

高含水比廃滓の土質工学的性質と底面排水工法による急速脱水

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF HIGHLY-MOISTURED WASTES AND RAPID DEHYDRATION BY A BOTTOM DRAINAGE METHOD

三浦 哲彦*・福田 直三**・小林 是則***

By Norihiko MIURA, Naozo FUKUDA and Yoshinori KOBAYASHI

This paper describes the geotechnical properties of highly-moistured wastes discharged from several plants, and also describes a new method for the rapid dehydration by which the wastes become easy for the geotechnical processing. The samples tested are red muds, white muds, and sludges from a filtration plant. Consolidative and shear characteristics of these wastes are comparably discussed with those of clays and high organic soils. For the rapid dehydration, a bottom drainage method is examined at field using a polymer grid container of 5 m diameter and 1 m depth with the filter fabric at inside wall and bottom. Field test results prove the bottom drainage method to be very effective for the rapid dehydration of the highly-moistured wastes.

1. ま え が き

化学工場や浄水場から排出される高含水比の廃滓は、一時的に沈殿池に貯留された後かなりの費用を投じて脱水、運搬、投棄しているのが現状である。中でも産業廃棄物に指定されている廃滓の場合には、取扱いは一層厳しく規制されており敷地内での貯留廃棄を余儀なくされていることも少なくない。かかる場合は廃滓からいかに効率的に脱水させるかが貯留スペース確保と処理費用の両面から重要な問題となる。

現在、脱水過程の最終段階としては、フィルタープレスなど機械的方法による脱水、天日乾燥による脱水などの方法が講じられている。しかし、これらの方法においては土質工学的考慮はほとんどなされていないために、必ずしも効果的脱水が行われているとはいいがたい。たとえば、沈殿池に貯留する過程において本報で述べる底面排水工法を採用すれば大幅な含水比低下が期待でき、それ以降の脱水をより効果的に行うことが可能となる。

本研究は高含水比の各種廃滓から土質工学的手法で効果的に脱水させることを目的として、代表的な数種類の廃滓について土質工学的特性を調べるとともに先述の底面排水工法に関する現場実験および解析結果について述べるものである。

2. 実験試料

(1) 赤泥 (ボーキサイト滓)

アルミナ原料であるボーキサイトはアルミナ、酸化けい素、酸化鉄、酸化チタン等を含有している。これを粉碎シカセイソーダで溶解させる過程で排出される不溶解残渣は酸化鉄を主成分としており、赤褐色を呈しているところから赤泥とよばれている¹⁾。

本実験では九州の2つの工場から排出された赤泥を対象とした。それらの化学成分は Table 1 に示されている。普通の土に比べて酸化ソーダと酸化チタンの含有量が多い。pH 値は、赤泥 M では pH=12.0、また亜硫酸ガス処理した赤泥 S では pH=9.0 であった。

赤泥の粒度曲線および物理的性質は Fig. 1 および Table 2 のとおりであった。本試料の塑性図上の位置は Fig. 2 に示しているが、自然含水比試料の P.I. ~ w_L プロットに対して空気乾燥、炉乾燥試料のそれは A 線に沿って移動し液性限界値は 10~15% 低下する。

* 正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部建設工学科
(〒840 佐賀市本庄町1番地)

** 正会員 工博 復建調査設計(株)課長補佐 地質調査部
(〒730 広島市東区光町2-10-11)

*** 三井石油化学工業(株)研究員 ポリマー応用研究所
(〒740 山口県玖珂郡和木町)

(2) 白 泥

ソーダ灰，リン酸，氷晶石の製造工場から排出される廃滓は Table 3 の化学組成を有しており，乳白色であっていわゆる白泥の一種である．沈殿池の廃滓は 250～300 % の含水比であるが，これを濾過機に通して含水比 50 % 程度のケーキ状となし，遠隔地に運んで埋立材としているのが現状である³⁾．

本実験では沈殿池の 3 か所から採取した試料を用いたが，これらの粒度曲線は Fig. 1 に示すようであった．ま

Table 1 Chemical components of red mud.

Component	lg. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Sample M(%)	8.72	7.52	19.19	47.30	8.32	3.81	0.32	4.32	0.32	98.82
Sample S(%)	9.32	17.24	21.15	33.28	6.64	2.69	0.44	9.28	0.14	100.18

(By Kyushu Industrial Research Institute)²⁾

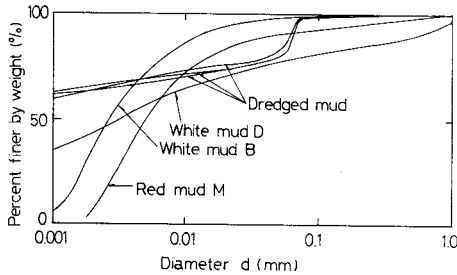


Fig. 1 Grain size distributions of tested muds.

