「標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における耐力低下に関する実験的研究」

2016 年　7 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

金城　仁

（千葉大学審査学位論文）

「標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における耐力低下に関する実験的研究」

2016 年　7 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

金城　仁

目　　次

第１章　序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
１．１　研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２
１．２　既往の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３
　１．２．１　標準火災加熱を受ける木構造部材の炭化性状および断面内温度・・・・・３
　１．２．２　標準火災加熱を受ける木構造部材の耐力・・・・・・・・・・・・・・・・・７
１．３　研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９
１．４　本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
第１章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１

第２章　標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度・・・・１３
２．１　実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
２．２　実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
　２．２．１　試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
　２．２．２　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
２．３　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０
　２．３．１　炭化性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０
　　２．３．１．１　残存断面における断面性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３４
　　２．３．１．２　放冷過程における炉内空気供給量の影響・・・・・・・・・・・・・３５
　　２．３．１．３　載荷および非載荷による影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３６
　２．３．２　断面内温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４０
　　２．３．２．１　放冷過程における炉内空気供給量の影響・・・・・・・・・・・・・４１
　　２．３．２．２　載荷および非載荷による影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４２
２．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８
第２章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４９

第３章　標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下・・・・・・・・・・・・・・・・・・５０
３．１　実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５１
３．２　実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
　３．２．１　試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
　３．２．２　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５３
３．３　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５４
　３．３．１　火災加熱前の耐力および剛性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５４
　３．３．２　火災加熱終了後および放冷過程での耐力・剛性低下・・・・・・・・・・・５５
３．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６０
第３章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６１

第４章　標準火災加熱時とその放冷過程における梁のたわみ・破壊性状・・・・・・・・６２
４．１　実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６３
４．２　実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
　４．２．１　試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
　４．２．２　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６５
４．３　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６６
　４．３．１　たわみ挙動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６６
　４．３．２　破壊性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７０
４．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７２
第４章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７３

第５章　構造用集成材梁の火災時および放冷過程における耐力計算・・・・・・・・・・７４
５．１　耐力計算の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７５
５．２　高温耐力低下を考慮しない耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
５．２．１　燃えしろ設計による耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
５．２．２　残存断面法による耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・７７
５．２．３　耐力計算結果と実験結果の比較・・・・・・・・・・・・・・・・７９
５．３　高温耐力低下を考慮した耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
５．３．１　構造用集成材の高温時における強度特性・・・・・・・・・・・・８１
５．３．２　高温耐力低下を考慮した耐力計算手法・・・・・・・・・・・・・８２
５．３．３　耐力計算結果と実験結果の比較・・・・・・・・・・・・・・・・８６
５．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８９
第５章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９０

第６章　結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９１
６．１　本研究の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９２
６．２　今後の研究課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９４

資料編・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９５
資料１　実験結果のグラフ(温度・荷重・たわみ・ひずみ)・・・・・・・・・・９６
資料２　試験体の素材データ(密度)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２８
資料３　実験時の状況(写真)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３２
資料４　実験後の試験体炭化深さ計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・１９０
資料５　実験後の残存断面より算定した断面性能計算結果・・・・・・・・・・１９３

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０８

発表論文・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１０

付　録　論文要旨・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１６
付録１　和文要旨・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１７
付録２　SYNOPSIS・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２２７

第１章　序論

１．１　研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２
１．２　既往の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３
　１．２．１　標準火災加熱を受ける木構造部材の炭化性状および断面内温度・・・・・３
　１．２．２　標準火災加熱を受ける木構造部材の耐力・・・・・・・・・・・・・・・７
１．３　研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９
１．４　本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
第１章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１

１．１　研究の背景

近年、森林資源や林業の健全化および低炭素化による環境配慮等の視点から、耐火構造の要件を満たす木質構造部材（以下、耐火木質構造部材）の開発が進み、大規模な木造耐火建築物が増加している[1)]。2000 年の改正建築基準法の施行により、耐火木質構造部材の国土交通大臣認定取得が可能となり、木造でも耐火建築物を設計することが可能となった。これらが引き金となり、様々な防耐火構造の技術開発が継続的に行われてきている。その後、2010 年 10 月の公共建築物等の木材の利用促進に関する法律が施行され、2015 年 6 月に大規模木造建築関連の法令（建築基準法第 21 条、第 27 条）が改正された。近年、環境問題等を背景に大規模木造建築に関連する法令が大きく変わってきたことも、大規模木造建築の実現を後押ししている。

可燃材料である木質構造は、盛期火災後の火災減衰期(建物内部にある可燃物の燃焼後）においても、部材の自己燃焼が継続して耐火性能が失われる恐れがある。そのため木質構造部材の国土交通大臣認定に係わる耐火性能評価では、所定の加熱時間までの性能のみならず、火災加熱終了後の残炎・赤熱および残煙がなくなる燃え止まり性能も要求されている[注 1)]。これより、耐火木質構造部材に関する我が国の研究開発では、木質材料を難燃処理した工法[2)]、構造用集成材を基本とした木質構造部材の内部に不燃材料（モルタルブロック等）を挿入した工法[3)]など、火災加熱終了後の燃え止まり性能に着眼したものが多い。

一方、大断面の構造用集成材による柱・梁について、火災加熱終了後の放冷過程をも含めた非損傷性能（具体的には耐力低下の推移）を把握することは重要である。しかしながら、所定の時間に対する非損傷性能（変形量および変形速度が制限値を超えないこと）を確認するための耐火性能評価試験[4)]では、不合格となる試験体を除き、放冷過程を含めた火災時耐力（破壊が生じた時間に対応する耐力）に関するデータは得られない。よって、火災加熱終了後の放冷過程の耐力低下に言及した研究はなく、構造用集成材梁の火災加熱終了後の放冷過程における挙動は未だ明らかでない。火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における挙動を把握するためには、放冷過程における炭化性状、断面内温度分布および火災時耐力を定量的に把握する必要がある。木質構造の耐火性能を火災加熱終了後の放冷過程まで詳細に把握することができれば、将来的には木質構造部材の適用可能性が拡がる。

このような背景のもと、標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における耐力低下を検討するために、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施した。

注 1)　燃え止まり性能の要求に関する公的資料はなく、指定性能評価機関が定める業務方法書には規定されていないが、指定性能評価機関における統一的な評価基準として公表および運用されている。

１．２　既往の研究

１．２．１　標準火災加熱を受ける木構造部材の炭化性状および断面内温度

木材は燃焼が進むにつれて、炭化した部分と未炭化の部分の境界面である炭化境界面も部材内部に向かって進行する。炭化境界面が部材内部へ進行すると、部材断面が焼損することで構造耐力上、危険が及ぶ。既往の研究においても、木材の炭化部分と未炭化部分では、機械的強度が著しく異なることが示されている[5)]。したがって、建築材料の火災安全性を検討する上で、木材の炭化速度は重要な因子とみなされ、ISO834-1[6)]による標準火災加熱を受ける木材の炭化速度に関する多くの研究が行われている。大断面集成材の火災時の炭化性状に関する実験的研究は国内でも数多く実施され[7)~12)]、木材の炭化速度は概ね 0.5～0.8㎜/分の範囲にあることが知られている。1985 年、中村らは、大断面集成材の柱・梁部材について、含水率および比重と炭化速度の関係について耐火試験後の残存断面寸法より炭化速度を計算した[8)]。その結果を表 1.1 に示す。

表 1.1 大断面集成材柱・梁の平均炭化速度[8)]

柱				梁			
試験体			炭化速度	試験体			炭化速度
樹　種	含水率(%)	気乾比重	(mm/分)	試験体	含水率(%)	気乾比重	(mm/分)
トドマツ集成材	8.5	0.42	0.60	ベイツガ集成材	9.7	0.59	0.63
トドマツ集成材	8.1	0.44	0.69	ベイツガ集成材	10.6	0.59	0.67
トドマツ集成材	6.6	0.44	0.63	ベイツガ集成材	10.1	0.47	0.66
トドマツ集成材	7.2	0.41	0.67	ベイツガ集成材	9.3	0.46	0.68
トドマツ集成材	6.7	0.43	0.66	トドマツ集成材	11.0	0.47	0.55
トドマツ集成材	6.0	0.41	0.58	トドマツ集成材	10.5	0.48	0.56
ベイマツ集成材	9.6	0.58	0.71	トドマツ集成材	10.9	0.47	0.57
スギ集成材	15.2	0.42	0.74	スギ集成材	13.6	0.41	0.59
				スギ集成材	11.0	0.48	0.60

また、大断面製材の炭化速度については、2003 年に文献 10)において示されている。一覧を表 1.2 に示す。その報告書では、カラマツ部材の炭化速度はスギ部材よりも小さい傾向にある。ただし、製材の場合は含水率のバラツキが大きく、炭化速度も含水率のバラツキの影響を受けるのが分かる。

表 1.2 大断面製材柱・梁の平均炭化速度[10)]

樹種・種類（断面寸法）	加熱時間	含水率	絶乾比重	炭化速度	炭化深さ	含水率補正後（MC=15%）		比重・含水率補正後（ｽｷﾞ0.330、ｶﾗﾏﾂ0.435）（MC=15%）	
						炭化速度	炭化深さ	炭化速度	炭化深さ
	（分）	（%）		（mm/分）	（mm）	（mm/分）	（mm）	（mm/分）	（mm）
スギ柱（18cm×18cm）	45	15.3	0.34	0.78	35.1	0.78	35.3	0.79	35.6
スギ柱（24cm×24cm）	45	32.4	0.34	0.58	26.1	0.74	33.3	0.75	33.5
スギ柱（30cm×30cm）	45	46.4	0.32	0.61	27.5	1.07	48.0	1.05	47.4
スギ柱（30cm×30cm）	60	47.1	0.30	0.55	33.0	0.93	55.9	0.90	54.2
スギ梁（15cm×30cm）	30	13.3	0.32	0.80	24.0	0.78	23.4	0.77	23.2
スギ梁（15cm×30cm）	45	9.7	0.33	0.67	30.2	0.62	28.0	0.62	28.0
スギ梁（18cm×36cm）	45	18.0	0.35	0.76	34.2	0.80	36.0	0.81	36.6
スギ梁（24cm×40cm）	45	41.8	0.32	0.51	23.0	0.71	32.2	0.71	31.9
スギ梁（24cm×40cm）	45	41.8	0.32	0.47	21.2	0.73	28.5	0.63	28.3
カラマツ柱（18cm×18cm）	30	19.3	0.65	0.66	19.8	0.70	21.0	0.81	24.4
カラマツ柱（18cm×18cm）	45	19.3	0.65	0.64	28.8	0.68	30.6	0.80	36.0
カラマツ柱（24cm×24cm）	45	19.7	0.63	0.56	25.2	0.59	26.7	0.67	30.1
カラマツ柱（30cm×30cm）	45	24.6	0.60	0.59	26.6	0.67	30.2	0.76	34.0
カラマツ柱（30cm×30cm）	60	24.6	0.60	0.50	30.0	0.56	33.5	0.62	37.1
カラマツ梁（15cm×30cm）	30	15.9	0.45	0.65	19.5	0.66	19.7	0.66	19.9
カラマツ梁（15cm×30cm）	45	15.9	0.45	0.54	24.3	0.55	24.5	0.55	24.7
カラマツ梁（18cm×36cm）	45	10.8	0.60	0.61	27.5	0.58	26.1	0.64	28.8
カラマツ梁（24cm×40cm）	45	48.1	0.56	0.55	24.8	0.91	40.9	1.04	46.7
カラマツ梁（24cm×40cm）	60	48.1	0.56	0.48	28.8	0.74	44.6	0.83	49.8

近年では、木材の炭化性状について標準火災加熱以外の条件下での加熱実験も実施され、ユーロコード 1 のパラメトリック温度時間曲線（開口因子を変え、高温短時間火災と低温長時間火災を再現）と標準火災温度時間曲線による実験結果を比較した Lange らの研究[13]など、様々な火災条件を想定した場合の炭化速度に関するデータも蓄積されつつある。

Lange[13]らは図 1.1 に示す 3 つの加熱条件による実験を行い、それぞれのケースによる炭化性状(炭化速度)の違いについて報告されている。図 1.2 に示すように、高温短時間加熱(Test3)の場合は加熱初期段階から炭化速度が上昇し、炭化深さ 20㎜ 到達時の炭化速度が約 1.1㎜/分、50㎜ の場合でも 0.7㎜/分となっており一般的な炭化速度と比較して進行が速い。その一方で、低温短時間加熱(Test4)では炭化深さ 10㎜ 到達時で約 0.2㎜/分、それ以降も炭化速度は約 0.3㎜/分程度と比較的炭化の進行は遅くなることを示している。標準加熱の場合の炭化速度は、載荷(Test1)と非載荷(Test2)で炭化速度に違いが生じており、炭化深さ 0～50㎜ において約 0.5㎜/分と約 0.7㎜/分の違いが生じている。ただし、0～40㎜ 以下の結果では、載荷と非載荷の違いはあまり見られない。

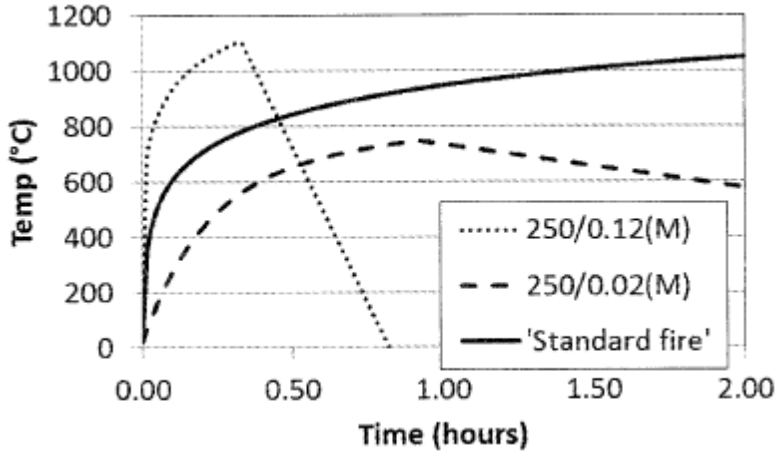


図 1.1 標準加熱温度曲線とパラメトリック温度時間曲線[13]

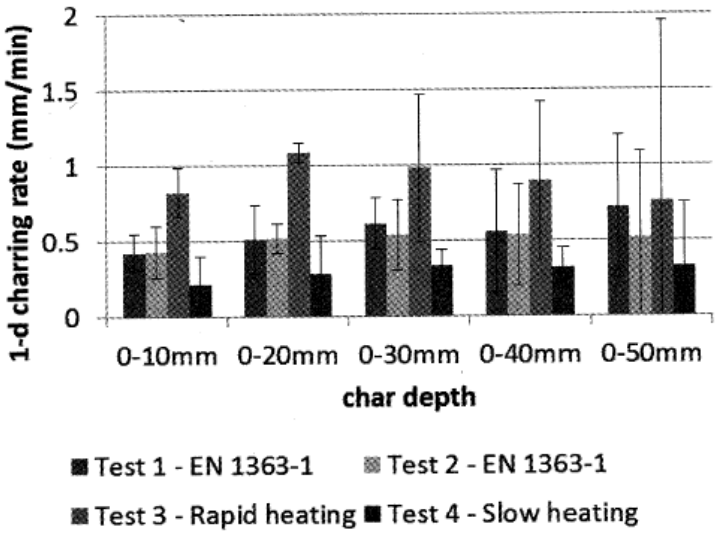


図 1.2 標準火災加熱以外の条件下による炭化速度への影響[13]

構造用集成材の火災加熱時における内部温度についても、文献 14)において報告がある。中村[14)]らは、構造用集成材梁の載荷加熱実験を行い、重ね梁仕様の断面内部温度が、梁幅 160㎜ の試験体において側面から 10㎜ の位置における温度が 45 分で約 780℃まで上昇するのに対し、側面から 40㎜ の位置で約 150℃程度、梁断面中央では 50℃以下であり、火災加熱時においては、未炭化領域となる内部温度は殆ど上昇しないことが示されている。温度分布を図 1.3 に示す。

一方で、火災加熱終了後の放冷過程における内部温度についての報告もある。大橋らは[15)]、カラマツ構造用集成材と不燃材料であるモルタルブロックで構成された柱部材について、１時間の標準火災加熱実験を行い、その後放冷 5 時間までの内部温度分布について報告している。断面内温度分布を図 1.4 に示す。火災加熱時においては、図 1.3 同様に断面内部の温度は 50℃以下と低い。しかし、火災加熱終了後の放冷過程において、断面内部の温度が徐々に上昇し始め、図中の■で示されている部分の温度は放冷 1 時間経過時点で 100℃まで上昇し、その後停滞し、放冷 4 時間経過頃から徐々に下降を示している。

また、燃え止まり性状について木材の樹種の違いで比較を行った報告もある[16)]。文献 16)において、H 形鋼を木材で被覆した鋼材内蔵型の燃え止まり柱部材について、木材の樹種をスギ、カラマツおよびベイマツの３種類で比較し、１時間の標準火災加熱実験を行っている。それぞれ小断面（鋼材寸法：H150）および大断面（鋼材寸法：H300）で実験を行い、カラマツおよびベイマツについては、各断面ともに燃え止まりが確認されたのに対し、スギについてはすべての試験体で燃え止まりは確認されなかった。前述した文献 15)において、木材の密度が大きい程木材表面温度は低くなり、密度が小さいと木材表面の温度は高くなることが示されており、文献 16)における３つの樹種においても、最も密度が小さいスギだけが燃え止まらなかった。これらのことから、本論文においては、スギよりも燃え止まり性状に優れているカラマツを選択して、実験的研究を行う。

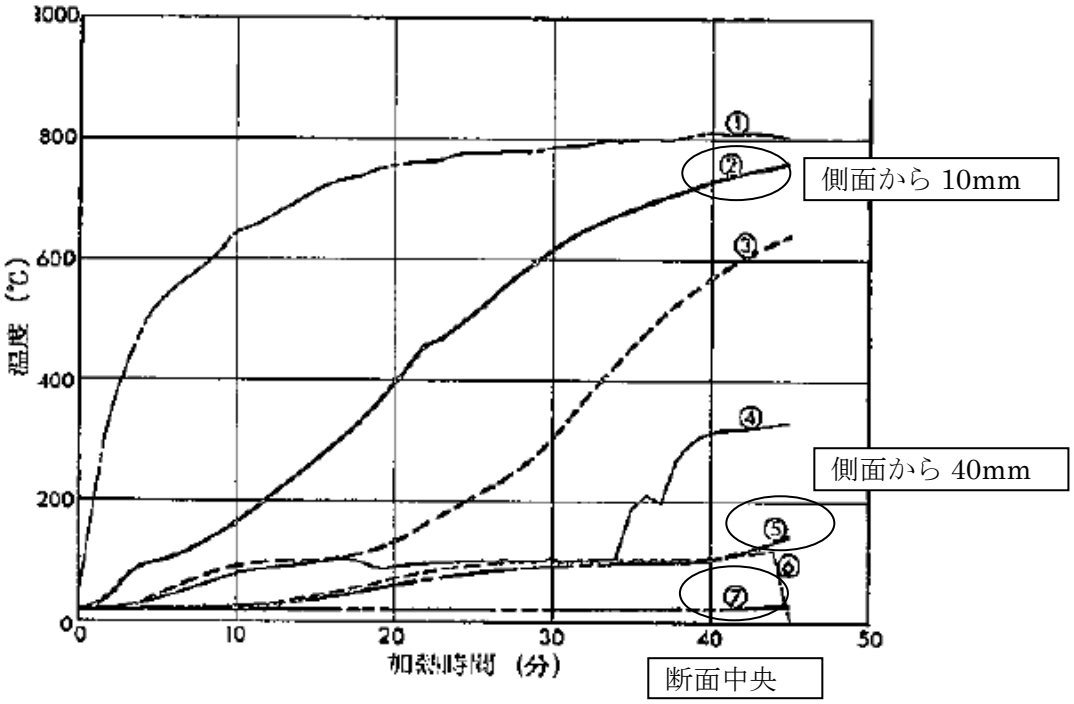


図 1.3 火災加熱時における構造用集成材梁の断面内温度 [14)]

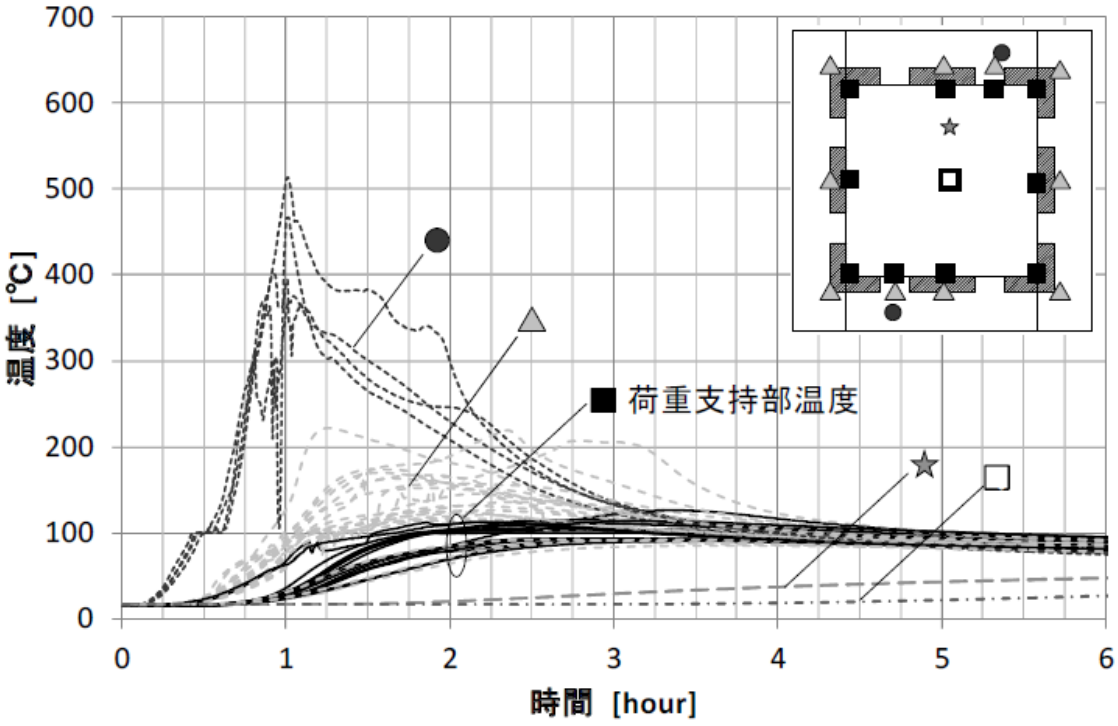


図 1.4 火災加熱終了後の放冷過程における構造用集成材柱の断面内温度 [15)]

１．２．２　標準火災加熱を受ける木構造部材の耐力

火災加熱時における耐火性能を把握する準耐火構造については、耐火構造と異なり火災加熱終了後の要求がないため、構造用集成材梁の火災時耐力について参考となる載荷加熱実験結果がある。構造用集成材梁については、表 1.3 に示すように、最上ら[17]・須藤ら[18]・西田ら[19]・田中ら[20]によって、長期許容応力度を指標とした荷重レベルに対する耐火時間（破壊時間）が報告されている。樹種としてはカラマツのデータが最も多く、その他ではスギ・ベイツガ・トドマツ・オウシュウアカマツのデータがある。梁の断面寸法は、梁背が 240～518mm で、アスペクト比（梁幅に対する梁背の比）は 2.0～2.45 である。実験から得られた耐火時間は49分～85分であり、45分と60分の準耐火性能を念頭に置いた研究が多い。実験結果の考察については燃えしろ設計[21]に関するものが多く、その考察における炭化速度には 0.6～0.7mm/分[17]，0.65～0.75 mm/分[18]，0.7 mm/分[19]が用いられ、燃えしろ設計の妥当性が示されている。また、ユーロコード 5[22]の残存断面法に基づく計算により、実験値が計算値と概ね対応することも示されている[20]。文献 20)と同様に、ユーロコード 5 の残存断面法を用いた計算結果と表 1.3 に示す実験結果の耐火時間を比較したものを図 1.5 に示す。実験結果には試験体のばらつき等が含まれるが、火災加熱時の耐力については未炭化領域を有効断面とする残存断面法で概ね推定できていることが分かる。

火災加熱終了の放冷過程における耐力については、蛇石ら[23]によって難燃薬剤処理された耐火集成材の小断面梁部材（幅 240×背 180）が、加熱 1 時間終了後の放冷過程（254 分）において、曲げ破壊により破断したことが報告されている。上述した準耐火構造における火災時耐力についての実験的研究と比較して、耐火構造で要求されている火災加熱終了後の放冷過程における火災時挙動について言及した実験的研究は殆ど無いのが現状である。

表 1.3 構造用集成材梁の耐火時間に関する既往の実験結果 [17)～20)]

文献	樹種	断面[mm]	載荷条件 *1	耐火時間	破壊形式 *2
17)	ベイツガ	516×212	F_b×1.2	52.0 分	曲げ破壊
17)	ベイツガ	518×211	F_b×1.2	71.0 分	せん断破壊
18)	カラマツ	300×150	F_b×1.0	62.4 分	曲げ破壊
18)	カラマツ	400×180	F_b×1.0	85.5 分	載荷点で破壊
18)	トドマツ	300×150	F_b×1.0	62.4 分	載荷点で破壊
18)	トドマツ	400×180	F_b×1.0	73.0 分	曲げ破壊
18)	スギ	300×150	F_b×1.0	49.4 分	曲げ破壊
18)	スギ	400×180	F_b×1.0	66.9 分	載荷点で破壊
19)	カラマツ	300×150	F_b×0.76	56.5 分	曲げ破壊
19)	スギ	300×150	F_b×0.76	66.0 分	曲げ破壊
19)	ｵｳｼｭｳｱｶﾏﾂ	300×150	F_b×0.74	61.5 分	曲げ破壊
19)	カラマツ	240×120	F_b×0.55	56.5 分	曲げ破壊
20)	カラマツ	300×150	F_b×1.0	43.5 分	曲げ破壊
20)	カラマツ	300×180	F_b×1.0	46.5 分	載荷点で破壊

*1：F_bは長期許容曲げ応力度。表中の応力度に対応する荷重が載荷された。

*2：梁中央部の等曲げ区間での破壊は，曲げ破壊と記載している。

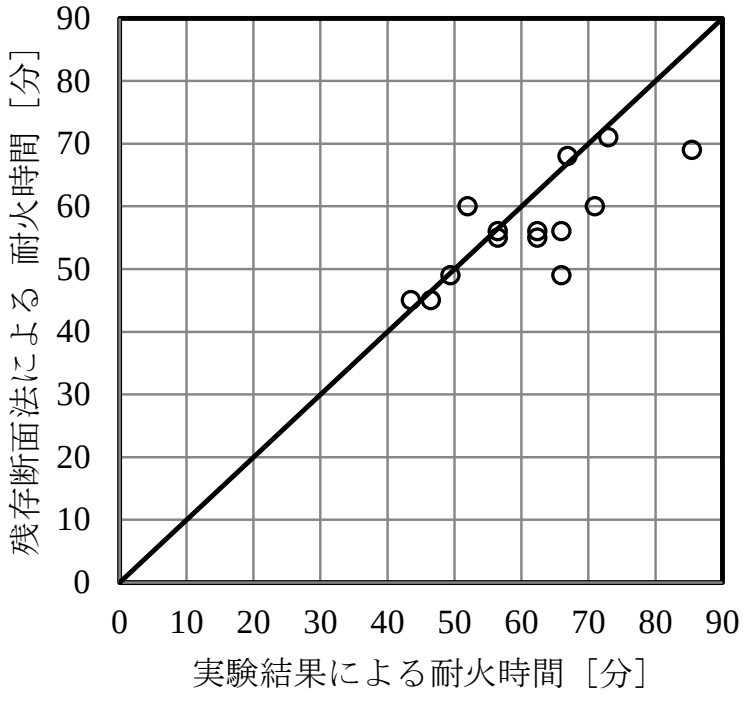


図 1.5 既往の実験結果(表 1.3)とユーロコード 5 の残存断面法による計算結果の比較

１．３　研究の目的

１．１節「研究の背景」で記述したように、木質構造部材については、盛期火災後の火災減衰期（建物内部にある可燃物の燃焼後）においても、部材の自己燃焼が継続して耐火性能が失われる恐れがあるため、耐火木質構造部材の燃え止まり性能に関する研究が多く進められている。木質構造部材としての耐火性能を考えた場合、部材自身の非損傷性能（具体的には耐力低下の推移）は重要であり、火災加熱時のみならず、火災加熱終了後の放冷過程においても把握する必要がある。火災加熱時のデータとしては、準耐火性能を把握するためのデータがあり、燃えしろ設計あるいはユーロコード 5 における残存断面法を用いることで、火災加熱時の耐力は概ね予測できることが既往の研究からも示されている。火災時の耐力低下に起因する炭化性状についても、火災加熱時については多くの研究報告により明らかにされている。しかしながら、耐火木質構造部材の火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下に言及した報告はなく、放冷過程における耐力および炭化性状についてのデータはない。

そこで、本研究では、カラマツ集成材の梁を対象とし、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施して 1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程における耐力低下傾向を明らかにし、火災時および放冷過程における高温耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行うことを目的とする。

以下、本目的を達成するために検討した具体的項目を記述する。

（１）標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度

カラマツ集成材梁の加熱実験および載荷加熱実験により、火災時および火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状と断面内温度を取得する。

（２）標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下

カラマツ集成材梁の加熱後載荷実験および載荷加熱実験により、火災時および火災加熱終了後の放冷過程における耐力および剛性低下を把握する。

（３）標準火災加熱時とその放冷過程における梁のたわみ・破壊性状

カラマツ集成材梁の載荷加熱実験により、火災時および火災加熱終了後の放冷過程におけるたわみ挙動と破壊性状を踏まえた耐力低下傾向を把握する。

（４）構造用集成材梁の火災時および放冷過程における耐力計算

上記（１）の実験結果より得られた炭化性状・温度を元に、カラマツ集成材梁の火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下計算を行い、上記（２）と（３）の実験結果と比較する。火災加熱時の計算については、建築基準法告示による燃えしろ設計およびユーロコード 5 における残存断面法を用いて検討する。火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算については、高温耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行う。

１．４　本論文の構成

本研究論文は、以下に述べる全６章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第１章　序論

第２章　標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度

第３章　標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下

第４章　標準火災加熱時とその放冷過程における梁のたわみ・破壊性状

第５章　構造用集成材梁の火災時および放冷過程における耐力計算

第６章　結論

第１章「序論」では、本研究の背景を述べ既往の研究を整理し、本研究の目的を記述した。

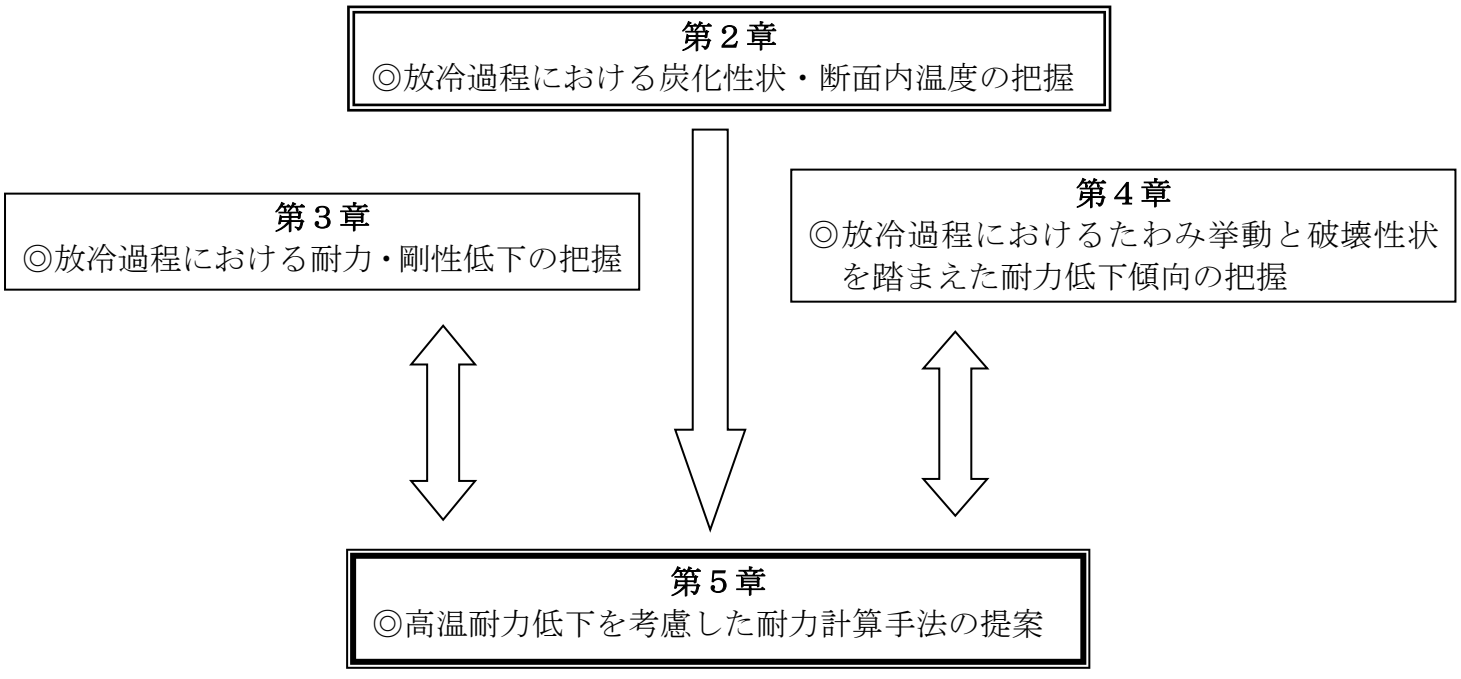
第２章「標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度」では、カラマツ集成材梁を対象とした加熱実験および載荷加熱実験により、火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状および断面内温度を把握した。

第３章「標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下」では、カラマツ集成材梁を対象とした加熱後載荷実験および載荷加熱実験により、火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における梁の耐力・剛性低下を把握した。

第４章「標準火災加熱時とその放冷過程における梁のたわみ・破壊性状」では、カラマツ集成材梁を対象とした載荷加熱実験により、火災加熱終了後の放冷過程における梁のたわみ挙動と破壊性状を踏まえた耐力低下傾向を把握した。

第５章「構造用集成材梁の火災時および放冷過程における耐力計算」では、火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下について、２章で得られたデータを元に、燃えしろ設計および残存断面法による実験値との比較検討を行うとともに、放冷過程における高温耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行った。

第６章「結論」では、各章で得られた研究成果をまとめて示すとともに、標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における火災時耐力を把握する上での今後の研究課題について言及した。



第１章の参考文献

1) 原田寿郎, 日本建築学会・木質材料耐火性 WG：木質材料の耐火性, 日本建築学会・防火委員会・構造材料耐火性小委員会・構造材料耐火性シンポジウム資料, pp.35-50, 2013.3

2) 宮本圭一, 抱憲誓, 西村光太, 服部順昭, 安藤恵介, 石垣弘之, 原田寿郎, 上川大輔, 宮林正幸, 大内富夫：耐火集成材の開発 その 7, ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材梁の載荷加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.323-324 2009.8

3) 集成材建築物設計の手引：日本集成材工業協同組合 編著 大成出版社 p.170, 2012.5

4) (一財)ベターリビング制定　防耐火性能試験・評価業務方法書 平成 12 年 6 月 1 日制定/平成 27 年 6 月 1 日最終変更

5) E.L. Schaffer, STATE OF STRUCTURAL TIMBER FIRE ENDURANCE[1,2], Wood and Fiber, 9 (2),pp.145-171 (1977)

6) ISO 834-1: Fire－resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999

7) 今泉勝吉：木材工業, 31 (11), pp.502-504, 1976.

8) 中村賢一, 宮林正幸：木材工業, 40 (12), pp.563-567, 1985.

9) 上杉三郎：木材学会誌, 40 (4), pp.424-428, 1994.

10) 日本住宅・木材技術センター：地域を活かした新事業・起業創出緊急対策事業 製材耐火性能開発事業報告　pp.1-96, 2003.7

11) 成瀬友宏, 中村賢一, 遊佐秀逸, 増田秀昭, 原田寿郎, 山田誠, 佐藤章：構造用製材の耐火性能 その1, スギとカラマツの炭化速度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.11-12 2004.8

12) 河原崎政行, 戸田正彦, 田坂茂樹：火災時におけるカラマツ集成材の炭化の進行と密度の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.281-282 2008.9

13) David Lange, Lars Bostrom, Joachim Schmid and Joakim Albrektsson, Charring rate of timber in natural fires, 8th International Conference on Structures in Fire, pp. 521-528, 2014.

14) 中村賢一, 最上淀二：構造用集成材の耐火性能実験, 建築研究資料, pp.19-23, 1985.

15) 大橋宏和, 長岡勉, 永盛洋樹, 高橋拡, 山本正人,杉田敬太郎, 遊佐秀逸, 大宮喜文, 山田誠, 齋藤潔：耐火木造部材の荷重支持部の木材密度が耐火性能に与える影響, 日本建築学会技術報告集 第 21 巻 第47号 pp.151-156 2015.2

16) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人 建築研究所, 財団法人 日本建築センター：木質複合建築構造技術の開発 平成 14 年度報告書 防火分科会　pp.27-71, 2003.3

17) 最上淀二, 中村賢一, 山田誠, 上杉三郎, 宮林正幸：構造用集成材はりの耐火試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系 pp.2789-2790 1983.9

18) 須藤昌照, 山田誠, 宮林正幸, 吉川利文, 中村賢一：構造用集成材・単板積層材の耐火性能, 梁の載荷加熱試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.147-148 2000.9

19) 西田一郎, 山田誠, 宮林正幸, 中村賢一:API 接着剤を用いた構造用集成材の耐火性能に関する研究 その 2, 燃えしろ設計を適用したはり部材の載荷加熱試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.23-24 2005.9

20) 田中義昭, 河原崎政行, 戸田正彦:木質被覆材を用いたカラマツ集成材梁の準耐火性能の検討 その2, 載荷加熱試験による評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.315-316 2009.8

21) 昭和 62 年建設省告示第 1902 号および平成 12 年建設省告示第 1380 号

22) BS EN1995-1-2: 2004, Eurocode 5 Design of timber structures, Part1-2: General-Structural fire design.
23) 蛇石貴宏，石垣弘之，西出直樹，片岡弘行，服部順昭，安藤恵介，原田寿郎，上川大輔，宮林正幸，西村光太：実用化に向けた難燃薬剤処理スギラミナを活用した耐火集成材の開発 その 3，柱・梁の実大載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）pp.101-102 2015.9

第２章　標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度

２．１　実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４
２．２　実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
２．２．１　試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
２．２．２　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
２．３　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０
２．３．１　炭化性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０
２．３．１．１　残存断面における断面性状・・・・・・・・・・・・・・・・３４
２．３．１．２　放冷過程における炉内空気供給量の影響・・・・・・・・・・３５
２．３．１．３　載荷および非載荷による影響・・・・・・・・・・・・・・・３６
２．３．２　断面内温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４０
２．３．２．１　放冷過程における炉内空気供給量の影響・・・・・・・・・・４１
２．３．２．２　載荷および非載荷による影響・・・・・・・・・・・・・・・４１
２．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８
第２章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４９

２．１　実験目的

標準火災加熱を受ける大断面集成材の炭化性状に関する実験は国内でも数多く実施され[1)~6)]、木材の炭化速度は概ね 0.5～0.8㎜/分の範囲にあることが示されている。一方、火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状を段階的に調べた実験はない。木質構造部材の放冷過程における耐力低下を詳細に把握するには、放冷過程における炭化性状の把握は重要である。火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状は炉内空気供給量の影響を受けることが予測され、載荷の影響も受ける可能性もある。実際の火災においても、火災室内への空気の流入は十分に考えられ、新鮮空気の増加による燃焼継続による炭化の進行も懸念される。しかしながら、炉内空気供給量および載荷条件が火災加熱後放冷過程の炭化性状に及ぼす影響は詳細に検討されていない。

火災加熱終了後の放冷過程における大断面集成材の火災時断面内温度に関するデータは近年増えている。木材の熱伝導率は極めて小さいため、火災加熱中における非炭化領域の温度は比較的低い。しかし火災加熱終了後でも非炭化領域内部の温度は緩やかに 100℃位にまで上昇して停滞する傾向がある[7)]。しかし、火災加熱終了後の放冷過程における耐力の低下および回復に着目して断面内温度を分析した報告は少ない。集成材の一定高温度の圧縮実験結果[8)]から、含水変化時に圧縮強度が大きく低下し、水分蒸発後は圧縮強度が回復することが示されている。したがって、木質構造部材の火災時断面内温度に関しては、最高温度履歴の他、非炭化領域の断面全体としての温度が降下し始める時間にも着目すべきである。また前述した炭化性状と同様、炉内空気供給量および載荷条件が火災加熱終了後の放冷過程における断面内温度に及ぼす影響については考察されてない。

このような背景のもと、火災加熱終了後の放冷過程における木質構造梁の耐力低下を分析するための基礎データを得ることを目的として、1 時間の標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁の火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状および断面内温度を取得するために加熱実験および載荷加熱実験を実施した。本章ではこれらの実験概要と実験結果を述べる。

２．２　実験計画

２．２．１　試験体

実験内容および実験条件を表 2.1 に示す。試験体は全部で 4 体である。梁試験体の樹種はカラマツ(長野県産)、強度等級は E95-F315 とした。同一等級構成集成材を用い、ラミナの厚さを 30mm とし、合計 14 層のラミナで構成した。集成材の接着には、一次接着および二次接着ともにレゾルシノール・フェノール樹脂系接着剤を用いた。試験体内部に熱電対を挿入していない試験体 LF(0.2)については、二次接着はされていない。塗布量は 350g/m^2、圧締条件は 0.8～1.0MPa、圧締時間は 15 時間以上とした。梁試験体の寸法は幅 210mm×成 420mm×長さ 6,000mm とした。今回の構造用集成材の幅については、1 枚のラミナで製造可能な最大幅である。梁せいは、梁部材のせん断破壊の先行を避けるために断面のアスペクト比を１：２という割合で設定した。本断面は、ある集成材メーカーの 2007 年から 2011 年までの梁集成材の断面データと比較してやや大きい。試験体ラミナサンプルの密度平均値は加熱実験(F(0),F(0)IA)は 0.51 g/cm^3～0.53 g/cm^{3}程度、載荷加熱実験（LF(0.2),LF(0.4)）は 0.45 g/cm^3～0.47 g/cm^{3}程度の値であった。JIS Z 2101 の木材の含水率測定方法（全乾法）により得られた含水率の平均値は加熱実験および載荷加熱実験の試験体ともに 11%程度であり、一般的な木材における値と概ね大差はなかった。

表 2.1 に示した F(0)および F(0)IA の加熱実験試験体は、6,000mm の梁試験体から長さ 680mm の試験体を 5 つ切り出した。F(0)および F(0)IA それぞれ、5 つの分割した試験体を同時に加熱した。梁試験体を 3 面加熱とするために、加熱実験試験体の上部および分割小口面が直接加熱されないように、繊維混入けい酸カルシウム板およびセラミックファイバーブランケットにて被覆した。分割した加熱実験試験体図・写真および炉への設置状況を図 2.1(a)および(b)に示す。載荷加熱実験の試験体においても、試験体上面を除く 3 面加熱とするため、上部は繊維混入けい酸カルシウム板およびセラミックファイバーブランケットにて被覆した。試験体および写真を図 2.2(a)および(b)に示す。

表 2.1 実験内容および条件

試験体記号	実験内容		実験条件		実験時間
	加熱	載荷加熱	荷重レベル	放冷時炉内空気供給量	
F(0)	○		0	通常(1.0倍)	1,2,3,4および8時間
F(0)IA※	○			増加(1.3倍)	1,2,3,4および8時間
LF(0.2)		○	0.2	通常(1.0倍)	約26時間
LF(0.4)		○	0.4		約9時間
・荷重レベル：試験体寸法から算定した長期許容荷重(79.2kN)に対する割合					

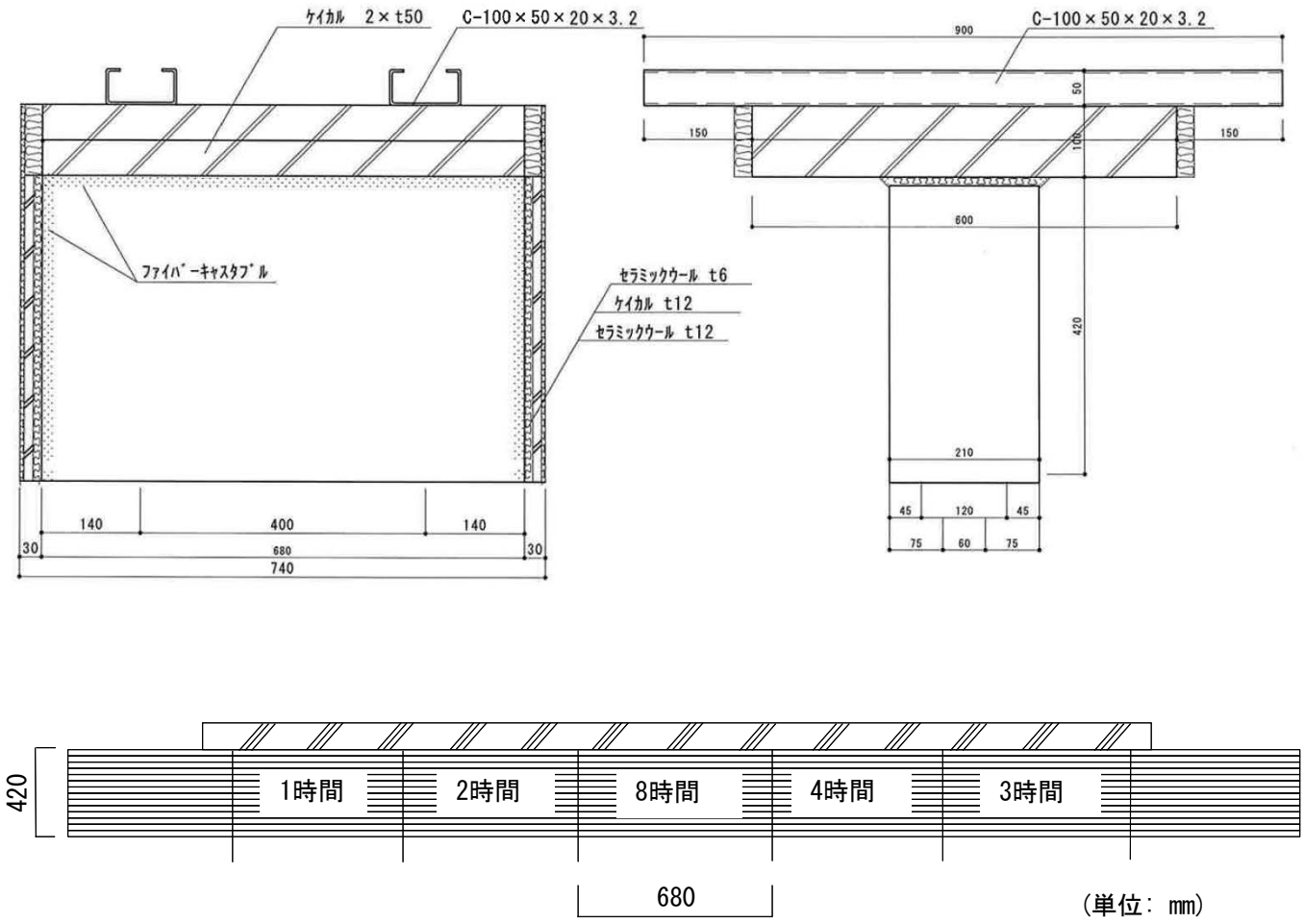


図 2.1(a) 分割した加熱実験試験体図

図 2.1(b) 試験体写真および炉への設置状況

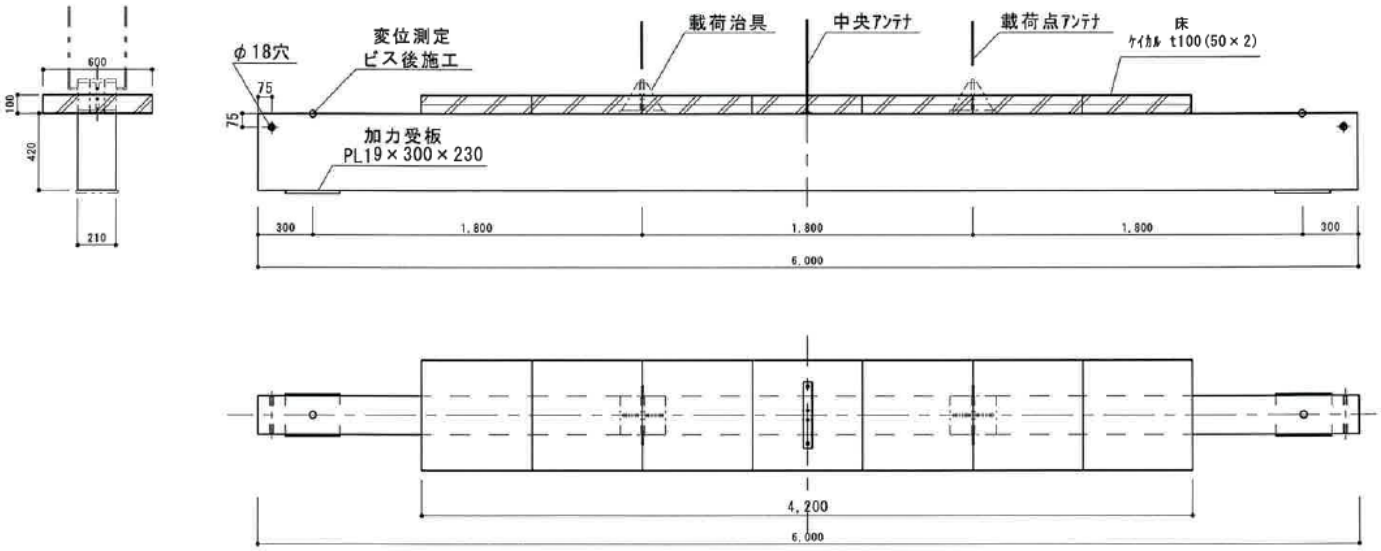


図 2.2(a) 載荷加熱実験試験体図

図 2.2(b) 載荷加熱実験試験体

２．２．２　実験方法

試験体への加熱は ISO834-1[9]に規定される標準加熱時間-温度曲線（以下，標準加熱）による 1 時間加熱とし、その後は炉蓋を閉めた状態で炉内にて放冷した。F(0)試験体の放冷時における炉内への空気供給量は、耐火性能評価試験と同様に、加熱終了後は炉内排煙に必要な最低空気量の供給としたが、F(0)IA の試験体については放冷時における炉内空気供給量を通常よりも 3 割程度増加(排気ファン作動周波数の値で、通常時は 0 設定で最低空気量の強制給気)させて実験を行った。加熱炉の寸法は、幅 2.0m×長さ 4.0m×深さ 2.0m である。バーナーは全部で 15 個、梁長さ平行方向の炉壁 2 面に上下段で配置している。炉壁の材質はセラミックファイバーブロック（一部排気煙道は耐火レンガ)、排気口は全部で 5 箇所、面積は 1 箇所あたり 0.046m^{2}となっている。今回の実験に使用した多目的水平加熱炉の鳥瞰図を図 2.3 に示す。

載荷加熱実験の実験概要図を図 2.4 に示す。梁試験体の支点間距離は 5,400mm、3 等分点 2 線載荷方式とし、中央ジャッキにロードセルを設置し、荷重値を計測した。また、試験体毎の耐力のバラツキを小さくするため、ラミナのフィンガージョイント継手位置を全層ともに等曲げ区間である載荷点より外側へ配置させた。たわみについては試験体中央及び載荷点(2 箇所)について計測した。

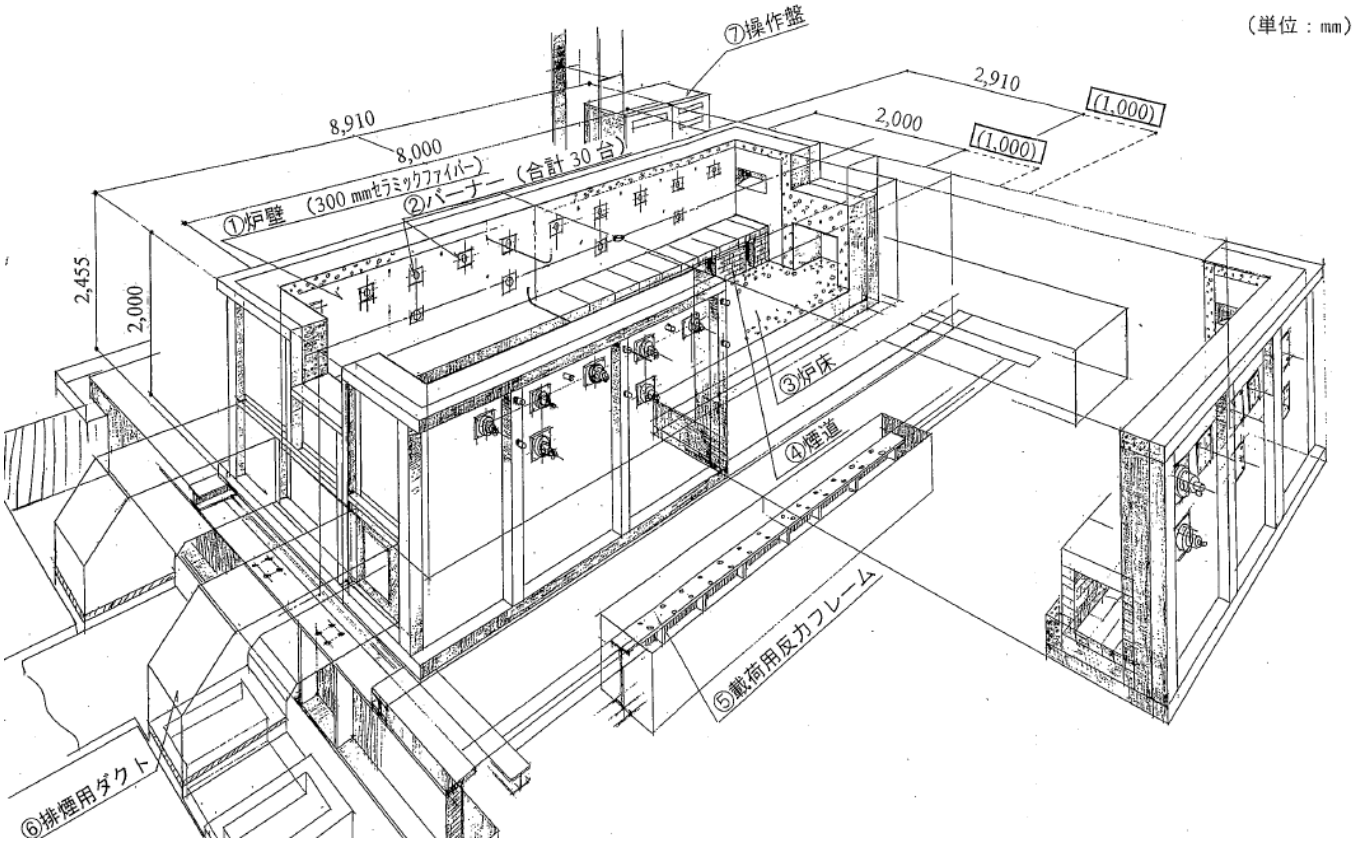


図 2.3 多目的水平加熱炉(鳥瞰図)

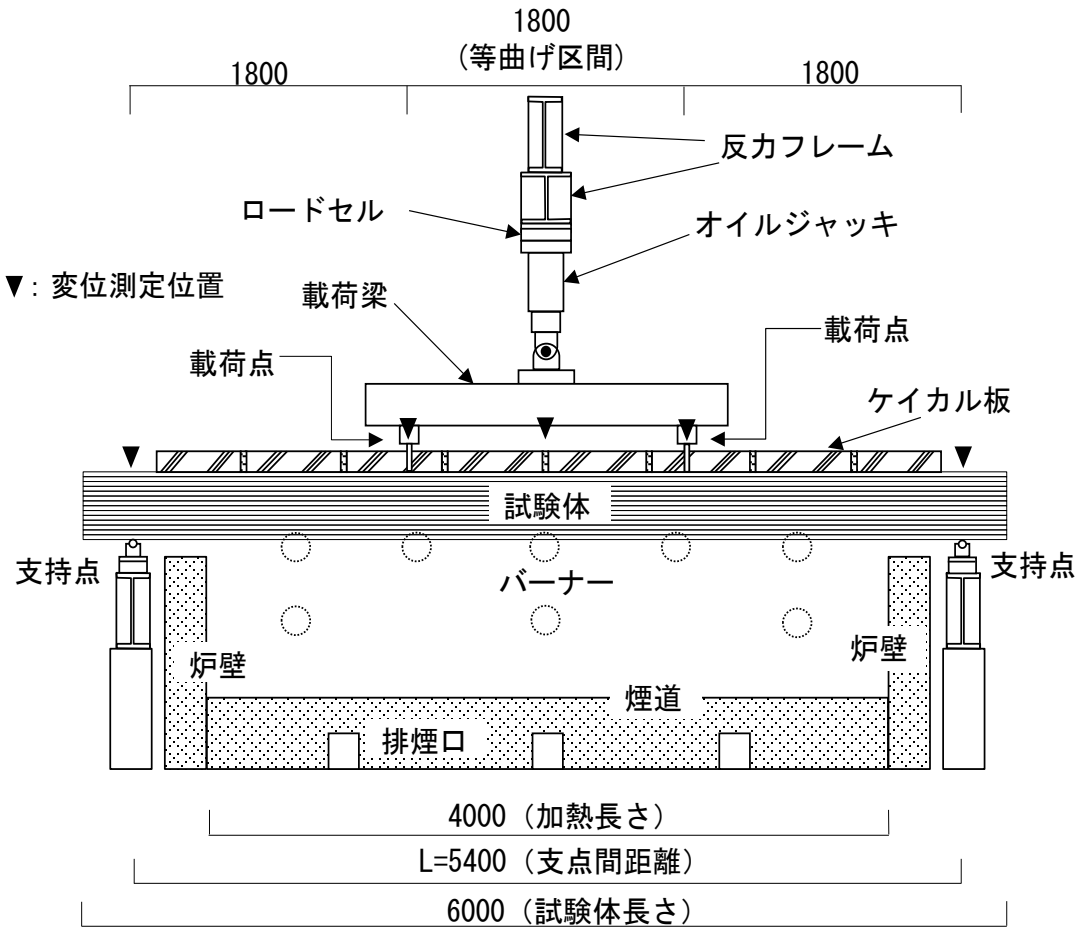


図 2.4 載荷加熱実験概要図

２．３　実験結果

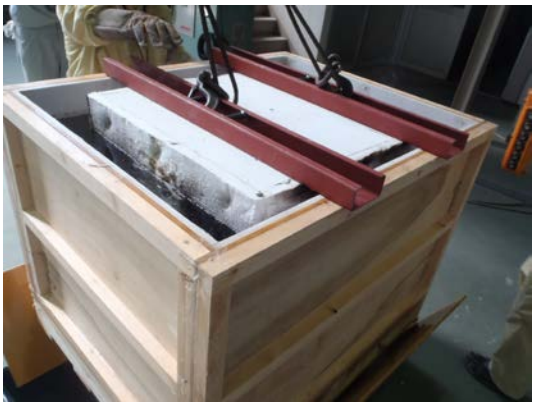
２．３．１　炭化性状

試験体の火災加熱時および火災加熱終了後の炭化性状を把握するため、各試験体の残存断面寸法を計測した。F(0)およびF(0)IAの加熱実験試験体については、標準加熱によって1時間加熱終了直後および放冷過程（加熱開始から2時間・3時間・4時間および8時間後)において条件毎に5分割した試験体を1体ずつ取り出した。加熱実験試験体を取り出した後、すぐに水槽に入れて消火し、ワイヤーブラシ等で炭化層を除去した。載荷加熱実験の試験体2体については、実験終了後、試験体を炉から取り出した後、試験体全体をホースにて消火後、試験体断面を切断してワイヤーブラシ等で炭化層を除去した。載荷加熱実験の試験体については、載荷装置等の移動作業の影響もあり、炉からの取り出しおよび試験体の消火まで1時間程度を要した。

梁幅方向および梁成方向の残存断面寸法は、実験後、炭化層を除去した試験体断面の寸法を測定した。計測には金尺およびノギスを用いた。F(0)およびF(0)IAの加熱実験試験体については、試験体の両端(東西方向)から200㎜の位置で切断し、その2つの切断面について残存断面寸法を計測した。載荷加熱実験の試験体については実験後の試験体を破壊点近傍で切断し、その破壊点近傍の断面について計測を行った。梁幅方向については、各ラミナの上面部と中央部の2箇所において合計26点（炭化にて焼損した最下層のラミナを除いた13枚のラミナ)計測した。梁成方向については、梁幅方向の中央部、中央から15㎜、30㎜、45㎜、50㎜、55㎜、60㎜および65㎜の位置において計15点計測した。加熱実験試験体における実験終了後から残存断面寸法までの手順一覧を図2.5に示し、全試験体の残存断面寸法測定結果を表2.2から表2.11に示す。梁幅方向の残存断面寸法は、実験時の炭化の進行による断面焼失が著しい最下層（14層）を除いた13層分のデータを示している。梁背方向の残存断面寸法について、放冷過程では、梁断面隅角部等の炭化による断面焼失および炭化層の脱落が進行している部分を除いたデータを示している。

加熱実験F(0)における加熱開始から1時間までの平均炭化速度は梁幅方向で0.61㎜/分、梁成方向で0.72㎜/分であり、既往の実験結果に含まれる値であった。試験体切断後の断面の炭化状況を図2.6から図2.21に示す。

①実験後、速やかに脱炉



②専用の水槽にて一気に消火

③消火後水槽から引き上げる

④試験体を切断解体

⑤各経過時間における残存断面寸法計測

図 2.5　残存断面寸法の測定手順

表 2.2 試験体 F(0)東側断面測定結果(梁幅方向)

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	非炭化領域における残存断面幅 (mm)				
			1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
1	上面部	0	136.9	132.5	137.9	136.0	132.8
	中央部	15	137.7	132.4	137.3	134.0	131.0
2	上面部	30	138.3	130.8	136.1	132.2	129.5
	中央部	45	137.8	129.4	134.7	130.7	128.1
3	上面部	60	136.9	126.5	133.9	129.6	126.1
	中央部	75	137.9	123.9	133.4	128.1	124.5
4	上面部	90	139.5	124.6	132.0	126.4	124.9
	中央部	105	139.8	125.5	130.8	125.9	125.2
5	上面部	120	137.4	127.2	129.9	125.3	125.0
	中央部	135	135.8	128.5	129.9	125.2	126.7
6	上面部	150	136.4	128.3	128.3	126.2	129.7
	中央部	165	135.1	127.8	127.9	126.9	129.9
7	上面部	180	133.6	125.7	129.5	126.9	127.2
	中央部	195	133.8	123.9	129.8	127.6	125.5
8	上面部	210	136.1	124.0	132.2	129.2	125.9
	中央部	225	139.6	125.4	134.3	130.9	126.6
9	上面部	240	141.6	125.3	134.6	131.1	127.8
	中央部	255	141.5	126.0	133.3	131.4	129.0
10	上面部	270	140.6	128.7	132.0	132.2	129.5
	中央部	285	138.6	129.1	131.0	132.1	127.0
11	上面部	300	136.4	127.9	128.4	129.8	125.8
	中央部	315	135.9	125.2	124.9	125.1	123.9
12	上面部	330	135.2	123.0	117.6	117.6	120.6
	中央部	345	132.6	107.9	96.1	100.7	105.4
13	上面部	360	118.0	46.7	40.2	44.5	45.2
	中央部	375	105.3	0.0	0.0	0.0	0.0

※時間は加熱開始からの時間を示す。

表 2.3 試験体 F(0)西側断面測定結果(梁幅方向)

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	非炭化領域における残存断面幅 (mm)				
			1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
1	上面部	0	143.8	131.0	136.3	131.0	129.0
	中央部	15	141.5	131.8	136.0	129.3	128.0
2	上面部	30	137.9	132.2	134.3	128.4	126.4
	中央部	45	133.4	131.0	132.2	127.4	125.8
3	上面部	60	130.2	129.9	129.9	128.3	123.9
	中央部	75	130.1	128.7	127.3	130.2	125.1
4	上面部	90	130.4	127.2	124.9	130.2	127.5
	中央部	105	131.1	128.6	123.6	127.6	126.7
5	上面部	120	132.0	129.2	125.0	123.7	125.6
	中央部	135	131.9	128.0	127.1	123.4	126.5
6	上面部	150	131.9	128.5	127.7	125.0	126.8
	中央部	165	132.8	128.7	129.7	125.5	126.5
7	上面部	180	134.3	128.2	131.3	125.1	126.8
	中央部	195	136.7	129.2	130.1	125.2	127.1
8	上面部	210	137.2	131.3	129.2	126.4	127.8
	中央部	225	136.8	132.5	128.6	126.9	129.6
9	上面部	240	139.3	134.9	130.7	127.4	131.7
	中央部	255	141.1	137.1	137.8	128.0	132.1
10	上面部	270	141.2	135.1	140.1	128.7	131.6
	中央部	285	139.4	132.9	135.0	128.7	130.7
11	上面部	300	138.3	133.0	130.7	127.6	129.6
	中央部	315	139.3	132.8	127.6	125.3	129.2
12	上面部	330	139.5	130.3	117.2	121.3	122.7
	中央部	345	136.4	116.3	97.8	105.3	105.8
13	上面部	360	125.7	92.9	43.7	45.9	76.3
	中央部	375	117.8	81.3	0.0	0.0	57.2

※時間は加熱開始からの時間を示す。

表 2.4 試験体 F(0)IA 東側断面測定結果(梁幅方向)

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	非炭化領域における残存断面幅 (mm)				
			1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
1	上面部	0	146.2	138.0	144.3	141.5	140.1
	中央部	15	144.6	138.7	140.9	138.9	138.2
2	上面部	30	142.1	138.9	137.0	136.4	135.8
	中央部	45	138.1	137.9	134.4	133.4	131.7
3	上面部	60	133.8	137.8	132.2	130.6	128.5
	中央部	75	132.2	137.3	130.1	128.4	124.7
4	上面部	90	132.5	137.6	130.8	127.0	123.6
	中央部	105	132.3	137.9	132.2	127.7	127.6
5	上面部	120	130.7	136.0	130.8	128.7	130.6
	中央部	135	129.0	133.7	130.5	128.8	130.5
6	上面部	150	130.6	132.7	133.4	126.3	130.9
	中央部	165	132.3	132.4	133.1	120.4	131.5
7	上面部	180	130.5	131.1	131.4	115.3	132.5
	中央部	195	129.2	130.6	131.5	112.1	132.2
8	上面部	210	128.7	131.7	131.5	111.6	129.2
	中央部	225	130.5	131.5	131.9	114.8	126.7
9	上面部	240	131.8	130.9	129.5	119.5	125.5
	中央部	255	132.7	129.6	130.4	126.2	124.6
10	上面部	270	135.7	128.2	133.2	130.6	123.9
	中央部	285	136.1	129.0	130.0	132.9	120.0
11	上面部	300	136.1	128.3	123.7	133.8	109.9
	中央部	315	136.1	125.6	117.9	129.7	101.5
12	上面部	330	135.3	116.3	107.8	118.9	92.4
	中央部	345	131.6	88.5	84.2	100.3	77.8
13	上面部	360	64.2	34.3	34.1	44.7	35.2
	中央部	375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※時間は加熱開始からの時間を示す。

表 2.5 試験体 F(0)IA 西側断面測定結果(梁幅方向)

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	非炭化領域における残存断面幅 (mm)				
			1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
1	上面部	0	143.6	137.9	139.7	144.6	142.6
	中央部	15	139.7	137.5	140.1	142.4	141.2
2	上面部	30	136.1	136.1	138.5	140.1	138.6
	中央部	45	132.7	135.8	134.9	137.9	135.9
3	上面部	60	131.6	135.7	130.8	136.2	135.6
	中央部	75	132.4	135.8	127.8	135.4	137.2
4	上面部	90	132.7	134.8	127.1	133.4	139.0
	中央部	105	133.1	134.2	127.4	130.7	138.6
5	上面部	120	134.2	134.8	128.3	129.1	135.7
	中央部	135	134.7	135.9	129.9	128.1	133.5
6	上面部	150	134.1	136.8	131.3	125.9	134.9
	中央部	165	133.1	136.0	130.6	122.8	135.8
7	上面部	180	132.3	134.9	129.7	119.9	136.6
	中央部	195	131.9	134.8	127.7	118.1	136.6
8	上面部	210	132.5	135.0	124.5	120.7	134.1
	中央部	225	133.8	134.9	123.4	123.3	133.2
9	上面部	240	135.1	134.3	125.9	120.4	131.9
	中央部	255	136.6	134.0	129.5	115.6	132.6
10	上面部	270	137.6	131.3	131.8	111.0	135.2
	中央部	285	135.7	131.5	132.2	104.1	135.7
11	上面部	300	134.5	133.8	128.6	95.1	135.6
	中央部	315	134.4	130.8	122.6	86.9	132.7
12	上面部	330	132.8	124.0	108.8	77.8	123.2
	中央部	345	129.0	108.6	85.6	63.8	104.2
13	上面部	360	63.1	49.2	36.5	27.9	46.3
	中央部	375	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※時間は加熱開始からの時間を示す。

表 2.6 試験体 F(0)東側断面測定結果(梁成方向)

幅方向中心からの距離(mm)		非炭化領域における残存断面背　(mm)				
		1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
中心 (0)		378.0	376.0	372.0	376.0	374.0
15	左	377.0	375.0	371.0	375.0	372.0
	右	380.0	376.0	369.0	375.0	374.0
30	左	377.0	372.0	371.0	374.0	369.0
	右	380.0	374.0	366.0	370.0	368.0
45	左	375.0	363.0	365.0	366.0	364.0
	右	380.0	365.0	355.0	365.0	359.0
50	左	373.0	362.0	359.0	360.0	363.0
	右	378.0	358.0	353.0	360.0	355.0
55	左	370.0	358.0	355.0	352.0	357.0
	右	375.0	349.0	335.0	353.0	353.0
60	左	365.0	352.0	347.0	335.0	345.0
	右	373.0	0.0	0.0	335.0	332.0
65	左	360.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	右	367.0	0.0	0.0	0.0	0.0
※時間は加熱開始からの時間を示す。						

表 2.7 試験体 F(0)西側断面測定結果(梁成方向)

幅方向中心からの距離(mm)		非炭化領域における残存断面背　(mm)				
		1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
中心 (0)		380.0	375.0	374.0	371.0	374.0
15	左	379.0	374.0	372.0	371.0	374.0
	右	383.0	372.0	374.0	371.0	374.0
30	左	376.0	374.0	370.0	368.0	373.0
	右	384.0	368.0	373.0	370.0	372.0
45	左	372.0	371.0	367.0	360.0	369.0
	右	379.0	359.0	369.0	365.0	366.0
50	左	371.0	367.0	364.0	358.0	355.0
	右	378.0	357.0	358.0	360.0	364.0
55	左	368.0	367.0	358.0	350.0	351.0
	右	377.0	354.0	350.0	357.0	360.0
60	左	364.0	360.0	353.0	0.0	335.0
	右	375.0	351.0	348.0	345.0	350.0
65	左	359.0	355.0	0.0	0.0	0.0
	右	370.0	0.0	0.0	0.0	342.0
※時間は加熱開始からの時間を示す。						

表 2.8 試験体 F(0)IA 東側断面測定結果(梁成方向)

幅方向中心からの距離(mm)		非炭化領域における残存断面背　(mm)				
		1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
中心 (0)		383.0	376.0	368.0	379.0	372.0
15	左	384.0	375.0	369.0	379.0	366.0
	右	382.0	374.0	362.0	378.0	373.0
30	左	383.0	372.0	365.0	378.0	348.0
	右	382.0	368.0	360.0	371.0	372.0
45	左	381.0	362.0	358.0	370.0	318.0
	右	380.0	355.0	350.0	355.0	366.0
50	左	379.0	356.0	350.0	365.0	302.0
	右	378.0	350.0	335.0	352.0	362.0
55	左	378.0	351.0	345.0	360.0	293.0
	右	377.0	345.0	325.0	344.0	349.0
60	左	374.0	334.0	338.0	353.0	282.0
	右	372.0	338.0	310.0	335.0	0.0
65	左	360.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	右	362.0	0.0	0.0	0.0	0.0
※時間は加熱開始からの時間を示す。						

表 2.9 試験体 F(0)IA 西側断面測定結果(梁成方向)

幅方向中心からの距離(mm)		非炭化領域における残存断面背　(mm)				
		1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
中心 (0)		384.0	382.0	378.0	373.0	378.0
15	左	385.0	380.0	372.0	365.0	375.0
	右	384.0	382.0	382.0	376.0	377.0
30	左	386.0	379.0	362.0	326.0	371.0
	右	384.0	377.0	373.0	376.0	372.0
45	左	384.0	374.0	346.0	292.0	364.0
	右	382.0	363.0	361.0	358.0	360.0
50	左	383.0	373.0	338.0	279.0	360.0
	右	382.0	357.0	352.0	347.0	353.0
55	左	379.0	367.0	333.0	258.0	356.0
	右	378.0	351.0	343.0	325.0	350.0
60	左	373.0	358.0	324.0	200.0	349.0
	右	374.0	344.0	332.0	305.0	345.0
65	左	0.0	348.0	315.0	170.0	0.0
	右	364.0	332.0	0.0	0.0	335.0
※時間は加熱開始からの時間を示す。						

表 2.10 載荷加熱実験 東側および西側断面測定結果(梁幅方向)

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	試験体			
			LF(0.2) ①	LF(0.2) ②	LF(0.4)-1 E	LF(0.4)-1 W
1	上面部	0	164.4	150.4	168.5	173.2
	中央部	15	152.4	142.5	157.0	164.2
2	上面部	30	137.0	133.2	143.3	150.3
	中央部	45	123.6	126.1	130.9	134.7
3	上面部	60	118.1	122.5	122.6	125.7
	中央部	75	118.4	120.6	116.9	123.2
4	上面部	90	119.5	121.2	117.3	123.7
	中央部	105	121.2	121.3	122.0	124.6
5	上面部	120	121.8	119.9	126.5	126.1
	中央部	135	119.0	118.9	127.6	124.6
6	上面部	150	117.3	116.1	122.5	122.1
	中央部	165	117.7	112.8	117.8	122.2
7	上面部	180	117.5	111.1	118.1	122.8
	中央部	195	118.2	110.4	119.6	123.8
8	上面部	210	119.5	110.2	120.3	123.7
	中央部	225	119.2	110.0	121.0	122.3
9	上面部	240	118.2	110.5	123.2	120.3
	中央部	255	117.3	110.6	123.7	114.6
10	上面部	270	115.5	107.9	120.9	113.2
	中央部	285	112.6	103.8	119.5	116.5
11	上面部	300	83.5	102.9	117.4	117.7
	中央部	315	28.1	101.5	116.7	116.9
12	上面部	330	0.0	67.6	111.8	108.7
	中央部	345	0.0	36.1	90.8	91.4
13	上面部	360	0.0	0.0	38.0	40.3
	中央部	375	0.0	0.0	0.0	0.0

表 2.11 載荷加熱実験 東側および西側断面測定結果(梁成方向)

幅方向中心からの距離(mm)		試験体			
		LF(0.2) ①	LF(0.2) ②	LF(0.4)-1 E	LF(0.4)-1 W
中心 (0)		325.0	354.0	370.0	370.0
15	左	324.0	364.0	369.0	373.0
	右	322.0	350.0	371.0	370.0
30	左	321.0	352.0	356.0	367.0
	右	319.0	343.0	368.0	366.0
45	左	322.0	345.0	351.0	352.0
	右	312.0	341.0	360.0	357.0
50	左	324.0	285.0	345.0	344.0
	右	313.0	340.0	355.0	354.0
55	左	322.0	236.0	331.0	335.0
	右	312.0	310.0	350.0	344.0
60	左	93.0	36.0	141.0	55.0
	右	310.0	146.0	340.0	333.0
65	左	43.0	26.0	45.0	46.0
	右	0.0	61.0	48.0	267.0

