重量に対する重量減少量の百分率である $R_w$ で表した。

#### 3.実験結果と考察

載荷時熱ひずみに及ぼす水分蒸発の影響は100~200°Cで顕著だった。200°C以上では、封かん試験体の載荷時熱ひずみは気乾試験体よりも大きくなった。また、試験体の水セメ

ント比が小さいほど、200°C以上で荷時熱ひずみは大きくなった。荷時熱ひずみは、養生条件や水セメント比によらず応力レベルに比例して増加した。

荷時熱ひずみと重量減少の関係から、セメント水和物の脱水や分解に伴い生じる荷時熱ひずみは、水分蒸発に伴い生じるものよりはるかに大きいことが分かった。さらに、両者の関係は一つの曲線に収れんすることから、荷時熱ひずみと重量減少の関係はコンクリート中の水分の影響を包含したものになることが明らかになった。LITS と重量減少の関係を、実験結果から以下の数式モデルで定式化した。

$$LITS(R_{wl}, \sigma/\sigma_b) = 3.4 \cdot \sigma/\sigma_b \cdot LITS(R_{wl}, 0.3)$$

$$LITS(R_{wl}, \sigma/\sigma_b=0.3) = -785 \times R_{wl}^{0.43} \times 10^{-6} \quad [R_{wl} \leq R_{wc}]$$

$$LITS(R_{wl}, \sigma/\sigma_b=0.3) = (-785 \times R_{wc}^{0.43} - 560 \times (R_{wl} - R_{wc})^{2.39}) \times 10^{-6} \quad [R_{wl} > R_{wc}]$$

数式モデルの算出値は、応力レベル 0.3 の実験結果に対して概ね一致した。

#### 4. 結論

本研究において、荷時熱ひずみは、水分の蒸発よりもセメント水和物の脱水や分解による影響を大きく受けることが明らかになった。また、重量減少との関係を基に、荷時熱ひずみの包括的な数式モデルを提案した。

## SYNOPSIS

### An Experimental Study on Influence of Water on Load Induced Thermal Strain of Concrete at Elevated Temperatures in Fire Conditions

Heisuke Yamashita

#### 1. Introduction and Purpose

When a concrete specimen is heated under sustained load, great shrinkage occurs to compensate the thermal expansion. Therefore, in deformation analysis of RC structures in fire, considering this shrinkage defined as 'load-induced thermal strain (LITS)' by Khoury is needed. In the constitutive models of strains of concrete at high temperature for deformation analysis, LITS is generally formulated in terms of concrete temperature. Meanwhile, it is difficult to apply the model based on the temperature to the concrete with different water conditions (i.e. curing conditions and W/C), because the relationship between LITS and the temperature is influenced by water in the concrete. On the other hands, the relationship of LITS with dehydration and decomposition of the cement hydrate would be comprehensive and it includes the influence of water, because LITS occurs with physical and chemical reactions in the cement hydrate during heating. The dehydration and decomposition in the cement hydrate are able to be quantified with weight loss of the concrete specimen in high temperature. But the relationship between LITS and the weight loss of the specimen has not been considered in the previous study except the results obtained from TGA (Sabeur (2008)). In this study, the influence of curing conditions and water cement ratios on LITS is discussed on the basis of results obtained from transient tests for measuring the total thermal strain of concrete specimens. And, the relationship with weight loss of the specimens is considered to propose the comprehensive model of LITS to appreciate it for concrete with different water conditions.

#### 2. Outline of Tests

The test parameters are concrete specimen's water cement ratios (40%, 50%, 65%) and curing conditions (oven-dry, air-dry, sealed curing). The water contents ( $R_{we}$ ) of the oven-dried, air-dried and sealed specimens were approximately 0%, 2.7% and 6.1%, respectively. In the transient tests for measuring total thermal strain, specimens were heated at a constant rate of 1.5°C/min up to 800°C under a sustained load  $\sigma$ . LITS were calculated by subtracting the values of the thermal expansion from the total thermal strain measured from the transient tests. The weight loss of the specimen was obtained

from no-loading transient tests using the same heating rate with the tests for the total thermal strain. The weight loss is expressed as the percentage ( $R_w$ ) of the weight loss and the initial weight.

### 3. Results of Tests and Considerations

The influence of water evaporation on LITS of concrete was evident between 100°C and 200°C. LITS were greater for the sealed specimens than for the air-dried specimens above 200°C. The lower the water cement ratio of the specimens was, the greater the LITS were above 200°C. LITS was increased linearly with the applied load regardless of the curing conditions and water cement ratios. From the relationship between LITS and the weight loss, it is clarified that the main factor of LITS was not the water evaporation but the dehydration and decomposition of the cement hydrate. Furthermore, as the relationships of them converge on one relationship regardless of the specimen's water conditions, it is clarified that the relationship with the weight loss becomes to be comprehensive relationship including the influence of the water in concrete. The relationship between LITS and the weight loss is able to be formulated with the following numerical model from the results of the tests.

$$LITS(R_w, \sigma/\sigma_b) = 3.4 \cdot \sigma/\sigma_b \cdot LITS(R_w, 0.3)$$

$$LITS(R_w, \sigma/\sigma_b=0.3) = -785 \times R_w^{0.43} \times 10^{-6} \quad [R_w \leq R_{wc}]$$

$$LITS(R_w, \sigma/\sigma_b=0.3) = (-785 \times R_{wc}^{0.43} - 560 \times (R_w - R_{wc})^{2.39}) \times 10^{-6} \quad [R_w > R_{wc}]$$

The calculated values obtained from these numerical models indicate reasonable agreement with the experimental values.

### 4. Conclusions

In this study, it is clarified that the LITS is influenced by the dehydration and decomposition of the cement hydrate much more than the water evaporation. And, the comprehensive numerical model is proposed on the basis of the relationship with the weight loss of the specimens.