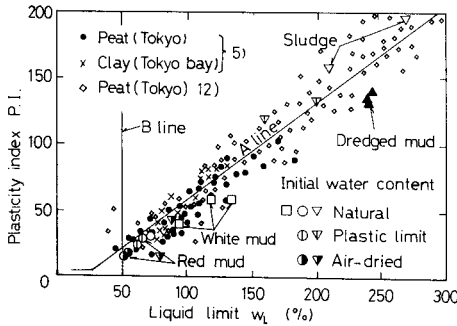


Fig. 2 Plasticity chart.

Table 2 Physical properties of tested samples.

Sample	Symbol	ω_p (%)	e_n	G_s	ω_L (%)	ω_p (%)	P.I.	Classification
Red mud	M	14.3	4.3	3.64	66.8	34.3	32.5	MH
	S	11.6	3.6	3.15	67.5	34.4	34.4	MH
	B	11.0	3.2	2.86	90.0	52.9	37.1	CH
White mud	D	14.5	4.2	2.90	135.1	73.4	61.7	CH
	E	12.0	3.4	2.84	122.0	57.9	64.1	CH
	A	67.1	18.0	2.68	340.9	83.1	257.8	CH
	B	30.5	7.9	2.59	80.7	72.5	208.2	CH
	C-1	45.6	11.9	2.61	267.8	65.0	202.8	CH
Sludge	C-2*	45.6	11.9	2.61	196.9	65.0	131.9	CH
	C-3***	45.6	11.9	2.61	77.0	65.0	12.0	CH
	D-1	35.5	9.5	2.68	209.8	49.9	159.9	CH
	D-2*	35.5	9.5	2.68	161.3	49.9	111.4	CH
	D-3***	35.5	9.5	2.68	88.2	49.9	38.3	CH
	E	41.0	10.6	2.59	220.5	53.0	167.5	CH

* Sample was dried to plastic limit before the consistency tests.

** Sample was dried in air before the consistency tests.

Table 3 Chemical components of white mud.

Component	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaCO ₃	NaCl	Mg(OH) ₂	CaF ₂	Na ₂ (PO ₃) ₂ ·6H ₂ O	SiO ₂	Total
Percent	1.5	3.0	5	1.5	1.0	1.5	1.0	10.0

(By The Factory of Central Glass Co. Ltd.)

Table 4 Chemical components of sludge.

Component	lg. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Total
Percent	16.54	47.93	31.48	4.88	2.92	2.29	0.31	100.00

(By Works of Ito et al. (1971))

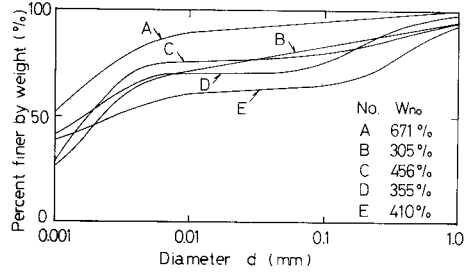


Fig. 3 Grain size distribution of sludge.

た，物理的性質については前出 Table 2 に示している．液性限界，塑性限界は普通の粘土や赤泥に比べてかなり高いようである．

(3) 浄水スラッジ

浄水場から排出されるスラッジは，かつては希釈して河川放流していたのであるが昭和 51 年 6 月に水質汚濁防止法が施行されてからは浄水場は特定施設の中に含まれ厳しい規制を受けるようになった．

スラッジは原水に含まれていた微粒粘土質，浄水過程で使用される沈殿凝集剤などを含んでおり，Table 4 の化学組成を有している⁴⁾．その処理方法については機械的処理，天日乾燥などが考えられているが決め手となる処理システムはいまだ確立されていない．

実験試料は宇部市広瀬浄水場から採取した．その粒度曲線は Fig. 3 に示すようであった．また，物理的性質は Table 2 に示している．コンシステンシー特性は Fig. 2 にみられるように赤泥や白泥とはかなり異なっており，泥炭に近い性質であることがわかる．これは 16～17 %

の有機物を含有しているためであろう．一般の高有機質土と同じように試料を乾燥させるとコンシステンシーは著しく低下する．本試料の場合，自然含水状態では液性限界が 210～330 % であったものが，十分気乾させた後に測定すると 75～90 % まで低下する (Table 2)．

3. 圧密特性

(1) 赤 泥

2 つの試料について標準圧密試験を行い Fig. 4 に示す $e \sim \log \sigma_v$ 関係を得た．これより圧縮指数 C_c は 0.61～0.71 程度であることが

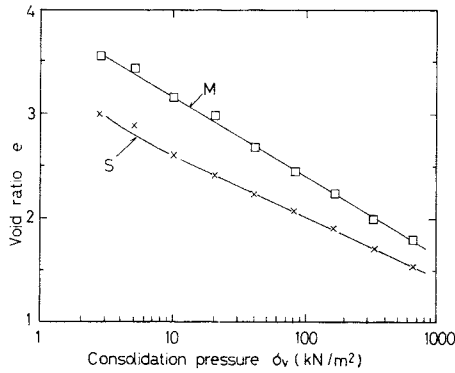


Fig. 4 $e \sim \log \sigma_v$ curves of red mud.

