

高含水建設搬出土の改良システムの開発

勝又正治¹・滝口健一²・清水英樹³・安田昭彦⁴・大林成行⁵

¹正会員 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町一丁目39-16)

²正会員 前田建設工業株式会社 技術部 (〒102 東京都千代田区富士見町二丁目10-26)

³正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町一丁目39-16)

⁴正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町一丁目39-16)

⁵正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 千葉県野田市山崎2641)

建設分野において掘削工事等で排出される高含水土については、その処理・処分が難しいのが現状である。そこで、筆者らはこの高含水土処理に対し低加圧と負圧を併用する新しい脱水機構を有する処理装置を開発した。そして、この脱水装置を含む一連のシステムを考案し、泥水シールド工事の余剰泥水処理に実証実験として導入した。本論文はこの導入に際しての種々の検討結果と、実証実験結果について示したものである。そして、当脱水処理システムは脱水時間がフィルタープレスの約1/3と高効率脱水であることがわかった。さらに、凝集剤にセメントを使用することで、改良土も有効利用できる強度のものが得られることがわかった。

Key Words : slurry, flocculant, dehydrator, sludge cake, slurry shield method, recycle, industrial waste

1. まえがき

近年、都市開発や地下の有効利用に伴い掘削工事が増え、これによって発生する建設搬出土は年々増加傾向を示している。この内、泥水状の搬出土（以下高含水土と記す）は汚泥に該当し、ほとんどが再利用されずに処分されているのが現状である¹⁾。環境問題が大きくクローズアップされ、リサイクル法が施行された現在、この高含水土を効率よく改良し有効利用していく技術が強く求められている。そこで、この社会ニーズに応えるべく、高含水土を効率よく脱水し、改良土も土質材料として有効利用していけるような脱水装置の開発に取り組んできた^{2), 3)}。そして、脱水機構として低加圧と負圧を併用する方法が高含水土の処理に適していることを、基礎的な実験や小型脱水装置を用いた実験から実証した^{5), 6)}。そして、この脱水機構を有する実機を製作し、その性能を検証することとした。

現在、脱水装置として一般的に使用されているものにフィルタープレスがあり、建設分野では主に泥水シールド工事から発生する余剰泥水処理に用いられている。このフィルタープレスについてはさらなる高効率脱水と、改良土の有効利用が求められている。そこで、開発した脱水装置を泥水シールドの余剰泥水処理に適用し、フィルタープレスと性能比較

試験を実施した。

本論文は、開発した脱水装置を泥水シールドの余剰泥水処理に適用した場合のシステムについて示し、フィルタープレスと脱水効率を比較すると共に、改良土の有効利用について示唆したものである。

2. 脱水装置の機構

図-1は脱水装置の構造を示したものであり、ろ板をジャッキで各々重ね合わせた時の断面図を示したものである。ろ材に金網を用いたろ板を各々重ね合わせるにより、ろ板間に厚さ30mmのろ室（空間）ができる。このろ室内に上部投入口から凝集剤を添加した高含水土を圧入する。そして、ろ室内圧が 2.5kgf/cm^2 (0.25MPa) 程度となった時点でこの圧力を保持したまま真空ポンプを稼働し、負圧（真空度約700mmHg（約93kPa））を作用させ真空脱水を同時に行う。なお、高含水土投入時のろ板内圧力を 2.5kgf/cm^2 (0.25MPa) 以上にするとろ板の耐圧性の関係から脱水装置の大幅なコストアップが考えられたため、投入圧力の最大値としてはこの 2.5kgf/cm^2 (0.25MPa) の値を採用している。ろ板のフィルター部はパンチングメタルと金網から成り、圧入及び真空時に脱水されたろ液はこのフィルター部で

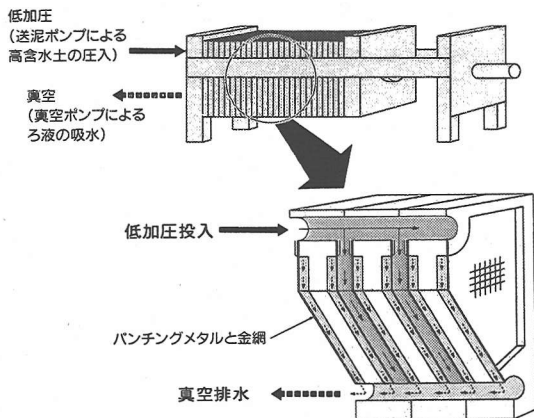


図-1 脱水装置の構造

表-1 高含水土の性状

比重	含水比 (%)	粒度 (%)			コンシステンシー特性		
		砂分	シルト分	粘土分	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 Ip
1.35	147.0	37.0	28.0	35.0	61.0	35.5	25.5

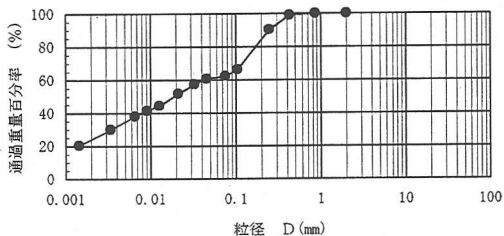
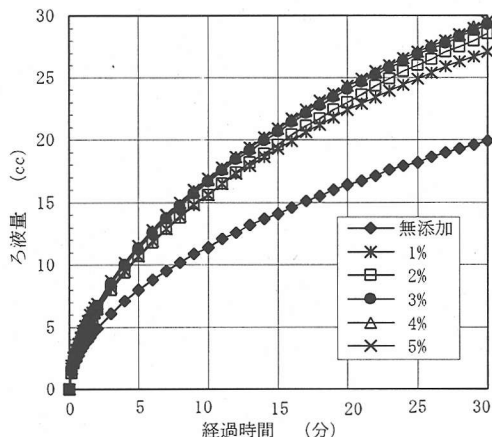


図-3 粒度分布図

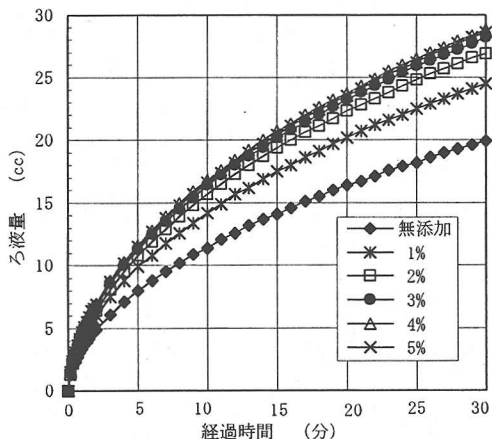
過された後、ろ板背面を通して下部排水口より排出される。真空ポンプを稼働させるとフィルター背面全体が真空ゾーンとなる構造のため、真空脱水時にはろ板内に圧入された高含水土全面に常に負圧が作用する仕組みとなっている。

