

ヘドロの利活用に関する研究 III. ヘドロの乾燥に伴うコンシステンシー及び透水性の変化

金 原台*・趙 宰賢**・大上岳彦**・高橋 悟***・矢橋晨吾**
(*自然科学研究科, **緑地環境工学研究室, ***東京農業大学農業水利学研究室)

A Study on the Utilization and Application of Hedoro Soil III. The Changes of Consistency and Hydraulic Conductivity of Hedoro Soil in the Drying Process

Wontae Kim*, Jaehyun Cho**, Oogami Takehiko**,
Satoru Takahashi***, and Shingo Yabashi**
(*Graduate School of Science and Technology,
**Laboratory of Green Space Environmental Technology,
***Laboratory of Irrigation and Drainage, Tokyo University of Agriculture)

ABSTRACT

We have conducted a series of experiments to obtain fundamental data for the improvement of hedoro (muddy sediment) soil which are widely existing in lowlands of Japan. In this paper, we investigated the physical properties of hedoro soils taken from three different place, which were Haneda hedoro soil (H) existing under the seawater, Kasumigaura (K) and Obagawa (O) hedoro soil existing under the fresh water. We also investigated the changes of consistency and hydraulic conductivity of Haneda and Kasumigaura hedoro soils in drying process.

The results are summarized as follow;

1. There were large variations in the grading and the fundamental physical properties of hedoro soil among the samples collected from the different places.
2. It was observed that the liquid limit (LL) and plastic limit (PL) of K hedoro soil seemed to be much higher than the other two different hedoro soils.
3. The drying process caused an irreversible effect on the hedoro soil with regard to consistency and hydraulic conductivity.

結 言

港湾・湖沼・河川に堆積するヘドロは膨大な量であり、霞ヶ浦の湖底だけでも4,000万 m^3 以上とされている。霞ヶ浦においては、平成4年度から約720万 m^3 のヘドロを順次的に浚渫し、湖沼及び河川環境の整備並びに河川機能の維持を図っている。一般的に浚渫ヘドロはセメントで固めて埋め立て処分されている。しかし、処分地の確保は年々困難となってきた。一方、園芸用培土の製造や緑化工事等に必要な土の山林・原野からの供給は

環境保全の観点からみれば自然破壊を伴うため好ましくない。従って、農業や都市緑化への浚渫ヘドロの利用は未利用資源の有効利用であり、環境保全にも有効である。しかし、前報[6, 7]にて述べたようにヘドロは自然含水比(w_n)が高く、親水性の高い土であることがわかった。このような性質によりヘドロ地盤は通常軟弱な状態に置かれていると考えられる。しかし、この水は風乾等の乾燥により不可逆的に脱水され、土の理工学的性質が顕著に変わることが明らかにされてきた[3, 5]。これらの乾燥による諸特性の変化をもたらす原因は、①微細粒子が結合し、団粒化する[1]。②土の界面構造特性が

変わり、親水性から疎水性に変わる[8]。③土粒子の集合化による土の比表面積が減少する[4]、ことなどから論じられている。従って、脱水・乾燥処理によるヘドロの諸性質の変化を明らかにすることがヘドロを改良するための基礎資料になると考えられる。こうした点を踏まえて、本報ではヘドロの生土から風乾土に至るまでの乾燥途中の各段階におけるヘドロの質的变化をコンシステンシー特性並びに透水特性から検討した。また、砂混合に伴うヘドロの質的变化もコンシステンシー特性から検討した。

供試土と実験方法

(1) 供試土

対象試料は東京湾羽田沖(H)の東京国際空港拡張工事に伴って浚渫された海水ヘドロ及び霞ヶ浦(K)の西浦と埼玉県八潮市の大場川(O)の浚渫現場から採取した淡水ヘドロである。現地における試料の採取は、雑物の混入していない個所を選び、長柄杓でプラスチックコンテナに掬い入れてから移送し、実験に用いた。対象試料の特徴として、羽田沖(H)と霞ヶ浦(K)ではかなり粘質状であり、大場川(O)では砂分を多く含むことが挙げられる。