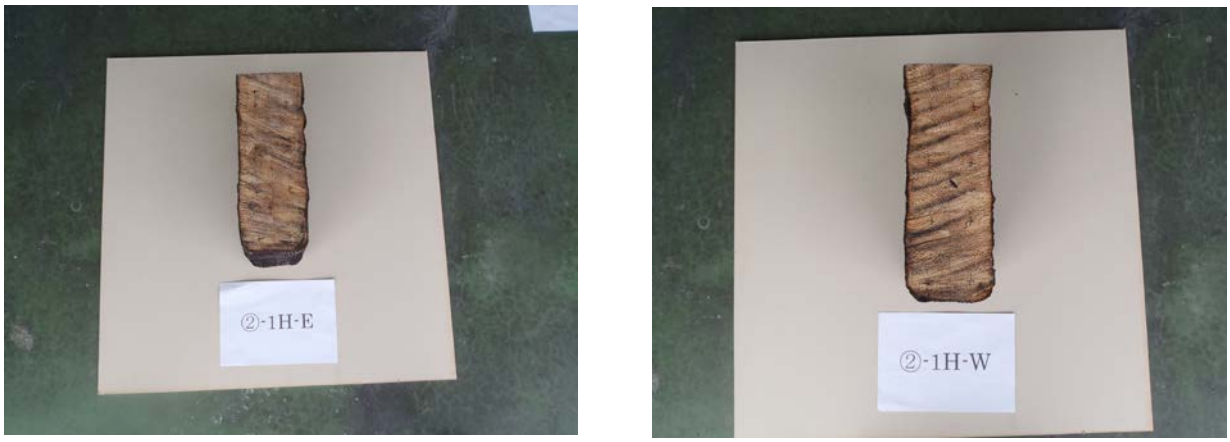


図 2.6 F(0) 火災加熱終了直後の残存断面の状況

図 2.7 F(0) 火災加熱終了後放冷 1 時間の残存断面の状況

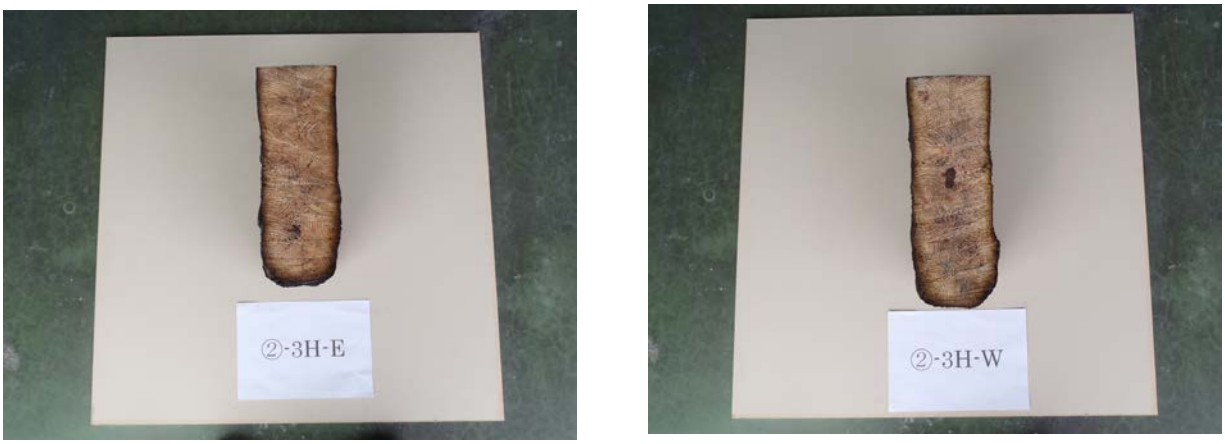


図 2.8 F(0) 火災加熱終了後放冷 2 時間の残存断面の状況

図 2.9 F(0) 火災加熱終了後放冷 3 時間の残存断面の状況

図 2.10 F(0) 火災加熱終了後放冷 7 時間の残存断面の状況

図 2.11 F(0) 経時変化による残存断面の状況(東側断面)
(左から放冷 0 時間、1 時間、2 時間、3 時間および 8 時間)

図 2.12 F(0) 経時変化による残存断面の状況(西側断面)
(左から放冷 0 時間、1 時間、2 時間、3 時間および 8 時間)

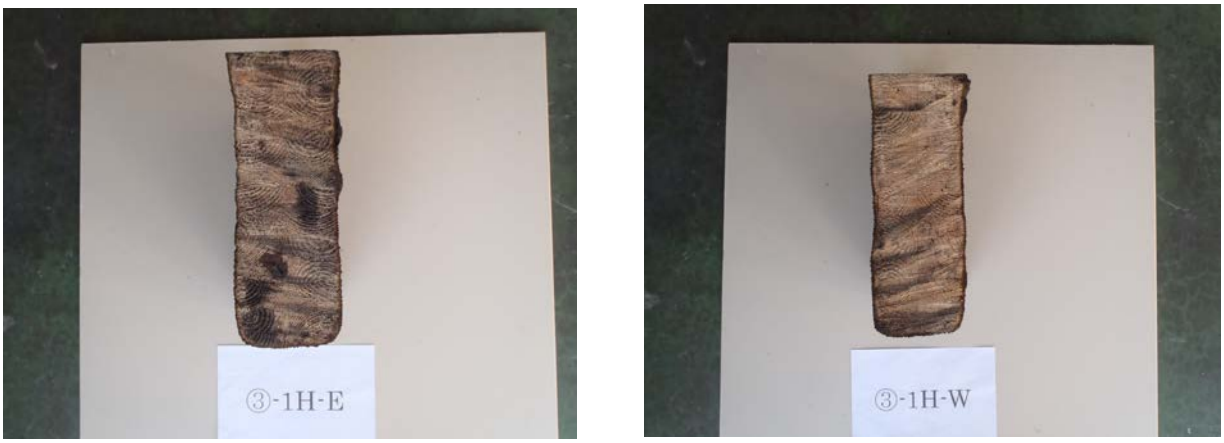


図 2.13 F(0)IA 火災加熱終了直後の残存断面の状況

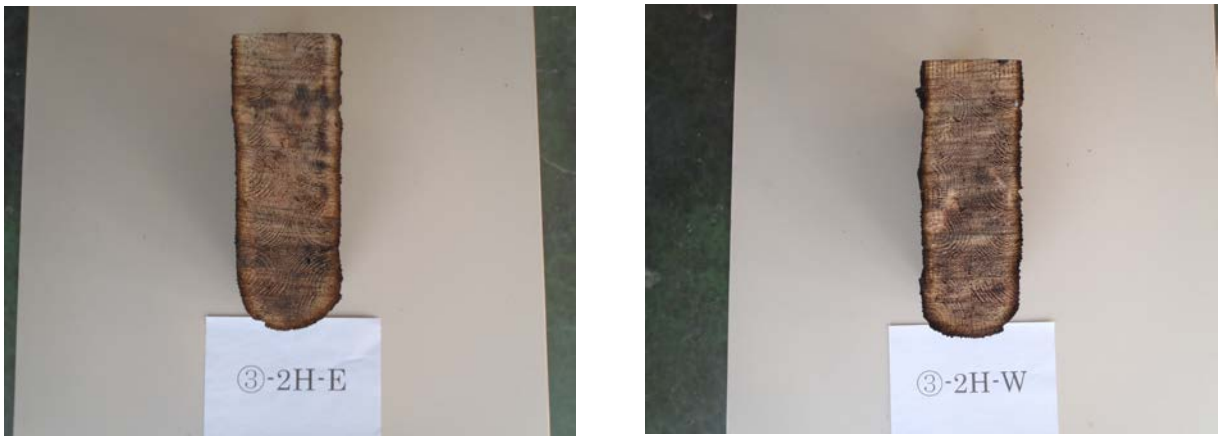


図 2.14 F(0)IA 火災加熱終了後放冷 1 時間の残存断面の状況

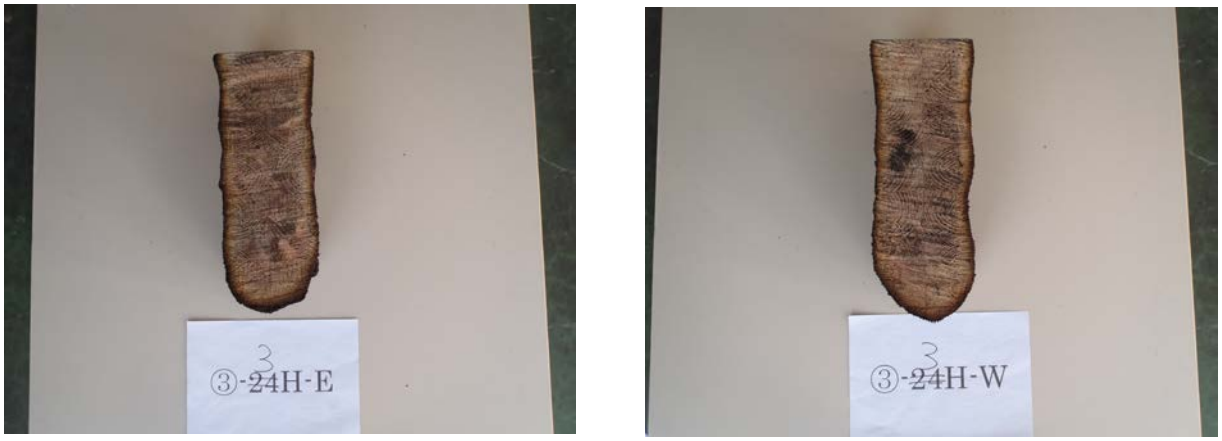


図 2.15 F(0)IA 火災加熱終了後放冷 2 時間の残存断面の状況

図 2.16 F(0)IA 火災加熱終了後放冷 3 時間の残存断面の状況

図 2.17 F(0)IA 火災加熱終了後放冷 7 時間の残存断面の状況

図 2.18 F(0)IA 経時変化による残存断面の状況(東側断面)
(左から加熱前、放冷 0 時間、1 時間、2 時間、3 時間および 8 時間)

図 2.19 F(0)IA 経時変化による残存断面の状況(西側断面)
(左から加熱前、放冷 0 時間、1 時間、2 時間、3 時間および 8 時間)

図 2.20 LF(0.4) 試験体解体後の残存断面の状況(放冷 7 時間)

図 2.21 LF(0.2) 試験体解体後の残存断面の状況(放冷 24 時間)

２．３．１．１　残存断面における炭化性状

残存断面寸法測定結果から得られた数値をもとに、梁断面の各経過時間における炭化状況を図 2.22 に示す。炭化性状に関しては実験結果を定量的に把握するため、残存断面寸法測定結果に基づいて、非炭化領域における残存断面について断面二次モーメント（以下、I)、断面係数（以下、Z）および断面積（以下、A）を求めた。30㎜厚のラミナ層毎 2 箇所で残存断面の梁幅を測定したので、断面性能の算定においては、厚さ 15㎜の断面要素に分けて、その断面要素の上下で測定された残存断面幅の平均値を断面要素の幅とした。残存断面の最下層の断面要素については、幅は上で測定された残存断面幅とし、厚さは梁幅方向中心位置での残存断面背の値から決定した。これらの寸法情報から非炭化領域の断面を断面要素に分割して各断面要素における I と Z および A を算定した。結果の一覧(東西断面)を表 2.12 に示すとともに、今回の試験体断面寸法（幅 210㎜×成 420㎜）において、非炭化領域断面の I と Z および A について、元断面に対する割合で比較した結果を図 2.23 および図 2.24 に示す。放冷 1 時間経過時における I,Z および A については、LF(0.2)を除き、I は 4 割、Z は 4.5 割そして A については 5 割を少し上回る程度であった。

海外においては木材の炭化境界面の温度を 288℃としており、既往の研究からも、木材の急激な密度変化および重量減少が 300℃付近で生じていることから、炭化境界面の温度は 300℃とされている。ただし、我が国における火災危険温度(炭化境界面の温度)は、火災安全上 260℃とされており、本論文においても、火災危険温度である 260℃を燃焼が起こり得る温度(炭化が始まる温度)としている。

２．３．１．２　放冷過程における炉内空気供給量の影響

通常の空気量で実施したF(0)試験体の観測では,炭化層表面の燃焼が加熱終了後から15分程度継続した。図2.22(a)に示すF(0)試験体では，放冷1時間後と放冷7時間後の炭化状況を比較すると、その間における炭化の進行は殆ど見られない。一方で炉内空気供給量を増加したF(0)IAについては、加熱終了直後の放冷過程における炭化層表面の燃焼が加熱終了後から52分程度継続した。その結果､F(0)に比べ、試験体表面付近における炭化層の脱落および焼損が進み、放冷1時間後の欠損がF(0)に比べてやや大きい。また，F(0)IAの放冷7時間後の炭化状況を見ると、特に隅角部において断面欠損の変化が大きい。隅角部を除いては、F(0)と同様、放冷1時間以降の炭化の進行は小さい。図2.22 (a)と(b)より、放冷1時間後までにおける炭化の進行が確認できる。両試験体とも、放冷 7 時間後に炉内から取り出した時は試験体表面における赤熱・残炎は見られなかった。

図2.23に示す元断面と非炭化領域の割合を比較したグラフから、放冷7時間後においてIは3.5～4割程度、Zは4～4.5割程度、Aについては5～5.5割程度となった。表2.14に示す非炭化領域のI、ZおよびAについて、F(0)とF(0)IAを比較すると、放冷3時間後のZにおいて最大20%の程度差が生じている。F(0)については、各時間段階において東西面でのばらつきは 4～7%程度となっているが、F(0)IA においては、放冷3時間後における東西面のZで最大20%程度のばらつきが見られた。

加熱終了後の放冷過程における炭化の進行は、炉内空気供給量を増加させた場合、2面加熱となる梁下隅角部において、炉内空気供給量の違いが加熱終了後の放冷過程における炭化深さに及ぼす影響がみられた。

２．３．１．３　載荷および非載荷による影響

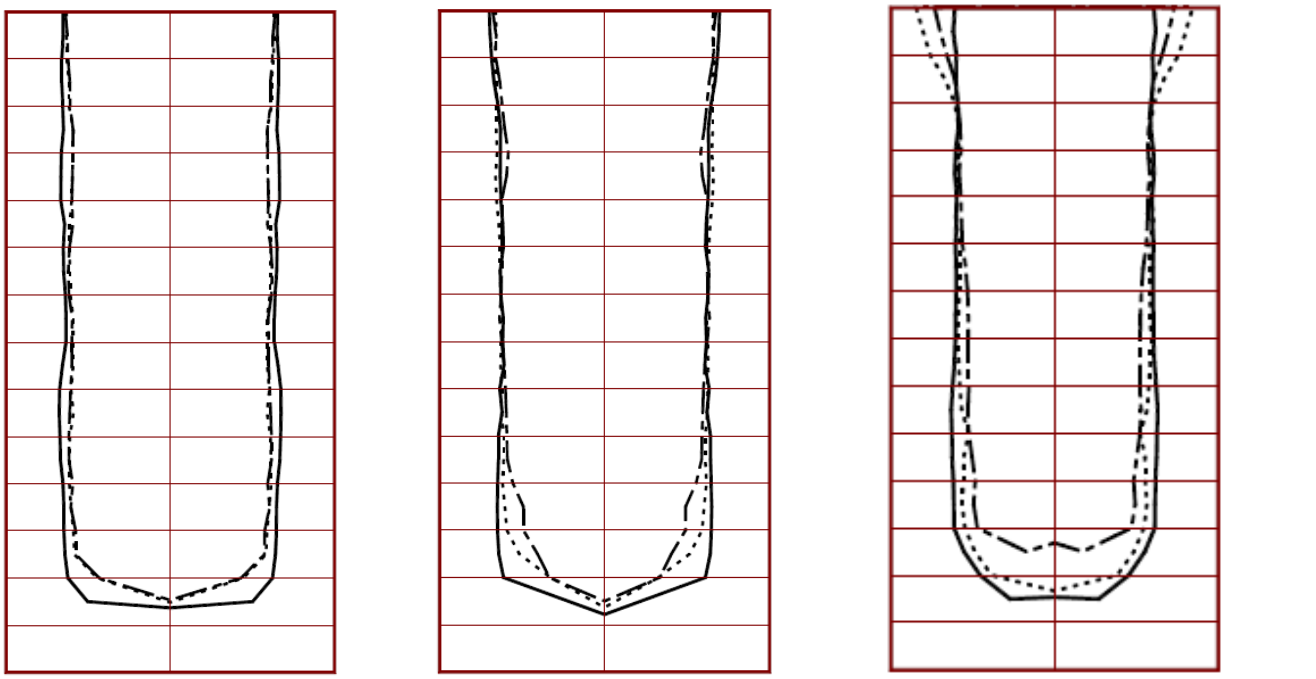
図 2.22 (c) に示す炭化図から、加熱実験の F(0)に比べて載荷加熱実験の LF(0.4)の方が、梁の下端(特に 2 面加熱となる梁下隅角部)での炭化が進行しているのが確認できる。載荷加熱実験 LF(0.2)の炭化性状を見ると、梁幅方向については加熱実験である F(0)および載荷加熱実験の LF(0.4)と変わらないが、梁下部分の炭化は進行ており、LF(0.4)と比較して梁成方向の炭化については放冷 7 時間後から 24 時間後の間に約 20㎜以上進行していた。実験中の観察では、試験体表面の燃焼は確認されなかったが、炭化層内部で部分的に赤熱が継続し、放冷 7 時間以降においても炭化が若干進行した可能性がある。

表 2.12 より、非載荷の F(0)と載荷した LF(0.4)の放冷 7 時間時の結果を見ると、I,Z および A ともに 5%程度の差であり、図 2.24 の元断面に対する比較においても I および Z については約 4 割、A は 5 割程度となり、非載荷および載荷の違いによる明確な違いは見られなかった。一方で試験体 LF(0.2)の 25 時間時の I と Z は、F(0)および LF(0.4)の放冷 7 時間後と比べて小さくなり，図 2.24 の元断面に対する割合が I および Z では 2.5～3 割、A では 4 割を少し上回る結果であった。LF(0.2)の 25 時間時においては前述した 2 体の放冷 7 時間経過時と比較して I,Z および A について約 1～2 割程度の差が見られた。

火災加熱後放冷過程において、載荷および非載荷の違いが炭化性状に与える影響は、梁幅方向では明確な違いは確認できなかった。梁成方向では放冷 7 時間後においては炭化性状に差は見られなかったが、LF(0.4)と LF(0.2)で比較すると、放冷 7 時間以降から 25 時間経過時においては差が見られた。一方で、LF(0.2)については、放冷 7 時間後以降から実験終了の 25 時間までのたわみがほとんど増加しなかった。たわみの結果も考慮すると、LF(0.2)の炭化は、放冷 7 時間後から実験終了の 25 時間時まで殆ど進行しておらず、LF(0.2)の放冷 7 時間後の炭化性状と今回の 25 時間時の炭化性状は殆ど変わらず、試験体のばらつきの可能性が高い。しかしながら、今回の実験においては試験体が限られた数の中での検討となったことから、試験体のばらつきについて明確に言及することは難しい。

梁下端においては載荷による曲げ変形が生じることで、非載荷の試験体と比べて載荷の試験体については非炭化領域断面の I と Z および A は載荷の影響を受ける可能性があり，その影響を定量的に示すには更なるデータの蓄積が必要である。

なお、非載荷の F(0)試験体の加熱終了から 7 時間経過した時点での断面炭化状況が矩形となっているのに対し、載荷した 2 体の試験体についてはラミナ上部 1 層目の梁幅方向の炭化が小さくなり、残存断面の形状が下側へ向かうにつれて細くなった。これは載荷治具への熱の進入を防ぐためにセラミックファイバーブランケットを被覆した影響によるものと考えられる。



(a) F(0)

実線：加熱終了直後
点線：放冷 1 時間後
一点鎖線：放冷 7 時間後

(b) F(0)IA

実線：加熱終了直後
点線：放冷 1 時間後
一点鎖線：放冷 7 時間後

(c) F(0), LF(0.4), LF(0.2)

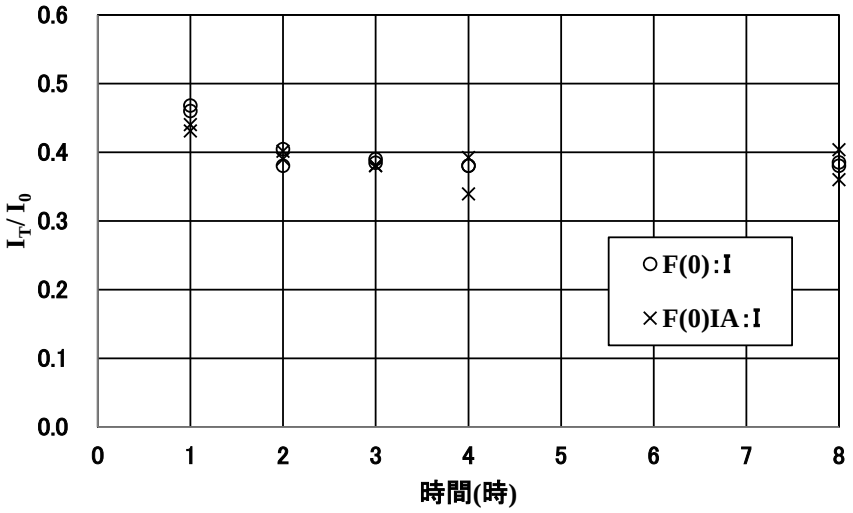
実線：F(0)　放冷 7 時間後
点線：LF(0.4)　放冷 7 時間後
一点鎖線：LF(0.2)　放冷 24 時間後

図 2.22 残存断面における炭化状況

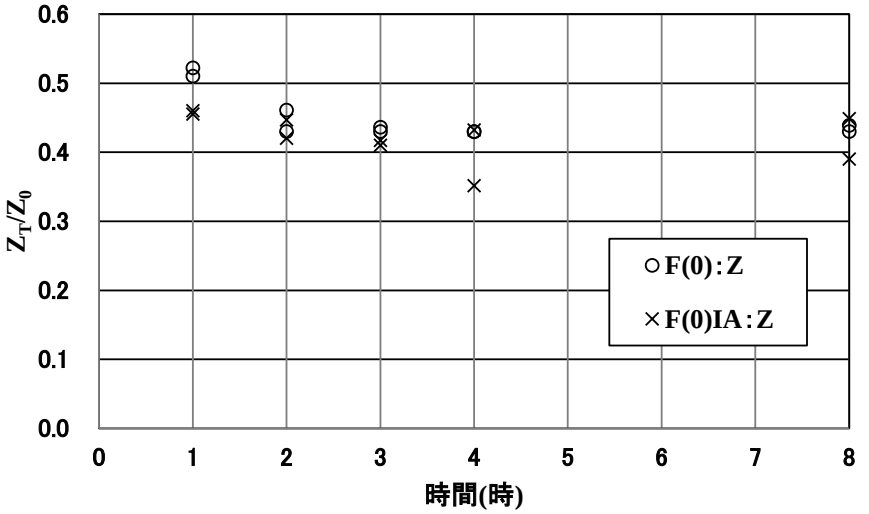
表 2.12 残存断面における断面二次モーメント、断面係数および断面積

加熱開始からの時間および測定箇所（放冷時間：h）		加熱実験						載荷加熱実験 LF(0.2)：25時間　LF(0.4)：8時間		
		F(0)			F(0)IA					
		I (mm^4)	Z (mm^3)	A (mm^2)	I (mm^4)	Z (mm^3)	A (mm^2)	I (mm^4)	Z (mm^3)	A (mm^2)
1時間	東面	5.99×10^8	3.16×10^6	5.14×10^4	5.67×10^8	2.84×10^6	4.92×10^4	－	－	－
	西面	6.06×10^8	3.22×10^6	5.11×10^4	5.58×10^8	2.81×10^6	4.93×10^4	－	－	－
2時間（1h）	東面	4.99×10^8	2.66×10^6	4.58×10^4	5.02×10^8	2.61×10^6	4.73×10^4	－	－	－
	西面	5.24×10^8	2.85×10^6	4.75×10^4	5.20×10^8	2.76×10^6	4.83×10^4	－	－	－
3時間（2h）	東面	5.00×10^8	2.67×10^6	4.69×10^4	4.93×10^8	2.56×10^6	4.66×10^4	－	－	－
	西面	4.99×10^8	2.69×10^6	4.65×10^4	4.93×10^8	2.58×10^6	4.61×10^4	－	－	－
4時間（3h）	東面	4.98×10^8	2.67×10^6	4.61×10^4	5.08×10^8	2.67×10^6	4.55×10^4	－	－	－
	西面	4.93×10^8	2.65×10^6	4.56×10^4	4.40×10^8	2.17×10^6	4.32×10^4	－	－	－
8時間（7h）	東面	4.93×10^8	2.64×10^6	4.57×10^4	4.63×10^8	2.38×10^6	4.48×10^4	4.93×10^8	2.60×10^6	4.47×10^4
	西面	4.99×10^8	2.71×10^6	4.61×10^4	5.23×10^8	2.77×10^6	4.86×10^4	4.98×10^8	2.59×10^6	4.51×10^4
25時間（24h）	東面	－	－	－	－	－	－	3.34×10^8	1.74×10^6	3.87×10^4
	西面	－	－	－	－	－	－	3.85×10^8	2.10×10^6	3.96×10^4

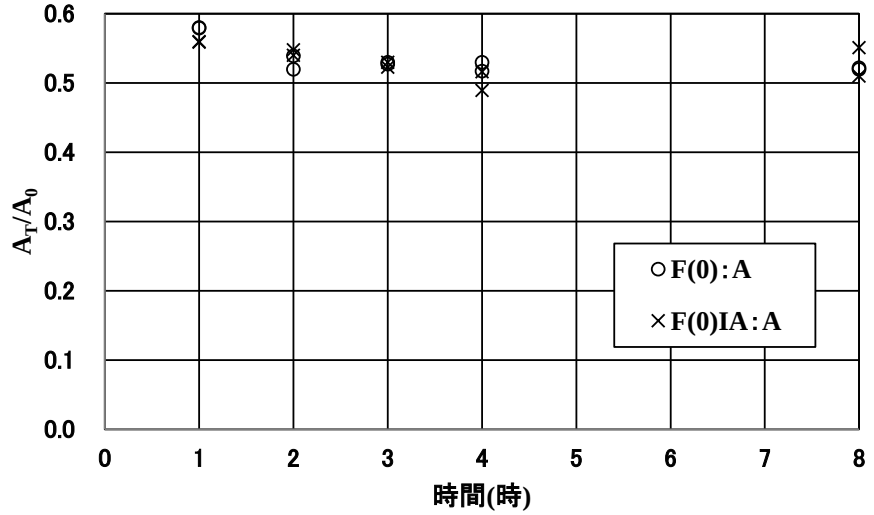
※LF(0.2)およびLF(0.4)は、炉から試験体取り出しに要した時間約 1 時間後の炭化深さ測定値から算定した値



(a) 断面二次モーメント

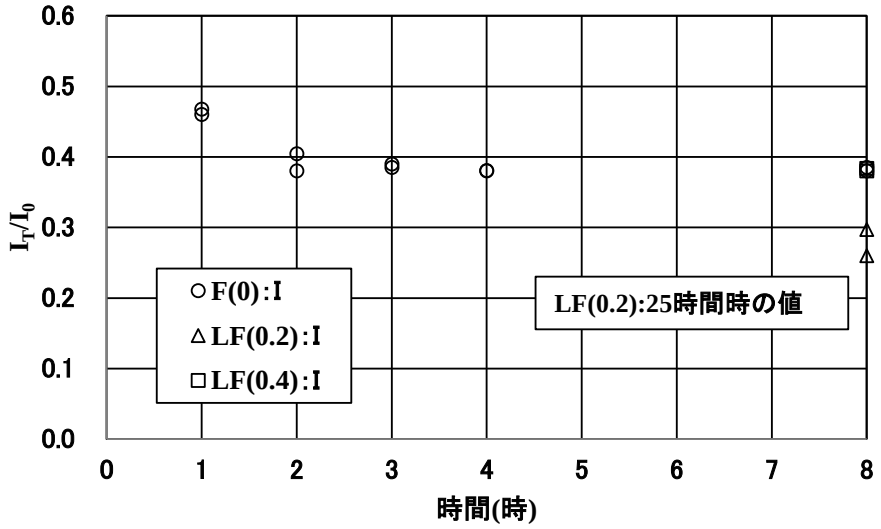


(b) 断面係数

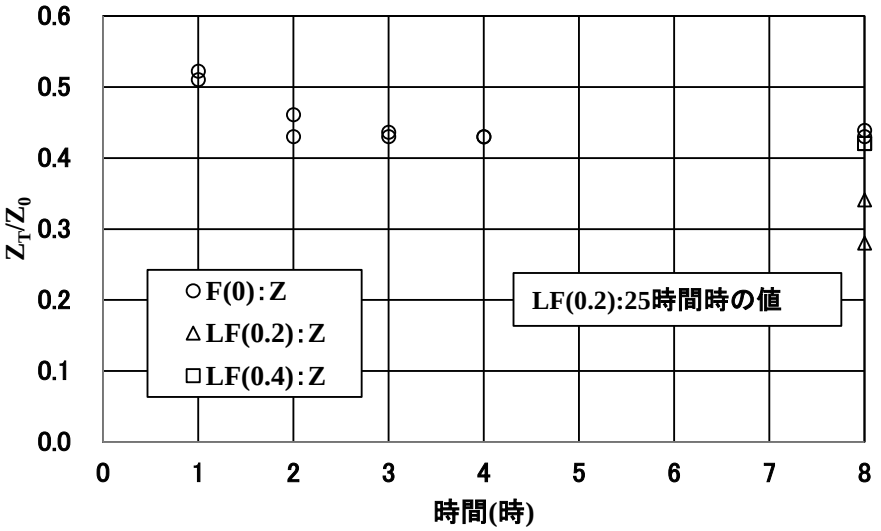


(c) 断面積

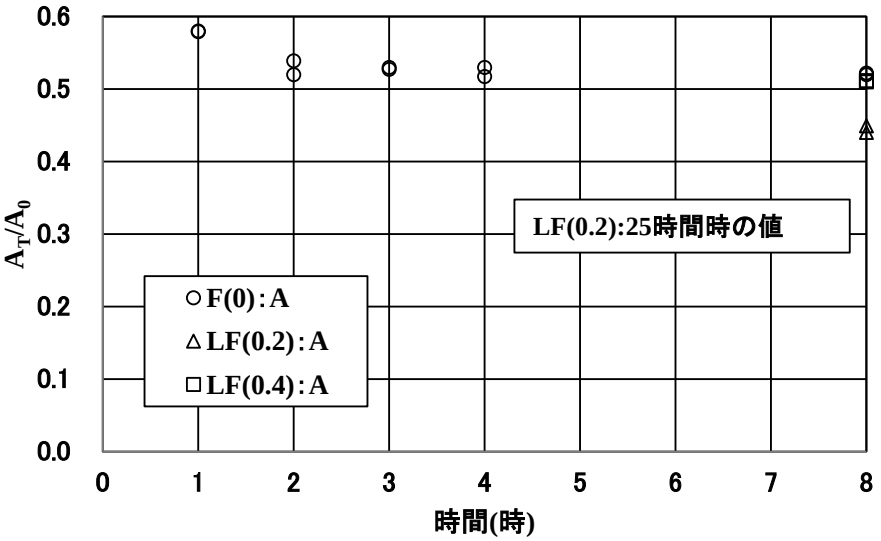
図 2.23 炉内空気供給量の違いによる断面性能低下率



(a) 断面二次モーメント



(b) 断面係数



(c) 断面積

図 2.24 載荷レベルの違いによる断面性能低下率

２．３．２　断面内温度

断面内温度は、JIS C 1602 に規定するクラス 2 の性能を持つ線径 0.65㎜の K 熱電対を用いた。断面内温度はF(0)およびF(0)IAの加熱実験試験体については、実験時間が最も長い8時間の試験体にて調べた。載荷加熱実験については、LF(0.4)の試験体にて調べた。測定箇所は図 2.25 に示すように、ラミナ接着位置で計 18 点の温度を測定した。熱電対の設置位置については、梁幅側面から 45㎜（準耐火 60 分の燃えしろライン [10]を予測)、65㎜（放冷過程の炭化速度を約 0.1㎜/分 [11]としたラインを予測）および断面中央部とし、載荷加熱実験の試験体 LF(0.4)については、試験体のせん断区間（載荷点から 800㎜外側）の断面内部に設置した（図 2.26 参照)。熱電対を設置したこれら 3 体の試験体は、ラミナ積層（一次接着）後にそれぞれを梁断面中央で二次接着をおこなっている。図 2.27 に示すように梁幅中央部を熱電対の配線経路（写真は二次接着前の様子）とした。図 2.25 では温度測定位置を 1 つの断面にまとめて示しているが、梁側面からの距離（65㎜, 中央, 45㎜）毎 3 断面に分けて、所定の深さまでドリルにて穴を開けて熱電対を配置した。二次接着面の不陸を無くすため、図 2.27 に示す熱電対が配線される部分に溝加工を施した。

加熱実験である F(0)、F(0)IA および載荷加熱実験である LF(0.2)、LF(0.4)の炉内温度測定結果（全 8 点の平均）を図 2.28 に示す。炉内供給空気量を増加した加熱実験 F(0)IA においては、F(0)に比べて加熱終了後放冷 1 時間時点で 200℃程度低かった。加熱実験と載荷加熱実験を比較すると、加熱終了後の放冷過程における炉内温度は、加熱実験の方が載荷加熱実験に比べて若干低かった。炉内温度が 100℃以下にまで低下する時間を見ると、F(0)が約 5 時間、F(0)IA では約 2 時間半、載荷加熱実験の 2 体については 7 時間であった。

なお、図 2.28 において、F(0)IA 試験体の放冷 5 時間時の温度が 20℃程度上昇した。実験中の観察において、放冷 5 時間時では試験体表面の燃焼は確認されていないこと、そして炉内温度を測定したすべての点において温度が上昇していることから、試験体の局所的な燃焼によって温度上昇が生じたとは考え難い。この温度上昇の原因については不明である。

今回の実験において、放冷過程における炉内温度が加熱実験の方が低くなった要因は、試験体の仕様および大きさによるものと考えられる。加熱実験は分割された試験体となっていることから、実験条件毎に所定の時間で炉から取り出されることとなる。その結果、加熱実験の試験体は、放冷過程において炉内における試験体(可燃物)が徐々になくなることとなり、炉内温度が載荷加熱実験よりも低い値となった。

放冷過程における温度－時間曲線については、加熱過程のような規定はない。放冷過程での炉内温度は、試験体の材料（可燃性材料か不燃性材料）によって異なる。試験体の大きさ（試験炉容積に対する試験体体積の割合）にも影響を受ける。したがって、放冷過程での炉内温度曲線の制御は難しい。

火災時および放冷過程での断面内温度測定結果を図 2.29 から図 2.31 に示す。各図とも、凡例は図 2.26 に示した温度測定点の番号であり、梁の側面からの距離で(a)～(c)の 3 図に分けて示している。これら 9 図より、下面から 30㎜の温度は加熱 1 時間の間に 260℃を大きく超え、下面から 30㎜の位置では加熱中に炭化したことが分かる。図 2.29 から図 2.31 の（c）図を見ると 2 面加熱の影響で、側面から 45㎜で下面から 60㎜の部分で 260℃を超える温度になっている。一方、側面から 45㎜で下面から 90㎜以上の部分の温度は 260℃に到達しなかった。図 2.29 から図 2.31 の(a)と(b)に示す側面から 65㎜および断面中央位置では、加熱終了後放冷 2 時間経過以降において、断面内温度が 100℃に到達以降、温度の上昇が緩やかになっており、水分の蒸発潜熱の影響が見られた。放冷 3 時間経過以降では、温度が下降に転じる領域が増えて、熱の流入による木材の水分蒸発は概ね終了したと思われる。

F(0)・F(0)IA および LF(0.4) の 3 つの試験体温度を比較するため、非炭化領域の断面内平均温度を図 2.32 に示す。非炭化領域の温度は、燃焼および炭化による焼損が激しい下側およびその隅角部（図 2.25

に示す温度測定点 1，2，7，13，14）を除いた 13 点の断面内平均温度である。図 2.32 に示す温度下降時間とは、断面内平均温度が平均最高温度の 0.95 倍となった時間である。以下、この時間を温度下降時間と称す。なお、これら 3 体の実験においては、実験の時期（9 月と 3 月）が異なるため、実験開始時の初期温度に最大で 16℃程度の差が生じた。

２．３．２．１　放冷過程における炉内空気供給量の影響

炉内空気供給量を増加させた F(0)IA の側面から 45㎜の温度（図 2.30(c)）は、通常の空気量で実施した F(0)の結果（図 2.29(c)）に比べて、放冷 1 時間後において、下面から 60㎜と 90㎜の温度が高かった。実験時の観測で、炉内空気供給量の増加により放冷 1 時間までは、給気口付近の試験体表面において、新鮮空気の流入により燃焼(赤熱等)が助長されたと考えられる。一方、F(0)IA の 8 時間経過時点の断面内温度は約 70℃～140℃であり、F(0)と比較して全体的に 20℃～30℃低かった。図 2.32 に示す非炭化領域の断面内平均温度で F(0)と F(0)IA を比較すると、両者の差は加熱終了直後から見られ、最高平均温度は通常の空気量で実施した F(0)の方が 20℃位高かった。炉内空気供給量を増加させた F(0)IA は、最高温度到達時間が 2.2 時間、温度下降時間が 3.5 時間であり、それぞれ F(0)に比べて 30 分位早かった。炉内空気供給量を増加させると、加熱終了直後に試験体表面の燃焼が助長される一方で、図 2.28 に示したように試験体周辺の炉内温度が早く低下するため、非炭化領域の最高平均温度は 20℃～30℃低くなり、温度下降時間は早くなった。

今回の実験結果では、炉内空気量を増加させた場合、試験体表面の燃焼を助長させる現象が放冷初期に見られた。燃焼がおさまると、空気量増加することで炉内温度を下げることとなり、部材表面から内部にかけての温度は低くなる。耐力低下の要因が、断面内温度の上昇による未炭化領域の高温強度低下によるものと考えると、空気供給量を増加した場合、耐火試験としては有利になる。一方で空気量を減少させた場合は、燃料支配型（炉の中の可燃物である試験体に依存）の火災性状となり、空気量（酸素）が 0 に近づくにつれて炉内のガス濃度（可燃性ガスおよび一酸化炭素含め）は上昇する。可燃物の燃焼に必要な空気量（酸素）が減少していくことで、可燃性ガスとの燃焼反応が鈍くなり、最終的には燃焼が収まると考えられる。一方、炉内温度も下がりにくくなり断面内温度も下がりにくくなるため、耐火性上不利になるとも考えられる。

２．３．２．２　載荷および非載荷による影響

図 2.29 と図 2.31 から載荷の影響を比較すると、非載荷の F(0)では加熱終了後の放冷過程で側面から 45㎜で下面から 60㎜の位置が 260℃を超えたのに対し、載荷した LF(0.4)では側面から 65㎜で下面から 60 ㎜の位置でも 260℃に到達した。載荷の場合に梁下側の温度が高くなった理由は、下凸の曲げモーメントによって梁下側に亀裂が生じやすくなったためと考えられる。

放冷 3 時間経過時の下面から 60㎜以上の位置における各断面最高温度を比較すると、載荷した試験体 LF(0.4)の方が約 30℃～50℃程度全体的に高く、これは放冷 7 時間経過時の全断面の温度分布においても同様の結果であった。図 2.29 (c) と図 2.31 (c)の側面から 45㎜の位置における放冷後の温度履歴を比較すると、F(0)では下面から 90 ㎜以上の部分で梁成方向の温度が均一となったのに対し、LF(0.4)では梁の上側になるに従って温度が低くなった。図 2.31 (c)に示す温度の結果は、図 2.20 に示した非炭化領域断面の結果と対応した。

図 2.32 に示す非炭化領域の断面内平均温度で F(0)と LF(0.4)を比較すると、両者の差は放冷 1 時間後から見られ、最高平均温度は載荷した LF(0.4)の方が 15℃位高かった。最高温度到達時間および温度下降時間を比較すると、LF(0.4)は最高温度到達時間が 3.9 時間、温度下降時間が 5.7 時間となり、F(0)と比較して最高温度到達時間で約 1 時間程度、温度下降時間では 1 時間 30 分近く遅くなった。

梁の場合、載荷した LF(0.4)の方がたわみに伴う亀裂の影響により梁下側の温度が高くなったと考えられる。一方、断面内全体の温度において F(0)試験体よりも LF(0.4)が高い理由は、図 2.28 に示したように LF(0.4)の炉内温度が F(0)よりも高いことに起因し、放冷過程で試験体を抜き取る分割試験体 F(0)に比べて、LF(0.4)では炉内の熱源(試験体部分)が多かったためと考えられる。したがって、F(0)と LF(0.4)による実験結果の比較のみで断面内全体の温度に及ぼす載荷の影響を明らかにできたとはいえず、同じ試験体仕様・加熱放冷条件下での比較が必要である。

単位 : (mm)

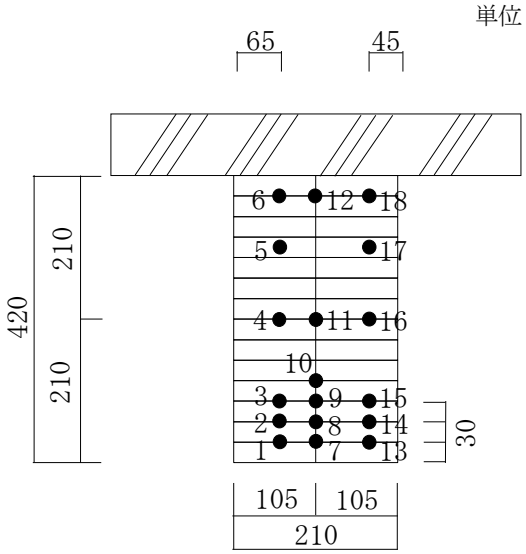


図 2.25 断面内熱電対挿入位置

図 2.27 熱電対配線の様子(梁幅中央断面)

単位 : (mm)

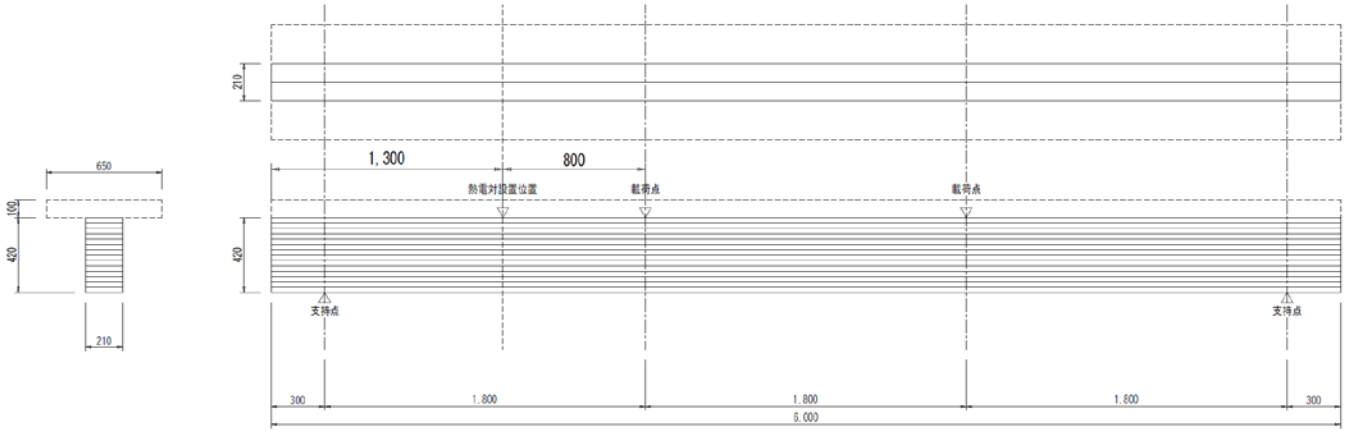


図 2.26 載荷加熱実験試験体の熱電対設置位置

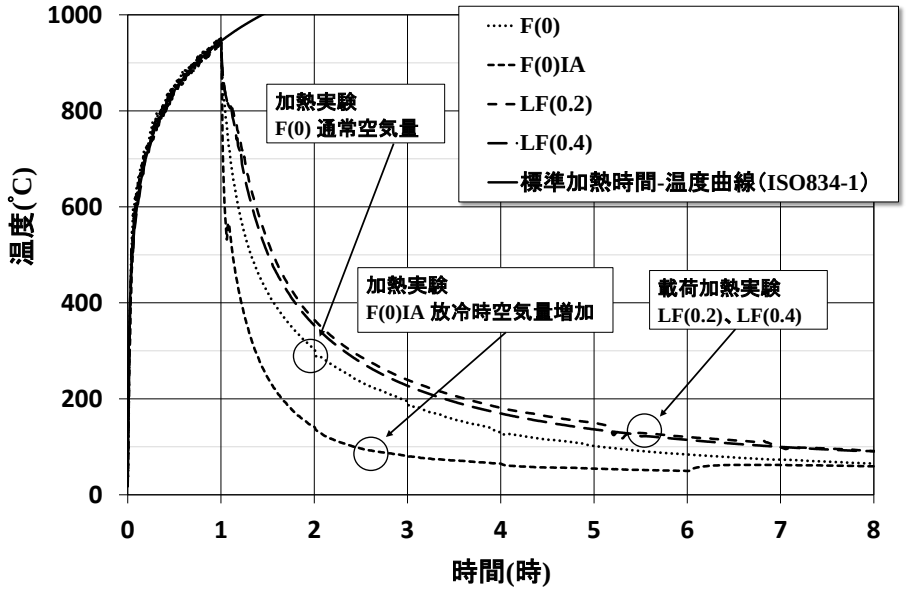
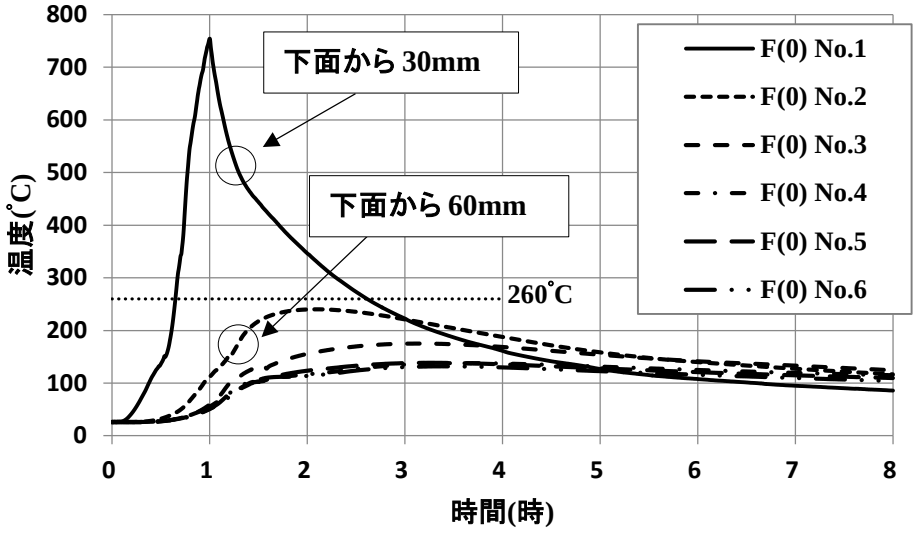
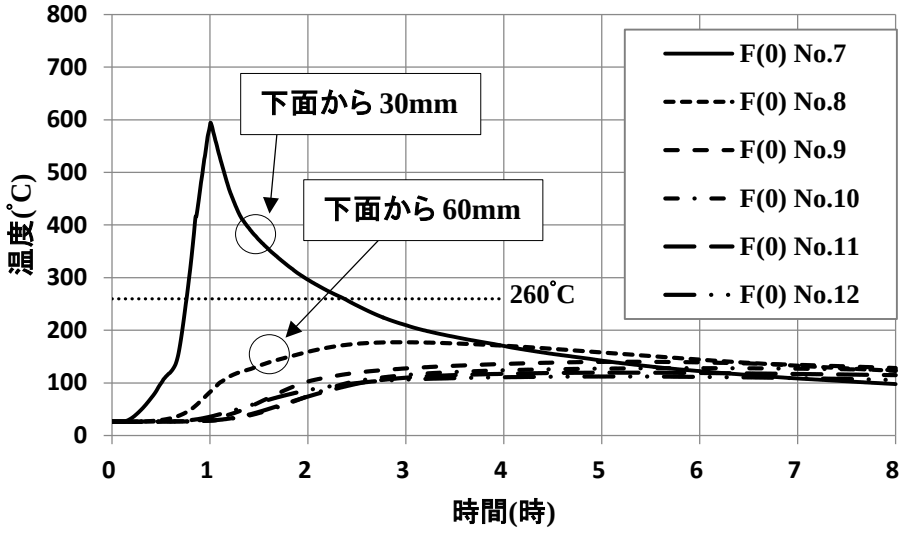


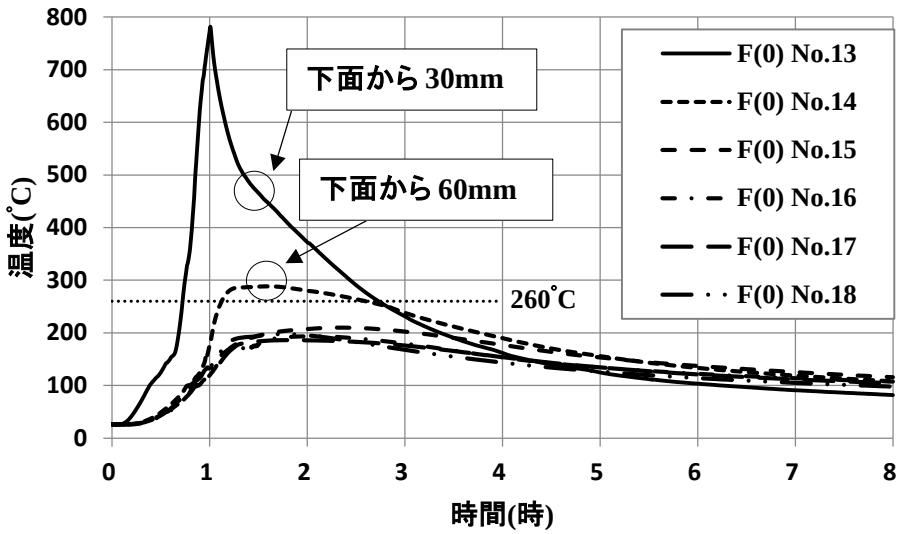
図 2.28 炉内温度測定結果



(a) 側面から 65㎜

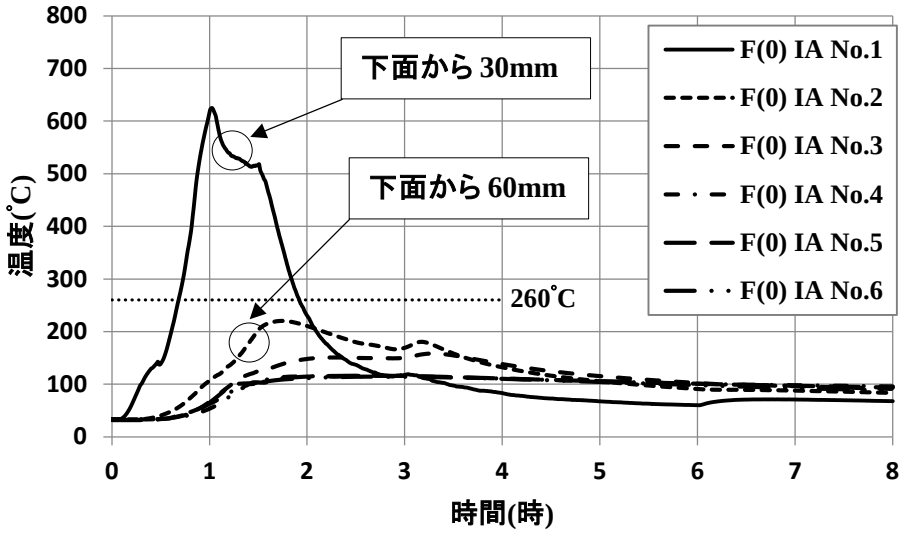


(b) 中央

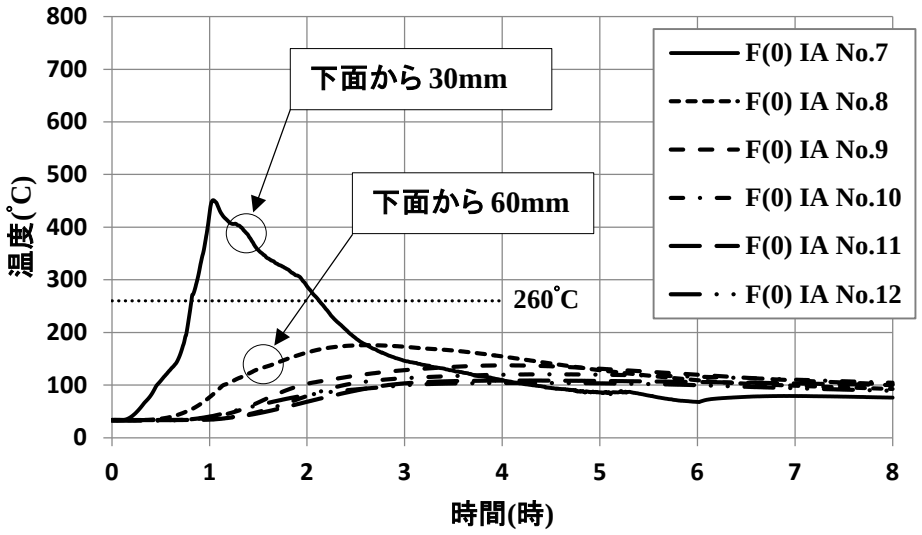


(c) 側面から 45㎜

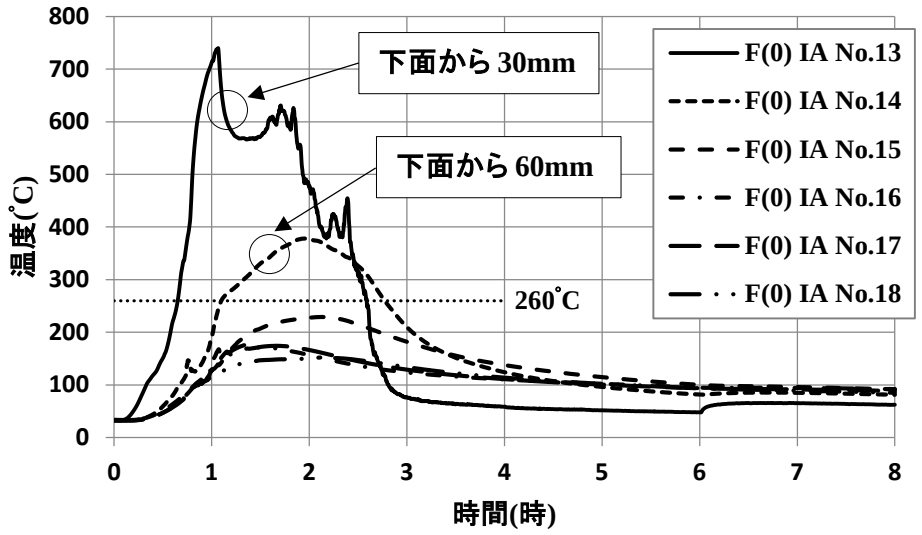
図 2.29 試験体 F(0) 断面内温度分布



(a) 側面から 65㎜

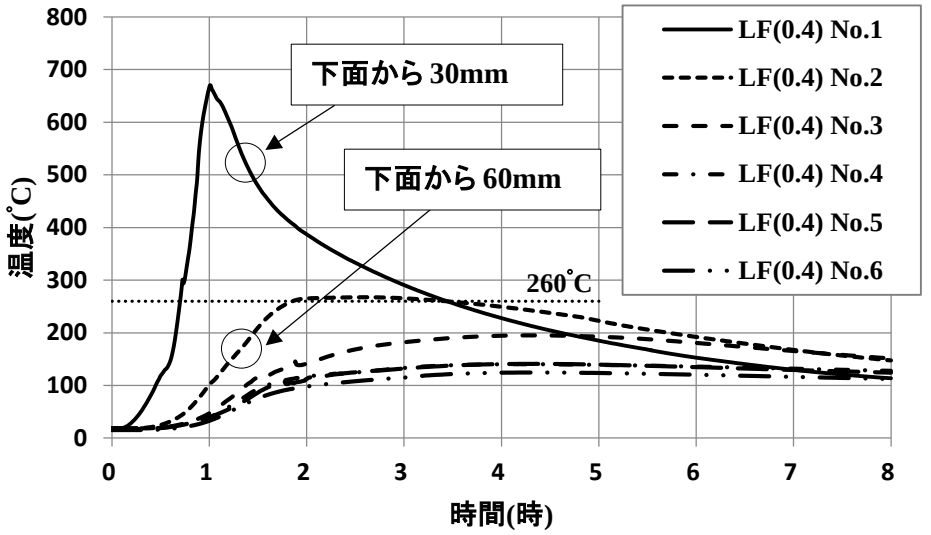


(b) 中央

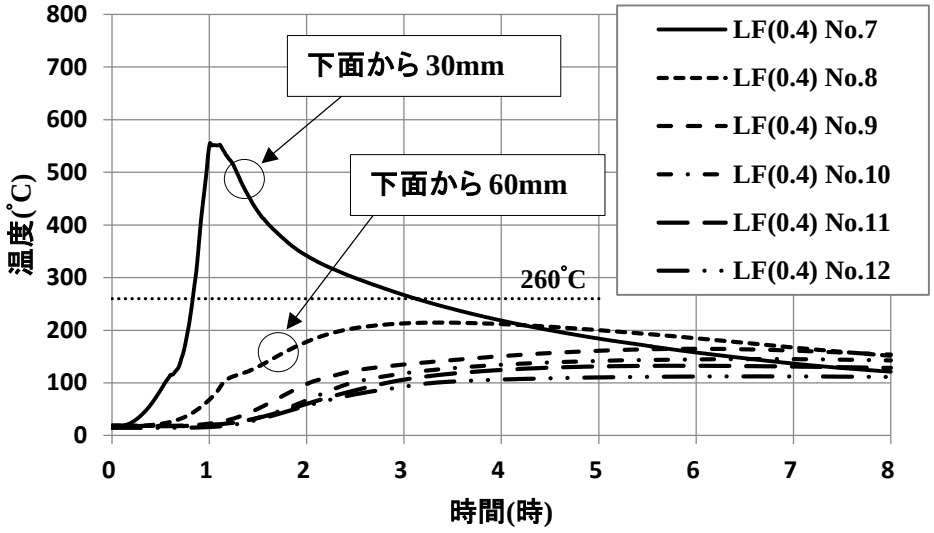


(c) 側面から 45㎜

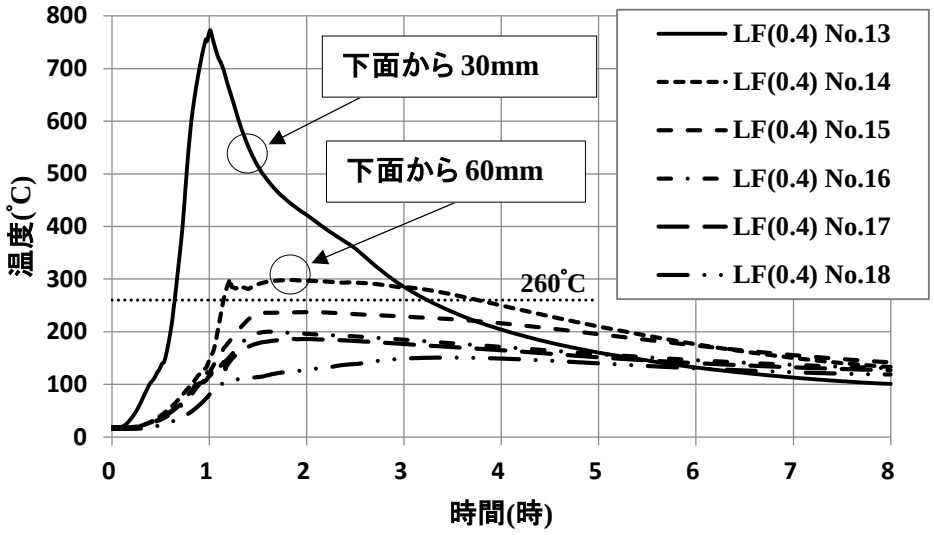
図 2.30 試験体 F(0)IA 断面内温度分布



(a) 側面から 65㎜



(b) 中央



(c) 側面から 45㎜

図 2.31 試験体 LF(0.4) 断面内温度分布

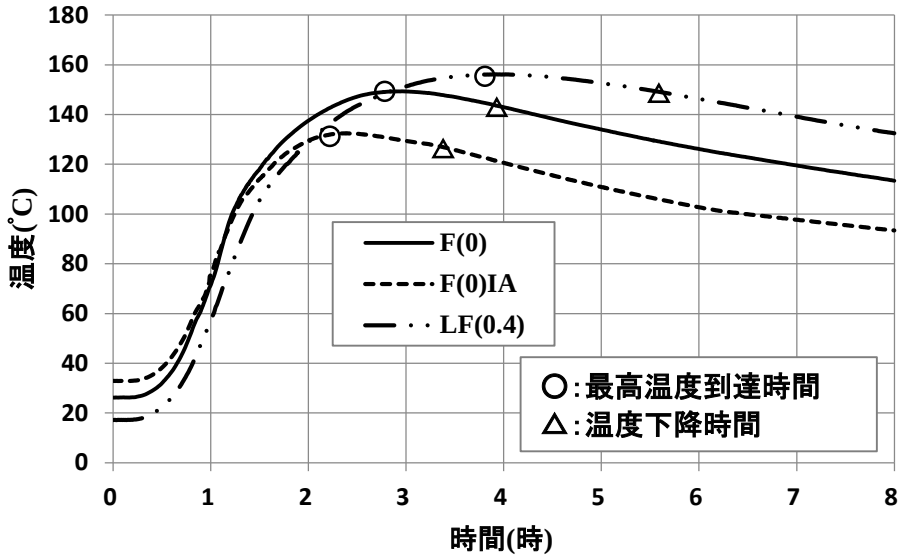


図 2.32 非炭化領域の断面内平均温度

２．４　本章のまとめ

カラマツ集成材梁（幅 210㎜×成 420㎜）の加熱実験および載荷加熱実験より得られた、1 時間の標準加熱を受けた後の放冷過程における炭化性状および断面内温度に関する結果を以下に要約する。

（１）本実験に用いたカラマツ集成材梁では、加熱終了から 7 時間後には赤熱が全く見られず、燃え止まり性能が確認された。

（２）放冷 1 時間以降における非炭化領域の断面性能は、LF(0.2)を除き、加熱前の断面に対してＩは 4 割、Z は 4.5 割、A は 5 割強であった。

（３）放冷過程で炉内空気供給量を増加させた F(0)IA の場合、加熱終了直後の燃焼時間が長くなり、梁下隅角部での炭化が進み、放冷 3 時間後の Z は通常空気供給量の場合に比べて 20％程度小さかった。

（４）載荷加熱実験 LF(0.4)と非載荷実験 F(0)の比較では非炭化領域の断面性能に及ぼす影響は見られなかったが、2 つの載荷試験体 LF(0.2)と LF(0.4)のＩ・Z・A では、放冷 7 時間時と放冷 24 時間時の比較で 1～2 割の差が見られた。

（５）載荷が断面内温度へ及ぼす影響は、たわみによって亀裂が生じる梁下側で見られた。

（６）標準加熱時の平均炭化速度は、梁幅方向で 0.61㎜/分、梁背方向で 0.72㎜/分であり、既往の実験結果に近い値であった。F(0)における火災加熱終了後の放冷過程における炭化速度は比較的小さく、加熱終了から 1 時間以内で主に隅角部の炭化領域が拡大したが，加熱終了から 1 時間以降では炭化領域が拡大しなかった。

（７）側面から 65㎜ 以上の深さの領域では、加熱終了後放冷 2 時間経過以降に断面内温度が 100℃に到達し、温度の上昇が緩やかになり水分の蒸発潜熱の影響である温度停滞が見られた。

（８）F(0)試験体の非炭化領域の温度は、加熱終了後から放冷 1 時間までの上昇が大きく、放冷 3 時間後に概ね最大（全断面で 110℃から 200℃）となり、放冷 3 時間以降は緩やかに低下した。

（９）放冷過程で炉内空気供給量を増加した F(0)IA の場合、炉内の雰囲気温度は低くなり、非炭化領域全体の断面内温度が 20℃～30℃低くなった。

第２章の参考文献

1) 今泉勝吉：木材工業，31（11），pp.502-504，1976.

2) 中村賢一，宮林正幸：木材工業，40（12），pp.563-567，1985.

3) 上杉三郎：木材学会誌，40（4），pp.424-428，1994.

4) 日本住宅・木材技術センター：地域を活かした新事業・起業創出緊急対策事業 製材耐火性能開発事業報告 pp.1-96，2003.7

5) 成瀬友宏，中村賢一，遊佐秀逸，増田秀昭，原田寿郎，山田誠，佐藤章:構造用製材の耐火性能 その1，スギとカラマツの炭化速度，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.11-12 2004.8

6) 河原崎政行，戸田正彦，田坂茂樹：火災時におけるカラマツ集成材の炭化の進行と密度の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.281-282 2008.9

7) 大橋宏和，長岡勉，永盛洋樹，高橋拡，山本正人,杉田敬太郎，遊佐秀逸，大宮喜文，山田誠，齋藤潔:耐火木造部材の荷重支持部の木材密度が耐火性能に与える影響，日本建築学会技術報告集 第21巻 第47号 pp.151-156 2015.2

8) 松本匠，平島岳夫，金城仁，遊佐秀逸，堀尾岳成，齋藤潔：カラマツ集成材の強度に及ぼす温度と水分蒸発の影響，日本建築学会関東支部研究報告集 2015.3

9) ISO 834-1: Fire - resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999

10) 昭和62年建設省告示第1902号および平成12年建設省告示第1380号

11) 堀長生，西村俊彦，丹羽博則，安部裕，山口純一，上原茂男:燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究、その1 火災終了後の自己燃焼に関する実験的検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.149-150 2004.8

第３章　標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下

３．１　実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５１
３．２　実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
３．２．１　試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
３．２．２　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５３
３．３　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５４
３．３．１　火災加熱前の耐力および剛性・・・・・・・・・・・・・・５４
３．３．２　火災加熱終了後および放冷過程での耐力・剛性低下・・・・・５５
３．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６０
第３章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６１

３．１　実験目的

木質構造においては、不燃材料による構造とは異なり、盛期火災後の火災減衰期（建物内部にある可燃物の燃焼後）においても、部材の自己燃焼が継続して耐火性能が失われる恐れがある。したがって、木質構造部材の耐火性能評価試験では、所定の加熱時間までの性能のみならず、火災加熱終了後の放冷過程における燃え止まり性能についても要求されている。これより、耐火木質構造部材に関する我が国の研究開発では、木質材料を難燃化した工法、木質構造部材の内部に不燃材料を挿入した工法など、火災加熱終了後の放冷過程における燃え止まり性能に着眼したものが多い[1)、2)]。一方で構造部材の耐火性能を検討するには、火災加熱終了後の燃え止まり性能のみならず、非損傷性能（具体的には耐力低下の推移）の把握は重要である。

燃え止まり性能を要求されない準耐火構造については、構造用集成材梁の火災時耐力について、長期許容応力度を指標とした荷重レベルに対する耐火時間（破壊時間）が示されている[3)～6)]。これらは準耐火構造の目標耐火時間である 45 分および 60 分についての性能に着眼した非損傷性能についての把握となっている。しかしながら、所定の時間に対する非損傷性能（変形量および変形速度が制限値を超えないこと）を確認するための耐火性能評価試験[7)]では、不合格となる試験体を除き、火災加熱終了後の放冷過程を含めた火災時耐力（破壊が生じた時間に対応する耐力）に関するデータは得られない。準耐火構造における火災時耐力についての報告とは異なり、耐火木質構造部材の火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下に言及した報告はなく、耐火木質構造部材の火災加熱終了後の放冷過程における挙動は未だ明らかでない。

このような背景のもと、カラマツ集成材の梁を対象とし、1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程における梁の耐力・剛性低下を把握することを目的として、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施した。本章ではこれらの実験概要と実験結果を述べる。

３．２　実験計画

３．２．１　試験体

実験内容および実験条件を表3.1に示す。火災加熱終了後の放冷過程における力学的挙動については、載荷実験（荷重漸増実験）と載荷加熱実験（温度漸増実験）の両者で検討した。載荷実験（L-0h, L-1h, L-4h）の目的は、常温時に対する 1 時間加熱直後と放冷過程（本実験では 3 時間放冷後）における剛性・耐力の低下を把握することである。載荷加熱実験（LF-1h, LF-4h）の目的は、載荷加熱時および放冷時における梁のたわみ挙動と破壊性状を把握することである。載荷実験との相関も調べるため、載荷加熱実験で与える一定荷重は、載荷実験より得られた最大荷重とした。

梁試験体の寸法は幅 210mm×成 420mm×長さ 6,000mm とした。試験体仕様（樹種・強度等級および製作時の諸条件）については、２章の試験体と同一である。試験体の密度の平均値は 0.53 g/cm^{3}であった。JIS Z 2101 の木材の含水率測定方法（全乾法）により得られた含水率の平均値は 11.0%であり、一般的な値と大差はなかった。梁試験体を 3 面加熱とするために、上部は繊維混入けい酸カルシウム板およびセラミックファイバーブランケットにて被覆した。

表 3.1 実験条件表

試験体記号	実験内容	検討事項	実験条件
L-0h	載荷実験	耐力 剛性	加熱せず、20kN/分で破壊まで載荷。
L-1h			1時間加熱終了後に載荷開始(破壊まで荷重漸増)。
L-4h			1時間加熱終了後、炉内3時間放冷後に載荷開始 (破壊まで荷重漸増)。
LF-1h	載荷加熱実験	耐火時間 耐力	L-1hの最大荷重にて載荷加熱し、破壊まで加熱継続。
LF-4h			L-4hの最大荷重にて1時間載荷加熱し、炉内放冷時は 破壊まで載荷継続。

３．２．２　実験方法

試験体への加熱は ISO834-1[8]に規定される標準加熱時間-温度曲線（以下，標準加熱）による 1 時間加熱とし、その後は炉蓋を閉めた状態で炉内にて放冷した。放冷時における炉内への空気供給量は、耐火性能評価試験と同様に、加熱終了後は炉内排煙に必要な最低空気量の供給とした。炉内温度測定結果（測定 8 点の平均）の 2 例（F(0)および L-4h）を図 3.1 に示す。炉内温度は、1 時間加熱時は 945℃位であるが、加熱開始から 2 時間後では約 300℃、4 時間後では約 150℃であった。2 章で実施した加熱実験（F(0)）では後述する分割試験体を取りだす際に炉蓋部分が開放される時間帯が若干あるが、その影響は小さく、放冷時の炉内温度は載荷実験（L-4h）とほぼ同じであった。実験は２章と同じ多目的水平加熱炉で実施した。

載荷実験および載荷加熱実験における梁試験体の支点間距離は 5,400mm、3 等分点 2 線載荷方式とし、等曲げ区間は 1,800mm である。中央ジャッキにロードセルを設置し、荷重値を計測した。たわみについては試験体中央及び載荷点(2 箇所)について計測した。載荷実験における載荷速度は 20kN/分程度とし、破壊するまで載荷した。常温実験（L-0h）においては、梁中央の縁ひずみを圧縮側と引張側で 6 点ずつ計 12 点測定した。試験体は梁成方向（積層方向）の接着のみで、二次接着はされていない。また、試験体毎の耐力のバラツキを小さくするため、ラミナのフィンガージョイント継手位置を全層ともに等曲げ区間である載荷点より外側へ配置させた。実験は、試験体の荷重支持能力が無くなるまで載荷した。

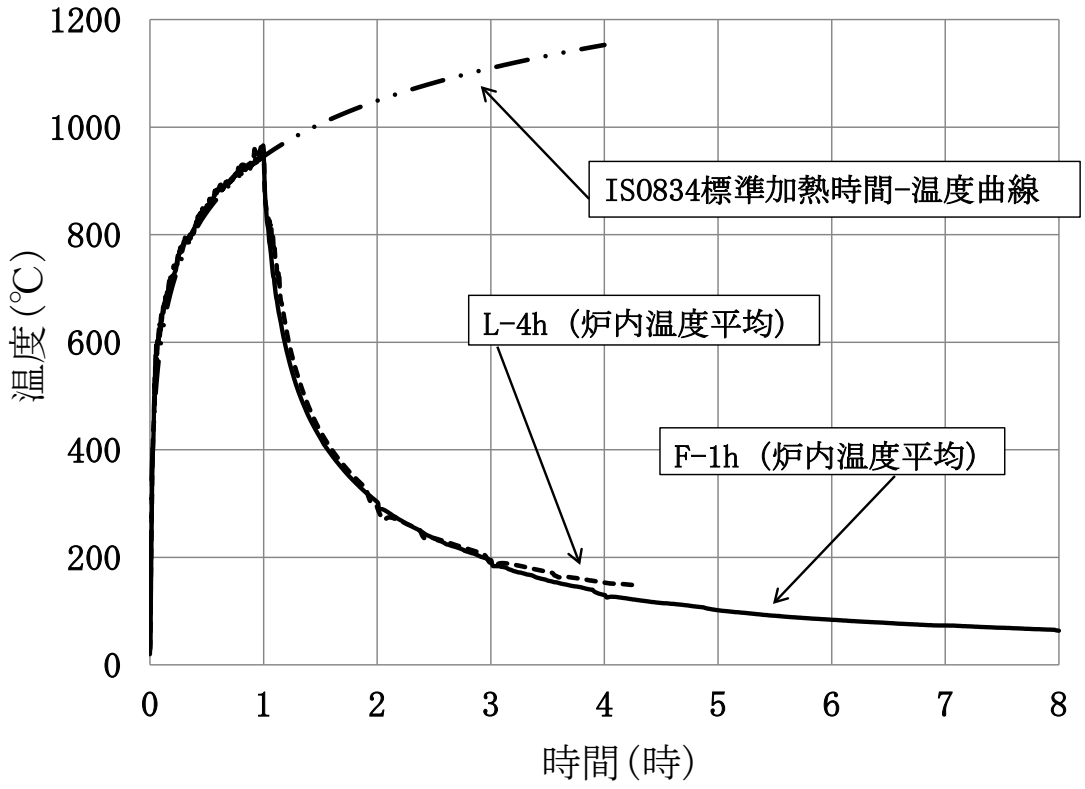


図 3.1 炉内温度測定結果（F-1h、L-4h）

３．３　実験結果

３．３．１　火災加熱前の耐力および剛性

載荷実験による荷重とたわみの関係を図 3.2 に示す。最大荷重に至るまで弾性的な挙動を示した。常温時(L-0h)の最大荷重は 292.0 kN であり、本試験体の曲げに関する基準材料強度 31.5 N/mm^{2}より算定される耐力値に対して 1.35 倍であった。構造用集成材を製造する場合は設計基準強度に対して 1～2 割程度の安全率が見込まれているが、今回の実験ではラミナのフィンガージョイントの継手配置を梁中央部の等曲げ区間から外したことから、通常よりも若干高めの結果となったと考えられる。常温実験(L-0h)における最大荷重時の梁中央断面の縁ひずみは、図 3.3 に示すように圧縮・引張両側ともに約 4000×10^{-6}であった。最大荷重時のたわみは、61.1mm であった。

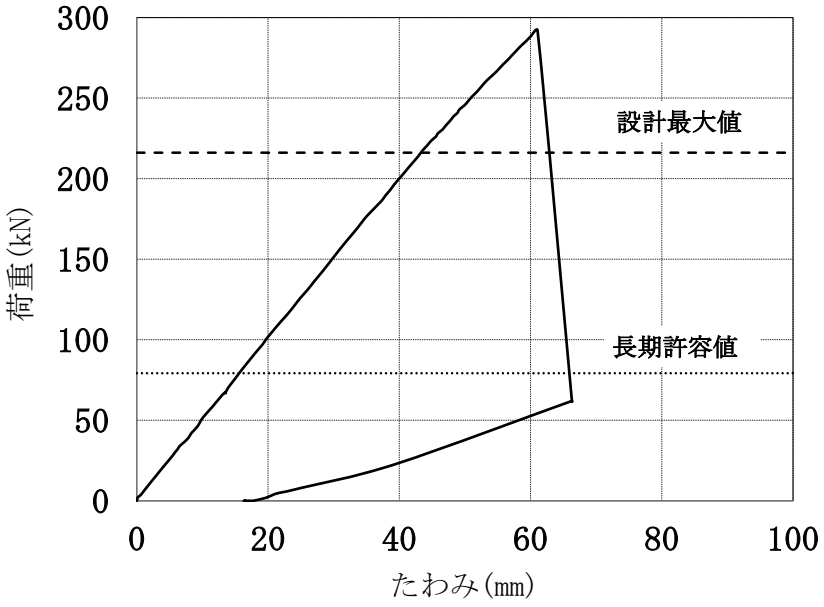


図 3.2 荷重-たわみ関係 (L-0h)

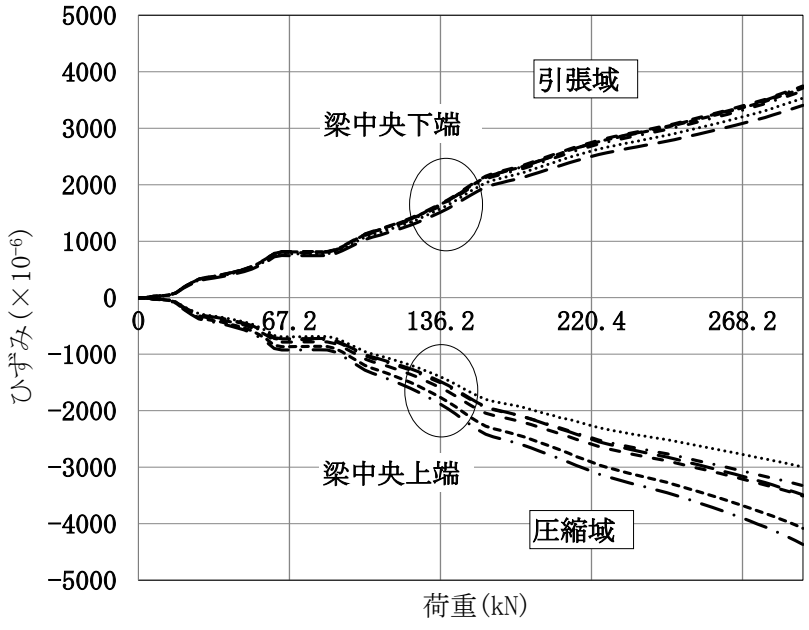


図 3.3 常温実験 (L-0h) における荷重-ひずみ関係

３．３．２　火災加熱終了後および放冷過程での耐力・剛性低下

1 時間加熱直後の載荷実験（L-1h）では、1 時間後に加熱を終了した直後から載荷し、破壊までに 7.5 分の時間を要した。1 時間加熱終了から 3 時間後の載荷実験(L-4h)では破壊までに 5 分の時間を要した。火災加熱終了後および放冷過程における荷重とたわみの関係を図 3.4 に示す。加熱 1 時間後(L-1h、最大耐力時の時間は 67.5 分)における最大荷重は 88.2 kN であり、常温時耐力の約 30%であった。加熱 1 時間終了後に 3 時間放冷した実験(L-4h、最大荷重時の時間は 245 分)では、最大荷重が 41.6kN であり、常温時耐力の約 14%であった。設計指標となる長期許容値で比較すると、L-1h の最大荷重は長期許容値より大きかったが、L-4h の最大荷重は長期許容値より小さかった。

最大耐力時の半分の荷重による曲げ剛性においては、加熱 1 時間後(L-1h)では常温時の約 38%、加熱 1 時間終了後に 3 時間放冷(L-4h)した場合は約 25%まで低下した。