3. 凝集剤について

泥水シールド工から発生する余剰泥水処理に使用されているフィルタープレスは、凝集剤として PAC (ポリ塩化アルミニウム) を用いている。これは水中で負に帯電している土粒子に対し、陽イオ



<普通ポルトランドセメント>



<PAC>

図-2 ろ液量の経時変化

ンである無機凝集剤のPACを添加することにより、土粒子のマイナス電位が中和され、土粒子を凝集させることができるためである⁷⁾。すなわち、微細な土粒子を凝集させることにより、脱水しやすくする脱水助剤の役割をしている。そこで、この凝集剤として普通ポルトランドセメントを用いることを試みた。これは前述したPACと同様の凝集効果が得られれば、安価であること、さらには開発目標でもある改良土の有効利用も期待できると考えたためである。つまり脱水されて得られた改良土はセメントが添加されているため、水和反応によって時間経過とともに強度増加を示し、改良土は土質材料としての有効利用の用途を広げられると考えた。そこで、PACと普通ポルトランドセメントを添加することによる脱水効果を比較することとした。

図-2は、API規格 (American Petroleum

表-3 小型脱水装置による実験結果

実験No.		1	2	3	
凝集剤	種類	セメント	PAC	消石灰	
	添加率 (%)	3			
	脱水終了時のろ液排出量 (ml/cm ²)	0.2			
脱水時間		17	33	15	
含水比 (%)		64	69	67	
改良土の性状	改良土強度	0.5h	2.13	1.92	2.00
	qc (kgf/cm ²)	2.0h	9.29	—	1.89
		4.0h	13.81	—	2.08

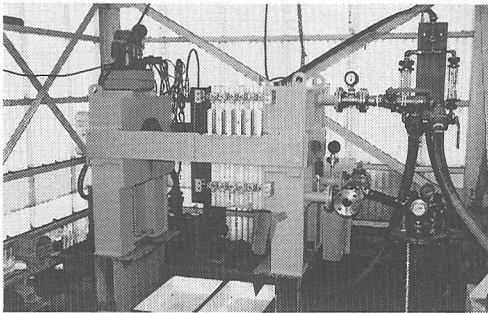


写真-1 小型脱水装置

表-2 小型脱水装置の仕様

ろ室数	5室
ろ室容量	0.055m ³
総重量	約1t
ろ板の材質	ポリプロピレン
ろ板の寸法	0.75m×0.75m
ろ材	ステンレス金網 (200メッシュ, 74μm)
改良土厚	30mm

Institute Standard) によるろ過試験器 (ろ過面積 23cm²)⁸⁾ を用いて、セメントとPACについて、その添加量を変化させた場合の排出液量の経時変化を示したものである。この試験器での圧力は開発した脱水装置の高含水土投入圧と同値の2.5kgf/cm² (0.25MPa) とし、ろ材は脱水装置と同様の200メッシュのステンレス金網を用いた。なお、使用した高含水土の性状を表-1に示し、粒度分布を図-3に示す。この高含水土は泥水シールド工事より発生した余剰泥水であり、シールド掘進位置の土質は東京層砂質土と下部有楽町層粘性土の互層で、一次分級装置を通過したものである。したがって、下部有楽町層が主体であり、粘性が高く一般的に脱水しにくいとされている泥水である。

この図-2より、セメントもPACもその添加率を増加させるにしたがい早い時間に多くのろ液を排出する傾向を示す。しかし、この傾向はセメントの方がPACに比べ顕著であり、例えばセメント1%のものはPAC2%のものに匹敵するろ液の出方を示している。しかし、PAC、セメントとも高含水土重量に対する添加率は、3%以上増加させてもろ液の排出量が顕著に増える傾向は見られず、脱水効率率は向上しないことがわかる。勿論この添加率は泥水の性状によって異なってくるものと考えられる。

以上から、凝集剤として普通ポルトランドセメン

トを用いても、PACと同様に凝集効果が得られ、むしろPACよりもその効果が高い結果が得られた。そこで、図-1に示した機構を有する小型脱水装置を用いて、さらに凝集剤の違いによる脱水特性を比較することとした。写真-1に小型脱水装置を示し、表-2にその仕様を示す。

表-3はこの小型脱水装置を用い、表-1の高含水土を脱水した結果を示したものである。なお、凝集剤として普通ポルトランドセメントとPACの他に、地盤改良のセメント系固材⁹⁾として用いられる消石灰も使用し比較した。なお、高含水土重量に対する添加率は、前述の「3. 凝集剤について」で示した3%とした。また、脱水時間はろ液の排出量がろ過面積に対し0.2ml/cm²になるまでとした。

表-3より、凝集剤がセメントの場合、ろ液の排出量が0.2ml/cm²に至る時間(脱水時間)は17分であり、30分後の改良土強度は2.13kgf/cm² (0.21MPa)を示した。また、改良土は時間の経過とともに強度増加を示し、4時間後には13.81kgf/cm² (1.35MPa)と、30分後の改良土強度の約1.6倍を示した。

次に、凝集剤がPACの場合、ろ液排出量が0.2ml/cm²に至るまでの脱水時間は33分と、セメントの場合の約2倍の時間がかかった。改良土強度は1.92kgf/cm² (0.19MPa)とセメントの場合とほぼ等しい結果が得られた。一方、当然のことながら、PACの場合は時間経過に伴う強度増加は得られない。

さらに、地盤改良材で使用されるセメント系固材を凝集剤として使用した場合、ろ液の排出量が0.2ml/cm²に至るまでの脱水時間はセメントの場合よりも若干短く、改良土はセメントとほぼ同等の強度のものが得られている。しかし、時間経過に伴う改良土の強度増加は30分後と4時間後ではほとんど変わらず、速硬性がないことがわかる。

以上、実験に用いた高含水土に対しては、PACでセメントと同じ強度の改良土を得るには、脱水時間が約2倍かかることがわかった。また、セメント系固材の場合はセメントよりも若干短い脱水時間

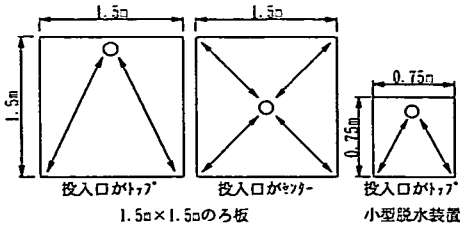


図-4 ろ板の投入口位置

表-4 高含水土の性状

比重	粒度 (%)			コンシステンシー特性		
	砂分	シルト分	粘土分	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 Ip
1.14	1.0	82.0	17.0	73.2	34.6	38.6

