

高含水比土の脱水減容化と濁水の濾過処理における マルチドレーン真空脱水法の開発

梅崎健夫¹, 河村 隆¹, 河崎 彰²,
大寺正志³, 西田健吾⁴, 志方洋介⁴

¹信州大学工学部, ²宇部工業株式会社,
³錦城護謨株式会社, ⁴一般社団法人 グリーンディール推進協会

Dewatering of High Water Content Soil and Filtering of Turbid Water using Multi-Drain Vacuum Aspirating System

T. Umezaki¹, T. Kawamura¹, A. Kawasaki²,
M. Oodera³, K. Nishida⁴ & Y. Shikata⁴

¹Faculty of Engineering, Shinshu University, ²Ube Kogyo Co., Ltd.,
³Kinjo Rubber Co., Ltd. & ⁴Green Deal Promoting Association

キーワード：汚泥，濁水，リサイクル，脱水，濾過，真空圧，含水比，SS

Keywords: Sludge, Turbid water, Recycling, Dewatering, Filtering, Vacuum pressure, Water content, Suspended solids

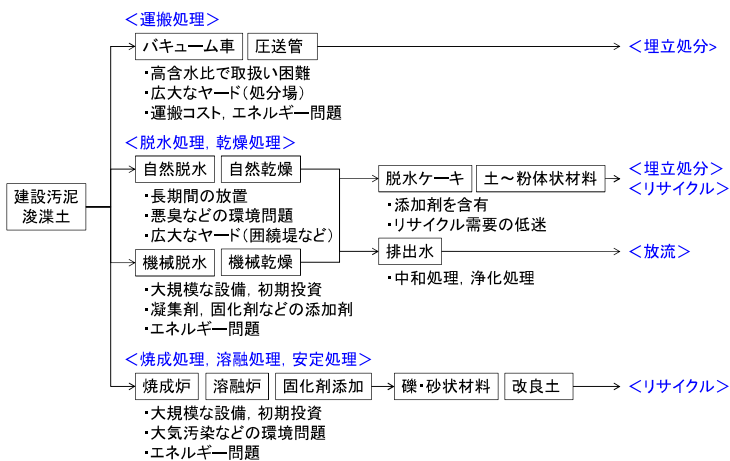
1. はじめに

建設工事に伴って排出される建設汚泥¹⁾は、細粒分が多く高含水比の泥状で非常に軟弱であるため、その上を人が歩けず、また、ダンプトラックに山積みできないなど、取扱いが容易ではない。建設汚泥の排出量は近年減少傾向にあるものの、国土交通省の調査結果²⁾によれば、平成 20 年度の排出量は 450 万トンであり、建設廃棄物の全排出量の 7% である。最終処分量は 67 万トンであり、全体の 17% を占めており、そのうち 44 万トンがそのまま最終処分されている。そのほか、港湾・河川等の浚渫に伴って発生する浚渫土においては、海底浚渫だけでも年間 2000 万 m³ (湿潤密度 $\rho_t=1.2 \text{ g/cm}^3$ とすると、2400 万トンに相当) に及ぶとの報告もある³⁾。また、建設工事においては、土粒子等の懸濁物質を多く含む濁水も多量に発生する。

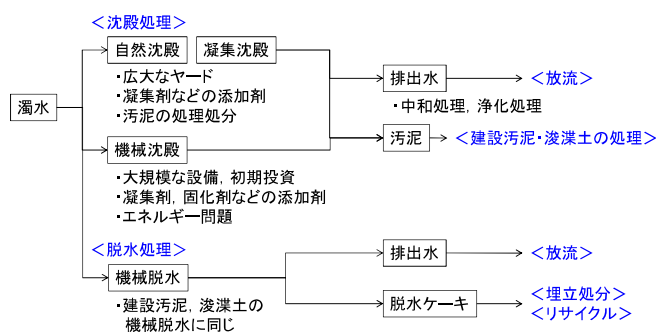
建設汚泥・浚渫土および濁水の処理の現状と問題点は、図-1 (a), (b) のように 2 つに大別してまとめることができる。建設汚泥や浚渫土は、そのまま運搬処理して埋立処分される場合と脱水処理などを施した後に埋立処分やリサイクルされる場合などがある。そのとき、排出水が発生する

場合には、さらに必要な処理を講じた後に河川等に放流される。一方、濁水の場合は、沈殿処理や脱水処理が行われるが、ここでも排出水の他に汚泥や脱水ケーキの処分が必要となる。建設汚泥・浚渫土の脱水処理には、フィルタープレス⁴⁾を用いた機械脱水が一般に用いられる (図-2 参照)。また、トンネル工事に伴う濁水処理においては、9 割以上においてフィルタープレスが用いられている⁵⁾。しかし、フィルタープレスを用いる場合には以下のような点を考慮する必要がある。

- ①大規模な付随設備が必要で、設備に対する初期投資が大きく、山間地やため池のような狭隘な場所や中小規模の工事には不向きである。
- ②処理能力が高く、短時間で低含水比まで脱水可能であるが、エネルギーの消費や CO₂ の排出量が多い。
- ③砂分以上の土粒子を事前に分級・除去する前処理が必要である。
- ④通常、凝集剤や固化剤の添加が必要である。
- ⑤脱水ケーキの剥離は、通常、手作業を伴う。
- ⑥脱水ケーキは低含水比で固いので、運搬や貯蔵には好都合である。しかし、埋立処分においては、空隙が生じて全体の容量が大きくなる。ま



(a)建設汚泥・浚渫土の処理



(b)濁水の処理

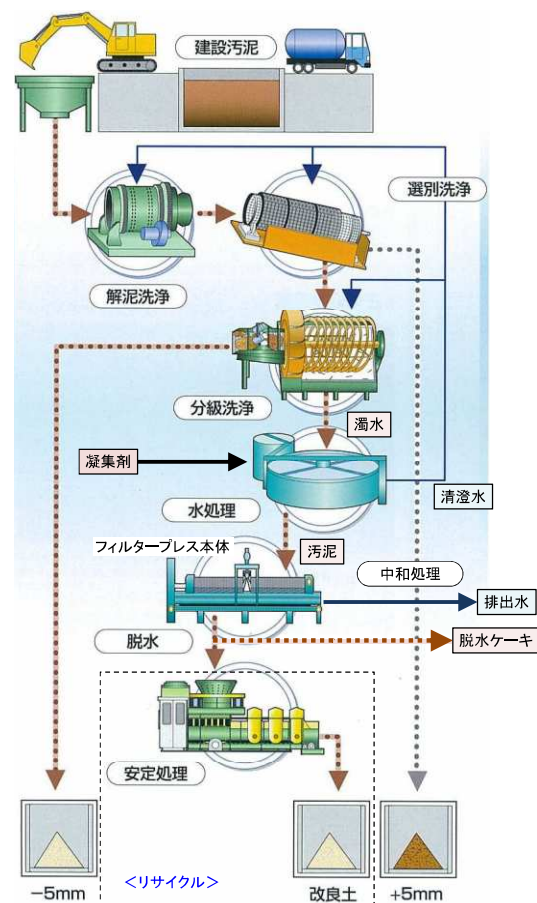


図-2 フィルタープレスを用いた機械脱水システムの一例（文献4）に加筆

図-1 建設汚泥・浚渫土および濁水の処理の現状と問題点

た、リサイクルのための安定処理に際しては、改良剤や固化剤等の混合・攪拌が容易でなく、特別な機械が必要である。

- ⑦脱水ケーキや排水には添加剤が含まれているため、生態系に及ぼす影響に十分な配慮が必要である。

本文では、高含水比土の脱水減容化処理および濁水の濾過処理における簡易で移設可能であり低コストの処理方法としてマルチドレーン真空脱水法を提案する。まず、提案法の概要および原理と特徴について論じる。次に、脱水減容化実験および濾過実験を実施し、その結果に基づいて、提案法の適用性と有効性を検証する。さらに、試作機を用いた実用化実験についても論じる。