L-1h と L-4h の比較から、炉内で 3 時間の放冷をされている間に、耐力および剛性が大きく低下したことが分かる。火災加熱終了後における部材耐力の低下の原因については、未炭化領域における温度上昇に伴う部材耐力・剛性の低下、梁下端隅角部における炭化の進行が考えられる。また、木材内部の水分の蒸発も、部材の耐力低下に影響する要因の一つと考えられる[9)]。最大荷重時のたわみは、L-1h は 61.2㎜および L-4h は 45.2㎜ であった。写真 3.1(a)～写真 3.1(c)に示すように、3 体ともに、梁中央部近傍の最下層のラミナにおける引張破断に起因すると思われる曲げ破壊であった。

耐力（最大荷重）に至るまでの挙動が弾性的で脆性的な破壊を示す部材では、局所的な欠陥が耐力に大きな影響を及ぼし、耐力のバラツキが大きくなる。木構造部材においては、節等の欠損が常温時の耐力に影響を与え、加熱を受けた場合は炭化層の亀裂・脱落等のバラツキが耐力へ影響を及ぼす事となり得る。耐力に関する更なるデータの蓄積が必要である。

載荷加熱実験では載荷実験での耐力と比較するため、1 時間後の破壊を想定した載荷加熱実験（LF-1h）では載荷実験（L-1h）による最大荷重値を載荷荷重とし、加熱終了から 3 時間後の破壊を想定した載荷加熱実験（LF-4h）では載荷実験（L-4h）による最大荷重値を載荷荷重とした。LF-1h では破壊するまで標準加熱時間-温度曲線による加熱を継続し、LF-4h では 1 時間加熱後に放冷した。

載荷加熱実験(LF-1h)における梁中央部のたわみ-時間関係を図 3.5 に示す。加熱開始直後からたわみが増加し，60 分以降でたわみ速度が増加し，79 分に荷重支持能力を失った。60 分位で壊れるという予想に反して、載荷実験 L-1h の最大耐力時の時間 67.5 分を大きく上回る結果であった。破壊時のたわみは 76㎜ であり、載荷実験 L-1h での最大荷重時のたわみ 61.2㎜ もより大きかった。LF-1h では、写真 3.2(a)に示すように載荷点近傍の最下層ラミナが破断しており、曲げ破壊であったと考えられる。載荷加熱実験 LF-1h において予想を上回る 79 分の耐火時間を示した理由を今回の実験結果のみで述べることは難しいが、前述したように部材強度もしくは炭化状況のバラツキが影響したと考えられる。

載荷加熱実験(LF-4h)における梁中央部のたわみ-時間関係を図 3.6 に示す。LF-1h と同様に加熱直後からたわみは増加し、40 分以降からたわみ速度が大きくなり、加熱を終了した 60 分以降でもたわみは増加し続け，121.5 分後に荷重支持能力を失った。載荷実験 L-4h で得られた最大荷重で載荷したため、240 分位までの荷重支持能力を期待したが、それと比べて半分位の時間であった。破壊時 121.5 分のたわみは約 65㎜ であり、載荷実験 L-4h の最大荷重時のたわみよりも大きかった。LF-4h の実験後における破壊状況を写真 3.2(b)に示す。LF-4h では、試験体の表面観察では破壊位置を確認できなかったが、載荷点付近で試験体を切断したところ、写真 3.2(b)の右写真に示すようにラミナの接着層付近のずれに起因するせん断破壊が確認された(黒丸の箇所)。載荷加熱実験 LF-4h において予想を下回る 121.5 分の耐火時間を示した理由は、ラミナ接着層付近でせん断破壊が生じたことが原因の一つと考えられる。

２章における F-1h の実験結果の図 2.29（例えば(b)の断面中央部の温度）において、実験開始 2 時間

以降の断面内部の温度上昇が緩やかになった時間と、LF-4h の実験で荷重支持能力を失った時間がほぼ同じであることから、水分の蒸発が部材耐力の性能低下に影響を与えた可能性が考えられる。

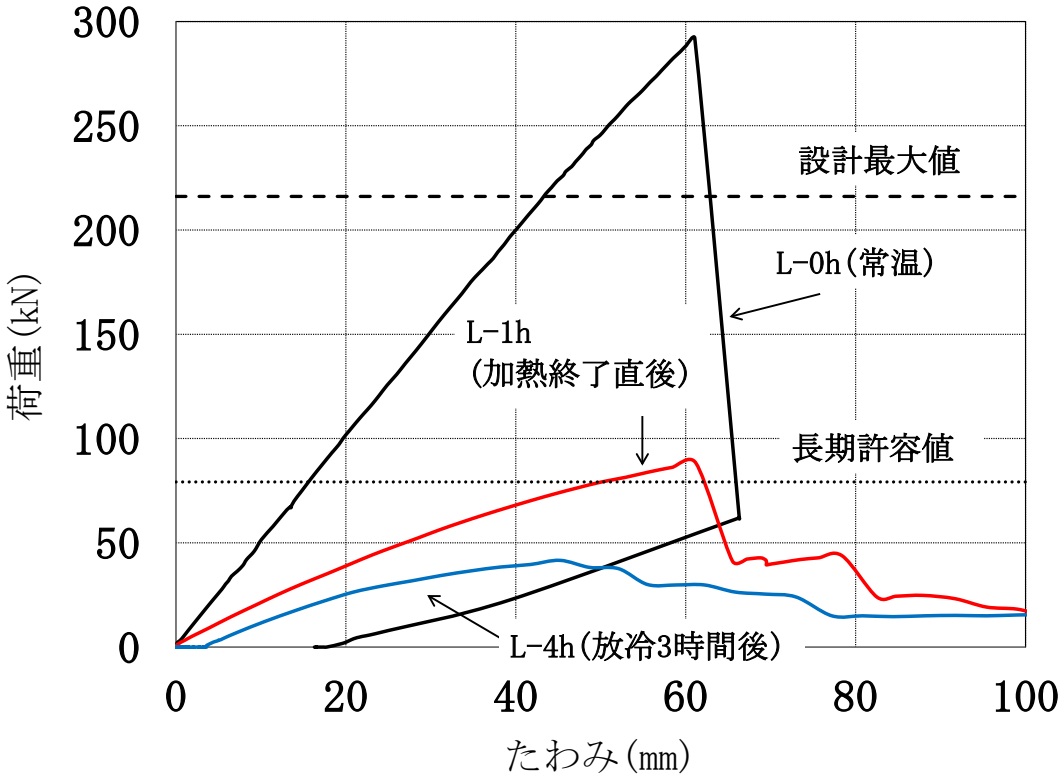


図 3.4 荷重-たわみ関係 (L-0h, L-1h, L-4h)

写真 3.1(a) 載荷実験の破壊状況 (L-0h)

写真 3.1(b) 載荷実験の破壊状況 (L-1h)

写真 3.1(c) 載荷実験の破壊状況 (L-4h)

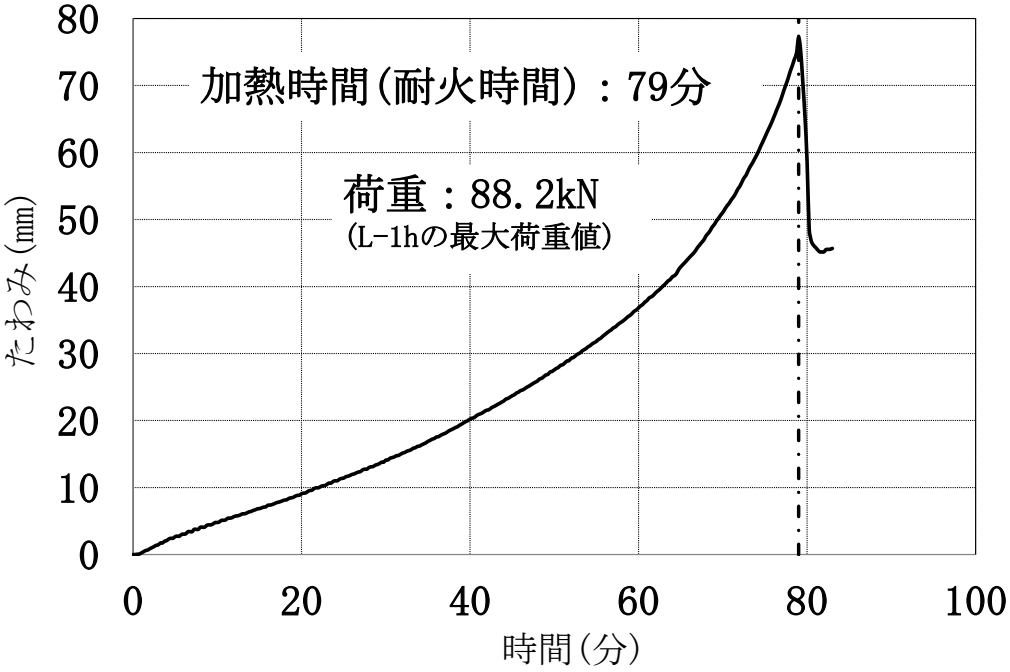


図 3.5 たわみ-時間関係 (LF-1h)

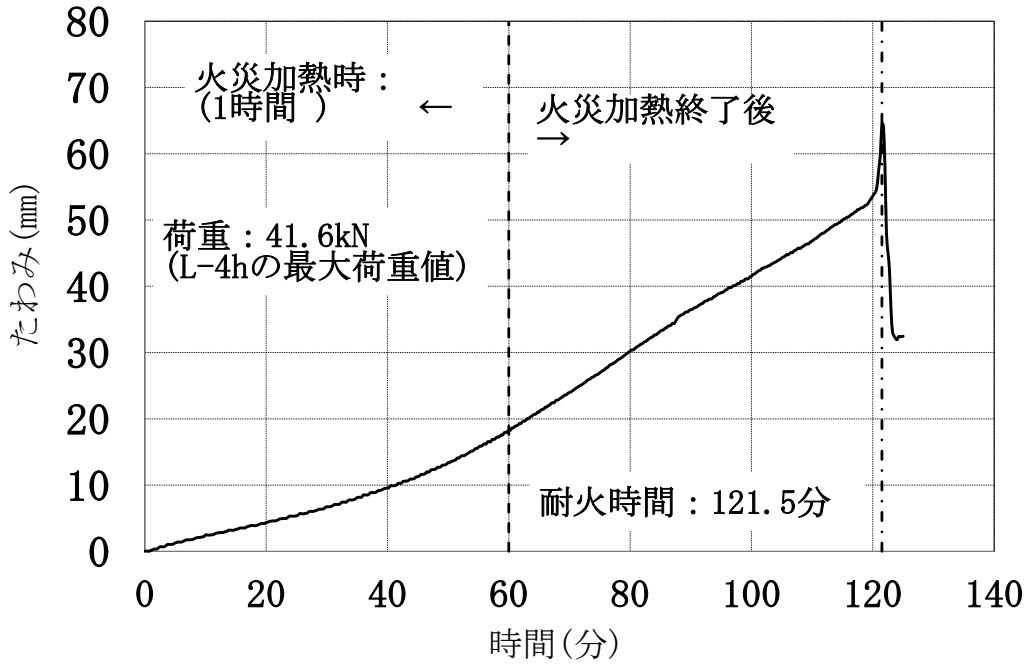


図 3.6 たわみ-時間関係 (LF-4h)

写真 3.2(a) 載荷実験の破壊状況 (LF-1h)

写真 3.2(b) 載荷実験の破壊状況 (LF-4h)

３．４　本章のまとめ

本研究において実施した載荷実験および載荷加熱実験より得られた、1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程における梁の耐力・剛性低下についての知見を以下にまとめる。

(1) 常温時および加熱後載荷実験では、最大荷重に至るまで弾性的挙動を示して曲げ破壊した。常温時の耐力に対して、加熱 1 時間直後の最大耐力は 30%まで低下し、さらに 3 時間放冷後は 14%まで低下した。

(2) 最大耐力時の半分の荷重による曲げ剛性を算定した。常温時の曲げ剛性に対して、加熱 1 時間直後の曲げ剛性は 38%まで低下し、3 時間放冷後においては 25%まで低下した。

(3) 載荷加熱実験においては、加熱終了後もたわみは増加し続けた。LF-4h の実験においては、載荷実験 L-4h で得られた最大荷重による載荷加熱実験であったが、約半分の時間(121 分)で荷重支持能力を失った。

(4) 火災加熱終了後における部材耐力の低下の原因については、未炭化領域における温度上昇に伴う部材剛性・耐力の低下、梁下端隅角部における炭化の進行が考えられる。

(5) 耐力（最大荷重）に至るまでの挙動が弾性的で脆性的な破壊を示す部材では、局所的な欠陥が耐力に大きな影響を及ぼし、耐力のバラツキが大きくなる。木構造部材においては、節等の欠損が常温時の耐力に影響を与え、加熱を受けた場合は炭化層の亀裂・脱落等のバラツキが耐力へ影響を及ぼす事となり得る。

第３章の参考文献

1) 宮本圭一，抱憲誓，西村光太，服部順昭，安藤恵介，石垣弘之，原田寿郎，上川大輔，宮林正幸，大内富夫：耐火集成材の開発 その 7，ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材梁の載荷加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.323-324 2009.8

2) 集成材建築物設計の手引：日本集成材工業協同組合 編著 大成出版社 p.170，2012.5

3) 最上淀二，中村賢一，山田誠，上杉三郎，宮林正幸：構造用集成材はりの耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系 pp.2789-2790 1983.9

4) 須藤昌照，山田誠，宮林正幸，吉川利文，中村賢一：構造用集成材・単板積層材の耐火性能，梁の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.147-148 2000.9

5) 西田一郎，山田誠，宮林正幸，中村賢一：API 接着剤を用いた構造用集成材の耐火性能に関する研究 その 2，燃えしろ設計を適用したはり部材の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.23-24 2005.9

6) 田中義昭，河原崎政行，戸田正彦：木質被覆材を用いたカラマツ集成材梁の準耐火性能の検討 その 2，載荷加熱試験による評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.315-316 2009.8

7) (一財)ベターリビング制定　防耐火性能試験・評価業務方法書 平成 12 年 6 月 1 日制定/平成 27 年 6 月 1 日最終変更

8) ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999

9) Schaffer, E.L.: State of structural timber fire endurance, Wood and Fiber ,Vol.9, No.2, pp.145～170、1977

第４章　標準火災加熱時とその放冷過程における梁のたわみ・破壊性状

４．１　実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６３
４．２　実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
４．２．１　試験体・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
４．２．２　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６５
４．３　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６６
４．３．１　たわみ挙動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６６
４．３．２　破壊性状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７０
４．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７２
第４章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７３

４．１　実験目的

２章および３章において、構造用集成材による梁を対象として、1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程における挙動（炭化・温度分布および耐力）を把握することを目的とした実験を行い、構造用集成材梁の放冷過程を含めた火災時耐力について実験結果を示した。その実験結果より、火災加熱終了後の放冷過程においては炭化の進行は比較的小さいが、残存断面部の温度は加熱終了後から上昇して放冷 3 時間後に全断面で 100℃以上となり、梁の耐力が加熱終了直後に対して 3 時間放冷後は半減することが明らかにされた。木構造部材の火災加熱終了後の放冷過程における非損傷性について検討を行うには、火災加熱終了直後からの部材耐力を段階的に把握することは重要である。火災加熱時における木構造部材のたわみ挙動と破壊性状を踏まえた耐力低下傾向については、準耐火構造（要求耐火時間と加熱時間が同じ）に対する実験・研究により示されている [1)~4)]。一方で耐火構造を対象とした火災加熱終了の放冷過程における耐力については、難燃薬剤処理された耐火集成材の小断面梁部材（幅 240×背 180）が、加熱 1 時間終了後の放冷過程（254 分）において、曲げ破壊により破断したことが報告されている [5)]。しかし、放冷過程におけるたわみ挙動および破壊性状について言及した報告は殆ど無い。火災終了後の放冷過程における非損傷性能について言及するためには、放冷過程におけるたわみ挙動および破壊性状を踏まえた耐力について詳細に把握する必要がある。

このような背景のもと、２章および３章と同様なカラマツ集成材の梁を対象とし、1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程におけるたわみ挙動と破壊性状を踏まえた耐力低下傾向を把握するために、荷重レベルを指標とした載荷加熱実験を実施した。本章ではこれらの実験概要と実験結果を述べる。

４．２　実験計画

４．２．１　試験体

実験条件を表 4.1 に示す。試験体数は全部で 7 体、実験は常温時の部材耐力を把握するために実施した載荷実験 L-RT を除き、残りはすべて載荷加熱実験とした。実験条件は長期許容荷重に対する載荷荷重の比である。長期許容荷重を指標とした載荷加熱実験により、その荷重条件を変えることで梁部材の破壊に至るまでのたわみ挙動の違いについて検討する。LF-0.6 および LF-0.4(1)の試験体については、加熱終了後の放冷過程における部材断面内の温度上昇を把握するために部材断面に熱電対を挿入している。

試験体仕様については、３章における試験体仕様と同一とした。LF-0.4(1)および LF-0.6 の試験体については、部材断面に熱電対を挿入するため、二次接着を施したが、それ以外の試験体 5 体について二次接着は施していない。また、試験体毎の耐力のバラツキを小さくするため、３章と同様にラミナのフィンガージョイント継手位置を全層ともに等曲げ区間である載荷点より外側へ配置させている。熱電対挿入位置については２章と同位置である。

表 4.1 実験条件表

試験体記号	実験内容	実験条件
L-RT	載荷実験	常温耐力確認(最大耐力までの破壊実験)
LF-1.0	載荷加熱実験（1時間加熱）	79.2kN (長期許容荷重)
LF-0.8		63.4kN (長期許容荷重×0.8)
LF-0.6※		47.5kN (長期許容荷重×0.6)
LF-0.4(1)※		31.7kN (長期許容荷重×0.4)
LF-0.4(2)		
LF-0.2		15.8kN (長期許容荷重×0.2)

※試験体断面内温度測定のため熱電対を挿入。

４．２．２　実験方法

試験体への加熱は ISO834-1[6]に規定される標準加熱時間-温度曲線（以下，標準加熱）による 1 時間加熱とし、その後は炉蓋を閉めた状態で炉内にて放冷した。炉内温度測定結果（測定 8 点の平均）を図 4.1 に示す。炉内温度は、1 時間加熱時は 945℃位であるが、放冷 1 時間後では約 350℃、放冷 3 時間後では約 180℃、7 時間後で約 90℃、放冷 24 時間後には常温（23℃）まで下降していた。

載荷実験および載荷加熱実験の載荷方法は 3 章と同様である。梁試験体の支点間距離は 5,400㎜、3 等分点 2 線載荷方式とし、等曲げ区間は 1,800㎜ である。内部に熱電対を挿入していない試験体は梁成方向（積層方向）の接着のみで、二次接着はされていない。熱電対を挿入した試験体は二次接着（梁幅方向中央位置）を施した。たわみについては試験体中央及び載荷点(2 箇所)について計測した。実験は、試験体の荷重支持能力が無くなるまで載荷した。

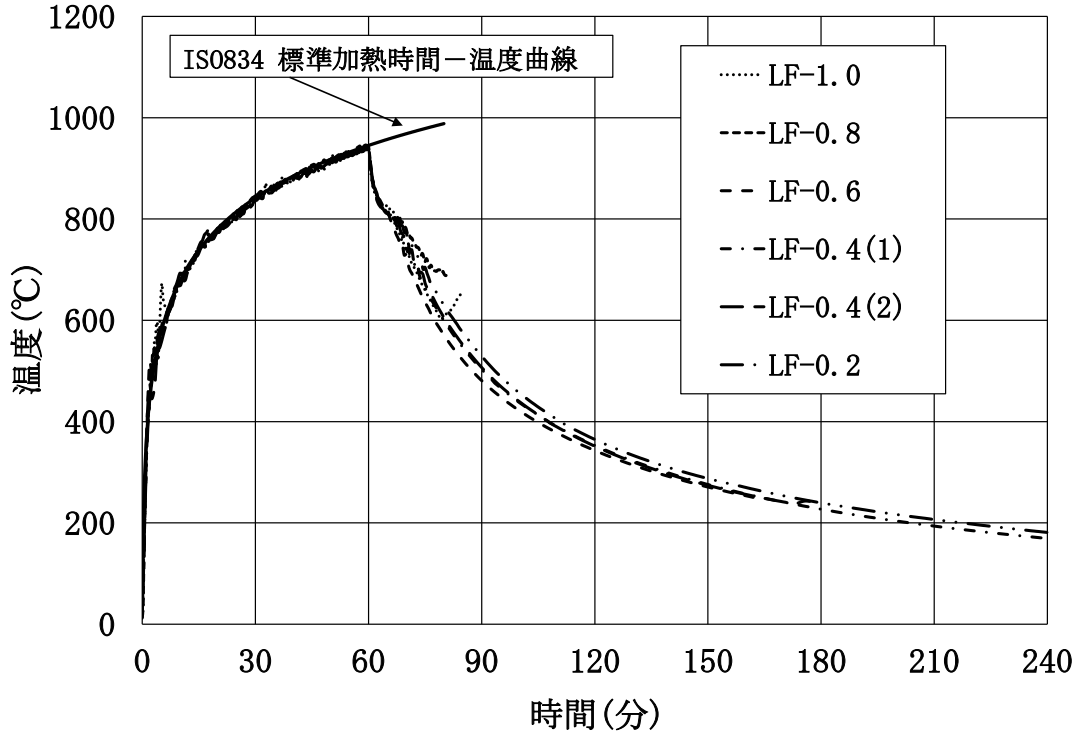


図 4.1 炉内温度測定結果

４．３　実験結果

４．３．１　たわみ挙動

載荷実験（L-RT）における載荷速度は 20kN/分程度とし、破壊するまで載荷した。常温載荷実験においては、梁中央の縁ひずみを圧縮側と引張側で 6 点ずつ計 12 点測定した。最大耐力時の荷重は 350kN であり、本試験体の曲げに関する基準材料強度 31.5kN/mm^{2}から算定される耐力値の 1.62 倍であった。最大耐力時の梁中央縁ひずみは、圧縮側が 4300×10^{-6}、引張側が 3860×10^{-6}であった。最大たわみは 76.3mm であった。梁の載荷実験による縁応力度-縁ひずみ関係を図 4.2 に示す。図 4.2 より、圧縮域および引張域ともに縁応力度が最大になるまで直線的に増加しており、３章での常温実験と同様に脆性的な破壊を示した。破壊性状は、写真 4.1 に示すように、等曲げ区間内の梁最下層ラミナの節から材軸方向(繊維方向)に垂直に亀裂が生じており、曲げ破壊であった。

放冷過程で破壊した試験体のたわみ-時間関係を図 4.3 に、破壊しなかった試験体の結果を図 4.4 に示す。

図 4.3 より、LF-1.0 および LF-0.8 については、加熱中からたわみは増加し、その後急激なたわみ増加により荷重支持能力を失い、破壊に至った。荷重支持能力を失った時点での最大たわみ量は、LF-1.0 が 56.6mm、LF-0.8 が 41.1mm であった。破壊時間は LF-1.0 が 79 分であり、耐火性能評価試験における準耐火 1 時間の性能を満足した。LF-0.8 の破壊時間は 76 分であった。LF-0.6 については、加熱終了後から徐々にたわみが増加し始め、放冷約 1 時間 40 分後にたわみが急増し、荷重支持能力を失った。荷重支持能力を失った時点での最大たわみ量は 82.6mm、破壊時間は 158 分であった。LF-0.4(2)については、加熱 1 時間終了後から放冷 1 時間頃まではたわみは緩やかに増加していたが、その後 15 分経過時点において荷重が抜ける現象が生じたと同時に、たわみが急に上昇し始め、その後約 30 分経過時点で荷重支持能力を失った。そのときの最大たわみ量は 97.4mm で、破壊時間は 170 分であった。一方、同じ荷重レベルである LF-0.4(1)は、加熱 1 時間終了後から放冷 1 時間経過時点までは LF-0.4(2)と同じたわみ挙動を示したが、荷重の抜けは生じず、放冷 7 時間後まで荷重支持能力を有した。

図 4.4 において、LF-0.4(1)については、放冷 3 時間以降からたわみの上昇が緩やかになり、加熱開始から 8 時間時点にて荷重を増加させ破壊させた。LF-0.4(1)が最大耐力を示した時のたわみ量 88.6mm であった。LF-0.2 については、加熱終了後放冷 3 時間経過頃からたわみの上昇が緩やかになり、放冷 7 時間以降についてはたわみが一定となった。LF-0.2 については、放冷 24 時間後に荷重を増加し破壊させた。LF-0.2 が最大耐力を示した時のたわみ量は 69.0mm であった。これら 2 体の結果から、荷重レベルが長期許容荷重の 0.4 以下でせん断破壊が生じなければ、放冷過程においてたわみが安定し、荷重を支持し続ける性能が示された。実際の建物は長期許容荷重までの荷重で設計が可能となることから、今回の断面寸法による準耐火構造では 1 時間の火災加熱終了後の放冷過程において崩壊の危険性がある。一方、断面寸法を今回の寸法よりも大きくできる場合は、長期許容荷重の 0.4 を超えて荷重を保持できる可能性がある。

放冷過程において荷重支持能力を失った 4 体(LF-1.0,0.8,0.6 および 0.4(2))のたわみ速度を図 4.5 に示す。その中で、LF-0.4(2)については途中の荷重が抜けたところで ISO834-1 に規定されるたわみ速度の制限値を超えた。この試験体を除き、破壊直前までのたわみ速度は、その制限値の半分以下であった。

載荷加熱実験におけるたわみは、加熱終了後の放冷過程においても増加し続けた。加熱 1 時間終了直後のたわみと比較して、LF-0.4(1)では放冷 7 時間時点で約 6.7 倍、LF-0.2 では放冷 24 時間時点で約 7.2 倍までたわみが増加した。放冷過程におけるたわみの増加は、２章において示した断面内の温度上昇および水分蒸発の影響によるものと考えられる。

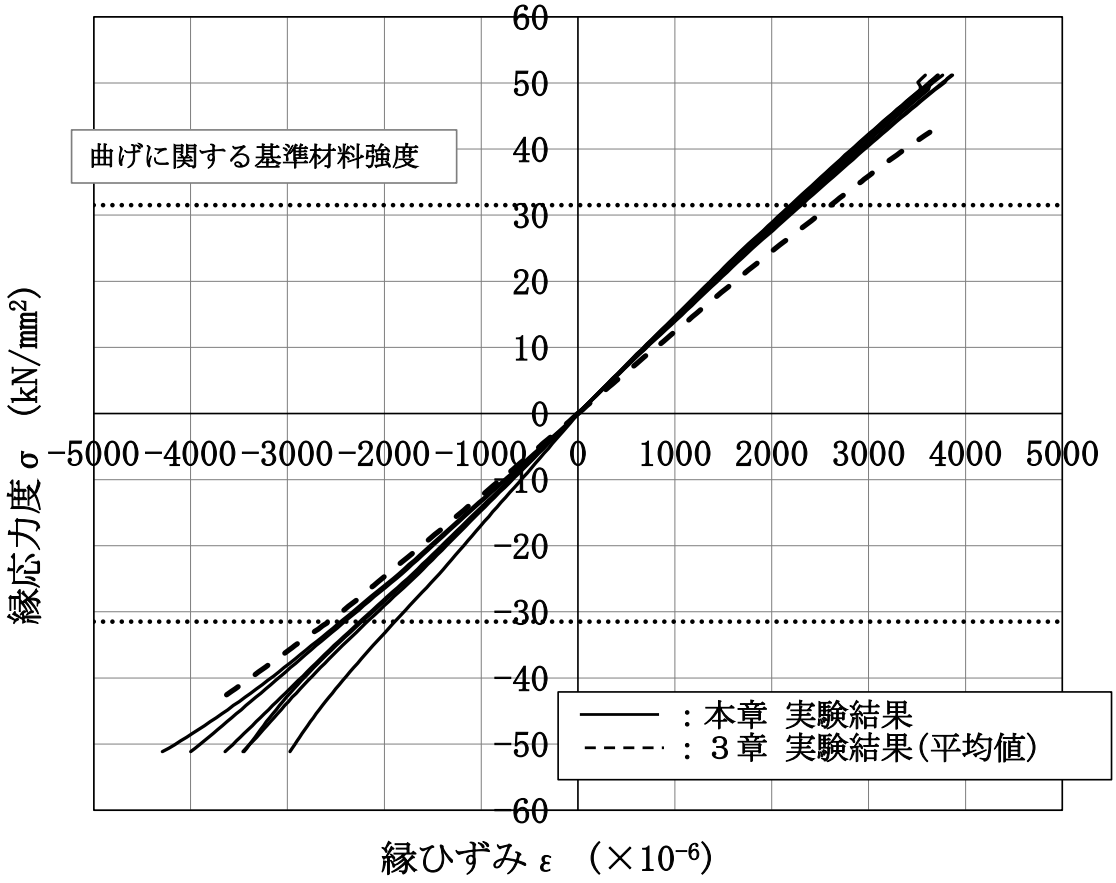


図 4.2 常温実験（L-RT）の縁応力度-縁ひずみ関係

写真 4.1 常温実験（L-RT）における梁下端の破壊状況

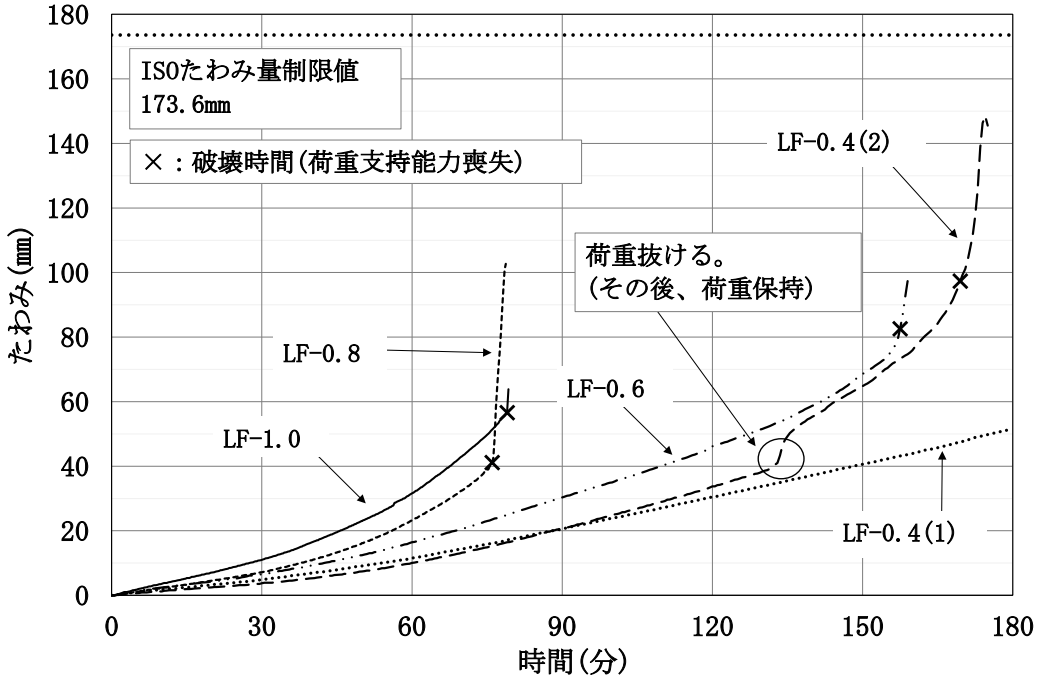


図 4.3 たわみ-時間関係（荷重比 0.4～1.0）

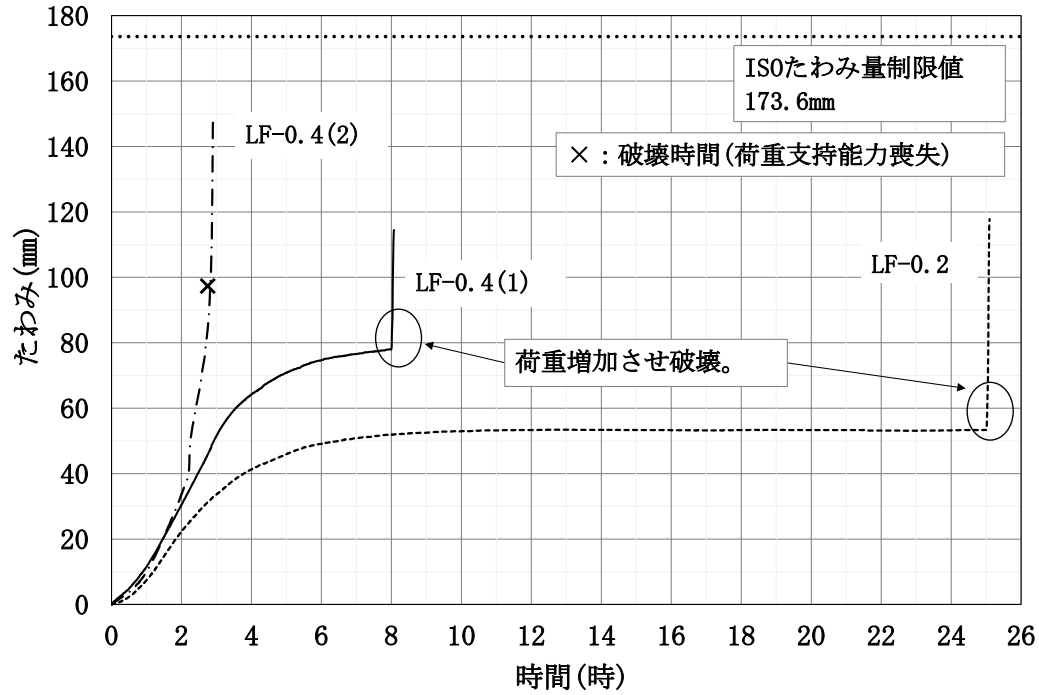


図 4.4 たわみ-時間関係（荷重比 0.2 および 0.4）

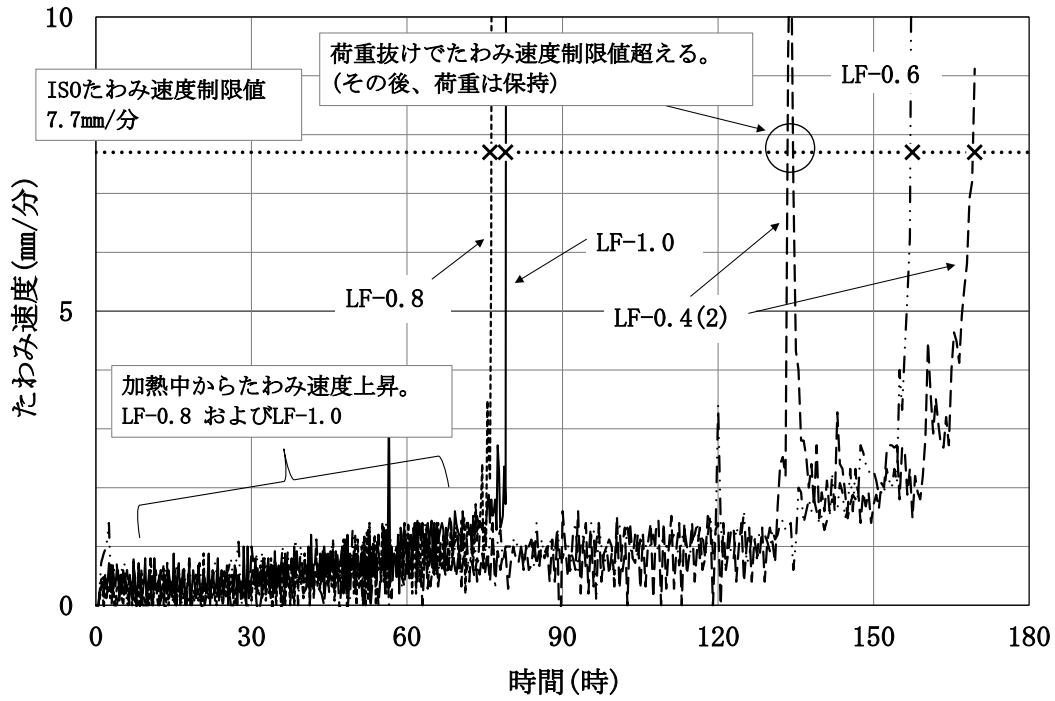


図 4.5 たわみ速度-時間関係（破壊試験体）

４．３．２　破壊性状

載荷加熱実験のLF-1.0については、実験終了後の試験体取り出し時(炉内から取り出し前)の状況より、写真 4.2(a)のように載荷点付近の梁下端から亀裂が生じており、等曲げ区間内側に斜め上方向へ大きな亀裂が生じていた。破断した断面内において、写真 4.2(b)のとおり、梁下層ラミナに亀裂が生じていた。LF-1.0 はこの状況から曲げ破壊と判断した。LF-0.8 も同様な曲げ破壊と判定した。LF-0.4(2)については、梁下端の亀裂も見られたが、写真 4.3(b)の試験体解体後の断面から図心軸付近において年輪に沿うずれが確認されたため、せん断破壊と判断した。加熱終了後の放冷過程において途中で荷重が抜けた現象は、このせん断破壊によるもと考えられる。LF-0.6 も同様なせん断破壊が観察された。

LF-0.4(1)は 8 時間まで荷重支持能力を失わなかったため、8 時間後に荷重を増加させ破壊させた。その結果、写真 4.4(a)と写真 4.4(b)に示すように、等曲げ区間内の梁下端からの亀裂が観察されたため、曲げ破壊と判定した。LF-0.2 でも同様な曲げ破壊が観察された。

加熱終了後の放冷過程においては、２章の実験結果より部材断面内の温度が上昇し、100℃付近において水分の蒸発が生じる。破壊性状が曲げ破壊を示した試験体とせん断破壊を示した試験体においては、その破壊した時間帯における水分の蒸発が影響していたと考えられる[7)]。曲げ破壊を示した 4 体の試験体は図芯軸付近の水分の蒸発が生じる前、もしくは蒸発した後の時間帯であったのに対し、せん断破壊を示した 2 体については、断面内の温度上昇が停滞し始める水分の蒸発が生じる放冷 1 時間～2 時間経過以内で起きている。木材内部の水分蒸発前後によって年輪のずれが生じ易くなった可能性がある。放冷過程における破壊性状については、加熱終了直後から 1 時間位までは曲げ破壊となり、水分蒸発の現象が生じる 1～3 時間においてせん断破壊へ移行するが、水分が蒸発する放冷 3 時間経過以降においては再び荷重支持能力が安定していくと考えられる。

写真 4.2(a) LF-1.0 全体

写真 4.2(b) LF-1.0 断面

写真 4.3(a) LF-0.4(2)全体

写真 4.3(b) LF-0.4(2)断面

写真 4.4(a) LF-0.4(1)全体

写真 4.4(b) LF-0.4(1)断面

４．４　本章のまとめ

1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程におけるカラマツ集成材梁(210㎜×420㎜)のたわみ挙動、破壊性状および耐力低下に関する結果を以下にまとめる。

(1) 長期許容荷重を載荷した LF-1.0 の破壊時間は 79 分であり、1 時間の準耐火性能を満足した。
(2) 長期許容荷重の 0.4 以下の荷重であれば、放冷過程においても荷重を支持し続ける可能性が示された。
(3) 一方で、加熱終了後の放冷過程において、たわみが増加することが確認された。加熱 1 時間終了直後のたわみと比較して、LF-0.4(1)では放冷 7 時間後、加熱中よりもたわみが約 6.7 倍、LF-0.2 では放冷 24 時間後で約 7.2 倍まで増加した。
(4) 破壊性状が曲げ破壊であった放冷 7 時間および 24 時間経過時の耐力は、３章で報告した放冷 3 時間時の耐力と同じ位の値であった。
(5) 梁下端のラミナ層引張り破断に起因する曲げ破壊と、梁断面図心軸近傍における年輪部分でのずれによるせん断破壊が観察された。せん断破壊は加熱終了から 1～3 時間までに見られた。

第４章の参考文献

1) 最上浤二，中村賢一，山田誠，上杉三郎，宮林正幸：構造用集成材はりの耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系 pp.2789-2790 1983.9

2) 須藤昌照，山田誠，宮林正幸，吉川利文，中村賢一：構造用集成材・単板積層材の耐火性能，梁の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.147-148 2000.9

3) 西田一郎，山田誠，宮林正幸，中村賢一：API 接着剤を用いた構造用集成材の耐火性能に関する研究 その 2，燃えしろ設計を適用したはり部材の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.23-24 2005.9

4) 田中義昭，河原崎政行，戸田正彦：木質被覆材を用いたカラマツ集成材梁の準耐火性能の検討 その2，載荷加熱試験による評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.315-316 2009.8

5) 蛇石貴宏，石垣弘之，西出直樹，片岡弘行，服部順昭，安藤恵介，原田寿郎，上川大輔，宮林正幸，西村光太：実用化に向けた難燃薬剤処理スギラミナを活用した耐火集成材の開発 その 3，柱・梁の実大載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）pp.101-102 2015.9

6) ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999

7) 片倉祐介，松本匠，平島岳夫，金城仁，齋藤潔：カラマツ集成材の高温時強度に及ぼす水分蒸発の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）pp.131-134 2015.9

第５章　構造用集成材梁の火災時および放冷過程における耐力計算

５．１　耐力計算の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７５
５．２　高温耐力低下を考慮しない耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
５．２．１　燃えしろ設計による耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
５．２．２　残存断面法による耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７７
５．２．３　耐力計算結果と実験結果の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・７９
５．３　高温耐力低下を考慮した耐力計算・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
５．３．１　構造用集成材の高温時における強度特性・・・・・・・・・・・・・・８１
５．３．２　高温耐力低下を考慮した耐力計算手法・・・・・・・・・・・・・・・８２
５．３．３　耐力計算結果と実験結果の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・８６
５．４　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８９
第５章の参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９０

５．１　耐力計算の目的

火災時の構造用集成材梁の耐火性能を把握する際、火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下について言及し、実験および研究をした事例がないのが現状である。準耐火構造については、耐火構造と異なり火災加熱終了後の要求がないため、構造用集成材梁の火災時耐力について参考となる実験・研究結果があり、その耐力低下についても報告されている[1)~4)]。準耐火構造における火災加熱中の耐力については未炭化領域を有効断面とする燃えしろ設計[5)]およびユーロコード5[6)]に示されている残存断面法で概ね推定できる。一方、未炭化領域における有効断面は、むしろ火災加熱終了後に温度上昇する傾向があり、火災時の構造用集成材梁の耐火性能を把握するには、火災加熱終了後の放冷過程を含めた耐力低下についても検討する必要がある。しかしながら、火災加熱終了後の放冷過程の耐力低下に言及した研究報告はなく、構造用集成材梁の火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算手法はない。

本章では２章の実験結果より得られた炭化性状・温度を元に、火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下計算を行い、３章および４章の実験結果と比較する。火災加熱時の計算については､建築基準法告示による燃えしろ設計およびユーロコード５における残存断面法を用いて検討する。火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算については、高温耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行うとともに、実験結果との比較・検討を行う。

５．２　高温耐力低下を考慮しない耐力計算

５．２．１　燃えしろ設計による耐力計算

準耐火構造においては、告示（平成 12 年建設省告示第 1358 号および 1380 号）にて燃えしろ設計による構造方法が定められている。燃えしろ設計とは、あらかじめ火災時において焼損する断面を燃えしろ部分と設定し、燃えしろ部分を除いた残存断面を構造上の有効断面として許容応力度計算を行い、表面の燃えしろ部分が燃えても構造耐力上支障のないことを確かめる方法である。そのため、部材断面は通常の設計断面に比べて燃えしろ部分を考慮するために大きくなる。告示にて定められている燃えしろ設計の値を表 5.1 に、燃えしろ断面のイメージを図 5.1 に示す。これら燃えしろの値については、既往の研究から得られた木材の種類における炭化速度を基に安全率を考慮して設定されている。本研究においては、対象となる構造用集成材の 1 時間準耐火構造における燃えしろの値（45㎜）とし、その燃えしろ部分を差し引いた残存断面を有効断面として火災時における耐力計算に用いて、実験値との比較を行う。

表 5.1 燃えしろの値[5)]

	45分準耐火構造	1時間準耐火構造
構造用集成材	35mm	**45mm**
化粧張構造層集成材	35mm	45mm
構造用単板積層材	35mm	45mm
構造用製材	45mm	60mm
関連告示	告示第1358号	告示第1380号

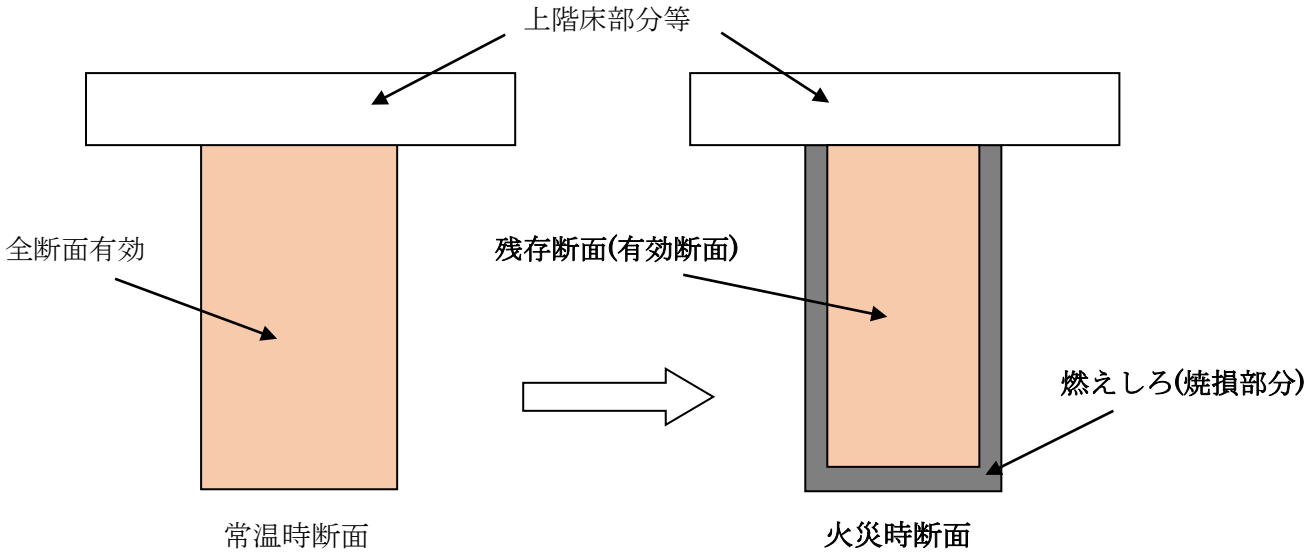


図 5.1 燃えしろ設計[5)]のイメージ（梁断面）

５．２．２　残存断面法による耐力計算

ユーロコード 5 においては、木質構造部材の火災時耐力を評価する方法として、残存断面法が示されている。残存断面法[6)]（Reduced cross-section method）とは、木材の熱伝導率が小さいという特性を利用し、火災加熱を受ける木構造部材の外周部の炭化領域とその内側の未炭化領域に分け、その未炭化領域において常温時と同じ強度とみなせる部分を有効断面とし、この有効断面から火災時耐力を得る方法である。残存断面法による設計と燃えしろ設計の考え方は基本的に同様である。炭化深さについては、標準加熱をうける 1 次元に炭化する設計炭化速度と、隅角部における 2 面加熱の影響を考慮した公称炭化速度が、木材の種類および密度の違いによりユーロコード 5 において定められており、実験値を用いない場合はそれぞれの耐火時間に応じた炭化深さを設定することになっている。ユーロコード 5 における残存断面法では、炭化深さに変色劣化深さとしてさらに 7㎜ 加えた値を炭化領域とし、この炭化領域を差し引いた未炭化領域を有効断面としている。ユーロコード 5 で示されている設計および公称炭化速度を表 5.2 に、残存断面法のイメージを図 5.2 に示す。

欧州における木構造梁部材の研究[7)~9)]では、梁幅 134㎜～170㎜ 程度、梁成 269㎜～420㎜ 程度による実験あるいは解析が紹介されている。ユーロコード 5 の残存断面法の検討では、これらと同等な断面について検討されたと考えられる。一般的に断面寸法が小さいほど火災時における構造耐力の低下が早くなるので、断面寸法が大きくなる場合は安全側の検討となると考えられる。

表 5.2　ユーロコード 5 における炭化速度 [6)]

	β_0 mm/分	β_n mm/分
①針葉樹とブナ		
密度290kg/m^{3}以上の集成材	0.65	0.7
密度290kg/m^{3}以上の製材	0.65	0.8
②広葉樹		
密度290kg/m^{3}の製材または集成材	0.65	0.7
密度450kg/m^{3}以上の製材または集成材	0.5	0.55
③LVL		
密度480kg/m^{3}以上	0.65	0.7
但し　β_0: 設計炭化速度　　β_n: 公称炭化速度		

◆ An effective cross-section should be calculated
by reducing the initial cross-section by the effective charring depth “d_{ef}”

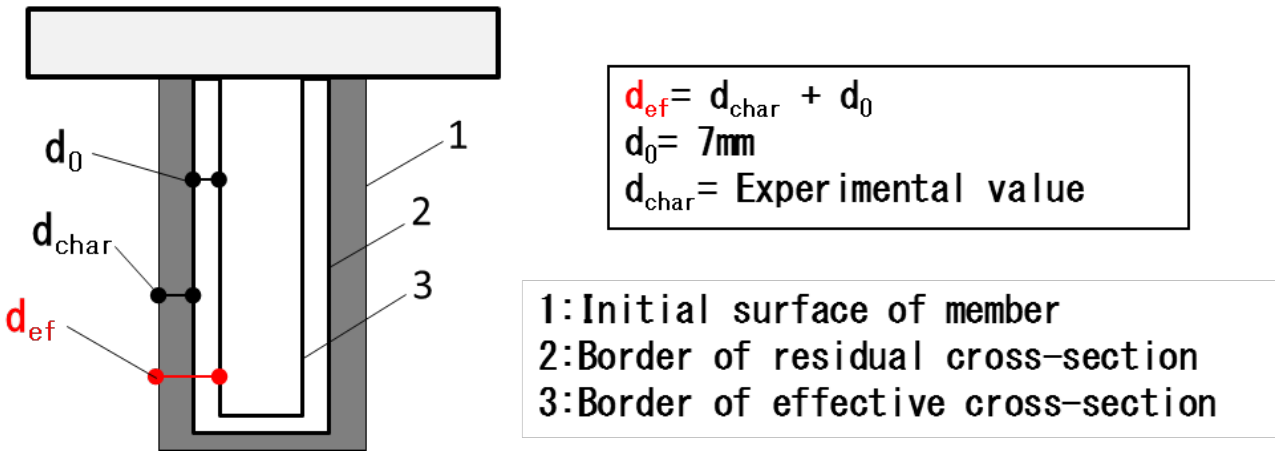


図 5.2 ユーロコード 5 における残存断面法 [6)] のイメージ

５．２．３　耐力計算結果と実験結果の比較

前項までに示した準耐火構造の燃えしろ設計とユーロコード 5 の残存断面法による耐力計算を行い、３章にて行った実験結果と比較を行った。耐力計算に用いた値を表 5.3 に示す。Case1 の燃えしろ設計による計算では、平成 12 年建設省告示第 1380 号に示されている燃えしろの値（炭化深さ）を除いた断面を有効断面とした。Case2 では、ユーロコード 5 に示されている針葉樹構造用集成材における公称炭化速度 0.7㎜/分（隅角部の欠損が考慮された値）による炭化深さを求め、その数値に変色劣化深さ 7㎜ を足した数値を有効炭化深さとし、その値を減じた断面を有効断面として残存耐力を算定した。Case3 の有効炭化深さは、加熱実験で得られた炭化深さ（２章における F(0)試験体の平均炭化深さに変色劣化深さ 7㎜ を加えた値）で、Case1～Case3 の曲げ耐力算定に用いた基準強度は、設計基準強度とした。Case4 は、有効炭化深さの値は Case3 と同じとし、基準強度には３章における常温載荷実験結果から逆算された強度を用いた。Case3 と Case4 については、放冷過程の計算も行った。

これら 4 つの比較対象にて計算した計算値と実験値との比較を図 5.3 に示す。Case1 の燃えしろ設計による 60 分時の火災時耐力は、設計耐力に対して半分以下にまで低下しているが、L-1h の実験値と比較して概ね同程度の値であった。Case2 の残存断面法による結果は、L-1h に対しても概ね一致した。Case3 の火災加熱終了時（60 分の加熱を受けた直後）の結果は、Case1 と一致し、L-1h の実験値よりもやや大きめの値であった。その後の放冷過程については、実験値を上回る結果であった。実強度に基づいた Case4 の結果と実験値と比較すると、火災加熱終了時の耐力の値は約 2 割近くの差が生じ、計算値が実験値を上回った。加熱 1 時間以降に放冷した場合の耐力については、３章の載荷実験 L-4h および載荷加熱実験 LF-4h の結果に対して，計算値とさらに大きな差が生じた。Case1 から Case4 の計算結果は、残存断面の強度を常温時と同じに仮定した。火災加熱終了直後は、断面内部の温度が常温に近く、部材全体の強度低下に影響を及ぼすまでには至らなかった。一方、火災加熱終了後の放冷過程では、未炭化領域の温度が 100℃を超えたため、耐力計算結果に比べて実験値は小さな値を示した。加熱終了後の炭化速度の値は小さいが、火災加熱終了後の放冷過程において、未炭化領域の温度が 100℃～200℃まで上昇したことが梁の耐力低下に影響を及ぼしたと考えられる。

表 5.3 耐力計算に用いた値

計算方法	引用	強度* [N/mm2]	炭化深さ [mm]
Case1	準耐火構造 燃えしろ設計	31.5	45(60分)[9]
Case2	ユーロコード5[10]		0.7t+7 (t：時間[分])
Case3			表3と表4の平均炭化深さに7mmを加えた値
Case4		42.6	

＊Case1～Case3 は設計基準強度、Case4 は載荷実験(常温)で得られた強度

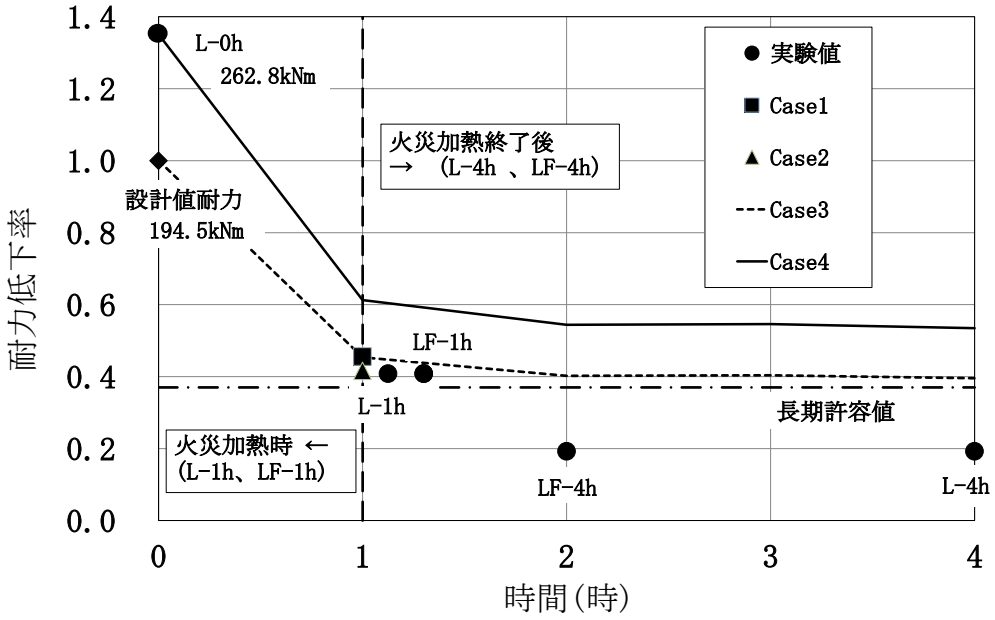


図 5.3 燃えしろ設計・残存断面法による耐力計算値と実験値の比較

５．３　高温耐力低下を考慮した耐力計算

５．３．１　構造用集成材の高温時における強度特性

２章における実験結果からも構造用集成材梁の断面内温度については、火災加熱終了後の放冷過程において温度上昇する傾向があり、未炭化領域における有効断面では放冷３時間経過時点で最大 200℃近くまで温度が上昇している。未炭化領域の温度上昇に伴う部材剛性・耐力の低下、そして木材内部の水分の蒸発も、部材耐力低下に影響する要因の一つとして考えられる。ユーロコード 5 の付録 B「高度な計算方法」に示されている木材の高温時における強度低下率（針葉樹の繊維方向に関する圧縮・引張・せん断強度低下率）および高温時における弾性係数低下率を図 5.4 および図 5.5 に示す。

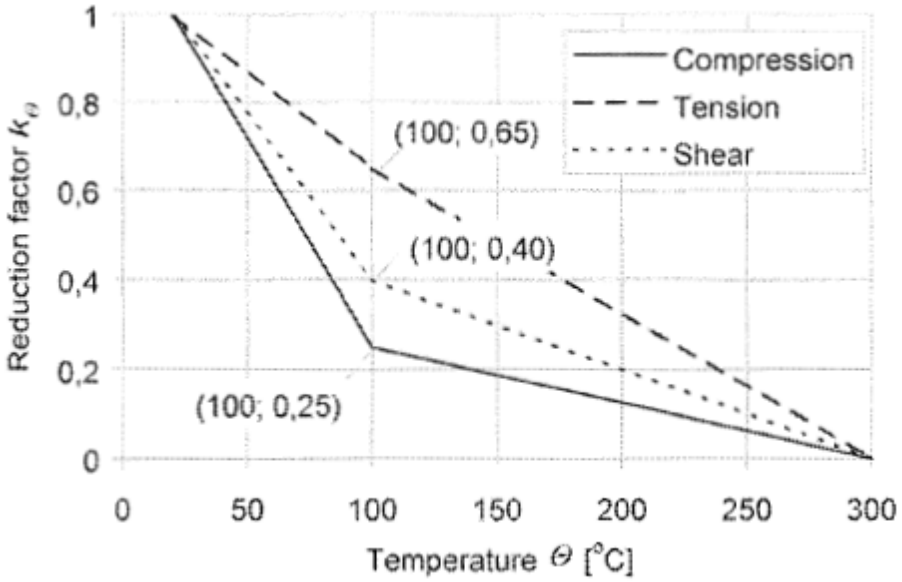


図 5.4 木材の高温時における強度低下率

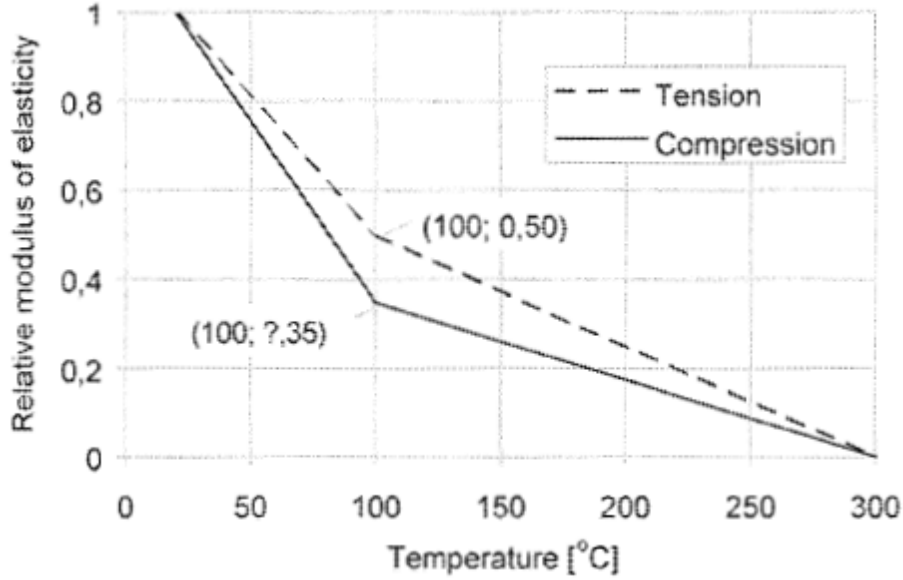


図 5.5 木材の高温時における弾性係数低下率

５．３．２　高温耐力低下を考慮した耐力計算手法

高温耐力低下を考慮した耐力計算を行うにあたり、本研究においては計算の単純化のため以下３つの仮定を設けて計算を行う。高温耐力低下を考慮した耐力計算については、３章および４章にて行った載荷実験および載荷加熱実験を対象とした。

（１）火災時における梁の曲げ耐力は、圧縮縁が圧縮強度に達するときの曲げモーメントと引張縁が引張強度に達するときの曲げモーメントの平均値から得る。高温強度の基準値となる圧縮・引張に関する常温時強度は、３章および４章で実施した常温時曲げ耐力を元断面の断面係数で除した曲げ強度 42.6 N/mm^{2}および 51.2 N/mm^{2}とした。

（２）火災時における梁のせん断耐力は、残存断面の図心軸上におけるせん断応力度がせん断強度に達するときの値から得る。高温せん断強度に用いる基準値（常温時強度）は、カラマツ集成材のせん断応力に対する基準材料強度[16)] 3.6 N/mm^{2}とする。

（３）梁の残存断面は、長方形断面を仮定する。梁幅方向の炭化深さ d_{char2}は、各実験の平均炭化深さに 7 mm（ユーロコード 5 の変色劣化深さ）を加えた値とする。梁背方向の炭化深さ d_{char1}は、各実験の炭化深さに 21 mm を加えた値とする（図 5.6 参照）。この残存断面に関して、梁背方向の温度分布は均一と仮定する。梁幅方向の温度分布は加熱実験および載荷加熱実験の温度測定結果に基づいて与える。

仮定（１）は、３章における常温時の載荷実験(L-0h)のみならず、加熱終了直後(L-1h)および放冷 3 時間後(L-4h)でも最大荷重に至るまで概ね弾性的挙動を示した（図 3.4 に示した荷重～たわみ関係が概ね線形であった）ことによる。梁の曲げ挙動に対して弾性の応力度分布を仮定すると、高温時の強度低下率と弾性係数低下率の関係から、圧縮縁の方が先に圧縮強度に達する。このときの曲げモーメントで耐力を計算すると過小となる。一方、載荷実験で最大荷重時に梁下端の破断が生じたことを踏まえ、弾性の応力度分布で引張縁が引張強度に達するときの曲げモーメントで耐力を計算すると過大となる。本載荷実験での応力度分布は圧縮縁近傍が塑性化しながら引張縁が破断したと想定されるが、その場合は中立軸位置の再計算などが煩雑となる。したがって、曲げ耐力 M_uは、両者の平均値とし、式(5-1)より求めた。なお、今回は火災加熱による耐力低下勾配を検討するため、曲げ耐力算定に用いる強度の基準値は３章および４章の常温実験結果から逆算した。本計算において中立軸位置は圧縮域と引張域の弾性係数で決まるが、常温時における断面の中立軸は図心軸に一致する（常温時では圧縮と引張の弾性係数は同じ）と仮定し、図 5.5 に示すユーロコード 5 付録 B の高温時弾性係数の低下率を用いて、高温時における中立軸と図心軸の距離 e を式(5-2)により求めた。

$$M_u = \frac{h'}{6}\left\{\left(\frac{h'}{2}-e\right)\left(\sigma_{t1}b_1+\sigma_{t2}b_2\right)+\left(\frac{h'}{2}+e\right)\left(\sigma_{c1}b_1+\sigma_{c2}b_2\right)\right\} \qquad (5\text{-}1)$$

$$e = \frac{h'\left(E_t+E_c\right)-h'\sqrt{\left(E_t+E_c\right)^2+\left(E_t-E_c\right)^2}}{2\left(E_t-E_c\right)} \qquad (5\text{-}2)$$

ここで、

h'：残存断面の梁背［mm］

b_1，b_2：残存断面領域 A1，A2 の幅［mm］

σ_{t1}，σ_{t2}：残存断面領域 A1，A2 の高温時引張強度［N/mm^2］

σ_{c1}，σ_{c2}：残存断面領域 A1，A2 の高温時圧縮強度［N/mm^2］

E_t：残存断面の引張域の高温時弾性係数(加重平均値)［N/mm^2］

E_c：残存断面の圧縮域の高温時弾性係数(加重平均値)［N/mm^2］

仮定（２）による火災時における梁のせん断耐力は、３章および４章の載荷加熱実験にてせん断破壊が生じたため検討を加えた。せん断応力度分布は矩形断面梁の放物線分布を仮定し、式(5-3)より求めた。本実験では常温時のせん断強度が不明であったため、文献 10)による値を高温せん断強度の基準値として用いた。

$$Q_u = \frac{2h'}{3}\left\{\left(\tau_{u1}b_1 + \tau_{u2}b_2\right)\right\} \qquad (5\text{-}3)$$

ここで、

h'，b_1，b_2：前記と同じ

τ_{u1}，τ_{u2}：残存断面領域 A1，A2 の高温時せん断強度［N/mm^2］

仮定（３）において梁背方向の温度分布を均一と仮定した理由は、２章における図 2.29(a)・図 2.29 (b)の温度測定結果において下端から 90mm 以上の温度がほぼ等しかったためである。よって、残存断面領域 A1 と A2 の温度は、下端から 90mm 以上の部分で取得した温度の平均値とした。４章における温度計測データが無い LF-0.2 の 25 時間時における断面内温度については、LF-0.4(1)の残存断面内温度の最高温度を与えた。但し、この温度では残存断面部における梁下端の温度を低く見積もることなる。また梁下端の隅角部では炭化が進む。以上を踏まえて、梁下端部における炭化深さは、実測値に 21 mm（ユーロコード 5 の変色劣化深さの 3 倍）を加えた値とし、梁下端からの加熱の影響を受けない範囲の温度を用いたことに整合させた。図 5.6 に残存断面モデルの 2 例(２章における実験結果)を示す。また、式(1)～式(3)に用いた値および計算結果を表 5.4 および表 5.5 に示す。

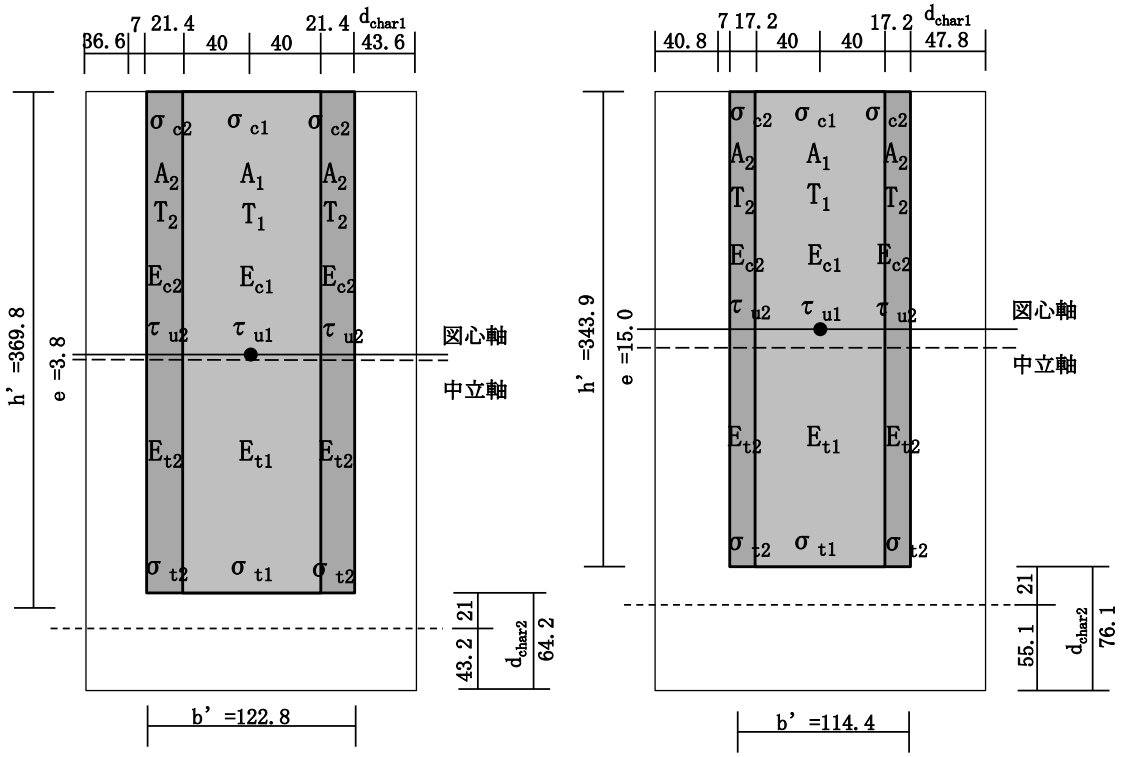


図 5.6 火災時耐力計算に用いた残存断面モデル

表 5.4 3章における実験の耐力計算に用いた値および計算結果

	断面領域	加熱開始からの時間 ［放冷時間］			
		1時間 ［0時間］	2時間 ［1時間］	3時間 ［2時間］	4時間 ［3時間］
梁背h' ［mm］	-	355.8	345.6	342.6	343.9
梁幅b1 ［mm］	A1	80.0	80.0	80.0	80.0
梁幅b2 ［mm］	A2	42.8	35.2	37.6	34.4
断面内温度 ［℃］	A1	42.5	106.0	129.7	132.5
	A2	90.5	161.4	163.0	149.9
高温時引張強度 ［N/mm^2］	A1	38.3	27.7	24.7	23.4
	A2	28.5	19.2	19.2	20.4
高温時圧縮強度 ［N/mm^2］	A1	35.1	10.3	9.1	8.9
	A2	14.7	7.4	7.3	8.0
高温時せん断強度 ［N/mm^2］	A1	3.10	1.40	1.23	1.21
	A2	1.71	1.00	0.99	1.08
高温時引張弾性係数 ［N/mm^2］	A1	8265	4750	3895	3800
	A2	4940	3325	3230	3610
高温時圧縮弾性係数 ［N/mm^2］	A1	8075	3325	2850	2755
	A2	3610	2280	2280	2375
火災時曲げ耐力 M_u ［kNm］	A1+A2 （残存断面）	**81.3**	**38.0**	**34.8**	**33.8**
火災時せん断耐力 Q_u ［kN］		**76.8**	**33.8**	**30.9**	**30.6**

表 5.5 ４章における実験の耐力計算に用いた値および計算結果

	断面領域	試験体					
		LF-1.0	LF-0.8	LF-0.6	LF-0.4(1)	LF-0.4(2)	LF-0.2
梁背h’［mm］	－	332.7	332.7	342.4	339.9	346.4	314.8
梁幅b1［mm］	A1	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
梁幅b2［mm］	A2	23.6	23.6	38.6	34.2	34.0	25.8
断面内温度［℃］	A1	50.1	46.2	118.7	142.9	121.3	142.9
	A2	117.7	111.1	160.4	164.0	161.2	164.0
高温時引張強度［N/mm^2］	A1	43.5	45.1	29.2	24.6	28.7	24.6
	A2	29.7	31.2	22.0	20.5	21.5	20.5
高温時圧縮強度［N/mm^2］	A1	16.0	16.2	11.6	10.1	11.4	10.1
	A2	11.7	12.1	8.9	8.7	8.9	8.7
高温時せん断強度［N/mm^2］	A1	1.80	1.83	1.31	1.21	1.29	1.13
	A2	1.31	1.36	1.01	1.23	1.00	0.98
高温時引張弾性係数［N/mm^2］	A1	7600	8360	4465	3800	4275	3800
	A2	4370	4560	3325	3325	3325	3325
高温時圧縮弾性係数［N/mm^2］	A1	7125	7600	3230	2470	3040	2470
	A2	3135	3515	2280	2090	2280	2090
火災時曲げ耐力 M_u［kNm］	A1+A2（残存断面）	**52.3**	**53.9**	**42.0**	**34.7**	**40.9**	**27.8**
火災時せん断耐力 Q_u［kN］		**38.8**	**39.5**	**32.7**	**31.5**	**31.6**	**24.3**

５．３．３　耐力計算結果と実験結果の比較

残存断面領域の強度低下を考慮した耐力計算値と実験値の比較を図 5.7 に示す。ここで縦軸の耐力低下率は、３章の常温載荷実験(L-0h)による耐力を 1.0 としたときの値とした。

曲げモーメントに関する耐力計算値は、加熱後の放冷過程における実験値の耐力低下まで概ね追跡できている。これは、残存断面部における炭化深さ・温度の設定およびユーロコード 5 の高温時強度低下率の組合せが概ね妥当であったためと考えられる。ただし、本試験体に用いたカラマツ集成材の高温時強度低下率はユーロコード 5 の針葉樹に関する値とは異なる可能性もある。したがって、これらの設定に関しては、カラマツ集成材の高温時強度低下率を高温素材実験によって把握した上で、再度検討する必要がある。載荷加熱実験(LF-4ｈ)ではせん断破壊が見られたが、せん断に関する耐力計算値は LF-4ｈの実験値(図 5.7 中における約 2 時間の値)より 2 倍位大きな値であった。集成材に関する高温時せん断強度は、実験データに基づき改めて慎重に設定する必要があると考える。

４章における載荷加熱実験による放冷過程の耐力低下傾向を図 5.8 に示す。図 5.8 を見ると、加熱終了直後の構造用集成材梁部材の耐力は部材の設計基準強度を指標とした設計値耐力比において半分以下まで減少した。曲げ破壊であった放冷 7 時間および 24 時間経過時の耐力低下は、３章において報告した放冷 3 時間時の耐力と殆ど変わらない結果であった。

４章の実験について、残存断面領域の高温強度低下を考慮した耐力計算値と実験値の比較を図 5.9 に示す。ここで縦軸の耐力低下率は、常温載荷実験(L-RT)による耐力を 1.0 としたときの値とした。曲げモーメントに対する耐力計算値は、温度上昇による耐力低下を考慮した計算によって、概ね実験値を追跡できた。放冷 7 時間および放冷 24 時間時の再載荷により得た曲げ耐力は、最高履歴温度を与えたことで、計算値と実験値が対応した。4 章の実験においても LF-0.4(2)および LF-0.6 の 2 体においてせん断破壊が見られた。せん断に関する耐力計算値は実験値より 2 倍位大きな値であった。放冷過程における集成材に関する高温時せん断強度は、ユーロコード 5 に示されているせん断強度よりも低下することが明らかにされた。構造用集成材梁の放冷過程における耐力計算においては、せん断力に対しても検討する必要がある。３章および４章の実験における高温耐力低下を考慮した計算値と実験値の比較を図 5.10 に示す。

３章および４章における曲げ耐力の実験値と耐力計算の結果比較では、高温強度の基準値となる圧縮・引張に関する常温時強度に、実耐力を元断面の断面係数で除した曲げ強度を用いた。一方、通常の設計においては、設計基準強度を用いて設計・計算されることになる。したがって実耐力を用いた計算結果が実験結果の火災時耐力低下と対応していれば、設計基準強度と実耐力の差が 1.5 倍位はあることから、その差を安全率と考えることが可能である。

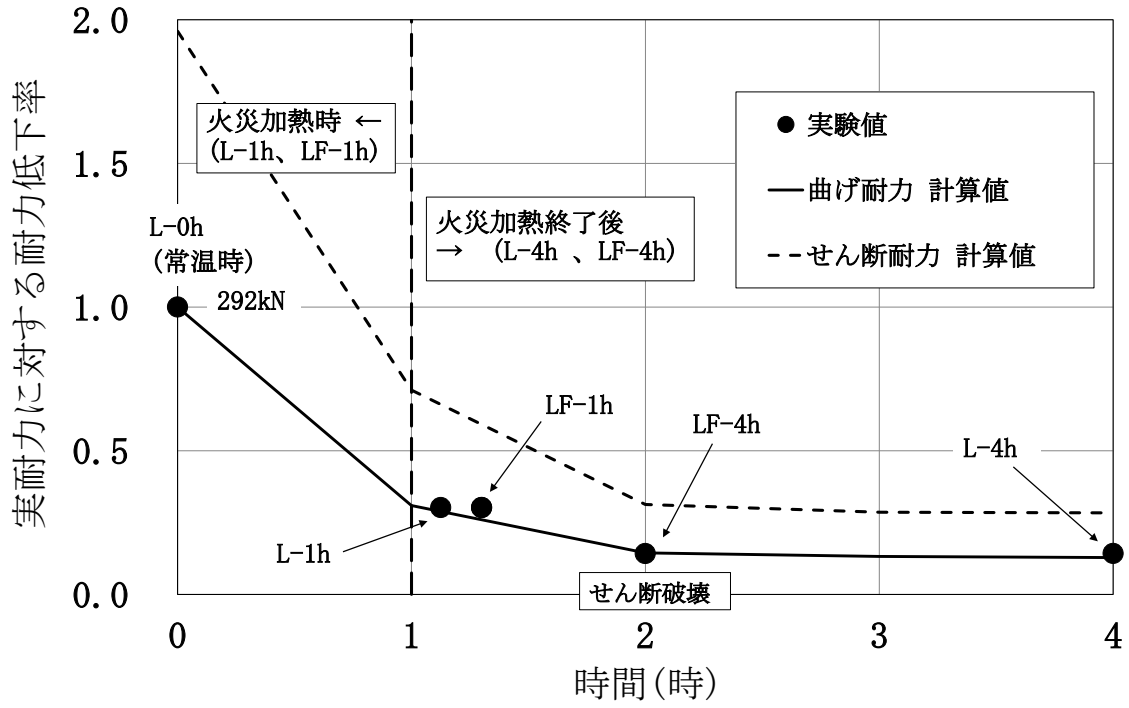


図 5.7 ３章の実験における高温耐力低下を考慮した計算値と実験値の比較

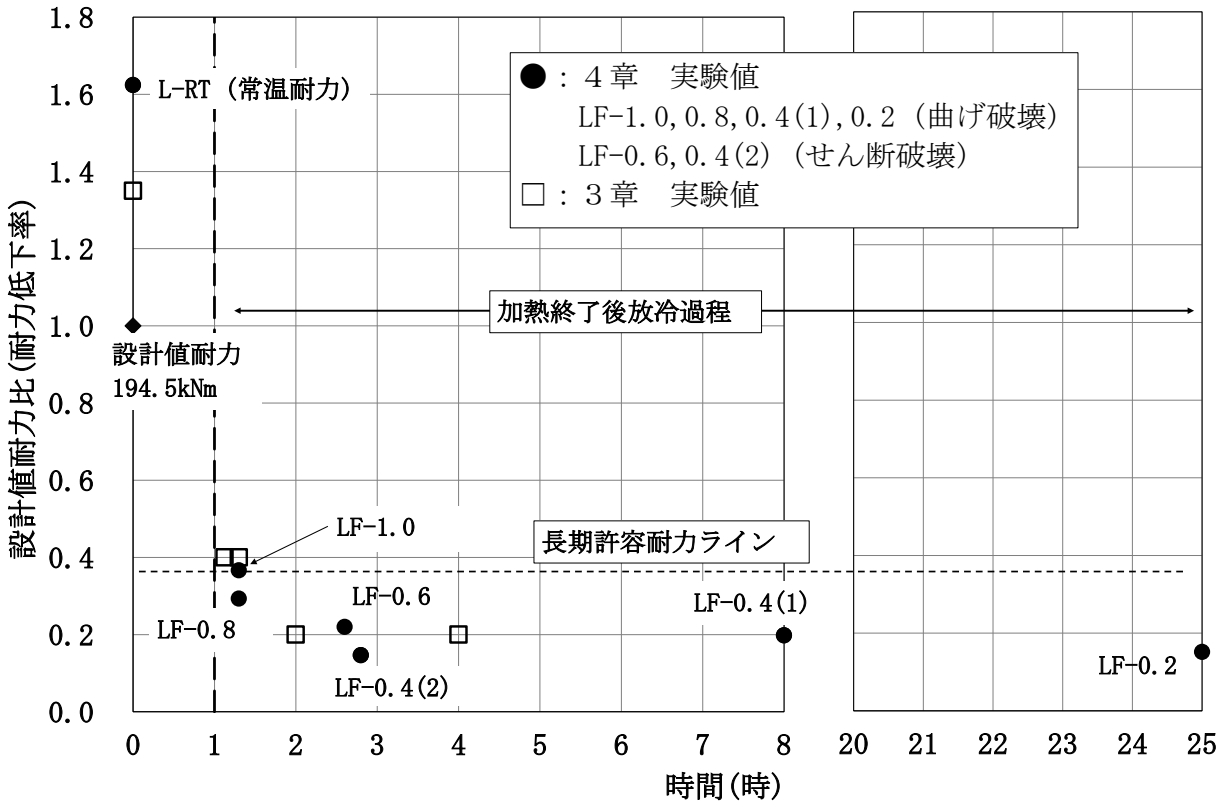


図 5.8 ４章の実験における設計基準強度を指標とした耐力低下率

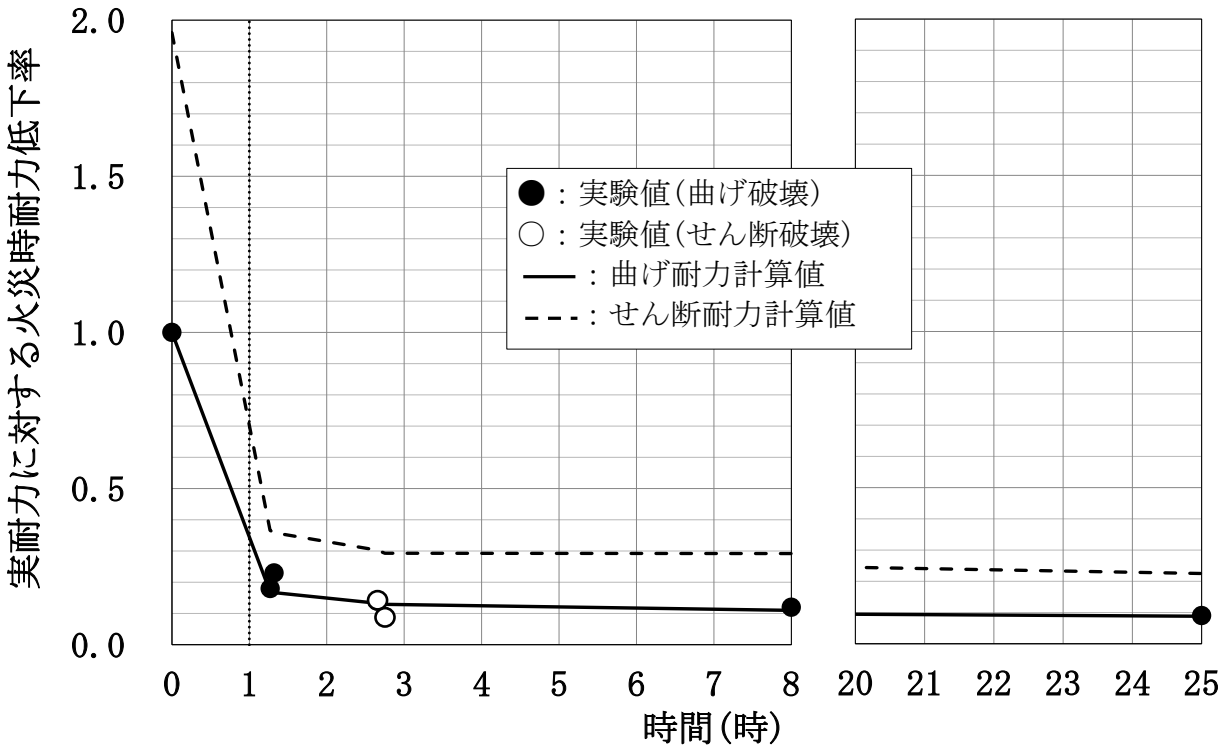


図 5.9　４章の実験における高温耐力低下を考慮した計算値と実験値の比較

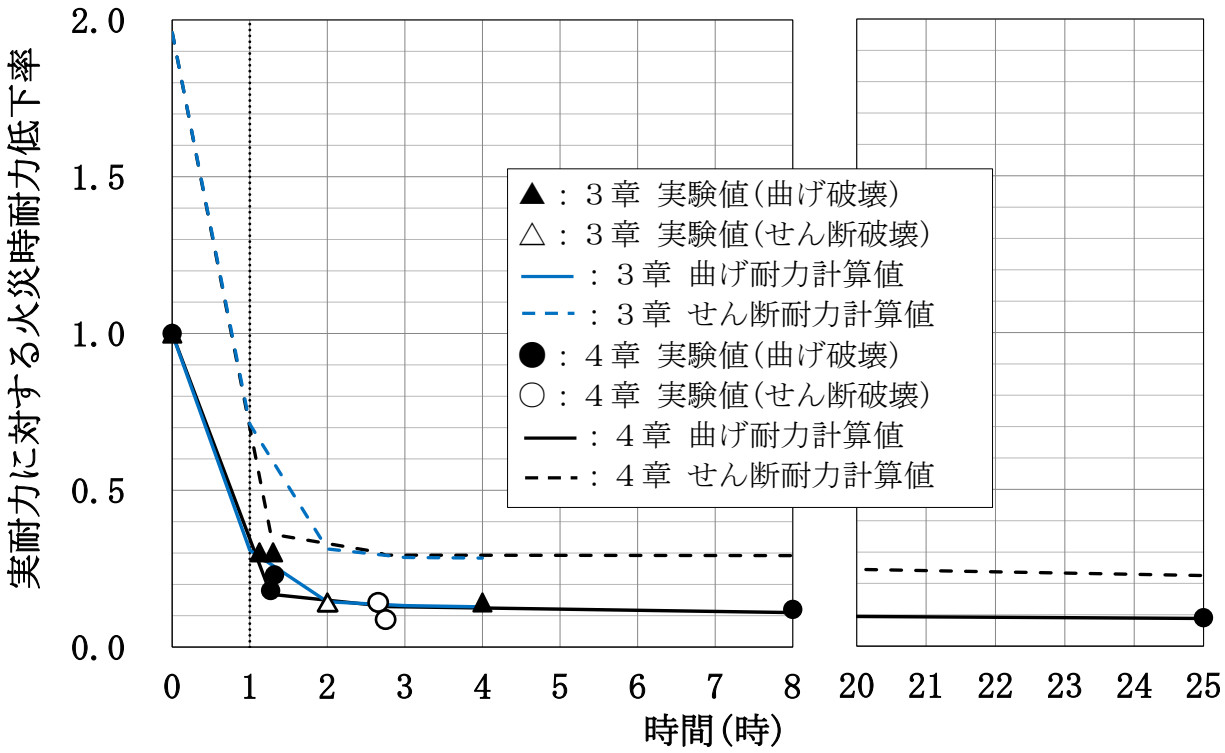


図 5.10　３章および４章の実験における高温耐力低下を考慮した計算値と実験値の比較

５．４　本章のまとめ

本章では準耐火構造における燃えしろ設計およびユーロコード 5 に示されている残存断面法により、２章から４章に示した火災加熱時から火災加熱終了後の放冷過程における実験結果との比較を行った。そして、本研究で得られた実験結果をもとに、構造用集成材梁の高温時における耐力低下を考慮した火災加熱終了後の放冷過程も含めた耐力計算手法を示し、実験結果との比較・検討を行った。本計算結果から得られた知見を以下にまとめる。

（１）燃えしろ設計による１時間時の火災時耐力は、設計値耐力に対して半分以下まで低下したが、火災加熱終了直後の実験値と比較して概ね同程度の値であった。高温時の耐力低下を考慮しない残存断面法による耐力計算値は､設計値耐力を用いた場合で１時間加熱直後の耐力と概ね一致した。しかし、常温載荷実験から得られた実耐力を用いた場合および放冷 1 時間以降の耐力を大きく上回った。

（２）残存断面領域の放冷過程における曲げ耐力は、ユーロコード 5 による強度低下率を与えた計算値が概ね実験値と一致した。曲げモーメントに関する耐力計算値は、加熱後の放冷過程における実験値の耐力低下まで概ね追跡できている。これは、残存断面部における炭化深さ・温度の設定およびユーロコード５の高温時強度低下率の組合せが概ね妥当であったためと考えられる。

（３）せん断耐力については計算値が実験値を大きく上回った。放冷過程における集成材に関する高温時せん断強度は、ユーロコード 5 に示されているせん断強度よりも低下する可能性がある。構造用集成材梁の放冷過程における耐力計算においては、せん断力に対しても検討する必要がある。

第５章の参考文献

1) 最上浤二，中村賢一，山田誠，上杉三郎，宮林正幸：構造用集成材はりの耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系 pp.2789-2790 1983.9

2) 須藤昌照，山田誠，宮林正幸，吉川利文，中村賢一：構造用集成材・単板積層材の耐火性能，梁の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.147-148 2000.9

3) 西田一郎，山田誠，宮林正幸，中村賢一：API 接着剤を用いた構造用集成材の耐火性能に関する研究 その 2，燃えしろ設計を適用したはり部材の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.23-24 2005.9

4) 田中義昭，河原崎政行，戸田正彦：木質被覆材を用いたカラマツ集成材梁の準耐火性能の検討 その 2，載荷加熱試験による評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 pp.315-316 2009.8

5) 昭和 62 年建設省告示第 1902 号および平成 12 年建設省告示第 1358 号および 1380 号

6) BS EN1995-1-2: 2004, Eurocode 5 Design of timber structures, Part1-2: General-Structural fire design.

