

# 天日乾燥浄水汚泥の水分滲出特性と 含水減量による安定処理効果

AN Oozing Property of Purified Water Sludge  
Accumulating in Air Drying Bed and Its Stabilization Effect  
Brought by Reducing Moisture Content

山田幹雄\*・佐野博昭\*\*・坪川 茂\*\*\*・奥野雅基\*\*\*\*

By Mikio YAMADA, Hiroaki SANO, Shigeru TSUBOKAWA and Masaki OKUNO

## 1. はじめに

統計資料<sup>1)</sup>によると、2008年度の産業廃棄物排出総量は403,661千トンであり、調査の対象となる19品目の中で最も多く排出された廃棄物は前年度に続いて汚泥(176,114千トン、総量の43.6%)であった。このうち、上水道・水道用水供給事業で生じた浄水汚泥の量(脱水処理前)は8,349千トン、汚泥全体の4.7%に相当していた。

水道に関する重要な政策課題とそれに対処する上での具体的な施策等を示すものに『水道ビジョン』がある。先般の改訂<sup>2)</sup>では「レビューに基づく水道施策の重点取組項目」が追加され、環境・エネルギー対策の強化に係る達成目標の1つに“浄水汚泥の有効利用率を100%とする”ことが掲げられた。

有効利用率の推移<sup>3)</sup>をみると、2004年度の53%から2008年度には63%へと増加しているものの、2009年度以降も同程度の経年変化に止まっているとするならば、上記の目標にいたるまでにはかなりの期間を要するといえよう。ただし、東京都のようにすでに80%に達している自治体も存在する。

浄水汚泥は、これまでのところセメント原料(有償処分が主)や園芸用土のほかグラウンド改良材<sup>4)</sup>、緑化基盤材<sup>5)</sup>、埋戻し材<sup>6)</sup>、排水処理剤・汚染土壌不溶化材<sup>7)</sup>、インターロッキングブロック<sup>8)</sup>、保水性舗装用保水材<sup>9)</sup>などに用いられている。

ここで汚泥処理、すなわち、水分を除いて体積を減らす方法を大別すると機械式と自然式となる。前者の典型は加圧脱水装置であり、排泥の頻度の高い大規模な浄水場に設置される場合が多い。一方、屋外に設ける天日乾燥床が後者にあたり、広い用地

の確保が可能な中・小規模の浄水場では機械式に比べて経費面で有利となる反面、乾燥に費やす時間や乾き具合は季節や天候に左右されることになる<sup>10)</sup>。

写真-1は、本研究で使用した浄水汚泥の入手先である福井県坂井地区水道管理事務所の天日乾燥床(720m<sup>2</sup>×10池)における汚泥の乾燥過程を示したものである。打込(沈殿池の底から泥を引き抜いて貯留)に約1ヶ月半、乾燥に11ヶ月程度の日数を経て搔寄(回収して搬出)にいたる。その間、およそ6ヶ月経過時にはスコップで掬える状態、9ヶ月目には大きなひび割れが生じる状態にまで水分は蒸発している。なお、搔寄量は平均して500m<sup>3</sup>/年である。

次に、浄水汚泥は機械式、自然式の区別なく日常の排出量には限りがあるため、例えば道路土工などに利用する際の不足分を天然の土砂を混ぜ合わせて補う措置が講じられる<sup>11)</sup>。ところが、数年後に改修工事を行って混合材料を掘り起こした段階で、元の天然資源までもが廃棄物扱いとなる不都合を生じる。

この点に関して、文献12)には天日乾燥浄水汚泥の水道管理戻し材への複数年繰返し利用を対象に、最終処分量の削減や天然資源の損失を考慮に入れた環境価格を算定したところ、土砂(当該事例では山砂)の混合は環境負荷低減をもたらさず、浄水汚泥のみで用いるのが得策との見解が述べられている。

そこで、著者らは漸次含水減量を呈する天日乾燥浄水汚泥の特長を活かして、乾いた塊となる以前の湿った塊を、安定処理を前提に消費していくことも建設分野における利用促進の一助になると考えた。また、含水比がおおよそ1/2にまで低下する3ヶ月間(前出写真-1参照)を短縮できれば天日乾燥床1池あたりの稼働率が向上し、給水量と併せて排泥量も徐々に増えていくものと判断した。

この論文では、透水性のジオテキスタイルの上に置いた高含水比浄水汚泥の水分滲出率と載荷条件との関係、最適含水比に調整した浄水汚泥を安定処理したときの支持力や強度の経時変化について述べる。

\*福井工業高等専門学校 教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町), \*\*大分工業高等専門学校 教授 都市・環境工学科, \*\*\*福井工業高等専門学校 教育研究支援センター, \*\*\*\*福井県産業労働部 坂井地区水道管理事務所 所長

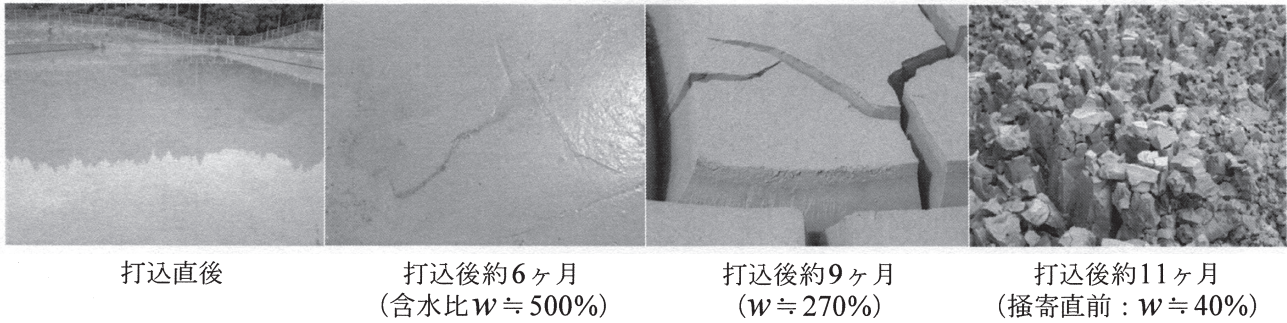


写真-1 浄水汚泥の天日乾燥床打込から搔寄にいたる経過

## 2. 試験に用いた浄水汚泥の性質

福井県の北部に位置する坂井地区水道管理事務所で、約8km隔てた龍ヶ鼻〔りゅうがはな〕ダムから一級河川の竹田川に放流された水を汲み上げて水道用水をつくり、それを2つの市の7箇所の配水池へ送っている。2008年度の計画給水人口は135,000人、1日最大給水量は44,175m<sup>3</sup>であった。