2. マルチドレーン真空脱水法

2. 1 脱水法の概要

マルチドレーン真空脱水法の概要を図-3(a)～(e)に示す。設備の基本構成は、マルチドレーン真空脱水装置、脱水槽、真空ポンプおよびコンプレッサーだけであり、フィルタープレスと比較し

て、簡易でコンパクトな設備である。ドレーンは、例えば、地盤改良で使用されているプラスチックボードドレーン（PD）を濾布（ポリプロピレン製の透水シート）で覆って作製される（図-3(a)）。まず、脱水槽に高含水比の建設汚泥・浚渫土もしくは濁水を投入する。そして、真空ポンプを用いてドレーン内を減圧し、真空圧密によりドレーンの表面に土を付着させて脱水する（図-3(b)）。その後、脱水された土が付着したドレーンを空气中に引上げ、真空圧を継続して負荷することにより、含水比をさらに低下させる（図-3(c)）。最後に、ドレーン表面の濾布を圧縮空気により膨張させて、ドレーンに付着した土を剥離させる（図-3(d)）。剥離した付着土はそのまま排出袋に投入することも可能である。また、濾過により排水のSS（浮遊物質）が低下される（図-3(e)）。

2. 2 原理と特徴

(1) 原理

マルチドレーン真空脱水法の原理は、以下の通

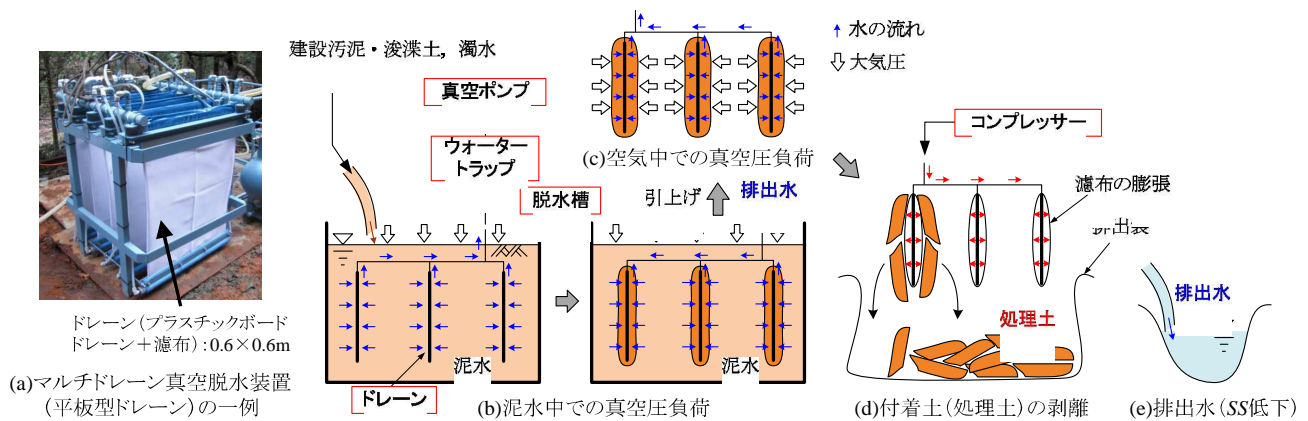


図-3 マルチドレーン真空脱水法の概要

りである。

①空気中での真空圧の負荷

①-1 排水距離の短縮

脱水槽内においては、泥水全体から脱水するので、排水距離が長くなる。そこで、空気中に引き上げて脱水範囲を限定することにより、排水距離を短くし、短時間で脱水することが可能になる。

①-2 大気圧作用面の追加

梅崎ら^{6),7)}は、圧密に伴う体積の減少は、鉛直応力のみの载荷による一次元変形よりも、等方応力の载荷による三次元変形の方が大きいことを示している。そこで、空気中に引き上げることにより、大気圧作用面を付着土の周面に追加し、排水量を増加させる。

①-3 通気乾燥による含水比低下の促進

空気中において真空圧負荷が長時間継続されれば、通気乾燥^{8),9)}による含水比の低下も期待される。

②濾布によるドレーンの被覆

②-1 ドレーンの耐久性の向上

プラスチックボードドレーンなどの表面に直接土を接触させないことにより、ドレーンの目詰まりを防止し、耐久性を向上させる。

②-2 付着土の容易な剥離

圧縮空気を用いて濾布を膨張させることにより、付着土の剥離を容易に行える。

②-3 用途に合わせた濾布の選択

濁水の濾過処理において、対象となる濁水に合わせて、通気度の異なる濾布を選択できる。

(2) 特徴

本脱水法の基本的な特徴は以下のとおりであ

る。

①簡易で移設可能であり低コストの脱水技術である。狭隘な場所や中小規模の工事においても有効である。

②実務で許容される短時間の脱水によりダンプトラックで運搬できる程度まで含水比を低下させる。

③大きな礫分や異物の除去を除いて、厳密な分級などの前処理を行わない。

④通常、凝集剤や固化剤等の添加剤を用いない。

⑤脱水後にドレーンに付着した土を簡単に剥離し、排出作業を容易にする。

⑥処理土はある程度の流動性を有し、その後の埋立処分やリサイクルが容易である。

⑦処理土は適度な含水比とせん断強度を有しており、排水水とともに添加剤を含まないので、水生物や植物の生育を妨げない。

3. 試料および実験装置

(1) 試料

高含水比土の脱水減容化実験には、長野県の諏訪湖、山口県の湖沼および港湾、佐賀県の有明干潟において採取した17種類の閉鎖性水域の底泥を試料とした。濁水の濾過実験には、鉾山殿物および市販の工業用粘土と神奈川県建設残土置き場、山口県の造成地および建設現場において採取した6種類の試料および諏訪湖湖岸より採取したアオコを多く含む湖水を用いた。土試料の諸特性および粒径加積曲線は表-1(a), (b)および図-4(a), (b)に示すとおりである。ここで、 ρ_s : 土粒子密度、 w_L : 液性限界、 I_P : 塑性指数、 CF : 粘土分含有率、 L_i : 強熱減量である。底泥の採取は、

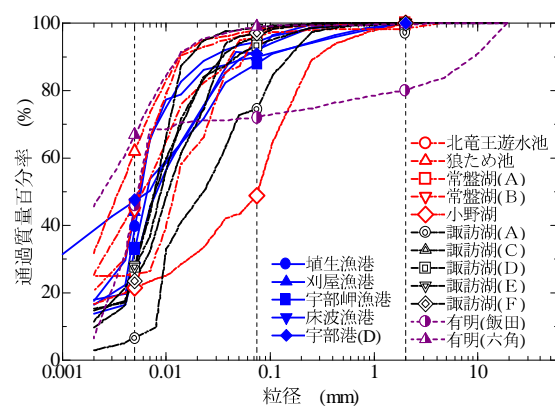
表-1 土試料の諸特性

(a)脱水減容化実験

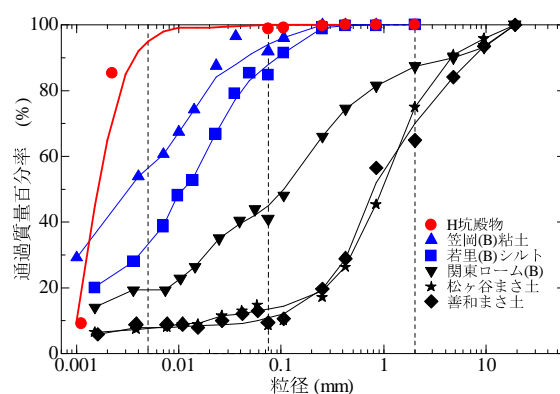
採取場所	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	I_P	CF(%)	L_i (%)
諏訪湖(A)	2.671	70.3	20.9	6.8	10.2
諏訪湖(C)	2.484	157.3	79.9	30.0	15.3
諏訪湖(D)	2.515	158.0	82.1	30.0	13.1
諏訪湖(E)	2.433	177.0	83.4	40.1	13.5
諏訪湖(F)	2.492	147.2	67.1	25.1	15.8
北竜王遊水池	2.473	88.1	54.6	25.1	14.2
狼ため池	2.555	129.0	67.6	25.5	15.0
常盤湖(A)	2.589	116.6	71.9	48.0	10.8
常盤湖(B)	2.480	185.8	127.9	46.0	14.9
小野湖	2.656	NP	NP	22.5	6.3
宇部港(D)	2.619	70.4	37.7	47.5	10.4
埴生漁港	2.686	90.3	53.7	40.6	12.3
刈屋漁港	2.613	104.6	63.6	48.2	12.9
宇部岬漁港	2.652	76.0	40.9	36.0	10.2
床波漁港	2.666	78.0	42.0	30.0	10.9
有明干潟(六角川)	2.650	125.5	78.6	68.0	15.3
有明干潟(飯田)	2.673	161.8	107.3	50.0	14.8