7) Michael Klippel and Andrea Frangi, Numerical Investigations on the Fire Behaviour of Gluued Laminated Timber Beams taking into Account the Influence of Adhesive, 8th International Conference on Structures in Fire, pp537-544, 2014

8) Alar Just, Joachim Schmid, Norman Werther and Andrea Frangi, Fire Protection of Timber Members-Determination of the Fire Protection System Characteristics for the Verification of the Load-Bearing Resistance by means of Calculation Models, 8th International Conference on Structures in Fire, pp567-576, 2014

9) Joachim Schmid, Alar Just, Michael Klippel, Massimo Fragiacomo and David Lange, Verification of the Load-Bearing Resistance of Timber Members by means of The Reduced Cross-Section Method Background to the EuroCode Model and Comparison to Fire Tests in Bending, 8th International Conference on Structures in Fire, pp567-576, 2014

10) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，許容応力度・許容耐力設計法，2006.12

第６章　結論

６．１　本研究の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９２
６．２　今後の研究課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９４

６．１　本研究の成果

本研究では、１時間の標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁（幅 210㎜×成 420㎜）を対象として、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を行った。これらの実験より、火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状、断面内温度分布、耐力・剛性低下およびたわみ挙動・破壊性状を明らかにし、火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算手法を提案した。以下に、各章から得られた知見をまとめ、研究成果を総括して述べる。

第１章では、標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の火災時挙動に関する既往の研究を紹介し、従来の研究では火災加熱終了後の放冷過程におけるデータが不足していることを指摘し、本研究の目的を示した。

第２章では、加熱実験および載荷加熱実験より、標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度について検討した。また、放冷過程における炉内空気供給量および荷重レベルの違いによる比較を行った。その成果を以下に示す。

（１）本実験に用いたカラマツ集成材梁では、加熱終了から 7 時間後には赤熱が全く見られず、燃え止まり性能が確認された。

（２）標準加熱時の平均炭化速度は、梁幅方向で 0.61㎜/分、梁背方向で 0.72㎜/分であり、既往の実験結果に近い値であった。火災加熱終了後の放冷過程における炭化速度は比較的小さく、加熱終了から 1 時間以内で主に隅角部の炭化領域が拡大したが，加熱終了から 1 時間以降では炭化領域が拡大しなかった。

（３）放冷 7 時間後における非炭化領域の断面性能は、加熱前の断面に対して断面二次モーメント(I)は 4 割、断面係数(Z)は 4.5 割および断面積(A)は 5 割強であった。

（４）放冷過程で炉内空気供給量を増加させた場合、加熱終了直後の燃焼時間が長くなり、梁下隅角部での炭化が進み、放冷 3 時間後の Z は通常空気供給量の場合に比べて 20%程度小さかった。一方で、炉内の雰囲気温度は低くなり、非炭化領域全体の断面内温度が 20℃～30℃低くなった。

（５）載荷加熱実験と非載荷実験の比較では非炭化領域の断面性能に及ぼす影響は見られなかったが、２つの載荷加熱試験体では、梁下端での炭化深さが異なり、I・Z・A で 1～2 割の差が見られた。

（６）非炭化領域の温度は、加熱終了後から放冷 1 時間までの上昇が大きく、加熱終了後放冷 2 時間経過以降に断面内温度が 100℃に到達し、水分の蒸発潜熱の影響である温度停滞が見られた。放冷 3 時間後に概ね最大（全断面で 110℃から 200℃）となり、放冷 3 時間以降は緩やかに低下した。

第３章では、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施し、火災時および火災加熱終了後の放冷過程における梁の耐力および剛性低下について検討した。その成果を以下に示す。

（１）常温時および加熱後載荷実験では、最大荷重に至るまで弾性的挙動を示して曲げ破壊した。常温時の耐力に対して､加熱 1 時間直後では 30%まで低下し､さらに 3 時間放冷後は 14%まで低下した。

（２）最大耐力時の半分の荷重による曲げ剛性においては、加熱 1 時間直後では 38%まで低下し、3 時間放冷後は 25%まで低下した。

（３）加熱後 3 時間放冷後の載荷実験で得た最大荷重を載荷した載荷加熱実験では、約半分の時間(121 分)でせん断破壊により荷重支持能力を失った。

第４章では、載荷加熱実験より、火災時および火災加熱終了後の放冷過程におけるたわみ挙動と破壊性状を踏まえた耐力低下傾向について検討した。載荷加熱実験については、梁部材の長期許容荷重を指標とした荷重レベルの違いによる比較を行った。その成果を以下に示す。

（１）長期許容荷重を載荷した場合の破壊時間は 79 分であり、1 時間の準耐火性能を満足した。

（２）長期許容荷重の 0.4 以下の荷重であれば、放冷過程においても荷重を支持し続ける可能性が示された。

（３）一方で、加熱終了後の放冷過程において、たわみが増加することが確認された。加熱 1 時間終了直後のたわみと比較して、長期許容荷重の 0.4 倍載荷では放冷 7 時間後のたわみが約 6.7 倍、0.2 倍載荷では放冷 24 時間後のたわみが約 7.2 倍まで増加した。

（４）破壊性状が曲げ破壊であった放冷 7 時間および 24 時間経過時の耐力は、第３章で報告した放冷 3 時間時の耐力と同じ位の値であった。

（５）梁下端のラミナ層引張り破断に起因する曲げ破壊と、梁断面図心軸近傍における年輪部分でのずれによるせん断破壊が観察された。せん断破壊は加熱終了から 1～3 時間までに見られた。

第５章では、２章の実験結果より得られた炭化性状・温度を元に、カラマツ集成材梁の火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下計算を行い、３章と４章の実験結果と比較した。火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算については、高温耐力低下を考慮した耐力計算手法を提案した。その成果を以下に示す。

（１）燃えしろ設計と残存断面法による１時間時の火災時耐力計算値は、火災加熱終了直後の実験値と比較して概ね同程度の値であった。

（２）残存断面領域の放冷過程における曲げ耐力は、剛性低下に基づく曲げ耐力計算手法を提案し、その耐力計算手法を用いて、残存断面部の炭化深さと温度の実験値およびユーロコード 5 による強度低下率を与えた計算値が概ね実験値と一致した。

以上、本研究論文では、１時間の標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁を対象とし、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を行った。これら実験より、火災加熱時から火災加熱終了後の放冷過程における火災時挙動を示すとともに、火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算手法を示した。本研究の成果を用いることで、これまで明らかにされていなかった木質構造部材の火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下についての検討が可能となり、木質構造部材の火災加熱時から火災加熱終了後の放冷過程を含めた耐火性能を適正に評価することが可能になると考えている。

６．２　今後の研究課題

以下に今後の課題を示す。

（１）樹種および断面寸法が異なる場合の火災時耐力に関するデータの蓄積

今回は、カラマツ集成材梁を対象とした加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を合計で１４体実施したが、各条件下におけるバラツキの影響、そして樹種および断面寸法を限定したこともあり、放冷過程における火災時挙動についてはある程度限られた範囲での検討となっている。木質構造部材においては、材料自身のバラツキや樹種による影響が耐火性能に与える要因は大きく、木質構造部材の耐火性能を評価していく上では多様な樹種についての火災時耐力のデータ蓄積は必要である。本論文で提案した耐力計算手法において、材料のバラツキに対する検討含め、他樹種および断面寸法の変化に対する適用可能性についても検討を行いたい。

（２）高温時の含水変化も考慮した素材試験データの蓄積

本論文においては、実大レベルの試験体による実験結果から得られた温度データ等を元に、放冷過程における高温時耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行った。本論文において放冷過程における耐力低下の要因が、断面内温度の上昇と同時に、木材の水分蒸発による影響についても指摘した。カラマツ集成材の高温時強度低下率を高温素材実験によって、素材の高温時力学的特性に及ぼす温度と含水の関係等を明らかにした上で、より精確な耐力計算手法を確立する必要がある。

（３）放冷過程におけるせん断耐力計算方法

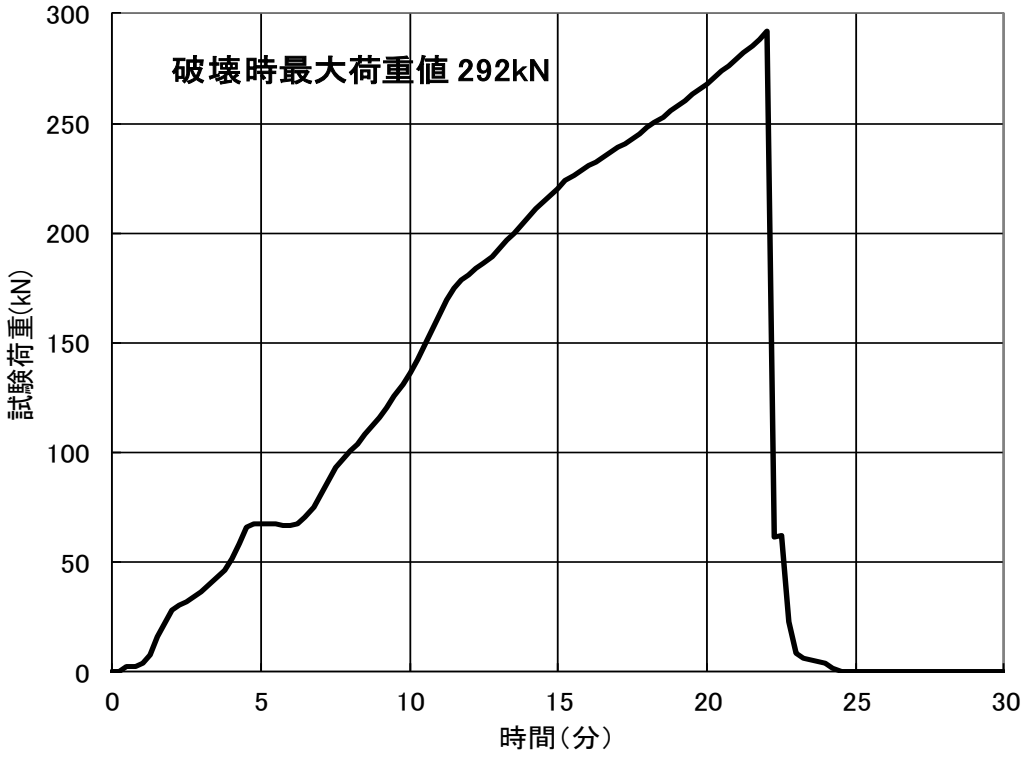
今回の実験において、放冷過程における破壊性状に曲げ破壊とせん断破壊の２種類の破壊性状が得られた。本論文においては、断面内温度上昇による水分蒸発の影響が破壊性状の違いをもたらす要因の一つであることを示した。しかしながら、せん断破壊に至る要因については水分蒸発時の時間帯と温度上昇の関係について更なる検討が必要である。せん断耐力の計算値についても実験値を大きく上回ったことからも、放冷過程における集成材に関する高温時せん断強度は、ユーロコード 5 に示されているせん断強度よりも低下する可能性がある。課題の一つである高温素材試験データの蓄積と併せて、放冷過程におけるせん断耐力の計算手法についても検討をすることが必要である。

資料編

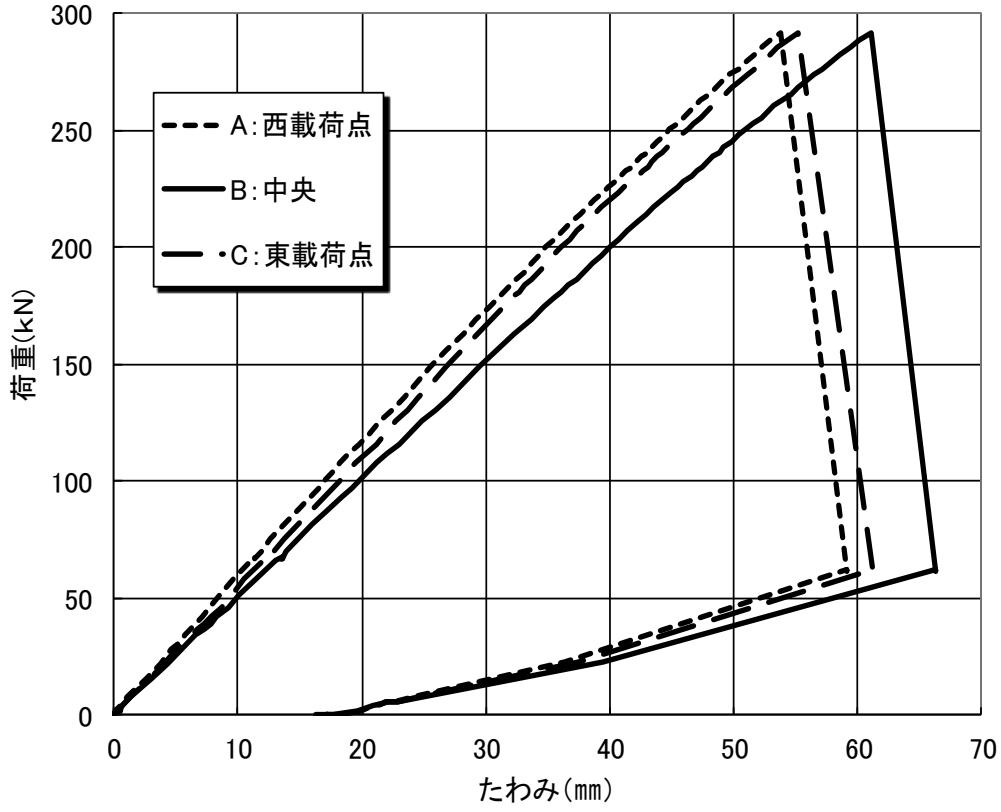
資料１　実験結果のグラフ(温度・荷重・たわみ・ひずみ)・・・・・・・・・・・・９６
資料２　試験体の素材データ(密度)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２８
資料３　製作および実験時の状況(写真)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３２
資料４　実験後の試験体炭化深さ計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１９０
資料５　実験後の残存断面より算定した断面性能計算結果・・・・・・・・・・・・１９３

資料１　実験結果のグラフ（温度・荷重・たわみ・ひずみ）

①L-0h 常温耐力 載荷実験

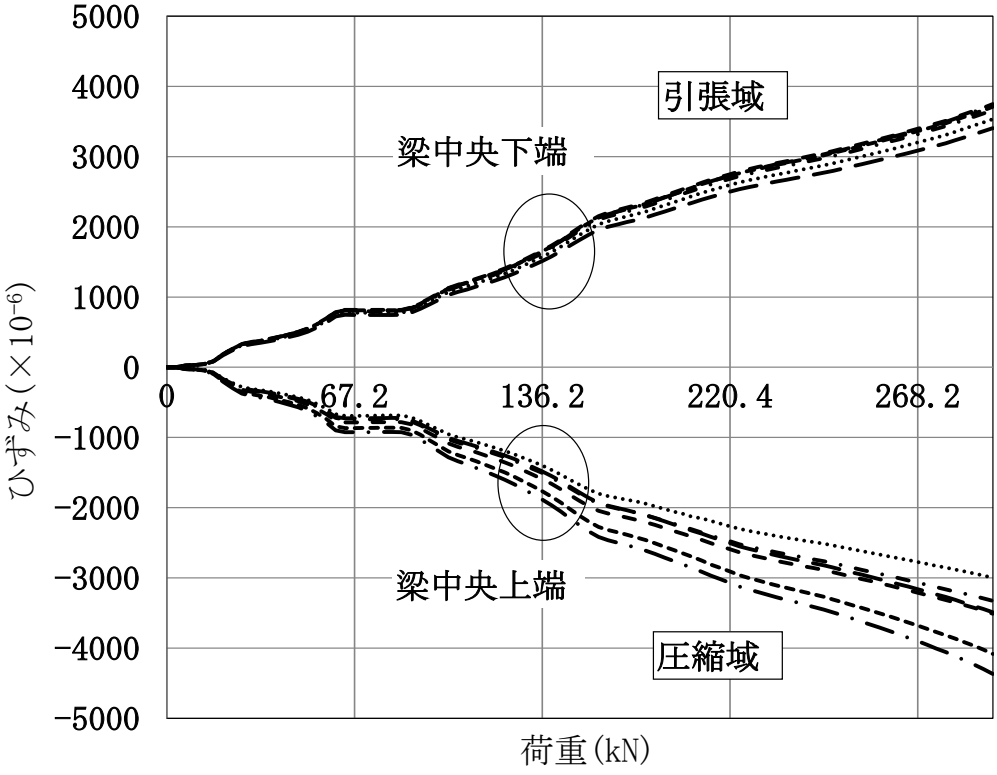


資図 1-1 荷重－時間　関係



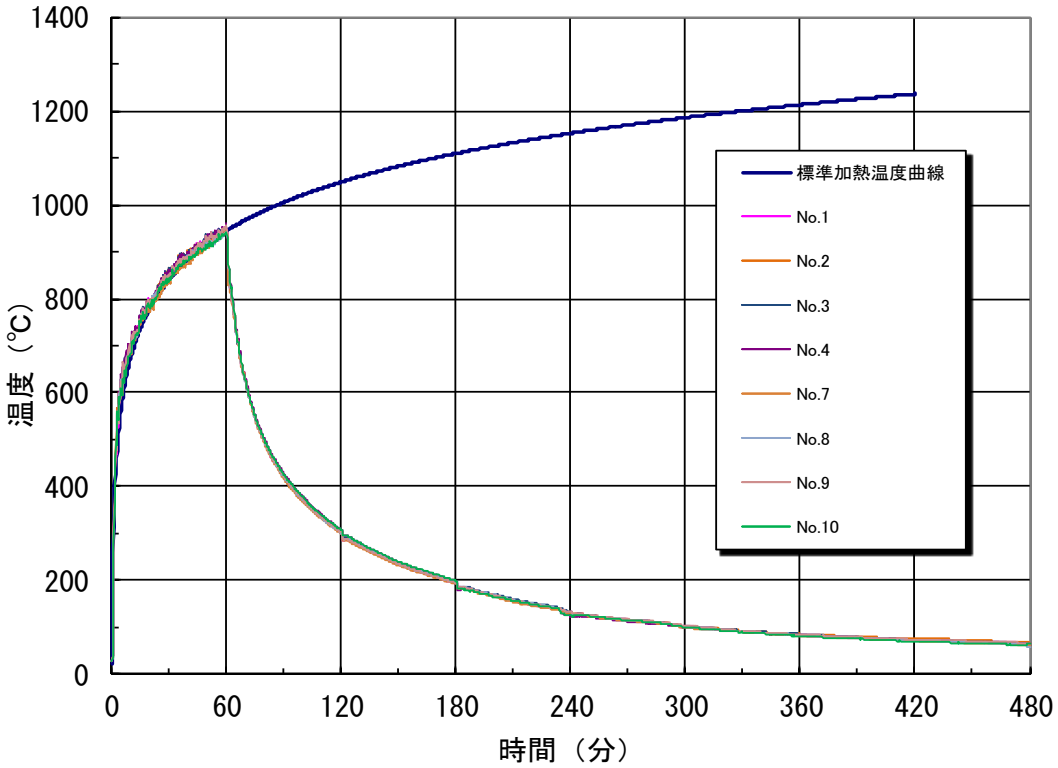
資図 1-2 荷重－たわみ　関係

①L-0h 常温耐力 載荷実験

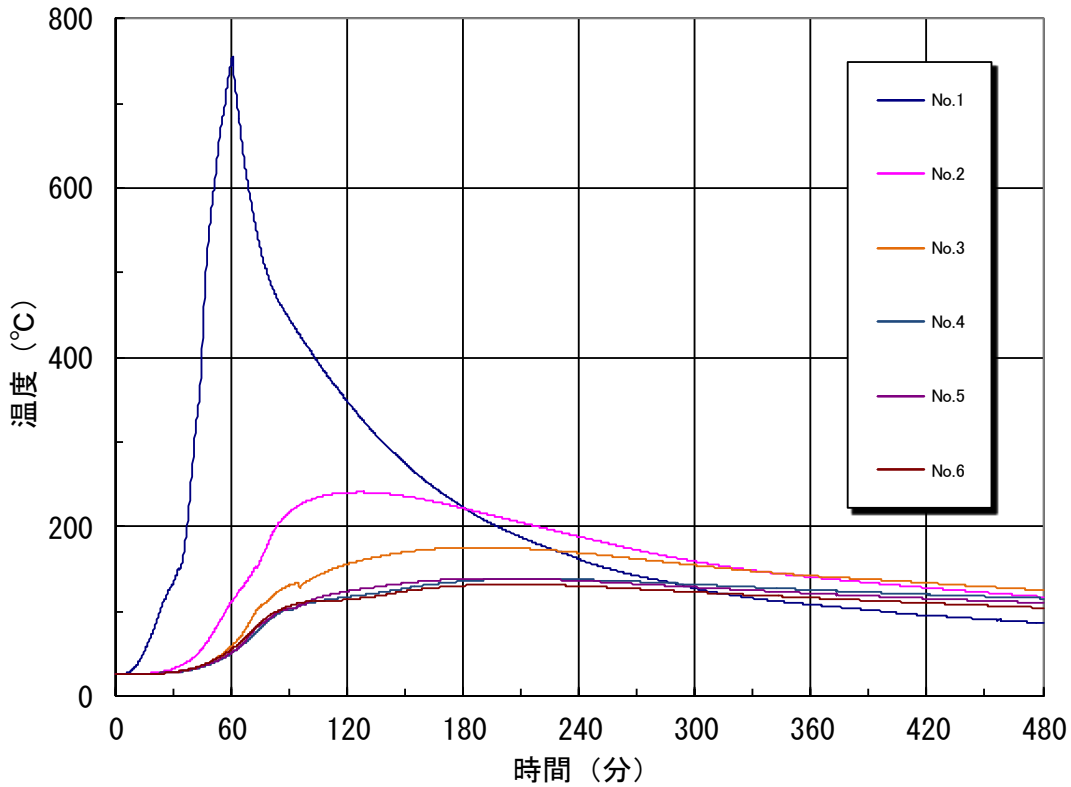


資図 1-3 荷重－ひずみ　関係

②F(0) 加熱実験（放冷時空気供給量：通常）

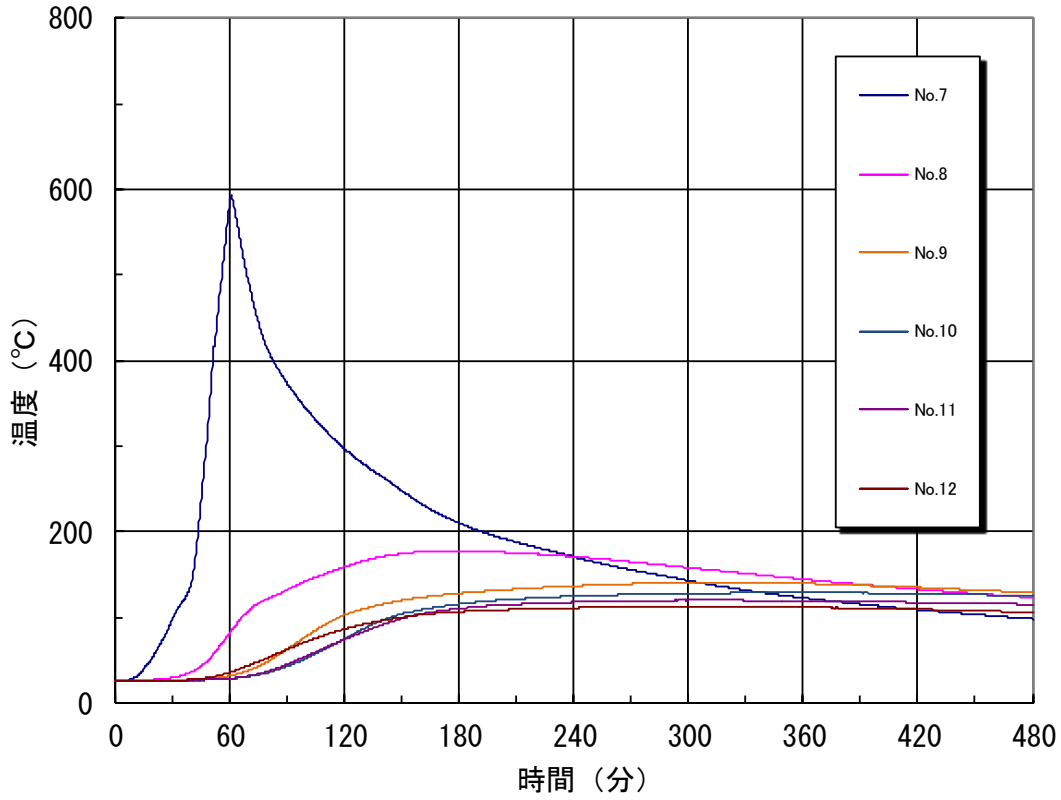


資図 1-4 炉内(加熱)温度

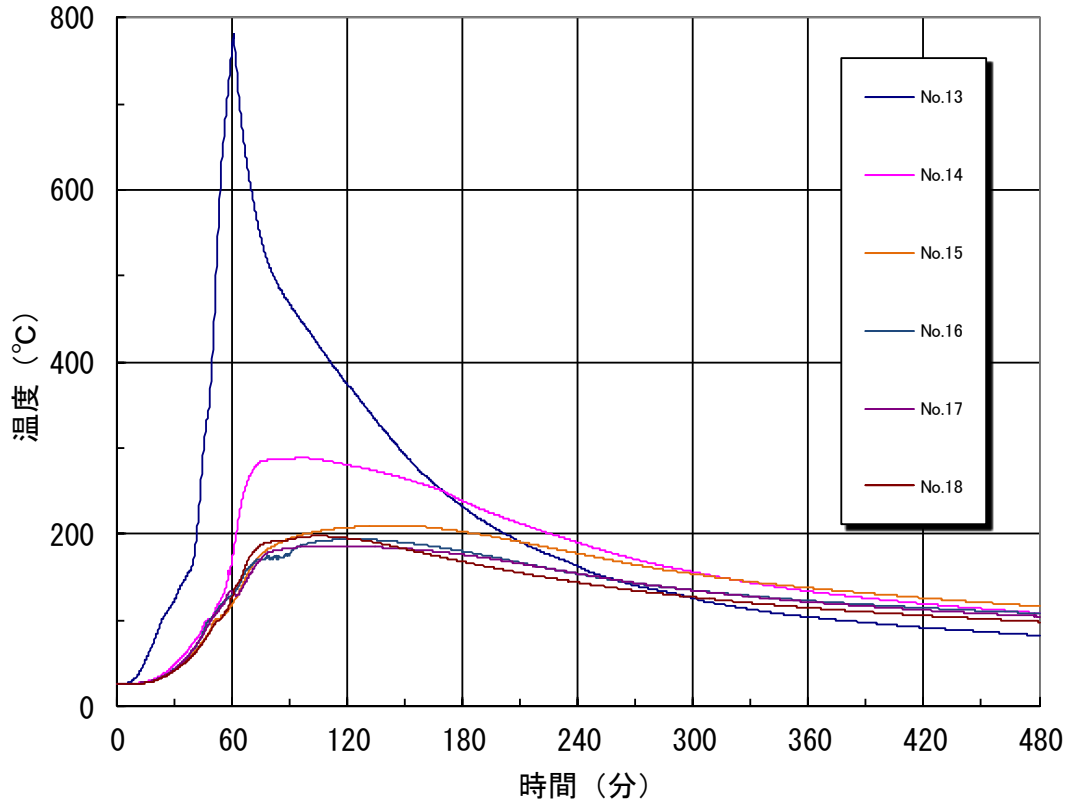


資図 1-5 内部温度(側面深さ 65mm)

②F(0) 加熱実験（放冷時空気供給量：通常）

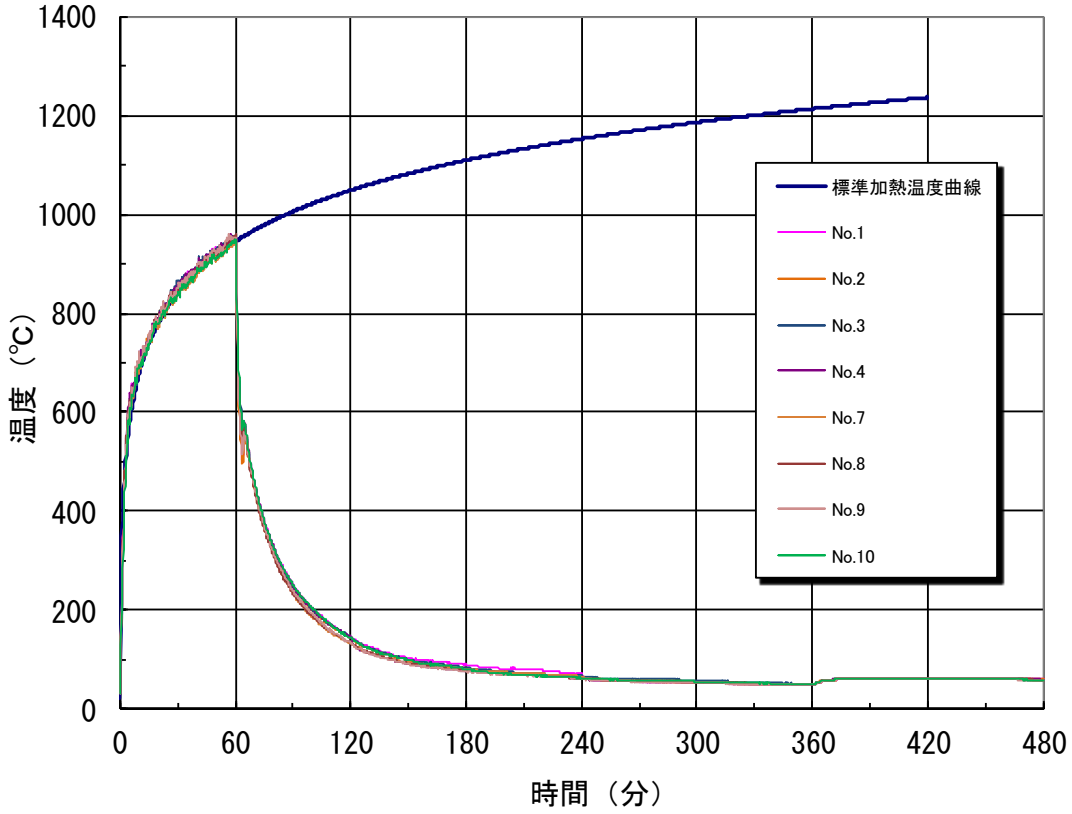


資図 1-6 内部温度(断面中央)

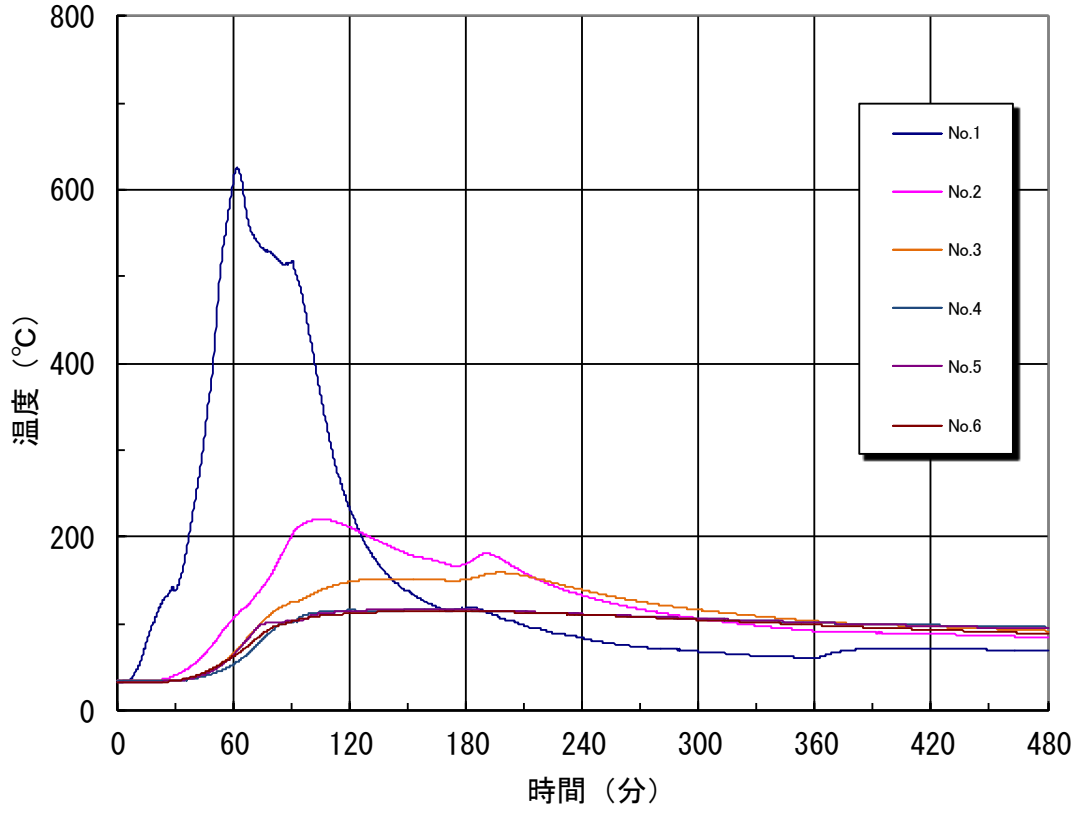


資図 1-7 内部温度(側面深さ 45mm)

③F(0)IA 加熱実験（放冷時空気供給量：通常より３割増加）

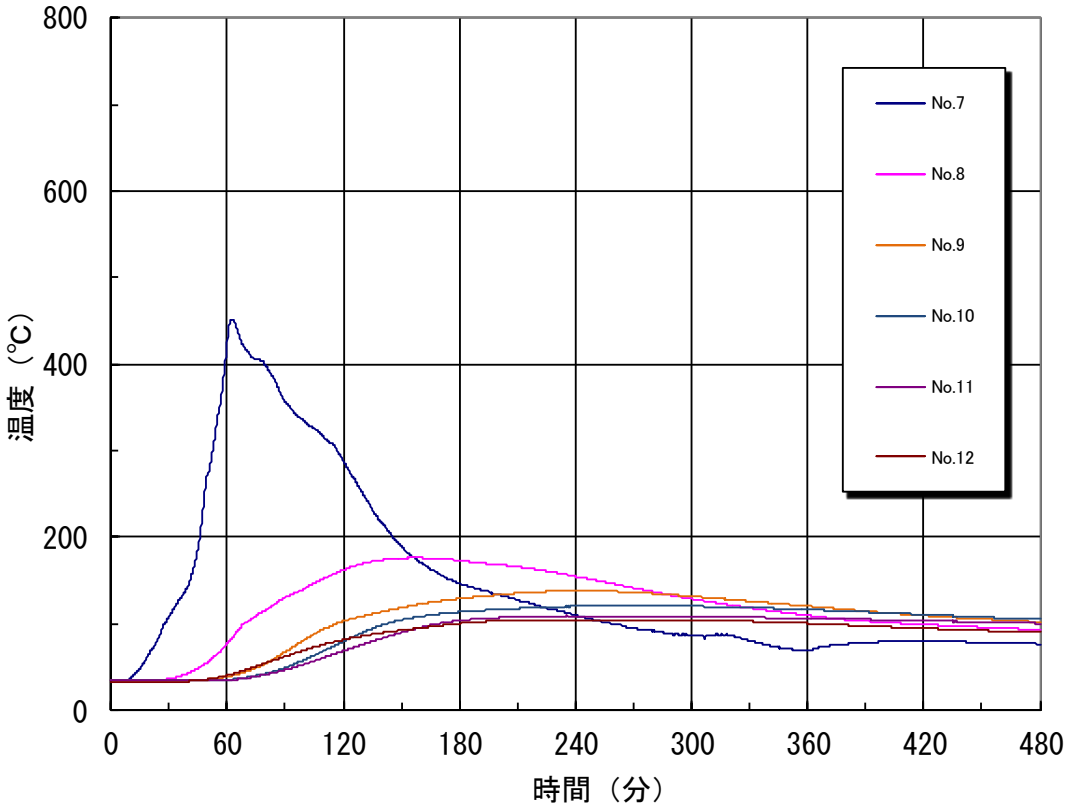


資図 1-8 炉内(加熱)温度

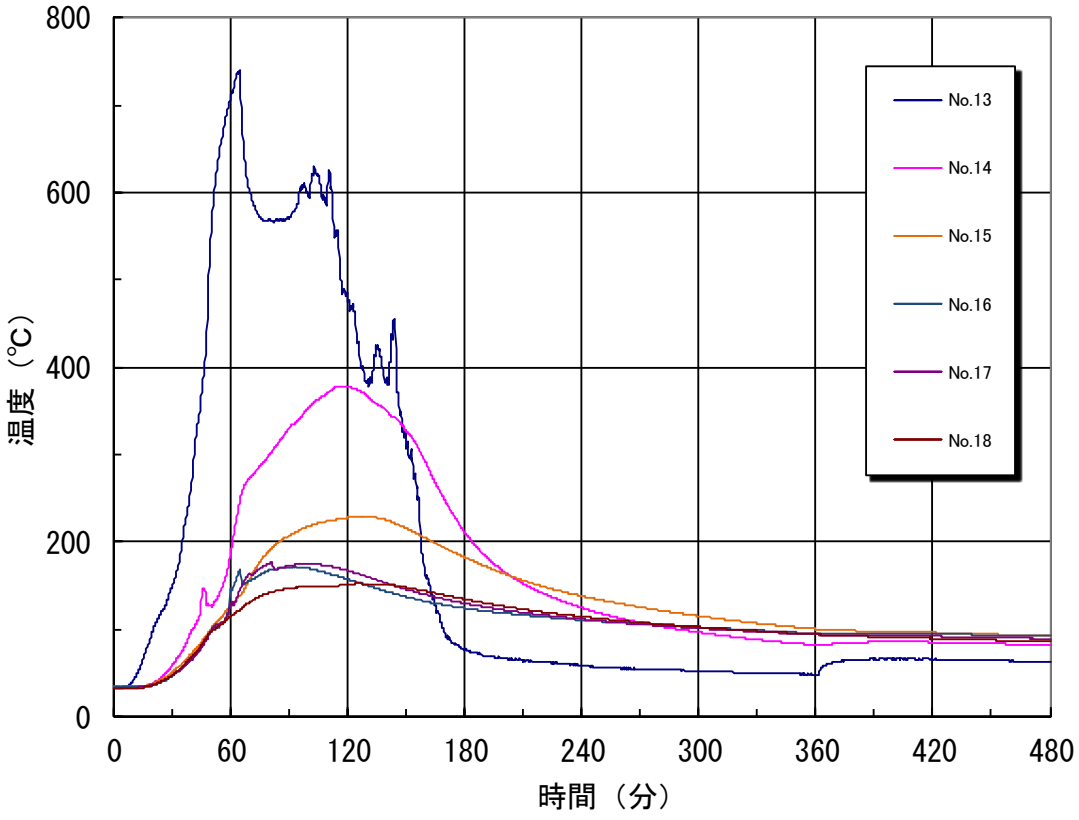


資図 1-9 内部温度(側面深さ 65㎜)

③F(0)IA 加熱実験（放冷時空気供給量：通常より３割増加）

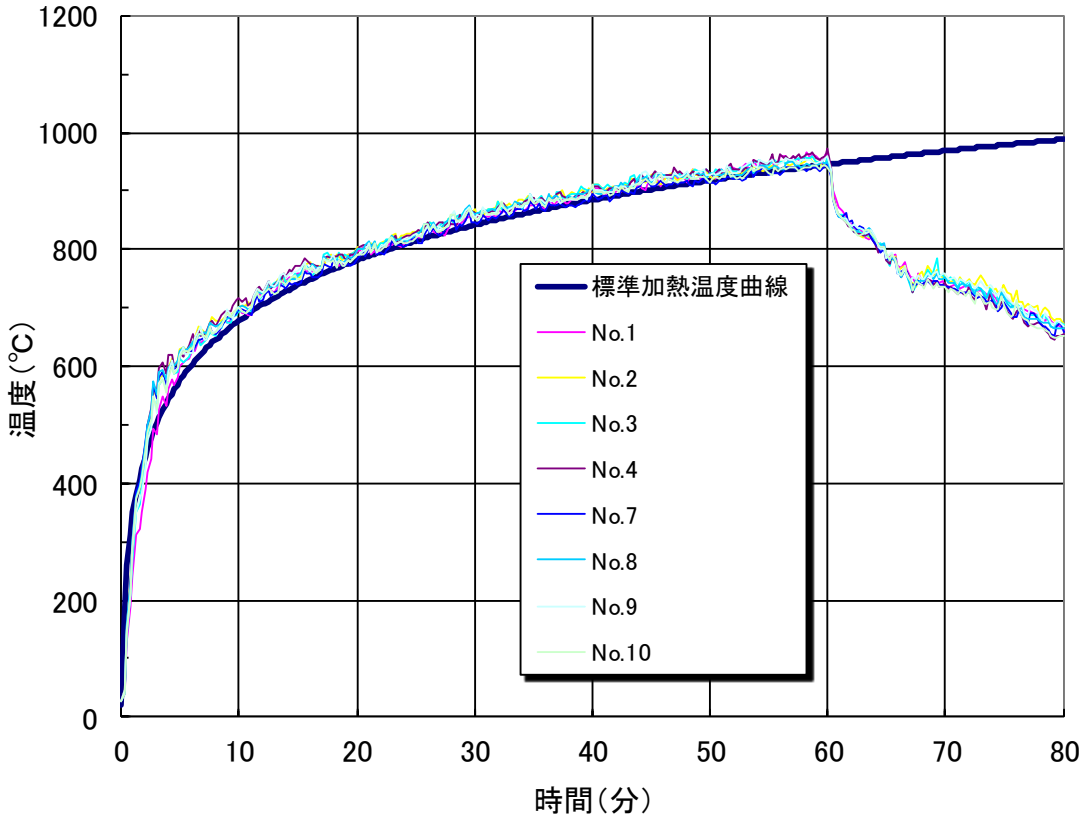


資図 1-10 内部温度(断面中央)

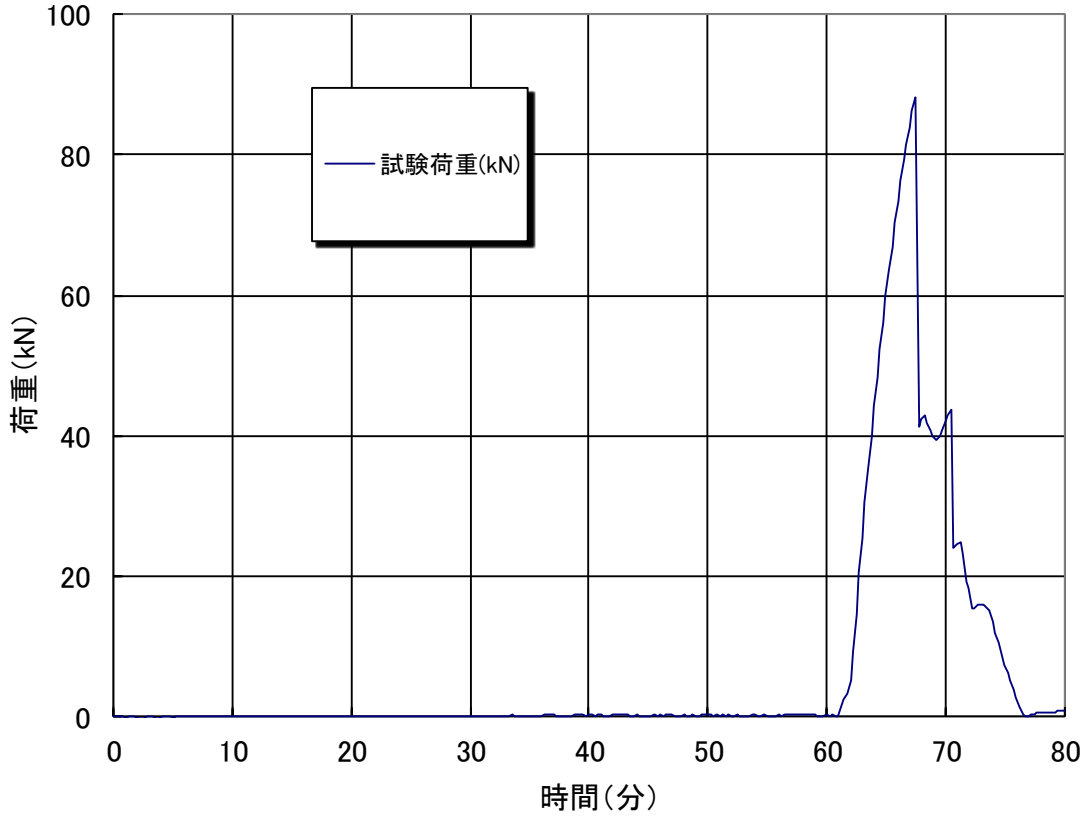


資図 1-11 内部温度(側面深さ 65㎜)