この浄水場において、沈砂池で上水〔うわみず〕中の濁りの粒子を固める薬品、いわゆるフロック形成の凝集剤にはポリ塩化アルミニウムを用いている。天日乾燥床の幅は18mであり、厚さ50～80mmの勾配コンクリート版の上に順次150mm厚の砂利層、土木シート、200mm厚の砂層が敷設されている。ここに、土木シートの素材はポリエステル繊維で、品質は厚さ0.25mm、引張強さ1570N/3cm、伸び率11%、引裂強さ350N、透水係数 $5.0 \times 10^{-5}$ m/sである。以後、本論文では天日乾燥浄水汚泥を単に浄水汚泥と称することにする。

搔寄直後の浄水汚泥を検体とした溶出試験（環境庁告示第13号）の結果を抜粋して表-1に示す。『産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準』に抵触する有害物質の溶出は認められず、かつ、全国的にみても安全性を同様に担保している従前からの証が、浄水汚泥を園芸用土や畑地客土に広く用いている所以の1つとなっている。なお、産業廃棄物を地盤材料に利用する場合には『土壌の汚染に係る環境基準』を満足する必要があるため、フッ素とホウ素についても溶出濃度を調べた（環境庁告示第46号による試験方法）が、いずれも計量下限値であった。

表-2は、乾いた浄水汚泥の蛍光X線分析および強熱減量試験の結果を示す。主成分は二酸化ケイ素、酸化アルミニウム、酸化第二鉄であることがわかる。このうち、Al成分には鉱物由来と凝集剤由来の双方が混在している。文献7)、13)には凝集剤の投入量は原水の質に応じて浄水場ごとによりかなりの差があること、また、X線回折において石英や曹長石の鉱物は確認できるものの、凝集剤由来のAlを成分とする

物質のピークは現れず、非晶質の形で存在するとの知見が述べられている。強熱減量も原水に含まれる有機物の多少に左右されるが、各地の浄水場で測定した値<sup>7)、14)</sup>に照合すると、今回の室内試験に供する浄水汚泥はそれらの概ね平均にあたる。

表-3は、浄水汚泥の土質試験の結果をまとめたものである。試験には2009年5月中旬に打込終了、6ヶ月後の11月上旬に採取した浄水汚泥（含水比 $w \approx 500\%$ ）を用いた。実験室搬入後、ホーローバットの中に径100mm程度の塊に小分けして並べ、日中は送風下に、夜間は室温下に置いた。

土粒子の密度は強熱減量が多いことに起因して幾分小さい<sup>15)</sup>ものの、粉末活性炭非投入の浄水汚泥としては通常の範囲にある<sup>14)</sup>。粒度組成の90%近くが細粒分（シルトと粘土の合計）であって、液性限界および塑性限界が極めて高い点に沖積層や洪積層の粘土との違いがみられる<sup>15)</sup>。JIS A 1210 A-a法で求めた締固め曲線（ $78\% \leq w \leq 131\%$ ）はなだらかで、最大乾燥密度との差は $0.08\text{g/cm}^3$ （ $w = 78\%$ ）ないし $0.14\text{g/cm}^3$ （ $w = 131\%$ ）とわずかであった。有機

表-1 浄水汚泥の金属等溶出量

	溶出量 [mg/L]	基準値* [mg/L]
アルキル水銀化合物	不検出	検出されないこと
水銀またはその化合物	0.0005 未満	0.005
カドミウムまたはその化合物	0.001 未満	0.3
鉛またはその化合物	0.002 未満	0.3
有機リン化合物	0.1 未満	1.0
六価クロム化合物	0.01 未満	1.5
ヒ素またはその化合物	0.005 未満	0.3
シアン化合物	0.1 未満	1.0
ポリ塩化ビフェニル (PCB)	0.0005 未満	0.003
セレンまたはその化合物	0.001 未満	0.3

\* 産業廃棄物の埋立処分に係る判定基準  
環境庁告示第13号：産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法

表-2 浄水汚泥の化学成分組成

SiO <sub>2</sub> (%)	45.5	CaO (%)	1.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	36.3	TiO <sub>2</sub> (%)	0.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	9.25	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.69
SO <sub>3</sub> (%)	2.06	Na <sub>2</sub> O (%)	0.63
MgO (%)	1.78	MnO (%)	0.24
K <sub>2</sub> O (%)	1.24	Ig.loss* (%)	24.6

\* JIS A 1226 の試験方法に準拠

炭素含有量について、その量は例えば有機質粘土を上回り(横浜市で採取した土の測定値: 2.4%), これを有機物含有量に換算するとおよそ7%となる<sup>15)</sup>。

一般に、ポリ塩化アルミニウムの化学的固結力によって、浄水汚泥は乾燥中途のある含水比を境に土粒子の集合体(団塊)を成し、その後は水に接しても再泥化しない性質を有する<sup>12), 14)</sup>。

写真-2に示すように、本研究で取り扱った浄水汚泥では、含水比 $w$ が78%~75%にまで低下したときに上記の事象が現れた。団塊の硬さは、木槌で叩くと砕けるくらいである。それでも粒は粗く、湿潤側への調整も難しいことから、安定処理にあたっては最適含水比 $w=95%$ を目標に、乾燥時間の短縮が見込める方法で含水減量を図るのが適切といえる。