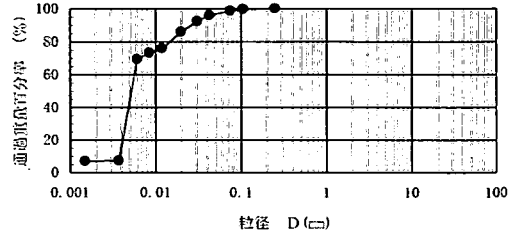
で同強度の改良土が得られることがわかった。しかし、速硬性はなく、価格はセメントの約2倍である。なお、フィルタープレスの場合にはろ材に化学合成繊維等からなるろ布を用いているため、凝集剤にセメントを使用した場合にはろ布の劣化が考えられるが、開発した脱水装置はろ材に金網を用いているため、劣化することはない。したがって、当脱水装置には基本的に普通ポルトランドセメントを用いることとした。

4. ろ板のスケールアップについて

(1) スケールアップに対する問題点

図-1に示した脱水機構を有する小型脱水装置を用い、凝集剤として少量のセメントを添加することで $q_c > 2 \text{ kgf/cm}^2$ (0.20MPa) の改良土が得られることが確認できた(表-3)。しかし、実工事で使用されているフィルタープレスと同等以上の処理能力を持たせるには、フィルタープレスと同程度のろ板寸法 (1.5m × 1.5m) にスケールアップする必要がある。このろ板のスケールアップに対しては次の問題点が懸念された。

①図-4に示すように、小型脱水装置と同様に高含水土の投入口をトップとした場合、投入口からろ板下部までの距離がろ板をスケールアップすることによって約2倍程度となるため、投入口より遠いろ板下部では改良が進むにつれて(改良土が形成されるにつれて)投入口からの圧入圧が伝わりにくくなり、ろ板下部での改良効果が悪くなることが考えられた。



0.005	0.075	0.425	2	4.75	19	75
粘土	シルト	細砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫

図-5 粒度分布

表-5 実験条件と実験結果

実験No.		1	2	3	
実験条件	ろ板寸法(m)	1.5 × 1.5		0.75 × 0.75 (小型脱水装置)	
	泥水投入口位置	センター	トップ	トップ	
	泥水投入圧 (kgf/cm ²)	2.5			
	セメント添加率 (%)	3.0			
	脱水時間 (分)	20			
	泥水の初期含水比 (%)	323	316	354	
実験結果	改良土の平均含水比	69	67	71	
	コンシステンシー指数 q_c (kgf/cm ²)	上部	3.4	3.2	3.1
		中央部	3.6	3.7	
		下部	3.5	3.6	
		平均	3.5	3.5	
ろ液量 (ℓ)	154	139	33		

②小型脱水装置と同等の脱水特性(脱水時間、改良土強度等)が得られるか懸念された。

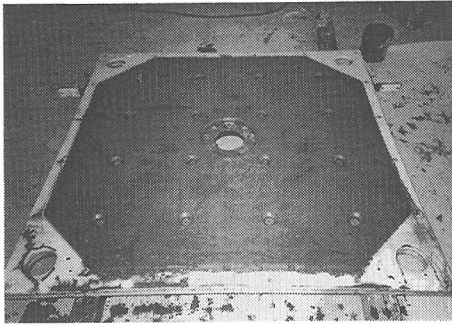
そこで、上記①に対しては、図-4に示すように投入口がトップのものに対して、投入口からの距離が最も離れているところでも小型脱水装置と同程度となるセンターのものも製作し、両者の脱水特性を比較することとした。さらに②に対しては、同じ高含水土を用い、小型脱水装置と脱水特性を比較することとした。

(2) 実験条件と実験結果

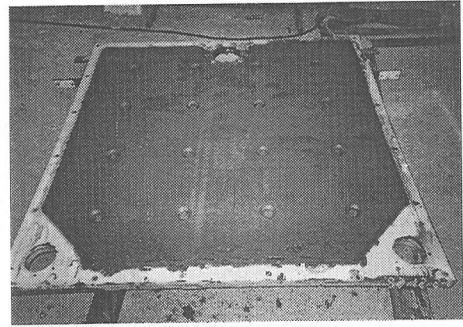
実験に用いた高含水土は、泥水シールド工事から発生した余剰泥水である。泥水は比重1.14、ほとんどが75μm以下のシルト・粘土分である。表-4に泥水性状を示し、図-5にその粒度分布を示す。

また、表-5に実験条件と実験結果を示し、写真-2にスケールアップしたろ板内の脱水後の改良土を示す。

表-5より、投入口がセンターの実験No.1の改良土強度はろ板の上部、中央部、下部ともに大きな差はなく、平均強度は $q_c = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ (0.34MPa) であった(写真-2<投入口センター>参照)。一方、投入口が上部のNo.2についてもろ板内での大きな強



＜投入口センター＞



＜投入口トップ＞

写真-2 ろ板内の脱水後の改良土

度差はなく、平均強度は $q_c=3.5\text{kgf/cm}^2$ (0.34MPa)と、投入口がセンターのものと同等の改良土強度が得られることがわかった(写真-2＜投入口がトップ＞参照)。これは「2. 脱水装置の機構」で示したように、真空脱水時にはろ板内に圧入された高含水土全面に常に負圧が作用し、脱水しているからであると考えられる。つまり、当初懸念された高含水土の投入圧の伝達低下を真空脱水で補えることができると考えられる。また、両ろ板の実験結果は(実験No. 1, 2)、小型脱水装置で脱水した結果(実験No. 3)に対し、改良土強度は同等以上の値を示した。さらに、小型脱水装置のろ板に対しスケールアップしたろ板の排出ろ液量は、投入口がセンターのもので4.2倍(139ℓ/33ℓ)、トップのもので4.7倍(154ℓ/33ℓ)であり、これは小型脱水装置に対する両ろ板の容量の4.5倍(0.050m³/0.011m³)とほぼ同程度の値である。つまり、両ろ板はほぼ小型脱水装置の容量をスケールアップした倍率分のろ液を排出していることになる。

以上から、ろ板のスケールアップに対する脱水特性については、小型脱水装置と同等な結果が得られ、問題のないことが確認できた。なお、投入口の位置は小型脱水装置と同様のトップを採用することとした。この理由は、製作上、センターのものは部品数が多くなりコストアップとなること、さらにセンターのものは投入口が障害となり改良土が落下しにくいためである。

5. 高含水土改良システムについて

図-1に示した機構を有する脱水装置の性能を、フィルタープレスと比較することとした。そこで、一般にフィルタープレスが使用されている泥水シー

ルド工事における余剰泥水処理プラントに当脱水装置を併設して導入すべく、そのシステムを考案した。図-6に泥水シールド工事における余剰泥水処理システムフロー図を示す。