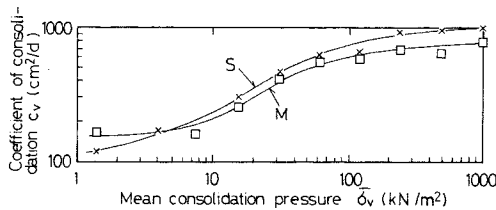


Fig. 5 $\log c_v \sim \log \bar{\sigma}_v$ curves of red mud.

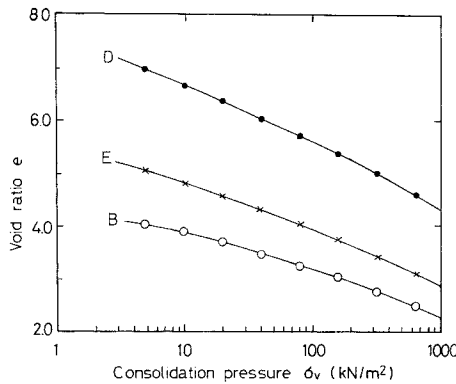


Fig. 6 $e \sim \log \sigma_v$ curves of white mud.

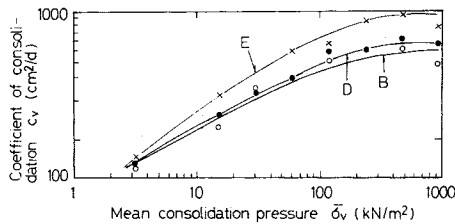


Fig. 7 $\log c_v \sim \log \bar{\sigma}_v$ curves of white mud.

わかる。圧密圧力の増加に伴う圧密係数 c_v の変化は Fig. 5 のようであった。 c_v の値は、実験の範囲で $100 \sim 1000 \text{ cm}^2/\text{d}$ 程度であって普通の飽和粘土の値と大差ない。透水係数は同じ圧密圧力の範囲で $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$

cm/s であった。

(2) 白 泥

標準圧密試験による $e \sim \log \sigma_v$ 曲線は Fig. 6 に示すとおりである。圧密指数 C_c は $0.97 \sim 1.47$ というかなり大きな値となる。また、圧密係数の値は Fig. 7 にみられるように $70 \sim 700 \text{ cm}^2/\text{d}$ の程度であり、赤泥と似かよった数値である。

(3) 浄水スラッジ

浄水スラッジの初期間隙比は $16 \sim 17$ と非常に高く $e \sim \log \sigma_v$ 特性も普通粘土、白泥、赤泥などとは異なっている。Fig. 8 にみられるように圧密圧力が $100 \text{ kN}/\text{m}^2$ より小さい範囲では圧縮指数 C_c は 4.0 以上のきわめて大きな値を示すが、圧力が $100 \text{ kN}/\text{m}^2$ より高いところでは $C_c = 2.0$ 程度に低下してくる。圧密係数は Fig. 9 に示すように $10 \text{ cm}^2/\text{d}$ 程度の小さな値であり赤泥や白泥の $1/10$ の大きさである。これより、スラッジの圧密には他の廃滓より長い時間を要することがわかる。

(4) 一般粘土^{5),6)}との比較

上述の3つの高含水比廃滓の圧密特性を一般の粘土、有機質粘土の特性値と比較検討する。

Fig. 10 は液性限界と圧縮指数の関係プロットしたものである。3つの廃滓および後述の浚渫底泥はおおむね埋立粘土や泥炭の分布範囲にあり、またスケンプトンの実験式よりやや高めの圧縮指数であることがわかる。次に、自然間隙比と圧縮指数の関係は Fig. 11 のようであり、赤泥と白泥は他の材料⁵⁾とは異なった特性を有することがわかる。

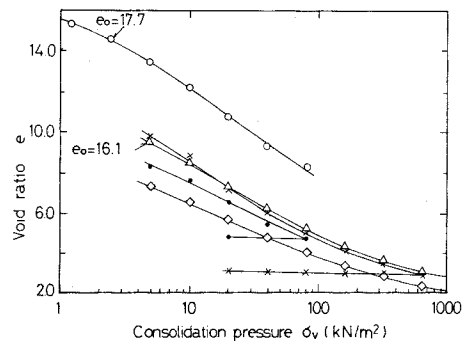


Fig. 8 $e \sim \log \sigma_v$ curves of sludge.