(b)濾過実験

試料名	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	I_P	CF(%)
H 坑殿物	3.979	105.6	50.8	95.0
笠岡(B)粘土	2.702	72.6	37.2	79.7
若里(B)シルト	2.665	44.8	21.3	32.5
善和まさ土	2.619	NP	NP	8.9
松ヶ谷まさ土	2.630	NP	NP	7.6
関東ローム(B)	2.746	105.9	25.5	19.3

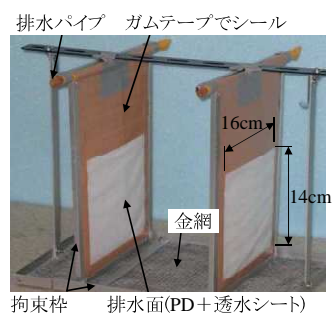


(a)脱水減容化実験

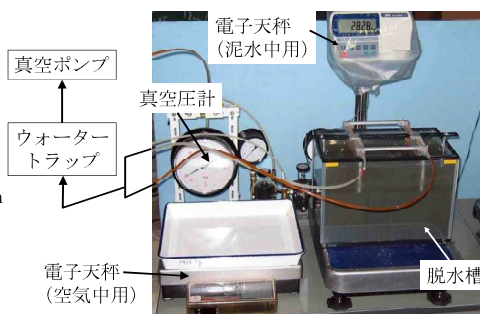


(b)濾過実験

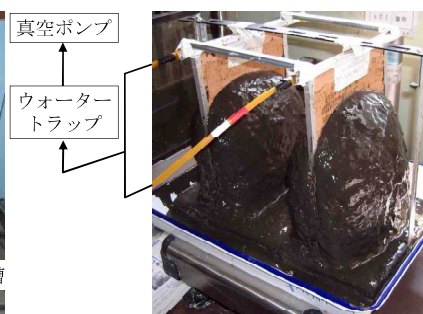
図-4 土試料の粒径加積曲線



(a)ドレーンの小型模型の一例



(b)泥水中での真空負荷の一例



(c)空気中での真空負荷の一例

図-5 室内実験の概要

諏訪湖(A)では湖岸からバックホウにより、諏訪湖(C)～(F)、小野湖を除く山口県の湖沼および港湾では小型船上から採泥器により、小野湖および有明干潟では水面よりも上に堆積した部分をスコップにより、それぞれ行った。

(2) 実験装置

室内実験に用いた装置を図-5(a)～(c)に示す。ドレーンは、プラスチックボードドレーンを濾布で覆って作製したものである(図-5(a))。濾布に

表-2 濾布の仕様(カタログ値)

型番	厚さ(mm)	重量(g/m ²)	通気度* (cm ³ /cm ² /min)
P89C	0.68	460	2
P91C	0.99	640	20
P2721C	0.54	310	100

*: 圧力差 125Pa のときに 1 分間に 1cm² の濾布を通過する空気の流量。

は、表-2 に示す通気度の異なる 3 種類を用いた。ドレーン表面をガムテープでシールし、排水面を

表-3 脱水減容化実験の初期含水比の一覧

採取場所	w_0 (%)
諏訪湖(A)	103.5 (1.5 w_L), 128.9 (1.8 w_L), 267.7 (3.8 w_L), 270.9 (3.9 w_L)
諏訪湖(C)	450.6 (2.9 w_L)
諏訪湖(D)	436.3 (2.5 w_L)
諏訪湖(E)	427.3 (2.4 w_L)
諏訪湖(F)	288.8 (2.0 w_L), 435.7 (3.0 w_L), 437.9 (3.0 w_L)
北竜王遊水池	170.4 (1.9 w_L), 222.0 (2.5 w_L), 352.0 (4.0 w_L)
狼ため池	353.9 (2.7 w_L), 352.0 (4.0 w_L)
常盤湖(A)	305.2 (2.6 w_L)
常盤湖(B)	443.0 (2.4 w_L), 312.8 (1.7 w_L), 424.6 (2.3 w_L), 531.5 (2.9 w_L), 730.2 (3.9 w_L)
小野湖	70.7, 225.8, 257.1, 283.4, 289.9, 299.4, 315.7, 325.4, 533.6, いずれも NP
宇部港(D)	276.9 (3.9 w_L), 154.6 (2.2 w_L), 183.0 (2.6 w_L), 217.5 (3.1 w_L), 234.4 (3.3 w_L), 259.6 (3.7 w_L), 284.3 (4.0 w_L), 286.4 (4.1 w_L), 298.7 (4.2 w_L), 315.5 (4.5 w_L)
埴生漁港	227.8 (2.5 w_L)
刈屋漁港	230.4 (2.2 w_L), 230.5 (2.2 w_L), 259.4 (2.5 w_L)
宇部岬漁港	183.3 (2.4 w_L), 194.8 (2.6 w_L)
床波漁港	217.9 (2.8 w_L), 229.2 (2.9 w_L)
有明干潟 (六角川)	184.4 (1.5 w_L)
有明干潟 (飯田)	223.5 (1.4 w_L), 617.8 (3.8 w_L)

16 cm×14 cm (両面の排水面の面積 : 0.0448 m²) に設定した (図-5(a)). 排水パイプ (外径 1.0 cm, 内径 0.7 cm) の一端をシールし, もう一端をウォータートラップを介して真空ポンプに接続した. 脱水槽は電子天秤の上に設置されており, その質量の変化から排水量を算定する (図-5(b), (c)).

4. 高含水比土の脱水減容化実験

(1) 実験概要

表-3 に初期含水比 w_0 の一覧を示す. w_0 の設定は, グラブ浚渫を想定して採取した底泥を含水比調整せずに練返して用いたもの $w_0 \div 1.5 \sim 3.0w_L$ およびポンプ浚渫を想定して底泥に湖水もしくは海水を加えて練返した泥水状態の底泥 $w_0 \div 4.0w_L$ の 2 つの場合とした. 脱水槽内にドレーンを設置した後, 試料を投入した. 泥水中で 120 分間真空圧を負荷した後 (図-5(b)), ドレーンを脱水槽から引上げ空気中でさらに 30 分間もしくは 60 分間真空圧を負荷した (図-5(c)). 排水量が多い場合には, ドレーンの排水面が常に泥水中に浸漬された状態を保つために, 適宜泥水を追加した. 実験中は, 脱水槽の質量および真空圧の経時変化を測定した. 実験終了後に, 付着土の質量および含水比を測定した.