(2) 実験方法

供試土の基本的物理量として前報[6]と同様の実験方法により①土粒子の密度、②自然含水比、③粒度特性の3項目を測定し、検討した。ヘドロの生土と風乾土との間に顕著な性状変化の発現することについてはこれまでいくつかの物理性によって把握した[3, 7]が、本報ではこの現象をより詳細に検討することを試みた。すなわち、粘質状を呈する羽田沖(H)と霞ヶ浦(K)に対しては生土から風乾土までの脱水・乾燥過程を3段階または8段階に区分し、各々の供試土についてコンシステンシー特性並びに透水特性について検討した。なお、各乾燥段階の供試土は竹中らの研究[5]に基づいて水分状態並びに土壌表面のき裂を観測しながら制作し実験に用いた。砂分が多く含まれているOについて、コンシステンシー限界が求められるか否かをふるい分けにより、粒径別の試料を用いて測定・検討した。また、粒径別に液性限界を求めたOとの比較のため、試料量が多かったKに対して粒径850~425 μ mの砂を混合し、液性限界の変化を測定した。なお、コンシステンシー特性は液性限界、塑性限界、収縮限界を各々JIS A1205, JIS A1206, JIS A1209に準じて測定した。透水特性については供試土が微細粒子で構成されていることから、JIS A1218に準じ

た変水位透水試験により飽和透水係数を求めた。

実験結果と考察

(1) 基本物理量

Table 1には供試土の土粒子の密度(ρ_s)、自然含水比(w_n)、粒度組成をまとめて示した。 ρ_s について3試料を比較すると、Oが約2.7(Mg/m³)の最大値を示し、次にHとKの順であった。 w_n は約2.4(kg/kg)のKがHの約2倍、Oの5倍以上の値を示した。HとKの粒度組成はかなり類似しており、砂分が極く微量で、8割弱を粘土分が占めていた。JISによるHとKの土性名は重粘土(HC)であった。これに対してOは7割強を砂分が占めており、土性名は砂質埴壌土(SCL)に分類される。

Table 1 Physical properties of soil samples

Soil sample Test	Haneda (H)	Kasumi gaura(K)	Obagawa (O)
Soil particle density: ρ_s (Mg/m ³)	2.662 ± 0.004	2.545 ± 0.004	2.739 ± 0.006
Natural water content: w_n (kg/kg)	1.256 ± 0.055	2.445 ± 0.082	0.449 ± 0.038
Sand : S (%)	2.0	1.0	74.0
Silt : Si (%)	20.0	22.0	8.0
Clay : C (%)	78.0	77.0	18.0
Soil texture	HC	HC	SCL

(2) ヘドロの乾燥特性

1) コンシステンシー特性

Table 2並びにTable 3はそれぞれHとKのコンシステンシー特性を示したものである。Hの液性限界(LL)は生土で1.112(kg/kg)を示したものの、乾燥が進むことに従って乾燥段階3までは徐々に減少し、風乾土に至っては0.705(kg/kg)へと大きく減少している。塑性限界(PL)は生土で0.380(kg/kg)を示し、乾燥の進行とともに風乾土の0.351(kg/kg)まで徐々に減少している。LLとPLの差である塑性指数(I_p)は主としてLLの影響を受けているため、LLと同様な減少傾向を示している。流動指数(I_L)すなわち、流動曲線の勾配は生土が最大値の0.620を示し、乾燥に伴って減少するものの、風乾土に至っては大きく変化して0.260になった。生土から風乾土に至るまでの乾燥に伴う収縮限界(SL)及び収縮比(R)の変化傾向はPLの減少傾向と類似していた。次に、KのLL・PLはともにHの2倍以上であった。 I_p はこれらの影響を受けており、生土から風乾土までのいずれの乾燥段階でもHの約2倍以上であった。また I_p の乾燥に伴う減