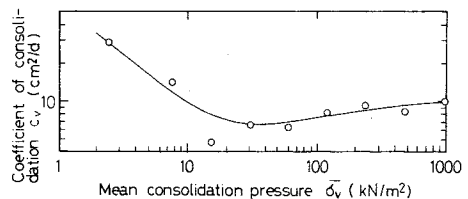


Fig. 9 $\log c_v \sim \log \bar{\sigma}_v$ curve of sludge.

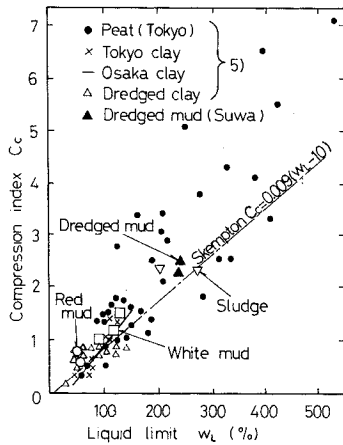


Fig. 10 Relationship between C_c and w_L .

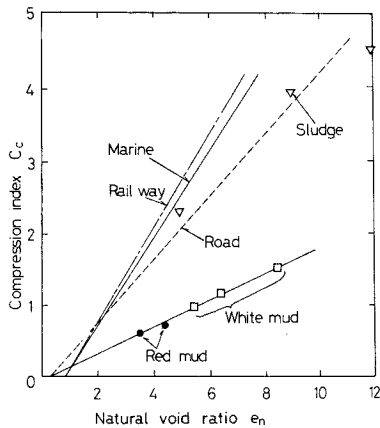


Fig. 11 Relationship between C_c and e_n .

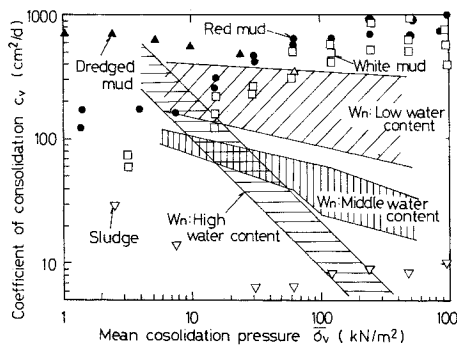


Fig. 12 Comparison of c_v with other soils⁵⁾.

Fig. 12 は、圧密圧力の増加に伴う圧密係数の変化を一般の粘土⁵⁾と比較して示したものである。赤泥、白泥および浚渫底泥は自然含水比の低い飽和粘土と類似の変化をみせているのに対して、浄水スラッジでは自然含水比の高い粘土と同じような値となっている。この結果か

ら、赤泥、白泥等の圧密は通常の飽和粘土と同じような経過で進行することが予測される。これに対して浄水スラッジの場合は泥炭や有機質土と類似の圧密沈下～時間曲線を示すことになる。

4. 圧密による強度増加率

圧密による非排水せん断強度の増加率 c_u/p を調べるために、各試料について圧密後に一軸圧縮試験ならびに一面せん断試験を行った。Fig. 13 はその結果をまとめたものである。赤泥および白泥の c_u/p 値は 0.2~0.3 と正規圧密粘土よりやや低い値となっている。一方浄水スラッジの場合は $c_u/p=0.8$ でかなり高く、泥炭等の c_u/p の値に匹敵するものである。この結果より、浄水スラッジでは、圧密の進行には時間を要するが、圧密による地盤改良効果は普通の粘土よりも大きいと推測される。

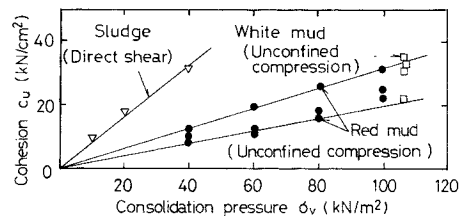


Fig. 13 Determination of c_u/p .