システムは処理する余剰泥水に凝集剤としてのセメントを添加混合する前処理システム、脱水装置で改良する脱水システム、改良土の搬出とろ液処理を行う後処理システムから成り立っている。以下に、各システムについてその機能を示す。なお、文中の①～⑬は図-6に付記する①～⑬を示す。

a) 前処理システム

余剰泥水槽内の泥水を、汚泥移送ポンプによってスラリー混和槽に移送する際(図-6の①)、セメントサイロから凝集剤として普通ポルトランドセメントを粉体のまま添加する(②)。スラリー混和槽には超音波式のレベルコントロールが設置されており、泥水とセメントの投入や停止を自動的に制御する。

b) 脱水システム

脱水装置のろ板を閉板した後、ろ板間にセメントを添加した泥水を圧入ポンプによって圧入する(③)。この圧入時に排出されるろ液はろ液槽へ送られる(④)。圧入圧が約2.5kgf/cm² (0.25MPa)程度となった時点で、この圧力を保持したまま真空ポンプを稼働させ、真空度約700mmHg(約93KPa)の負圧で脱水を行う(⑤)。この真空脱水中に排出されるろ液は、いったんろ液受け槽に溜められ(⑥)、一定水位に達したことをレベルコントロールが検知すると自動的にろ液ポンプが稼働し、ろ液槽へ移送される(⑦)。

c) 後処理システム

上記脱水工程が終了後、ろ板上部の投入口内の未改良土と圧入管内に残っている泥水を、水(⑧)とエア(⑧)によってスラリー混和槽内へ押し戻す(③)。次にろ板を開板すると、同時に改良土は自重でベルトコンベア上に落下し、土砂ピットへ移送される。

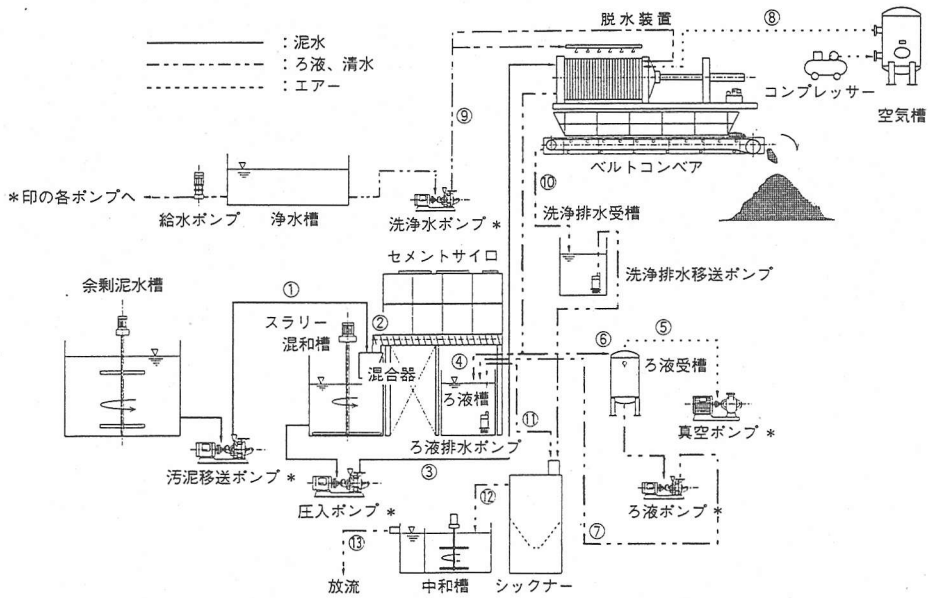


図-6 システムフロー図

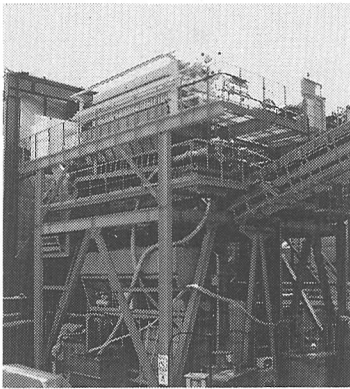


写真-3 プラント全景

化させるためのシステム上の課題に対する検討結果等や、さらにはフィルタプレスとの性能比較結果について以下に示す。

6. 実証実験について

(1) 概要

実証実験として当システムを導入した泥水シールド工事は、雨水貯留管築造工事であり、シールド外径4,430mm、シールド延長1,800mである。写真-3に導入したプラント全景を示す。また、写真-4に脱水装置、表-6にその仕様を示す。シールドの切羽土質は上総層群に属し、砂質泥岩や泥岩に砂礫層が介在するもの、および砂礫層が主体である。表-7に当工事で処理した余剰泥水の性状を示し、図-7にその粒度分布を示す。処理した泥水は初期含水比148~303%（平均214%）と幅広く、泥水比重は1.19~1.32（平均1.25）、シルト・粘土分の含有率は50~97%（平均83%）と大きく変化している。

(2) 検討課題

実証実験で検討した課題を以下に示す。

- a) 泥水へのセメント添加と混合
 - ・凝集剤としてのセメントを、送泥重量の1~3%の範囲で自動制御して添加する方法。

改良土を搬出終了後、ろ枠に付着した改良土を洗浄する目的で洗浄水ポンプを稼働させ、脱水装置上部に取り付けられた洗浄管より水を散水する(⑨)。この時ベルトコンベア上に落ちた洗浄水は、ベルトコンベアの傾斜を利用して改良土の搬出方向とは逆の方向へ排水され、洗浄排水受け槽に溜められる(⑩)。洗浄排水受け槽に溜まった洗浄水とろ液槽に溜まったろ液は一定量に達すると、レベルコントロールが作動し自動的にシックナーに送られる(⑪)。ここで濁度調整された後、さらに中和処理槽へと送られる(⑫)、pH調整後放流される(⑬)。

次に、このシステムを実際の泥水シールド工事に導入し実証実験を行い、上記一連のシステムを自動

表-6 脱水装置の仕様

ろ室数	36室
ろ室容量	約2 m ³
総重量	約13 t
ろ板の材質	ポリプロピレン
ろ板の寸法	1.5m×1.5m
ろ材	ステンレス金網 (200メッシュ, 74μm)
改良土厚	30mm

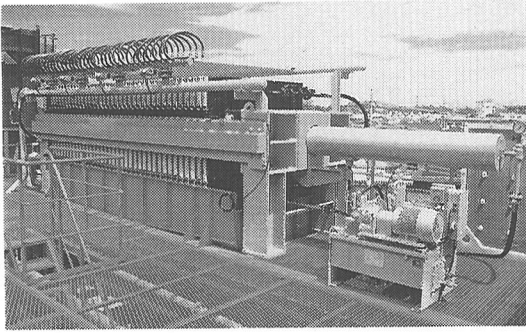


写真-4 脱水装置 (2 m³用)