(2) 実験結果および考察

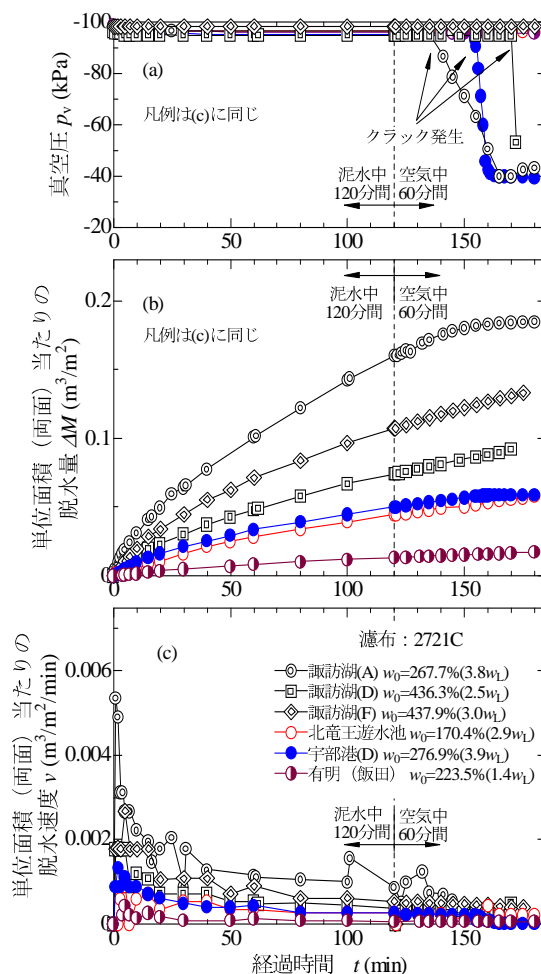


図-6 脱水減容化実験の結果の一例

図-6(a) ~ (c) に真空圧 p_v とドレーン単位面積 (両面) 当たりの排水量 ΔM および脱水速度 v の経時変化の一例を示す. 図-6(a) に示すように, 真空圧はいずれの場合も -93 kPa 程度以上 ($|p_v| > 93$ kPa) が保たれており, ドレーンを泥水中に浸漬した場合においても高い真空圧が維持される. ドレーンを泥水から引き上げた後も -93 kPa 程度以上の真空圧が保たれており, 排水面が飽和した付着土で覆われている場合には, 真空圧が維持される. 諏訪湖(A), 諏訪湖(D) および宇部港(D) では, 140 ~ 170 分後において真空圧が減少している. これは, 付着土の表面が乾燥してクラックが発生したためである. 諏訪湖(D) では, 172 分においてクラック発生後に付着土が剥離して落下したため, 実験はそこで終了した. 図-6(b) に示すように, 排水量は, 試料によって大きく異なり, いずれも時間の経過とともに収束する傾向を示す. 脱水速度は, 図-6(c) に示すように, 真空圧を負荷した直後に最大となった後に, 時間の経過とともに徐々に

表-4 脱水前後の試料の状態

	(a)諏訪湖(A)	(b)諏訪湖(C)	(c)諏訪湖(D)	(d)諏訪湖(E)	(e-1)諏訪湖(F)	(e-2)諏訪湖(F)
初期状態	 $w_0 = 267.7\% (3.8w_L)$	 $w_0 = 450.6\% (2.9w_L)$	 $w_0 = 436.3\% (2.5w_L)$	 $w_0 = 427.3\% (2.4w_L)$	 $w_0 = 288.8\% (2.0w_L)$	 $w_0 = 437.9\% (3.0w_L)$
付着土	 $\bar{w}_2 = 93.7\% (1.3w_L)$	 $\bar{w}_2 = 201.5\% (1.3w_L)$	 $\bar{w}_2 = 199.1\% (1.1w_L)$	 $\bar{w}_2 = 211.5\% (1.2w_L)$	 $\bar{w}_2 = 171.3\% (1.2w_L)$	 $\bar{w}_2 = 156.0\% (1.1w_L)$
	(f)北竜王遊水池	(g)狼ため池	(h)常磐湖(A)	(i)常盤湖(B)	(j)小野湖	(k)宇部港(D)
初期状態	 $w_0 = 170.4\% (1.9w_L)$	 $w_0 = 353.9\% (2.7w_L)$	 $w_0 = 305.2\% (2.6w_L)$	 $w_0 = 443.0\% (2.4w_L)$	 $w_0 = 70.7\% (NP)$	 $w_0 = 165.0\% (2.3w_L)$
付着土	 $\bar{w}_2 = 101.3\% (1.2w_L)$	 $\bar{w}_2 = 155.2\% (1.2w_L)$	 $\bar{w}_2 = 140.7\% (1.2w_L)$	 $\bar{w}_2 = 186.8\% (1.0w_L)$	 $\bar{w}_2 = 47.6\% (NP)$	 $\bar{w}_2 = 52.0\% (0.8w_L)$
	(l)埴生漁港	(m)刈屋漁港	(n)宇部岬漁港	(o)床波漁港	(p)有明干潟(六角川)	(q)有明干潟(飯田)
初期状態	 $w_0 = 227.8\% (2.5w_L)$	 $w_0 = 230.4\% (2.2w_L)$	 $w_0 = 183.3\% (2.4w_L)$	 $w_0 = 217.9\% (2.8w_L)$	 $w_0 = 184.4\% (1.5w_L)$	 $w_0 = 617.8\% (3.8w_L)$
付着土	 $\bar{w}_2 = 109.0\% (1.2w_L)$	 $\bar{w}_2 = 116.3\% (1.1w_L)$	 $\bar{w}_2 = 82.2\% (1.1w_L)$	 $\bar{w}_2 = 87.5\% (1.1w_L)$	 $\bar{w}_2 = 138.4\% (0.86w_L)$	 $\bar{w}_2 = 135.6\% (0.8w_L)$

に減少する．効率よく脱水作業を進めるためには、泥水中および空気中における真空圧負荷のサイクルタイムの決定が重要である．サイクルタイムの最適化については後述する．

表-4(a)～(q)に全試料の脱水前後の状態を示す．ここで、 \bar{w}_2 は脱水後の平均含水比である．いずれの実験においても高含水比の泥水が、合計3時間の脱水によって、手で持てる程度の固さになる．ドレーンに付着した土の厚さは片側 1.0～8.9 cm 程度であり、付着土量は試料によって異なる．

図-7 に泥水中 120 分間、空气中 30～60 分間の脱水におけるドレーン単位表面積（両面）当たりの脱水後の付着土量 M_{d2} と液性限界で正規化した初期含水比 w_0/w_L の関係を示す．付着土量は w_0 および土の種類によって異なる．すなわち、 w_0 が小さい方が M_{d2} は大きくなるが、総じて 60 kg/m^2 程度以上が付着している．本実験で用いた山口県の港湾底泥の付着土量は、 $70 \sim 80 \text{ kg/m}^2$ 程度であり、場所が異なる場合においてもほぼ同じである．一方、湖沼の付着土量は、 w_0 や土の種類