5. 底面排水工法に関する実験

(1) 概要

各種廃滓は、しばしば含水比 1000% 以上の超高含水状態で排出される。このような廃滓を直接的に最終脱水工程に流すのは得策ではなく、通常は沈殿池に導き自重圧密により、ある程度の含水比低下を図っている。この自重圧密工程に底面排水工法を適用すれば、きわめて短時間に自重による圧密を終らせることができよう。

この底面排水工法の有効性を実際規模で確かめるべく、圧密係数の最も小さい浄水スラッジについて、現場実験を実施した。また、これに先立ち、諏訪湖の浚渫底泥に対して底面排水工法の適用性に関する現場実験⁷⁾が行われた。以下、これらの実験結果の概要と解析結果について述べる。

(2) 浄水スラッジに対する現場実験

宇部市広瀬浄水場の敷地内で、平らに整地した上に直径 5 m、高さ 1 m のポリマーグリッドによる円形プール状の実験槽を 3 個設置した。Fig. 14 にみられるように、底面および内側側面にはフィルター材を張った。ポリマーグリッド (ネトロン社製, SR-2) は Fig. 15 に示す形状、寸法のものであり、空隙の長手方向には 1 m 幅

正 誤 表

「高含水比廃滓の土質工学的性質と底面排水工法による急速脱水」

三浦哲彦・福田直三・小林是則

(第 358 号/Ⅲ-3(報告) 1985 年 6 月)

p. 161 の Fig. 14, Fig. 16, Fig. 18 の写真が不鮮明になっております。下記のようにご訂正下さい。

執筆者および関係者の方々には大変ご迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げます

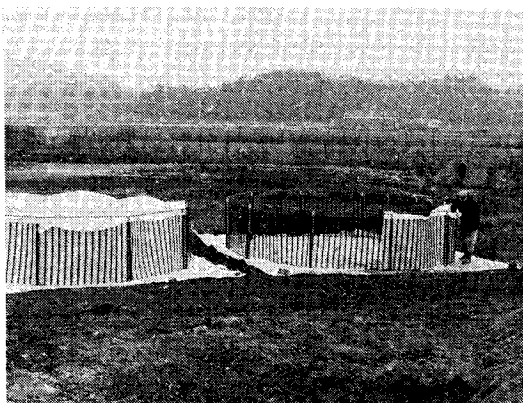


Fig. 14

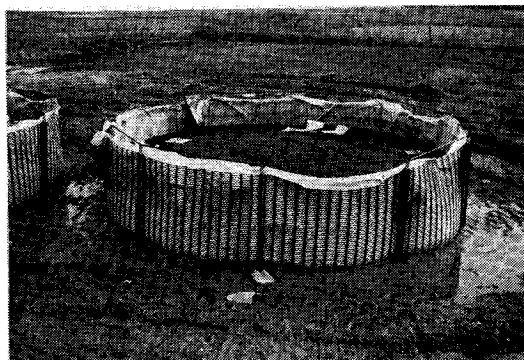


Fig. 18

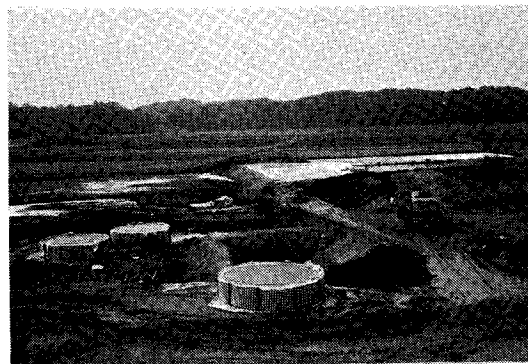


Fig. 16

土木学会論文集編集委員会

委員 長 岡田 清
副委員 長 松本 順一郎
幹事 長 黒田 勝彦

第1小委員会

委員 長 伊藤 学
委員 園田 恵一郎
〃 伯野 元彦
〃 亀田 弘行
〃 松田 真一
〃 宇佐美 勉
〃 青柳 史郎
幹事 岩熊 哲夫
編集調整会議幹事 長谷川 彰夫