### 3. ジオテキスタイル併用による水分滲出促進効果

周知のとおり、建設発生土に付加価値を与えて高度で多目的な要求に対応できるように開発した材料、いわゆるハイグレードソイルを提供する技術の1つに袋詰脱水処理工法がある。この工法に用いる袋体は透水性のジオテキスタイルでつくられており、中に詰めた高含水比の土壌や底泥の流出を防ぎながら排水を促す機能を具備している<sup>16)</sup>。著者らは透水性のジオテキスタイルの効用を根底に、これに鉛直方向の荷重を加味した場合の浄水汚泥(441% $\leq w \leq 480%$ : 打込後約6ヶ月)の水分滲出特性を、在来型の一面せん断試験機を用いて調べてみることにした。

図-1は、せん断箱(内径100mm)内部の状態を

表-3 浄水汚泥の土質試験結果

採取時含水比 (%)	504.4	
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.54	
砂分	粗砂分 (%)	4.3
	中砂分 (%)	5.5
	細砂分 (%)	1.4
シルト分 (%)	19.5	
粘土分 (%)	69.3	
液性限界 (%)	407.0	
塑性限界 (%)	127.5	
塑性指数	279.5	
最適含水比 (%)	95.3	
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.70	
透水係数 (m/s)	$3.53 \times 10^{-8}$	
有機炭素含有量 (%)	3.7	
強熱減量 (%)	23.4	
pH [H <sub>2</sub> O]	6.9	

示す。可動箱と固定箱との間にジオテキスタイルを挟み、その上に浄水汚泥を25mmまたは40mmの厚さ( $h_1$ )に充填した。このときの湿潤密度 $\rho_{tl}$ は $1.09 \sim 1.25 \text{ g/cm}^3$ 、乾燥密度 $\rho_{dl}$ は $0.19 \sim 0.23 \text{ g/cm}^3$ であった。浄水汚泥の上面に作用させる垂直応力 $\sigma$ は0.05MPa, 0.08MPa, 0.10MPaの3段階、載荷時間 $t$ は24hr., 48hr.の二通りに設定した。 $\sigma=0.10 \text{ MPa}$ を上限としたのは、 $h_1=25 \text{ mm}$ の試験においてジオテキスタイルが過度にたわまない範囲(目安1mm)で重錘量を決めた経緯による。高強力ポリエステル繊維製のジオテキスタイルの品質は厚さ0.3mm, 引張強さ1900N/3cm, 伸び率15%, 引裂強さ800N, 透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ である。

図-2は、浄水汚泥充填時の含水比 $w_1$ と湿潤質量 $m_1$ 、除荷後の含水比 $w_2$ と湿潤質量 $m_2$ をもとに算出した水分滲出率 $W_0$ および体積変化率 $V_c$ を、垂直応力 $\sigma$ ごとにまとめたものである。ここに、 $W_0$ は「充填時の水分量」と「除荷後の水分量」との差を前者で割った値の百分率、 $V_c$ は「除荷後の体積」と「充填時の体積」との差を後者で割った値の百分率で表して