④L-1h 加熱後載荷実験

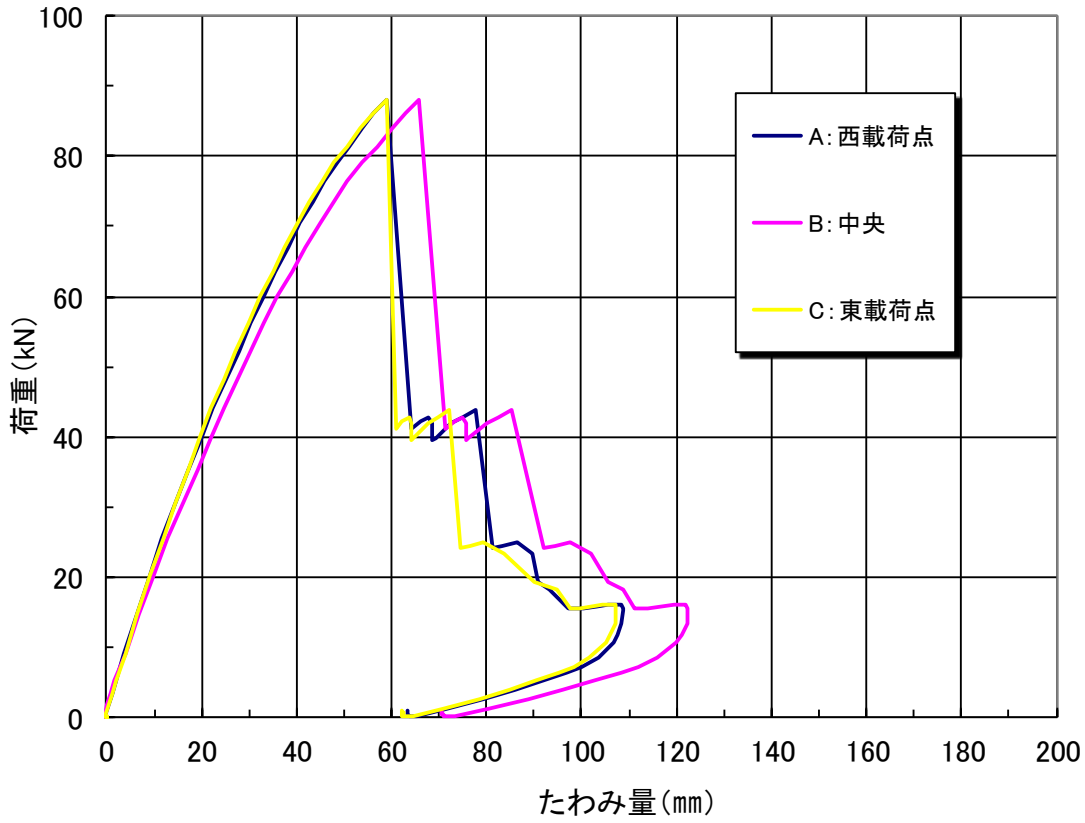


資図 1-12 炉内(加熱)温度

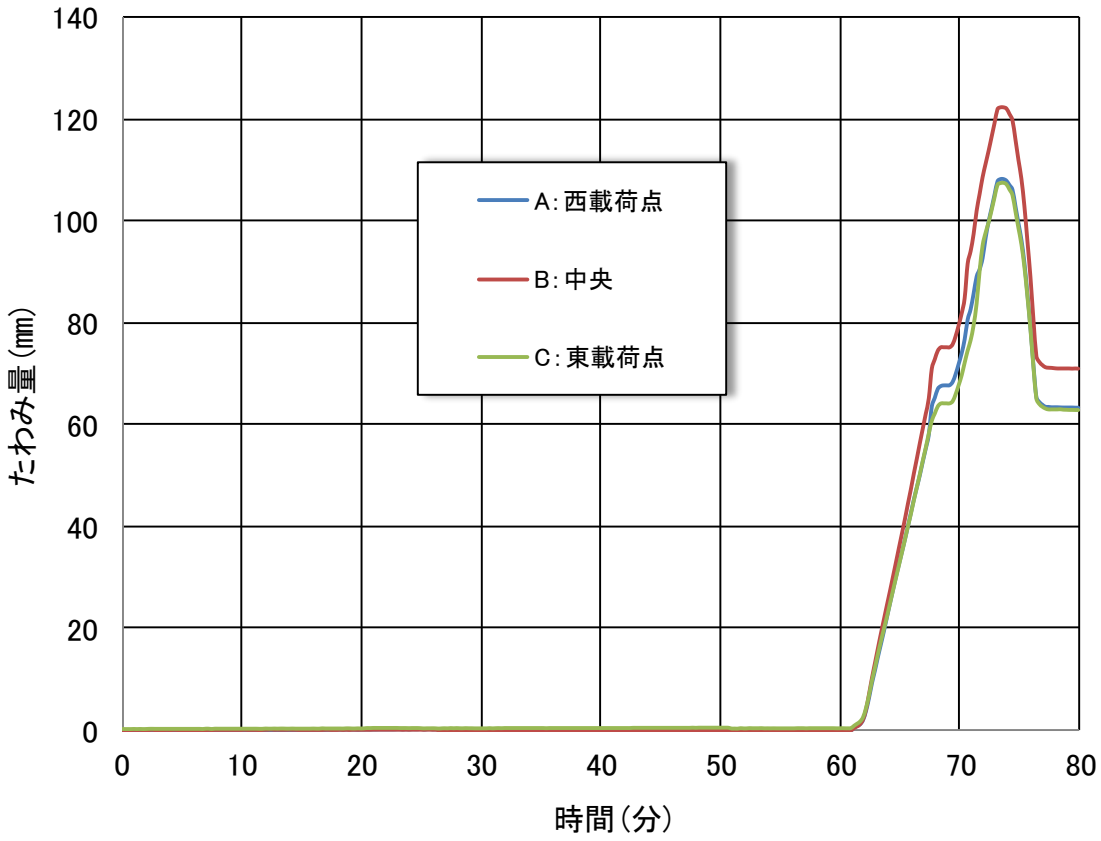


資図 1-13 荷重－時間　関係

④L-1h 加熱後載荷実験

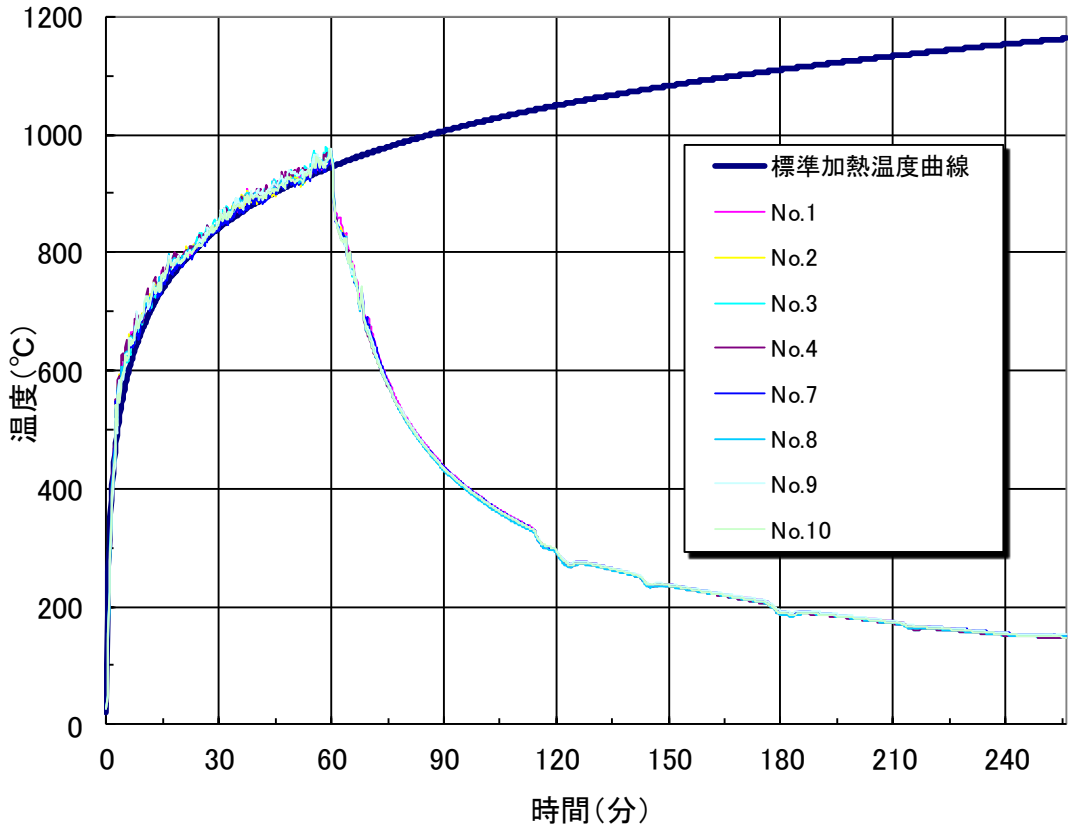


資図 1-14 荷重ーたわみ　関係

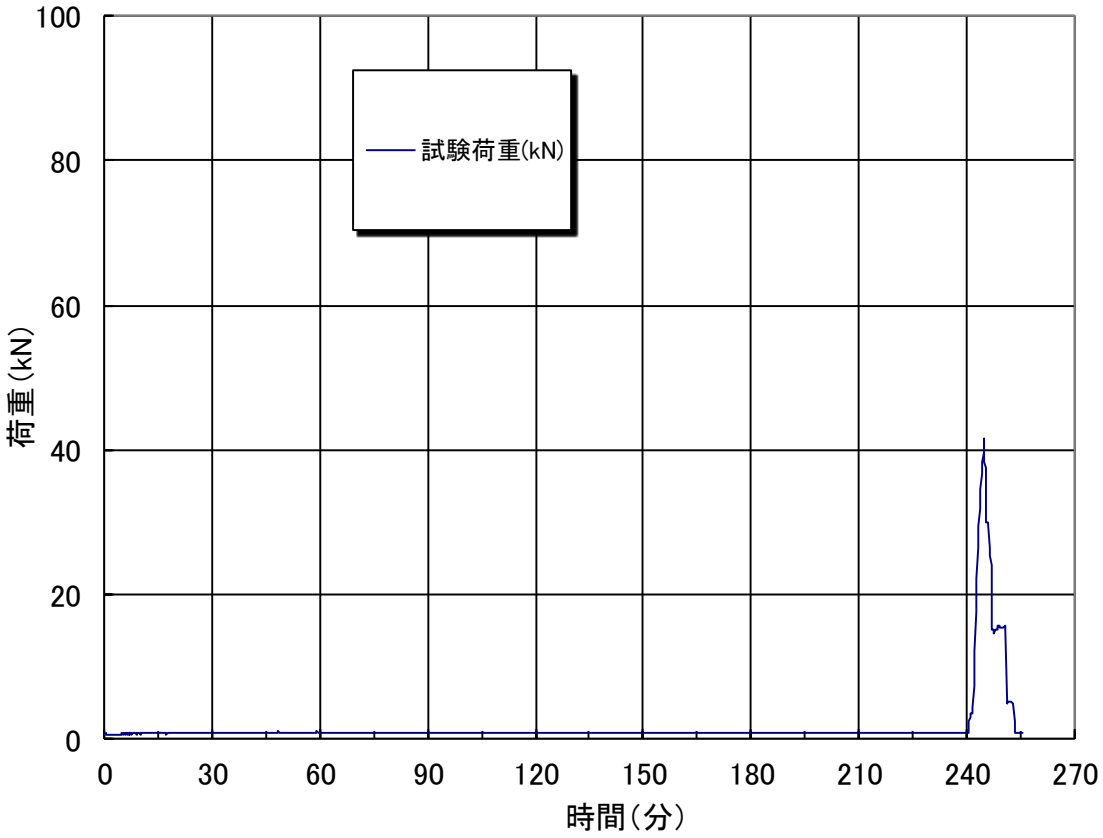


資図 1-15 たわみー時間　関係

⑤L-4h 加熱後載荷実験

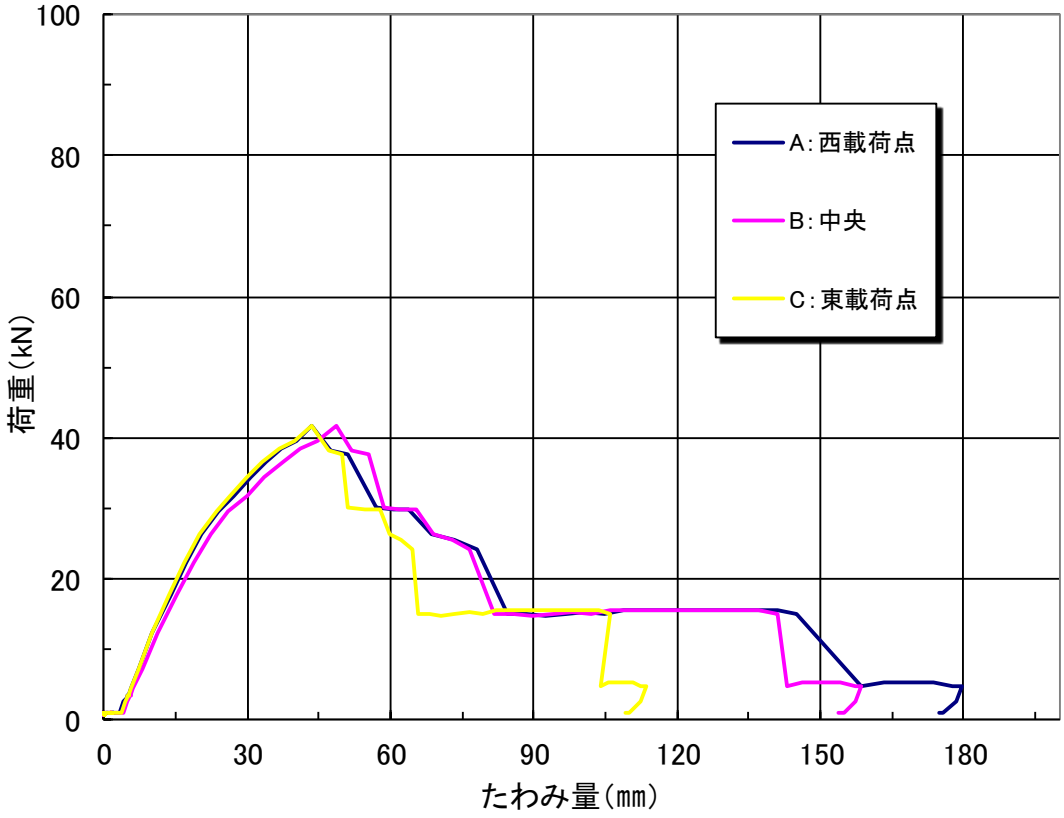


資図 1-16 炉内(加熱)温度

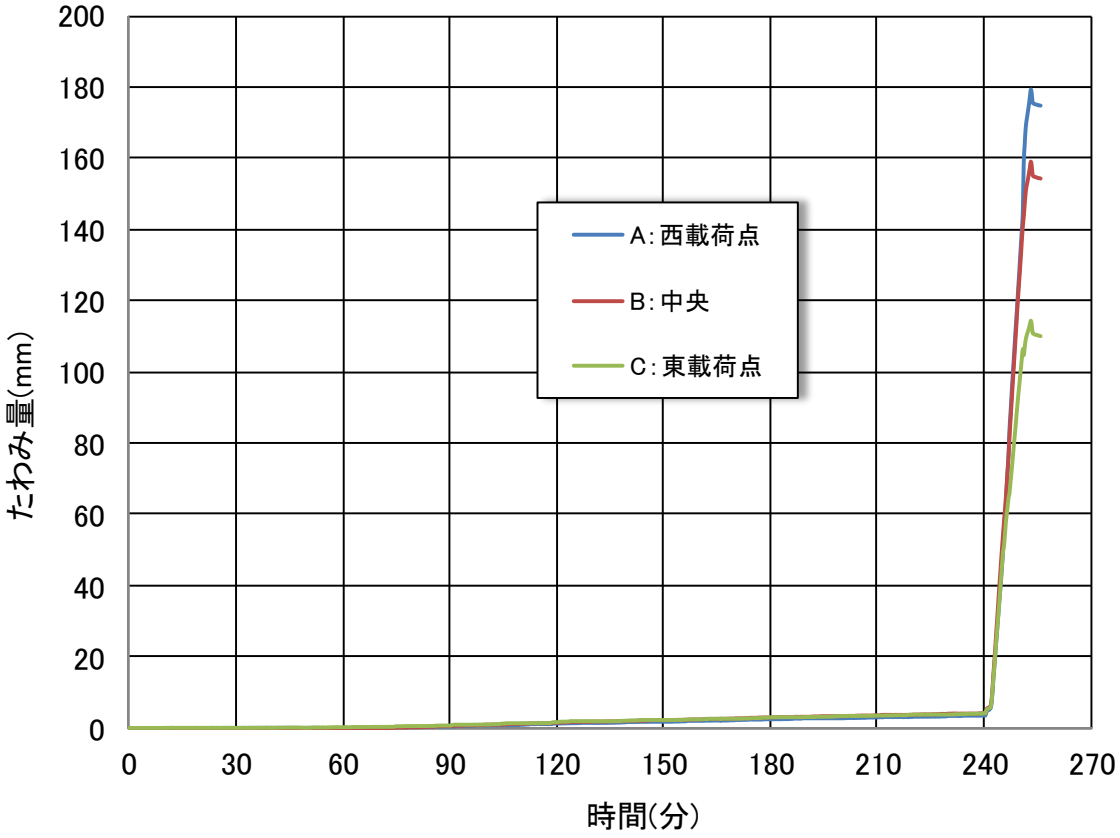


資図 1-17 荷重－時間　関係

⑤L-4h 加熱後載荷実験

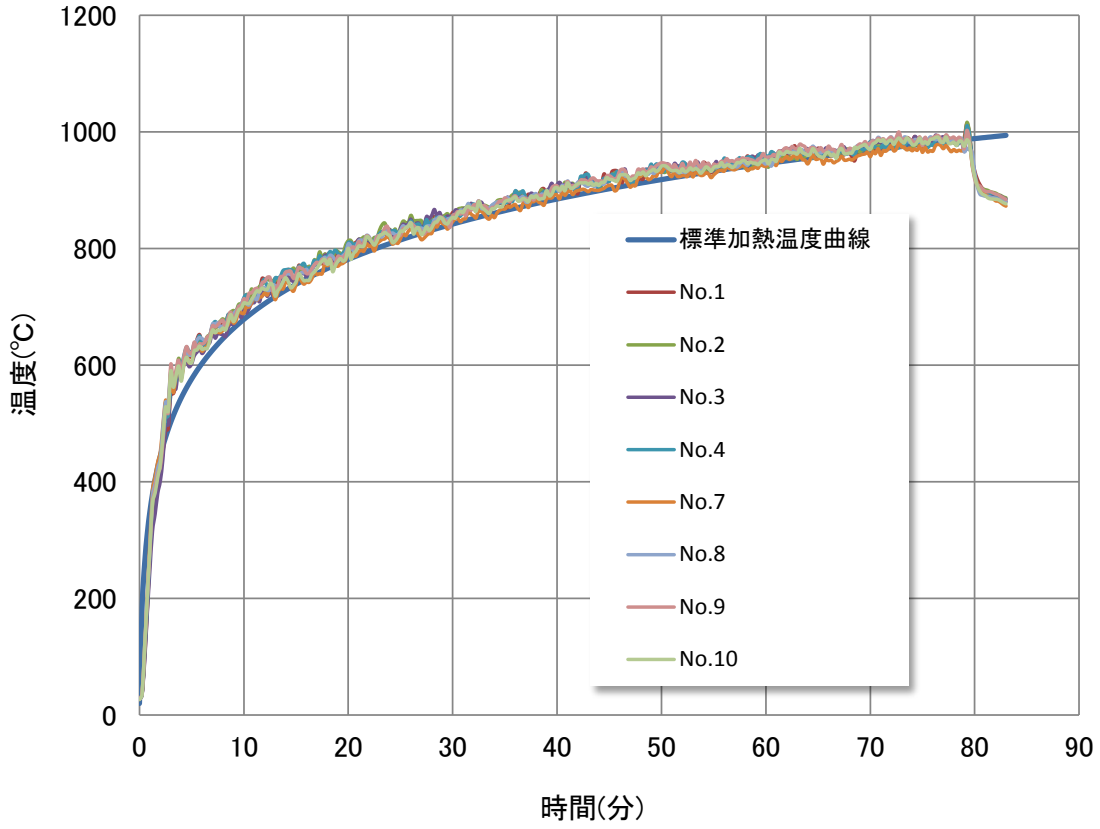


資図 1-18 荷重ーたわみ　関係

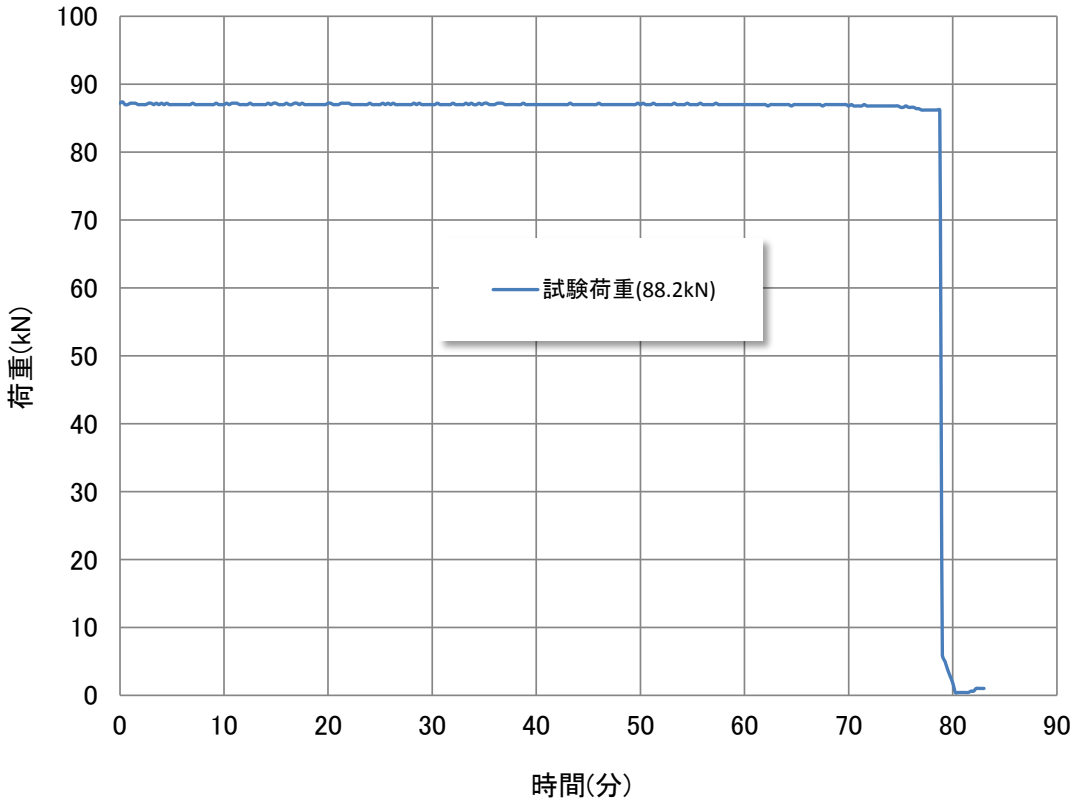


資図 1-19 たわみー時間　関係

⑥LF-1h 載荷加熱実験

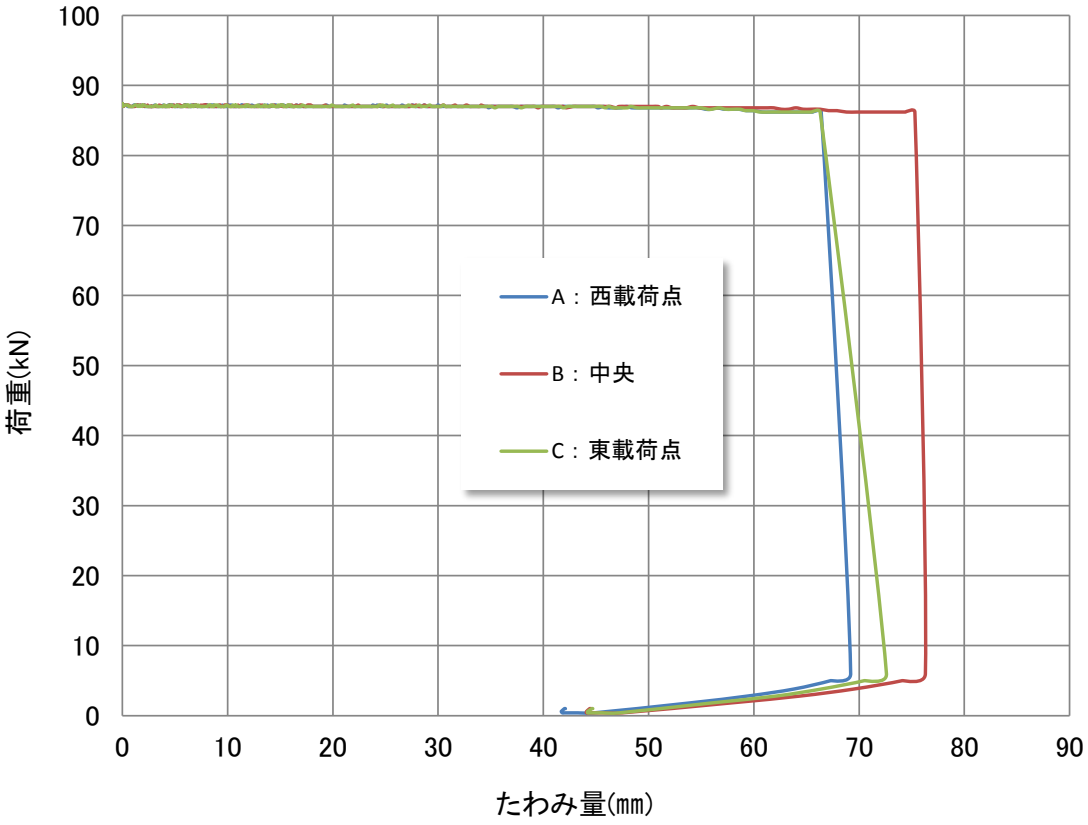


資図 1-20 炉内(加熱)温度

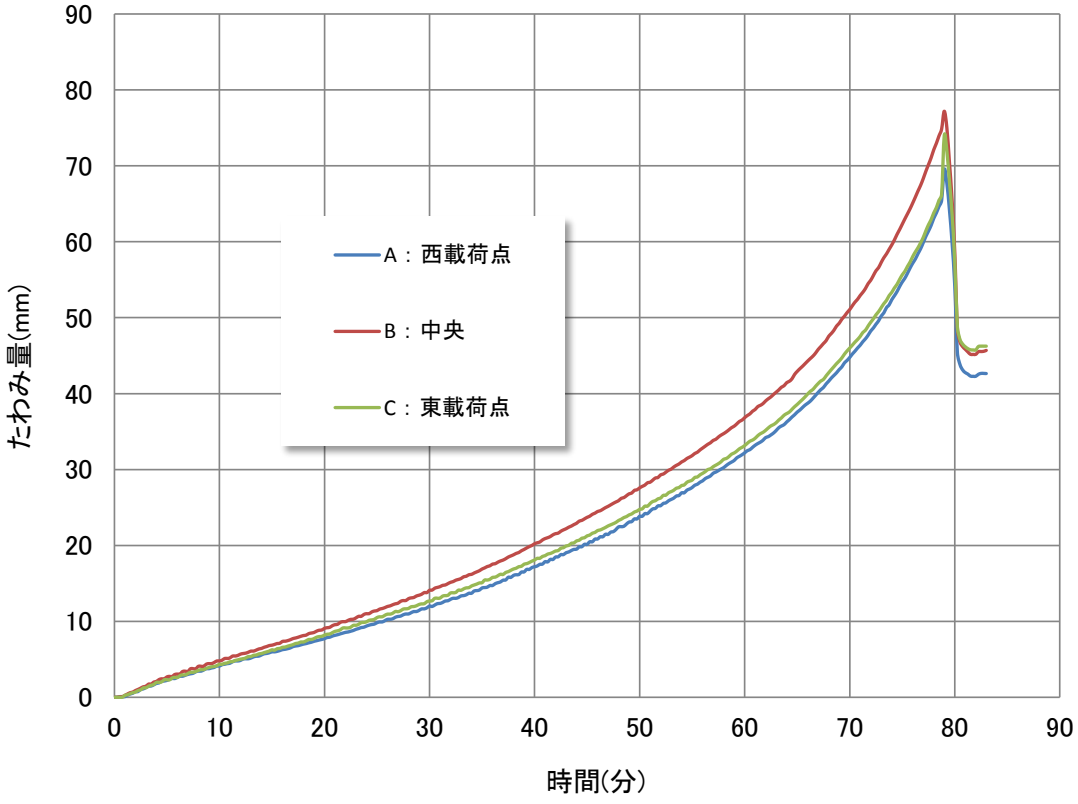


資図 1-21 荷重－時間　関係

⑥LF-1h 載荷加熱実験

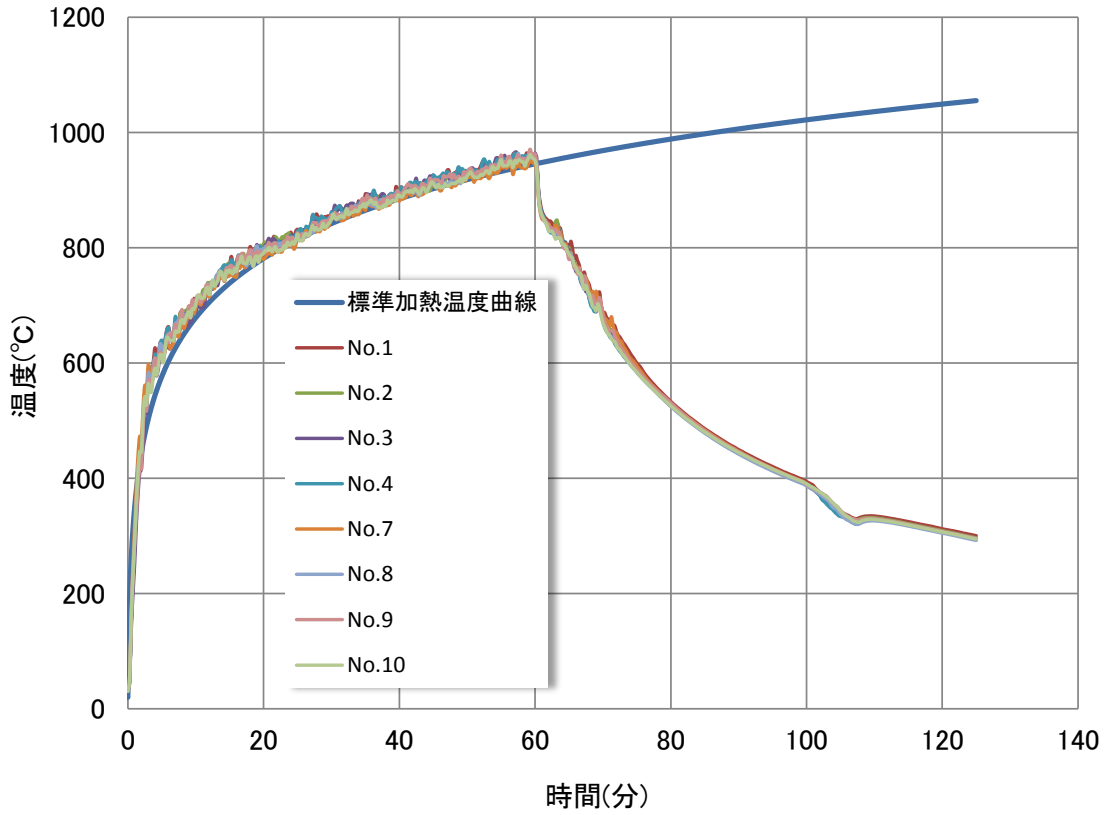


資図 1-22 荷重ーたわみ　関係

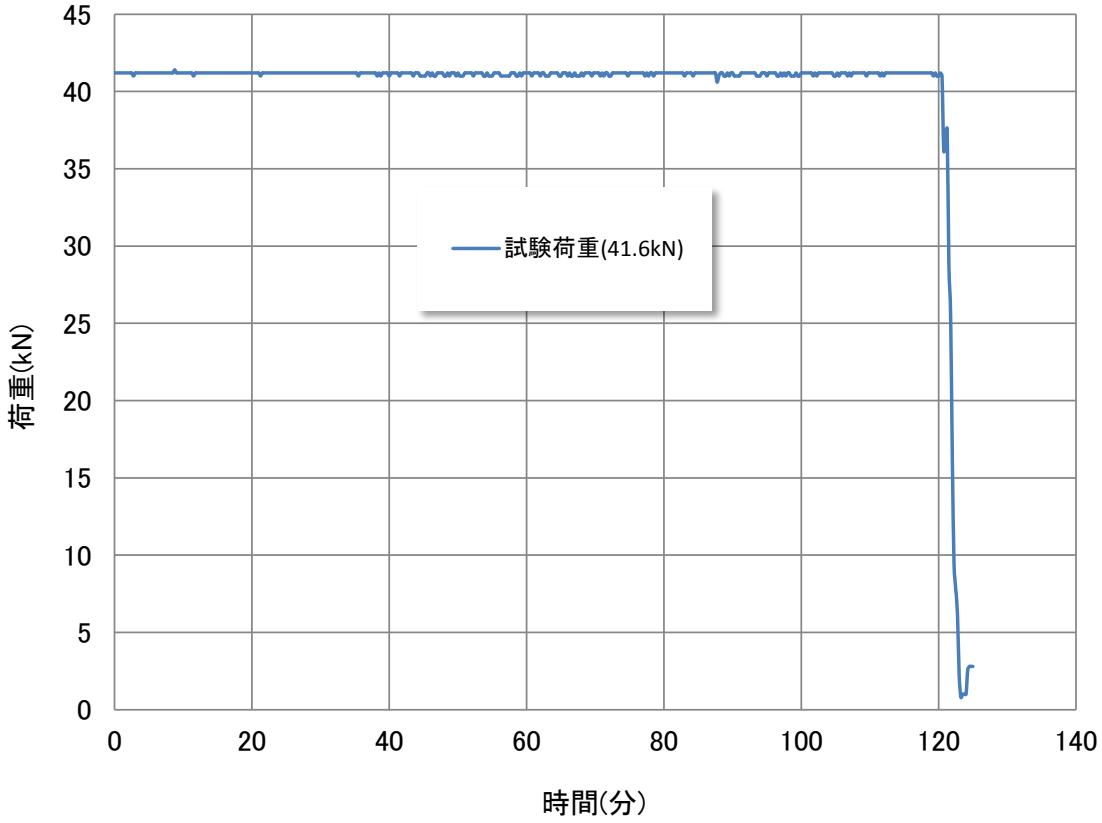


資図 1-23 たわみー時間　関係

⑦LF-4h 載荷加熱実験

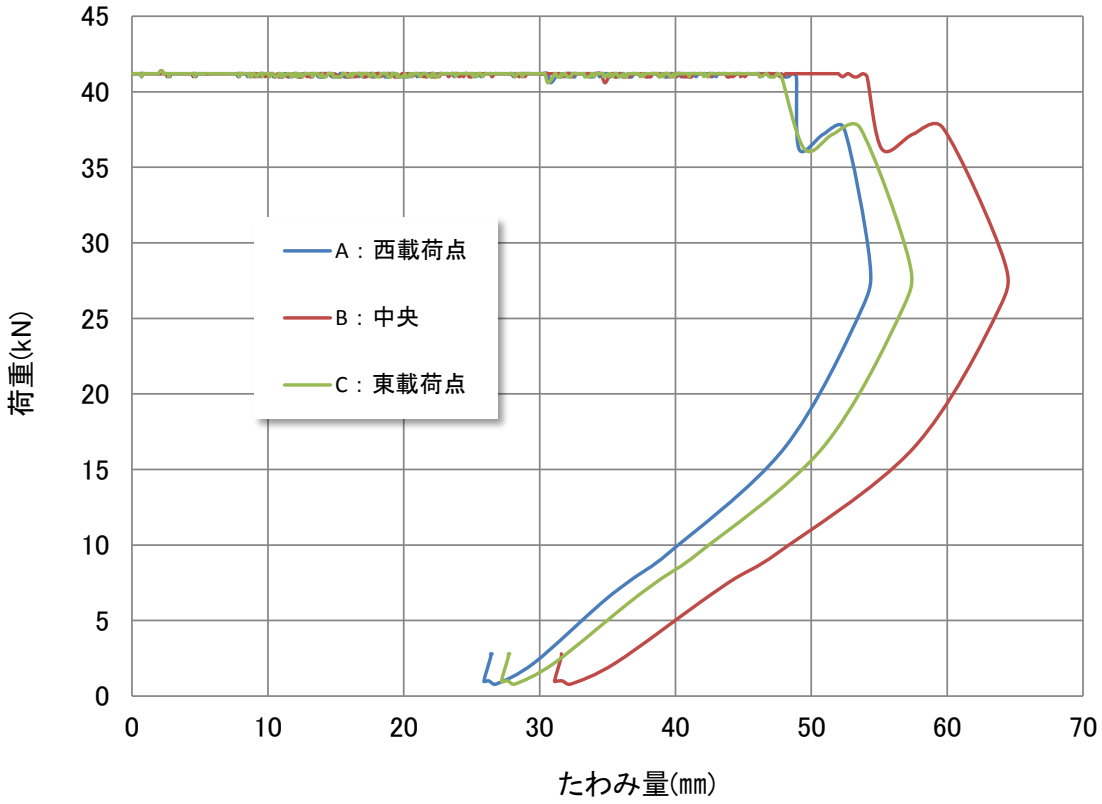


資図 1-24 炉内(加熱)温度

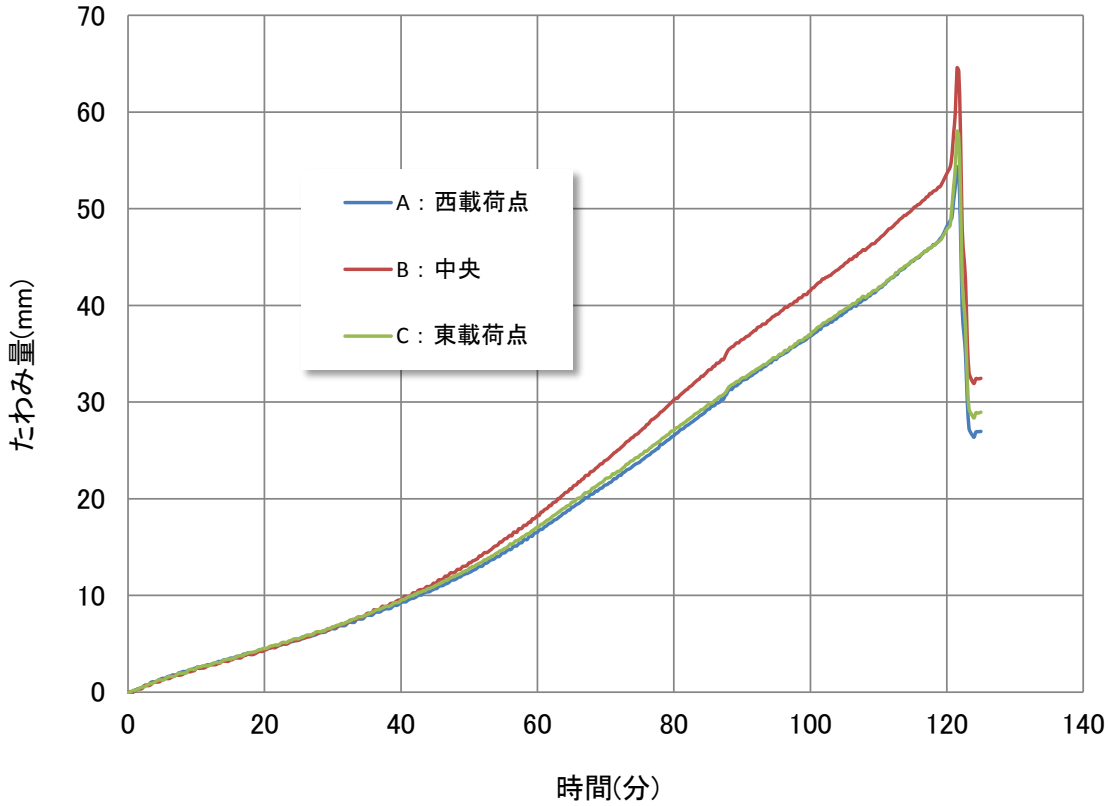


資図 1-25 荷重－時間　関係

⑦LF-4h 載荷加熱実験

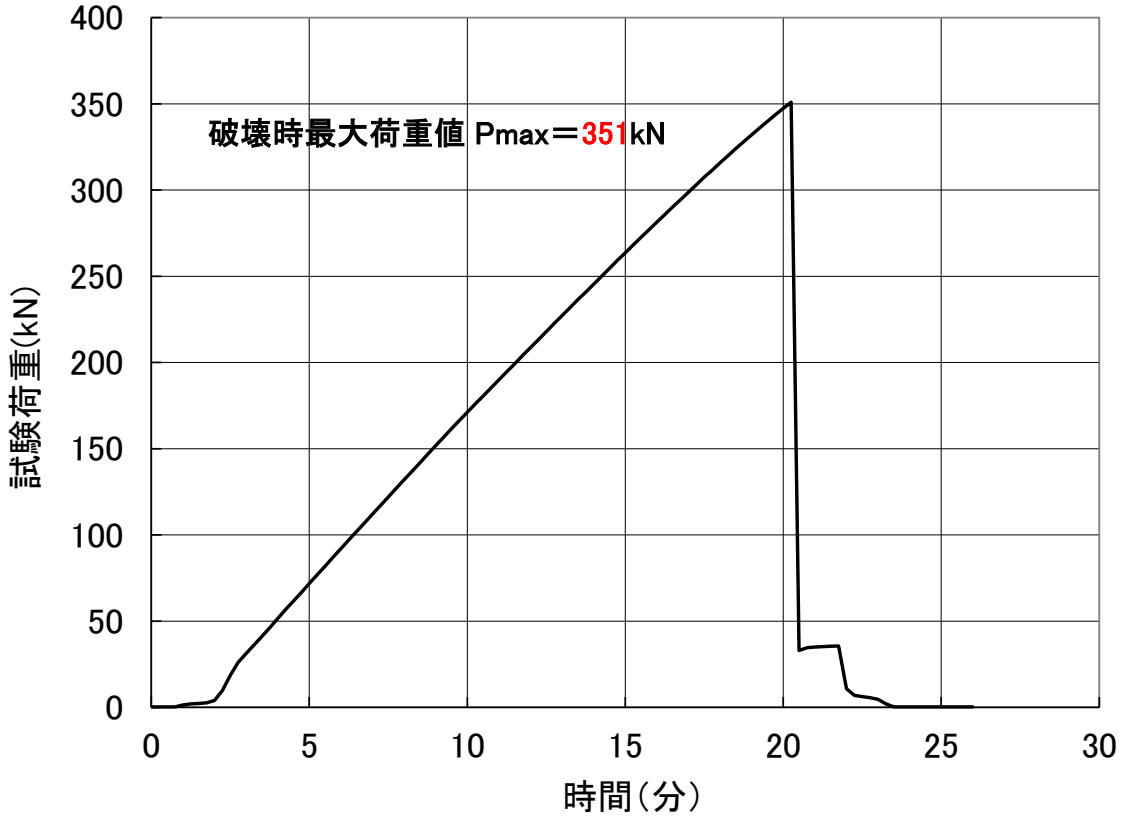


資図 1-26 荷重－たわみ　関係

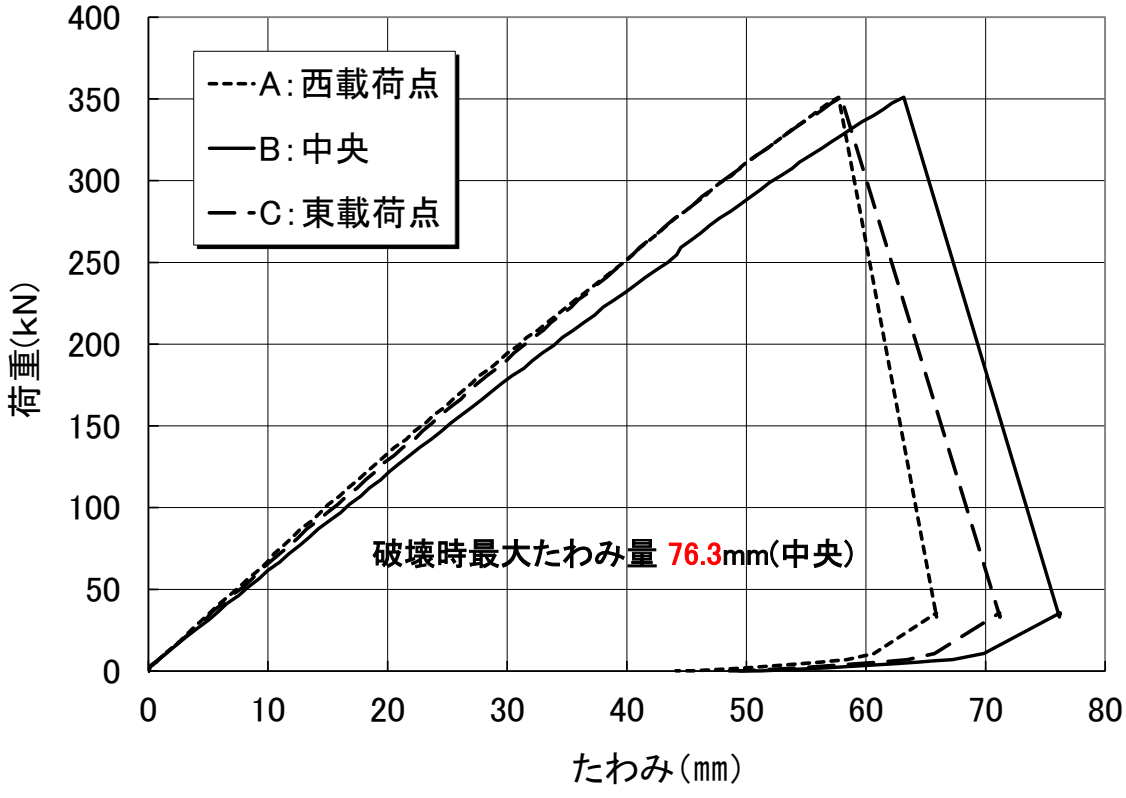


資図 1-27 たわみ－時間　関係

⑧L-RT 常温耐力 載荷実験

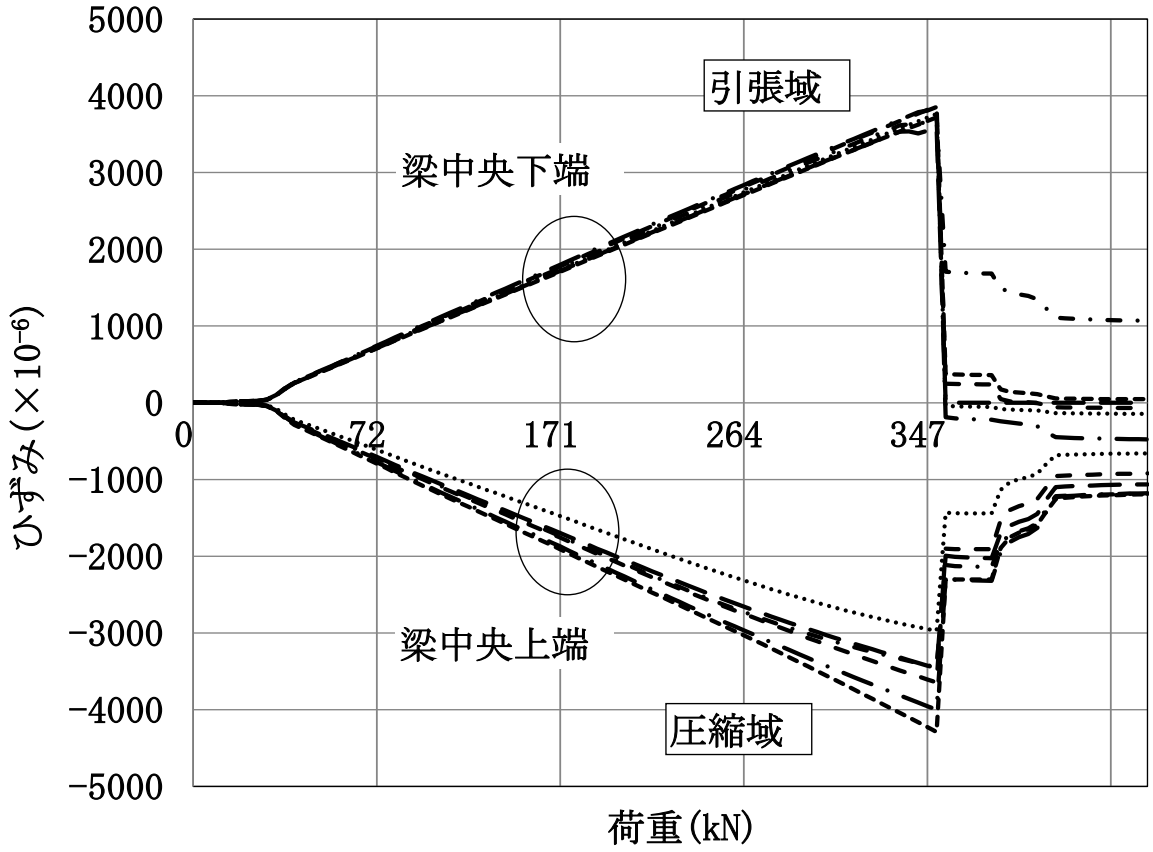


資図 1-28 荷重－時間　関係



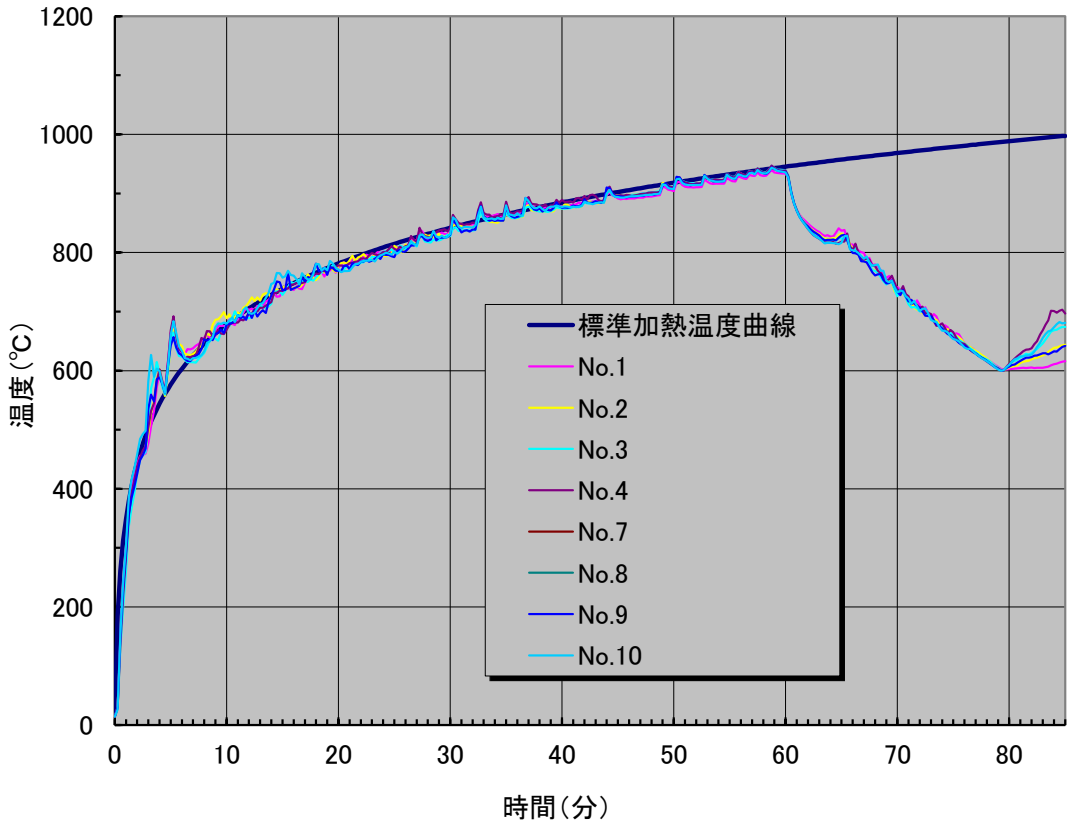
資図 1-29 荷重－たわみ　関係

⑧L-RT 常温耐力 載荷実験

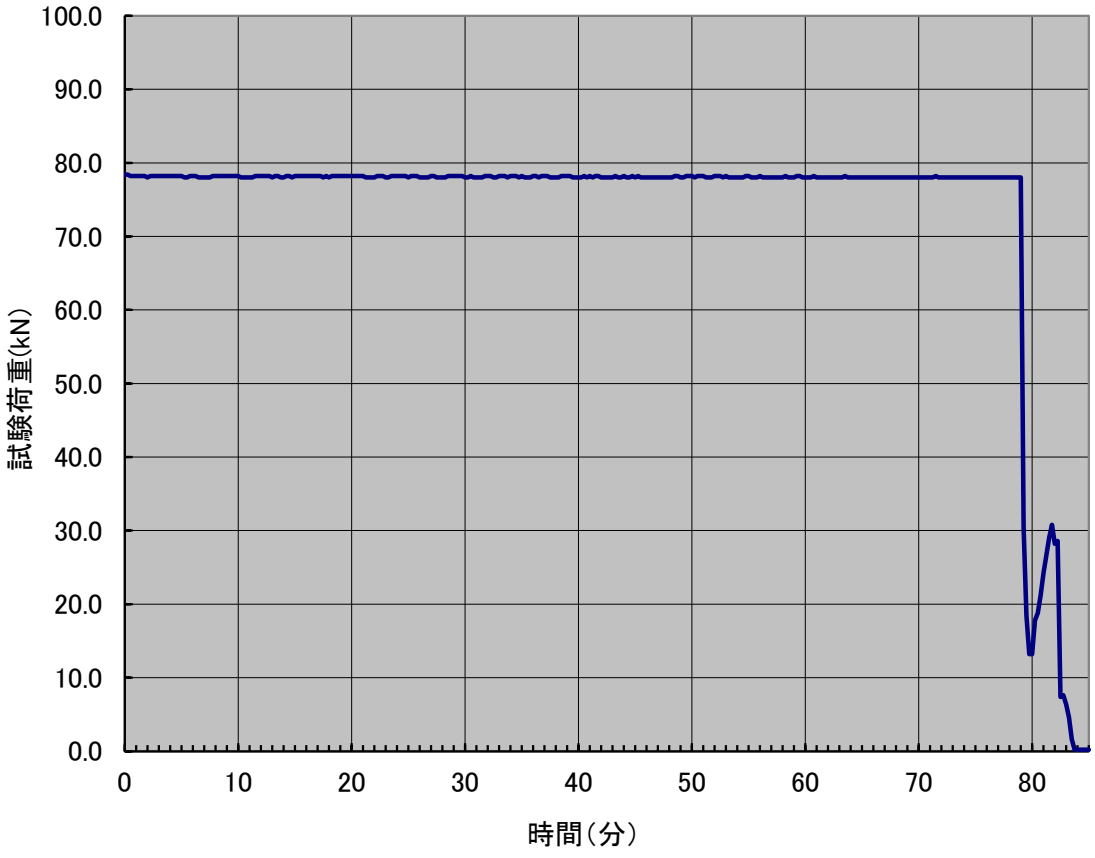


資図 1-30 荷重－ひずみ　関係

⑨LF-1.0 載荷加熱実験

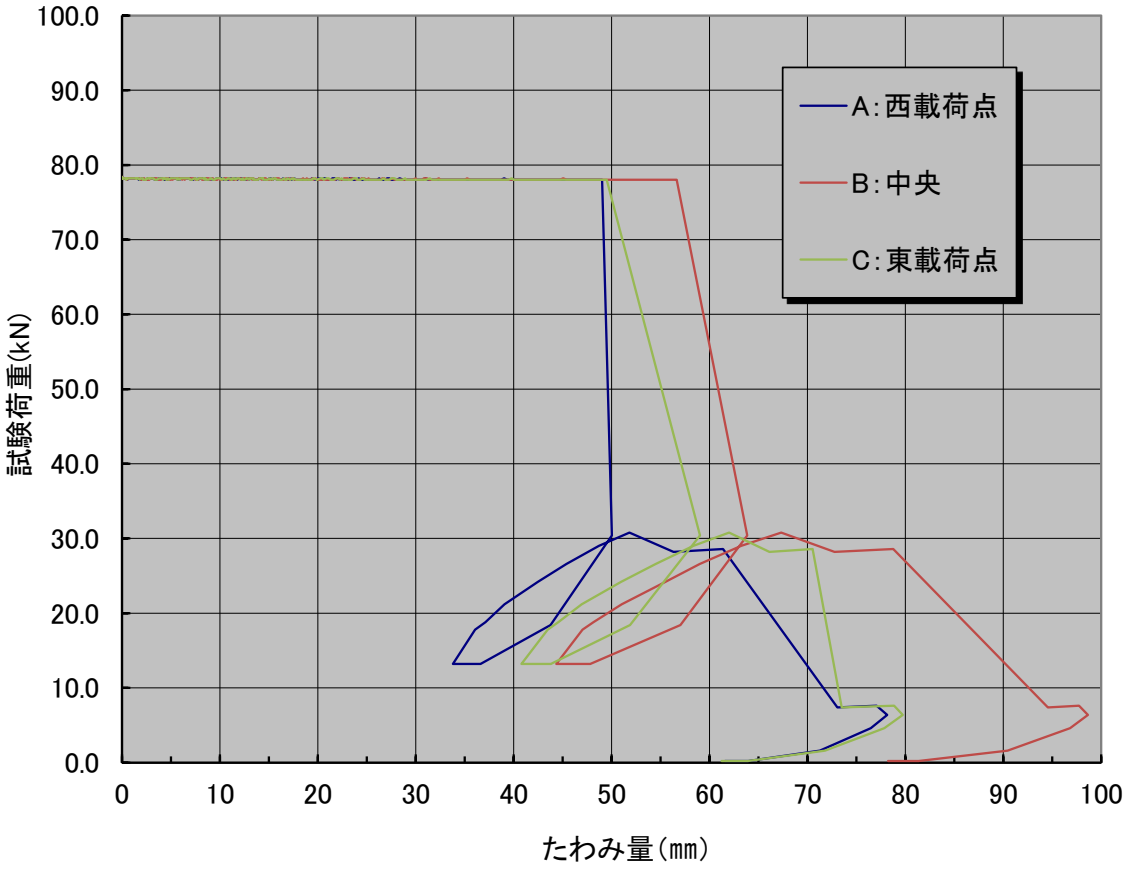


資図 1-31 炉内(加熱)温度

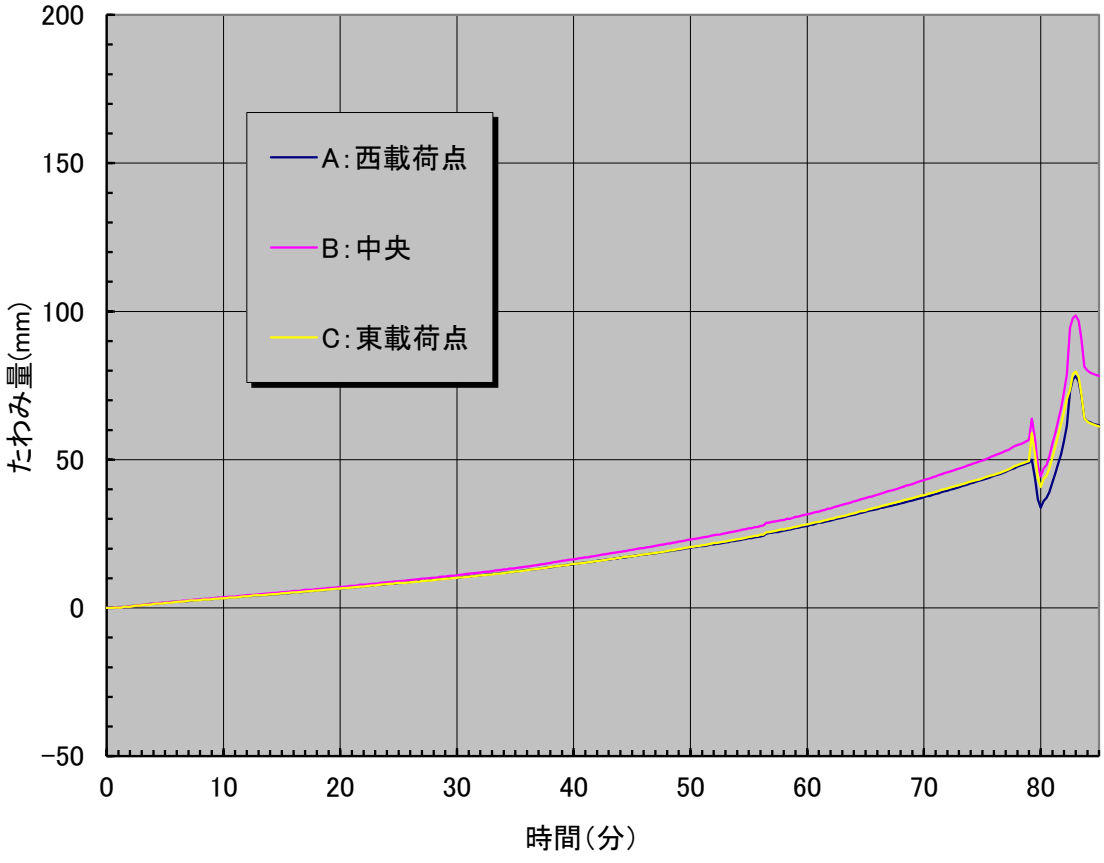


資図 1-32 荷重－時間　関係

⑨LF-1.0 載荷加熱実験

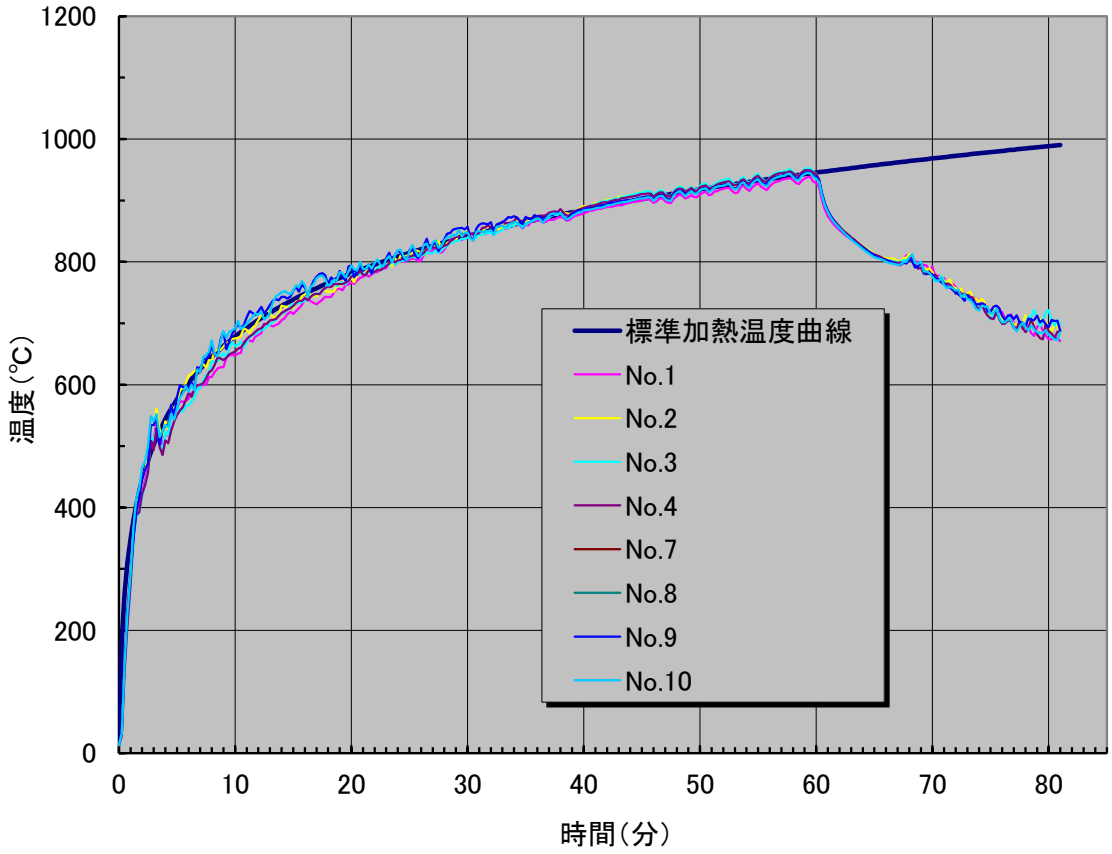


資図 1-33 荷重ーたわみ　関係

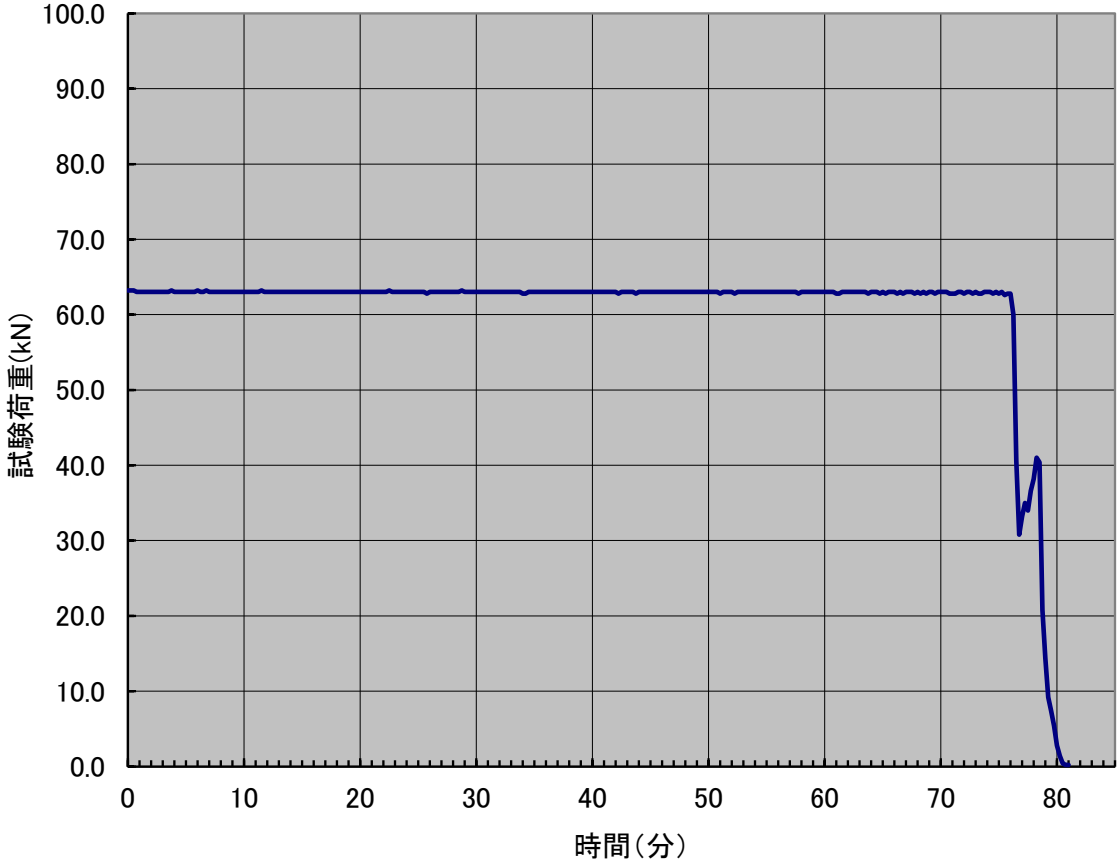


資図 1-34 たわみー時間　関係

⑩LF-0.8 載荷加熱実験

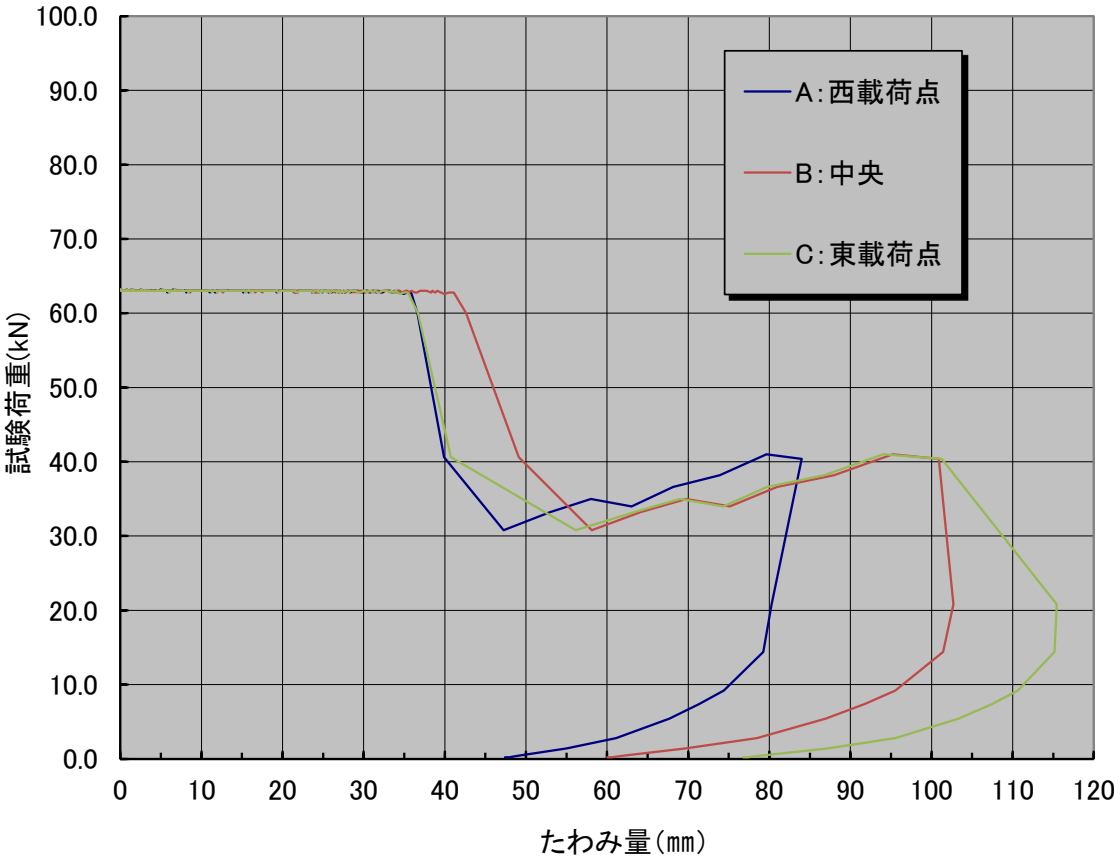


資図 1-35 炉内(加熱)温度

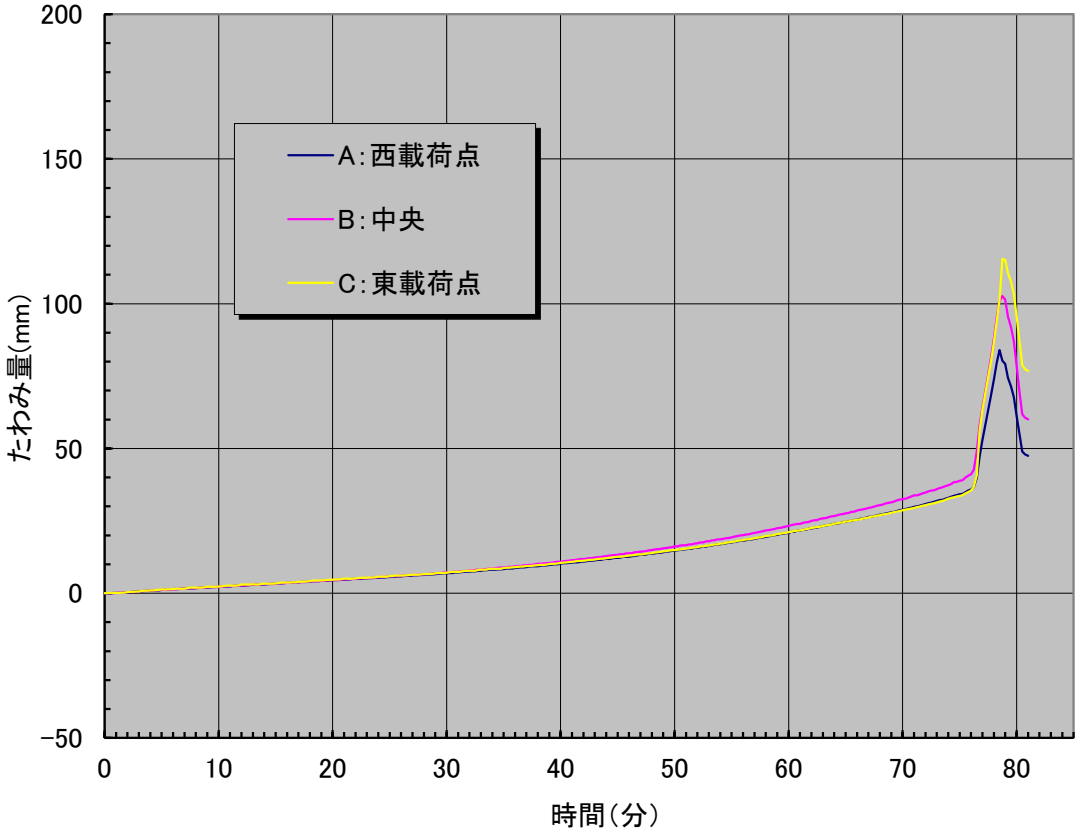


資図 1-36 荷重－時間　関係

⑩LF-0.8 載荷加熱実験

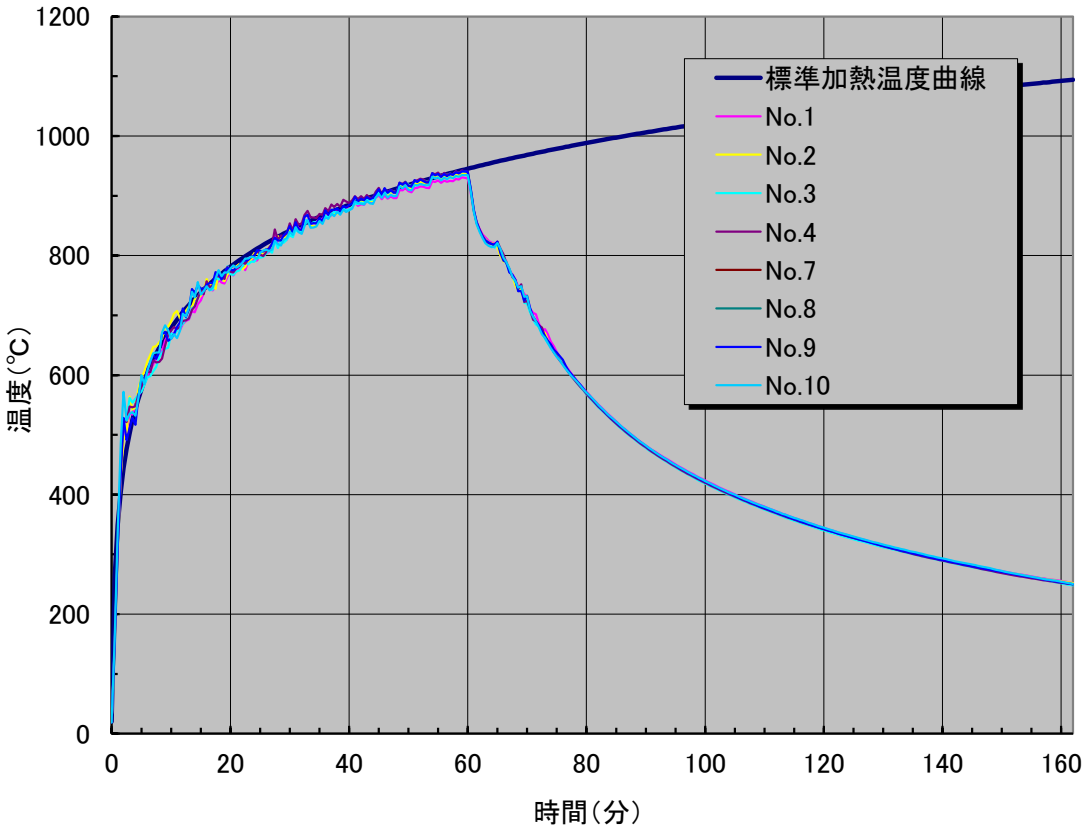


資図 1-37 荷重ーたわみ　関係

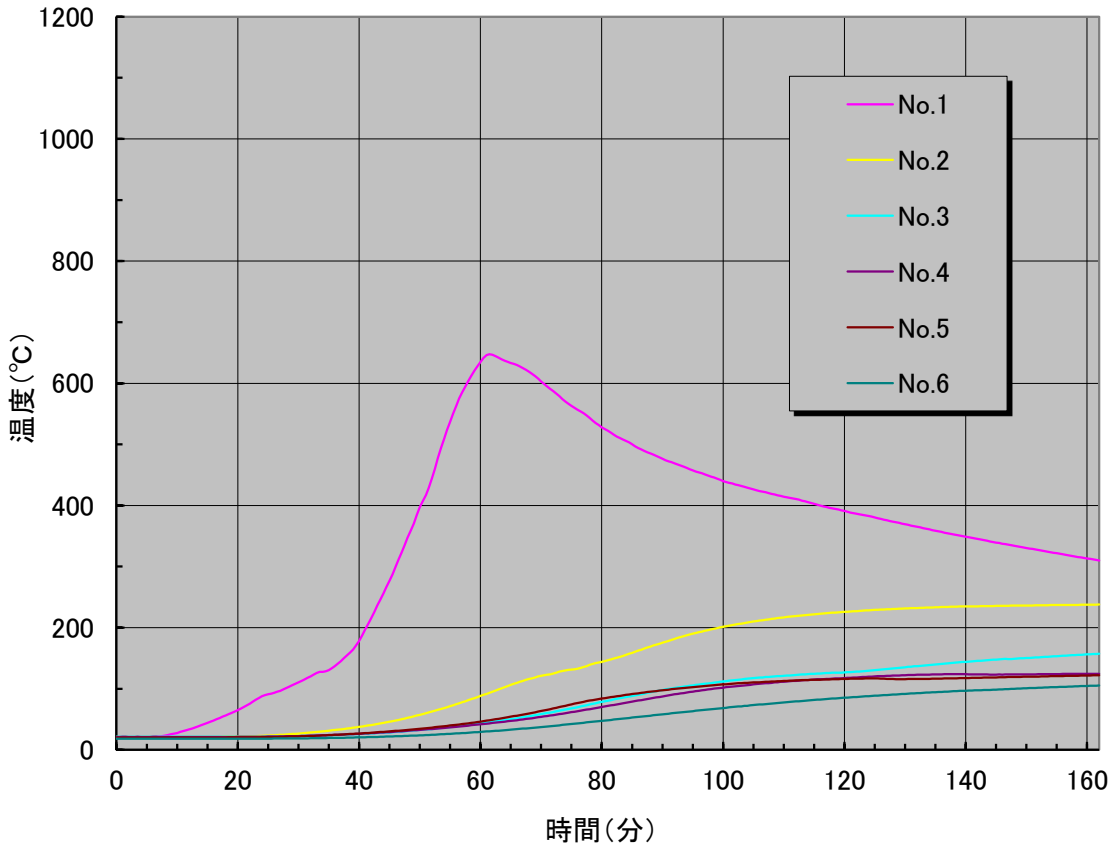


資図 1-38 たわみー時間　関係

⑪LF-0.6 載荷加熱実験

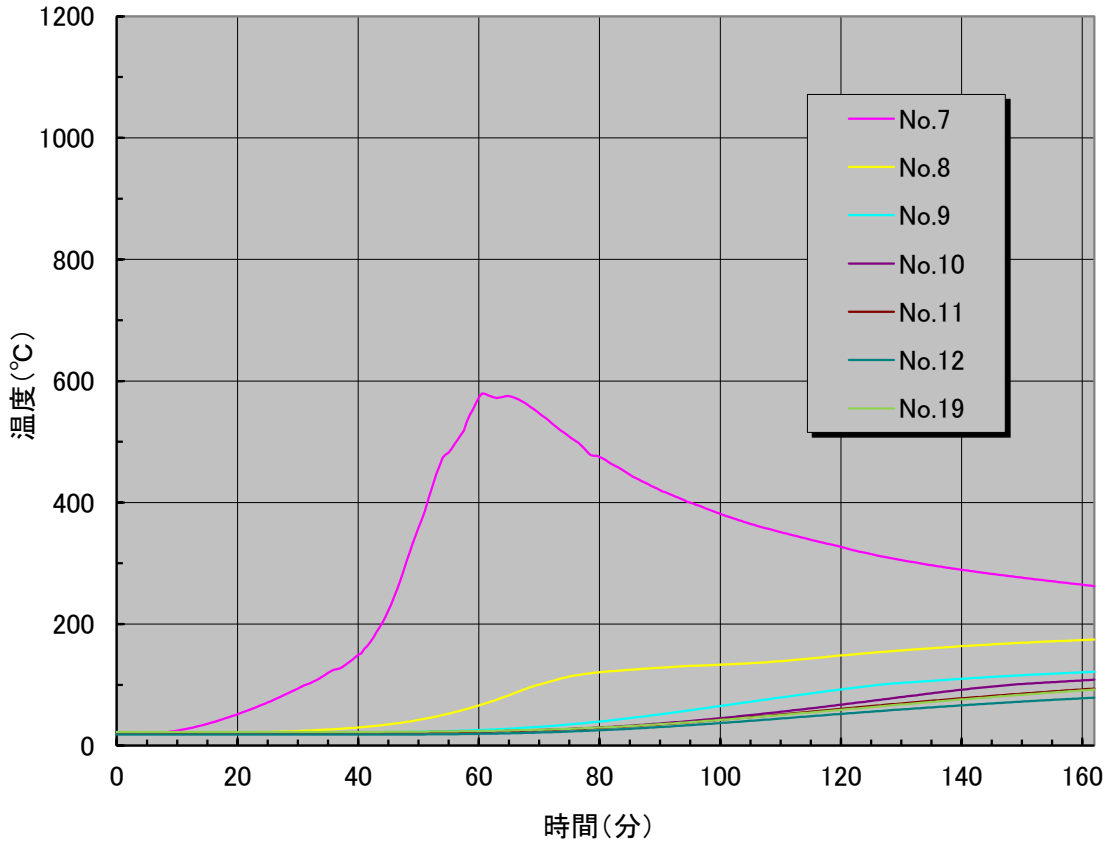


資図 1-39 炉内(加熱)温度

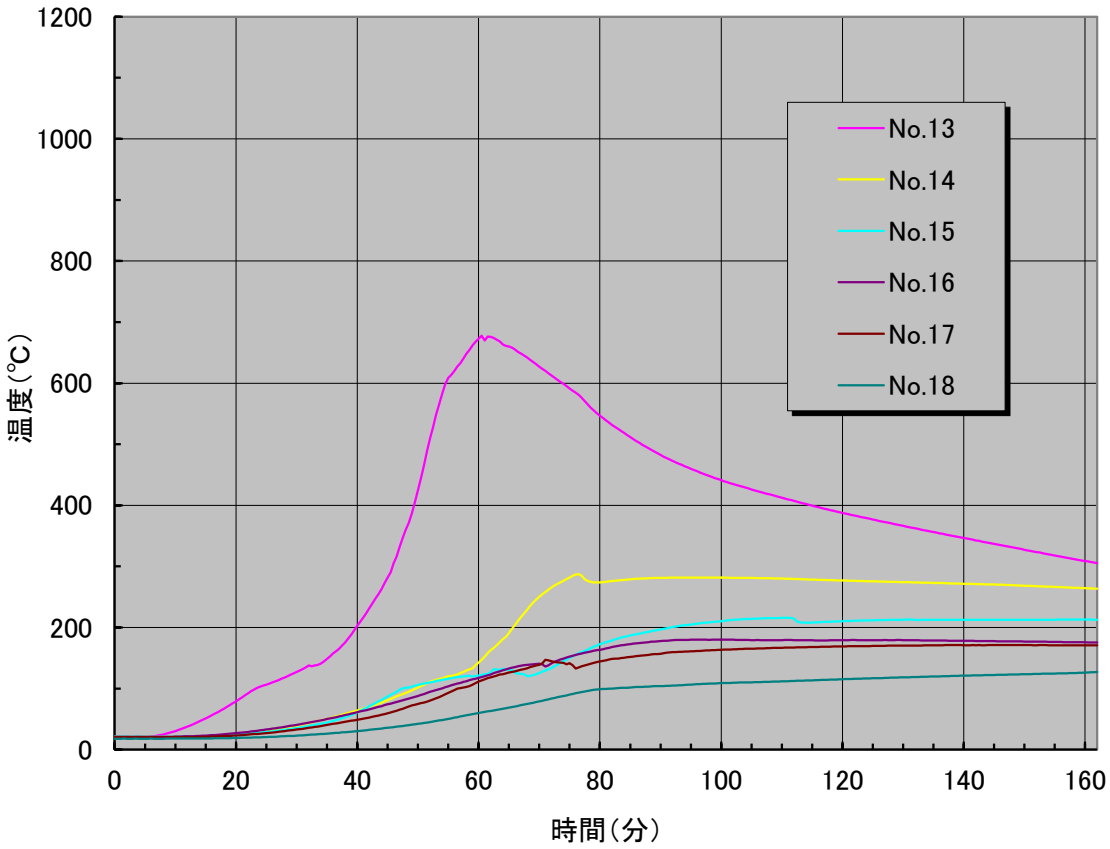


資図 1-40 内部温度(側面深さ 65㎜)

⑪LF-0.6 載荷加熱実験

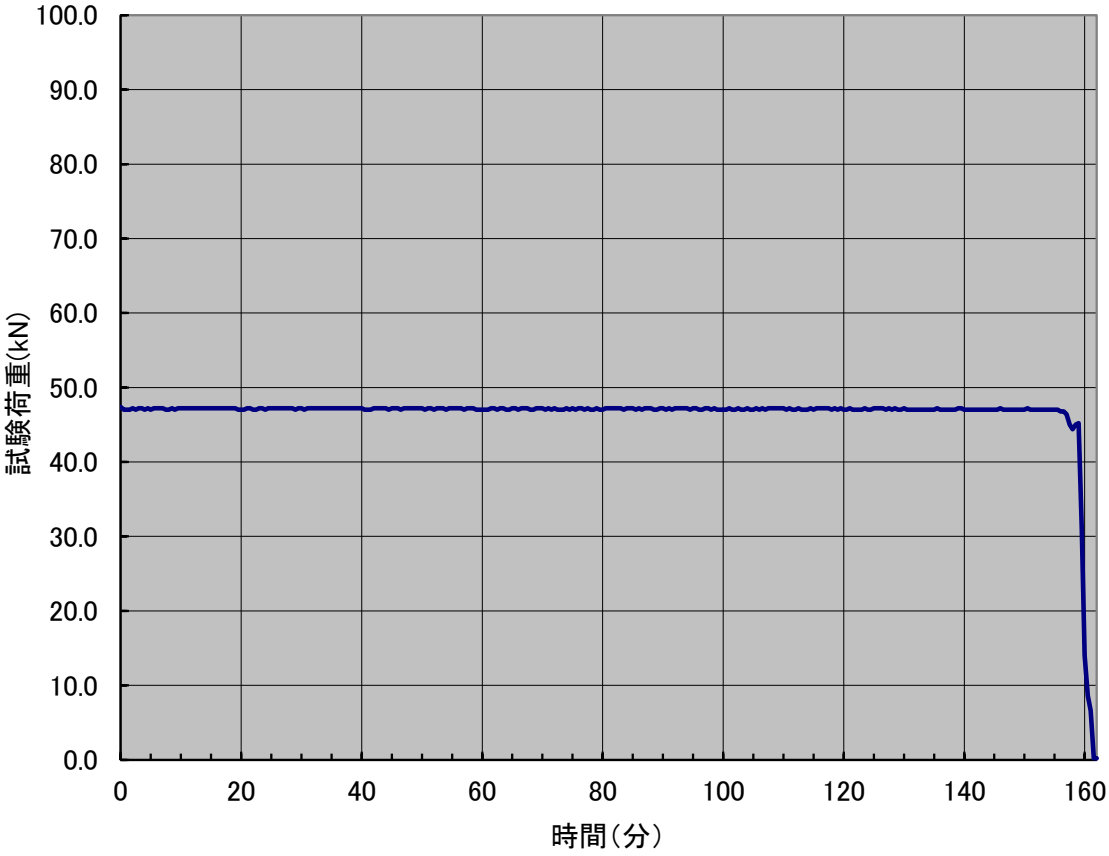


資図 1-41 内部温度(断面中央)

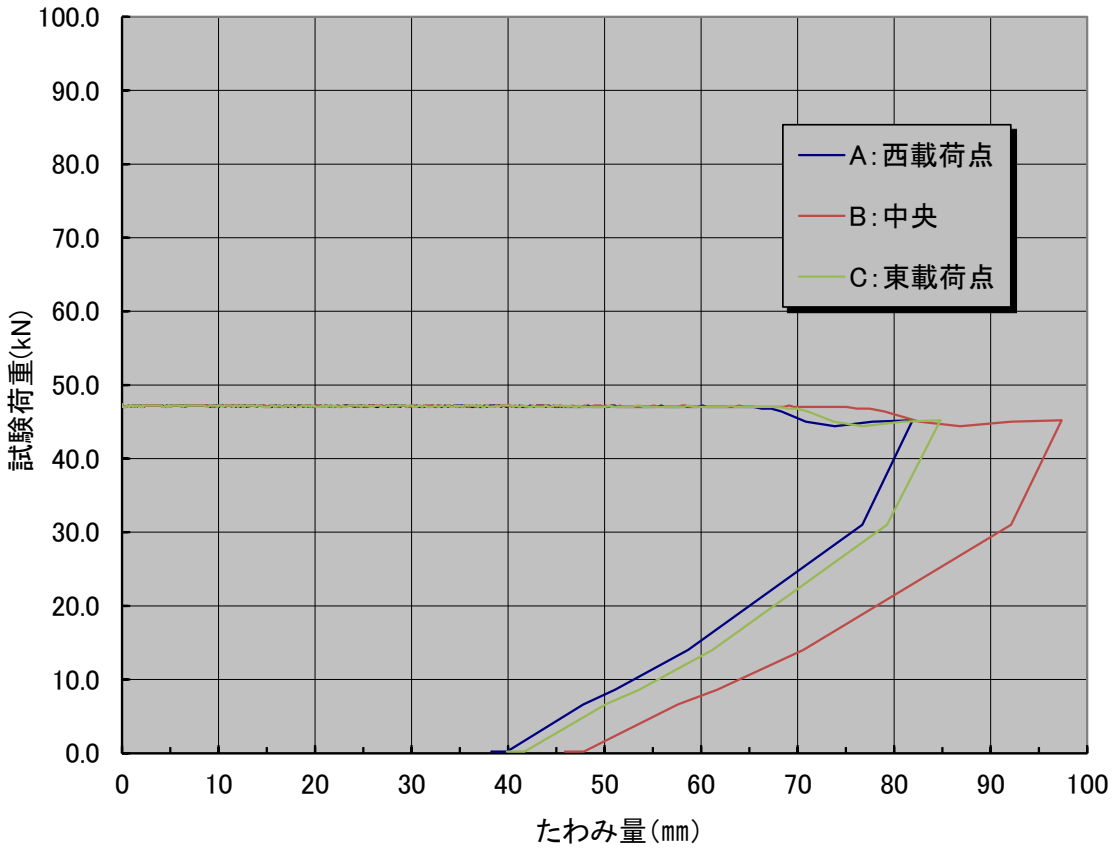


資図 1-42 内部温度(側面深さ 45㎜)

⑪LF-0.6 載荷加熱実験

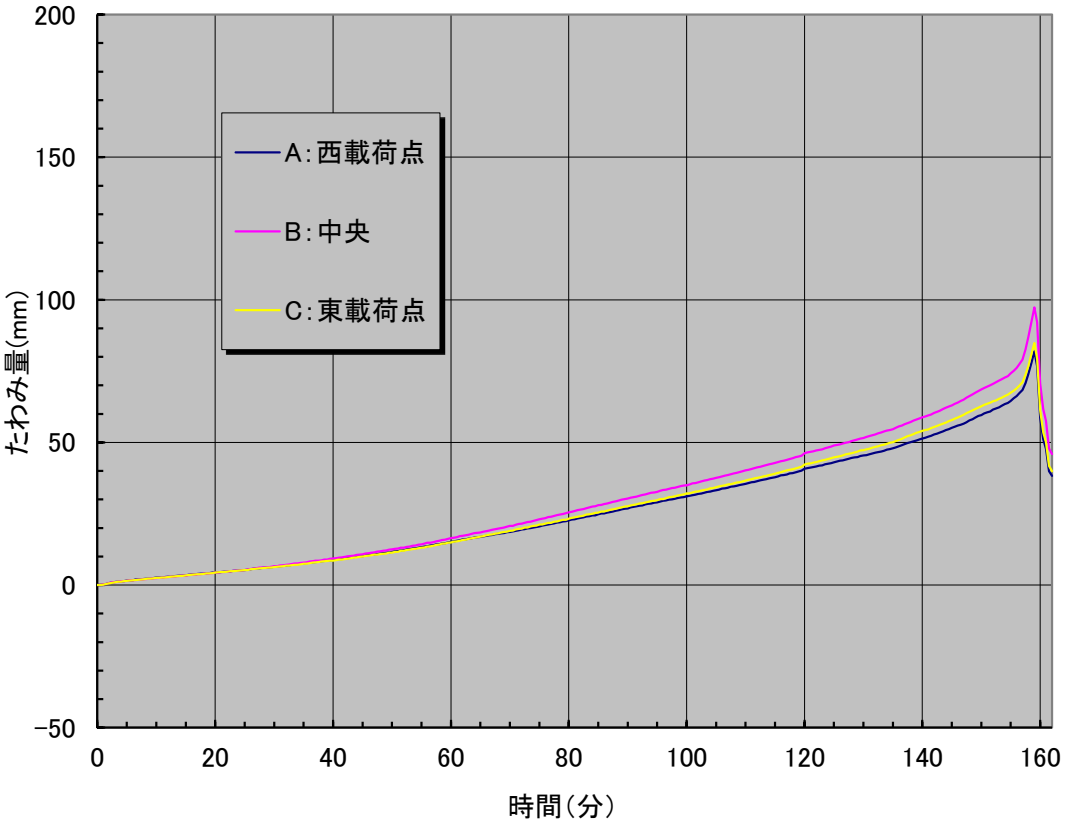


資図 1-43 荷重－時間　関係



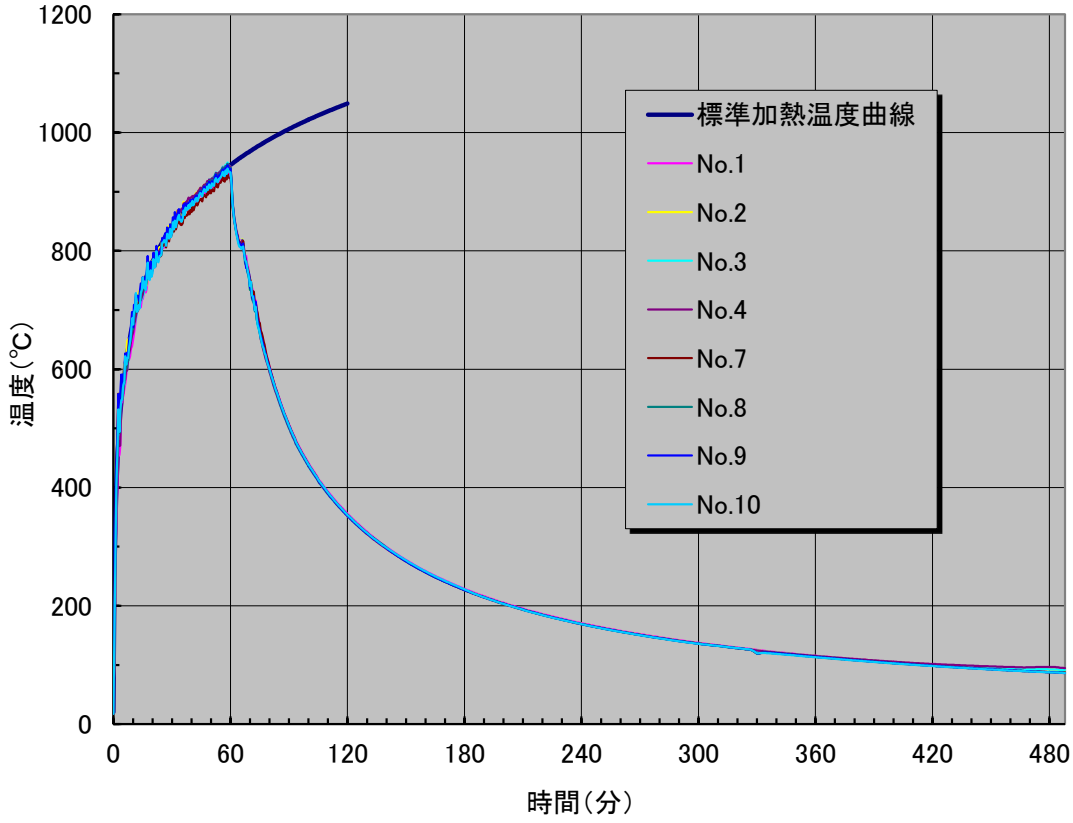
資図 1-44 荷重－たわみ　関係

⑪LF-0.6 載荷加熱実験

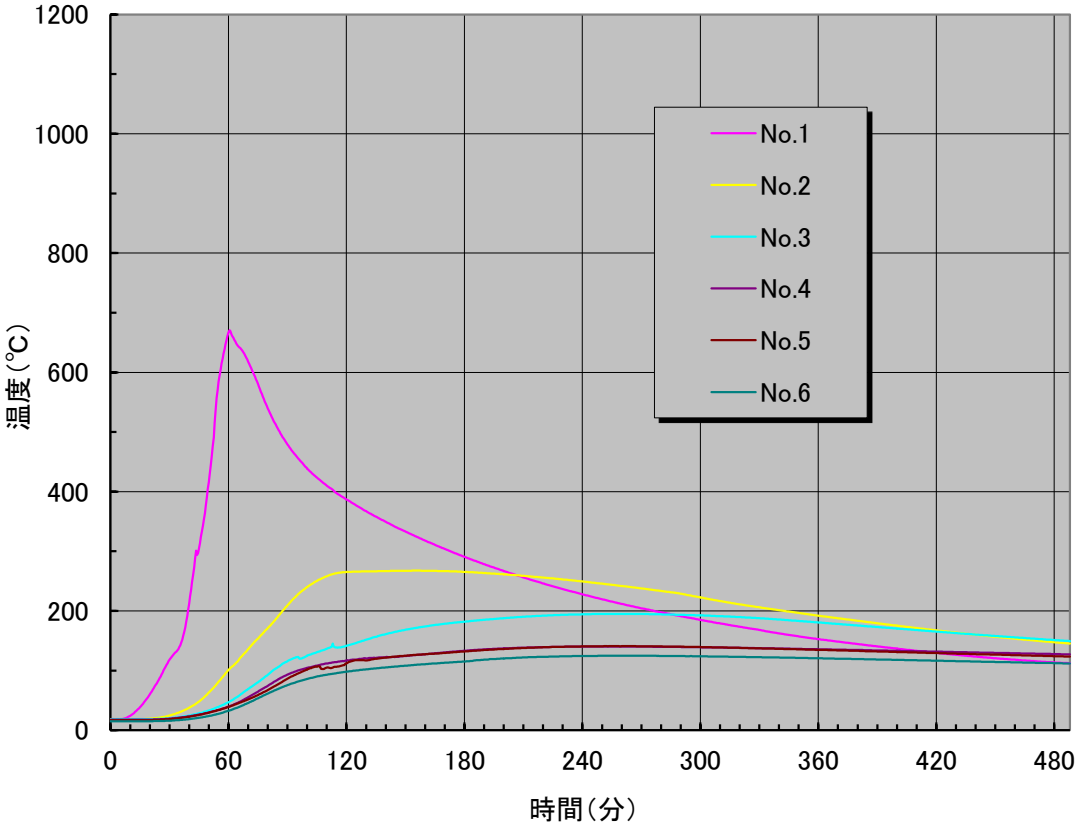


資図 1-45 たわみ－時間　関係

⑫LF-0.4(1) 載荷加熱実験

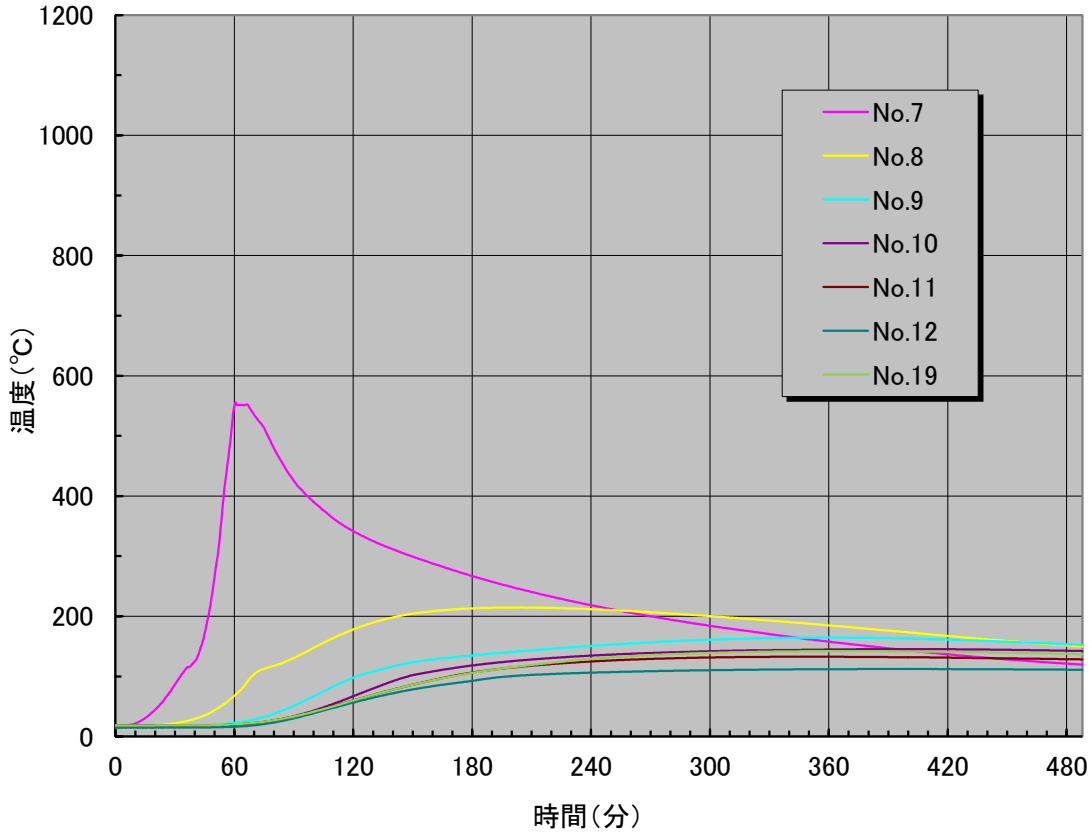


資図 1-46 炉内(加熱)温度

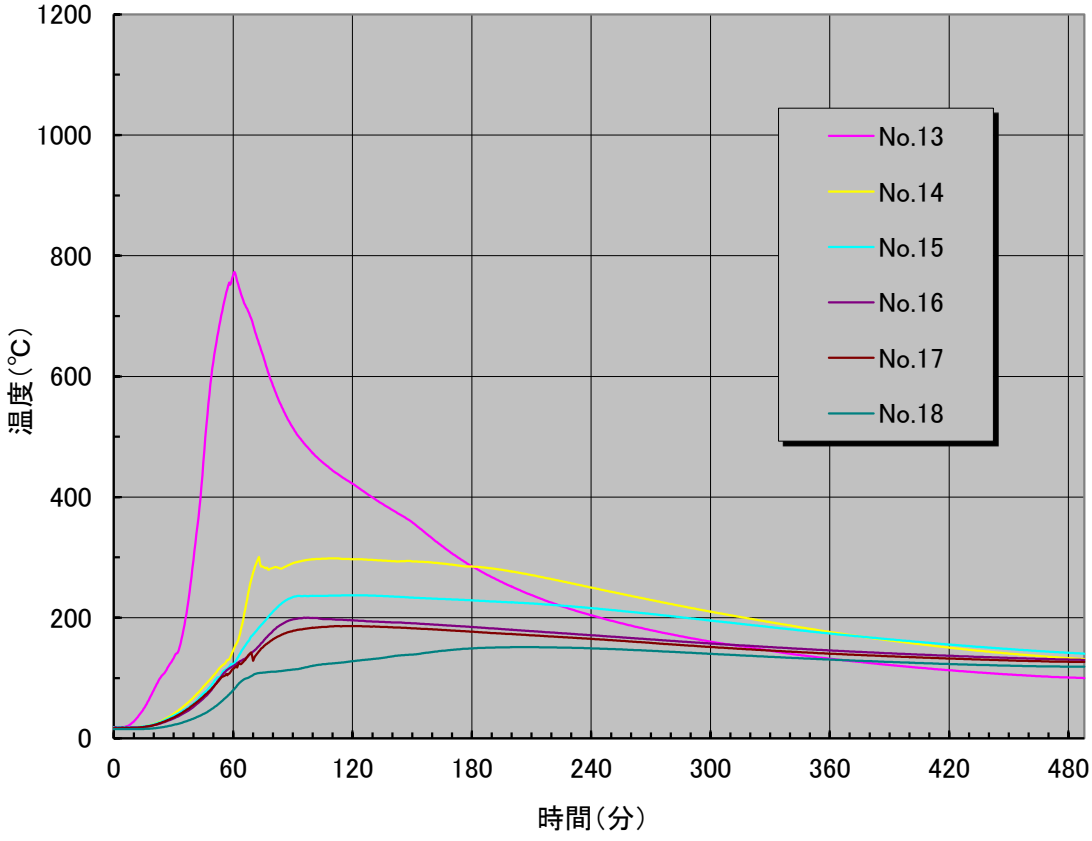


資図 1-47 内部温度(側面深さ 65㎜)