第2小委員会

委員 長 中川 博次
委員 住友 恒志
〃 長尾 正利
〃 谷本 勝介
〃 池田 駿彦
幹事 磯部 雅正
編集調整会議幹事 山田 正

第3小委員会

委員 長 大草 重康
委員 宇野 尚雄
〃 桜井 春輔
〃 梅原 靖文
〃 岩崎 敏男
〃 半沢 秀郎
幹事 日下部 治夫
編集調整会議幹事 龍岡 文夫

第4小委員会

委員 長 河上 省吾
委員 中村 良夫
〃 片倉 正彦
〃 松井 寛隆
〃 青山 吉勝
〃 太田 勝久
幹事 内山 久雄
編集調整会議幹事 黒田 勝彦

第5小委員会

委員 長 岩崎 訓明
委員 小柳 治政
〃 阿部 頼篤
〃 町田 文一
〃 達下 幸和
幹事 辻 本 健人
編集調整会議幹事 魚本 健人

第6小委員会

委員 長 安昌 克秀
委員 伊佐 義昭
〃 根上 孝夫
〃 白砂 伸行
〃 島田 光雄
〃 吉喜 多健
幹事 喜太 林成
編集調整会議幹事 大 林 成 行

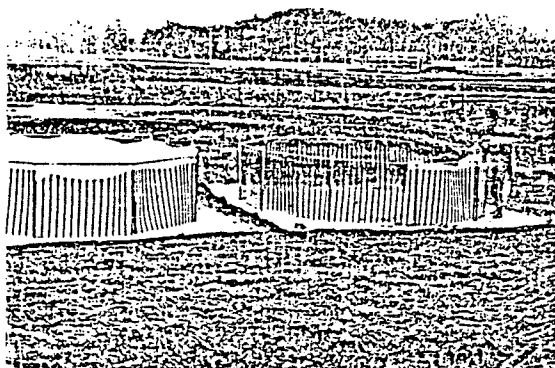


Fig. 14 Polymer grid container for dehydration of sludge.

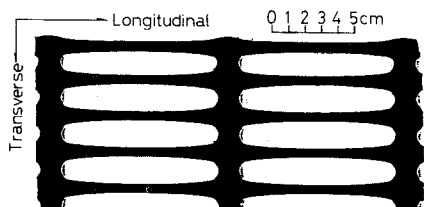


Fig. 15 Shape of a polymer grid (SR-2).

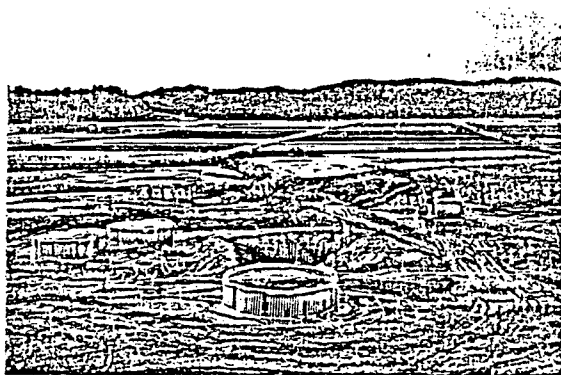


Fig. 16 Initial stage of bottom drainage test.

当たり約 78 kN の引張強度を有している⁹⁾。実験槽は形状を安定させるために 10 か所にパイプ支柱を立て、上下面の円周に沿って鉄筋を配している。しかし、容器内に入れた廃滓による内圧（低部で約 10.8 kN/m²）はポリマーグリッド自身の張力で十分に耐え得る。また、フィルター材としては、厚さ約 4 mm、幅 2.6 m の不織布（三井石油化学工業（株）製、U-80）を用いた。

上述のように準備した実験槽に、1 m の深さいっばいに浄水スラッジを投入した（Fig. 16）。このスラッジは沈殿池に貯えられていたものであり、投入時の含水比は 500～1000 % の範囲にあった。本実験を開始したの

は昭和 59 年 1 月下旬であり、スラッジ投入の直後から例年のない寒気に見舞われ、実験槽のスラッジは、一時、側面および表面で凍結、凍上した。これにより、表面沈下量は一時的に正確な測定が困難となったが、その一方で、実験開始後 1 か月間の沈下はほとんど容器底面からの排水によるものであり、側面からの排水あるいは表面からの直射日光による急速な蒸発は実質的に生じなかったと考えてよい。

(3) 実験結果および考察

3 つの実験槽で測定した表面沈下量および含水比の経時変化は Fig. 17 に示すとおりである。双曲線法で圧密度を調べたところ 3 ケースともに 1 か月間ほどで自重圧密は 90 % 以上に達していることがわかった。その後の沈下は二次圧密あるいは表面からの乾燥による沈下であると考えられる。Fig. 17 中の No. 3 では 33 日目に厚さ約 50 cm の土を載せたことによって新たな沈下が始まっている。含水比は、当初約 500～1000 % であったものが 1 か月の間におよそ 200～500 % と半分以下に低下している。Fig. 18 はスラッジ投入後 28 日目における表面の状況である。

上述のように、底面排水工法によれば圧密特性の上からはきわめて条件の悪い浄水スラッジを短期間に高含水

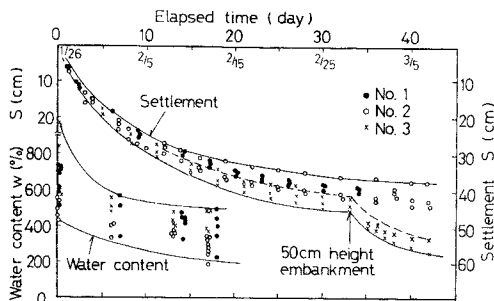


Fig. 17 Test results on self-weight consolidation of sludge.