Table 2 Consistency of Haneda hedoro soil in drying process

Test	Water content		liquid limit	plastic limit	plastic index	flow index	shrinkage limit	shrinkage ratio
Drying process	w (kg/kg)	pF	LL (kg/kg)	PL (kg/kg)	I _p (kg/kg)	I _f	SL (kg/kg)	R
fresh	1.268	0.5	1.112	0.380	0.732	0.620	0.355	1.40
stage 1	1.107	1.7	1.075	0.377	0.698	0.440	0.342	1.38
stage 2	1.012	2.0	1.065	0.376	0.689	0.390	0.340	1.38
stage 3	0.929	2.6	1.029	0.375	0.654	0.320	0.338	1.36
air dried	0.109	—	0.705	0.351	0.354	0.260	0.327	1.33

Table 3 Consistency of Kasumigaura hedoro soil in drying process

Test	Water content		liquid limit	plastic limit	plastic index	flow index	shrinkage limit	shrinkage ratio
Drying process	w (kg/kg)	pF	LL (kg/kg)	PL (kg/kg)	I _p (kg/kg)	I _f	SL (kg/kg)	R
fresh	2.445	0.5	2.455	0.843	1.612	0.750	0.390	1.30
stage 1	2.209	1.4	2.430	0.837	1.593	0.730	0.383	1.30
stage 2	2.202	1.4	2.422	0.835	1.578	0.730	0.381	1.30
stage 3	2.055	1.7	2.408	0.832	1.576	0.630	0.378	1.30
stage 4	1.886	1.8	2.391	0.831	1.560	0.620	0.376	1.30
stage 5	1.669	2.3	2.278	0.818	1.460	0.610	0.360	1.29
stage 6	1.608	2.5	2.225	0.816	1.409	0.590	0.357	1.28
stage 7	1.325	3.0	1.988	0.766	1.222	0.530	0.342	1.28
stage 8	1.128	3.6	1.536	0.691	0.845	0.450	0.338	1.27
air dried	0.086	—	1.266	0.653	0.613	0.350	0.334	1.25

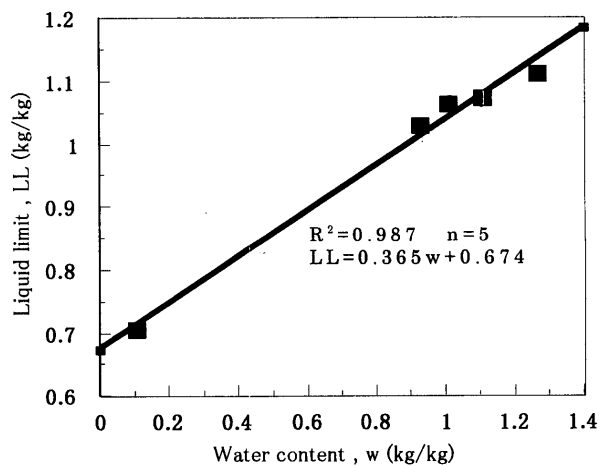


Fig. 1 Relationship between water content and liquid limit of Haneda hedoro soil

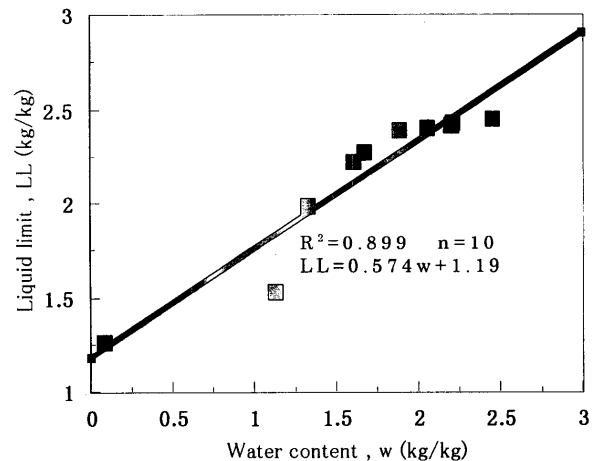


Fig. 2 Relationship between water content and liquid limit of Kasumigaura hedoro soil

少傾向はHと類似していた。I_fは、生土と風乾土では顕著な差がみられるものの、生土から乾燥段階6まではわずかな変化のみを示した。SL及びRは、KとHとの間に大きな差がみられない。以上の結果から、ヘドロは水中に堆積しているため自然含水比がほぼLLの状態にあり、非