表-7 泥水の性状

測定項目	泥 水									
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	*No. 9	
初期含水比 (%)	260	267	156	148	198	220	207	303	171	
泥水の粘性 (秒)	Pポート	8.53	7.92	8.66	8.3	8.39	—	—	—	
	ファンネル	—	—	—	—	—	24.7	27.35	20.14	26.86
比 重	土粒子	2.688	2.674	2.677	2.672	2.677	2.662	2.603	2.668	2.670
	泥水	1.21	1.22	1.32	1.27	1.27	1.25	1.25	1.19	1.30
コンシステンシー	液性限界 (%)	77.6	51.9	52.9	55.0	63.6	61.5	78.5	56.8	52.2
	塑性限界 (%)	40.2	38.7	28.7	28.9	34.5	37.7	46.6	29.2	30.2
	塑性指数 (%)	37.4	13.2	24.2	26.1	29.1	23.8	31.9	27.6	22.0
粒度構成	最大粒径 (mm)	2	0.85	2	2	0.25	0.25	0.25	2	2
	礫分 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	砂分 (%)	8	48	20	19	3	3	13	15	26
	シルト分 (%)	50	32	59	56	56	66	63	47	42
	粘土分 (%)	42	20	21	25	41	31	24	38	32

- ・セメントを容易に泥水に混合する方法。
- b) 改良土の強度
 - ・改良土は有効利用可能な強度のものが得られるか否か。
- c) ろ材 (金網) の目詰まり
 - ・ろ材の目詰まり時期の把握とその解消方法。
- d) フィルタープレスとの比較
 - ・フィルタープレスとの性能比較。

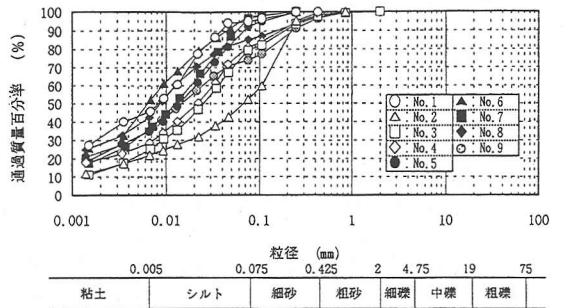


図-7 粒度分布

(3) 実証実験結果

a) 泥水へのセメント添加と混合

余剰泥水に対してある一定のセメント量を添加するには、アジテータ付きのスラリー混和槽内にセメントを粉体のまま自由落下させて混合させることが最も簡易的な方法と考えられる。しかし、スラリー混和槽内のアジテータのみでは十分にセメント粉体を泥水と混ぜることができないばかりか、セメント粉体を投入する際に大量の粉塵が発生する。また、スラリー混和槽をコンパクト化するには、スラリー混和槽内から脱水装置に圧入された泥水量を非接触型のレベルコントロールで検知し、減った分新たに泥水を自動投入する必要がある。この場合、スラリー混和槽内に残存する既にセメントが混ざった泥水とは別に、新たに投入されて来る泥水に対して定め

られた量のセメントを添加混合しなくてはならない。そこで、粉塵をたてずに新たに投入されてくる泥水に対してセメントを粉体のまま混合する方法として、図-8に示すような簡単な構造の混合器を考案した。この混合器による混合度合いの検討結果を以下に示す。

表-8は、セメントと泥水の攪拌方法の違いによる泥水性状変化をファンネル粘性で示したものである。セメント無添加ならびに攪拌不十分な（アジテータ程度に攪拌した）泥水のファンネル粘性は、水のファンネル粘性（18秒程度）に近い値を示した。一方、攪拌十分な（ハンドミキサーで十分攪拌した）泥水と混合器を通過した泥水のファンネル粘性は、他の2つよりその値が高く、しかも両者はほぼ同じ

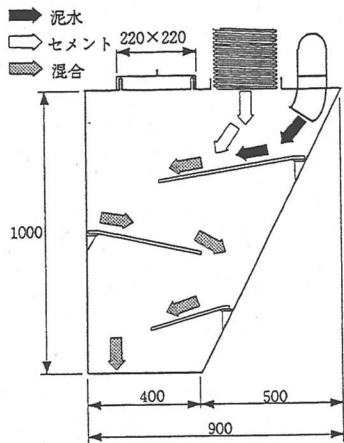


図-8 混合器

表-8 攪拌方法の違いによる泥水性状変化

攪拌方法	泥水性状			セメント 添加率 (%)	ファン秒 粘性 (秒)
	含水比 (%)	濃度 (%)	比重		
セメント無添加	231	30	1.24	0	22.9
攪拌不十分				1	24.1
攪拌十分				1	46.5
混合器通過				1	47.7

値である。したがって、図-8に示した混合器を用いることによって、セメントを粉体のまま泥水と十分に混合させることができることがわかった。さらに、この方法であればセメント粉体と泥水を同時にこの混合器中で混ぜてしまうため、スラリー混和槽内に残存するセメント混合泥水に関係なく、新たに投入されて来る泥水に対してのみセメントを添加混合することができる。

次に、この混合器にある流量で投入されてくる泥水に対して、任意の添加率でセメントを添加する場合の添加量の制御方法について検討した結果を以下に示す。

図-9はセメントサイロ内にあるスクリュコンベアの回転数を制御するサイリスタモーターの動力周波数と、セメント吐出量の関係を示したものである。この図より、セメントの吐出量は、動力周波数に対して比例関係にあることがわかる。また、この関係はサイロ内(20t用)のセメント残量に影響を受けないことがわかった。したがって、セメントの添加率は汚泥移送ポンプの送泥量に対して、動力周波数を調整することで制御できる。