⑫LF-0.4(1) 載荷加熱実験

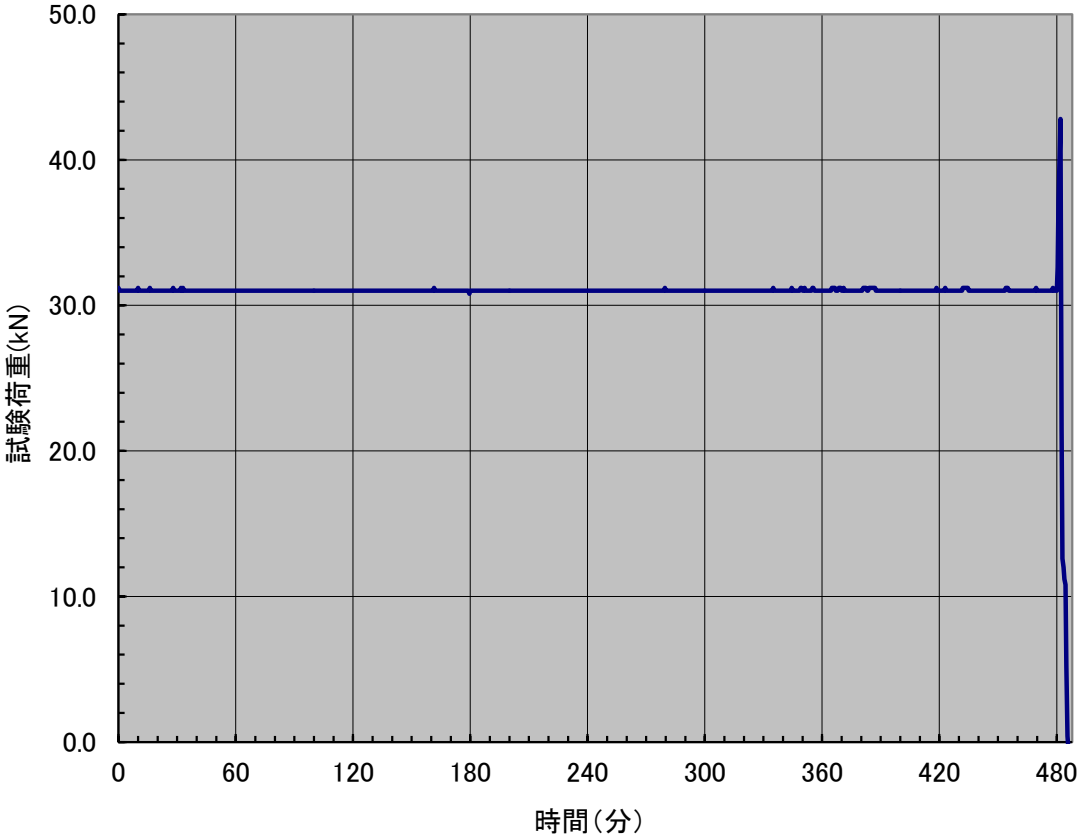


資図 1-48 内部温度(断面中央)

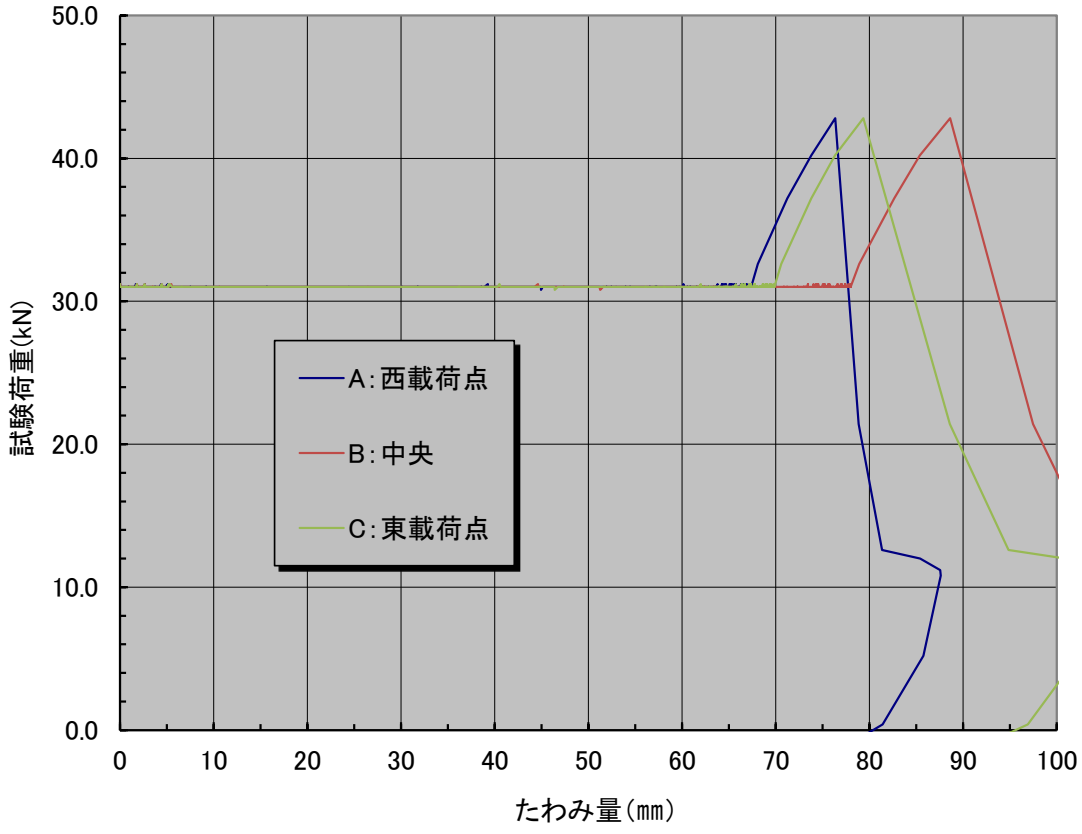


資図 1-49 内部温度(側面深さ 45mm)

⑫LF-0.4(1) 載荷加熱実験

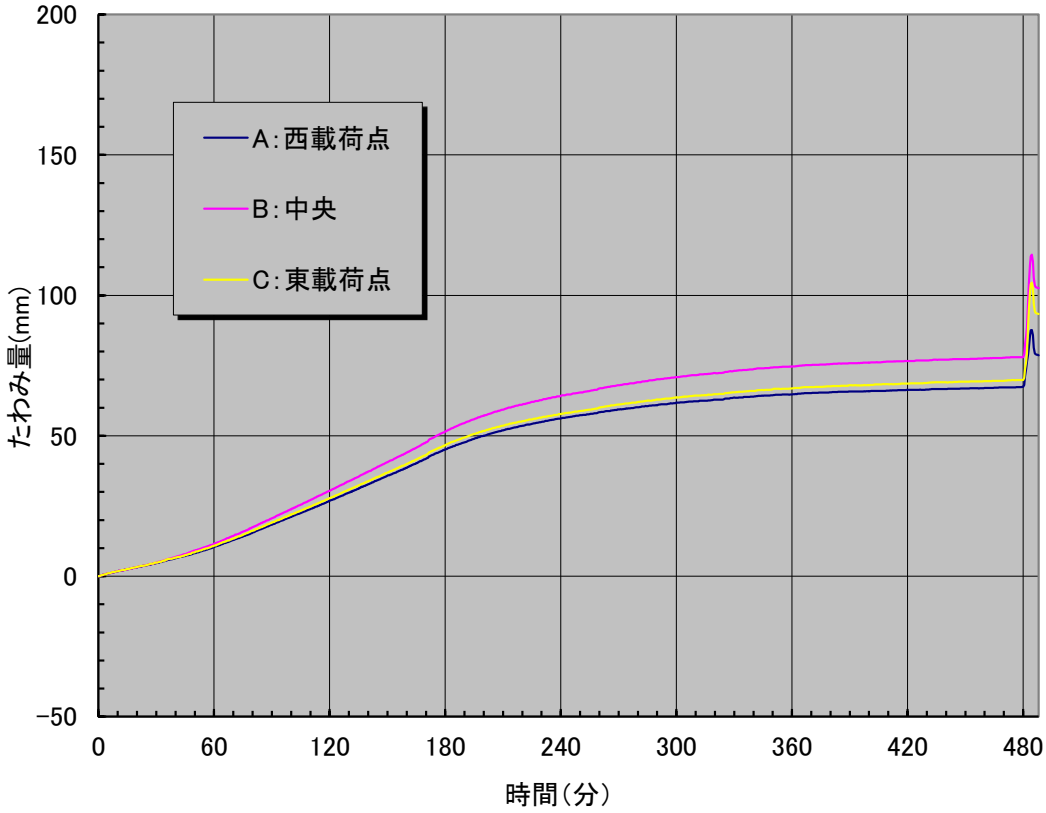


資図 1-50 荷重－時間　関係



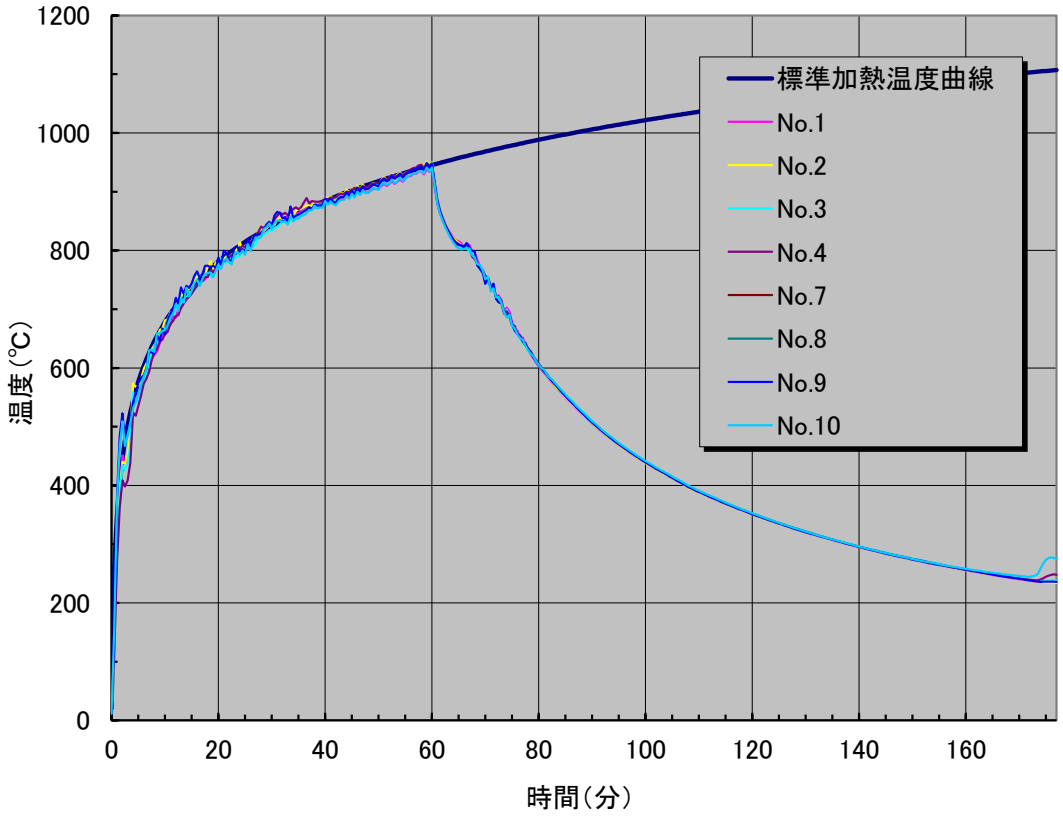
資図 1-51 荷重－たわみ　関係

⑫LF-0.4(1) 載荷加熱実験

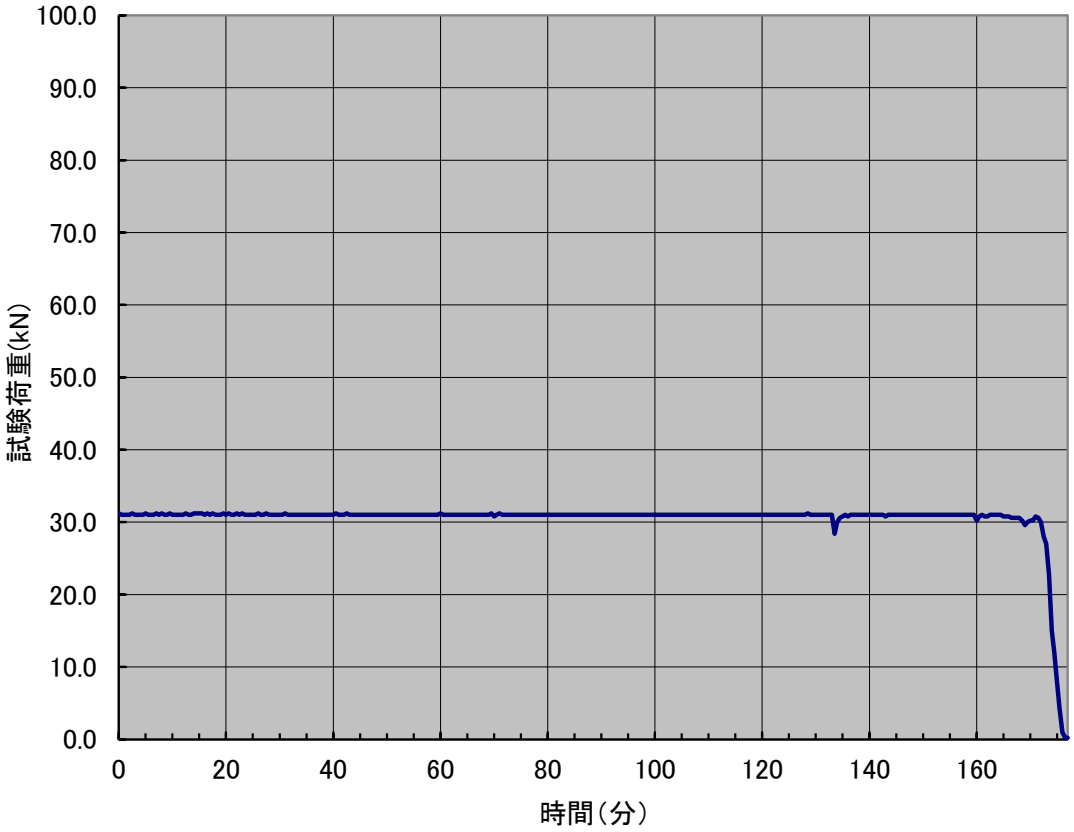


資図 1-52 たわみ－時間　関係

⑬LF-0.4(2) 載荷加熱実験

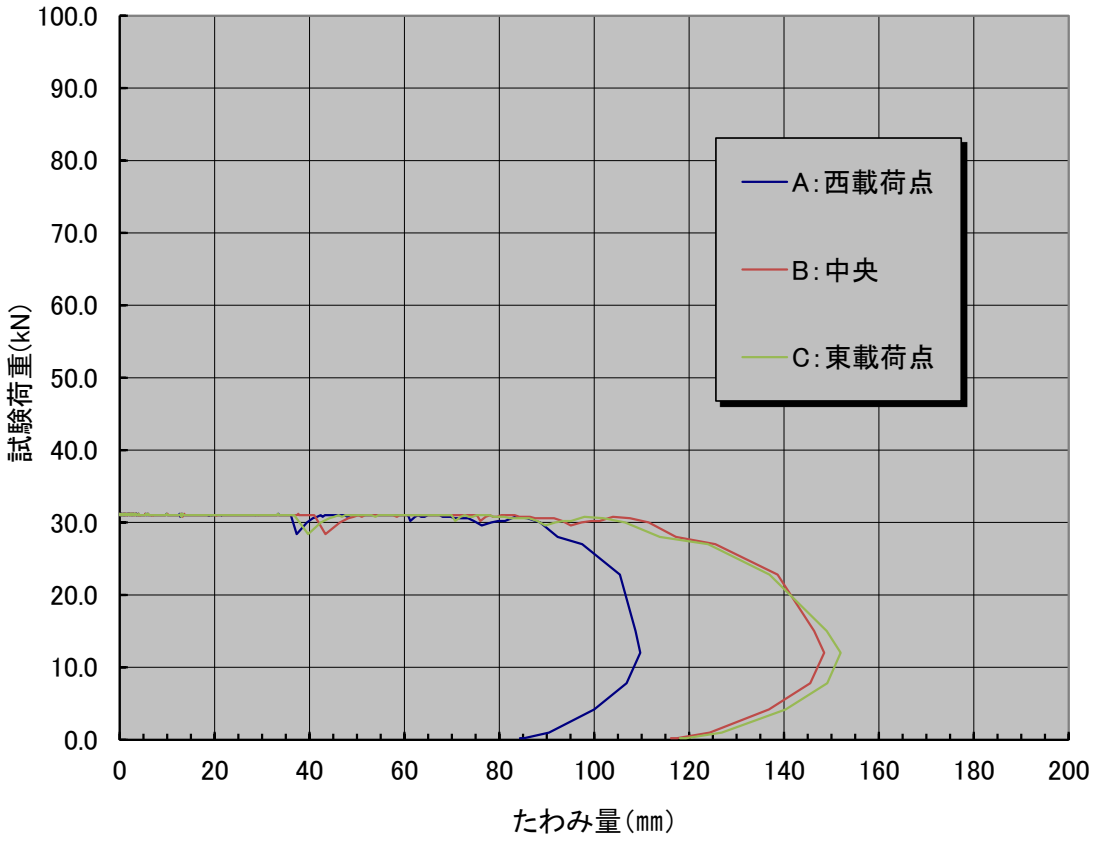


資図 1-53 炉内(加熱)温度

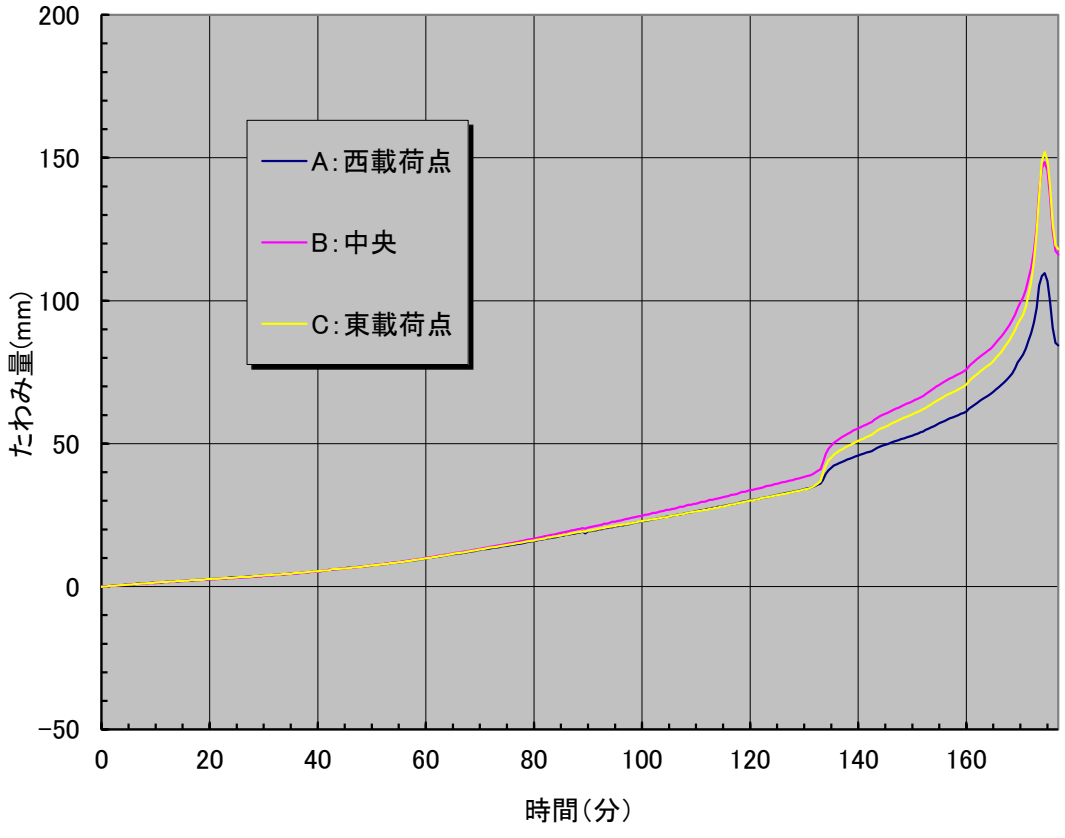


資図 1-54 荷重－時間　関係

⑬LF-0.4(2) 載荷加熱実験

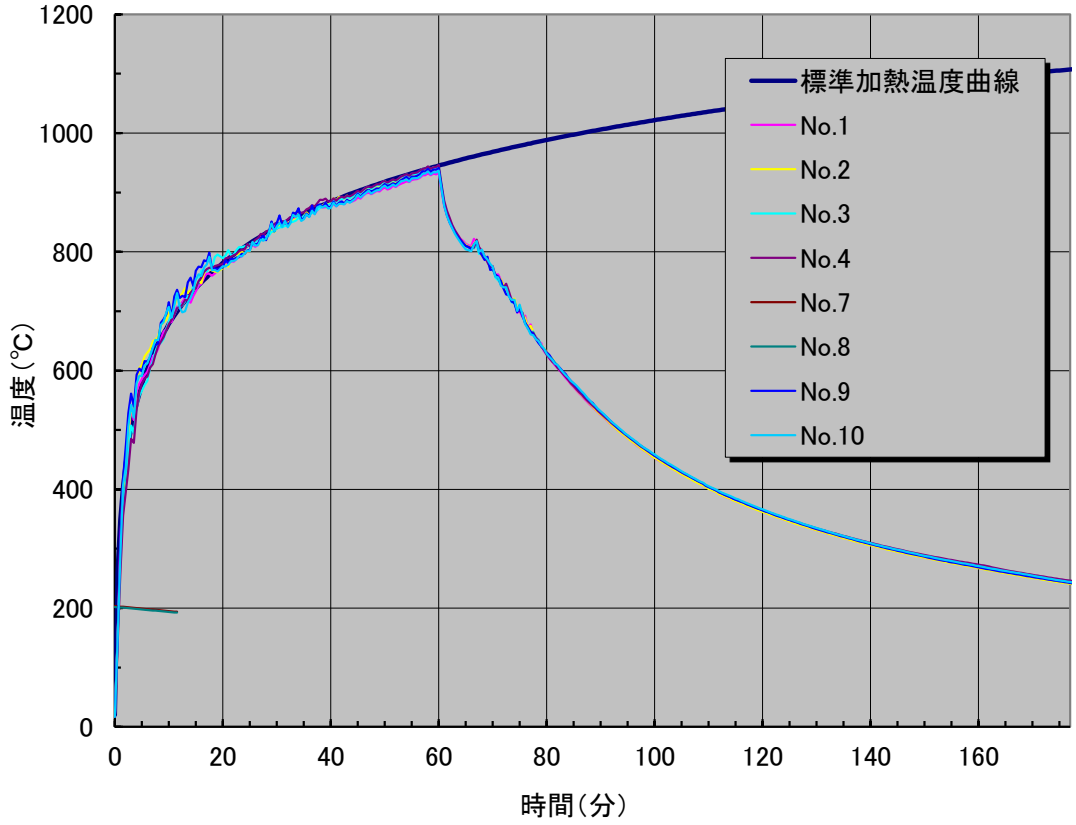


資図 1-55 荷重ーたわみ　関係

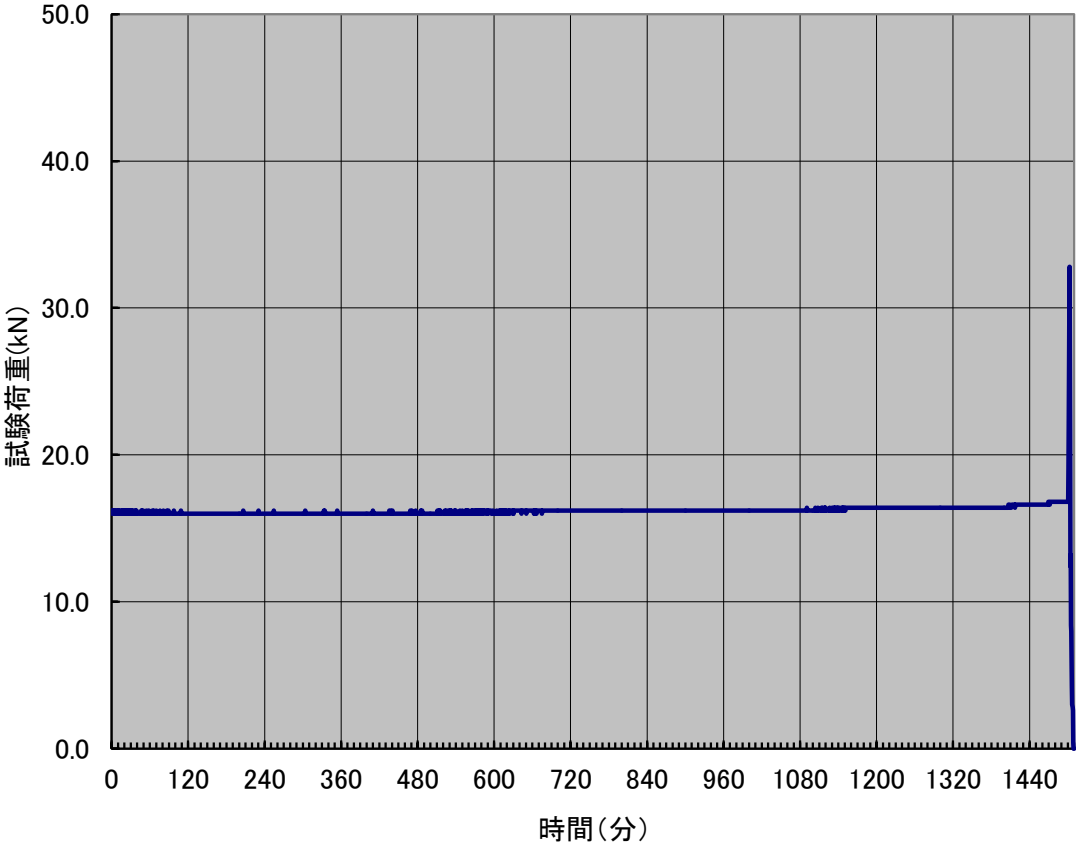


資図 1-56 たわみー時間　関係

⑭LF-0.2 載荷加熱実験

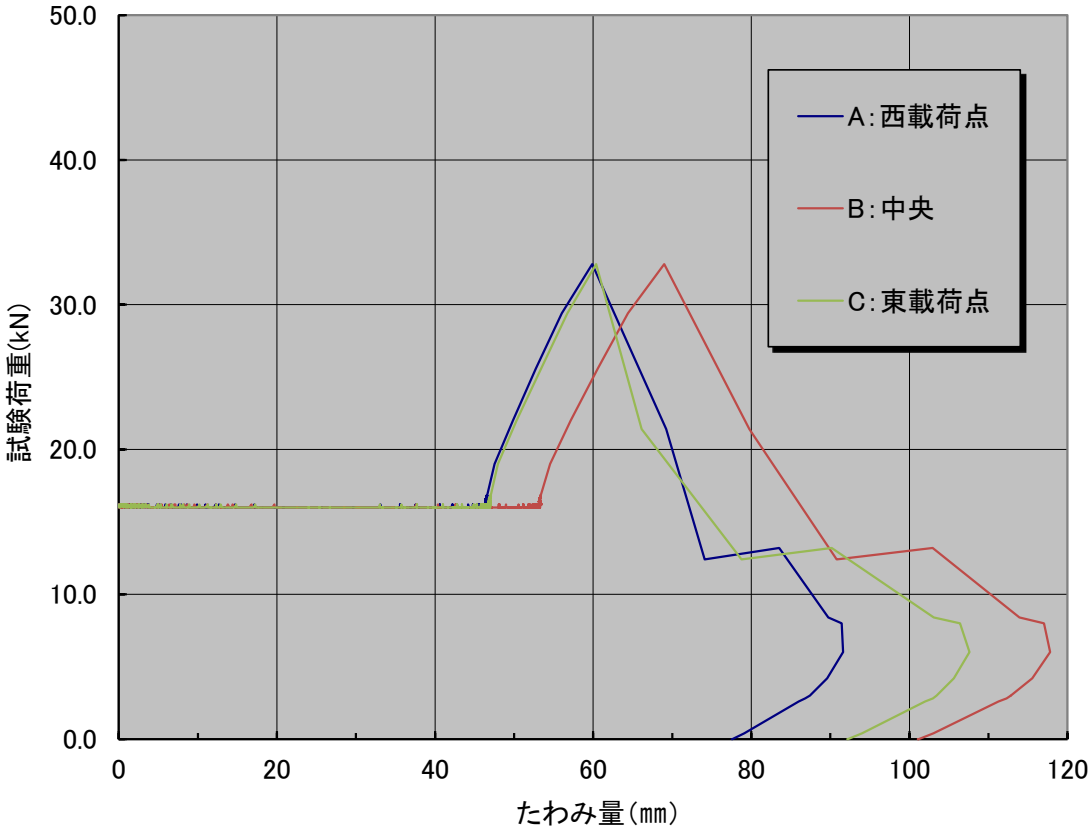


資図 1-57 炉内(加熱)温度

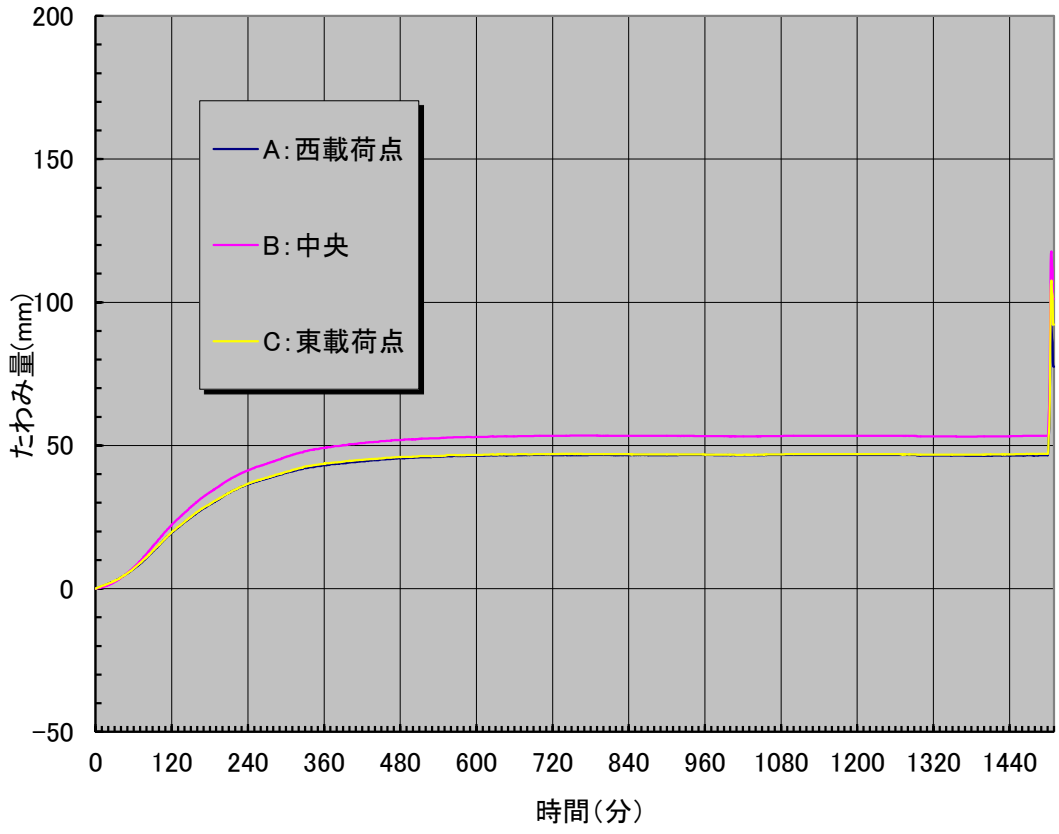


資図 1-58 荷重－時間　関係

⑭LF-0.2 載荷加熱実験



資図 1-59 荷重ーたわみ　関係



資図 1-60 たわみー時間　関係

資料２　試験体の素材データ（密度）

資表 2-1 L-0h 密度データ

	※No.1 常温耐力確認						
圧縮	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
	B	40	225	34	6250	23.2	0.485
	A	2	225	34	6250	25.9	0.542
	B	21	225	34	6250	26.5	0.554
	B	26	225	34	6250	23.5	0.492
	A	5	225	34	6250	25.1	0.525
	B	27	225	34	6250	25.2	0.527
	B	33	225	34	6250	24.4	0.510
	A	7	225	34	6250	23.7	0.496
	B	11	225	34	6250	24.8	0.519
	B	8	225	34	6250	25.6	0.535
	A	20	225	34	6250	25.7	0.538
	B	4	225	34	6250	26.9	0.563
	B最	5	225	34	6250	24.9	0.521
引張	A化	1	225	34	6250	26.1	0.546
			225	34	87500	351.5	**0.525**

資表 2-2 F(0) 密度データ

	※No.2 加熱実験 炭化速度確認(二次接着)													
	No		幅	厚み	長さ	重量	比重	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
圧縮	B	26	135	34	6250	14.1	0.492	B	5	135	34	6250	14.3	0.498
	A	12	135	34	6250	14.8	0.516	A	3	135	34	6250	14.9	0.519
	B	12	135	34	6250	14.7	0.512	B	17	135	34	6250	14.5	0.505
	B	11	135	34	6250	14.7	0.512	B	8	135	34	6250	14.5	0.505
	A	5	135	34	6250	15.3	0.533	A	11	135	34	6250	15.3	0.533
	B	24	135	34	6250	15	0.523	B	6	135	34	6250	15	0.523
	B	20	135	34	6250	15.3	0.533	B	4	135	34	6250	15.2	0.530
	A	1	135	34	6250	16.1	0.561	A	8	135	34	6250	15.6	0.544
	B	1	135	34	6250	15.5	0.540	B	3	135	34	6250	15.4	0.537
	B	18	135	34	6250	16	0.558	B	9	135	34	6250	15.9	0.554
	A外	4	135	34	6250	14.6	0.509	A外	1	135	34	6250	15.5	0.540
	B外	1	135	34	6250	15.8	0.551	B外	4	135	34	6250	15.7	0.547
	B最	4	135	34	6250	14.5	0.505	B最	2	135	34	6250	14.6	0.509
引張	A化	2	135	34	6250	15.6	0.544	A化	4	135	34	6250	15.6	0.544
			135	34	87500	212	**0.528**			135	34	87500	212	**0.528**

資表 2-3 F(0)IA 密度データ

	※No.3 加熱実験 炭化速度確認(二次接着)													
	No		幅	厚み	長さ	重量	比重	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
圧縮	B	28	135	34	6250	14.4	0.502	B	19	135	34	6250	14.5	0.505
	A	7	135	34	6250	15.1	0.526	A	2	135	34	6250	15.1	0.526
	B	7	135	34	6250	14.6	0.509	B	15	135	34	6250	14.6	0.509
	B	23	135	34	6250	14.8	0.516	B	27	135	34	6250	15	0.523
	A	4	135	34	6250	15.2	0.530	A	9	135	34	6250	15.2	0.530
	B	25	135	34	6250	15.1	0.526	B	14	135	34	6250	15.1	0.526
	B	21	135	34	6250	15.2	0.530	B	13	135	34	6250	15.2	0.530
	A	6	135	34	6250	15.5	0.540	A	10	135	34	6250	15.4	0.537
	B	22	135	34	6250	15.4	0.537	B	2	135	34	6250	15.3	0.533
	B	10	135	34	6250	15.6	0.544	B	16	135	34	6250	15.6	0.544
	A外	2	135	34	6250	15.6	0.544	A外	3	135	34	6250	16.2	0.565
	B外	3	135	34	6250	15.3	0.533	B外	2	135	34	6250	15.2	0.530
	B最	3	135	34	6250	14.9	0.519	B最	1	135	34	6250	15	0.523
引張	A化	3	135	34	6250	15.2	0.530	A化	1	135	34	6250	14.6	0.509
			135	34	87500	211.9	**0.528**			135	34	87500	212	**0.528**

資表 2-4 L-1h 密度データ

※No4 耐力確認(加熱1時間)

	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
圧縮	B	13	225	34	6250	23.9	0.500
	A	10	225	34	6250	25.1	0.525
	B	25	225	34	6250	25.4	0.531
	B	29	225	34	6250	25.9	0.542
	A	8	225	34	6250	26	0.544
	B	32	225	34	6250	24.6	0.515
	B	36	225	34	6250	24.8	0.519
	A	14	225	34	6250	23.9	0.500
	B	19	225	34	6250	25.5	0.533
	B	18	225	34	6250	23.6	0.494
	A	17	225	34	6250	25.7	0.538
	B	2	225	34	6250	25.3	0.529
	B最	1	225	34	6250	25.9	0.542
引張	A化	3	225	34	6250	25.9	0.542
			225	34	87500	351.5	**0.525**

資表 2-5 L-4h 密度データ

※No5 耐力確認(加熱1時間+3時間放置)

	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
圧縮	B	34	225	34	6250	24.6	0.515
	A	1	225	34	6250	25.1	0.525
	B	23	225	34	6250	24.1	0.504
	B	30	225	34	6250	24.9	0.521
	A	6	225	34	6250	25.3	0.529
	B	16	225	34	6250	24.2	0.506
	B	38	225	34	6250	25.1	0.525
	A	12	225	34	6250	27.2	0.569
	B	17	225	34	6250	25.9	0.542
	B	7	225	34	6250	25.5	0.533
	A	16	225	34	6250	24.6	0.515
	B	3	225	34	6250	26.2	0.548
	B最	3	225	34	6250	23.5	0.492
引張	A化	5	225	34	6250	25.3	0.529
			225	34	87500	351.5	**0.525**

資表 2-6 LF-1h 密度データ

※No.6 載荷加熱実験(No.4の最大耐力時荷重による)

	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
圧縮	B	37	225	34	6250	23.8	0.498
	A	13	225	34	6250	24.5	0.512
	B	31	225	34	6250	24.8	0.519
	B	28	225	34	6250	25.5	0.533
	A	11	225	34	6250	26	0.544
	B	35	225	34	6250	24.4	0.510
	B	39	225	34	6250	26.4	0.552
	A	15	225	34	6250	25.1	0.525
	B	15	225	34	6250	25.3	0.529
	B	10	225	34	6250	24.2	0.506
	A	19	225	34	6250	26.2	0.548
	B	5	225	34	6250	25.4	0.531
	B最	4	225	34	6250	24.3	0.508
引張	A化	2	225	34	6250	25.7	0.538
			225	34	87500	351.6	**0.525**

資表 2-7 LF-4h 密度データ

※No.7 載荷加熱実験(No.5の最大耐力時荷重による)

	No		幅	厚み	長さ	重量	比重
圧縮	B	9	225	34	6250	24.4	0.510
	A	3	225	34	6250	25.3	0.529
	B	22	225	34	6250	26.6	0.556
	B	24	225	34	6250	25.6	0.535
	A	4	225	34	6250	25	0.523
	B	14	225	34	6250	23.4	0.489
	B	20	225	34	6250	25.4	0.531
	A	9	225	34	6250	26.5	0.554
	B	12	225	34	6250	25	0.523
	B	6	225	34	6250	24.8	0.519
	A	18	225	34	6250	25.6	0.535
	B	1	225	34	6250	25.2	0.527
	B最	2	225	34	6250	24.3	0.508
引張	A化	4	225	34	6250	24.5	0.512
			225	34	87500	351.6	**0.525**

※試験体 L-RT, LF-1.0, LF-0.8, LF-0.6, LF-0.4(1), (2)および LF-0.2 全 7 体分の測定結果
（下表の試験体 No. は製作前の通し番号） *右端欄が密度の値

サンプル材密度（試験体端部より切断）

試験体No.1

1	210	50	420	2.33	0.528
1	210	50	420	2.36	0.535
1	210	50	420	2.32	0.526
1	210	50	420	2.32	0.526
				平均	0.529

試験体No.2

2	210	50	420	2.41	0.546
2	210	50	420	2.52	0.571
2	210	50	420	2.31	0.524
2	210	50	420	2.32	0.526
				平均	0.542

試験体No.3

3	210	50	420	2.31	0.524
3	210	50	420	2.31	0.524
3	210	50	420	2.32	0.526
3	210	50	420	2.35	0.533
				平均	0.527

試験体No.4

4	210	50	420	2.49	0.565
4	210	50	420	2.5	0.567
4	210	50	420	2.23	0.506
4	210	50	420	2.22	0.503
				平均	0.535

※試験体 L-RT, LF-1.0, LF-0.8, LF-0.6, LF-0.4(1), (2)および LF-0.2 全 7 体分の測定結果
（下表の試験体 No. は製作前の無作為の番号）　*右端欄が密度の値

試験体No.6-1

6-1	105	50	420	1.17	0.531
6-1	105	50	420	1.16	0.526
6-1	105	50	420	1.14	0.517
6-1	105	50	420	1.17	0.531
				平均	0.526

試験体No.6-2

6-2	105	50	420	1.14	0.517
6-2	105	50	420	1.18	0.535
6-2	105	50	420	1.17	0.531
6-2	105	50	420	1.16	0.526
				平均	0.527

No.6平均	0.527

試験体No.7-1

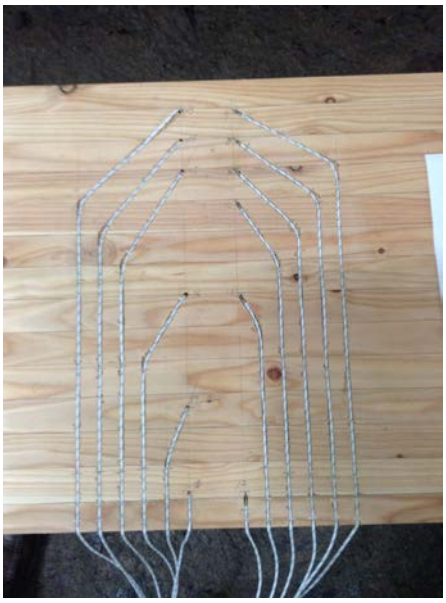
7-1	105	50	420	1.24	0.562
7-1	105	50	420	1.18	0.535
7-1	105	50	420	1.18	0.535
7-1	105	50	420	1.16	0.526
				平均	0.540

試験体No.7-2

7-2	105	50	420	1.16	0.526
7-2	105	50	420	1.16	0.526
7-2	105	50	420	1.16	0.526
7-2	105	50	420	1.17	0.531
				平均	0.527

No.7平均	0.533

資料３　製作および実験時の状況（写真）



No.	写真１
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概　要	内部温度測定用 熱電対位置の確認

No.	写真２
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概　要	内部温度測定用 熱電対位置の確認

No.	写真３
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概　要	内部温度測定用 熱電対位置の確認

No.	写真４
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	２次接着前の 試験体の状態

No.	写真５
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	２次接着前の 試験体の状態

No.	写真６
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	２次接着前の 試験体の状態

No.	写真７
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	接着材の計量 (ﾚｿﾞﾙｼﾉｰﾙ・ﾌｪﾉｰﾙ系)

No.	写真８
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	接着材の塗布状況

No.	写真９
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	接着材の塗布状況

No.	写真１０
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	接着材の塗布状況

No.	写真１１
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	手作業による 二次接着 (仮押さえ)

No.	写真１２
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	手作業による 二次接着完了 (仮押さえ)

No.	写真１３
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	圧縮プレス機による 二次接着 (セット状況)

No.	写真１４
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	圧縮プレス機による 二次接着 (セット状況)

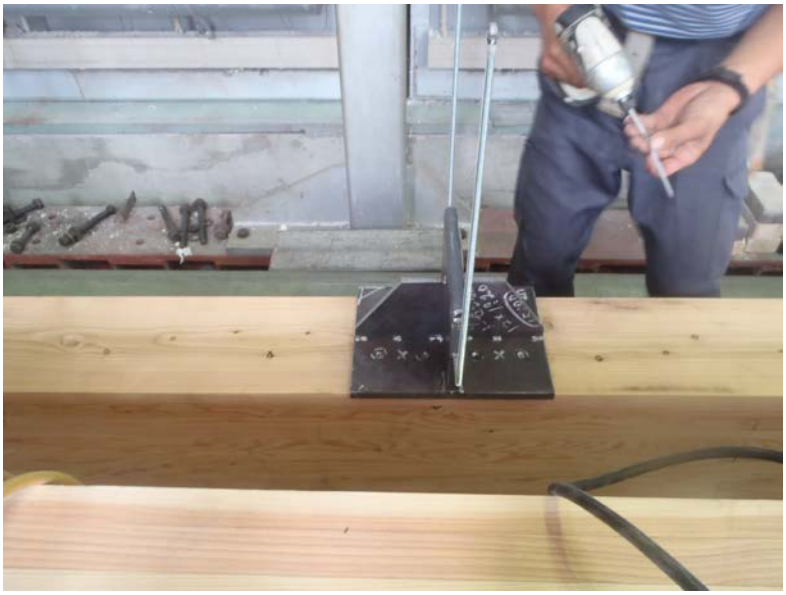
No.	写真１５
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	圧縮プレス機による 二次接着 (本押さえ)

No.	写真１６
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	圧縮プレス機による 二次接着 (本押さえ)

No.	写真１７
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 7 月 29 日
概 要	完成した試験体の 養生状態

No.	写真１８
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 20 日
概 要	集成材（搬入） 耐力実験用

No.	写真１９
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 20 日
概 要	集成材（搬入） 加熱実験用 (分割試験体)



No.	写真２０
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	載荷点治具及び 変位測定用アンテナ 取り付け

No.	写真２１
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	載荷点治具及び 変位測定用アンテナ 取り付け

No.	写真２２
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	試験体中央部 変位測定用アンテナ 取り付け

No.	写真２３
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	試験体上部被覆用 ケイカル板取り付け

No.	写真２４
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	試験体上部被覆用 ケイカル板取り付け

No.	写真２５
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	加熱実験用 分割試験体

No.	写真２６
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	加熱実験用 分割試験体

No.	写真２７
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	加熱実験用 分割試験体 (分割小口面の断熱)

No.	写真２８
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	加熱実験用 分割試験体 (上部断熱被覆)

No.	写真２９
実験名	－
試験体	－
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	加熱実験用 分割試験体 (吊り治具取り付け)

No.	写真３０
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	完成試験体

No.	写真３１
実験名	加熱実験 (炭化速度確認)
試験体	F(0)及び F(0)IA
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	完成試験体

No.	写真３２
実験名	加熱後載荷実験 及び載荷加熱実験
試験体	L-1h,4h LF-1h,4h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 8 月 21 日 ～8 月 30 日
概 要	完成試験体

No.	写真３３
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 4 日
概 要	実験前の試験体状況 (全体)

No.	写真３４
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 4 日
概 要	実験前の試験体状況 (ひずみゲージ位置)

No.	写真３５
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 4 日
概 要	実験前の試験体状況 (載荷・変位測定位置)

No.	写真３６
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概　要	実験前の状況 (試験体設置)

No.	写真３７
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概　要	実験後の試験体状況 (試験体中央付近)

No.	写真３８
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概　要	実験後の試験体状況 (試験体中央付近)

No.	写真３９
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概 要	実験後の試験体状況 (試験体中央付近)

No.	写真４０
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真４１
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真４２
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概 要	実験後の試験体状況 (試験体最下層)

No.	写真４３
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概 要	実験後の試験体状況 (中央部側面)

No.	写真４４
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 5 日
概 要	実験後の試験体状況 (中央部側面)

No.	写真４５
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 25 日
概 要	実験後の試験体状況 (中央断面切断)

No.	写真４６
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 25 日
概 要	実験後の試験体状況 (破壊面のラミナ 側面から)

No.	写真４７
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 25 日
概 要	実験後の試験体状況 (破壊面の 最下層ラミナ)

No.	写真４８
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 25 日
概 要	実験後の試験体状況 (中央断面切断)

No.	写真４９
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-0h
加熱面	－
年月日	平成 25 年 9 月 25 日
概 要	実験後の試験体状況 (切断面側面から)

No.	写真５０
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)(分割 5 体共通)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 9 日
概 要	実験前の試験体状況

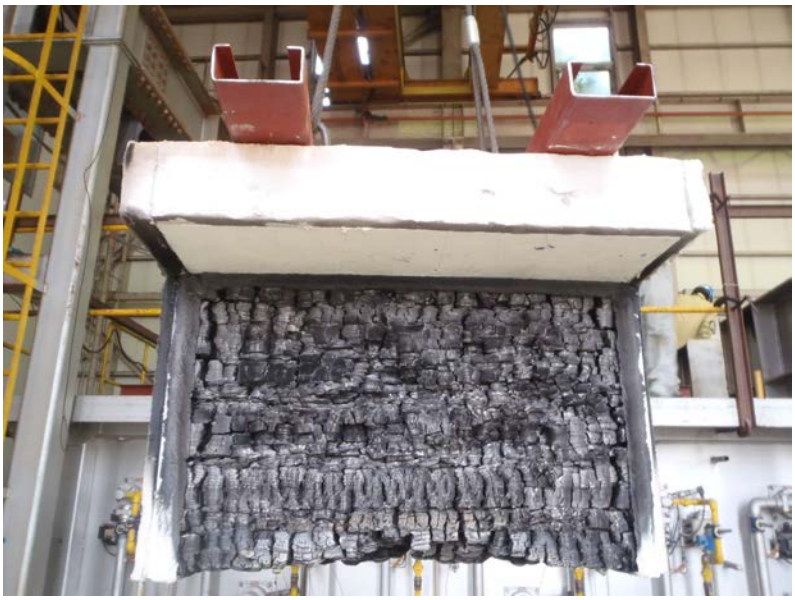
No.	写真５１
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)(分割 5 体共通)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 9 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真５２
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概 要	加熱 30 分時の 試験体の状況

No.	写真５３
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	加熱 60 分時の 試験体の状況

No.	写真５４
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体状況 (1H 試験体)

No.	写真５５
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (1H 試験体)



No.	写真５６
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体状況 (2H 試験体)

No.	写真５７
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (2H 試験体)

No.	写真５８
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体状況 (3H 試験体)

No.	写真５９
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (3H 試験体)

No.	写真６０
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体状況 (4H 試験体)

No.	写真６１
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (4H 試験体)

No.	写真６２
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体状況 (8H 試験体)

No.	写真６３
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 10 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (8H 試験体)

No.	写真６４
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 11 日
概　要	試験体断面炭化層 除去後の状況 (西側断面)

No.	写真６５
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 11 日
概 要	試験体断面炭化層除去後の状況（東側断面）

No.	写真６６
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA(分割５体共通)（放冷時空気量増加）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 11 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真６７
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA(分割５体共通)（放冷時空気量増加）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 11 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真６８
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概 要	加熱 30 分時の 試験体の状況

No.	写真６９
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概 要	加熱 60 分時の 試験体の状況

No.	写真７０
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概 要	加熱終了後の 放冷時における 試験体の状況

No.	写真７１
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体状況 (1H 試験体)

No.	写真７２
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (1H 試験体)

No.	写真７３
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体状況 (2H 試験体)

No.	写真７４
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (2H 試験体)

No.	写真７５
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体状況 (3H 試験体)

No.	写真７６
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (3H 試験体)

No.	写真７７
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体状況 (4H 試験体)

No.	写真７８
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (4H 試験体)

No.	写真７９
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体状況 (8H 試験体)

No.	写真８０
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 13 日
概　要	実験後の試験体 切断時の状況 (8H 試験体)

No.	写真８１
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 14 日
概　要	試験体断面炭化層 除去後の状況 (西側断面)

No.	写真８２
実験名	炭化速度確認実験
試験体	F(0)IA (放冷時空気量増加)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 14 日
概　要	試験体断面炭化層 除去後の状況 (東側断面)

No.	写真８３
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 18 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真８４
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 18 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真８５
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概　要	加熱 30 分時の 試験体の状況

No.	写真８６
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概 要	加熱 60 分時の 試験体の状況

No.	写真８７
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真８８
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真８９
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真９０
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真９１
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概　要	実験後の試験体状況 (上部ケイカル除去)

No.	写真９２
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (破壊箇所)

No.	写真９３
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-1h(火災時耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 19 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (等曲げ区間外側)

No.	写真９４
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 20 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真９５
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 20 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真９６
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概 要	加熱 30 分時の 試験体の状況

No.	写真９７
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概 要	加熱 60 分時の 試験体の状況

No.	写真９８
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真９９
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１００
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１０１
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体状況 (上部ケイカル除去)

No.	写真１０２
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (破壊箇所)

No.	写真１０３
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (破壊箇所)

No.	写真１０４
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (破壊箇所)

No.	写真１０５
実験名	耐力確認実験 (火災時・火災終了後)
試験体	L-4h(火災終了後耐力)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 21 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (等曲げ区間外側)

No.	写真１０６
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 26 日
概　要	実験前の試験体状況

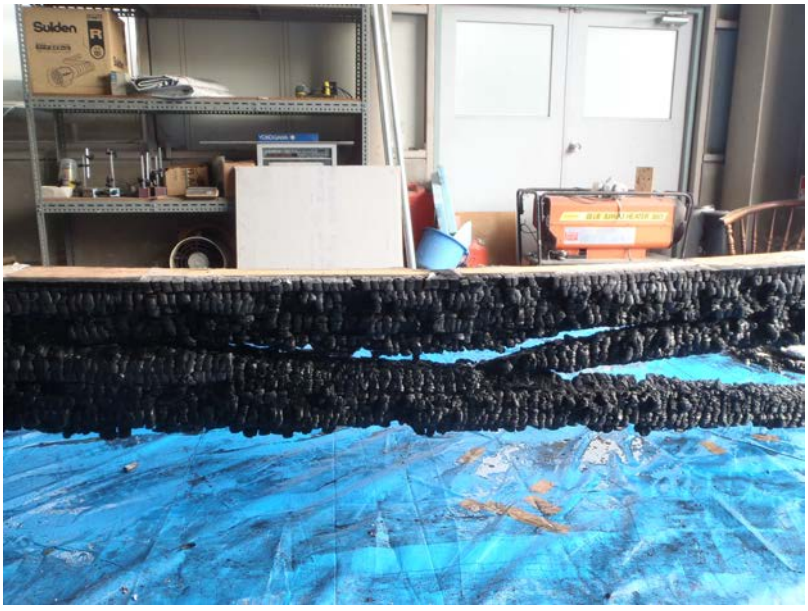
No.	写真１０７
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-1h （火災時耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 26 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１０８
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-1h （火災時耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	加熱 30 分時の 試験体の状況

No.	写真１０９
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-1h （火災時耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	加熱 60 分時の 試験体の状況

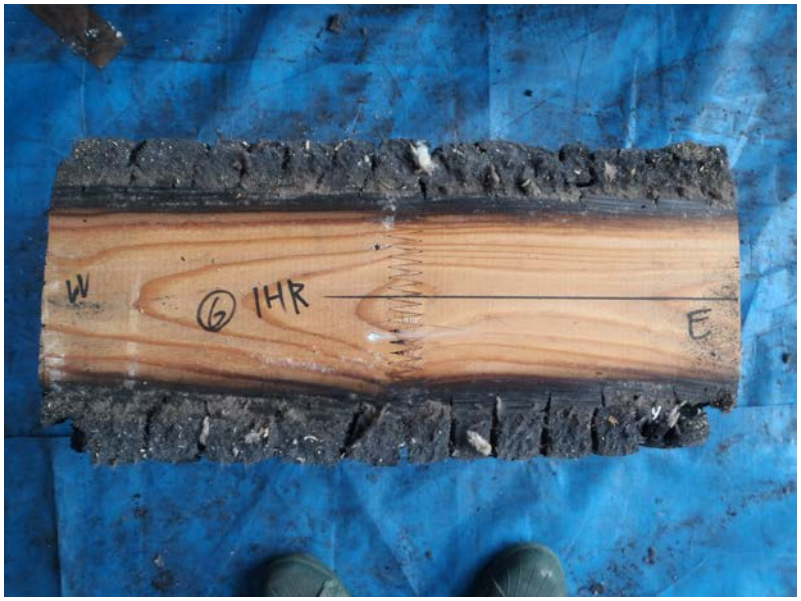
No.	写真１１０
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１１１
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体状況



No.	写真１１２
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１１３
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体状況



No.	写真１１４
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体状況 (上部ケイカル除去)

No.	写真１１５
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (破壊箇所)

No.	写真１１６
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-1h (火災時耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 9 月 30 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況 (等曲げ区間外側)

No.	写真１１７
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-4h (火災終了後耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 1 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１１８
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-4h (火災終了後耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 1 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１１９
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-4h （火災終了後耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 3 日
概 要	加熱 30 分時の 試験体の状況

No.	写真１２０
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-4h （火災終了後耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 3 日
概 要	加熱 60 分時の 試験体の状況

No.	写真１２１
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-4h （火災終了後耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 3 日
概 要	実験後の試験体状況

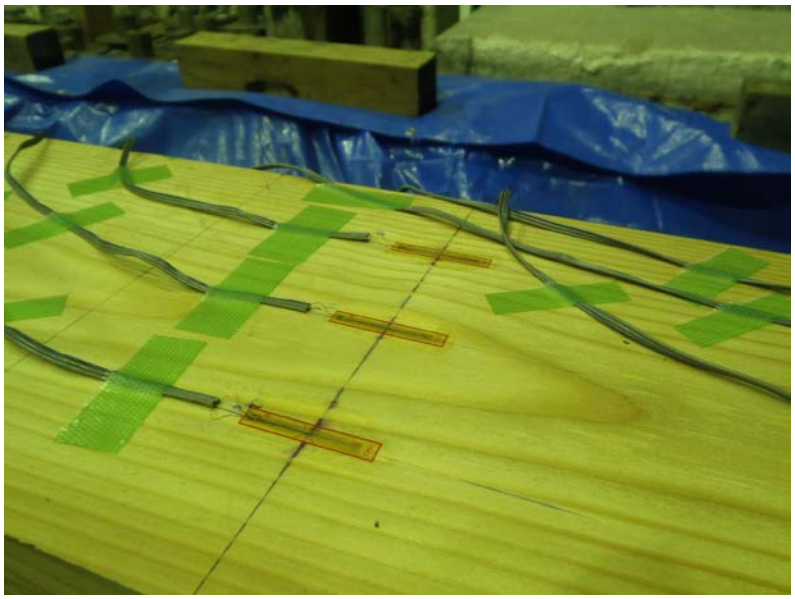
No.	写真１２２
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-4h (火災終了後耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 3 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１２３
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	上面を除く３面
加熱面	平成 25 年 10 月 3 日
年月日	LF-4h (火災終了後耐力による)
概 要	実験後の試験体状況 (上部ケイカル除去)

No.	写真１２４
実験名	載荷加熱実験 (火災時・火災終了後)
試験体	LF-4h (火災終了後耐力による)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 3 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１２５
実験名	載荷加熱実験 （火災時・火災終了後）
試験体	LF-4h （火災終了後耐力による）
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 25 年 10 月 3 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況 （接着層のずれ）

No.	写真１２６
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-RT
加熱面	－
年月日	平成 26 年 10 月 31 日
概　要	実験前の試験体状況 (全体)



No.	写真１２７
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-RT
加熱面	－
年月日	平成 26 年 10 月 31 日
概　要	実験前の試験体状況 (ひずみゲージ位置)

No.	写真１２８
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-RT
加熱面	－
年月日	平成 26 年 11 月 1 日
概　要	実験前の状況 (試験体設置)

No.	写真１２９
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-RT
加熱面	－
年月日	平成 26 年 11 月 1 日
概 要	実験後の試験体状況 (試験体中央付近)

No.	写真１３０
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-RT
加熱面	－
年月日	平成 26 年 11 月 1 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１３１
実験名	常温耐力確認実験
試験体	L-RT
加熱面	－
年月日	平成 26 年 11 月 1 日
概 要	実験後の試験体状況 (試験体最下層)

No.	写真１３２
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-1.0
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 11 月 18 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１３３
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-1.0
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 11 月 18 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１３４
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-1.0
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 11 月 19 日
概　要	実験終了直後の 試験体の状況

No.	写真１３５
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-1.0
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 11 月 19 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１３６
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-1.0
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 11 月 19 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１３７
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-1.0
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 11 月 19 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１３８
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.6
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 12 月 21 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１３９
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.6
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 12 月 21 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１４０
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.6
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 12 月 22 日
概　要	実験終了直後の 試験体の状況

No.	写真１４１
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.6
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 12 月 22 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１４２
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.6
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 12 月 22 日
概　要	実験後の試験体状況

No.	写真１４３
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.6
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 26 年 12 月 22 日
概　要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１４４
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 9 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１４５
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 9 日
概　要	実験前の試験体状況

No.	写真１４６
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概　要	実験終了直後の 試験体の状況

No.	写真１４７
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１４８
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１４９
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１５０
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１５１
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１５２
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.8
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 10 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１５３
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(1)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 11 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真１５４
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(1)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 11 日
概 要	実験前の状況

No.	写真１５５
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(1)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 12 日
概 要	実験終了後の 試験体の状況

No.	写真１５６
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(1)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 12 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１５７
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(1)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 12 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１５８
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(1)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 12 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１５９
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(2)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 23 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真１６０
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(2)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 24 日
概 要	実験前の状況

No.	写真１６１
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(2)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 24 日
概 要	実験終了直後の 試験体の状況

No.	写真１６２
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(2)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 24 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１６３
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(2)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 24 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１６４
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.4(2)
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 24 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１６５
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.2
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 25 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真１６６
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.2
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 25 日
概 要	実験前の試験体状況

No.	写真１６７
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.2
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 26 日
概 要	実験終了直後の 試験体の状況

No.	写真１６８
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.2
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 26 日
概 要	実験後の試験体状況

No.	写真１６９
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.2
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 26 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

No.	写真１７０
実験名	載荷加熱実験
試験体	LF-0.2
加熱面	上面を除く３面
年月日	平成 27 年 3 月 26 日
概 要	実験後の試験体 切断後の状況

資料４　実験後の試験体炭化深さ計測結果

資表 4-1 F(0)梁幅方向炭化深さ測定結果

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	加熱開始からの時間				
			1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
1	上面部	0	34.8	39.3	36.5	37.8	39.5
	中央部	15	34.9	39.0	36.5	38.8	39.7
2	上面部	30	35.5	38.9	36.9	39.6	40.8
	中央部	45	36.4	39.6	37.9	40.1	41.2
3	上面部	60	38.0	40.2	38.6	40.8	41.9
	中央部	75	38.4	41.6	39.5	40.3	43.2
4	上面部	90	37.6	42.1	40.1	40.6	42.1
	中央部	105	37.5	42.0	41.4	41.1	41.8
5	上面部	120	37.1	40.9	41.4	42.1	42.3
	中央部	135	38.2	40.9	41.2	43.3	42.4
6	上面部	150	38.0	40.8	40.4	42.3	41.0
	中央部	165	37.9	40.8	41.6	42.1	40.8
7	上面部	180	38.1	41.0	39.6	41.7	41.0
	中央部	195	37.9	42.1	40.0	42.3	42.0
8	上面部	210	36.8	41.4	40.0	41.3	41.7
	中央部	225	36.5	41.0	39.3	40.9	41.4
9	上面部	240	35.3	40.1	39.3	40.2	40.5
	中央部	255	34.3	39.8	38.1	40.5	39.8
10	上面部	270	34.4	38.6	36.3	39.8	39.7
	中央部	285	34.7	39.5	37.6	39.8	39.8
11	上面部	300	36.3	39.5	39.3	39.8	41.4
	中央部	315	36.3	40.0	41.1	41.5	41.0
12	上面部	330	(36.1)	(40.9)	(42.6)	(43.3)	(42.5)
	中央部	345	(36.6)	(42.4)	(50.0)	(47.2)	(45.8)
13	上面部	360	(38.9)	(55.5)	(63.1)	(59.9)	(58.6)
	中央部	375	(49.2)	(84.7)	(105.0)	(105.0)	(90.7)
平均炭化深さ			36.6	40.4	39.2	40.8	41.1

※平均炭化深さは、表の括弧書きの数値を除いた数値を用いて算定

資表 4-2 F(0)梁成方向炭化深さ測定結果

幅方向中心からの距離(mm)		加熱開始からの時間				
		1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
中心 (0)		41.0	44.5	47.0	46.5	46.0
15	左	38.5	46.0	48.5	47.0	46.0
	右	42.0	45.5	48.5	47.0	47.0
30	左	38.0	49.0	50.5	50.0	50.0
	右	43.5	47.0	49.5	49.0	49.0
45	左	40.5	58.0	58.0	55.0	57.5
	右	46.5	53.0	54.0	57.0	53.5
50	左	42.0	62.5	64.5	60.0	60.5
	右	48.0	55.5	58.5	61.0	61.0
55	左	44.0	68.5	77.5	65.0	63.5
	右	51.0	57.5	63.5	69.0	66.0
60	左	(46.0)	(64.0)	(70.0)	(80.0)	(79.0)
	右	(55.5)	－	－	－	(80.0)
65	左	(51.5)	－	－	－	－
	右	(60.5)	－	－	－	－
平均炭化深さ		43.2	53.4	56.4	55.1	54.5

※平均炭化深さは、表の括弧書きの数値を除いた数値を用いて算定

資表 4-3 F(0)IA 梁幅方向炭化深さ測定結果

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離(mm)	加熱開始からの時間				
			1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
1	上面部	0	31.8	36.1	33.8	32.8	33.5
	中央部	15	33.3	36.0	34.2	34.1	35.1
2	上面部	30	34.6	36.0	35.3	35.2	35.2
	中央部	45	36.3	36.6	37.0	36.5	37.6
3	上面部	60	38.3	36.6	38.4	37.8	38.6
	中央部	75	39.0	36.6	40.1	38.8	39.3
4	上面部	90	38.7	36.9	40.9	39.3	39.7
	中央部	105	38.7	37.0	40.2	40.5	39.0
5	上面部	120	38.6	37.0	40.1	40.4	37.9
	中央部	135	39.0	37.6	40.4	40.7	39.0
6	上面部	150	39.1	37.5	39.4	40.8	39.0
	中央部	165	38.5	37.7	38.2	43.1	38.1
7	上面部	180	38.8	38.1	39.9	45.3	38.2
	中央部	195	39.8	39.0	39.5	47.0	37.2
8	上面部	210	39.6	38.4	40.9	47.9	38.4
	中央部	225	39.8	38.3	41.1	46.0	40.0
9	上面部	240	38.0	38.5	41.3	45.0	40.0
	中央部	255	38.5	38.9	41.0	45.1	41.3
10	上面部	270	36.8	39.3	39.0	44.0	40.1
	中央部	285	36.5	41.0	38.5	45.2	40.4
11	上面部	300	37.6	38.8	40.4	46.3	41.7
	中央部	315	37.1	40.2	43.5	49.3	45.5
12	上面部	330	(37.6)	(41.6)	(46.3)	(52.4)	(47.4)
	中央部	345	(38.4)	(48.2)	(55.4)	(59.2)	(54.8)
13	上面部	360	(41.4)	(63.3)	(69.7)	(68.7)	(64.3)
	中央部	375	(105.0)	(105.0)	(105.0)	(135.1)	(105.0)
平均炭化深さ			37.7	37.8	39.2	41.9	38.9

※平均炭化深さは、表の括弧書きの数値を除いた数値を用いて算定

資表 4-4 F(0)IA 梁成方向炭化深さ測定結果

幅方向中心からの距離(mm)		加熱開始からの時間				
		1時間	2時間	3時間	4時間	8時間
中心 (0)		36.5	41.0	47.0	44.0	45.0
15	左	36.5	43.0	53.0	48.5	46.0
	右	36.0	41.5	44.5	42.5	48.5
30	左	36.0	43.0	47.0	44.0	48.0
	右	36.5	45.5	51.0	43.0	60.0
45	左	38.0	55.5	(72.0)	(96.5)	55.0
	右	38.5	57.5	60.5	56.0	(81.0)
50	左	39.5	58.5	(83.5)	(104.5)	59.0
	右	39.5	63.5	69.0	64.0	(92.5)
55	左	42.0	64.0	(91.0)	(119.0)	67.5
	右	42.0	69.0	(76.0)	77.5	(98.5)
60	左	(47.5)	(72.0)	(103.0)	(152.5)	-
	右	(46.0)	(81.0)	(85.0)	(91.0)	(106.5)
65	左	-	-	-	-	-
	右	(58.0)	-	-	-	-
平均炭化深さ		38.3	52.9	53.1	52.4	53.6

※平均炭化深さは、表の括弧書きの数値を除いた数値を用いて算定

資表 4-5 載荷加熱実験 梁幅方向炭化深さ測定結果

ラミナ層	測定位置	梁上端からの距離	試験体				
			LF-0.2	LF-0.4(1)	LF-0.4(2)	LF-0.6	LF-0.8
1	上面部	0	24.2	17.1	17.1	17.8	25.6
	中央部	15	28.4	22.1	21.2	20.5	27.1
2	上面部	30	34.2	27.4	27.6	27.4	32.9
	中央部	45	40.7	35.8	34.0	35.4	38.5
3	上面部	60	44.5	41.4	37.9	39.9	40.9
	中央部	75	45.2	44.5	40.6	39.0	43.9
4	上面部	90	45.3	45.5	42.0	41.4	48.5
	中央部	105	44.4	44.0	41.8	39.9	49.1
5	上面部	120	44.4	42.7	40.4	40.3	47.0
	中央部	135	44.8	41.0	41.7	41.8	48.7
6	上面部	150	46.3	42.9	43.0	41.9	47.7
	中央部	165	47.0	44.8	43.8	42.0	52.2
7	上面部	180	47.7	45.2	45.0	42.1	52.5
	中央部	195	48.0	44.3	44.0	41.7	50.5
8	上面部	210	47.7	43.9	44.1	42.1	49.7
	中央部	225	47.5	44.1	44.4	42.0	50.4
9	上面部	240	48.0	44.3	45.3	42.8	53.2
	中央部	255	47.7	43.9	46.6	42.8	55.7
10	上面部	270	48.4	46.9	48.0	41.8	53.0
	中央部	285	49.9	46.1	50.0	41.5	51.0
11	上面部	300	51.9	46.0	49.5	43.0	49.9
	中央部	315	65.0	46.5	53.7	43.8	49.4
12	上面部	330	(80.2)	(46.7)	(55.3)	(44.3)	(57.9)
	中央部	345	(96.0)	(53.0)	(59.1)	(47.8)	(68.8)
13	上面部	360	(105.0)	(65.8)	(68.7)	(57.1)	(105.0)
	中央部	375	(105.0)	(105.0)	(105.0)	(105.0)	(105.0)
平均炭化深さ			45.1	40.9	41.0	38.7	46.2

※平均炭化深さは、表の括弧書きの数値を除いた数値を用いて算定

資表 4-6 載荷加熱実験 梁成方向炭化深さ測定結果

幅方向中心からの距離(mm)		試験体				
		LF-0.2	LF-0.4(1)	LF-0.4(2)	LF-0.6	LF-0.8
中心 (0)		80.5	50.0	46.3	49.0	59.0
15	左	77.0	48.0	48.8	48.5	55.0
	右	83.0	50.5	46.5	47.0	63.0
30	左	84.5	52.5	(82.3)	54.0	60.0
	右	88.0	59.0	48.5	49.5	77.0
45	左	－	64.0	(94.5)	63.0	72.0
	右	88.5	66.0	60.3	55.5	(90.0)
50	左	－	70.5	－	62.0	78.0
	右	88.0	70.5	65.3	60.5	－
55	左	－	(77.5)	－	68.5	(86.0)
	右	－	(82.5)	(80.0)	65.0	－
60	左	－	－	－	(80.5)	－
	右	－	－	－	(83.0)	－
65	左	－	－	－	－	－
	右	－	－	－	－	－
平均炭化深さ		84.2	59.0	52.6	56.6	66.3