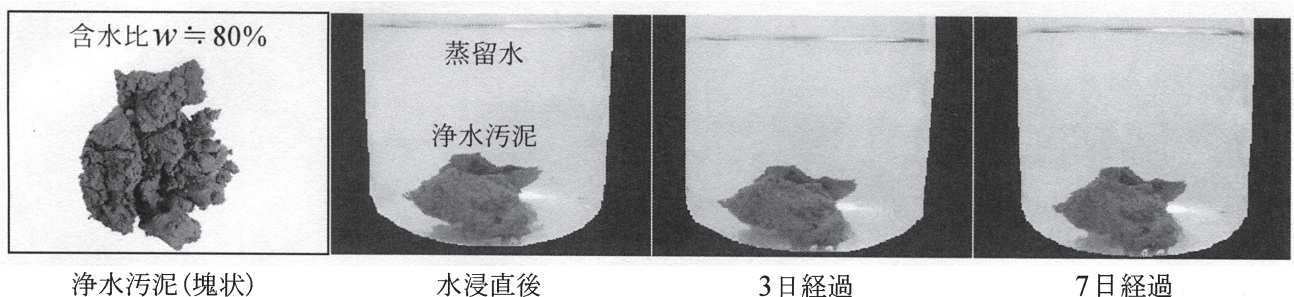


写真-2 水中に浸漬した塊状の浄水汚泥

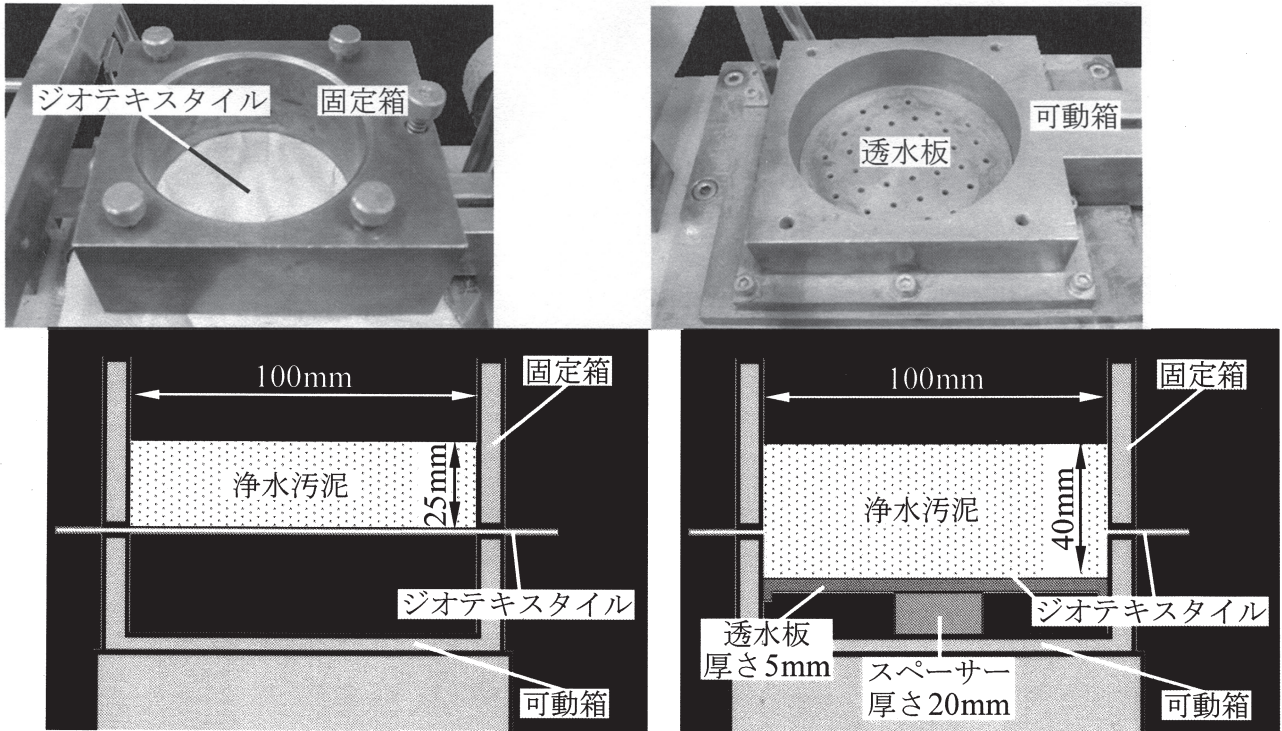


図-1 セン断箱およびジオテキスタイルを用いた浄水汚泥の水分滲出試験

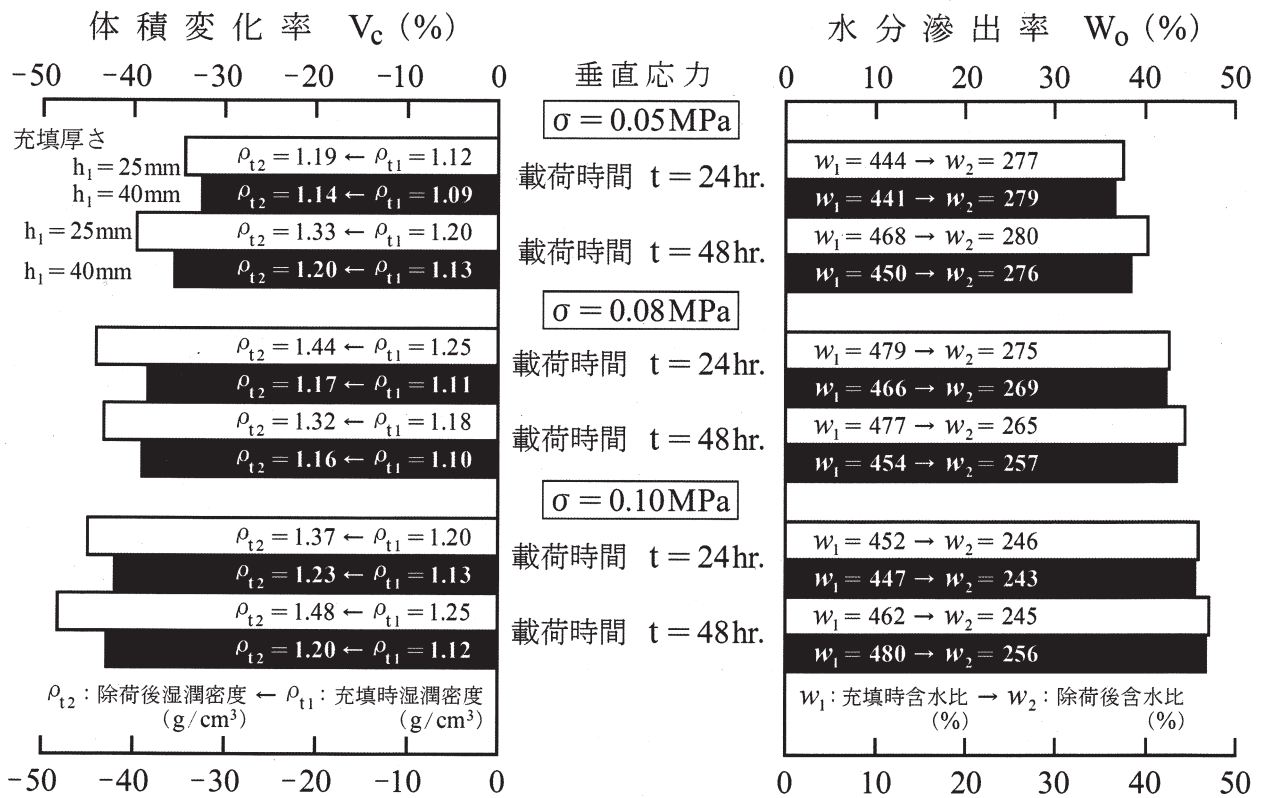


図-2 浄水汚泥の充填厚さ、載荷条件が水分滲出率や体積変化率におよぼす影響

表-4 最適含水比に調整した浄水汚泥に対する CBR試験, 一軸圧縮試験および一面せん断試験の結果

吸水膨張量 $d_e$ (mm)	0.13	JIS A 1211
CBR <sub>2.5</sub> (%)	7.9	に準拠
一軸圧縮強さ $q_u$ (MPa)	0.09	JIS A 1216
変形係数 $E_{50}$ (MPa)	8.8	を準用
粘着力 $c_d$ (MPa)	0.04	JGS 0561
せん断抵抗角 $\phi_d$ (deg.)	25.5	を準用

ある。この図には  $w_1, w_2$  に加えて充填時の湿潤密度  $\rho_{t1}$ , 除荷後の湿潤密度  $\rho_{t2}$  も併記してある。