一方、汚泥移送ポンプの送泥量は、泥水性状が異

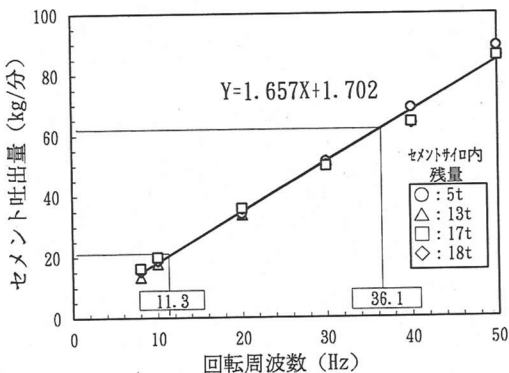


図-9 セメント吐出量と周波数の関係

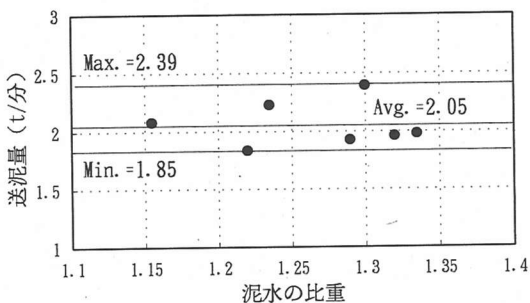


図-10 送泥量と泥水比重の関係

なることによってその量が増える。そこで、この汚泥性状を示す一指標として比較的測定が容易な泥水比重に対し、送泥量との関係を調べることにした。図-10は試運転時に求めた送泥量と泥水比重との関係を示したものである。この図から、泥水比重からだけでは送泥量を推定することはできないことがわかる。ところで、当脱水装置で使用するセメントの添加率は泥水重量に対し1~3%の範囲である。そこで、図-10に示す試運転時に求められた送泥量の平均値(2.05t/分)に対して、例えば設定セメント添加率3%のセメント量を求めると 61.5×10^{-3} t/分となる。仮に、このセメント量を変化する送泥量に添加したとすると、図-10から、送泥量の最大値(2.39t/分)に対しては添加率が2.6%となり、最小値(1.85t/分)に対しては3.3%の添加率となる。つまり、表-9に示すように、送泥量の平均値に対してセメント量を定め、変化する送泥量に添加しても、例えば設定セメント添加率3%の場合は-0.4~+0.3%の添加率誤差でしかすぎないことがわかる。さらに、設定セメント量1%の場合は、-0.1~+0.1%とよりわずかな添加率誤差でしかない。したがって、ここでのセメント添加量は試運転時に測定した送泥量の平均値を基準として定めることと

表-9 セメント添加率について

① 設定セメント 添加率 (%)	② 平均汚泥量 (t/分)	③= ②×(①/100) 平均汚泥量に対し て求めたセメント 量 (t/分)	④ 送泥量 (t/分)		セメント添加率 (%)		⑥-① ⑦-① 添加率誤差 (%)	
			④ 最大値	⑤ 最小値	⑥= (③/④)×100	⑦= (③/⑤)×100	⑥-①	⑦-①
1	2.05	20.5×10^{-3}	2.39	1.85	0.9	1.1	-0.1	+0.1
3		61.5×10^{-3}			2.6	3.3	-0.4	+0.3

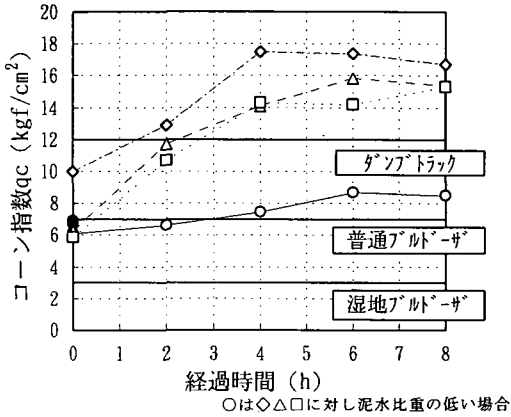


図-11 コーン指数経時変化

した。そして、この方法によって求めたセメント量を泥水に自動添加するには、図-9より、例えば1%のセメント添加に対してはスクリューコンベアのサイリスタモーターの動力周波数を11.3Hzにセットし、3%の場合は36.1Hzにセットし、泥水の投入と同時にスクリューコンベアを自動回転させればよい。なお、泥水の送泥量が図-10の範囲内にあることを適宜確認することとした。

b) 改良土の強度

図-11は、セメントを1%添加した場合のコーン指数経時変化を示したものである。

強度増加の傾向が泥水性状の違いによってそれぞれ異なっているものの、この図より4~6時間後には最大でコーン指数測定限界値近い $q_c = 16 \text{ kgf/cm}^2$ 程度(1.57MPa)までの強度増加が見られる。改良直後に対し8時間後の強度増加率は約1.5~2.5倍であり、各建設機械に必要なトラフィカビリティに応じた改良強度が得られることがわかる。なお、これは厚さ3cmの改良土をモールド($\phi = 150 \text{ mm}$, $h = 175 \text{ mm}$)内に重ねて詰め測定した結果である。これを住宅都市整備公団方式¹⁰⁾により、モールドに3層に分けて突固めた(1層55回、2.5kgのランマーを30cmの高さより落下させて突く)場合のコーン指数と比較した結果を表-10に示す。この表より突固めたものは突固めないものに対して、約3~4割の

表-10 突固め有無によるコーン指数

突固めの有無	1回	2回	3回
無し	8.70	7.68	6.18
有り	5.90	4.26	3.29

コーン 指数 (kgf/cm ²)	用途 区分	工作物の埋戻し	道路(路床)盛土	土木構造物の敷込み	道路路体用盛土	河川築堤 高規格堤防	一般堤防	土地造成 宅地造成	公園・緑地造成	水面埋立
		—	第1種改良土	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
8以上	第2種改良土	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
4以上	第3種改良土	△	○	○	○	○	○	○	○	○
概ね2以上	第4種改良土	×	×	×	×	×	×	×	×	×
概ね2以下	泥土a	△	△	△	○	○	○	○	○	○
	泥土b	△	△	△	○	○	○	○	○	○
	泥土c	×	×	×	×	×	×	×	×	△

図-12 有効利用マトリックス図¹¹⁾

強度低下を示すことがわかり、この強度低下は乱れによる影響と考えられる。その後、「建設発生土の有効利用マニュアル¹¹⁾」において、図-12に示す指標が提示された。このコーン指数の測定条件は上記住宅都市整備公団方式に対し1層25回と突固めエネルギーが小さい。したがって、図-11の結果を1層25回で突固めたとしても、表-10に示すほどの強度低下にはならないと考えられる。よって、この脱水装置で得られる改良土は、図-12に示す用途別土質材料として十分有効利用可能な強度を示すことがわかる。一方、セメントの添加率の違いによる長期強度の増加傾向を追跡するために、一軸圧縮試験を実施した。その結果が図-13であり、セメントを1%および3%添加した場合の一例を示したものである。ここで、一軸圧縮試験用の供試体($\phi = 5 \text{ cm}$, $h = 10 \text{ cm}$)は、前述の住宅都市整備公団方式によってモールド内に突固めたのち、シンウォールサンプラーで押し抜いて作成した。図より、強度の増加傾向は両者とも、7日目ではほぼ28日強度と等しい強度に達することがわかる。一方、28日