※平均炭化深さは、表の括弧書きの数値を除いた数値を用いて算定

資料５　実験後の残存断面より算定した断面性能計算結果

資表 5-1 F(0) 1時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	1時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	36.5		第1層目	136.9	15	2053	7.5	15398	179.4	66124194		
15	1中	36.6		第2層目	137.7	15	2065	22.5	46469	164.4	55866503		
30	2上	35.7		第3層目	138.3	15	2075	37.5	77819	149.4	46365642		
45	2中	35.9		第4層目	137.8	15	2066	52.5	108486	134.4	37372110		
60	3上	36.3		第5層目	136.9	15	2054	67.5	138626	119.4	29323541		
75	3中	36.8		第6層目	137.9	15	2068	82.5	170596	104.4	22582367		
90	4上	35.4		第7層目	139.5	15	2092	97.5	204004	89.4	16766921		
105	4中	35.2		第8層目	139.8	15	2097	112.5	235870	74.4	11648951		
120	5上	35.1		第9層目	137.4	15	2061	127.5	262835	59.4	7315381		
135	5中	37.5		第10層目	135.8	15	2037	142.5	290305	44.4	4056659		
150	6上	36.7		第11層目	136.4	15	2047	157.5	322328	29.4	1808875		
165	6中	36.9		第12層目	135.1	15	2026	172.5	349545	14.4	458939		
180	7上	38.0		第13層目	133.6	15	2003	187.5	375638	-0.6	38254		
195	7中	38.4		第14層目	133.8	15	2008	202.5	406524	-15.6	525377		
210	8上	37.8		第15層目	136.1	15	2042	217.5	444173	-30.6	1948874		
225	8中	36.1		第16層目	139.6	15	2094	232.5	486820	-45.6	4390640		
240	9上	34.3		第17層目	141.6	15	2124	247.5	525727	-60.6	7837117		
255	9中	34.1		第18層目	141.5	15	2122	262.5	557058	-75.6	12164318		
270	10上	34.5		第19層目	140.6	15	2110	277.5	585393	-90.6	17350314		
285	10中	34.9		第20層目	138.6	15	2078	292.5	607888	-105.6	23208562		
300	11上	36.5		第21層目	136.4	15	2047	307.5	629353	-120.6	29799521		
315	11中	37.0	315-330	第22層目	135.9	15	2039	322.5	657513	-135.6	37519173		
330	12上	37.1	330-345	第23層目	135.2	15	2028	337.5	684425	-150.6	46024134		
345	12中	37.7		第24層目	132.6	15	1989	352.5	701228	-165.6	54582005		
360	13上	39.6		第25層目	118.0	15	1770	367.5	650613	-180.6	57768051		
375	13中	52.3		第26層目	105.3	1.8	190	369.3	70010	-182.4	6306298		
390				第27層目	0	15	0	384.3	0	-197.4	0		
405				第28層目	0	15	0	399.3	0	-212.4	0		
				合計			51386		9604643	186.9	599152721		3155312.45
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.583				0.462		0.511

資表 5-2 F(0) 1時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	1時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	33.0		第1層目	143.8	15	2157	7.5	16174	181.2	70835518		
15	1中	33.2		第2層目	141.5	15	2123	22.5	47770	166.2	58674290		
30	2上	35.3		第3層目	137.9	15	2068	37.5	77563	151.2	47314739		
45	2中	36.8		第4層目	133.4	15	2001	52.5	105064	136.2	37152846		
60	3上	39.8		第5層目	130.2	15	1953	67.5	131838	121.2	28720109		
75	3中	40.0		第6層目	130.1	15	1952	82.5	161042	106.2	22046099		
90	4上	39.8		第7層目	130.4	15	1956	97.5	190747	91.2	16303293		
105	4中	39.8		第8層目	131.1	15	1967	112.5	221265	76.2	11452431		
120	5上	39.1		第9層目	132.0	15	1980	127.5	252469	61.2	7449979		
135	5中	38.9		第10層目	131.9	15	1979	142.5	281979	46.2	4257955		
150	6上	39.2		第11層目	131.9	15	1978	157.5	311555	31.2	1960801		
165	6中	38.9		第12層目	132.8	15	1993	172.5	343711	16.2	559298		
180	7上	38.3		第13層目	134.3	15	2014	187.5	377634	1.2	40591		
195	7中	37.5		第14層目	136.7	15	2050	202.5	415090	-13.8	429663		
210	8上	35.9		第15層目	137.2	15	2058	217.5	447533	-28.8	1747058		
225	8中	37.0		第16層目	136.8	15	2052	232.5	477125	-43.8	3978136		
240	9上	36.2		第17層目	139.3	15	2089	247.5	516966	-58.8	7264624		
255	9中	34.5		第18層目	141.1	15	2117	262.5	555621	-73.8	11572641		
270	10上	34.4		第19層目	141.2	15	2118	277.5	587620	-88.8	16743231		
285	10中	34.5		第20層目	139.4	15	2092	292.5	611793	-103.8	22581633		
300	11上	36.1		第21層目	138.3	15	2075	307.5	637955	-118.8	29326837		
315	11中	35.6	315-330	第22層目	139.3	15	2090	322.5	673912	-133.8	37457510		
330	12上	35.1	330-345	第23層目	139.5	15	2093	337.5	706371	-148.8	46389633		
345	12中	35.4		第24層目	136.4	15	2046	352.5	721136	-163.8	54937584		
360	13上	38.3		第25層目	125.7	15	1885	367.5	692646	-178.8	60299981		
375	13中	46.1		第26層目	117.8	1.8	212	369.3	78313	-180.6	6917781		
390				第27層目	0	15	0	384.3	0	-195.6	0		
405				第28層目	0	15	0	399.3	0	-210.6	0		
				合計			51095		9640890	188.7	606414261		3223632.58
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.579				0.468		0.522

資表 5-3 F(0) 2時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	2時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	38.8		第1層目	132.5	15	1988	7.5	14907	171.7	58609416		
15	1中	38.7		第2層目	132.4	15	1986	22.5	44675	156.7	48770920		
30	2上	39.0		第3層目	130.8	15	1961	37.5	73555	141.7	39402017		
45	2中	40.3		第4層目	129.4	15	1941	52.5	101914	126.7	31181855		
60	3上	40.3		第5層目	126.5	15	1898	67.5	128102	111.7	23699734		
75	3中	43.2		第6層目	123.9	15	1859	82.5	153326	96.7	17401190		
90	4上	42.9		第7層目	124.6	15	1869	97.5	182198	81.7	12497969		
105	4中	42.5		第8層目	125.5	15	1883	112.5	211781	66.7	8401750		
120	5上	42.0		第9層目	127.2	15	1907	127.5	243194	51.7	5127294		
135	5中	40.8		第10層目	128.5	15	1928	142.5	274722	36.7	2627948		
150	6上	40.6		第11層目	128.3	15	1925	157.5	303203	21.7	939752		
165	6中	41.0		第12層目	127.8	15	1917	172.5	330747	6.7	121146		
180	7上	41.2		第13層目	125.7	15	1886	187.5	353573	-8.3	166337		
195	7中	43.1		第14層目	123.9	15	1858	202.5	376255	-23.3	1046517		
210	8上	43.0		第15層目	124.0	15	1860	217.5	404615	-38.3	2768610		
225	8中	43.0		第16層目	125.4	15	1881	232.5	437280	-53.3	5385196		
240	9上	41.6		第17層目	125.3	15	1879	247.5	464991	-68.3	8808164		
255	9中	43.1		第18層目	126.0	15	1890	262.5	496184	-83.3	13162273		
270	10上	40.9		第19層目	128.7	15	1930	277.5	535568	-98.3	18698297		
285	10中	40.5		第20層目	129.1	15	1936	292.5	566339	-113.3	24906091		
300	11上	40.5		第21層目	127.9	15	1919	307.5	590031	-128.3	31637967		
315	11中	41.6	315-330	第22層目	125.2	15	1879	322.5	605873	-143.3	38632019		
330	12上	43.1	330-345	第23層目	123.0	15	1846	337.5	622865	-158.3	46301388		
345	12中	43.8		第24層目	107.9	15	1618	352.5	570283	-173.3	48637466		
360	13上	58.3		第25層目	46.7	6.6	308	359.1	110670	-179.9	9979077		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	359.1	0	-179.9	0		
390				第27層目	0	15	0	374.1	0	-194.9	0		
405				第28層目	0	15	0	389.1	0	-209.9	0		
				合計			45750		8196852	179.2	498910394		2661789.74
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.519				0.385		0.431

資表 5-4 F(0) 2時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	2時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	39.7		第1層目	131.0	15	1965	7.5	14736	174.8	60099075		
15	1中	39.3		第2層目	131.8	15	1977	22.5	44484	159.8	50549915		
30	2上	38.9		第3層目	132.2	15	1982	37.5	74334	144.8	41622865		
45	2中	38.9		第4層目	131.0	15	1965	52.5	103151	129.8	33160579		
60	3上	40.1		第5層目	129.9	15	1948	67.5	131498	114.8	25729476		
75	3中	40.1		第6層目	128.7	15	1931	82.5	159291	99.8	19283015		
90	4上	41.2		第7層目	127.2	15	1909	97.5	186096	84.8	13774559		
105	4中	41.5		第8層目	128.6	15	1929	112.5	217046	69.8	9446961		
120	5上	39.9		第9層目	129.2	15	1937	127.5	246999	54.8	5862761		
135	5中	41.0		第10層目	128.0	15	1919	142.5	273493	39.8	3082486		
150	6上	41.1		第11層目	128.5	15	1927	157.5	303510	24.8	1225308		
165	6中	40.5		第12層目	128.7	15	1931	172.5	333063	9.8	223207		
180	7上	40.8		第13層目	128.2	15	1922	187.5	360436	-5.2	87198		
195	7中	41.0		第14層目	129.2	15	1938	202.5	392354	-20.2	823688		
210	8上	39.8		第15層目	131.3	15	1969	217.5	428285	-35.2	2471007		
225	8中	38.9		第16層目	132.5	15	1988	232.5	462129	-50.2	5037963		
240	9上	38.6		第17層目	134.9	15	2024	247.5	500909	-65.2	8630592		
255	9中	36.5		第18層目	137.1	15	2057	262.5	539831	-80.2	13252389		
270	10上	36.4		第19層目	135.1	15	2027	277.5	562541	-95.2	18394393		
285	10中	38.5		第20層目	132.9	15	1994	292.5	583230	-110.2	24233794		
300	11上	38.6		第21層目	133.0	15	1995	307.5	613393	-125.2	31284892		
315	11中	38.4	315-330	第22層目	132.8	15	1993	322.5	642614	-140.2	39180845		
330	12上	38.7	330-345	第23層目	130.3	15	1955	337.5	659644	-155.2	47089639		
345	12中	41.0		第24層目	116.3	15	1744	352.5	614831	-170.2	50534168		
360	13上	52.8		第25層目	92.9	6.6	613	359.1	220131	-176.8	19154798		
375	13中	64.4		第26層目	81.3	0	0	359.1	0	-176.8	0		
390				第27層目	0	15	0	374.1	0	-191.8	0		
405				第28層目	0	15	0	389.1	0	-206.8	0		
				合計			47537		8668030	182.3	524235575		2845108.14
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.539				0.404		0.461

資表 5-5 F(0) 3 時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	3時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	36.0		第1層目	137.9	15	2068	7.5	15509	169.1	59140634		
15	1中	36.2		第2層目	137.3	15	2060	22.5	46340	154.1	48922264		
30	2上	36.5		第3層目	136.1	15	2042	37.5	76576	139.1	39526946		
45	2中	37.3		第4層目	134.7	15	2021	52.5	106104	124.1	31143806		
60	3上	37.9		第5層目	133.9	15	2008	67.5	135538	109.1	23921154		
75	3中	38.2		第6層目	133.4	15	2002	82.5	165126	94.1	17746002		
90	4上	38.4		第7層目	132.0	15	1981	97.5	193101	79.1	12416718		
105	4中	39.6		第8層目	130.8	15	1962	112.5	220717	64.1	8088182		
120	5上	39.6		第9層目	129.9	15	1948	127.5	248367	49.1	4725284		
135	5中	40.5		第10層目	129.9	15	1948	142.5	277554	34.1	2296219		
150	6上	39.6		第11層目	128.3	15	1925	157.5	303180	19.1	735476		
165	6中	42.1		第12層目	127.9	15	1918	172.5	330851	4.1	67594		
180	7上	40.1		第13層目	129.5	15	1943	187.5	364233	-10.9	268871		
195	7中	40.4		第14層目	129.8	15	1947	202.5	394343	-25.9	1346759		
210	8上	39.8		第15層目	132.2	15	1983	217.5	431319	-40.9	3360804		
225	8中	38.0		第16層目	134.3	15	2015	232.5	468528	-55.9	6343591		
240	9上	37.6		第17層目	134.6	15	2018	247.5	499554	-70.9	10195095		
255	9中	37.8		第18層目	133.3	15	2000	262.5	524908	-85.9	14805898		
270	10上	38.9		第19層目	132.0	15	1979	277.5	549304	-100.9	20205316		
285	10中	39.2		第20層目	131.0	15	1965	292.5	574894	-115.9	26456094		
300	11上	39.8		第21層目	128.4	15	1926	307.5	592360	-130.9	33063810		
315	11中	41.8	315-330	第22層目	124.9	15	1874	322.5	604397	-145.9	39950026		
330	12上	43.3	330-345	第23層目	117.6	15	1764	337.5	595401	-160.9	45726908		
345	12中	49.1		第24層目	96.1	15	1441	352.5	507891	-175.9	44627028		
360	13上	64.8		第25層目	40.2	3.6	145	356.1	51490	-179.5	4661030		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	356.1	0	-179.5	0		
390				第27層目	0	15	0	371.1	0	-194.5	0		
405				第28層目	0	15	0	386.1	0	-209.5	0		
				合計			46882		8277585	176.6	499741509		2671858.68
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.532				0.385		0.433

資表 5-6 F(0) 3 時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	3時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	37.0		第1層目	136.3	15	2044	7.5	15332	170.8	59694892		
15	1中	36.8		第2層目	136.0	15	2041	22.5	45914	155.8	49588956		
30	2上	37.2		第3層目	134.3	15	2014	37.5	75527	140.8	39981550		
45	2中	38.5		第4層目	132.2	15	1982	52.5	104076	125.8	31423964		
60	3上	39.3		第5層目	129.9	15	1949	67.5	131564	110.8	23977107		
75	3中	40.7		第6層目	127.3	15	1910	82.5	157559	95.8	17573570		
90	4上	41.9		第7層目	124.9	15	1874	97.5	182688	80.8	12276535		
105	4中	43.1		第8層目	123.6	15	1854	112.5	208558	65.8	8068133		
120	5上	43.3		第9層目	125.0	15	1875	127.5	239015	50.8	4878246		
135	5中	41.8		第10層目	127.1	15	1907	142.5	271676	35.8	2483038		
150	6上	41.1		第11層目	127.7	15	1916	157.5	301715	20.8	866951		
165	6中	41.2		第12層目	129.7	15	1945	172.5	335560	5.8	102550		
180	7上	39.2		第13層目	131.3	15	1969	187.5	369141	-9.2	202531		
195	7中	39.6		第14層目	130.1	15	1952	202.5	395315	-24.2	1177216		
210	8上	40.3		第15層目	129.2	15	1938	217.5	421450	-39.2	3009603		
225	8中	40.6		第16層目	128.6	15	1928	232.5	448318	-54.2	5694775		
240	9上	40.9		第17層目	130.7	15	1961	247.5	485242	-69.2	9417610		
255	9中	38.4		第18層目	137.8	15	2067	262.5	542686	-84.2	14685907		
270	10上	33.8		第19層目	140.1	15	2102	277.5	583291	-99.2	20712205		
285	10中	36.1		第20層目	135.0	15	2025	292.5	592400	-114.2	26438185		
300	11上	38.9		第21層目	130.7	15	1960	307.5	602785	-129.2	32744660		
315	11中	40.4	315-330	第22層目	127.6	15	1915	322.5	617483	-144.2	39833417		
330	12上	41.9	330-345	第23層目	117.2	15	1759	337.5	593553	-159.2	44590195		
345	12中	50.8		第24層目	97.8	15	1467	352.5	517250	-174.2	44541554		
360	13上	61.4		第25層目	43.7	3.6	157	356.1	55958	-177.8	4966238		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	356.1	0	-177.8	0		
390				第27層目	0	15	0	371.1	0	-192.8	0		
405				第28層目	0	15	0	386.1	0	-207.8	0		
				合計			46510		8294054	178.3	498929588		2692959.58
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.527				0.385		0.436

資表 5-7 F(0) 4時間(東側)

	幅方向											
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	4時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	36.7		第1層目	136.0	15	2040	7.5	15302	170.8	59537595	
15	1中	37.3		第2層目	134.0	15	2011	22.5	45240	155.8	48826653	
30	2上	38.7		第3層目	132.2	15	1983	37.5	74346	140.8	39324965	
45	2中	39.1		第4層目	130.7	15	1961	52.5	102962	125.8	31059880	
60	3上	40.1		第5層目	129.6	15	1943	67.5	131174	110.8	23881946	
75	3中	40.3		第6層目	128.1	15	1922	82.5	158524	95.8	17660611	
90	4上	41.6		第7層目	126.4	15	1896	97.5	184904	80.8	12408264	
105	4中	42.0		第8層目	125.9	15	1889	112.5	212507	65.8	8206969	
120	5上	42.1		第9層目	125.3	15	1880	127.5	239675	50.8	4881016	
135	5中	42.6		第10層目	125.2	15	1878	142.5	267636	35.8	2438584	
150	6上	42.2		第11層目	126.2	15	1893	157.5	298088	20.8	852121	
165	6中	41.6		第12層目	126.9	15	1904	172.5	328457	5.8	99142	
180	7上	41.4		第13層目	126.9	15	1904	187.5	356920	-9.2	197788	
195	7中	41.7		第14層目	127.6	15	1914	202.5	387646	-24.2	1159566	
210	8上	40.7		第15層目	129.2	15	1938	217.5	421613	-39.2	3019280	
225	8中	40.1		第16層目	130.9	15	1963	232.5	456409	-54.2	5809470	
240	9上	39.1		第17層目	131.1	15	1967	247.5	486820	-69.2	9463479	
255	9中	39.8		第18層目	131.4	15	1971	262.5	517348	-84.2	14018816	
270	10上	38.8		第19層目	132.2	15	1983	277.5	550303	-99.2	19562869	
285	10中	39.0		第20層目	132.1	15	1982	292.5	579698	-114.2	25896669	
300	11上	38.9		第21層目	129.8	15	1947	307.5	598772	-129.2	32554852	
315	11中	41.3	315-330	第22層目	125.1	15	1877	322.5	605220	-144.2	39072647	
330	12上	43.6	330-345	第23層目	117.6	15	1764	337.5	595375	-159.2	44758567	
345	12中	48.8		第24層目	100.7	15	1510	352.5	532187	-174.2	45857289	
360	13上	60.6		第25層目	44.5	4.9	218	357.4	77844	-179.1	6989098	
375	13中	105.0		第26層目	0	15	0	372.4	0	-194.1	0	
390				第27層目	0	15	0	387.4	0	-209.1	0	
405				第28層目	0	15	0	402.4	0	-224.1	0	
				合計			46137		8224970	178.3	497538135	2665937.22
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.523				0.384	0.432

資表 5-8 F(0) 4時間(西側)

	幅方向											
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	4時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	38.8		第1層目	131.0	15	1964	7.5	14734	171.4	57718434	
15	1中	40.3		第2層目	129.3	15	1939	22.5	43624	156.4	47434256	
30	2上	40.5		第3層目	128.4	15	1926	37.5	72211	141.4	38512176	
45	2中	41.1		第4層目	127.4	15	1911	52.5	100331	126.4	30547001	
60	3上	41.5		第5層目	128.3	15	1925	67.5	129934	111.4	23905116	
75	3中	40.2		第6層目	130.2	15	1953	82.5	161141	96.4	18170717	
90	4上	39.6		第7層目	130.2	15	1953	97.5	190461	81.4	12965628	
105	4中	40.2		第8層目	127.6	15	1914	112.5	215333	66.4	8463396	
120	5上	42.2		第9層目	123.7	15	1856	127.5	236653	51.4	4929857	
135	5中	44.1		第10層目	123.4	15	1851	142.5	263832	36.4	2481677	
150	6上	42.5		第11層目	125.0	15	1876	157.5	295395	21.4	890429	
165	6中	42.5		第12層目	125.5	15	1883	172.5	324848	6.4	111350	
180	7上	42.0		第13層目	125.1	15	1876	187.5	351816	-8.6	175430	
195	7中	42.9		第14層目	125.2	15	1878	202.5	380265	-23.6	1085138	
210	8上	41.9		第15層目	126.4	15	1896	217.5	412413	-38.6	2867412	
225	8中	41.7		第16層目	126.9	15	1903	232.5	442494	-53.6	5512799	
240	9上	41.4		第17層目	127.4	15	1910	247.5	472787	-68.6	9037318	
255	9中	41.2		第18層目	128.0	15	1920	262.5	503961	-83.6	13468376	
270	10上	40.8		第19層目	128.7	15	1930	277.5	535526	-98.6	18815203	
285	10中	40.6		第20層目	128.7	15	1930	292.5	564474	-113.6	24960473	
300	11上	40.8		第21層目	127.6	15	1914	307.5	588486	-128.6	31708240	
315	11中	41.6	315-330	第22層目	125.3	15	1879	322.5	606042	-143.6	38810728	
330	12上	43.1	330-345	第23層目	121.3	15	1820	337.5	614233	-158.6	45839370	
345	12中	45.6		第24層目	105.3	15	1579	352.5	556589	-173.6	47640085	
360	13上	59.2		第25層目	45.9	4.9	225	357.4	80295	-178.5	7162435	
375	13中	105.0		第26層目	0	15	0	372.4	0	-193.5	0	
390				第27層目	0	15	0	387.4	0	-208.5	0	
405				第28層目	0	15	0	402.4	0	-223.5	0	
				合計			45612		8157876	178.9	493213045	2651033.88
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.517				0.380	0.429

資表 5-9 F(0) 8 時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	8時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	37.9		第1層目	132.8	15	1992	7.5	14941	171.4	58530787		
15	1中	39.3		第2層目	131.0	15	1965	22.5	44219	156.4	48083270		
30	2上	39.7		第3層目	129.5	15	1942	37.5	72833	141.4	38844827		
45	2中	40.9		第4層目	128.1	15	1922	52.5	100891	126.4	30718254		
60	3上	41.0		第5層目	126.1	15	1891	67.5	127636	111.4	23483148		
75	3中	42.9		第6層目	124.5	15	1868	82.5	154100	96.4	17377468		
90	4上	42.6		第7層目	124.9	15	1873	97.5	182652	81.4	12434621		
105	4中	42.5		第8層目	125.2	15	1878	112.5	211292	66.4	8305071		
120	5上	42.2		第9層目	125.0	15	1875	127.5	239034	51.4	4979863		
135	5中	42.8		第10層目	126.7	15	1900	142.5	270779	36.4	2547311		
150	6上	40.6		第11層目	129.7	15	1945	157.5	306345	21.4	923612		
165	6中	39.8		第12層目	129.9	15	1949	172.5	336116	6.4	115265		
180	7上	40.3		第13層目	127.2	15	1909	187.5	357848	-8.6	178369		
195	7中	42.4		第14層目	125.5	15	1883	202.5	381206	-23.6	1087638		
210	8上	42.1		第15層目	125.9	15	1888	217.5	410651	-38.6	2854856		
225	8中	42.1		第16層目	126.6	15	1898	232.5	441378	-53.6	5498467		
240	9上	41.4		第17層目	127.8	15	1917	247.5	474476	-68.6	9069054		
255	9中	40.8		第18層目	129.0	15	1935	262.5	507839	-83.6	13571348		
270	10上	40.2		第19層目	129.5	15	1943	277.5	539085	-98.6	18939437		
285	10中	40.3		第20層目	127.0	15	1905	292.5	557300	-113.6	24642355		
300	11上	42.7		第21層目	125.8	15	1887	307.5	580183	-128.6	31259873		
315	11中	41.5	315-330	第22層目	123.9	15	1858	322.5	599149	-143.6	38368153		
330	12上	44.6	330-345	第23層目	120.6	15	1808	337.5	610335	-158.6	45547253		
345	12中	44.8		第24層目	105.4	15	1581	352.5	557223	-173.6	47693240		
360	13上	59.8		第25層目	45.2	5.5	249	358	89018	-179.1	7980556		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	358	0	-179.1	0		
390				第27層目	0	15	0	373	0	-194.1	0		
405				第28層目	0	15	0	388	0	-209.1	0		
				合計			45660		8166529	178.9	493034097		2641582.72
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.518				0.380		0.428

資表 5-10 F(0) 8 時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	8時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	41.1		第1層目	129.0	15	1934	7.5	14507	173.6	58337590		
15	1中	40.0		第2層目	128.0	15	1920	22.5	43195	158.6	48331966		
30	2上	42.0		第3層目	126.4	15	1896	37.5	71106	143.6	39141375		
45	2中	41.6		第4層目	125.8	15	1886	52.5	99040	128.6	31238621		
60	3上	42.7		第5層目	123.9	15	1859	67.5	125489	113.6	24030649		
75	3中	43.4		第6層目	125.1	15	1876	82.5	154762	98.6	18276259		
90	4上	41.6		第7層目	127.5	15	1912	97.5	186418	83.6	13401730		
105	4中	41.0		第8層目	126.7	15	1901	112.5	213832	68.6	8982955		
120	5上	42.3		第9層目	125.6	15	1885	127.5	240277	53.6	5451499		
135	5中	42.1		第10層目	126.5	15	1898	142.5	270394	38.6	2864227		
150	6上	41.4		第11層目	126.8	15	1901	157.5	299447	23.6	1095457		
165	6中	41.8		第12層目	126.5	15	1897	172.5	327202	8.6	176178		
180	7上	41.7		第13層目	126.8	15	1902	187.5	356611	-6.4	113323		
195	7中	41.5		第14層目	127.1	15	1906	202.5	386036	-21.4	907969		
210	8上	41.4		第15層目	127.8	15	1916	217.5	416784	-36.4	2573504		
225	8中	40.8		第16層目	129.6	15	1944	232.5	451980	-51.4	5170443		
240	9上	39.6		第17層目	131.7	15	1975	247.5	488899	-66.4	8743681		
255	9中	38.7		第18層目	132.1	15	1982	262.5	520262	-81.4	13166290		
270	10上	39.1		第19層目	131.6	15	1974	277.5	547660	-96.4	18373360		
285	10中	39.3		第20層目	130.7	15	1960	292.5	573293	-111.4	24355640		
300	11上	40.1		第21層目	129.6	15	1944	307.5	597665	-126.4	31084800		
315	11中	40.4	315-330	第22層目	129.2	15	1937	322.5	624812	-141.4	38767203		
330	12上	40.5	330-345	第23層目	122.7	15	1840	337.5	621093	-156.4	45043702		
345	12中	46.9		第24層目	105.8	15	1587	352.5	559523	-171.4	46656013		
360	13上	57.3		第25層目	76.3	5.5	420	358	150185	-176.9	13127649		
375	13中	76.4		第26層目	57.2	0	0	358	0	-176.9	0		
390				第27層目	0	15	0	373	0	-191.9	0		
405				第28層目	0	15	0	388	0	-206.9	0		
				合計			46052		8340471	181.1	499412083		2708453.83
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.522				0.385		0.439

資表 5-11 F(0)IA 1 時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	1時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	31.7		第1層目	146.2	15	2192	7.5	16443	174.8	67010521		
15	1中	32.2		第2層目	144.6	15	2169	22.5	48801	159.8	55408827		
30	2上	33.2		第3層目	142.1	15	2132	37.5	79948	144.8	44724983		
45	2中	34.7		第4層目	138.1	15	2071	52.5	108722	129.8	34915789		
60	3上	37.3		第5層目	133.8	15	2007	67.5	135452	114.8	26472310		
75	3中	38.9		第6層目	132.2	15	1983	82.5	163635	99.8	19782382		
90	4上	38.8		第7層目	132.5	15	1988	97.5	193781	84.8	14320902		
105	4中	38.7		第8層目	132.3	15	1984	112.5	223239	69.8	9698008		
120	5上	39.1		第9層目	130.7	15	1960	127.5	249878	54.8	5916728		
135	5中	40.3		第10層目	129.0	15	1935	142.5	275727	39.8	3097370		
150	6上	40.7		第11層目	130.6	15	1959	157.5	308495	24.8	1238939		
165	6中	38.7		第12層目	132.3	15	1984	172.5	342313	9.8	226806		
180	7上	39.0		第13層目	130.5	15	1957	187.5	366905	-5.2	90121		
195	7中	40.6		第14層目	129.2	15	1938	202.5	392521	-20.2	829268		
210	8上	40.2		第15層目	128.7	15	1930	217.5	419737	-35.2	2430765		
225	8中	41.1		第16層目	130.5	15	1958	232.5	455171	-50.2	4975244		
240	9上	38.4		第17層目	131.8	15	1978	247.5	489475	-65.2	8450805		
255	9中	39.8		第18層目	132.7	15	1991	262.5	522546	-80.2	12849372		
270	10上	37.5		第19層目	135.7	15	2035	277.5	564726	-95.2	18491734		
285	10中	36.8		第20層目	136.1	15	2041	292.5	597007	-110.2	24836284		
300	11上	37.1		第21層目	136.1	15	2041	307.5	627646	-125.2	32045963		
315	11中	36.8	315-330	第22層目	136.1	15	2042	322.5	658601	-140.2	40193902		
330	12上	37.0	330-345	第23層目	135.3	15	2030	337.5	684982	-155.2	48940503		
345	12中	37.7		第24層目	131.6	15	1973	352.5	695571	-170.2	57215236		
360	13上	40.8		第25層目	64.2	15	963	367.5	353985	-185.2	33064811		
375	13中	105.0		第26層目	0.0	6.7	0	374.2	0	-191.9	0		
390				第27層目	0	0	0	374.2	0	-191.9	0		
405				第28層目	0	15	0	389.2	0	-206.9	0		
				合計			49241		8975307	182.3	567227574		2844309.77
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.558				0.437		0.461

資表 5-12 F(0)IA 1 時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	1時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	32.0		第1層目	143.6	15	2154	7.5	16158	175.4	66313190		
15	1中	34.4		第2層目	139.7	15	2096	22.5	47150	160.4	53946393		
30	2上	35.9		第3層目	136.1	15	2041	37.5	76548	145.4	43185966		
45	2中	38.0		第4層目	132.7	15	1990	52.5	104489	130.4	33873950		
60	3上	39.3		第5層目	131.6	15	1974	67.5	133215	115.4	26313538		
75	3中	39.1		第6層目	132.4	15	1985	82.5	163783	100.4	20044006		
90	4上	38.5		第7層目	132.7	15	1991	97.5	194096	85.4	14551861		
105	4中	38.7		第8層目	133.1	15	1996	112.5	224598	70.4	9928611		
120	5上	38.2		第9層目	134.2	15	2012	127.5	256562	55.4	6210932		
135	5中	37.7		第10層目	134.7	15	2021	142.5	287985	40.4	3334418		
150	6上	37.6		第11層目	134.1	15	2011	157.5	316729	25.4	1333862		
165	6中	38.4		第12層目	133.1	15	1996	172.5	344293	10.4	252794		
180	7上	38.6		第13層目	132.3	15	1985	187.5	372122	-4.6	79430		
195	7中	39.1		第14層目	131.9	15	1979	202.5	400783	-19.6	798375		
210	8上	39.0		第15層目	132.5	15	1988	217.5	432298	-34.6	2418388		
225	8中	38.5		第16層目	133.8	15	2007	232.5	466523	-49.6	4976482		
240	9上	37.7		第17層目	135.1	15	2026	247.5	501503	-64.6	8497151		
255	9中	37.2		第18層目	136.6	15	2050	262.5	538040	-79.6	13029475		
270	10上	36.1		第19層目	137.6	15	2064	277.5	572843	-94.6	18517214		
285	10中	36.3		第20層目	135.7	15	2035	292.5	595318	-109.6	24491644		
300	11上	38.1		第21層目	134.5	15	2017	307.5	620289	-124.6	31361298		
315	11中	37.5	315-330	第22層目	134.4	15	2016	322.5	650184	-139.6	39334250		
330	12上	38.1	330-345	第23層目	132.8	15	1992	337.5	672351	-154.6	47659551		
345	12中	39.1		第24層目	129.0	15	1936	352.5	682273	-169.6	55718039		
360	13上	41.9		第25層目	63.1	15	946	367.5	347756	-184.6	32268363		
375	13中	105.0		第26層目	0.0	6.7	0	374.2	0	-191.3	0		
390				第27層目	0	0	0	374.2	0	-191.3	0		
405				第28層目	0	15	0	389.2	0	-206.3	0		
				合計			49308		9017888	182.9	558439181		2808878.11
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.559				0.431		0.455

資表 5-13 F(0)IA 2 時間(東側)

	幅方向							上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
上端からの		①東											
距離[mm]	ラミナ層	2時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	35.8		第1層目	138.0	15	2070	7.5	15528	167.5	58153731		
15	1中	36.2		第2層目	138.7	15	2080	22.5	46799	152.5	48436986		
30	2上	35.2		第3層目	138.9	15	2083	37.5	78120	137.5	39447649		
45	2中	36.0		第4層目	137.9	15	2069	52.5	108620	122.5	31106404		
60	3上	36.1		第5層目	137.8	15	2067	67.5	139548	107.5	23947781		
75	3中	36.1		第6層目	137.3	15	2059	82.5	169847	92.5	17669133		
90	4上	36.7		第7層目	137.6	15	2064	97.5	201203	77.5	12446234		
105	4中	35.7		第8層目	137.9	15	2069	112.5	232765	62.5	8131349		
120	5上	36.3		第9層目	136.0	15	2040	127.5	260071	47.5	4648300		
135	5中	37.7		第10層目	133.7	15	2006	142.5	285859	32.5	2161735		
150	6上	38.6		第11層目	132.7	15	1991	157.5	313575	17.5	649870		
165	6中	38.7		第12層目	132.4	15	1986	172.5	342637	2.5	50061		
180	7上	38.9		第13層目	131.1	15	1966	187.5	368634	-12.5	342081		
195	7中	40.0		第14層目	130.6	15	1959	202.5	396606	-27.5	1513539		
210	8上	39.4		第15層目	131.7	15	1976	217.5	429704	-42.5	3598797		
225	8中	38.9		第16層目	131.5	15	1973	232.5	458659	-57.5	6550172		
240	9上	39.6		第17層目	130.9	15	1963	247.5	485892	-72.5	10344412		
255	9中	39.5		第18層目	129.6	15	1944	262.5	510221	-87.5	14904194		
270	10上	40.9		第19層目	128.2	15	1923	277.5	533612	-102.5	20222904		
285	10中	40.9		第20層目	129.0	15	1935	292.5	566031	-117.5	26735126		
300	11上	40.1		第21層目	128.3	15	1925	307.5	591945	-132.5	33811761		
315	11中	41.6	315-330	第22層目	125.6	15	1883	322.5	607348	-147.5	40985384		
330	12上	42.9	330-345	第23層目	116.3	15	1745	337.5	588895	-162.5	46085473		
345	12中	50.8		第24層目	88.5	15	1327	352.5	467785	-177.5	41816269		
360	13上	70.7		第25層目	34.3	7.1	243	359.6	87535	-184.6	8292583		
375	13中	105.0		第26層目	0	15	0	374.6	0	-199.6	0		
390				第27層目	0	15	0	389.6	0	-214.6	0		
405				第28層目	0	15	0	404.6	0	-229.6	0		
				合計			47346		8287440	175.0	502051924		2614040.93
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.537				0.387		0.423

資表 5-14 F(0)IA 2 時間(西側)

	幅方向							上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
上端からの		①西											
距離[mm]	ラミナ層	2時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	36.3		第1層目	137.9	15	2068	7.5	15510	170.9	60466162		
15	1中	35.8		第2層目	137.5	15	2062	22.5	46389	155.9	50172966		
30	2上	36.7		第3層目	136.1	15	2042	37.5	76559	140.9	40590640		
45	2中	37.2		第4層目	135.8	15	2036	52.5	106911	125.9	32335809		
60	3上	37.1		第5層目	135.7	15	2036	67.5	137437	110.9	25096551		
75	3中	37.2		第6層目	135.8	15	2037	82.5	168028	95.9	18783835		
90	4上	37.0		第7層目	134.8	15	2021	97.5	197072	80.9	13278739		
105	4中	38.2		第8層目	134.2	15	2012	112.5	226395	65.9	8787052		
120	5上	37.6		第9層目	134.8	15	2022	127.5	257786	50.9	5283782		
135	5中	37.6		第10層目	135.9	15	2039	142.5	290550	35.9	2671487		
150	6上	36.5		第11層目	136.8	15	2051	157.5	323096	20.9	937722		
165	6中	36.7		第12層目	136.0	15	2041	172.5	352004	5.9	110191		
180	7上	37.2		第13層目	134.9	15	2024	187.5	379434	-9.1	204157		
195	7中	37.9		第14層目	134.8	15	2022	202.5	409516	-24.1	1208875		
210	8上	37.3		第15層目	135.0	15	2024	217.5	440323	-39.1	3127122		
225	8中	37.7		第16層目	134.9	15	2024	232.5	470499	-54.1	5952657		
240	9上	37.4		第17層目	134.3	15	2015	247.5	498626	-69.1	9647013		
255	9中	38.3		第18層目	134.0	15	2010	262.5	527566	-84.1	14239894		
270	10上	37.7		第19層目	131.3	15	1969	277.5	546495	-99.1	19363051		
285	10中	41.0		第20層目	131.5	15	1972	292.5	576825	-114.1	25694017		
300	11上	37.5		第21層目	133.8	15	2006	307.5	616922	-129.1	33456178		
315	11中	38.7	315-330	第22層目	130.8	15	1962	322.5	632866	-144.1	40764147		
330	12上	40.4	330-345	第23層目	124.0	15	1861	337.5	627953	-159.1	47109926		
345	12中	45.5		第24層目	108.6	15	1630	352.5	574434	-174.1	49403989		
360	13上	55.8		第25層目	49.2	7.1	349	359.6	125539	-181.2	11459154		
375	13中	105.0		第26層目	0	15	0	374.6	0	-196.2	0		
390				第27層目	0	15	0	389.6	0	-211.2	0		
405				第28層目	0	15	0	404.6	0	-226.2	0		
				合計			48335		8624733	178.4	520145117		2757008.27
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.548				0.401		0.447

資表 5-15 F(0)IA 3 時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	3時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	32.3		第1層目	144.3	15	2165	7.5	16235	167.0	60439384		
15	1中	33.4		第2層目	140.9	15	2114	22.5	47566	152.0	48905876		
30	2上	35.7		第3層目	137.0	15	2055	37.5	77079	137.0	38638141		
45	2中	37.3		第4層目	134.4	15	2016	52.5	105820	122.0	30056573		
60	3上	38.3		第5層目	132.2	15	1983	67.5	133858	107.0	22757128		
75	3中	39.5		第6層目	130.1	15	1952	82.5	161048	92.0	16572481		
90	4上	40.4		第7層目	130.8	15	1962	97.5	191295	77.0	11680678		
105	4中	38.8		第8層目	132.2	15	1983	112.5	223037	62.0	7667202		
120	5上	39.0		第9層目	130.8	15	1963	127.5	250241	47.0	4379185		
135	5中	40.2		第10層目	130.5	15	1958	142.5	278987	32.0	2046139		
150	6上	39.3		第11層目	133.4	15	2001	157.5	315158	17.0	618330		
165	6中	37.3		第12層目	133.1	15	1996	172.5	344332	2.0	45710		
180	7上	39.7		第13層目	131.4	15	1971	187.5	369520	-13.0	368118		
195	7中	39.0		第14層目	131.5	15	1972	202.5	399295	-28.0	1578796		
210	8上	39.6		第15層目	131.5	15	1973	217.5	429149	-43.0	3678976		
225	8中	38.9		第16層目	131.9	15	1978	232.5	459984	-58.0	6684020		
240	9上	39.2		第17層目	129.5	15	1942	247.5	480713	-73.0	10376302		
255	9中	41.3		第18層目	130.4	15	1956	262.5	513430	-88.0	15170610		
270	10上	38.3		第19層目	133.2	15	1997	277.5	554258	-103.0	21211835		
285	10中	38.5		第20層目	130.0	15	1950	292.5	570485	-118.0	27176547		
300	11上	41.5		第21層目	123.7	15	1856	307.5	570635	-133.0	32842436		
315	11中	44.8	315-330	第22層目	117.9	15	1768	322.5	570245	-148.0	38744425		
330	12上	47.3	330-345	第23層目	107.8	15	1617	337.5	545813	-163.0	42978851		
345	12中	54.9		第24層目	84.2	15	1263	352.5	445366	-178.0	40038183		
360	13上	70.9		第25層目	34.1	6.9	235	359.4	84638	-184.9	8048883		
375	13中	105.0		第26層目	0	15	0	374.4	0	-199.9	0		
390				第27層目	0	15	0	389.4	0	-214.9	0		
405				第28層目	0	15	0	404.4	0	-229.9	0		
				合計			46627		8138186	174.5	492704810		2561328.84
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.529				0.380		0.415

資表 5-16 F(0)IA 3 時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	3時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	35.3		第1層目	139.7	15	2095	7.5	15716	167.9	59093114		
15	1中	35.0		第2層目	140.1	15	2102	22.5	47284	152.9	49153546		
30	2上	34.9		第3層目	138.5	15	2077	37.5	77878	137.9	39517378		
45	2中	36.6		第4層目	134.9	15	2024	52.5	106261	122.9	30597589		
60	3上	38.5		第5層目	130.8	15	1961	67.5	132384	107.9	22860186		
75	3中	40.8		第6層目	127.8	15	1917	82.5	158183	92.9	16575044		
90	4上	41.4		第7層目	127.1	15	1907	97.5	185928	77.9	11600705		
105	4中	41.5		第8層目	127.4	15	1911	112.5	214996	62.9	7590999		
120	5上	41.1		第9層目	128.3	15	1925	127.5	245383	47.9	4447379		
135	5中	40.6		第10層目	129.9	15	1949	142.5	277661	32.9	2142502		
150	6上	39.5		第11層目	131.3	15	1970	157.5	310303	17.9	666495		
165	6中	39.2		第12層目	130.6	15	1960	172.5	338044	2.9	52950		
180	7上	40.2		第13層目	129.7	15	1945	187.5	364753	-12.1	322437		
195	7中	40.1		第14層目	127.7	15	1915	202.5	387858	-27.1	1445084		
210	8上	42.2		第15層目	124.5	15	1867	217.5	406067	-42.1	3347865		
225	8中	43.3		第16層目	123.4	15	1850	232.5	430183	-57.1	6072392		
240	9上	43.3		第17層目	125.9	15	1889	247.5	467571	-72.1	9862737		
255	9中	40.7		第18層目	129.5	15	1943	262.5	510024	-87.1	14784656		
270	10上	39.7		第19層目	131.8	15	1977	277.5	548638	-102.1	20656704		
285	10中	38.5		第20層目	132.2	15	1983	292.5	580159	-117.1	27246337		
300	11上	39.3		第21層目	128.6	15	1929	307.5	593121	-132.1	33707750		
315	11中	42.1	315-330	第22層目	122.6	15	1839	322.5	593078	-147.1	39840641		
330	12上	45.3	330-345	第23層目	108.8	15	1632	337.5	550825	-162.1	42928508		
345	12中	55.9		第24層目	85.6	15	1284	352.5	452663	-177.1	40311718		
360	13上	68.5		第25層目	36.5	6.9	252	359.4	90527	-184.0	8531049		
375	13中	105.0		第26層目	0	15	0	374.4	0	-199.0	0		
390				第27層目	0	15	0	389.4	0	-214.0	0		
405				第28層目	0	15	0	404.4	0	-229.0	0		
				合計			46104		8085490	175.4	493355763		2575944.05
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.523				0.381		0.417

資表 5-17 F(0)IA 4時間(東側)

	幅方向												
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	4時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	33.6		第1層目	141.5	15	2123	7.5	15924	169.5	61067307		
15	1中	34.8		第2層目	138.9	15	2084	22.5	46892	154.5	49812250		
30	2上	36.2		第3層目	136.4	15	2046	37.5	76728	139.5	39877821		
45	2中	37.4		第4層目	133.4	15	2002	52.5	105080	124.5	31081158		
60	3上	39.2		第5層目	130.6	15	1958	67.5	132182	109.5	23533397		
75	3中	40.3		第6層目	128.4	15	1926	82.5	158889	94.5	17249340		
90	4上	41.3		第7層目	127.0	15	1905	97.5	185781	79.5	12090498		
105	4中	41.6		第8層目	127.7	15	1915	112.5	215409	64.5	8011402		
120	5上	40.7		第9層目	128.7	15	1931	127.5	246187	49.5	4774808		
135	5中	40.6		第10層目	128.8	15	1932	142.5	275278	34.5	2340731		
150	6上	40.7		第11層目	126.3	15	1894	157.5	298266	19.5	758497		
165	6中	43.1		第12層目	120.4	15	1805	172.5	311406	4.5	71043		
180	7上	46.6		第13層目	115.3	15	1730	187.5	324408	-10.5	221774		
195	7中	48.1		第14層目	112.1	15	1681	202.5	340397	-25.5	1121222		
210	8上	49.8		第15層目	111.6	15	1673	217.5	363948	-40.5	2770749		
225	8中	48.6		第16層目	114.8	15	1722	232.5	400400	-55.5	5329470		
240	9上	46.6		第17層目	119.5	15	1793	247.5	443644	-70.5	8932902		
255	9中	43.9		第18層目	126.2	15	1893	262.5	496853	-85.5	13859494		
270	10上	39.9		第19層目	130.6	15	1959	277.5	543518	-100.5	19803935		
285	10中	39.5		第20層目	132.9	15	1994	292.5	583121	-115.5	26614164		
300	11上	37.6		第21層目	133.8	15	2007	307.5	617083	-130.5	34193029		
315	11中	38.6	315-330	第22層目	129.7	15	1945	322.5	627254	-145.5	41189946		
330	12上	41.7	330-345	第23層目	118.9	15	1783	337.5	601779	-160.5	45942867		
345	12中	49.4		第24層目	100.3	15	1504	352.5	530231	-175.5	46337296		
360	13上	60.3		第25層目	44.7	7.6	340	360.1	122388	-183.1	11391186		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	360.1	0	-183.1	0		
390				第27層目	0	15	0	375.1	0	-198.1	0		
405				第28層目	0	15	0	390.1	0	-213.1	0		
				合計			45544		8063046	177.0	508376286		2667789.12
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.516				0.392		0.432

資表 5-18 F(0)IA 4時間(西側)

	幅方向												
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	4時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	32.1		第1層目	144.6	15	2169	7.5	16266	157.4	53752056		
15	1中	33.3		第2層目	142.4	15	2136	22.5	48063	142.4	43339024		
30	2上	34.3		第3層目	140.1	15	2102	37.5	78820	127.4	34139151		
45	2中	35.6		第4層目	137.9	15	2068	52.5	108584	112.4	26155598		
60	3上	36.5		第5層目	136.2	15	2044	67.5	137948	97.4	19414810		
75	3中	37.3		第6層目	135.4	15	2031	82.5	167545	82.4	13817510		
90	4上	37.3		第7層目	133.4	15	2000	97.5	195024	67.4	9116464		
105	4中	39.3		第8層目	130.7	15	1961	112.5	220556	52.4	5413958		
120	5上	40.0		第9層目	129.1	15	1936	127.5	246837	37.4	2740131		
135	5中	40.9		第10層目	128.1	15	1921	142.5	273707	22.4	997315		
150	6上	41.0		第11層目	125.9	15	1888	157.5	297344	7.4	137983		
165	6中	43.1		第12層目	122.8	15	1841	172.5	317616	-7.6	141675		
180	7上	44.1		第13層目	119.9	15	1798	187.5	337191	-22.6	954566		
195	7中	46.0		第14層目	118.1	15	1771	202.5	358638	-37.6	2540850		
210	8上	45.9		第15層目	120.7	15	1810	217.5	393702	-52.6	5047559		
225	8中	43.4		第16層目	123.3	15	1850	232.5	430009	-67.6	8493589		
240	9上	43.3		第17層目	120.4	15	1807	247.5	447134	-82.6	12368394		
255	9中	46.2		第18層目	115.6	15	1734	262.5	455096	-97.6	16556980		
270	10上	48.2		第19層目	111.0	15	1664	277.5	461850	-112.6	21143485		
285	10中	50.9		第20層目	104.1	15	1562	292.5	456936	-127.6	25475632		
300	11上	55.0		第21層目	95.1	15	1426	307.5	438487	-142.6	29035208		
315	11中	60.0	315-330	第22層目	86.9	15	1304	322.5	420500	-157.6	32421516		
330	12上	63.1	330-345	第23層目	77.8	15	1167	337.5	393989	-172.6	34810382		
345	12中	69.1		第24層目	63.8	15	957	352.5	337475	-187.6	33721832		
360	13上	77.1		第25層目	27.9	7.6	212	360.1	76287	-195.2	8075510		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	360.1	0	-195.2	0		
390				第27層目	0	15	0	375.1	0	-210.2	0		
405				第28層目	0	15	0	390.1	0	-225.2	0		
				合計			43159		7115605	164.9	439811177		2169458.53
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.489				0.339		0.351

資表 5-19 F(0)IA 8 時間(東側)

	幅方向											
上端からの		①東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	8時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	33.9		第1層目	140.1	15	2102	7.5	15766	164.4	56834377	
15	1中	35.9		第2層目	138.2	15	2074	22.5	46654	149.4	46301629	
30	2上	35.8		第3層目	135.8	15	2037	37.5	76388	134.4	36816402	
45	2中	38.4		第4層目	131.7	15	1975	52.5	103710	119.4	28184887	
60	3上	39.9		第5層目	128.5	15	1928	67.5	130137	104.4	21037178	
75	3中	41.5		第6層目	124.7	15	1871	82.5	154329	89.4	14975687	
90	4上	43.8		第7層目	123.6	15	1854	97.5	180736	74.4	10287163	
105	4中	42.7		第8層目	127.6	15	1914	112.5	215367	59.4	6783498	
120	5上	39.7		第9層目	130.6	15	1960	127.5	249839	44.4	3894315	
135	5中	39.6		第10層目	130.5	15	1957	142.5	278869	29.4	1724683	
150	6上	39.9		第11層目	130.9	15	1963	157.5	309216	14.4	442177	
165	6中	39.2		第12層目	131.5	15	1973	172.5	340256	-0.6	37769	
180	7上	39.3		第13層目	132.5	15	1988	187.5	372656	-15.6	522855	
195	7中	38.2		第14層目	132.2	15	1983	202.5	401573	-30.6	1897793	
210	8上	39.6		第15層目	129.2	15	1938	217.5	421482	-45.6	4071266	
225	8中	41.2		第16層目	126.7	15	1901	232.5	442006	-60.6	7024265	
240	9上	42.0		第17層目	125.5	15	1882	247.5	465770	-75.6	10799784	
255	9中	42.5		第18層目	124.6	15	1869	262.5	490672	-90.6	15388750	
270	10上	42.9		第19層目	123.9	15	1858	277.5	515713	-105.6	20770898	
285	10中	43.2		第20層目	120.0	15	1801	292.5	526676	-120.6	26235709	
300	11上	46.7		第21層目	109.9	15	1649	307.5	506960	-135.6	30359001	
315	11中	53.4	315-330	第22層目	101.5	15	1522	322.5	490764	-150.6	34556484	
330	12上	55.2	330-345	第23層目	92.4	15	1387	337.5	468003	-165.6	38067430	
345	12中	62.4		第24層目	77.8	15	1167	352.5	411235	-180.6	38085910	
360	13上	69.9		第25層目	35.2	6.4	225	358.9	80738	-187.0	7869985	
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	358.9	0	-187.0	0	
390				第27層目	0	0	0	358.9	0	-187.0	0	
405				第28層目	0	15	0	373.9	0	-202.0	0	
				合計			44775		7695514	171.9	462969895	2379931.2
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.508			0.357		0.385

資表 5-20 F(0)IA 8 時間(西側)

	幅方向											
上端からの		①西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	8時間			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	33.1		第1層目	142.6	15	2139	7.5	16043	170.0	61867234	
15	1中	34.3		第2層目	141.2	15	2118	22.5	47655	155.0	50931757	
30	2上	34.6		第3層目	138.6	15	2079	37.5	77979	140.0	40802501	
45	2中	36.8		第4層目	135.9	15	2039	52.5	107021	125.0	31895291	
60	3上	37.3		第5層目	135.6	15	2034	67.5	137275	110.0	24650736	
75	3中	37.1		第6層目	137.2	15	2058	82.5	169804	95.0	18618298	
90	4上	35.6		第7層目	139.0	15	2085	97.5	203317	80.0	13388625	
105	4中	35.3		第8層目	138.6	15	2079	112.5	233913	65.0	8826632	
120	5上	36.1		第9層目	135.7	15	2035	127.5	259450	50.0	5127603	
135	5中	38.3		第10層目	133.5	15	2003	142.5	285452	35.0	2492964	
150	6上	38.2		第11層目	134.9	15	2023	157.5	318595	20.0	847932	
165	6中	37.0		第12層目	135.8	15	2037	172.5	351434	5.0	89352	
180	7上	37.2		第13層目	136.6	15	2048	187.5	384061	-10.0	242796	
195	7中	36.2		第14層目	136.6	15	2049	202.5	414968	-25.0	1318082	
210	8上	37.1		第15層目	134.1	15	2011	217.5	437354	-40.0	3253285	
225	8中	38.8		第16層目	133.2	15	1998	232.5	464587	-55.0	6079723	
240	9上	38.0		第17層目	131.9	15	1978	247.5	489642	-70.0	9728017	
255	9中	40.1		第18層目	132.6	15	1989	262.5	522211	-85.0	14406881	
270	10上	37.2		第19層目	135.2	15	2027	277.5	562604	-100.0	20307633	
285	10中	37.6		第20層目	135.7	15	2035	292.5	595164	-115.0	26942664	
300	11上	36.8		第21層目	135.6	15	2034	307.5	625340	-130.0	34400680	
315	11中	37.7	315-330	第22層目	132.7	15	1990	322.5	641791	-145.0	41871879	
330	12上	39.7	330-345	第23層目	123.2	15	1847	337.5	623523	-160.0	47323613	
345	12中	47.2		第24層目	104.2	15	1562	352.5	550746	-175.0	47871887	
360	13上	58.7		第25層目	46.3	6.4	297	358.9	106430	-181.4	9757915	
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	358.9	0	-181.4	0	
390				第27層目	0	0	0	358.9	0	-181.4	0	
405				第28層目	0	15	0	373.9	0	-196.4	0	
				合計			48596		8626358	177.5	523043980	2769051.88
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.551			0.403		0.449

資表 5-21 LF-0.2（東側）

	幅方向							上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
上端からの		①											
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.2)			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	20.5		第1層目	164.4	15	2466	7.5	18498	143.7	50957101		
15	1中	25.1		第2層目	152.4	15	2286	22.5	51425	128.7	37882922		
30	2上	32.6		第3層目	137.0	15	2054	37.5	77037	113.7	26582638		
45	2中	40.5		第4層目	123.6	15	1854	52.5	97331	98.7	18084503		
60	3上	45.9		第5層目	118.1	15	1771	67.5	119561	83.7	12433610		
75	3中	46.0		第6層目	118.4	15	1776	82.5	146532	68.7	8409098		
90	4上	45.6		第7層目	119.5	15	1792	97.5	174725	53.7	5195733		
105	4中	44.9		第8層目	121.2	15	1818	112.5	204525	38.7	2752805		
120	5上	43.9		第9層目	121.8	15	1827	127.5	232923	23.7	1057865		
135	5中	44.4		第10層目	119.0	15	1785	142.5	254309	8.7	167640		
150	6上	46.7		第11層目	117.3	15	1759	157.5	277039	-6.3	103439		
165	6中	46.1		第12層目	117.7	15	1765	172.5	304523	-21.3	836206		
180	7上	46.2		第13層目	117.5	15	1762	187.5	330328	-36.3	2358187		
195	7中	46.3		第14層目	118.2	15	1773	202.5	358972	-51.3	4703716		
210	8上	45.5		第15層目	119.5	15	1792	217.5	389787	-66.3	7918127		
225	8中	45.0		第16層目	119.2	15	1788	232.5	415605	-81.3	11857106		
240	9上	45.8		第17層目	118.2	15	1774	247.5	438985	-96.3	16491685		
255	9中	45.9		第18層目	117.3	15	1759	262.5	461829	-111.3	21838639		
270	10上	46.8		第19層目	115.5	15	1732	277.5	480706	-126.3	27677896		
285	10中	47.7		第20層目	112.6	15	1689	292.5	494076	-141.3	33770574		
300	11上	49.7		第21層目	83.5	15	1252	307.5	384959	-156.3	30618362		
315	11中	76.9	315-330	第22層目	28.1	15	422	322.5	135982	-171.3	12384866		
330	12上	105.0	330-345	第23層目	0.0	13	0	335.5	0	-184.3	0		
345	12中	105.0		第24層目	0	0	0	335.5	0	-184.3	0		
360	13上	105.0		第25層目	0	0	0	335.5	0	-184.3	0		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	335.5	0	-184.3	0		
390				第27層目	0	0	0	335.5	0	-184.3	0		
405				第28層目	0	15	0	350.5	0	-199.3	0		
				合計			38696		5849659	151.2	334082719		1741565.01
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.439				0.258		0.282

資表 5-22 LF-0.2（西側）

	幅方向							上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
上端からの		②											
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.2)			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	28.0		第1層目	150.4	15	2256	7.5	16920	152.6	52549647		
15	1中	31.6		第2層目	142.5	15	2137	22.5	48079	137.6	40474639		
30	2上	35.9		第3層目	133.2	15	1998	37.5	74928	122.6	30050423		
45	2中	40.9		第4層目	126.1	15	1891	52.5	99288	107.6	21915016		
60	3上	43.0		第5層目	122.5	15	1838	67.5	124072	92.6	15782094		
75	3中	44.4		第6層目	120.6	15	1809	82.5	149243	77.6	10916036		
90	4上	45.0		第7層目	121.2	15	1818	97.5	177277	62.6	7150161		
105	4中	43.8		第8層目	121.3	15	1819	112.5	204635	47.6	4148531		
120	5上	44.9		第9層目	119.9	15	1799	127.5	229337	32.6	1940643		
135	5中	45.2		第10層目	118.9	15	1784	142.5	254245	17.6	583606		
150	6上	45.9		第11層目	116.1	15	1742	157.5	274369	2.6	44079		
165	6中	48.0		第12層目	112.8	15	1692	172.5	291831	-12.4	293532		
180	7上	49.2		第13層目	111.1	15	1666	187.5	312398	-27.4	1285761		
195	7中	49.7		第14層目	110.4	15	1657	202.5	335462	-42.4	3014862		
210	8上	49.9		第15層目	110.2	15	1653	217.5	359495	-57.4	5484340		
225	8中	49.9		第16層目	110.0	15	1649	232.5	383468	-72.4	8685862		
240	9上	50.1		第17層目	110.5	15	1657	247.5	410176	-87.4	12702210		
255	9中	49.4		第18層目	110.6	15	1658	262.5	435310	-102.4	17433502		
270	10上	50.0		第19層目	107.9	15	1618	277.5	448988	-117.4	22345722		
285	10中	52.1		第20層目	103.8	15	1558	292.5	455598	-132.4	27350087		
300	11上	54.1		第21層目	102.9	15	1543	307.5	474557	-147.4	33577533		
315	11中	53.1	315-330	第22層目	101.5	15	1522	322.5	490837	-162.4	40188549		
330	12上	55.5	330-345	第23層目	67.6	13	878	335.5	294728	-175.4	27051145		
345	12中	86.9		第24層目	36.11	0	0	335.5	0	-175.4	0		
360	13上	105.0		第25層目	0	0	0	335.5	0	-175.4	0		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	335.5	0	-175.4	0		
390				第27層目	0	0	0	335.5	0	-175.4	0		
405				第28層目	0	15	0	350.5	0	-190.4	0		
				合計			39643		6345240	160.1	384967981		2104339.35
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.449				0.297		0.341

資表 5-23 LF-0.4(1) (東側)

	幅方向											
上端からの		東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.4)-1			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	18.0		第1層目	168.5	15	2527	7.5	18951	163.9	67936868	
15	1中	23.5		第2層目	157.0	15	2355	22.5	52991	148.9	52269880	
30	2上	29.5		第3層目	143.3	15	2150	37.5	80626	133.9	38596112	
45	2中	37.2		第4層目	130.9	15	1963	52.5	103080	118.9	27800287	
60	3上	41.9		第5層目	122.6	15	1839	67.5	124148	103.9	19894316	
75	3中	45.5		第6層目	116.9	15	1754	82.5	144682	88.9	13897027	
90	4上	47.6		第7層目	117.3	15	1760	97.5	171617	73.9	9649100	
105	4中	45.1		第8層目	122.0	15	1829	112.5	205816	58.9	6383961	
120	5上	43.0		第9層目	126.5	15	1898	127.5	241931	43.9	3694644	
135	5中	40.5		第10層目	127.6	15	1915	142.5	272841	28.9	1636507	
150	6上	41.8		第11層目	122.5	15	1837	157.5	289335	13.9	390051	
165	6中	45.7		第12層目	117.8	15	1767	172.5	304833	-1.1	35222	
180	7上	46.5		第13層目	118.1	15	1771	187.5	332142	-16.1	491638	
195	7中	45.4		第14層目	119.6	15	1794	202.5	363255	-31.1	1767202	
210	8上	45.0		第15層目	120.3	15	1804	217.5	392414	-46.1	3865952	
225	8中	44.7		第16層目	121.0	15	1815	232.5	421953	-61.1	6806337	
240	9上	44.3		第17層目	123.2	15	1848	247.5	457343	-76.1	10732248	
255	9中	42.5		第18層目	123.7	15	1856	262.5	487088	-91.1	15430167	
270	10上	43.8		第19層目	120.9	15	1814	277.5	503246	-106.1	20443909	
285	10中	45.3		第20層目	119.5	15	1792	292.5	524153	-121.1	26307600	
300	11上	45.2		第21層目	117.4	15	1761	307.5	541600	-136.1	32651669	
315	11中	47.4	315-330	第22層目	116.7	15	1750	322.5	564319	-151.1	39976499	
330	12上	46.0	330-345	第23層目	111.8	15	1677	337.5	566114	-166.1	46301597	
345	12中	52.2		第24層目	90.8	15	1362	352.5	480211	-181.1	44698714	
360	13上	67.0		第25層目	38.0	1	38	353.5	13440	-182.1	1260580	
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	353.5	0	-182.1	0	
390				第27層目	0	0	0	353.5	0	-182.1	0	
405				第28層目	0	15	0	368.5	0	-197.1	0	
				合計			44676		7658128	171.4	492918085	2599958.71
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.507				0.380	0.421

資表 5-24 LF-0.4(1) (西側)

	幅方向											
上端からの		西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.4)-1			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	16.2		第1層目	173.2	15	2598	7.5	19483	161.7	67958426	
15	1中	20.6		第2層目	164.2	15	2462	22.5	55406	146.7	53028769	
30	2上	25.2		第3層目	150.3	15	2254	37.5	84527	131.7	39128606	
45	2中	34.5		第4層目	134.7	15	2020	52.5	106068	116.7	27544937	
60	3上	40.8		第5層目	125.7	15	1886	67.5	127276	101.7	19531250	
75	3中	43.5		第6層目	123.2	15	1848	82.5	152423	86.7	13917126	
90	4上	43.4		第7層目	123.7	15	1856	97.5	180919	71.7	9569659	
105	4中	42.9		第8層目	124.6	15	1869	112.5	210237	56.7	6039410	
120	5上	42.5		第9層目	126.1	15	1891	127.5	241080	41.7	3320759	
135	5中	41.5		第10層目	124.6	15	1868	142.5	266247	26.7	1365332	
150	6上	44.0		第11層目	122.1	15	1832	157.5	288520	11.7	284398	
165	6中	43.9		第12層目	122.2	15	1833	172.5	316167	-3.3	54528	
180	7上	43.9		第13層目	122.8	15	1842	187.5	345459	-18.3	652690	
195	7中	43.3		第14層目	123.8	15	1858	202.5	376179	-33.3	2096854	
210	8上	42.9		第15層目	123.7	15	1856	217.5	403604	-48.3	4366813	
225	8中	43.4		第16層目	122.3	15	1834	232.5	426504	-63.3	7388611	
240	9上	44.3		第17層目	120.3	15	1805	247.5	446669	-78.3	11103126	
255	9中	45.4		第18層目	114.6	15	1719	262.5	451316	-93.3	15003909	
270	10上	50.0		第19層目	113.2	15	1697	277.5	470987	-108.3	19944817	
285	10中	46.8		第20層目	116.5	15	1747	292.5	510968	-123.3	26597872	
300	11上	46.7		第21層目	117.7	15	1765	307.5	542776	-138.3	33802596	
315	11中	45.6	315-330	第22層目	116.9	15	1753	322.5	565455	-153.3	41247132	
330	12上	47.5	330-345	第23層目	108.7	15	1630	337.5	550066	-168.3	46204328	
345	12中	53.9		第24層目	91.4	15	1371	352.5	483410	-183.3	46110781	
360	13上	64.7		第25層目	40.3	1	40	353.5	14243	-184.3	1368761	
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	353.5	0	-184.3	0	
390				第27層目	0	0	0	353.5	0	-184.3	0	
405				第28層目	0	15	0	368.5	0	-199.3	0	
				合計			45134		7635990	169.2	497631489	2594307.59
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.512				0.384	0.420

資表 5-25 LF-0.4(2) (東側)

	幅方向											
上端からの		載荷点から400						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.4)-2			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	17.4		第1層目	170.8	15	2562	7.5	19216	165.3	70019271	
15	1中	21.8		第2層目	159.3	15	2390	22.5	53767	150.3	53997417	
30	2上	28.9		第3層目	144.4	15	2166	37.5	81214	135.3	39661797	
45	2中	36.7		第4層目	133.6	15	2003	52.5	105171	120.3	29008783	
60	3上	39.7		第5層目	127.9	15	1919	67.5	129499	105.3	21291713	
75	3中	42.4		第6層目	123.2	15	1848	82.5	152441	90.3	15087728	
90	4上	44.4		第7層目	122.0	15	1830	97.5	178396	75.3	10397442	
105	4中	43.6		第8層目	125.4	15	1881	112.5	211604	60.3	6865072	
120	5上	41.0		第9層目	126.4	15	1895	127.5	241654	45.3	3917794	
135	5中	42.6		第10層目	124.7	15	1870	142.5	266461	30.3	1747099	
150	6上	42.7		第11層目	121.8	15	1828	157.5	287859	15.3	459792	
165	6中	45.5		第12層目	119.1	15	1787	172.5	308223	0.3	33622	
180	7上	45.4		第13層目	119.1	15	1787	187.5	335095	-14.7	421883	
195	7中	45.4		第14層目	118.6	15	1778	202.5	360111	-29.7	1606372	
210	8上	46.0		第15層目	117.1	15	1757	217.5	382088	-44.7	3549552	
225	8中	46.9		第16層目	115.8	15	1737	232.5	403748	-59.7	6230386	
240	9上	47.4		第17層目	115.3	15	1730	247.5	428218	-74.7	9697700	
255	9中	47.3		第18層目	114.4	15	1716	262.5	450568	-89.7	13855673	
270	10上	48.3		第19層目	112.9	15	1693	277.5	469821	-104.7	18605822	
285	10中	48.9		第20層目	113.8	15	1706	292.5	499144	-119.7	24499476	
300	11上	47.4		第21層目	117.8	15	1767	307.5	543468	-134.7	32120306	
315	11中	44.8	315-330	第22層目	118.9	15	1783	322.5	575130	-149.7	40020626	
330	12上	46.3	330-345	第23層目	111.0	15	1665	337.5	562013	-164.7	45225026	
345	12中	52.7		第24層目	104.66	15	1570	352.5	553390	-179.7	50748198	
360	13上	62.2		第25層目	85.56	7.4	633	359.9	227869	-187.1	22176818	
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	359.9	0	-187.1	0	
390				第27層目	0	0	0	359.9	0	-187.1	0	
405				第28層目	0	15	0	374.9	0	-202.1	0	
				合計			45301		7826167	172.8	521245367	3314935.37
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.514				0.402	0.537

資表 5-26 LF-0.4(2) (西側)

	幅方向											
上端からの		載荷点から200						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する	
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.4)-2			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント	
0	1上	16.9		第1層目	172.4	15	2587	7.5	19399	156.8	63637474	
15	1中	20.7		第2層目	163.1	15	2447	22.5	55050	141.8	49237877	
30	2上	26.2		第3層目	152.5	15	2288	37.5	85804	126.8	36828699	
45	2中	31.2		第4層目	142.7	15	2141	52.5	112380	111.8	26793367	
60	3上	36.1		第5層目	135.2	15	2028	67.5	136910	96.8	19041777	
75	3中	38.7		第6層目	131.8	15	1976	82.5	163059	81.8	13260554	
90	4上	39.5		第7層目	130.5	15	1958	97.5	190878	66.8	8771273	
105	4中	40.0		第8層目	130.2	15	1952	112.5	219637	51.8	5274178	
120	5上	39.9		第9層目	129.3	15	1939	127.5	247248	36.8	2661808	
135	5中	40.8		第10層目	125.9	15	1889	142.5	269197	21.8	932796	
150	6上	43.2		第11層目	124.6	15	1869	157.5	294297	6.8	121313	
165	6中	42.2		第12層目	123.2	15	1848	172.5	318858	-8.2	159096	
180	7上	44.6		第13層目	122.9	15	1844	187.5	345783	-23.2	1027604	
195	7中	42.5		第14層目	125.3	15	1879	202.5	380447	-38.2	2777472	
210	8上	42.3		第15層目	125.9	15	1888	217.5	410667	-53.2	5380227	
225	8中	41.9		第16層目	125.0	15	1875	232.5	435850	-68.2	8755724	
240	9上	43.2		第17層目	120.9	15	1814	247.5	448990	-83.2	12593119	
255	9中	45.9		第18層目	116.4	15	1746	262.5	458384	-98.2	16873678	
270	10上	47.7		第19層目	111.2	15	1668	277.5	462745	-113.2	21401490	
285	10中	51.1		第20層目	107.3	15	1609	292.5	470669	-128.2	26478535	
300	11上	51.6		第21層目	95.9	15	1438	307.5	442177	-143.2	29516427	
315	11中	62.6	315-330	第22層目	83.2	15	1249	322.5	402698	-158.2	31276224	
330	12上	64.2	330-345	第23層目	80.3	15	1205	337.5	406595	-173.2	36164249	
345	12中	65.5		第24層目	79.04	15	1186	352.5	417924	-188.2	42017453	
360	13上	75.2		第25層目	59.54	7.4	441	359.9	158571	-195.6	16859770	
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	359.9	0	-195.6	0	
390				第27層目	0	0	0	359.9	0	-195.6	0	
405				第28層目	0	15	0	374.9	0	-210.6	0	
				合計			44762		7354215	164.3	477842184	2883694.33
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑	断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合	元断面に対する割合	
							0.508				0.369	0.467

資表 5-27 LF-0.6（東側）

	幅方向												
上端からの		東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.6)			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	17.0		第1層目	173.1	15	2597	7.5	19477	164.2	70081064		
15	1中	19.9		第2層目	165.8	15	2487	22.5	55952	149.2	55416308		
30	2上	24.3		第3層目	151.7	15	2276	37.5	85348	134.2	41041986		
45	2中	33.9		第4層目	138.9	15	2083	52.5	109352	119.2	29642580		
60	3上	37.2		第5層目	137.1	15	2057	67.5	138824	104.2	22376135		
75	3中	35.7		第6層目	134.3	15	2015	82.5	166221	89.2	16074860		
90	4上	40.0		第7層目	131.4	15	1971	97.5	192209	74.2	10895564		
105	4中	38.6		第8層目	132.7	15	1991	112.5	223948	59.2	7017800		
120	5上	38.7		第9層目	131.4	15	1971	127.5	251341	44.2	3891103		
135	5中	39.9		第10層目	129.7	15	1946	142.5	277277	29.2	1697462		
150	6上	40.4		第11層目	126.8	15	1901	157.5	299482	14.2	419975		
165	6中	42.8		第12層目	124.1	15	1862	172.5	321122	-0.8	36046		
180	7上	43.1		第13層目	126.2	15	1892	187.5	354825	-15.8	506896		
195	7中	40.8		第14層目	127.9	15	1919	202.5	388572	-30.8	1854314		
210	8上	41.3		第15層目	126.6	15	1898	217.5	412902	-45.8	4014831		
225	8中	42.1		第16層目	124.0	15	1860	232.5	432363	-60.8	6905430		
240	9上	43.9		第17層目	121.3	15	1820	247.5	450438	-75.8	10486263		
255	9中	44.8		第18層目	123.4	15	1850	262.5	485691	-90.8	15283688		
270	10上	41.9		第19層目	126.8	15	1902	277.5	527805	-105.8	21319199		
285	10中	41.3		第20層目	125.5	15	1882	292.5	550434	-120.8	27488435		
300	11上	43.2		第21層目	120.5	15	1808	307.5	555899	-135.8	33364438		
315	11中	46.3	315-330	第22層目	116.5	15	1748	322.5	563666	-150.8	39769999		
330	12上	47.2	330-345	第23層目	113.7	15	1706	337.5	575758	-165.8	46918427		
345	12中	49.1		第24層目	111.89	15	1678	352.5	591618	-180.8	54884244		
360	13上	56.6		第25層目	96.89	3.4	329	355.9	117243	-184.2	11175582		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	355.9	0	-184.2	0		
390				第27層目	0	0	0	355.9	0	-184.2	0		
405				第28層目	0	0	0	355.9	0	-184.2	0		
				合計			47449		8147766	171.7	532562630		3364619.1
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.538				0.411		0.545

資表 5-28 LF-0.6（西側）

	幅方向												
上端からの		西						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.6)			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	18.6		第1層目	170.3	15	2554	7.5	19153	168.2	72318995		
15	1中	21.2		第2層目	158.3	15	2374	22.5	53416	153.2	55782968		
30	2上	30.6		第3層目	142.6	15	2139	37.5	80196	138.2	40900162		
45	2中	36.9		第4層目	130.4	15	1957	52.5	102725	123.2	29748118		
60	3上	42.7		第5層目	125.0	15	1875	67.5	126552	108.2	21995032		
75	3中	42.3		第6層目	124.9	15	1874	82.5	154564	93.2	16317888		
90	4上	42.8		第7層目	126.0	15	1889	97.5	184217	78.2	11597252		
105	4中	41.3		第8層目	126.8	15	1901	112.5	213899	63.2	7636254		
120	5上	42.0		第9層目	124.4	15	1865	127.5	237839	48.2	4373429		
135	5中	43.7		第10層目	122.9	15	1844	142.5	262763	33.2	2070237		
150	6上	43.4		第11層目	125.5	15	1882	157.5	296447	18.2	660535		
165	6中	41.1		第12層目	127.7	15	1915	172.5	330359	3.2	55840		
180	7上	41.2		第13層目	126.3	15	1894	187.5	355078	-11.8	298032		
195	7中	42.5		第14層目	124.7	15	1870	202.5	378640	-26.8	1375435		
210	8上	42.8		第15層目	125.4	15	1880	217.5	408971	-41.8	3316546		
225	8中	41.8		第16層目	126.5	15	1897	232.5	441064	-56.8	6150301		
240	9上	41.7		第17層目	127.5	15	1912	247.5	473158	-71.8	9884232		
255	9中	40.9		第18層目	127.4	15	1910	262.5	501480	-86.8	14420603		
270	10上	41.8		第19層目	126.5	15	1897	277.5	526390	-101.8	19683547		
285	10中	41.8		第20層目	125.4	15	1881	292.5	550105	-116.8	25680792		
300	11上	42.9		第21層目	125.8	15	1887	307.5	580137	-131.8	32795449		
315	11中	41.4	315-330	第22層目	127.2	15	1908	322.5	615378	-146.8	41142290		
330	12上	41.4	330-345	第23層目	122.1	15	1831	337.5	618005	-161.8	47956375		
345	12中	46.5		第24層目	117	15	1755	352.5	618638	-176.8	54874969		
360	13上	57.7		第25層目	94.63	3.4	322	355.9	114508	-180.2	10444912		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	355.9	0	-180.2	0		
390				第27層目	0	0	0	355.9	0	-180.2	0		
405				第28層目	0	0	0	355.9	0	-180.2	0		
				合計			46912		8243680	175.7	531480195		3445041.14
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.532				0.410		0.558

資表 5-29 LF-0.8

	幅方向												
上端からの		東						上端からの	上端に関する	図心軸からの	図心軸に関する		
距離[mm]	ラミナ層	LF(0.8)			幅[mm]	厚さ[mm]	面積[mm]	距離[mm]	断面1次モーメ	距離[mm]	断面2次モーメント		
0	1上	25.6		第1層目	157.3	15	2360	7.5	17696	156.2	57632068		
15	1中	27.1		第2層目	150.0	15	2250	22.5	50625	141.2	44918416		
30	2上	32.9		第3層目	138.6	15	2079	37.5	77963	126.2	33164080		
45	2中	38.5		第4層目	130.6	15	1959	52.5	102848	111.2	24272277		
60	3上	40.9		第5層目	125.2	15	1878	67.5	126765	96.2	17424712		
75	3中	43.9		第6層目	117.6	15	1764	82.5	145530	81.2	11671563		
90	4上	48.5		第7層目	112.4	15	1686	97.5	164385	66.2	7426375		
105	4中	49.1		第8層目	113.9	15	1709	112.5	192206	51.2	4515443		
120	5上	47.0		第9層目	114.3	15	1715	127.5	218599	36.2	2282216		
135	5中	48.7		第10層目	113.6	15	1704	142.5	242820	21.2	799729		
150	6上	47.7		第11層目	110.1	15	1652	157.5	260111	6.2	94998		
165	6中	52.2		第12層目	105.3	15	1580	172.5	272464	-8.8	151190		
180	7上	52.5		第13層目	107.0	15	1605	187.5	300938	-23.8	937189		
195	7中	50.5		第14層目	109.8	15	1647	202.5	333518	-38.8	2506925		
210	8上	49.7		第15層目	109.9	15	1649	217.5	358549	-53.8	4797653		
225	8中	50.4		第16層目	106.4	15	1596	232.5	371070	-68.8	7578625		
240	9上	53.2		第17層目	101.1	15	1517	247.5	375334	-83.8	10671171		
255	9中	55.7		第18層目	101.3	15	1520	262.5	398869	-98.8	14852973		
270	10上	53.0		第19層目	106.0	15	1590	277.5	441225	-113.8	20611338		
285	10中	51.0		第20層目	109.1	15	1637	292.5	478676	-128.8	27168034		
300	11上	49.9		第21層目	110.7	15	1661	307.5	510604	-143.8	34354918		
315	11中	49.4	315-330	第22層目	102.7	15	1541	322.5	496811	-158.8	38863272		
330	12上	57.9	330-345	第23層目	83.3	15	1250	337.5	421706	-173.8	37754764		
345	12中	68.8		第24層目	72.4	8.7	630	346.2	218064	-182.5	20976768		
360	13上	105.0		第25層目	0	0	0	346.2	0	-182.5	0		
375	13中	105.0		第26層目	0	0	0	346.2	0	-182.5	0		
390				第27層目	0	0	0	346.2	0	-182.5	0		
405				第28層目	0	0	0	346.2	0	-182.5	0		
				合計			40173		6577374	163.7	425426697		2558599.52
							断面積↑			図心軸↑	断面2次モーメント↑		断面係数↑
							元断面に対する割合			元断面に対する割合		元断面に対する割合	
							0.455				0.328		0.414