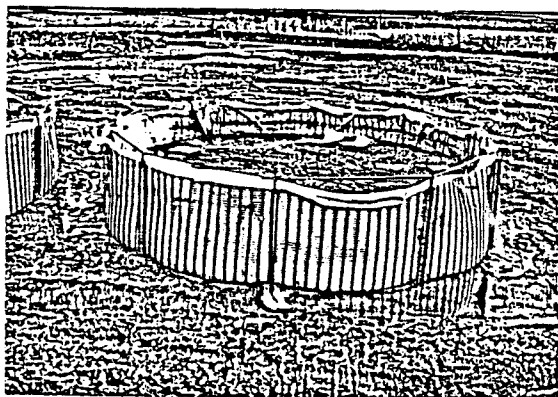


Fig. 18 After 28 days.

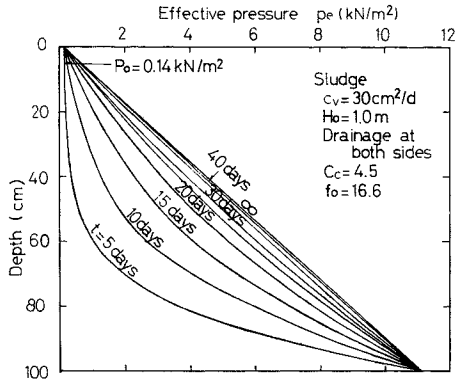


Fig. 19 Isochrone of self-weight consolidation.

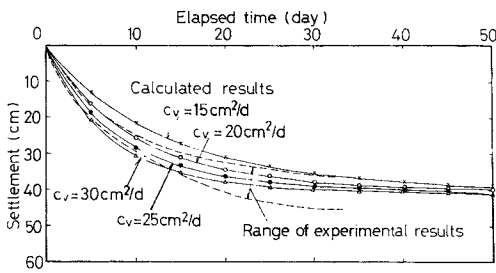


Fig. 20 Comparison between experimental and calculated results.

比状態から液性限界付近まで低下せしめることが可能であることがわかった。

本実験結果の妥当性を検証する意味で、三笠の圧密理論⁹⁾によって自重圧密解析を行った。数値解析¹⁰⁾は次のような条件のもとに進めた。

- 1) 排水は上下両面からのみ行われる。
- 2) 自重圧密が進行しても単位重量は変わらない(計算には γ_{sat} の初期値を使用)。
- 3) 初期体積比 $f_0 (=1+e) = 16.6$ 、圧縮指数 $C_c = 4.5$ (Fig. 11)、圧密係数 $c_v = 15 \sim 30 \text{ cm}^2/\text{d}$ (Fig. 9) の一定値とする。

得られた結果のうち、深度～有効応力の関係は Fig. 19 に示すとおりであった。これによると、30日で平均圧密度は90%以上に達することになり、Fig. 17の結果とよく合っているといえる。また、 c_v 値を15～30 cm^2/d の間で変えた場合の沈下量～時間曲線は Fig. 20 に示すようであり、実測データとよく合っている。

以上の検討結果から、圧密係数が30 cm^2/d 程度の浄水スラッジにおいても底面排水工法によれば比較的短期間に自重圧密は90%以上に達することが理論的にも裏付けられた。

(4) 浚渫底泥に対する実験結果

含水比1000～1200%の浚渫底泥を重機処理可能な

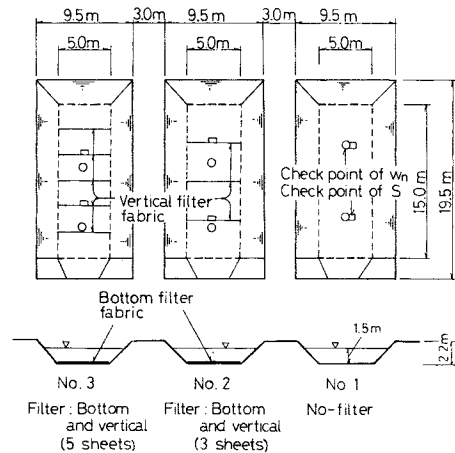


Fig. 21 Layout of bottom drainage test for dredged mud.