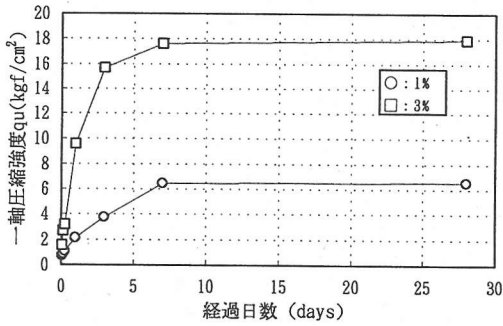


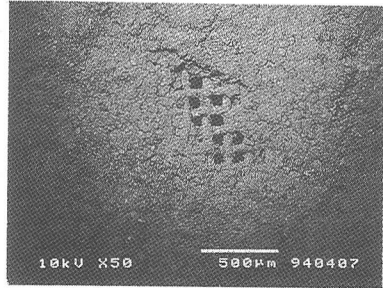
図-1 3 一軸圧縮強度の経時変化

後の強度で比較するとセメント添加率1%で約6 kgf/cm² (0.59MPa), 3%で約18 kgf/cm² (1.76MPa)と添加率が高いほど強度発現も大きい。この結果、凝集剤としてセメントを用いることによって、改良土に対しては水和反応による強度増加も期待でき、セメントの添加率を変えることによって、有効利用の目的にあった強度の改良土が得られるものである。

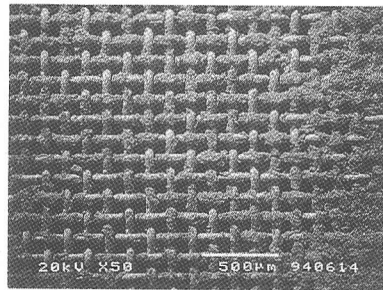
c) ろ材(金網)の目詰まり

実証実験において、脱水回数140回程度まで $q_c = 5 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ (0.49~0.78MPa)の間で推移していた改良土強度は、140回を越えたあたりから強度低下がはじまり、 $q_c < 2 \text{ kgf/cm}^2$ (0.20MPa)となるろ室が部分的に見られるようになった。さらに、160回程度では半数近くのろ室が $q_c < 2 \text{ kgf/cm}^2$ (0.20MPa)を示した。この時点における金網の状態を電子顕微鏡により撮影したものが写真-5 (a)である。金網のほぼ全面にセメント固形物が付着し、金網の開口率が著しく低下している様子がわかる。凝集剤としてPACを使用し、ろ材として化学合成繊維からなるろ布を用いているフィルタープレスは、一般にろ布が目詰まりを起こして改良土の付着が著しくなった時点でハイオクシャーによる洗浄を行い、目詰まりを解消している。そこで、同様に金網に対してもハイオクシャーによる洗浄を実施した。しかし、金網の網目が見える程度には回復したものの、凝集剤にセメントを用いているため、素線にはまだ多くのセメント固形物が付着している(写真-5 (b))。そこで、このセメント固形物を解かす目的で金網に希塩酸(濃度1.5%)を散布し、その後ハイオクシャーによる洗浄を試みた。その結果、セメント固形物は溶解し完全に金網の目詰まりを解消することができた(写真-5 (c))。

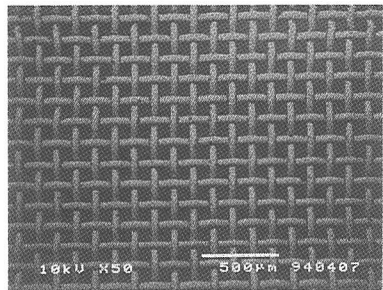
以上の結果から、ろ材としての金網が洗浄を必要とするまでの脱水回数は、今回の実証実験では140回程度であった。一方、同時期に稼働していたフィルタープレスは、脱水回数85回でハイオ



<(a) 金網の目詰まり状況>



<(b) (a)をハイオクシャーで洗浄>



<(c) (a)に希塩酸を散布し
ハイオクシャーで洗浄>

写真-5 ろ材(金網)の電子顕微鏡写真

クシャーによる洗浄を実施している。ろ材の洗浄を行うまでの脱水回数は処理する泥水の性状によって大きく変化するが、今回の比較実験結果では、当脱水装置が洗浄を必要とするまでの脱水回数はフィルタープレスの約1.6倍であった。また、セメントを凝集剤としている当脱水装置のろ材(金網)の目詰まりは、希塩酸を用いることで完全に解消することがわかった。この場合の金網への腐食は、希塩酸を散布して直ちにハイオクシャーによる洗浄を行えば、電子顕微鏡の写真(写真-5 (c))からもわかるように、金網の素線変化は見られず、問題ないと言える。

表-10 フィルタープレスとの比較

機種	容量 (m ³)	凝集剤		処理時間			処理泥水量 (m ³)	泥水に対する 処理能力 (m ³ /h)	改良土	
		種類	添加率 (%) ※1	脱水時間 ①	雑時間 ※2 ②	合計 ①+②			強度 q _c (kgf/cm ²)	含水比 (%)
当脱水装置	2	セメント	1.0	12分30秒	7分16秒	19分46秒	6	18	8.7	42
フィルタープレス	6	PAC	0.3	60分	30分	90分	18	12	5.9	44

※1：泥水重量に対する率

※2：当脱水装置 …………… 閉枠、残液戻し、開枠、洗浄等
フィルタープレス …… 閉枠、開枠

d) フィルタープレスとの比較

表-10に示すように、当工事におけるフィルタープレスが、PAC0.3%の添加率で脱水時間60分を要していた時に、当脱水装置でフィルタープレス以上の改良土強度を得るには、セメント添加率1%とすればフィルタープレスに対し約1/5の脱水時間で済むことがわかった。なお、PAC0.3%に対しセメント1%はほぼ同等のコストである。また、フィルタープレスは約6kgf/cm² (0.69MPa) 程度の投入圧で脱水しているのに対し、当脱水装置は2.5kgf/cm² (0.25MPa) の投入圧と真空度約700mmHg (約93KPa) の負圧を同時に作用させて脱水している。このように脱水効率が極めて高い理由は、セメントの使用に加え、ろ材がフィルタープレスの化学合成繊維から成るろ布に対し金網を用いていること、さらには脱水に負圧を作用させているためと考えられる¹²⁾。したがって、容量がフィルタープレスに対し1/3にもかかわらず、処理能力は約1.5倍を示した。これは上記で示したように、当脱水装置の脱水時間が短いことに加え、2m³用ろ板37枚(36室)を開枠するのに要する時間が、1分30秒と非常に早いので、チェーンによる瞬時開枠を採用しているからである。一方、フィルタープレスは6m³用ろ板126枚(125室)を約30分かけて順次開枠する。