常に不安定な状態であることが明らかとなった。また、コンシステンシー特性においてヘドロが脱水・乾燥に伴い質的・構造的変化する事が認められた。Fig. 1並びにFig. 2は各乾燥段階での含水比 (w) とLLをプロットしたものである。Fig. 1のH並びにFig. 2のKにおいて、

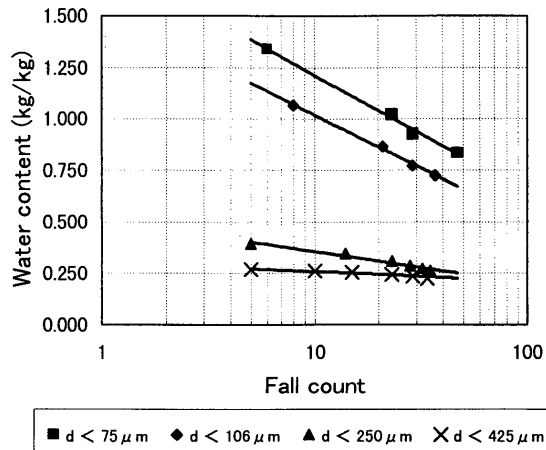


Fig. 3 Changes of flow curve depends on maximum particle size of Obagawa hedoro soil
d; particle size (μm)

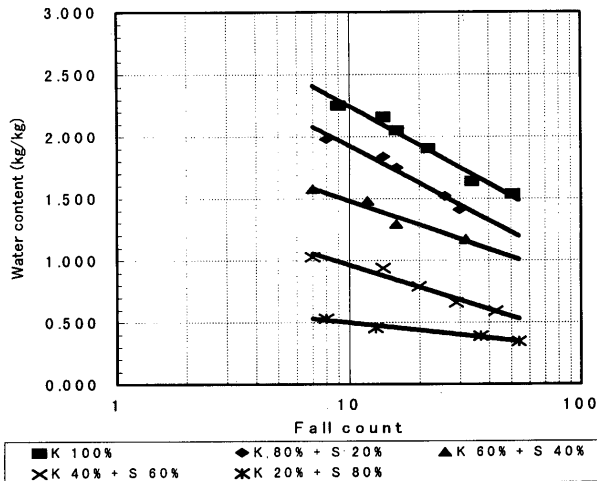


Fig. 4 Changes of flow curve of Kasumigaura hedoro soil mixed with sand
s; sand

測定値に多少バラツキが見られるものの、 w と LL の関係は正の比例関係であった。また、粒径別試料を用いて求めた O の LL は $2,000\sim 425\mu\text{m}$ の粒径区分においてすべて測定不能(非塑性, NP)であった。従って、粒径 $425\mu\text{m}$ 以下の試料に対して LL を求めた。実験の結果はFig. 3に示す。Fig. 3の各々の回帰直線から細粒分の含有率が大きいほど I_t は大きく、また LL も大きいことが明らかとなり、粒径区分の中でも $106\mu\text{m}$ 以下でその傾向が顕著に現れた。この結果との比較のため、粘質土である K に粒径区分 $850\sim 425\mu\text{m}$ の砂を混合率(質量比)を変えながら求めた流動曲線をFig. 4に示す。Fig. 4からも同様な結果、すなわち粘質土(K)の最大粒子径(d_{max})の小さい試料ほど(換言すれば微細粒子分の多いほど) I_t は大きく、また LL も大きいことが明らかとなった。

Table 4 Hydraulic conductivity of Haneda hedoro soil in drying process

Test	water content $w(\text{kg/kg})$	pF	dry density $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	hydraulic conductivity $k(\text{m/s})$
fresh	1.268 ± 0.040	0.5	0.602 ± 0.009	1.32×10^{-8}
stage 1	1.107 ± 0.023	1.7	0.687 ± 0.008	8.95×10^{-9}
stage 2	1.012 ± 0.029	2.0	0.700 ± 0.003	8.79×10^{-9}
stage 3	0.929 ± 0.016	2.6	0.755 ± 0.017	2.08×10^{-9}
air dried	0.109 ± 0.003	—	0.932 ± 0.006	3.26×10^{-8}