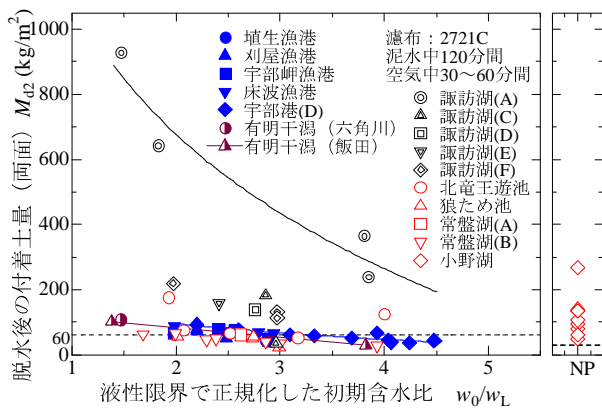


図-7 w_0/w_L と M_{d2} の関係

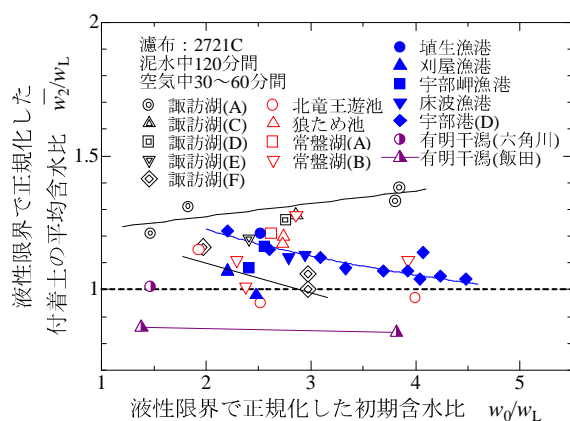


図-8 \bar{w}_2/w_L と w_0/w_L の関係

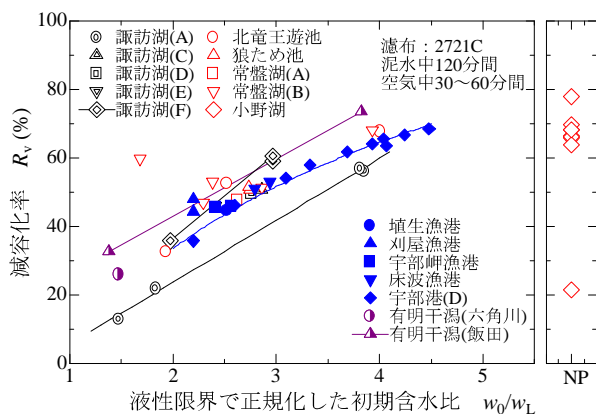


表-5 建設工事に関わる排水基準の一例¹³⁾

地域・都市	SS の基準
名古屋市	200mg/L 以下
埼玉県	180mg/L (日間平均 150mg/L)
東京都	120mg/L 以下
川崎市・横浜市	70mg/L 以下
神戸市	最大 40mg/L 以下 (日間平均値 30mg/L 以下)

6 種類の土および諏訪湖より採取した湖水を用いて透視度 T_r の異なる濁水を作製し、その SS と濁度 T_u を分析した。SS および濁度の分析方法は、SS: 重量法、濁度 T_u : JIS K 0101 9.4 に準拠した。

表-6(a)～(g)に透視度 T_r を変化させた濁水の写真とその SS および濁度 T_u を、図-11～13 に透視度 T_r と濁度 T_u 、濁度 T_u と SS および透視度 T_r と SS の関係を、それぞれ示す。表-5 中の SS=30, 120, 200 mg/L に相当する線を、表-6 中には赤線で、図-12, 13 中には黒色の実線で、それぞれ示した。濁度は、濁水に光を照射したときの透過光もしくは散乱光を測定し、その強さが水中の懸濁物質の濃度に関連することを利用して求められる。また、透視度は、透視度計(図-10(b))に濁水を注ぎ、徐々に水を抜きながら底面の標識板の二重線の十文字(図-10(c))が確認できたときの水の高さである。このように、透視度と濁度の測定原理はいずれも光学的で類似しており、図-11に示すように、両者の関係は土試料および湖水に関わらず、概ね 1 本の曲線で近似できる。一方、図-12, 13 に示すように、測定原理の異なる SS と濁度 T_u および透視度 T_r の関係は、試料によって大きく異なり、粒度分布との関連も認められない。濁水中の土粒子の粒度分布によっては、表-6(a)に示した H 坑殿物のように、SS≒30 mg/L においても透明度が低い場合もある。図-12, 13 のような関係を予め求めておけば、透視度 T_r もしくは濁度 T_u により排水基準の SS を決定することができる。

(2) 実験の概要

試料には、H 坑殿物、関東ローム(B)、松ヶ谷まさ土、善和まさ土およびアオコを多く含む諏訪湖湖水を用いた。図-4 に示した実験装置を用いて室内濾過実験を実施した。H 坑殿物では、図-2(a)に示した大型装置を用いた現場実験も実施した。実験条件を表-7 に示す。ここで、SS₀、T_{u0}

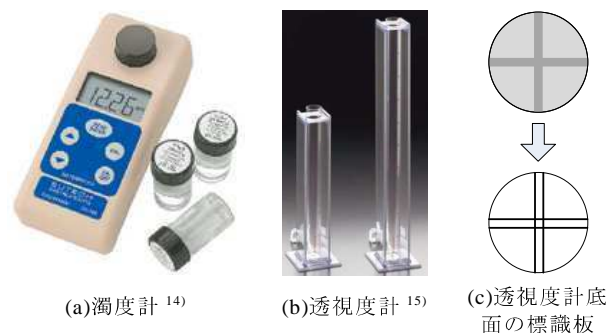


図-10 濁度計および透視度計の一例


















































および T_{r0} は、浮遊物質量、濁度および透視度の初期値である。ドレーンをウォータートラップを介して真空ポンプに接続し、濁水中に浸漬して真空圧を負荷した。実験中は真空圧および排水量を測定した。所定時間経過後、ウォータートラップ内の排水水の透視度 T_r 、濁度 T_u および SS も測定した。

(3) 実験結果および考察

図-14(a)～(d)に、H 坑殿物の濾過実験から得られた真空圧 p_v 、単位面積(両面)当たりの排水量 V および排水速度 v と透視度 T_r の経時変化を示す。図-14(b)に示すように、 w_0 が高いほど排水量は大きい。排水量の経時変化は時間の経過とともに収束し、排水速度は、図-14(c)に示すように、徐々に減少する。図-14(d)中には、図-12 から求めた排水基準に定められた SS=30, 120 mg/L およびそのほか SS=5, 10 mg/L に相当する透視度 T_r ≒31, 17, 7.4, 2.4 cm もそれぞれ示した。ドレーンの表面に土粒子が付着してそれ自身がフィルター(粘土フィルター)の役目をするために、排水水の透視度 T_r (SS) は時間の経過とともに高く(低く)なり、一定値に収束する傾向を示す。 w_0 が高いほど短時間で排水水の SS は低くなり、 w_0 ≒3500%では約 3 分後に、 w_0 ≒900%では約 21 分後に、SS=30 mg/L (T_r ≒7.4 cm) よりも低くなる。

表-8(a-1)～(e-3)に、室内濾過実験後のドレーンの表面および排水水の状況を示す。表-8(a-1)～(a-3)に示すように、H 坑殿物の場合は、濁水中での脱水時間が長くなるほどドレーン表面の付着土量(粘土フィルター)は増加する。しかし、粘土分含有率が CF=95%と高いため(表-1(b)参照)、排水水の SS が排水基準を下回るのは 20 分以降であり、そのときの透明度も高くはない。表

表-6 湖水の色, SS, 濁度および透視度

(a)H 坑殿物							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	860	150	95	37	29	14	6.8
濁度 T_u (度)	2400	400	260	97	72	37	11
透視度 T_r (cm)	0.6	1.8	2.4	5.0	6.6	13	21.5
(b)笠岡(B)粘土							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	(1800)	660	140	96	(45)	(33)	20
濁度 T_u (度)	(921)	300	56	36	(16)	(11)	6.5
透視度 T_r (cm)	1.0	2.4	12	12.5	30	40	60
(c)若里(B)シルト							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	(4800)	1800	400	180	(110)	(81)	51
濁度 T_u (度)	(1000)	290	41	15	(11)	(7.4)	4.0
透視度 T_r (cm)	1.0	2.4	15.5	27.5	30	40	60
(d)善和まさ土							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	(5400)	570	120	140	(35)	29	14
濁度 T_u (度)	(1800)	200	48	35	(10)	7.8	4.1
透視度 T_r (cm)	0.4	2.4	10.5	12	30	40	60
(e)松ヶ谷まさ土							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	(1600)	290	100	58	24	(18)	14
濁度 T_u (度)	(1600)	240	99	47	25	(14)	9.9
透視度 T_r (cm)	0.5	2.4	5.6	12	21.5	30	40
(f)関東ローム(B)							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	(2400)	310	120	45	35	(18)	12
濁度 T_u (度)	(2800)	260	98	39	21	(11)	7.1
透視度 T_r (cm)	0.4	2.4	5.5	12	18.5	30	40
(g)アオコを含む 湖水							
浮遊物質質量 SS(mg/L)	180	105	42	21	8.4	4.2	2.63
濁度 T_u (度)	210	100	38	17	7.6	3.6	2.5
透視度 T_r (cm)	3.1	6.0	12.5	18.5	46	63.5	89