$\sigma$  を 0.05MPa の 1.6 倍, 2 倍としても,  $t$  を 2 倍長くしても  $W_0$  や  $V_c$  (負: 収縮) はそれらに見合った増加とはならず, また, 充填厚さ  $h_1$  が小さい (記号  $\square$ ) ほど  $W_0, V_c$  ともに大きくなる傾向が認められる。

計算上,  $w_1 = 441 \sim 480\%$  の浄水汚泥が最適含水比  $w = 95\%$  にいたるときの  $W_0, V_c$  はそれぞれ 78 ~ 80%, -70 ~ -81% となって, 今回の載荷条件ではこれらを 5 割ないし 6 割しか満たしていない。しかしながら,  $w_2$  の平均は打込後約 9 ヶ月に相応する 265% であり, 差し当たり 3 ヶ月の天日乾燥期間の短縮に向けては参考となる結果が得られたことになる。

比較のために,  $\sigma = 0.08\text{MPa}$  を 24hr. 作用させ, 引き続き 0.02MPa を加えて 0.10MPa として 24hr. 経った時点 (計 48hr.) の  $W_0$  と  $V_c$  とを求めたが, 充填厚さ  $h_1$  にかかわらず  $\sigma = 0.08\text{MPa}$ ,  $t = 48\text{hr.}$  の条件とほぼ等しい値になった。なお,  $w_2 = 270\%$  の浄水汚泥は断続的な室内風乾状態のもと約 2 週間で最適含水比に調整できた。

#### 4. 安定処理した浄水汚泥の支持力および強度特性

##### 4.1 空気中と水浸とを組み合わせた養生条件下における CBR, 一軸圧縮強さおよびせん断強さ

初めに, 最適含水比  $w = 95\%$  にまで乾かした浄水汚泥の CBR<sub>2.5</sub>, 一軸圧縮強さ  $q_u$ , 強度定数 (粘着力  $c_d$ , せん断抵抗角  $\phi_d$ ) を求めた。

CBR 試験に用いる供試体は質量 4.5kg のランマーで突固め (67 回/層, 3 層) で作製し, 水槽内に 4 日間静置した後, 鋼製のピストンを貫入した。データ整理にあたっては, 貫入量 2.5mm における CBR を採用した。一軸圧縮試験や一面せん断試験に用いる供試体の乾燥密度  $\rho_d$  は CBR 試験で作製した供試体の  $\rho_d = 0.71\text{g/cm}^3$  を目処とし, 浄水汚泥を二つ割モールドまたはカッターリングの中に入れて静的に締固めた。二つ割モールドから取り出した供試体の寸法は直径 50mm, 高さ 100mm であり, 1%/min のひずみ速度で一軸圧縮試験を行った。カッターリン

表-5 安定材の種類, 添加率と供試体の養生条件

Case	軽焼マグネサイト (M)		消石灰 (L)		養生期間 (日)		
	添加率* (%)		添加率* (%)		空気中	水浸	計
	4	6	6	8			
M4-7	○	—	—	—	3	4	7
M6-7	—	○	—	—			
L6-7	—	—	○	—			
L8-7	—	—	—	○	6	4	10
M6-10	—	○	—	—			
L8-10	—	—	—	○			
M6-13	—	○	—	—	9	4	13
L8-13	—	—	—	○			

\* 浄水汚泥の湿潤質量に対する比率

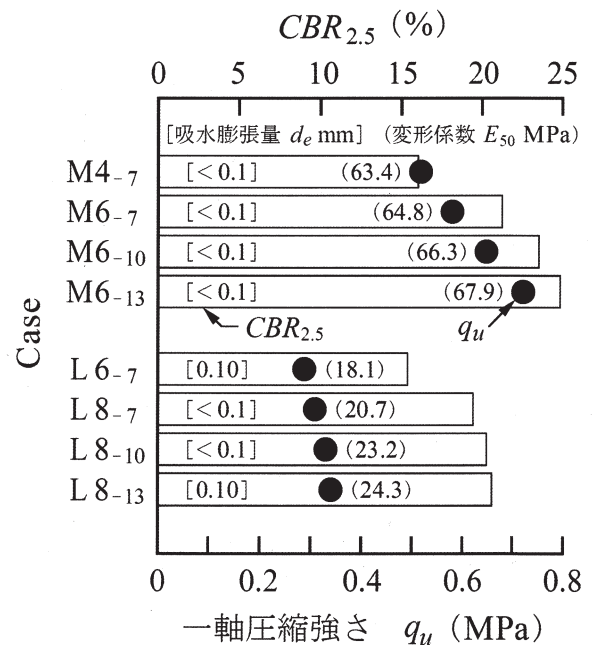


図-3 安定処理した浄水汚泥の CBR および一軸圧縮強さ (空気中養生 + 水浸養生)

グで作製した供試体は直径 100mm, 高さ 50mm であり, せん断変位速度は 0.1mm/min に設定した。

試験結果を表-4 に示す。吸水膨張量  $d_e$  はわずかで, 膨張比  $r_e$  に換算すると 1% 以下となって, 例えば道路路床の質の評価では良好な材料にあたる<sup>15)</sup>。ここで, 強度定数は一軸圧縮強さ  $q_u$  未満の垂直応力  $\sigma = 0.02\text{MPa}, 0.05\text{MPa}, 0.08\text{MPa}$  で生じた 3 つのせん断強さ  $\tau_f$  を結んだ直線から求めた値である。

表-5 は安定材に用いた軽焼マグネサイト (MgO 分 92%, pH = 11.4), 消石灰 (純度 95% 以上, pH = 12.8) の浄水汚泥の湿潤質量に対する添加率および供試体の養生条件 (方法, 期間) をまとめたものであ