Table 5 Hydraulic conductivity of Kasumigaura hedoro soil in drying process

Test	water content $w(\text{kg/kg})$	pF	dry density $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	hydraulic conductivity $k(\text{m/s})$
fresh	2.401 ± 0.023	0.5	0.354 ± 0.003	1.20×10^{-8}
stage 1	2.209 ± 0.052	1.4	0.371 ± 0.004	4.17×10^{-9}
stage 2	2.055 ± 0.047	1.7	0.389 ± 0.006	4.02×10^{-9}
stage 3	1.669 ± 0.016	2.3	0.488 ± 0.004	1.83×10^{-9}
air dried	0.086 ± 0.003	—	0.764 ± 0.010	1.27×10^{-8}

2) 透水特性

Table 4とTable 5は H 並びに K の飽和透水係数(k)と乾燥密度(ρ_d)を各乾燥段階別にまとめて示したものである。 H 並びに K ともに生土から乾燥の進行に伴って ρ_d は増大し、 k は低下していくが、風乾土に至っては ρ_d が最大値を示すものの、 k が逆に増大し、生土に近い値となっている。これは乾燥によって透水性を左右する乾燥亀裂が発生し、水浸時における膨潤が完全に回復しないことによるものと考えられる。従って、前述したコンシステンシー特性だけでなく透水特性においてもヘドロが脱水・乾燥に伴い質的・構造的変化をすることが認められた。

(3) 論 議

1) 基本物理性

LL は繰り返した状態の土粒子・水系が、一定の外部応力に対して一定の流動抵抗を起こすのに必要な水分であり、粒子間力に關係する。粒子間力は粒度組成が細粒側に移行するほど大きくなるから、一定の流動抵抗を起こすのに要する水分もそれに伴い多くなる。すなわち LL も大きくなる[2]。大場川(O)の粒径別の試料並びに霞ヶ浦(K)に砂を混合した試料の LL (Fig. 3, Fig. 4)をみると、最大粒径が小さくなるにつれて、 I_t は増大し、

またLLも増大する。また、ヘドロの性状は構成している流入物質に大きく左右されるため、堆積場所によって多少なりとも変化する。コンシステンシーに最も大きく関係する粒度組成はKとHとの間に大差がないものの、KのLL値はHの2倍以上を示している。これには、粒度組成以外の因子が関与しているものと考えられる。

2) ヘドロの乾燥特性

前報[6]ではヘドロの脱水・乾燥に伴う質的变化を究明するため、採取試料の量が多かったHのみで生土を含む総4段階の含水状態を対象として、コンシステンシーを中心に論じた結果、乾燥に伴う不可逆性の発現することが明らかとなった。従って、不可逆性発現の特性をより詳細に検討し、そのメカニズムを明らかにするため、本報では供試土であるHとKの乾燥処理を3段階または8段階まで、より詳細に把握しようとした。浚渫時には著大な自然含水比(w_n)を示したヘドロも、脱水・乾燥が進み空気にさらされるようになると、疎水化され保水性を低下させる。ここに述べた乾燥による疎水化現象は、コンシステンシーの変化によく現れている。この現象に関してはFig. 1とFig. 2に示したとおりいずれの試料においても明らかに乾燥処理の影響が少なからず現れた。その結果、試験時の含水比が低下するほどLL値も減少していった。このように、ヘドロの高含水状態、または自然含水比がほぼLLであり、非常に不安定な状態が、脱水・乾燥を行うことによって、顕著にLLの減少・流動性の安定化方向に向かうという事実は、ヘドロの土壌工学的な改良を図る上で重要な意味をもつものと考えられる。また、ヘドロは乾燥による脱水過程で、空気の侵入と酸化を受け、分散的な構造から凝集的な構造に次第に変化する。このような変化過程を本報では乾燥密度の変化とそれに伴う透水性から検討した。前述したように、対象試料ともに生土から乾燥3段階まで乾燥の進行とともに ρ_d は増大し、 k は低下していくが、風乾土に至っては ρ_d が最大値を示すものの、 k が逆に増大した。これには乾燥によって透水性を左右する乾燥亀裂が発生、すなわち構造的な変化が生じ、水浸時における膨潤が完全に回復しないことによるものと考えられる。