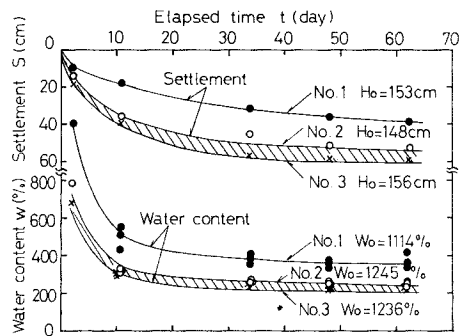


Fig. 22 Test results of dredged mud by bottom drainage method¹¹⁾

液性限界付近まで急速に脱水することを目的として、諏訪湖において底面排水工法の現場実験が実施された。その詳細は関係者によってすでに報告されている^{7), 11)}ので、ここでは浄水スラッジの場合と比較するため主な結果だけを示すことにする。

浚渫底泥の物理的性質は Fig. 1, 2 に、また圧密特性は Fig. 10, 12 にそれぞれ示している。Fig. 21 にみられるような実験施設に初期含水比1000%以上のスプ状の浚渫底泥を1.5m厚に投入し、底面排水による自重沈下および含水比の経時変化を観察した。その結果は Fig. 22 に示すとおりであり、浚渫底泥の場合も浄水スラッジと同じように底面排水工法 (No. 2 および No. 3) によれば、およそ1か月の間に自重圧密は90%以上に達することが、双曲線法で確かめられ、また、含水比は250%程度(液性限界)まで低下させ得ることがわかった。

6. まとめ

高含水比の各種廃滓の処理に関して、取り扱いやすい

含水比まで短期間に効果的に脱水させることが必要である。そこでまず、3種類の廃滓について土質工学的性質特に圧密特性を調べた。また、現場における底面排水工法実験を実施し、その結果を検討した。

得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 赤泥の物理的性質およびコンシステンシー特性は埋立粘土と類似している。また、圧縮性は比較的小さく、 c_u/p は0.2~0.3程度である。赤泥の土質工学的処理は普通の粘土の場合と同じように考えてよいが、圧密で排出された水は高いアルカリ性を示すことがあるので注意を要する。

(2) 白泥は赤泥より高い塑性を有している。圧密特性および c_u/p 値は赤泥と同じような特性を示すので土質工学的処理は比較的容易であるといえる。

(3) 浄水スラッジは17%程度の有機物を含んでおり、圧密特性は高有機質土に類似している。 c_u/p は0.8と高い。3つの廃滓の中では最も土質工学的処理の困難な材料である。

(4) 直径5m、高さ1mの円筒容器を用いて浄水スラッジに対する底面排水工法の適用性を調べた。その結果、非常に圧密しにくい材料であるにもかかわらず約1か月で90%以上の圧密度に達し、当初500~1000%の含水比は1か月後には200~500%に低下せしめることができた。

(5) 超高含水状態($w=1000\sim1200\%$)の諏訪湖浚渫底泥においても底面排水工法により、約1か月間に250%程度の含水状態(液性限界)まで脱水させ得ることが現場実験により示された。

著者らは、現在、宇部市水道局広瀬浄水場において底面排水処理したスラッジに水平ドレーン工法を適用して、地盤材料として使用するための現場実験を実施中であ

る⁴⁾。その成果については稿を改めて報告したい。

最後に現場実験の機会を与えていただいた宇部市水道局、同広瀬浄水場の各位、自重圧密の計算を手伝っていただいた復建調査設計(株)大森 智、岡田万寿三両氏およびご援助いただいた三井石油化学工業(株)末永昭紀、池上正宏両氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 軽金属精練会：赤泥の処理と有効利用，産業公害，Vol.13, No.8, pp.48~51, 1977.
- 2) 広末英晴・安部英一・横田 章：赤泥のろ過，乾燥特性，粉体工学会誌，Vol.16, No.8, pp.453~459, 1979.
- 3) 三浦哲彦・藤村龍太郎：スラリー状廃滓の水平ドレーン工法に関する室内実験，第15回土質工学研究発表会，pp.1089~1092, 1980.
- 4) 三浦哲彦：水平ドレーン工法によるスラッジ処理，宇部市水道局受託研究報告書，pp.1~43, 1984-3.
- 5) 稲田信徳：軟弱地盤における土質工学，鹿島出版会，pp.44~51, 1981.
- 6) 土質工学会：土質調査 試験結果の解釈と適用例，p.304, 1979.
- 7) 中村正春：浚渫底泥の急速脱水(土木的)工法について，(社)底質浄化協会，第8回底質処理技術セミナー，pp.21~27, 1983-3.
- 8) 福田直三・三浦哲彦・山内豊聡：延伸プラスチックグリッドによる擁壁土圧の軽減効果，土と基礎，Vol.32, No.6, pp.21~26, 1984.
- 9) 三笠正人：軟弱粘土の圧密，鹿島出版会，1963.
- 10) 高田直俊：軟弱粘土の自重圧密過程の数値解析，土木学会論文報告集，第334, pp.113~121, 1983.
- 11) 吉田龍夫：浚渫泥土の急速底面脱水法について，(社)底質浄化協会，No.28, pp.42~45, 1983.
- 12) 沓沢貞雄・溝口昭二：関東地方における泥炭の土質特性，有機質土に関するシンポジウム，pp.17~20, 1977.

(1984.8.3・受付)