-8(b)～(d-3)に示すように、善和まさ土、松ヶ谷まさ土および関東ローム(B)の場合は、初期含水

比が $w_0=8000\%$ 以上と高いため、ドレーン表面の付着土量（粘土フィルター）は少ない。排出水の

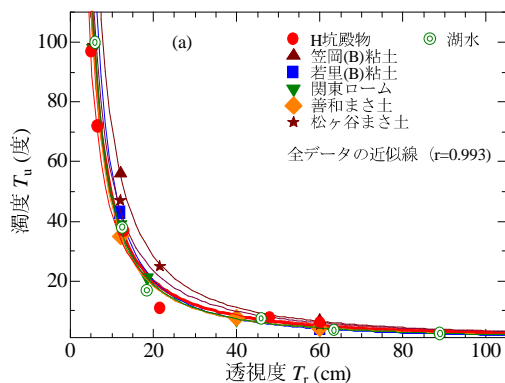


図-11 透視度と濁度の関係

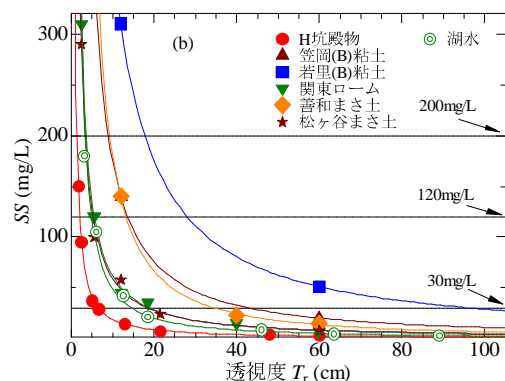


図-12 SSと透視度の関係

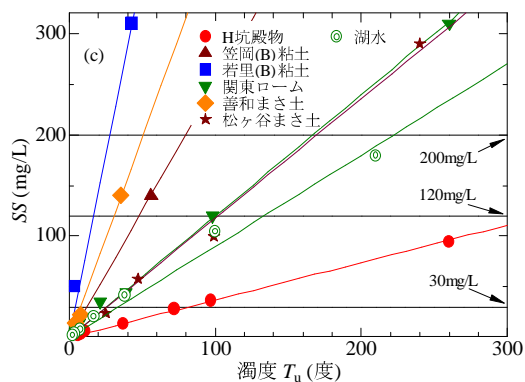


図-13 SSと濁度の関係

表-7 濾過実験の一覧

採取場所	実験の種類	濾布	w_0 (%)	SS_0 (mg/L)	T_{u0} (度)	T_{r0} (cm)
H 坑殿物	室内実験	P2721C	906.5%	—	—	0
	現場実験	P2721C	3398.7 —355.6%	—	—	0
善和まさ土	室内実験	P89C, P91C, P2721C	8774.0%	(5400)	(1800)	0.4
松ヶ谷まさ土	室内実験	P91C	18387.5%	(1600)	(1600)	0.5
関東ローム(B)	室内実験	P91C	9904.1%	(2400)	(2800)	0.4
諏訪湖湖水	室内実験	P89C, P91C, P2721C	8500%	(51)	(39)	10.0

SS_0 と濁度 T_{u0} の () は、図-12, 13の外挿値である。
 $T_{r0} \approx 0$ cm の場合は不定である。

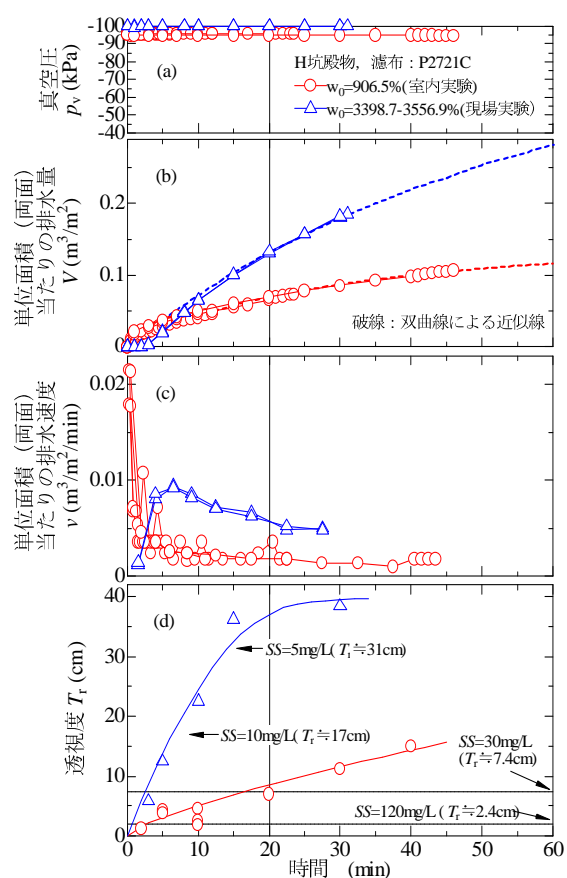


図-14 濾過実験結果の一例

SS は、0～3 分においては $SS=32 \sim 140$ mg/L と排水基準を満たしていないものもある。一方、3～90 分においては、粘土フィルターが形成されており、粘土分含有率が $CF < 20\%$ と低いため、 $SS=1.2 \sim 5$ mg/L であり、試料および濾布の種類に関わらず排水基準を満たしており、ほぼ透明である。

アオコを大量に含む諏訪湖湖水では、表-8(e-1)～(e-3)に示すように、濾布によって排水の透明度が異なっている。ドレーン表面に付着するアオコの量が少なく、濾布の通気量が直接透












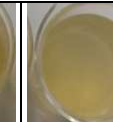




















明度に影響しているためである。そこで、泥水中で短時間真空圧を負荷して、濾布の表面に薄い粘土フィルターを形成させた後に湖水の濾過を行えば、アオコを十分に濾過できると考えられる。

6. 実用化実験

(1) 真空圧の向上

エジェクター (図-15(a)) は、プランジャーポ

表-8 濾過実験の結果（その1）










試料	(a-1)H 坑殿物			(a-2)H 坑殿物			(a-3)H 坑殿物		
w_0, \bar{w}_2, M_{d2}	906.5%, 203.3%, 7.6 kg/m ²			906.5%, 206.9%, 15.3 kg/m ²			906.5%, 204.3%, 22.3 kg/m ²		
濾布	2721C			2721C			2721C		
濾過時間	濁水中 5 分			濁水中 20 分			濁水中 40 分		
ドレーン 表面									
排水水									
	初期状態	0-2 分	2-5 分	初期状態	0-10 分	10-20 分	初期状態	20-30 分	30-40 分
T_r (cm)	0	1.2	4.3	0	3.8	2.6	0	11	15
SS (mg/L)	—	(260)	(55)	—	(64)	(100)	—	(18)	(12)
T_u (度)	—	(710)	(140)	—	(160)	(260)	—	(42)	(28)
試料	(b-1)善和まさ土			(b-2)善和まさ土			(b-3)善和まさ土		
w_0, \bar{w}_2, M_{d2}	8255.1%, 65.9%, 1.23 kg/m ²			8255.1%, 61.2%, 0.9 kg/m ²			8255.1%, 65.2%, 0.36 kg/m ²		
濾布	2721C			P91C			P89C		
濾過時間	濁水中 60 分+空気中 30 分			濁水中 60 分+空気中 30 分			濁水中 60 分+空気中 30 分		
ドレーン 表面									
排水水									
	初期状態	0-3 分	3-90 分	初期状態	0-3 分	3-90 分	初期状態	0-3 分	3-90 分
SS (mg/L)	10000	60	1.2	10000	49	1.8	10000	140	5
T_u (度)	220 以上	64	1.2	220 以上	48	1.9	220 以上	62	5.1
試料	(c)松ヶ谷まさ土			(d)関東ローム(B)					
w_0, \bar{w}_2, M_{d2}	17105.0%, 56.0%, 0.3 kg/m ²			9904.1%, 99.1%, 0.4 kg/m ²					
濾布	P91C			P91C					
濾過時間	濁水中 60 分+空気中 30 分			濁水中 60 分+空気中 30 分					
ドレーン 表面									
排水水									
	初期状態	0-3 分	3-90 分	初期状態	0-3 分	3-90 分			
SS (mg/L)	4700	82	3.8	11000	32	1.4			
T_u (度)	220 以上	88	4.0	220 以上	29	1.0			