る。軽焼マグネサイトの添加率4%, 6%はそれぞれ  $53\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $79\text{kg}/\text{m}^3$  の添加量に, 消石灰6%, 8%は  $78\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $101\text{kg}/\text{m}^3$  に相当する。CBR試験に用いる供試体の空气中養生と水浸養生は, 「安定処理土のCBR試験方法」<sup>17)</sup> に倣って実施した。一軸圧縮試験, 一面せん断試験に関しては, 安定処理した浄水汚泥を充填した容器(二つ割モールド, カッターリング)をラップフィルムで包んで室内の暗所に静置し, その後フィルムを剥がして容器ごと水中に浸漬した。

図-3は, CBR<sub>2.5</sub>(記号□)および一軸圧縮強さ $q_u$ (●)を示す。図には吸水膨張量 $d_e$ , 変形係数 $E_{50}$ も記入してある。CBR<sub>2.5</sub>について, 軽焼マグネサイトの添加率を6%(Case M6), 消石灰の添加率を8%(Case L8)としたときにCBR<sub>2.5</sub>  $\geq 20\%$ となり, 空气中で長く養生するほど大きくなる傾向が認められる。したがって, 構築路床の観点からすれば, 設計CBR = 20%を目標に置く可能性が高いといえる。 $q_u$ も経時的に大きくなるもののCase M6とL8との強度差は約2倍であり, CBR<sub>2.5</sub>に現れた約1.2倍の差に比べると顕著である。供試体のpHは軽焼マグネサイトを添加した浄水汚泥で9.0~9.3, 消石灰添加の浄水汚泥では11.6~11.8であった。

当初, 安定材にセメント系固化材や高炉セメントB種も試用したが, 添加率10%でのCBR<sub>2.5</sub>は15%を下回ったので一軸圧縮試験には着手しなかった。

一面せん断試験における垂直応力 $\sigma$ はCase M4-7の $q_u$ (0.5MPa)未満, L6-7の $q_u$ (0.3MPa)未満とな

るように, Case M4およびM6については $\sigma = 0.25\text{MPa}$ ,  $0.30\text{MPa}$ ,  $0.35\text{MPa}$ の3段階, Case L6およびL8については $\sigma = 0.15\text{MPa}$ ,  $0.20\text{MPa}$ ,  $0.25\text{MPa}$ の3段階とした。

図-4は, 垂直応力 $\sigma$ とせん断強さ $\tau_f$ との関係から求めた強度定数(粘着力 $c_d$ , せん断抵抗角 $\phi_d$ )を示す。 $c_d$ は, 浄水汚泥単体の $0.03\sim 0.06\text{MPa}$ 増となっている(前出表-4参照)。しかし, 養生期間や安定材の種類との関連は明確でない。 $\phi_d$ にも軽焼マグネサイト, 消石灰を添加した効用が現れるが,  $\phi_d$ については長く養生するほど, そして, Case M4とM6の供試体でより大きくなっている。いずれにしても,  $\tau_f$ は $c_d$ に比べて $\phi_d$ に依存する部分が多い。

$\tau_f$ に達した時点のせん断変位 $\delta_f$ はCase M4およびM6で6.7~8.9mm, Case L6およびL8では4.3~6.6mmであり, 概ね $\tau_f$ とともに増加した。

#### 4.2 空气中養生における強度発現過程およびX線回折パターン

次に, 安定処理した浄水汚泥を充填した二つ割モールドをラップフィルムで包んで室内の暗所に1~90日間静置したとき, すなわち, 空气中のみで養生した供試体の一軸圧縮強さ $q_u$ の推移を調べた。

試験結果を図-5に示す。横軸の空气中養生日数 $D_a$ は, 対数で目盛っている。また, 比較のためにCase M6の $q_u$ (記号●), L8の $q_u$ (記号■)も記入してある(前出図-3参照)。ただし, これらは単回帰分析の演算には関与していない。軽焼マグネサイトを

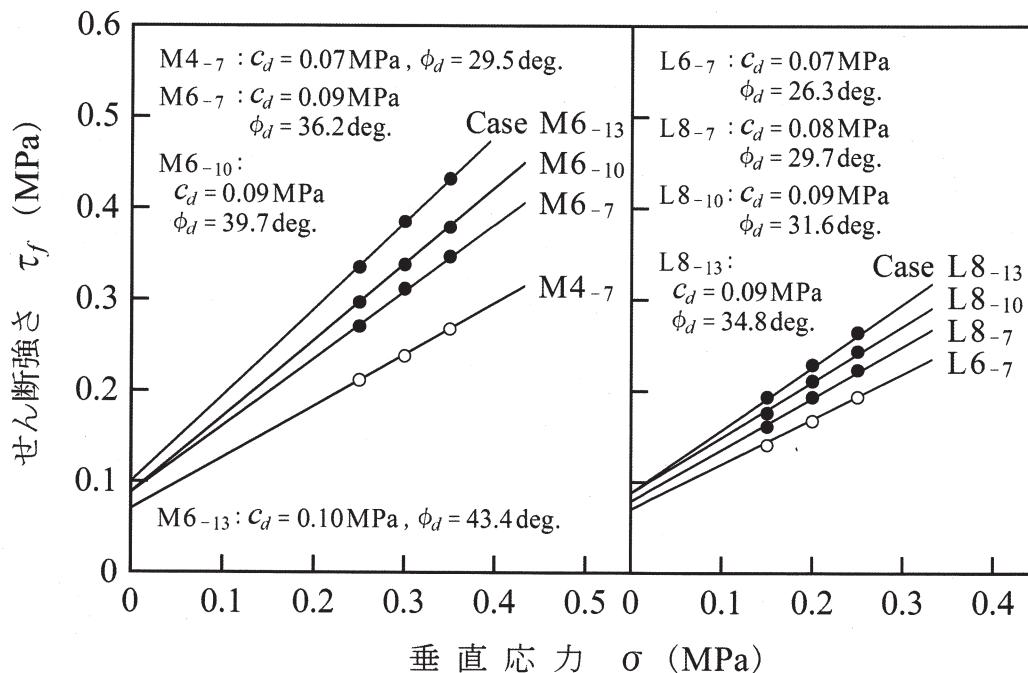


図-4 安定処理した浄水汚泥の強度定数 (空气中養生+水浸養生)