3) 砂混入によるコンシステンシー変化

Fig. 3から、粒径の大きい粒子の含有率が増加するほどLLは低下し、 I_r は小さくなっている。こうした現象は、Fig. 4に示したように粘質土のKに粒径区分850~425 μm の砂を混入し、混入率を高めていった場合にも再現された。従って、ここでは少量の細粒分がいかなる条件のもとで、粗粒分の移動に寄与するかを考えてみた。最大粒径(d_{max})が大となることは、供試土中の砂分が増加することを意味し、充填や練返し等、外力によ

る粗粒分の流動性を困難にさせ、流動における水分の役割は極めて重要となる。一方、 d_{max} が小さくなることは相対的に細粒分が増加することになり、粗粒分の流動における役割は水分と細粒分が受けもつものとする。本来コンシステンシーが分析対象となる土試料は大部分シルト分及び粘土分から構成されるものとされ、砂粒子のような粗粒分の多い土試料は非塑性(NP)として扱われていた。しかし、ヘドロは特殊な水分条件下に置かれており、わずかに含まれている微細粒子が水との相互作用によって流動化に少なからず寄与することになる。すなわち、砂分のみではたとえ、水分がある一定以上含まれていても生じることのない流動化現象が大場川ヘドロ(O)のような少量の微細粒子においては水との相互作用によって引き起こされるようになる。

摘 要

港湾・湖沼・河川に堆積するヘドロは膨大な量であり、必要に応じて浚渫を行わねばならない。しかし、浚渫土の処理もまた重要な課題である。従って、本報では、採取地の異なる3種類のヘドロを対象として、基本的物理性並びに乾燥処理に伴うヘドロの質的变化をコンシステンシー特性及び透水特性から検討した。

物理性並びに乾燥特性の検討より得られた結果は以下に要約される。

1. ヘドロは堆積場所によって粒度組成が大きく異なる。また、粒度組成が類似しても、堆積場所の周辺環境の影響によりコンシステンシー等がかなり異なる。
2. 生土の霞ヶ浦(K)のLL・PLがともに異常に大きいことが注目される。特にLL値はKが羽田沖(H)の2倍以上、大場川(O)の10倍以上を示している。
3. 霞ヶ浦(K)と大場川(O)ともに微細粒子分の混合率が大きいほど I_r は大きく、またLLも大きいことが明らかである。
4. ヘドロは、土のコンシステンシー特性並びに透水特性において、脱水・乾燥に伴い質的变化が認められた。

謝 辞

本研究を進めることに当たり、パシフィック コンサルタンツ株式会社総合技術本部港湾部並びに日本ソイルエンジニアリング株式会社土木本部営業部の御厚意により、試料を提供していただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 神山光男(1959): 試料の乾燥状態が土の稠度に及ぼす影響, 土と基礎, 7(1), 44-47.
- [2] 前田 隆・相馬尅之(1974): 土のコンシステンシーに影響をおよぼす因子について, 土壤の物理性, 30, 15-22.
- [3] Pons, L.J. and W.H. Van der McLen (1973): Soil Genesis under Dewatering Regimes during 1,000 years of Polder Development, Soil Sci., 116, 228-235.
- [4] 相馬尅之・前田 隆(1974): 火山性ローム土の初期含水比が液性限界に及ぼす影響, 農土論集, 49, 27-34.
- [5] 竹中 肇・江崎 要(1973): ヘドロの土壤工学的特性とその改良, 土と基礎, 21(6), 67-74.
- [6] 矢橋晨吾・金 原台・玉津智宏・Hoque M. Mozamel・阿部勢子・高橋 悟(1998): ヘドロの利活用 II. ヘドロの乾燥特性, 千葉大園学報, 52, 151-156.
- [7] 矢橋晨吾・武藤ゆり・玉津智宏・金 原台・高橋 悟・渡辺文雄(1997): ヘドロの利活用 I. 物理的性質, 千葉大園学報, 51, 167-172.
- [8] 山崎不二夫・竹中 肇(1965): 風乾がアッタベルグ限界に及ぼす影響, 農土論集, 14, 46-48.