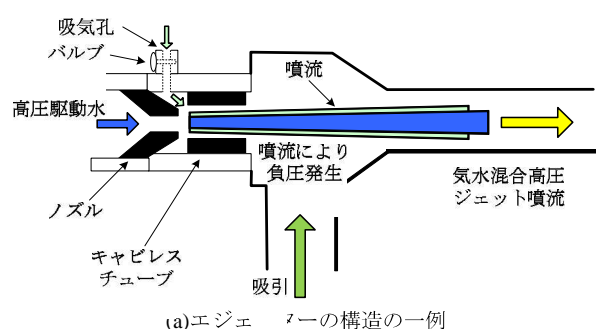
SS と濁度 T_u の () は、図-12, 13 の外挿値である。

ンプやタービンポンプなどで駆動水を高圧噴射することにより負圧を発生させるものである。一般的なエジェクターに改良を加えたマルチエジェクター（図-15(b)）を用いて、ドレーンに負荷

する真空圧を向上させた。一般的な真空ポンプとマルチエジェクターを用いて、それぞれを約 20 L の蓄圧タンクに接続して到達真空圧の比較実験を行った。写真-1(a), (b)および表-9, 10 に示す

表-8 濾過実験の結果（その2）

試料	(e-1)湖水		(e-2)湖水		(e-3)湖水	
濾布	2721C		P91C		P89C	
濾過時間	濁水中 60 分		濁水中 60 分		濁水中 60 分	
ドレーン表面						
排水						
	初期状態	0-60 分	初期状態	0-60 分	初期状態	0-60 分

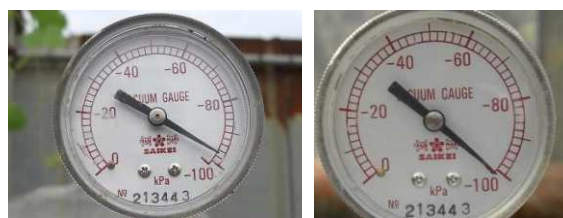


(a) エジェクターの構造の一例



(b) マルチエジェクターの外観

図-15 エジェクターの一例



(a) 真空ポンプの一例

(b) マルチエジェクター

写真-1 到達真空圧

ように、真空ポンプの到達真空圧は-96 kPa 程度であるが、最大値に達するまでに数分を要した。一方、マルチエジェクターでは、真空圧計の目視において $p_v \leq -100$ kPa 以上を示し、到達時間は2～3秒と非常に短かった。また、排気速度は1000 L/min であり、真空ポンプに比べて非常に大きいので、マルチドレーン真空脱水装置と組み合わせることで、脱水減容化処理や濾過処理の効率化を図ることができる。

(2) サイクルタイム（脱水時間）の最適化

図-6(c) および図-14(c) において示したように、高含水比土の脱水減容化処理および濁水の濾過

表-9 真空ポンプの性能の一例

到達真空圧	$p_v = -96$ kPa (実測値)
到達時間	数分
排気速度	$v_a = 50$ L/min (カタログ値)

表-10 マルチエジェクターの性能（実測値）

エジェクター駆動水量	$v_w = 30$ L/min
エジェクター駆動圧力	$p = 4 \sim 5$ MPa
到達真空圧	$p_v \leq -100$ kPa 以上 ($ p_v > 100$ kPa)
真空圧の到達時間	2～3 秒
排気速度	$v_a = 1000$ L/min

処理における脱水および排水速度は、真空圧を負荷した直後が最も大きく、負荷時間が長くなると徐々に減少する。また、空気中での真空圧負荷時にクラックが発生した場合は、脱水速度が急激に減少する。したがって、対象とする土質に合わせて、泥水中および空気中の脱水時間のサイクルタイムを最適化することにより、処理効率を向上できる。写真-2(a)～(h)は、現場実験において、脱水時間を泥水中で5～30分間、空気中で5～15分間とした場合の一例である。剥離の時間も含めて

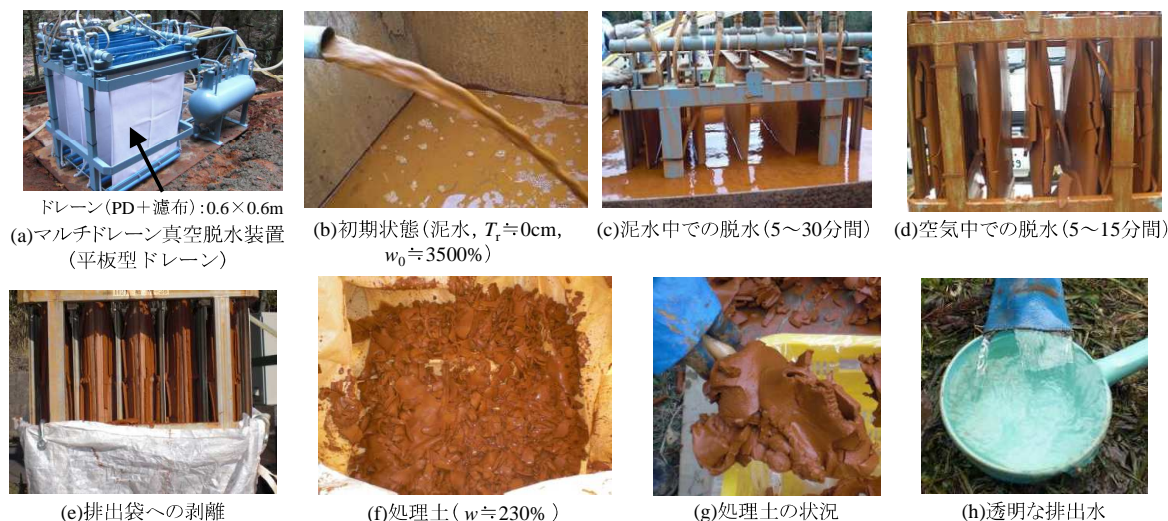


写真-2 サイクルタイムの一例 (H 坑殿物, 泥水中: 5~30 分間, 空気中: 5~15 分間)



写真-3 短冊型ドレーンによる付着土の剥離の一例

30~60 分程度の短時間で手に持てる程度に脱水減容化することが可能である。

(3) 付着土の剥離の効率化

新たに開発した短冊型ドレーン (写真-3(a)) を用いた脱水減容化実験の一例を示す (写真-3(b)~(f))。ドレーンを短冊型にすることにより, 圧縮空気によって濾布が円筒形に膨張し, 曲率が大きくなるため, ドレーン表面の付着土が容易に剥離し, 手作業をほとんど必要とせず短時間で剥離作業を行える。

(4) 濁水処理の効率化

図-16(a)~(c)は H 坑殿物を用いた現場実験において真空圧を連続負荷した場合と断続負荷した場合の結果の一例である。連続負荷した場合は, 図-16(b), (c)に示すように, 時間の経過とともに排水量が収束し, 排水速度が徐々に低下する。一方, 断続負荷した場合は, 図-16(a)に示すように, ドレーンを濁水中に浸漬したままの状態, 真空圧を 30 分間負荷し一旦解除して, 圧縮空気を 30 秒間送気する操作を繰り返した。一旦解除した真空圧は数分程度で -90 kPa 以上に復帰し,