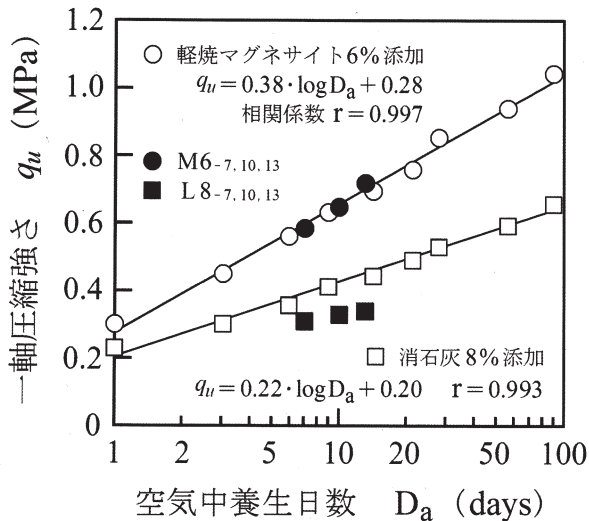


図-5 空气中で養生した供試体の強度発現過程 ( $1 \leq D_a \leq 90$ )

6%添加して作製した供試体(○), 消石灰を8%添加した供試体(□)とともに,  $q_u$ と $D_a$ の対数との間には高い相関をもって直線関係が成り立ち, その勾配を表す係数は前者で0.38, 後者で0.22となり, 強度発現におよぼす安定材の種類の影響が明らかである。さらに, Case M6の $q_u$ は回帰直線に一致するのに対して, L8の $q_u$ は直線の下方に位置することから, 今回取り扱った浄水汚泥に限ると, 水浸時には消石灰による安定処理効果を発揮しにくい兆候が窺える。

図-6は, 空气中養生を最長90日間施した供試体で求めた一軸圧縮強さ $q_u$ と変形係数 $E_{50}$ との関係を示す。軽焼マグネサイト6%添加(記号○), 消石灰8%添加(□)の区別なく $E_{50}$ は $q_u$ に比例して大きくなり,  $q_u$ のおよそ115倍の値に換算が可能である。

既往の研究で, 安定処理した浄水汚泥の $E_{50}-q_u$ 間の相関に言及したものは見当たらない。参考までに, 文献18)には含水比 $w$ が70~155%の建設汚泥(トンネル掘削現場の脱水ケーキ)にセメント系固化材を45~85kg/m<sup>3</sup>添加した際の $E_{50}$ は,  $q_u$ の50~200倍に相当していたとの事例が紹介されている。したがって, 汚泥や安定材の種類は異なるけれども, 先の結果(図-6)は余剰な水分を一定量減じた上で改良した汚泥の変形・強度特性を極端に逸脱していないとみられる。

空气中養生90日目の一軸圧縮試験終了後, 供試体から塊(検体)を採取してX線回折を行った。

1例として, 浄水汚泥に軽焼マグネサイトを6%添加した検体のX線回折パターンを図-7に示す。クリノクロア(斜緑泥石: C<sub>c</sub>), 石英(Q), 曹長石(A)の鉱物および未反応の酸化マグネシウム(M)

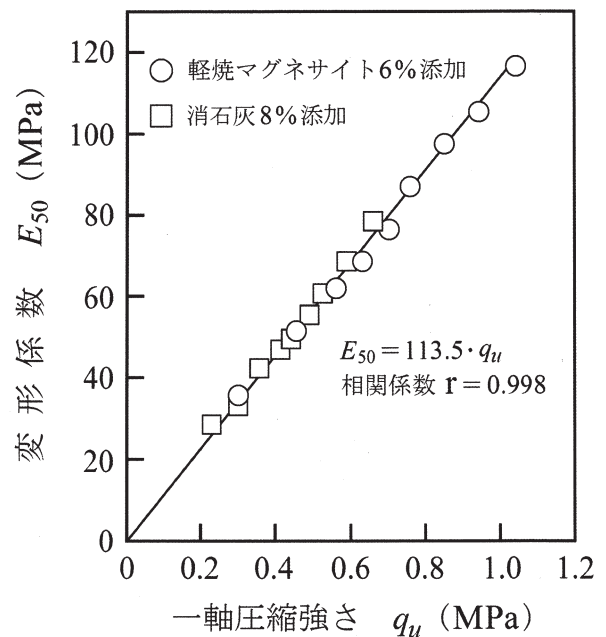


図-6 一軸圧縮強さと変形係数との関係 (空气中養生,  $0.23 \leq q_u \leq 1.04$ )

のピークに加えて, 回折角 $2\theta \approx 12^\circ, 23^\circ, 47^\circ$ にはミックスネライト(M<sub>x</sub>)の生成が確認できる。M<sub>x</sub>はマグネシウム-アルミニウムハイドロタルサイト化合物の一種であり, 軽焼マグネサイト添加による安定処理効果を裏付ける結晶情報といえる。

一方, 消石灰を8%添加した検体のX線回折パターンには上記の鉱物や炭酸カルシウムのほか, 反応生成物であるエトリングタイトのピークが現れた。

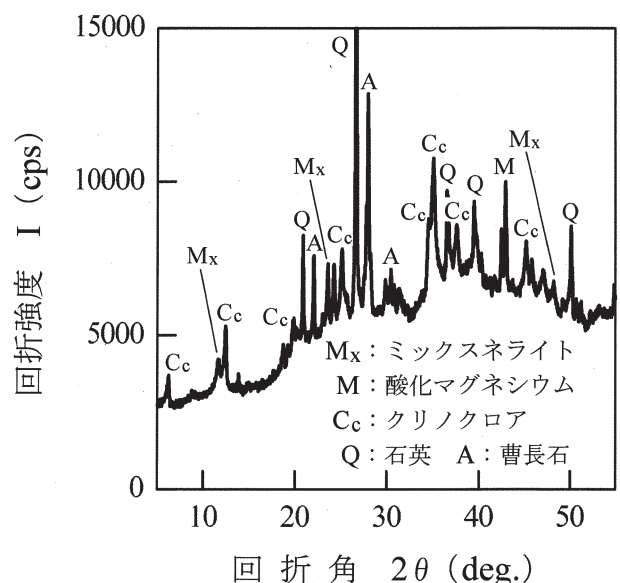


図-7 X線回折パターンの例(軽焼マグネサイト6%添加, 供試体材齢90日)