7. 結論

本研究結果をまとめると以下となる。

①凝集剤について

- ・API規格によるろ過試験器を用いた実験から、凝集剤として普通ポルトランドセメントを用いても、PACと同様に凝集効果を得られ、むしろPACよりもその効果が高い結果が得られた。
- ・開発した脱水機構を有する小型脱水装置で、凝集剤の違いによる脱水特性を比較した結果(添加率3%)、セメントはPACに対し約半分の脱水時間で同強度の改良土が得れ、セメントは高い脱水特性を示すことがわかった。

- ・地盤改良材用のセメント系固化材を凝集剤として使用した場合、セメントよりも若干短い時間で同強度の改良土が得られることがわかったが、セメントに比べ速硬性はなく、価格はセメントの2倍である。しかし、早く強度増加を望まない場合などでの利用価値が考えられる。

②ろ板のスケールアップについて

- ・ろ板寸法を実機仕様でスケールアップしても、小型脱水装置で得られた脱水特性と同等の結果が得られた。
- ・投入口がトップのものは、ろ板内の改良土強度も均一であり、センターのものと同様の結果が得られた。これはろ板内に圧入された高含水土全面に常に負圧が作用し、脱水しているためであり、センターのものに対しろ板下部に投入圧が伝わりにくくなるトップの欠点を補っているものと考えられる。
- ・センターのものはトップのものに対し、部品数が多くなることからコストアップとなることと、改良土の落下に投入口が障害となるため、トップのものを採用することとした。

③実証実験について

a) 泥水へのセメント添加と混合

- ・考案した混合器を用いることで、粉塵をたてることなく、セメントを粉体のまま泥水と十分に混合させられることがわかった。
- ・この方法であればセメント粉体と泥水を同時にこの混合器中で混合してしまうため、スラリー混和槽内に残存するセメント混合泥水に関係なく、新たに投入されて来る泥水に対してのみセメントを添加混合することができる。
- ・汚泥移送ポンプの送泥量は、泥水性状が異なることによってその量に変化する。しかし、当脱水装置で使用するセメントの添加率はごくわずかなため、変化する送泥量の平均値に対し、添加量を設定しても大きな誤差にはならない。
- ・セメントサイロ内のセメント残量に関係なく、セメント吐出量はスクリーコンベアのサイリスタモーターの動力周波数と比例関係にある。

したがって、設定した添加率のセメントを吐出させるには、この吐出量にあった動力周波数をセツトし、泥水の投入と同時にスクリーコンベアを自動回転させればよい。

b) 改良土の強度

- ・当脱水装置で得られる改良土は、凝集剤にセメントを使用しているため、水和反応による強度増加を示す。この強度は各用途別土質材料として十分有効利用可能なものである。
- ・改良土の強度はセメントの添加率を変化させることによって変えることができる。

c) ろ材（金網）の目詰まり

- ・セメントを凝集剤としている当脱水装置のろ材（金網）の目詰まりは、希塩酸を散布してハイウオッシャーによる洗浄を行えば、完全に解消できることがわかった。
- ・電子顕微鏡写真において金網の素線の変化は見られないことから、希塩酸を散布することによる金網への腐食については、直ちにハイウオッシャーによる洗浄を行えば、問題ないと言える。

d) フィルタープレスとの比較

- ・実証実験では、当脱水装置はフィルタープレスに対し、約1/5の脱水時間で同等以上の改良土強度が得られ、脱水効率が極めて高いことが実証できた。
- ・したがって、容量がフィルタープレスに対し1/3にもかかわらず、処理能力は約1.5倍を示した。

8. あとがき

当脱水装置を含む一連のシステムが、泥水シールドの余剰泥水処理に対し十分適用できることが実証できた。今回の実証実験で得られた知見に基づき、今後は各使用機器類についても最適容量等の検討を行い、脱水装置本体に対してもさらなるコスト低減を図っていく予定である。また、6 m³用フィルタープレスのろ板（125枚）の総重量は約23 tであるが、同処理能力を持つ2 m³用（39枚）の当脱水装置は4 tと、フィルタープレスのわずか1/5程度である。したがって、移動が容易で、しかもプラント設備の軽量化によるコスト低減が図れる。また、今後改良土の有効利用が求められるれば、環境問題に対しても大いに貢献できるものと考えられる。今後は、脱水・減量化が非常に難しい地盤改良工事等から排出されるものと

もとセメントを大量に混入している高含水土処理に対し、この脱水装置の適用性を検討していく所存である。

参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策 平成7年度版、(財)先端建設技術センター
- 2) 滝口、勝又、小口、安田：固化材を少量添加した高含水土の脱水特性（その1）、第26回土質工学研究発表会、pp.2055-2056, 1991.
- 3) 滝口、勝又、小口、安田：固化材を少量添加した高含水土の脱水特性（その2）、第26回土質工学研究発表会、pp.2057-2058, 1991.
- 4) 滝口、勝又、小口、安田：模型脱水装置による高含水土の改良について、第27回土質工学研究発表会、pp.2351-2352, 1992.
- 5) 滝口、勝又、安田：真空脱水を併用した高含水土の改良効果について、第28回土質工学研究発表会、pp.2603-2604, 1993.
- 6) 勝又、滝口、安田：真空脱水を併用した高含水土改良装置の性能特性、土木学会第48回年次学術講演会、pp.652-653, 1993.
- 7) 小林勲、今野昭三、岩崎光美：建設工事における濁水・汚水の処理工法、鹿島出版会、1993.
- 8) 沖野文吉：ホーリング泥水、技報堂、1981.
- 9) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、技報堂、1994.
- 10) 厚生省生活衛生局水道環境部産業廃棄物対策室：建設廃棄物処理ガイドライン、ぎょうせい、1990.
- 11) (財)土木研究センター：建設発生土の有効利用マニュアル、1994.
- 12) 勝又、滝口、清水、安田、大林：建設排出土の資源化を考えた土質改良装置の実用化について、土木学会論文報告集第6部門、pp.171-179, 1996.6
- 13) 日本粉体工業技術協会：濾過・圧搾技術マニュアル、日刊工業新聞社、1983.

(1996. 7. 16 受付)

THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO DEHYDRATE CONSTRUCTION SLURRY

Masaharu KATSUMATA , Kenichi TAKIGUCHI , Hideki SHIMIZU,
Akihiko YASUDA and Shigeyuki OBAYASHI

At present, slurry discharged from the construction sites are disposed in many cases since there is no suitable treatment method to improve the slurry and this has caused some problems to the environment. From that viewpoint, the authors have developed a new device to dewater slurry under low pressure and vacuum. The treatment system together with the dehydrator has been introduced in the shield construction in practice. This paper discussed the components and functions of the dehydrator and the experimental results conducted on the site. The system can dewater the slurry with high efficiency. Further the treated sludge cake with certain stiffness can be reused with additional of cement as flocculants.