謝　　辞

謝辞

本論文は多くの方々からのご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。

本論文をまとめるにあたり、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 モリスマーティン教授には、ご多忙の中、審査委員をお引き受け頂き、貴重な御教示を賜りました。ここに深く感謝し、御礼申し上げます。また、モリスマーティン教授には、筆者の英文要旨において丁寧なご指導を頂いたことを感謝致します。審査いただきました先生方からのご意見は、今後の研究に大いに参考となるものであり、これからの研究に活かしていきたいと思います。

本論文については、平成 25 年度から平成 26 年度において実施された、(一財)ベターリビングつくば建築試験研究センターと斎藤木材工業(株)との共同研究「構造用集成材を用いた木構造梁部材の火災時耐力およびその耐火性能評価」における成果をとりまとめたものであります。 (一財)ベターリビング井上俊之理事長、那珂正顧問、二木幹夫常務理事には、本研究を進めるにあたり、働きながら社会人博士課程への進学にご理解と格別のご配慮を頂きました。ここに深謝の意を表します。

(一財)ベターリビングつくば建築試験研究センター 藤本効所長、同 性能試験研究部 佐久間博文部長そして、旧防耐火性能試験研究部 吉川利文部長(現 試験研究推進役) をはじめとする部員の皆様には、試験業務多忙の時も、筆者の研究業務および論文作成において一方ならぬ御支援と多大なるご協力そしてご助言を頂いたこと、心より感謝致します。

共同研究を遂行するにあたり、齋藤木材工業(株)様においては、構造用集成材の製造に御支援とご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。そして研究委員会においては、齋藤木材工業(株) 齋藤健氏、齋藤潔氏、白石昭夫氏より実験計画から実験方法そして実験結果の分析に至るまで、有益な御助言を頂きましたことを御礼申し上げます。試験体製作および実験補助作業においては、三生技研(株) 井口久生氏、菅原鉄治氏はじめとした職員の皆様にも多大なるご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

千葉大学耐火構造研究会の皆様からは、研究の遂行および論文作成にあたり、大変貴重なご意見を頂きました。千葉大学 平島研究室の松本匠氏、片倉佑介氏においては、本研究に関心を寄せて頂き、その成果を自身の修士論文としてまとめて頂いたことを感謝致します。千葉大学名誉教授 上杉英樹先生には、筆者が学部４年生の時から今日に至るまで、学生時代の研究から現在の耐火性能評価業務そして本論文作成においても、長年にわたりご指導や貴重なご意見を頂いて参りました。ここに感謝の意を表します。

千葉大学教授 平島岳夫先生には、研究計画から実験遂行そして論文作成に至るまで、懇切丁寧なご指導を頂きました。平島岳夫先生には、本論文におけるご指導はもとより、研究に対する向き合い方、文章を書くことの難しさそして本研究を通して得ることができた事柄に対して感謝の気持ちを持ち続けることの大切さを教えて頂きました。この４年間、筆者の力量不足の点が多々あり、途中で何度かあきらめかけた時がありました。その時も、平島岳夫先生は惜しみないご指導と激励を絶えず下さったことで、筆者でも最後までやりきることができました。平島岳夫先生から教えて頂いたことは多岐にわたり、これからの筆者の人生において教訓となるものであります。今後は、研究者そして技術者として一層精進しながら、後身の育成も念頭に置きつつ、防耐火分野において少しでも多く活躍していくことで、これまでのご恩に報いたいと思います。

最後になりますが、本論文への取り組みを心から喜んだ両親や兄弟に感謝するとともに、この４年間、いつも近くで暖かく見守りながら筆者の体調を気遣い、精神的な支えとなった妻直子の理解と協力に心より感謝致します。

本論文は、多くの方々のご理解、ご指導、ご協力のもとで遂行されたものであります。皆様のお力添えなくしては、本論文の完成は遂げられませんでした。ここで深く感謝の意を表し、本論文の謝辞といたします。

2016 年　9 月

金城　仁

発 表 論 文

発表論文

本研究に関連する発表論文

(1) 金城仁, 遊佐秀逸, 堀尾岳成, 平島岳夫, 松本匠, 齋藤潔 : 標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁の放冷過程における挙動 構造用集成材梁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 80 巻 第 711 号 pp.831-840 2015.5

(2) 金城仁, 堀尾岳成, 平島岳夫, 片倉佑介, 齋藤潔, 遊佐秀逸 : 標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁の放冷過程におけるたわみ挙動および耐力 構造用集成材梁の耐火性に関する研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集 第 81 巻 第 726 号 pp.1355-1361 2016.8

(3) 金城仁, 片倉佑介, 平島岳夫, 遊佐秀逸:カラマツ集成材梁の標準火災加熱後の放冷過程における炭化性状および断面内温度, 日本火災学会論文集 第 66 巻 第 1 号 pp.1-11 2016.6

本研究に関連する講演発表

(1) KINJO H, YUSA S, HORIO T, HIRASHIMA T, MATSUMOTO T, SAITO K., “FIRE PERFORMANCE, INCLUDING THE COOLIMG PHASE, OF STRUCTURAL GLUDE LAMINATED TIMBER BEAMS”, 8th International Conference on Structures in Fire, Shanghai, China, pp.593-600, June 11-13, 2014 （口頭発表）

(2) KATAKURA Y, KINJO H, HIRASHIMA T, YUSA S, SAITO K., “DEFLECTION BEHAVIOR AND LOAD-BEARING-PERIOD OF STRUCTURAL GLUED LAMINATED TIMBER BEAMS IN FIRE INCLUDING COOLING PHASE”, 9th International Conference on Structures in Fire, Princeton, United States of America, pp.667-674, June 8-10, 2016

(3) 金城仁, 齋藤潔, 松本匠, 堀尾岳成, 遊佐秀逸, 平島岳夫 : 構造用集成材梁部材の火災時耐力 その 1, 実験概要及び試験体, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿) pp.257-258 2014.9

(4) 齋藤潔, 松本匠, 金城仁, 堀尾岳成, 遊佐秀逸, 平島岳夫 : 構造用集成材梁部材の火災時耐力 その 2, 炭化速度及び温度分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿) pp.259-260 2014.9

(5) 松本匠, 齋藤潔, 金城仁, 堀尾岳成, 遊佐秀逸, 平島岳夫 : 構造用集成材梁部材の火災時耐力 その 3, 火災終了後の耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿) pp.261-262 2014.9

(6) 金城仁, 松本匠, 遊佐秀逸, 堀尾岳成, 齋藤潔, 平島岳夫 : カラマツ集成材を用いた木構造梁部材の火災時耐力 その 1, 炭化速度及び温度分布, 日本火災学会研究発表会梗概集, pp.132-133 2014.5

(7) 松本匠, 金城仁, 遊佐秀逸, 堀尾岳成, 齋藤潔, 平島岳夫 : カラマツ集成材を用いた木構造梁部材の火災時耐力 その 2, 火災時耐力, 日本火災学会研究発表会梗概集, pp.134-135 2014.5

(8) 堀尾岳成, 金城仁, 片倉佑介, 齋藤潔, 遊佐秀逸, 平島岳夫 : 構造用集成材梁部材の火災時耐力 その 5, 長期許容耐力に基づく載荷加熱実験(実験概要および試験体), 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東) pp.117-118 2015.9

(9) 金城仁, 堀尾岳成, 片倉佑介, 齋藤潔, 遊佐秀逸, 平島岳夫 : 構造用集成材梁部材の火災時耐力 その 6, 長期許容耐力に基づく載荷加熱実験(温度・たわみ・破壊性状・耐力低下), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) pp.119-120 2015.9

その他の論文

(1) 金城仁, 平山実江子, 平島岳夫, 遊佐秀逸, 上杉英樹 : 杉材で被覆したアルミニウム合金部材の火災時における内部温度性状, 構造工学論文集 Vol.53B, pp.207-212, 2007.3

(2) 金城仁, 福田泰孝, 須藤昌照, 吉川利文, 遊佐秀逸, 常世田昌寿, 平島岳夫, 原田和典, 齋藤潔 : H 形鋼内蔵型カラマツ集成材柱の燃え止まりに関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.54B, pp.193-200, 2008.3

その他の著者が関係した講演発表

(1) 宮田博文, 金城仁, 周哲民, 原田昌利, 茂木武, 上杉英樹, 齋藤光 : 合成スラブの火災時における耐力変形性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.191-192 1997.7

(2) 上杉英樹, 金城仁, 鈴木博巳, 小林譲, 長尾覚博, 丹羽博則,吉岡研三, 齋藤光 : 鋼板巻き鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.213-216 1997.7

(3) 金城仁, 北野貴之, 鈴木博巳, 丹羽博則, 長尾覚博, 吉岡研三, 上杉英樹, 齋藤光 : 鋼板巻き鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する解析, 純圧縮の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.37-38 1998.7

(4) 金城仁, 鈴木博巳, 丹羽博則, 長尾覚博, 上杉英樹, 齋藤光 : 鋼板巻き鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する解析的研究, 曲げ圧縮を受ける場合その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.69-70 1999.7

(5) 上杉英樹, 金城仁, 鈴木博巳, 丹羽博則, 長尾覚博, 齋藤光 : 鋼板巻き鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する解析的研究, 曲げ圧縮を受ける場合その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.67-68 1999.7

(6) 吉川利文, 仲谷一郎, 須藤昌照, 金城仁, 中村賢一 : 載荷加熱試験による不燃下地防火構造外壁の耐火性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.153-154 2000.7

(7) 金城仁, 西本俊郎, 林吉彦, 吉岡英樹, 増田秀昭, 野口貴文 : 屋根に落下した火の粉の延焼加害性 その 2, 飛び火試験における野地板燃焼性状の基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.325-326 2004.7

(8) 常世田昌寿, 福田泰孝, 須藤昌照, 吉川利文, 金城仁,平島岳夫, 原田和典, 遊佐秀逸, 齋藤潔 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 21, H 型鋼内蔵型カラマツ集成材の柱部材温度予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.133-134 2005.7

(9) 金城仁, 福田泰孝, 須藤昌照, 吉川利文, 常世田昌寿, 平島岳夫, 原田和典, 遊佐秀逸, 齋藤潔 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 20, H 型鋼内蔵型カラマツ集成材の柱部材温度測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.131-132 2005.7

(10) 福田泰孝, 遊佐秀逸, 増田秀昭, 吉川利文, 須藤昌照, 金城仁 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 17, 木材被覆型柱梁仕口部の耐火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.125-126 2005.7

(11) 吉川利文, 遊佐秀逸, 増田秀昭, 須藤昌照, 福田泰孝, 金城仁 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 16, 集成材被覆平鋼梁の載荷加熱試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.123-124 2005.7

(12) 須藤昌照, 山田誠, 宮林正幸, 吉川利文, 福田泰孝, 金城仁, 中村賢一:API 接着剤を用いた構造用集成材の耐火性能に関する研究 その 3, 燃えしろ設計を適用した柱部材の載荷加熱試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.25-26 2005.7

(13) 山本盛男, 谷部徹, 遊佐秀逸, 金城仁 : 水系発泡性耐火塗料の性能評価, その 2 載荷加熱試験における膜厚の設定方法と試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.141-142 2006.7

(14) 谷部徹, 山本盛男, 遊佐秀逸, 金城仁 : 水系発泡性耐火塗料の性能評価, その 1 膜厚推定式適用に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.139-140 2006.7

(15) 西田一郎, 増田秀昭, 金城仁 : 木質複合構造の耐火性能 その 5, 燃え止まり火害調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.77-78 2006.7

(16) 金城仁, 増田秀昭, 西田一郎, 伊藤彩子, 安本辰也, 中村和孝 : 木質複合構造の耐火性能 その 4, 実大火災実験による部材温度測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.75-76 2006.7

(17) 安本辰也, 増田秀昭, 金城仁 : 木質複合構造の耐火性能 その 2, ボルト接合部の耐火性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.71-72 2006.7

(18) 遊佐秀逸, 吉川利文, 須藤昌照, 福田泰孝, 金城仁, 阪口明弘, 長村寛行 : 5 階建て木質ハイブリッド建築物の実現に関する研究, 日本建築学会研究報告集 I pp.289-292 2006.7

(19) 須藤昌照, 遊佐秀逸, 吉川利文, 金城仁, 長村寛行, 大内富夫 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 25, 5 階建て木質複合構造建築物の実現, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.67-68 2006.7

(20) 並木勝義, 遊佐秀逸, 吉川利文, 須藤昌照, 金城仁 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 24, H 形鋼梁構造のスギ材被覆による 2 時間耐火性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.65-66 2006.7

(21) 遊佐秀逸, 吉川利文, 須藤昌照, 金城仁, 並木勝義, 増田秀昭 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 22, 鋼構造の燃え尽き型木材被覆による耐火性能の確保, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.61-62 2006.7

(22) 金城仁, 遊佐秀逸, 吉川利文, 並木勝義 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 28, H 形鋼梁構造のスギ材被覆による 1 時間耐火性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.103-104 2007.7

(23) 並木勝義, 遊佐秀逸, 吉川利文, 金城仁 : 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 27, 角形鋼管柱構造のスギ材被覆による 2 時間耐火性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.101-102 2007.7

(24) 谷部徹, 遊佐秀逸, 金城仁 : H 型綱梁部材に適用した耐火塗料の発泡特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.269-270 2008.7

(25) 水上点晴, 遊佐秀逸, 吉川利文, 金城仁 : 加熱条件の違いが耐火性能に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.251-252 2009.7

(26) 小野潤一郎, 染谷朝幸, 金城仁 : II 形梁内部を床吹出し用ダクトに利用した梁の耐火性能, その 2 防火ダンパーの加熱実験とダクト梁試験体計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.127-128 2010.7

(27) 遊佐秀逸, 金城仁, 水上点晴, 吉川利文, 田坂茂樹, 田中義昭, 関正明, 山本将貴 : 耐火塗料の一般構造用炭素鋼鋼管柱及び角形鋼管柱への適用性に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.11-12 2010.7

(28) 藤田和彦, 小城貴嗣, 原田浩司, 谷川信江, 土橋常登, 金城仁, 常世田昌寿, 上川大輔, 平井倫之, 長谷見雄二 : 節を有するスギ板材の難燃化と準不燃材料の研究開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.181-184 2011.7

(29) 杉田敏之, 長谷見雄二, 玉川祐司, 安井昇, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 金城仁, 糸毛治, 関真理子, 泉潤一, 吉雄敏斗 : 住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その 4, 外壁の屋内側被覆に合板を用いた場合の防火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.149-150 2011.7

(30) 糸毛治, 長谷見雄二, 玉川祐司, 安井昇, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 金城仁, 関真理子, 泉潤一, 杉田敏之, 吉雄敏斗 : 住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その 3, 軸組造の小屋裏の天井懐に面する外壁の防火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.147-148 2011.7

(31) 金城仁, 長谷見雄二, 玉川祐司, 安井昇, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 糸毛治, 関真理子, 泉潤一, 杉田敏之, 吉雄敏斗 : 住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その 2, 枠組壁工法の小屋裏空間に面する外壁(妻壁)の防火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.145-146 2011.7

(32) 玉川祐司, 長谷見雄二, 安井昇, 増田秀昭, 上川大輔, 山田誠, 遊佐秀逸, 金城仁, 糸毛治, 関真理子, 泉潤一, 杉田敏之, 吉雄敏斗 : 住宅の防耐火性能の課題に関する実験 その 1, 検討概要および鋼板のファイヤーストップ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (A-2) pp.143-144 2011.7

(33) 久田隆司, 鈴木一幸, 佐藤明憲, 田原雅貴, 渡部紀夫, 遊佐秀逸, 金城仁 : 遮炎性能を有する耐熱強化ガラスの判定基準 その 1, 単板耐熱強化ガラスの試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) pp.241-242 2012.9

(34) 鈴木一幸, 久田隆司, 佐藤明憲, 田原雅貴, 渡部紀夫, 遊佐秀逸, 金城仁 : 遮炎性能を有する耐熱強化ガラスの判定基準 その 1, 単板耐熱強化ガラスの試験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) pp.239-240 2012.9

(35) 鈴木一幸, 久田隆司, 佐藤明憲, 西川晋司, 渡部紀夫, 遊佐秀逸, 金城仁 : 遮炎性能を有する耐熱強化ガラスの判定基準 その 4, 複合品評価と網入板ガラスとの比較 結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp.35-36 2013.8

(36) 久田隆司, 鈴木一幸, 佐藤明憲, 西川晋司, 渡部紀夫, 遊佐秀逸, 金城仁:遮炎性能を有する耐熱強化ガラスの判定基準 その3, 複合品評価と網入板ガラスとの比較 概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道) pp.33-34 2013.8

(37) 金城仁, 大橋宏和, 岡崎智仁, 永盛洋樹, 長岡勉, 山本秀一, 遊佐秀逸, 吉川利文 : 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その 4, 柱と鉄骨梁接合部の加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道) pp.143-144 2013.8

(38) 大橋宏和, 永盛洋樹, 長岡勉, 大野正人, 五十嵐信也, 遊佐秀逸, 吉川利文, 金城仁 : 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その 3, 柱梁接合部の載荷加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道) pp.141-142 2013.8

(39) 鈴木一幸, 久田隆司, 佐藤明憲, 西川晋司, 渡部紀夫, 遊佐秀逸, 金城仁:遮炎性能を有する耐熱強化ガラスの判定基準 その 6, 発生熱応力に影響を及ぼす要因 結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿) pp.373-374 2014.9

(40) 久田隆司, 鈴木一幸, 佐藤明憲, 西川晋司, 渡部紀夫, 遊佐秀逸, 金城仁:遮炎性能を有する耐熱強化ガラスの判定基準 その 5, 発生熱応力に影響を及ぼす要因 概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿) pp.371-372 2014.9

(41) 片倉佑介, 松本匠, 平島岳夫, 金城仁, 齋藤潔 : カラマツ集成材の高温時強度に及ぼす水分蒸発の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東) pp.131-134 2015.9

(42) 松本匠, 平島岳夫, 金城仁, 堀尾岳成, 齋藤潔, 遊佐秀逸, : 構造用集成材梁部材の火災時耐力 その 4, 既往耐力評価方法による計算値と実験値の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）pp.115-116 2015.9

付録　論文要旨

付録１　和文要旨・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１７
付録２　SYNOPSIS・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２２７

付録１

和文要旨・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１７

論文内容の要旨

標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における耐力低下に関する実験的研究

金城　仁

１．研究の背景

近年、森林資源や林業の健全化および低炭素化による環境配慮等の視点から、耐火構造の要件を満たす木質構造部材（以下、耐火木質構造部材）の開発が進み、大規模な木造耐火建築物が増加している。2000 年の改正建築基準法の施行により、耐火木質構造部材の国土交通大臣認定取得が可能となり、木造でも耐火建築物を設計することが可能となった。これらが引き金となり、様々な防耐火構造の技術開発が継続的に行われてきている。その後、2010 年 10 月の公共建築物等の木材の利用促進に関する法律が施行され、2015 年 6 月に大規模木造建築関連の法令（建築基準法第 21 条、第 27 条）が改正された。近年、環境問題等を背景に大規模木造建築に関連する法令が大きく変わってきたことも、大規模木造建築の実現を後押ししている。

可燃材料である木質構造は、盛期火災後の火災減衰期(建物内部にある可燃物の燃焼後）においても、部材の自己燃焼が継続して耐火性能が失われる恐れがある。そのため木質構造部材の国土交通大臣認定に係わる耐火性能評価では、所定の加熱時間までの性能のみならず、火災加熱終了後の残炎・赤熱および残煙がなくなる燃え止まり性能も要求されている。これより、耐火木質構造部材に関する我が国の研究開発では、木質材料を難燃処理した工法、構造用集成材を基本とした木質構造部材の内部に不燃材料(モルタルブロック等）を挿入した工法など、火災加熱終了後の燃え止まり性能に着眼したものが多い。

一方、大断面の構造用集成材による柱・梁について、火災加熱終了後の放冷過程をも含めた非損傷性能（具体的には耐力低下の推移）を把握することは重要である。しかしながら、所定の時間に対する非損傷性能（変形量および変形速度が制限値を超えないこと）を確認するための耐火性能評価試験では、不合格となる試験体を除き、放冷過程を含めた火災時耐力（破壊が生じた時間に対応する耐力）に関するデータは得られない。よって、火災加熱終了後の放冷過程の耐力低下に言及した研究はなく、構造用集成材梁の火災加熱終了後の放冷過程における挙動は未だ明らかでない。火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における挙動を把握するためには、放冷過程における炭化性状、断面内温度分布および火災時耐力を定量的に把握する必要がある。木質構造の耐火性能を火災加熱終了後の放冷過程まで詳細に把握することができれば、将来的には木質構造部材の適用可能性が拡がる。

このような背景のもと、標準火災加熱を受けた構造用集成材梁の放冷過程における耐力低下を検討するために、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施した。

本研究の目的は、カラマツ集成材の梁を対象とし、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施して 1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程における耐力低下傾向を明らかにし、火災時および放冷過程における高温耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行うことである。以下、本論文で検討した内容を示す。

(1) 標準火災加熱時とその放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度
(2) 標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下
(3) 標準火災加熱時とその放冷過程における梁のたわみ・破壊性状
(4) 構造用集成材梁の火災時および放冷過程における耐力計算

２．標準火災加熱時と放冷過程における梁の炭化性状および断面内温度

火災加熱終了後の放冷過程における木質構造梁の耐力低下を分析するための基礎データを得ることを目的として、1 時間の標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁の火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状および断面内温度を取得するために加熱実験および載荷加熱実験を実施した。実験内容および実験条件を表 1 に示す。試験体は全部で 4 体である。梁試験体の樹種はカラマツ(長野県産)、強度等級は E95-F315 とした。同一等級構成集成材を用い、ラミナの厚さを 30mm とし、合計 14 層のラミナで構成した。梁試験体の寸法は幅 210mm×成 420mm×長さ 6,000mm とした。載荷加熱実験の支点間距離は 5,400mm、3 等分点 2 線載荷方式とし、等曲げ区間は 1800mm である。表 1 に示した F(0)および F(0)IA の加熱実験試験体は、6,000mm の梁試験体から長さ 680mm の試験体を 5 つ切り出した。F(0)および F(0)IA それぞれ、5 つの分割した試験体を同時に加熱し、放冷時間に応じて実験時間を設定している。分割した試験体および載荷加熱実験の試験体を写真１および写真２に示す。

表１　実験内容および条件

試験体記号	実験内容		実験条件		実験時間
	加熱	載荷加熱	荷重レベル	放冷時炉内空気供給量	
F(0)	○		0	通常(1.0倍)	1,2,3,4および8時間
F(0)IA※	○			増加(1.3倍)	1,2,3,4および8時間
LF(0.2)		○	0.2	通常(1.0倍)	約26時間
LF(0.4)		○	0.4		約9時間
・荷重レベル：試験体寸法から算定した長期許容荷重(79.2kN)に対する割合					

写真１　分割した加熱実験試験体

写真２　載荷加熱実験試験体

実験後の試験体残存断面寸法測定結果を基に、非炭化領域における断面性能（断面係数：Z）を算定した結果を図１に示す。炉内空気供給量の違いによる比較では、元断面に対して放冷 7 時間後において Z は 4～4.5 割程度となった。載荷および非載荷の影響について比較した結果を図２に示す。載荷加熱実験 LF(0.4)と非載荷実験 F(0)の比較では非炭化領域の断面性能に及ぼす影響は見られなかったが、2 つの載荷試験体 LF(0.2)と LF(0.4)の Z では、放冷 7 時間時と放冷 24 時間時の比較で 1～2 割の差が見られた。一方で、LF(0.2)については、放冷 7 時間後以降から実験終了の 25 時間までのたわみがほとんど増加しなかった。

火災時加熱時および放冷過程での断面内温度は、図３に示すように加熱終了後放冷 2 時間経過以降に

おいて、断面内温度が 100℃に到達以降、温度の上昇が緩やかになっており、水分の蒸発潜熱の影響が見られた。炉内空気供給量および載荷・非載荷の違いによる非炭化領域の断面内温度への影響を図４に示す。炉内空気供給量を増加させた F(0)IA は、加熱終了直後に試験体表面の燃焼が助長される一方で、試験体周辺の炉内温度が早く低下するため、非炭化領域の最高平均温度は低くなり、温度下降時間は早くなった。載荷および非載荷の影響については、載荷した方がたわみに伴う亀裂の影響により梁下側の温度が上昇する。今回の実験においては、載荷と非載荷の試験体の大きさが異なったこともあり、実験結果の比較のみで断面内全体の温度に及ぼす載荷の影響を明らかにするのは難しく、同じ試験体仕様および加熱条件下での比較が必要である。

カラマツ集成材の梁では火災加熱終了から 1 時間位までの間に自己燃焼と炭化が止まる一方、非炭化領域の温度はむしろ放冷過程に上昇し、放冷過程において耐力低下が生じる可能性を示唆する結果が示された。

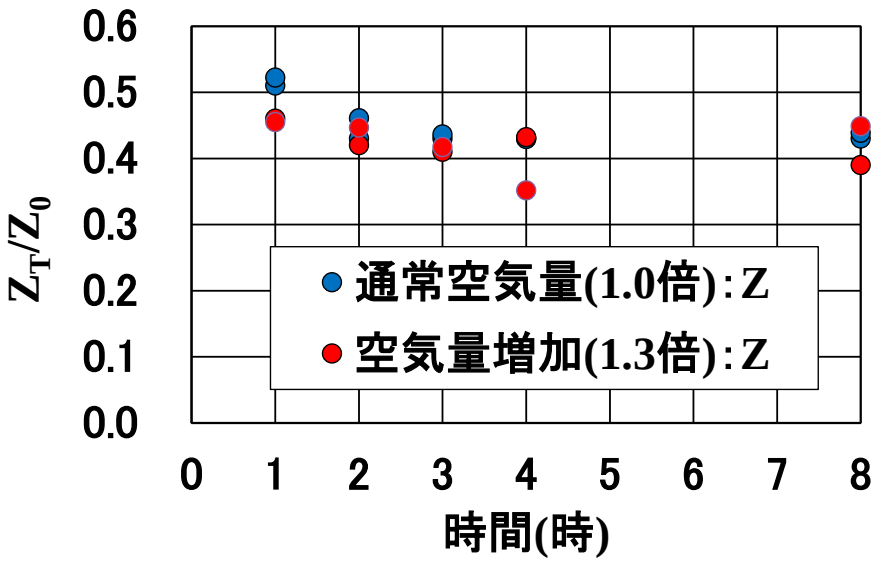


図１　空気供給量の違いによる影響

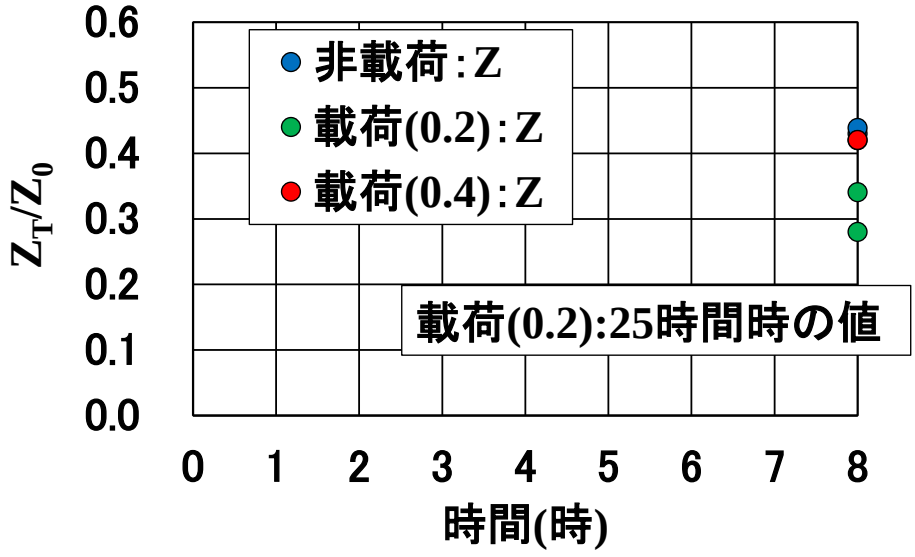


図２　載荷・非載荷の違いによる影響

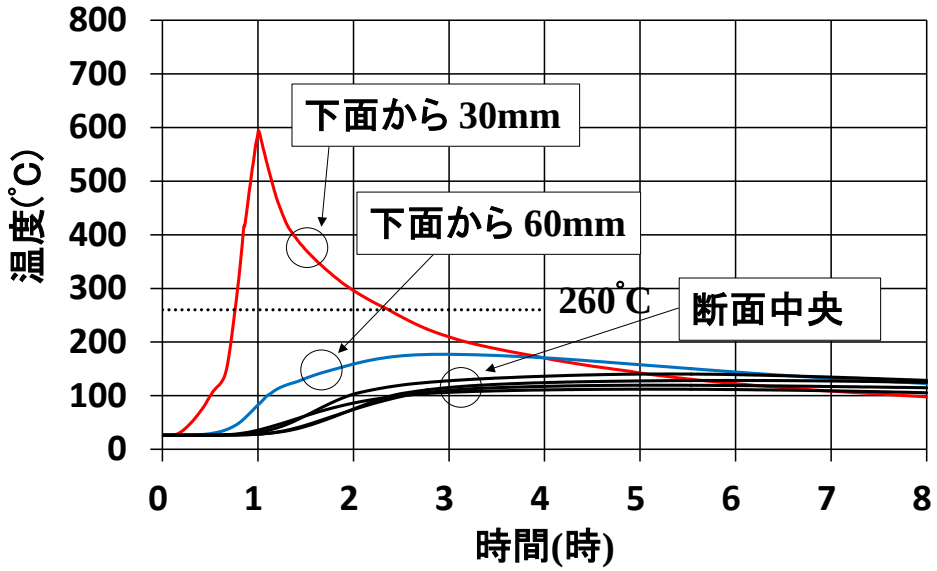


図３　断面内温度分布(F(0))

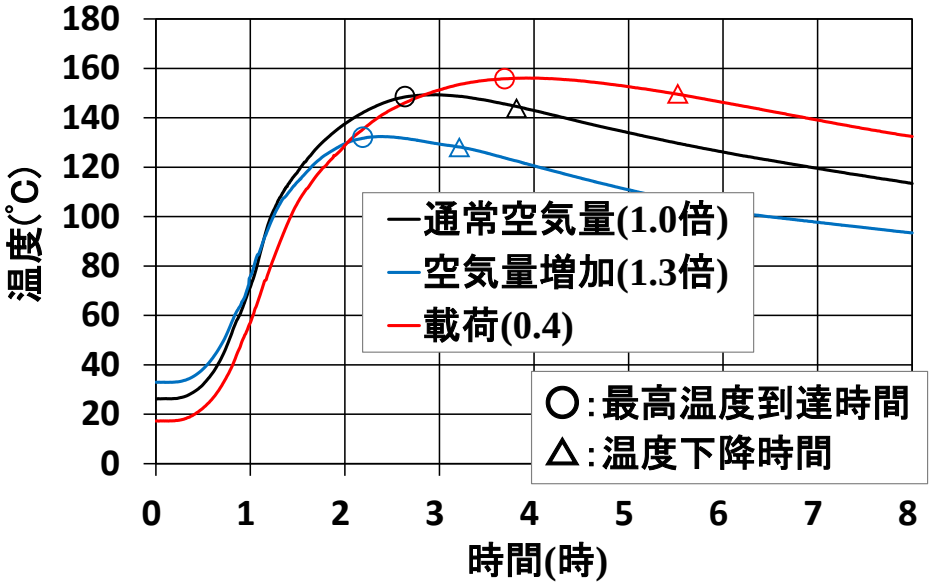


図４　非炭化領域における断面内平均温度

３．標準火災加熱を受ける梁の耐力・剛性低下

１時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程における梁の耐力・剛性低下を把握することを目的として、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を実施した。実験内容および実験条件を表２に示す。

加熱後載荷実験では、最大荷重に至るまで弾性的挙動を示して曲げ破壊した。常温時の最大荷重は 292.0 kN であり、本試験体の曲げに関する基準材料強度 31.5 N/mm^{2}より算定される耐力値に対して 1.35 倍であった。図５に示すように、加熱後載荷実験による梁(幅 210mm×成 420mm)の耐力は、加熱１時間直後で常温時耐力の 30%まで低下し、さらに３時間放冷後は常温時耐力の 14%まで低下した。最大荷重値の半分の値から算定した曲げ剛性については、加熱１時間直後で常温時の 38%、3 時間放冷後は常温時の 25%まで低下した。

図６に示すように、載荷加熱実験 LF-4h においては、載荷実験 L-4h で得られた最大荷重による載荷加熱実験であったが、約半分の時間(120 分：加熱終了後１時間)で荷重支持能力を失った。破壊時の試験体の状況を写真３に示す。LF-4h の実験後の試験体断面観察において、写真４に示すとおり、ラミナ接着層

付近におけるせん断破壊が生じていた。

以上、火災加熱終了後の放冷過程における耐力・剛性の低下は無視できないレベルであること、またそれらは加熱終了後１時間位の間に大きく低下する可能性が示唆された。

表２　実験内容および条件

試験体記号	実験内容	検討事項	実験条件
L-0h	加熱後載荷実験	耐力剛性	加熱せず、20kN/分で破壊まで載荷。
L-1h			1時間加熱終了後に載荷開始(破壊まで荷重漸増)。
L-4h			1時間加熱終了後、炉内3時間放冷後に載荷開始(破壊まで荷重漸増)。
LF-1h	載荷加熱実験	耐火時間耐力	L-1hの最大荷重にて載荷加熱し、破壊まで加熱継続。
LF-4h			L-4hの最大荷重にて1時間載荷加熱し、炉内放冷時は破壊まで載荷継続。

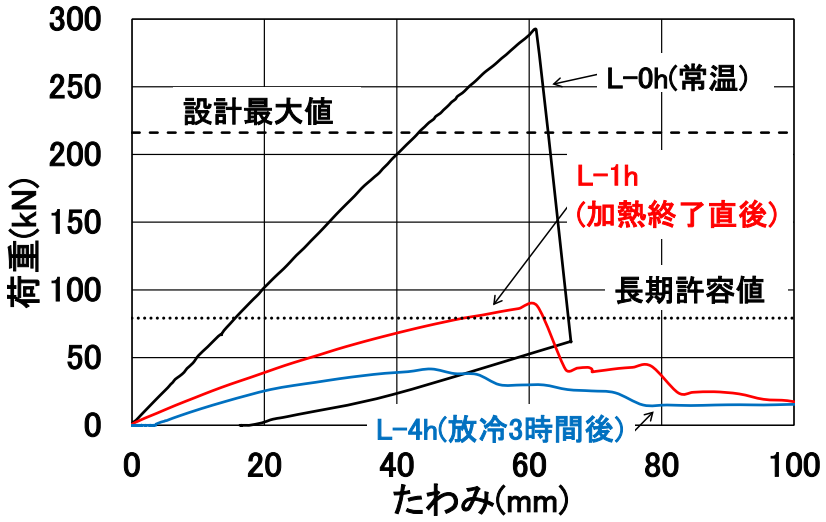


図５　荷重-たわみ関係

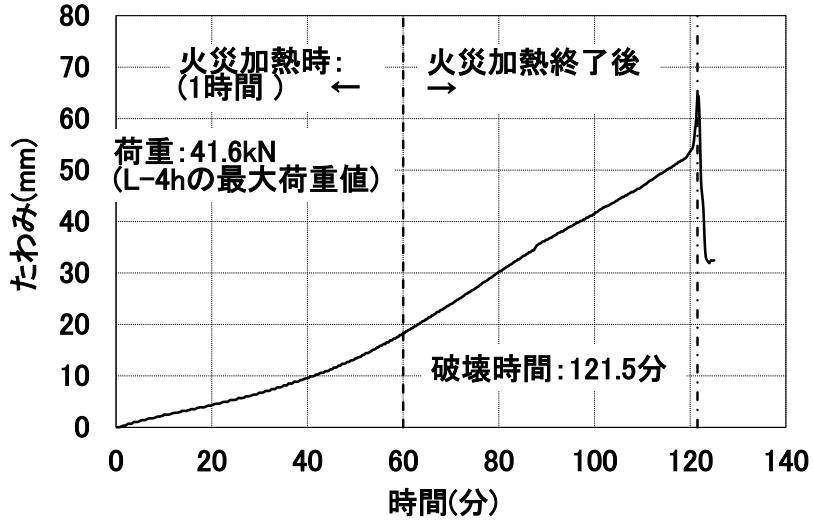


図６　たわみ-時間関係

写真３　載荷加熱実験 LF-4h の破壊状況

写真４　LF-4h の破壊断面の状況(せん断破壊)

４．標準火災加熱時と放冷過程における梁のたわみ・破壊性状

1 時間の標準火災加熱を受けた後の放冷過程におけるたわみ挙動と破壊性状を踏まえた耐力低下傾向を把握するために、荷重レベルを指標とした載荷加熱実験を実施した。実験内容および実験条件を表３に示す。実験は常温時の部材耐力を把握するために実施した載荷実験 L-RT を除き、残りはすべて載荷加熱実験とした。実験条件は長期許容荷重に対する載荷荷重の比である。長期許容荷重を指標とした載荷加熱実験により、その荷重条件を変えることで梁部材の破壊に至るまでのたわみ挙動の違いについて検討した。たわみ-時間関係を図７に示す。加熱終了後の放冷過程において、たわみが増加することが確認された。加熱 1 時間終了直後のたわみと比較して、LF-0.4(1)では放冷 7 時間後、加熱中よりもたわみが約 6.7 倍、LF-0.2 では放冷 24 時間後で約 7.2 倍まで増加した。LF-0.4(1)と LF-0.2 では放冷過程においても荷重を支持し続けることができた。破壊性状については、梁下端のラミナ層引張り破断に起因する曲げ破壊と、梁断面図心軸近傍における年輪部分でのずれによるせん断破壊が観察された。破壊状況を写真５から写真６に示す。せん断破壊は加熱終了から 1～3 時間までに見られた。せん断破壊となった時間帯は、断面内温度が水分蒸発時の温度停滞が見られた時間帯と一致した。

以上の結果から、梁断面寸法が幅 210㎜×成 420㎜ 以上であり、かつ荷重レベルが長期許容荷重の 0.4 以下であれば、火災加熱終了後の放冷過程においても荷重を支持し続けられる可能性が示された。

表３　実験内容および条件

試験体記号	実験内容	実験条件
L-RT	載荷実験	常温耐力確認 (最大耐力までの破壊実験)
LF-1.0	載荷加熱実験 (1時間加熱)	79.2kN (長期許容荷重)
LF-0.8		63.4kN (長期許容荷重×0.8)
LF-0.6		47.5kN (長期許容荷重×0.6)
LF-0.4(1)		31.7kN (長期許容荷重×0.4)
LF-0.4(2)		
LF-0.2		15.8kN (長期許容荷重×0.2)

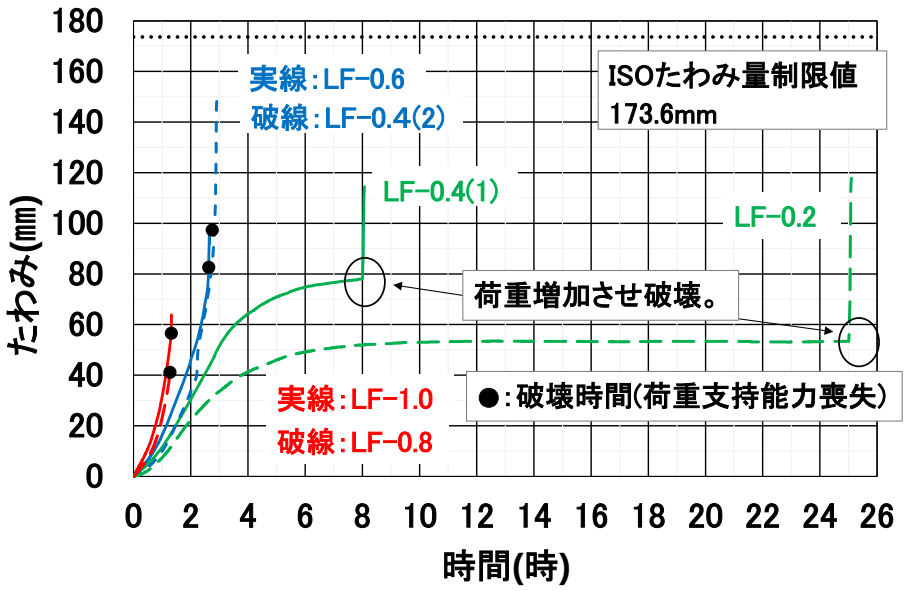


図７　たわみ-時間関係(赤・緑：曲げ破壊　青：せん断破壊)

写真５　LF0.4(1)　曲げ破壊

写真６　LF0.4(2)　せん断破壊

５．火災時および放冷過程における耐力計算

実験結果より得られた炭化性状・温度を元に、火災加熱時および火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下計算を行い、実験結果と比較した。火災加熱時の計算条件を表４に示し、実験値と計算値の比較を図８に示す。火災加熱時の計算については、ユーロコード 5 における残存断面法を用いて検討した結果を示す。火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算については、高温耐力低下を考慮した耐力計算手法の提案を行うとともに、実験結果との比較・検討を行った。火災加熱時の計算については、基準強度を設計基準強度とした場合、ユーロコード 5 における残存断面法により実験値と計算値は概ね一致した。基準強度を常温載荷実験結果から逆算された実強度を用いると、火災加熱時の計算は実験値を上回った。

火災加熱終了後の放冷過程における耐力計算については、実験で得られた炭化深さを元に、残存断面領域を長方形断面に仮定したモデルとした。その残存断面領域における断面内温度については加熱実験の結果に基づいて与えている。高温時における残存断面領域の強度低下については、ユーロコード 5 の木材の高温時強度低下率を用いて計算を行った。実験値と計算値の比較を図９に示す。曲げモーメントに対する耐力計算値は、温度上昇による耐力低下を考慮した計算によって、概ね実験値を追跡できた。放冷 7 時間および放冷 24 時間時の再載荷により得た曲げ耐力は、実験で得られた最高履歴温度を与えた

ことで、計算値と実験値が対応した。これは、残存断面部における炭化深さ・温度の設定およびユーロコード 5 の高温時強度低下率の組合せが概ね妥当であったためと考えられる。一方でせん断耐力については計算値が実験値を大きく上回った。放冷過程における集成材に関する高温時せん断強度は、ユーロコード 5 に示されているせん断強度よりも低下する可能性がある。

表４　計算条件

	計算方法	計算に用いた基準強度(N/mm^2)※	炭化深さ
Case1	ユーロコード5（残存断面法）	31.5	実験で得られた平均炭化深さに7mmを加えた値
Case2		42.6	
※ Case1は設計基準強度 Case2は載荷実験(常温)で得られた強度			

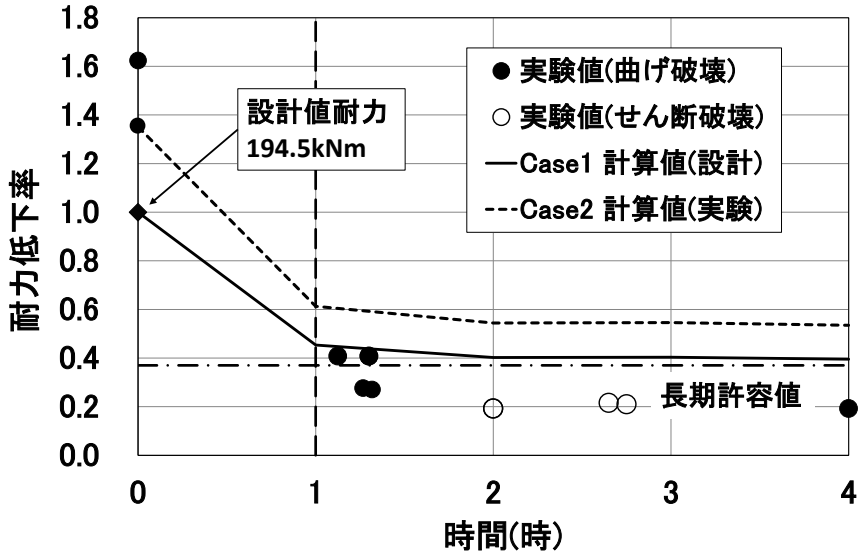


図８　火災加熱時における実験値と計算値の比較

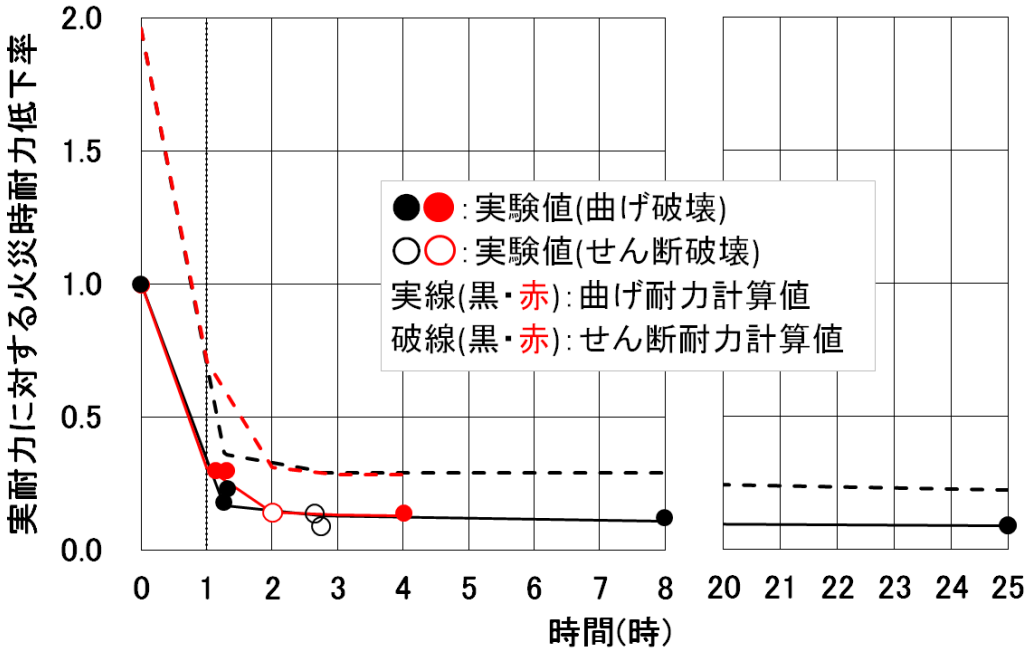


図９　高温耐力低下を考慮した放冷過程における実験値と計算値の比較

６．まとめ

本論文では、1 時間の標準火災加熱を受けた梁幅 210㎜×梁成 420㎜ のカラマツ集成材梁を対象とし、加熱実験、加熱後載荷実験および載荷加熱実験を行った。これら実験より、火災加熱時から火災加熱終了後の放冷過程における炭化性状・断面内温度および火災時挙動を示すとともに、火災加熱終了後の放冷過程における高温時耐力低下を考慮した耐力計算手法を示した。本研究の成果を用いることで、これまで明らかにされていなかった木質構造部材の火災加熱終了後の放冷過程における耐力低下についての検討が可能となり、木質構造部材の火災加熱時から火災加熱終了後の放冷過程を含めた耐火性能を適正に評価することが可能になると考えている。

本研究により、火災加熱終了後の放冷過程に木質構造物が崩壊する危険性を指摘する一方、大断面で荷重レベルが小さい場合には、カラマツ集成材の梁を耐火構造とすべき部位に適用できる可能性が示された。

付録２

SYNOPSIS・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２２７

An Experimental study on Strength Reduction of Structural Glued Laminated Timber Beams Exposed to Standard Fire Heating During the Cooling Phase

AUTHOR：Hitoshi KINJO

SYNOPSIS

1. INTRODUCTION

In recent years, owing to environmental considerations related to soundness of forests and forest resources and carbon offset, using timber structural elements meeting the requirements of fire-resistance of structures (below, fire-resistance of timber structures), advanced large-scale fire-resistant timber buildings have been increasing in number. The Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, which has enforcement power regarding the revised Building Standards Law of 2000, can now certify timber structures as fire resistant. Technological development of various fire resistant structures has been carried out continuously. Subsequently, legislation has been enacted to promote the use of timber in public buildings (October 2010), and laws and regulations related to large-scale wooden buildings were revised in June 2015 (Building Standards Law Article 21, Article 27). These recent changes have contributed to the building of a number of large-scale wooden buildings.

Timber elements, unlike other structural elements, have a characteristic problem in that the load-bearing capacity decreases due to self-burning in the case of a fire, and self-burning may continue even after all other fuel in the room has been consumed. Therefore, the criterion for fire-resistance evaluation of timber elements requires consideration of the fire performance during both the heating phase and the cooling phase until self-charring stops and there is no trace of flame, glowing embers, or smoke. With that in mind, research and development in Japan on the fire-resistance of timber structures, methods of construction using wood materials treated with flame retardant, and structural glued laminated timber in cooperating noncombustible material such as mortal blocks encasing a timber core. Studies focusing on thermal performance enhances such as self-charring stops are numerous.

At the same time, in order to make possible more wide spread use of normal timber structures using large cross-section columns and beams of structural, glued, laminated timber by demonstrating fire resistance potential, it is important to understand the structural performance (i.e., the transition of the strength decrease) not only during the heating phase but also during the cooling phase. However, fire resistance evaluation tests to confirm the structural performance (i.e. the deformation amount and deformation rate do not exceed the limit value) for a predetermined time unless the structural failure of the specimen has occurred, the data regarding fire performance is not available including the cooling phase (i.e., strength corresponding to the time the failure occurred). Therefore, no studies have discussed the strength decrease during the cooling phase after the end of heating. The behavior during the cooling phase after the end of the heating of structural, glued, laminated timber beams remains unclear. In order to clarify the behavior during the cooling phase of structural, glued, laminated timber beams exposed to heating, it is necessary to quantitatively clarify the charring properties, the cross-sectional temperature distribution, and the fire performance during the cooling phase. If it is possible to clarify in detail the fire resistance of a timber structure up until the cooling phase after the end of heating, more widespread use of timber structural elements will become possible in the future.

Against this background, in order to study the strength reduction during the cooling phase of structural, glued, laminated timber beams exposed to heating by a standard fire, heating tests, loading tests after heating, and load-bearing fire tests were conducted.

The objective of the present study is to discuss, based on heating tests and load-bearing fire tests, the charring rate, the temperature distribution in the test section, and the load-bearing capacity of structural, glued, laminated timber beams, not only during the heating phase of a 1-hour standard fire (in accordance with ISO 834-1), but also during the cooling phase. Moreover, the study goes on propose a method of calculation that takes account of the strength reduction at elevated temperature during the cooling phase. The following were investigated in order

to achieve this objective:

（1）The charring properties and cross-sectional temperature during the cooling phase of larch glulam beams exposed to standard fire.

（2）The strength and stiffness decrease of larch glulam beams exposed to standard fire.

（3）The deflection behavior and failure mode during the cooling phase of larch glulam beams exposed to standard fire.

（4）The strength calculation method during the heating and cooling phases of structural larch glulam beams.

2. CHARRING PROPERTIES AND TEMPERATURE DISTRIBUTION

In order to obtain base data for the analysis of the decrease in strength of timber beams during the cooling phase, the temperature in the furnace was controlled to follow the ISO834 standard fire for 1 hour. The purpose of the heating tests and load-bearing fire tests was to investigate the charring properties and the temperature distribution in the cross-section of the beams during the heating phase and the cooling phase. Table 1 shows the test program. Four specimens were tested. The tree species investigated herein was the Japanese larch. The cross-sections of all specimens were 210 mm (width) × 420 mm (height), and the length of all specimens used in the loading tests was 6,000 mm. The thickness of each lamina was 30 mm, and 14 laminas were bonded using resorcinol-phenol resin. The strength class of all of the structural, glued, laminated timber samples was the same (composition glulam E95-F315). The distance between supports was 5,400 mm, and the distance between the two loading points was 1,800 mm. Table 1 shows the heating test specimen, which was separated to into five short specimens for measurement of the charring depth at 1, 2, 3, 4, and 8 hours after ignition. The length of each short specimen was 680 mm. Five short F(0) and F(0)IA specimens were heated at the same time. The heating test specimen and the load-bearing fire test specimen are shown in Photos 1 and 2.

Table 1　Test Program

Specimens symbol	Test contents		Test condition		Test time
	Heating test	Load bearing fire test	Load level※	Air-content of Cooling phase	
F(0)	○		**0**	**Normal air-content**	**1, 2, 3, 4 and 8hour**
F(0)IA	○		**0**	**Increased air-content (30% Increase)**	**1, 2, 3, 4 and 8hour**
LF(0.2)		○	**0.2**	**Normal air-content**	**about 26hour**
LF(0.4)		○	**0.4**		**about 9hour**

※2：Ratio for the long-term permission load (79.2kN)

Photo 1 Short specimen (heating test)

Photo 2 Test specimen (Load-bearing fire test)

The results of residual cross-sectional measurement of the non-charred area (section modulus: Z) are shown in Figure 1. Due to differences in the furnace air content after cooling for 7 hours, Z of the original cross-section decreased to 40～45% of the original value. The results for the loaded (LF(0.4)) and non-loaded (F(0)) specimens are shown in Figure 2, which indicates that the non-charred area did not affect the cross-section performance. The section moduli of specimens LF(0.2) and LF(0.4), which were subjected to the load-bearing fire tests, differed by 10 to 20% after cooling for 7 hours after cooling and for 24 hours. On the other hand, the deflection of LF(0.2) did not increase from the beginning of after cooling 7 hours until the end of the test.

The temperature stagnated at around 100°C due to the evaporation of the water contained in the timber specimen after cooling for 2 hours, as shown in Figure 3. The influence on the cross-sectional temperature distribution of the non-charred area of differences in the furnace air content and loading or non-loading is shown in Figure 4. Increasing the furnace air content promoted burning of the surface of the specimen directly after the end of the heating phase. On the other hand, since the furnace temperature around the specimen decreased quickly, the maximum average temperature of the non-charred area also decreased quickly. Under loading conditions, the temperature on the surface of the beam increased due to the influence of cracks formed as a result of deflection.

In these tests, the loading and non-loading conditions of the test specimen were varied. It is difficult to clarify the effect of loading on the temperature of the entire cross-section just by comparing test results. It is also necessary to compare specimens having the same specifications under the same heating conditions.

These experimental results indicate that the resistance of structural glued laminated timber beams exposed to fire heating decreases during not only during the heating phase but also during the cooling phase because the residual cross-sectional temperature of the non-charred area gradually rises during cooling phase though the self-burning and charring effectively stop within 1 hour from the fire decay start time.

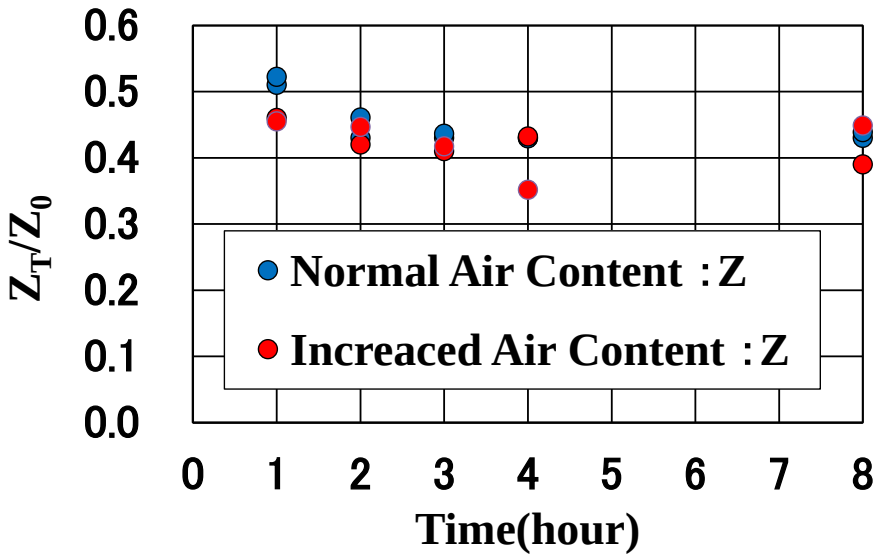


Figure 1 Differences in the furnace air content

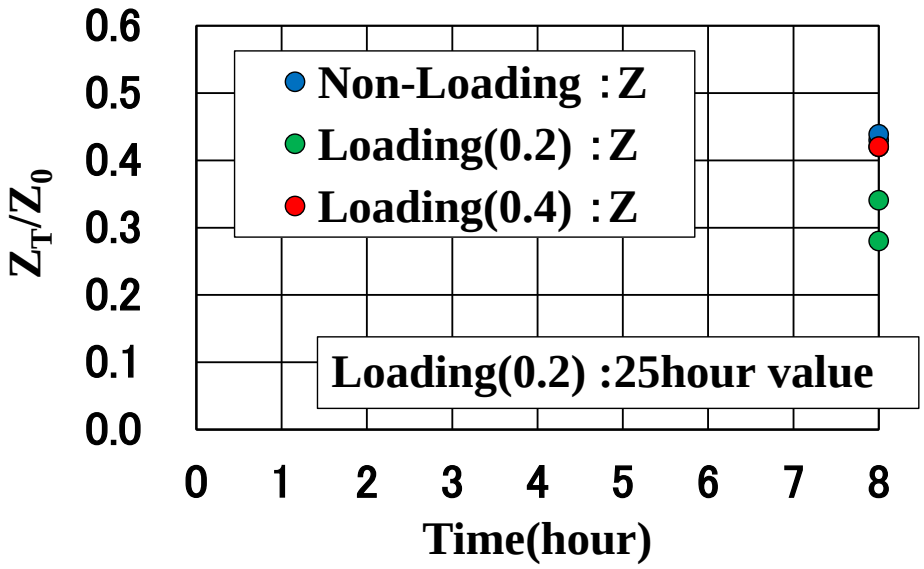


Figure 2 Differences in the loading and non-loading

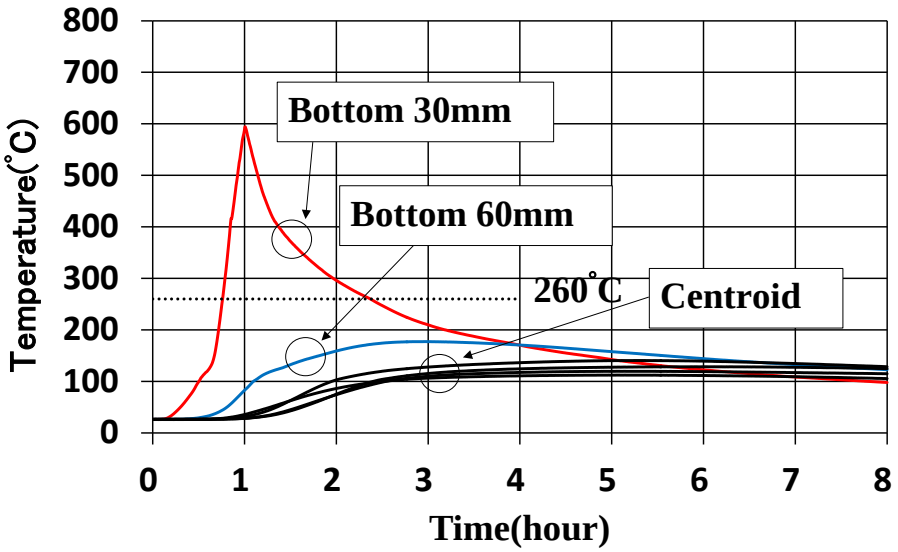


Figure 3 Temperature distribution (F(0))

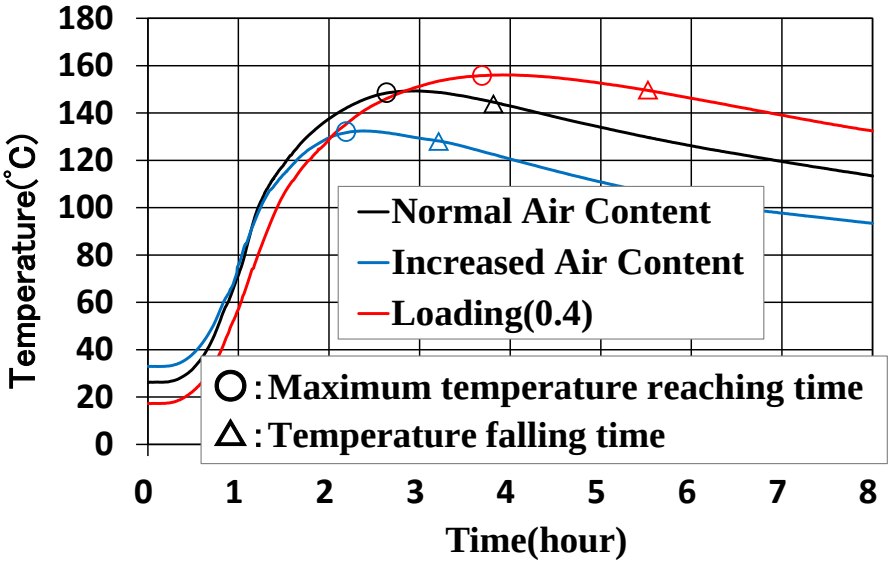


Figure 4 Average temperature non-charring areas

3. STRENGTH AND STIFFNESS

In order to clarify the strength and stiffness decrease of the beam, loading tests were carried out after the heating and load-bearing fire tests, during the cooling phase. Table 2 shows the test program.

The failure of specimens loaded after heating was bending failure of elastic behavior up to the maximum load. The maximum load at the mid-span of specimen L-0h (at ambient temperature) was 292 kN, which is 1.35 times the value calculated based on the design bending resistance. As shown in Figure 5, the maximum load of specimen L-1h (initial cross-section: 420 mm × 210 mm), which was exposed to a 1-hour standard fire, was reduced to approximately 30% of the maximum load of specimen L-0h. The maximum load of specimen L-4h, which was exposed to a 1-hour standard fire and 3 hours of natural cooling in the furnace, was reduced to approximately 14% of the maximum load at ambient temperature of specimen L-0h. The bending stiffness was calculated from half the maximum load of specimen L-1h, which was exposed to a 1-hour standard fire, and was reduced to approximately 38% compared with the specimen L-0h. Similarly, specimen L-4h which was exposed to a 1-hour standard fire and 3 hours of natural cooling in the furnace was reduced to approximately 25% compared with the specimen L-0h.

In the load-bearing fire test, specimen LF-4h was subjected to the maximum load applied to L-4h in the previous test. However, it lost load-bearing capacity after about 120 minutes i.e. 1 hour of natural cooling as shown in Figure 6. As shown in Photo 3, the specimen did not show bending failure. As shown in Photo 4, the cross-section of specimen LF-4h reveals that shear failure occurred in the vicinity of the lamina adhesive layer.

These results indicate that reduction of the resistance of the beams during the cooling phase cannot be ignored and the resistance reduces considerably within 1 hour from the fire decay start time.

Table 2 Test Program

Specimens symbol	Test contents	Examination	Test term
L-0h	Loading test (after the heating)	Strength Stiffness	Loading test at ambient temperature (until the failure)
L-1h			Loading test at 1 hour (Just after exposure to 1-hour standard fire)
L-4h			Loading test at 4 hours (1-hour standard fire and 3 hours of natural cooling)
LF-1h	Load-bearing fire test	Fire resistance time Strength	Load-bearing fire test (constant load = the maximum load of L-1h) (Standard fire heating until the failure)
LF-4h			Load-bearing fire test (constant load = the maximum load of L-4h) (1-hour standard fire heating and then natural cooling until the failur)

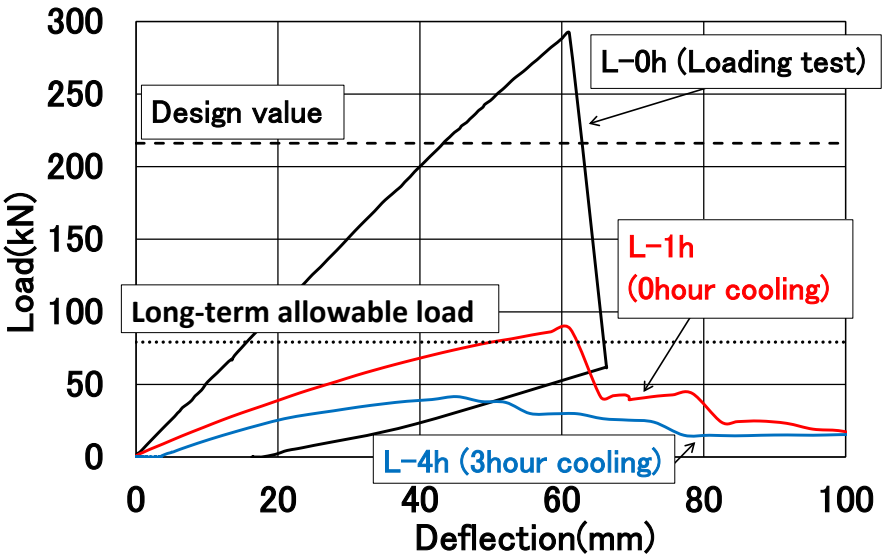


Figure 5 Load - deflection behavior

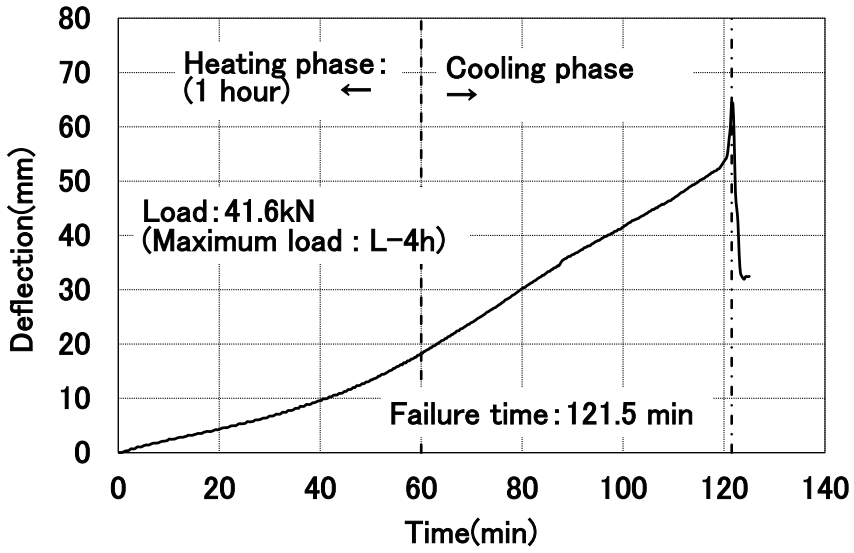


Figure 6 Deflection-time relationships

Photo 3 Global aspect of LF-4h

Photo 4 Cross-section LF-4h (Shear failure)

4. DEFLECTION BEHAVIOR AND FAILURE MODE

In order to clarify the deflection behavior and failure mode, load-bearing fire tests were carried out, in which the load level was used as an index during the cooling phase. Table 3 shows the test program. L-RT was carried out in order to clarify the strength at ambient temperature. The rest was all load-bearing fire tests. The test conditions is the ratio of the applied load on long-term allowable load. Load-bearing fire tests, which used as the index of the long-term allowable load, were investigated differences in deflection behavior up to the failure mode of the beam by changing the load level. The deflection of the specimen over time is shown in Figure 7. During the cooling phase, it was confirmed that the deflection increased. The deflection of specimen LF-0.4 (1) increased approximately 6.7-fold after cooling for 7 hours, as compared to the deflection just after heating for 1 hour. Moreover, the deflection of specimen LF-0.2 increased approximately 7.2-fold after cooling for 24 hours, as compared to the deflection just after heating for 1 hour. However, the both specimens had been keeping the load bearing capacity through the cooling phase.

The failure mode was bending failure due to tensile failure of the lamina at the bottom of the beam. Moreover, a gap caused by shear failure in a growth ring in the beam cross-section in the vicinity of the centroid axis was observed. The failure modes of the specimen are shown in Photos 5 and 6. Shear failure was observed up until 1 to 3 hours before end of heating. Moreover, shear failure was consistent with the time period during which temperature stagnation was observed during the evaporation of water.

These results indicate that if the cross-section is over 420 mm × 210 mm and the loading level is 0.4 or less, the load bearing capacity may be maintained during not only the heating phase but also during the cooling phase.

Table 3 Test Program

Specimens symbol	Test contents	Test condition
L-RT	**Loading test**	**Strength at ambient temperature**
LF-1.0	**Load bearing fire test**	**79.2kN (Long-term allowable load)**
LF-0.8		**63.4kN (0.8)**
LF-0.6		**47.5kN (0.6)**
LF-0.4(1)		**31.7kN (0.4)**
LF-0.4(2)		
LF-0.2		**15.8kN (0.2)**

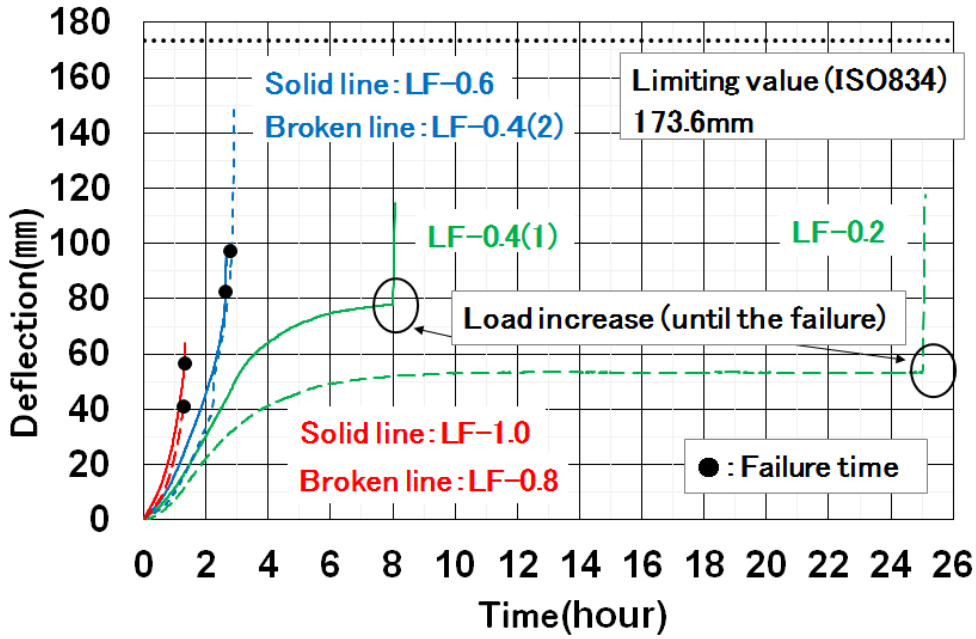


Figure 7 Deflection-time relationship (Red・Green：Bending failure　Blue：Shear failure)

Photo 5　LF0.4(1)　Bending failure

Photo 6　LF0.4(2)　Shear failure

5. STRENGTH CALCULATION METHOD

Based on the charring properties and temperature distribution obtained from tests, in case of the strength decrease calculation during the heating phase and the cooling phase, was carried out compared with tests results. The calculation terms at the heating phase shown in Table 4. Compared with the test result and calculated values shown in Figure 8. The remaining reduced cross-section method in Eurocode 5 was used for the heating phase calculation. For the strength calculation during the cooling phase, it is to carry out proposes of strength calculation method that taking account of the strength reduction at elevated temperature. For the calculation of the heating phase, it was roughly agreement which the strength was a design strength, calculated value and test result by the reduced cross-section method in the Eurocode 5. However, the use of real strength, which the calculated at the heating phase, it was higher than the test results.

For the strength calculation during the cooling phase, which residual cross-section of the beam is assumed to be rectangular, based on charring depth obtained in the test results. The temperature distribution at the residual cross-section is based on the temperature-time relationship data at the measurement points of the heating test. For the strength reduction residual cross-sectional area at elevated temperature, which the calculation was carried out using a strength reduction at elevated temperature reduction ratio of timber structure of Eurocode 5. Figure 9 shows

the test results and the calculated values. The strength calculations for bending moment, which were calculated in consideration of the strength reduction due to the elevated temperature, could be roughly agreement the test results. Bending strength calculation corresponded with the tests result, when the cooling time for 7 hours and 24 hours, by giving maximum histories temperature obtained in the tests. This is probably because the combination of char depth, temperature setting, and strength reduction at elevated temperature reduction ratio of Eurocode 5 was approximately appropriate of the residual cross-section. On the other hand, the calculated shear strength far exceeded the test results. Shear strength for elevated temperature of glued laminated timber is likely to decrease than the shear strength in Eurocode 5.

Table 4 Calculation term

	Calculation method	Based strength※ (N/mm^2)	Charring depth
Case1	Reduced cross-section method (Eurocode 5)	31.5	Average value (Test result) + 7mm
Case2		42.6	
※ Case1 : Design strength Case2 : Real strength (Test result)			

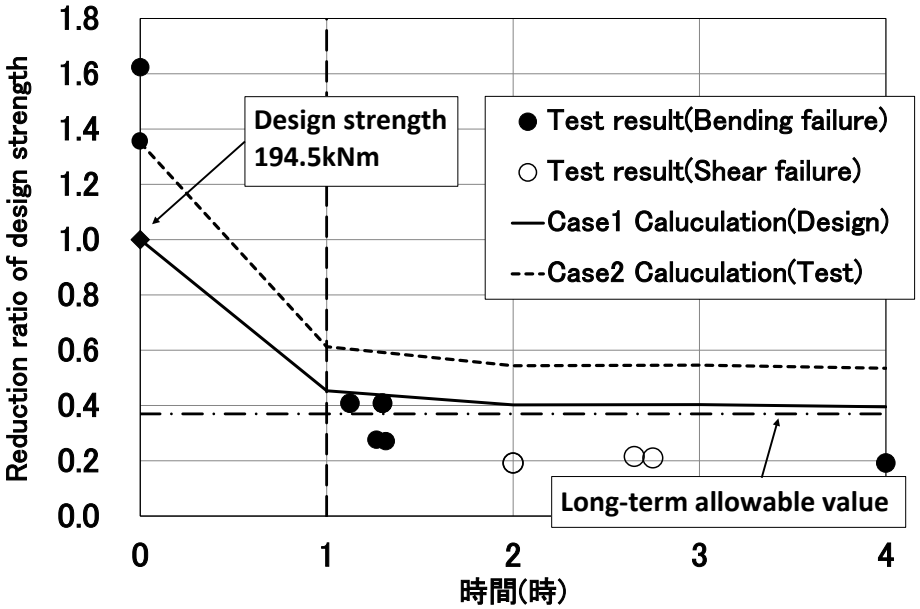


Figure 8 Compares of the test result and calculated values (Heating phase)

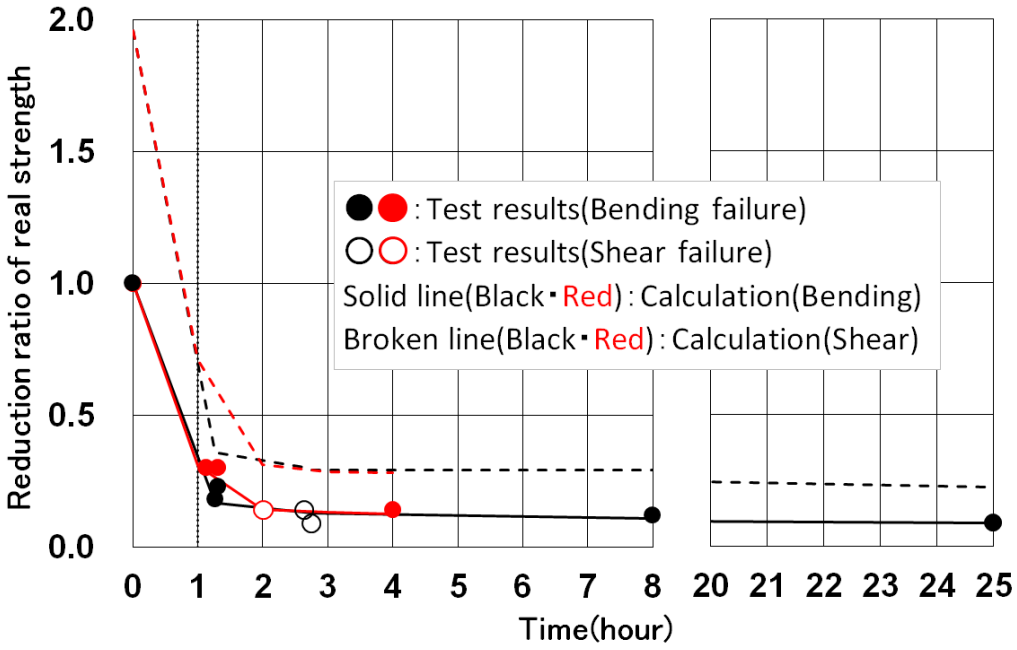


Figure 9 Compares of the test result and calculated values (Cooling phase)
(Taking account of the strength reduction at elevated temperature)

6. CONCLUSION

In the present paper, larch glued laminated timber beams of 210 mm (width) × 420 mm (height) were subjected to a standard fire for 1 hour. Heating tests, loading tests after heating, and load-bearing fire tests during the heating and cooling phases were conducted. The results of these test revealed the charring properties, cross-sectional temperature distribution, and fire behavior during the heating and cooling phases. In addition, it shows the strength calculation method that taking account of the strength reduction at elevated temperature during the cooling phase. By using the results of this study, it is possible to discussion of strength reduction in cooling phase for timber structural, which has not been clarified. Believes that is possible to appropriately evaluate the fire performance, including the cooling phase of the timber structural.

This study pointed out the risk of the collapse of timber structures during the fire decay period. However, one conclusion is that in the case of larch glued laminated timber beam of large cross-section lightly loaded may be considered fire resistive member.