## 5. まとめ

著者らは自然式の汚泥処理(水分除去, 体積減少)における排泥頻度を高め, 併せて建設分野での用途拡大を図る目的で, 排水促進に透水性のジオテキスタイルを充当した場合の水分滲出特性および安定材を添加した浄水汚泥の支持力, 強度特性を調べた。

以下に, 本研究で得られた主要な成果を列挙する。

- (1) 塑性限界を下回り最適含水比未満まで乾燥した浄水汚泥は, 凝集剤の化学的固結力によって湿潤側へ移行しない塊状を呈する。このため, 安定処理にあたっては最適含水比を保持することが肝要となる。
- (2) 透水性のジオテキスタイルの上に厚さ25mmまたは40mmの浄水汚泥を置き, これに0.05~0.10 MPaの垂直応力を作用させると, 水分滲出率は48時間以内に37~47%となる。この率は, 概ね3ヶ月の天日乾燥期間に相当する。
- (3) 最適含水比の浄水汚泥に軽焼マグネサイトあるいは消石灰を添加して作製した供試体を初めに空気中で, 続いて水中で養生すると $CBR_{2.5}$ , 一軸圧縮強さ $q_u$ , せん断強さ $\tau_f$ はいずれも経時的に増加する。ここで,  $\tau_f$ にはせん断抵抗角 $\phi_d$ が主に関与する。
- (4) 空気中で養生した供試体の $q_u$ と日数の対数との間には回帰直線が成立し, その勾配は消石灰よりも軽焼マグネサイトを添加した方で大きくなる。また, 変形係数 $E_{50}$ は $q_u$ の約115倍の値に換算できる。

## 謝 辞

研究の遂行にご助力を頂戴した緑商事株式会社の稲澤知洋氏, エス・イ・コンサル株式会社の森國英治氏, 轟産業株式会社福井支店の酒井信治氏と山田武史氏に厚く御礼申しあげる。さらに, 種々の室内試験やデータの整理に携わった福井工業高等専門学校専攻科および本科の学生諸君に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部:平成22年度事業 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 平成20年度実績 -概要版- (2011年3月)
- 2) 厚生労働省健康局水道課:水道ビジョンー平成20年7月改訂ー (2008年7月)
- 3) (社)日本水道協会・水道統計編纂専門委員会:水道統計の経年分析ー平成16年度~20年度ー (2010年8月)
- 4) 例えば, (社)雨水貯留浸透技術協会:エコマックス工法 (2001年8月)
- 5) 例えば, 田辺和康・富田武満・山田幹雄・佐野博昭:浄水ケーキを用いた緑化基盤材の開発,

土と基礎, 第55巻, 第7号, pp.21-23 (2007年7月)

- 6) 例えば, (財)土木研究センター:浄水汚泥を原料とする粒状改良土ーセフティクレイ, 建設技術審査証明事業概要書 (2008年11月)
  - 7) 吉岡 理・片山貴幸・市岡高男・塚田 進:浄水汚泥を原材料とした環境浄化材料の開発, 三重県保健環境研究所年報, 第11号, pp.67-73 (2009年9月)
  - 8) 例えば, 福井県工業技術センター:エコブロック, 技術支援成果事例集, pp.23 (2010年1月)
  - 9) 石川 響・平井伸一・丸山隆之・高木 努:浄水場発生土を利用した保水性舗装, 舗装, 第45巻, 第2号, pp.6-11 (2010年2月)
  - 10) (財)水道技術研究センター編:新しい浄水技術ー産学官共同プロジェクトの成果ー, 技報堂出版, pp.401-411 (2005年3月)
  - 11) 蛭田俊明・小峯秀雄・安原一哉・村上 哲・渡邊保貴・磯 秀幸・豊田和弘:浄水汚泥を用いた試験施工舗装における小型FWDによる支持力評価, 第45回地盤工学研究発表会講演集, 235, C-07, pp.469-470 (2010年8月)
  - 12) 渡邊保貴・小峯秀雄・安原一哉・村上 哲・ベジェヒョン・豊田和弘:環境経済効果に基づいた浄水汚泥と砂質土の混合利用, 土木学会論文集C, 第66巻, 第4号, pp.788-799 (2010年11月)
  - 13) 及川照靖・小峯秀雄・安原一哉・村上 哲・木賀田賢太:加圧脱水浄水汚泥と天日乾燥浄水汚泥のリン酸態リンおよび硝酸態窒素の吸着特性, 第45回地盤工学研究発表会講演集, 1005, B-12, pp.2009-2010 (2010年8月)
  - 14) 渡邊保貴・小峯秀雄・安原一哉・村上 哲・豊田和弘:浄水汚泥のアルミニウム溶出に関する環境影響評価手法の提案, 土木学会論文集G, 第65巻, 第3号, pp.188-201 (2009年9月)
  - 15) (社)地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編:地盤材料試験の方法と解説ー二分冊の1ー (2009年11月)
  - 16) (独)土木研究所編著:建設発生土利用技術マニュアルー第3版ー, 丸善, pp.85-95 (2004年9月)
  - 17) (社)日本道路協会:舗装調査・試験法便覧, 第4分冊, pp.155-158 (2007年6月)
  - 18) (独)土木研究所編著:建設汚泥再生利用マニュアル, 大成出版社, pp.182-183 (2008年12月)
- (2011年11月3日受付 2012年2月18日受理)