図-16(b), (c)に示すように, 排水速度の低下はほとんど見られない。時間の経過とともに連続負荷との差は大きくなる。例えば, 8 時間後における排水量の外挿値は, 断続負荷の方が連続負荷よりも 30%程度大きい。今回の実験の w_0 は, 断続負荷の方が連続負荷よりも低く, w_0 が同程度である場合には, 両者の差はさらに大きくなる。断続負荷を行うことにより, 濁水の処理効率を向上させることが可能である。

写真-4(a), (b)は, 濁水中において短冊型ドレーンへの送気によって付着土を剥離させている状況の一例である。大量の圧縮空気がドレーン表面から泡状となり放出されている。この場合には, 特殊な配管の開発により, 濁水の処理効率がさらに向上した。

7. まとめ

高含水比土の脱水減容化処理および濁水の濾過処理のためのマルチドレーン真空脱水法を提案した。本手法は, 移設可能でコンパクトな脱水技術であり, 山間地やため池などの狭隘な場所や

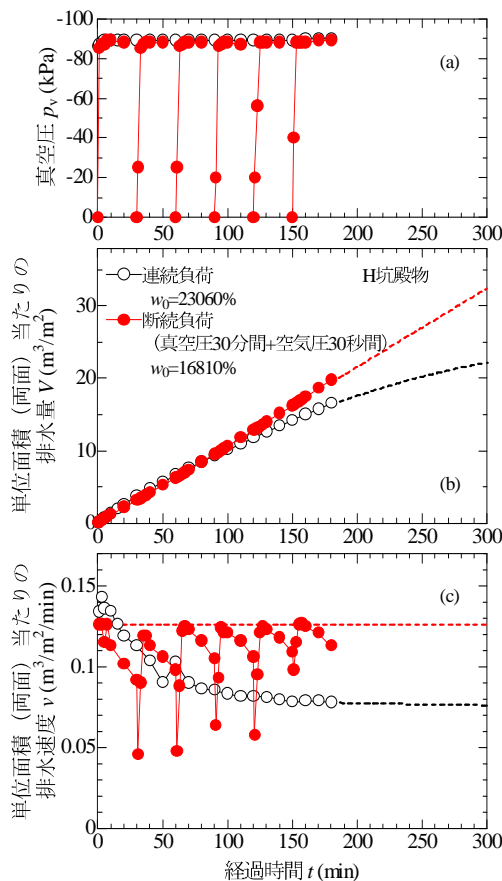


図-16 濁水中での空気圧負荷による処理の効率化の一例（平板型ドレーン）

中小規模の工事においても適用可能である。室内実験および現場実験と試作機を用いた実用化実験を実施した。得られた主な知見は、以下の通りである。

- (1) 17 種類の高含水比土に対する脱水減容化実験において、泥水中で 120 分間、空気中で 60 分間脱水した場合、処理土量は 60 kg/m^2 （両面）程度以上であり、減容化率は $1/3 \sim 4/5$ 程度であり、処理土の含水比は液性限界の $0.9 \sim 1.3$ 倍程度である。処理土をそのままダンプトラックで運搬することができる。
- (2) 処理土には適度な流動性があり、その後の埋立処理やリサイクルに好都合である。また、凝集剤などの添加剤を使用しておらず、水生生物や植物の生育に適した含水比やせん断強度を有しており、減容化した処理土を水底へ還元することも可能である。
- (3) 6 種類の濁水とアオコを含んだ湖水について、排水基準で規定されている SS と原位置において短時間で測定できる濁度および透視度の関



(a)送気前



(b)送気中

写真-4 濁水中での空気圧負荷の一例（短冊型ドレーン）

係を明らかにした。その関係を用いれば、原位置において SS を簡便に決定することが可能である。

- (4) ドレーン表面へ付着した土粒子がフィルターの役目をするために、濾布の通気度に関わらず、排出水の SS を低下させることができる。凝集剤等の添加剤を用いないため、有害物質等が含まれていなければ、排出水をそのまま河川等に放流することが可能である。
- (5) マルチエジェクターによる真空度の向上、サイクルタイム（脱水時間）の最適化による脱水の効率化、短冊型ドレーンを用いた付着土の剥離の効率化および特殊な配管の開発と濁水中での送気による濁水処理の効率化が達成された。

謝辞

本実験の一部は、経済産業省「平成 21 年度休廃止鉱山鉱害防止技術等調査研究事業」に基づく再委託業務の一環で実施された。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 環境省, 建設工事等から生ずる廃棄物の適性処理について (通知), 環廃産276号, 2001.
- 2) 国土交通省, 平成20年度建設副産物実態調査結果, <<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/jittaihouso/index01.htm>>(2011/3/29アクセス).
- 3) 日本製紙グループ, ニュースリリース, 海底浚渫土とペーパースラッジ燃焼灰から環境にやさしい「新海洋土木材料」を開発～廃棄物を有効活用し, 干潟環境の回復を実現～ (2011年2月), <<http://www.np-g.com/news/news11022801.html>>, (2011/3/29アクセス).
- 4) 氣工社, 環境再生システムのご案内, <http://www.kikosha.co.jp/katarogu_pdf/kikosha%20system.pdf>, (2011/3/29アクセス).
- 5) 国土交通省総合政策局建設施工企画課, 施工技術の動向 ①濁水処理工, 建設マネジメント技術, 2009年8月号, pp.53-56, 2009.
- 6) 梅崎健夫, 河村 隆, 鈴木俊介, 飯塚貴久: 真空圧密工法の施工過程を考慮した粘土の圧密および強度増加特性, 施工過程を考慮した地盤の変形・破壊予測に関するシンポジウム, pp.93-100, 2002.
- 7) Umezaki, T., Kawamura, T., Kono, T. & Kawasaki, A.: A New Method for Dewatering Soil with High Water Content Using Gravity and Atmospheric Pressure, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits (IS-Osaka 2004)*, pp.281-286, 2004.
- 8) 梅崎健夫, 河村 隆: ペーパーバッグ真空圧密法による高含水比の発生土および汚泥の脱水・減容化技術, 第5回地盤改良シンポジウム論文集, pp.115-120, 2002.
- 9) 梅崎健夫, 河村 隆: 高含水比の発生土および汚泥のリサイクルーペーパーバッグ真空圧密法による脱水・減容化技術ー, 土と基礎, Vol.51, No.6, pp.22-24, 2003.
- 10) 梅崎健夫, 河村 隆: 諏訪湖底泥の脱水・浄化対策の検討, 環境科学年報ー信州大学ー, 第29号, pp.29-38, 2007.
- 11) 梅崎健夫, 河村 隆, 河野剛志, 河崎 彰, 野村忠明, 細野武久, 境 大学: マルチドレーン真空脱水法による閉鎖性水域底泥の脱水・浄化システムの開発, ジオシンセティックス論文集, 第22巻, pp.177-184, 2007.
- 12) 環境省, 水・土壌・地盤環境の保全, 水環境関係, 一律排水基準, <<http://www.env.go.jp/water/impure/haisui.html>> (2011/3/11アクセス).
- 13) 日本環境アセス, 各地域で定められている建設工事排水基準, <http://www.jea-navi.com/suishitsu-kouji_haisui.html> (2011/3/11アクセス).
- 14) (株) エムケー・サイエンティフィック, 防水型ハンディ濁度計 <<http://www.mksci.com/wt/tn100.html>> (2011/3/11アクセス).
- 15) サンプラテック, 透視度計 (呼称: 300型用シリンダー) のご紹介ページ, <http://www.sanplatec.co.jp/product_pages.asp?arg_product_id=SAN1264> (2011/3/22アクセス).

(原稿受付 2011. 4. 8)