

## 泥水の自重脱水処理における脱水・ろ過特性

梅崎健夫<sup>1</sup>, 河村 隆<sup>1</sup>, 新井大揮<sup>1</sup>

<sup>1</sup>信州大学工学部

Dewatering and filtration properties on self-weight dewatering method for muddy water

T. Umezaki<sup>1</sup>, T. Kawamura<sup>1</sup> & D. Arai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Shinshu University

キーワード：除染作業，脱水袋，泥水，自重脱水，真空脱水，ろ過，透水性，凝集剤

Keywords: Decontamination work, Geotextile bag, Muddy water, Self-weight dewatering,

Vacuum dewatering, Filtration, Permeability, Flocculating agent

### 1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故によって飛散した放射性セシウムに対する代かきによる水田の除染作業において、汚染された細粒土分を含む泥水が多量に発生する。泥水中の放射性セシウムは主に細粒土分に吸着されており、一旦吸着した放射性セシウムはほとんど溶出しなことが知られている。効率的な除染作業のためには、細粒土分と水分を分離することが必要である。そのため、施工が容易で大規模な設備が不要な袋詰脱水による泥水の脱水減容化が検討されている。

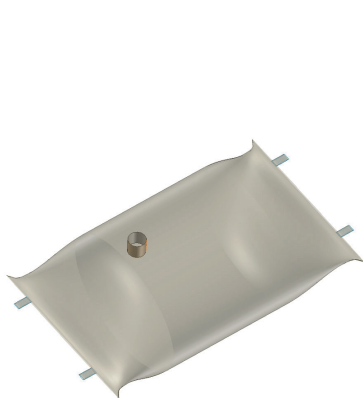
本文では、袋詰脱水の効率化を目的に、①ろ布およびろ紙の垂直方向および面内方向の透水試験、②泥水の沈降試験、③泥水の定水頭脱水ろ過実験および④懸垂型の袋詰脱水の模型実験の結果に基づいて、現状の問題点を指摘し、効率化のための提案を行った。

### 2. 試験および実験の概要

#### (1)ろ布・ろ紙および試料

袋詰脱水処理においては、たとえば、平置き型および懸垂型の脱水袋（写真-1(a), (b)）とセシウム汚染土壌用の脱水袋（写真-1(c)）が用いられている。前者には一般土壌用（E型ろ布，写真-2(a)）と汚染土壌用（S型ろ布，写真-2(b)）があり、後者の内袋にはゼオライト機能紙（写真-2(c)）が用いられている。ゼオライト機能紙は、水溶性のセシウムイオンを吸着除去でき<sup>1)</sup>、放射性セシウムの溶出が懸念される場合に、その対策として特に有効である。表-1に本文で用いたろ布およびろ紙の諸元を示す。

土試料には、NSF(C)粘土（粘土分 100%，土粒子密度 $\rho_s=2.723\text{g/cm}^3$ ，液性限界 $w_L=57.5\%$ ，塑性限界 $w_p=35.7\%$ ，塑性指数 $I_p=21.8$ ），DL クレー（粘土分 11.1%，シルト分 88.9%， $\rho_s=2.650\text{g/cm}^3$ ，NP）および



(a)ロジパック EP, SP  
(平置き型)

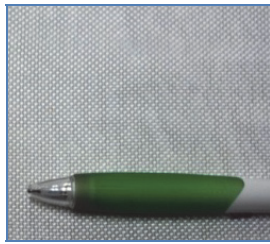


(b)ロジパック EB, SB  
(懸垂型)

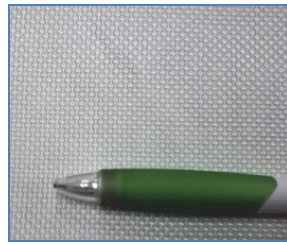


(c)除染用フレコンバッグ  
ゼオコン (懸垂型)

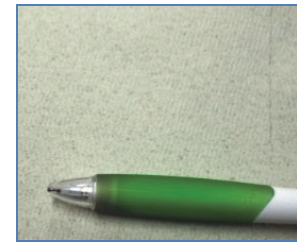
写真-1 脱水袋



(a)E型ろ布



(b)S型ろ布



(c)ゼオライト機能紙

写真-2 ろ布およびろ紙

表-1 ろ布およびろ紙の諸元

	E型ろ布	S型ろ布	ゼオライト機能紙※
品名	ロジパック EP, EB	ロジパック SP, SB	除染用フレコンバッグゼオコン
製造	芦森工業(株)	芦森工業(株)	辰野(株)
用途	一般土壌減量化小型袋	汚染土壌減量化小型袋	除染用耐候性クロスコンテナバッグ
寸法	EP: 幅 1.5m×長さ 2.3m EB: 幅 1.5m×長さ 2.5m	SP: 幅 1.5m×長さ 2.3m SB: 幅 1.5m×長さ 2.5m	直径 1.1m×高さ 1.1m
厚さ	0.3mm	0.6mm	0.6mm
容量	1.0m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>
透水係数	1.6×10 <sup>-5</sup> m/s (カタログ値)	2.6×10 <sup>-6</sup> m/s (カタログ値)	2.4×10 <sup>-5</sup> m/s (実測値)
定価	5,400 円	12,000 円	10,500 円

※天然ゼオライト粉末(粒径 0.5mm 未満)を 250g/m<sup>2</sup> 担持しており、水溶性セシウムを吸着する<sup>1)</sup>。

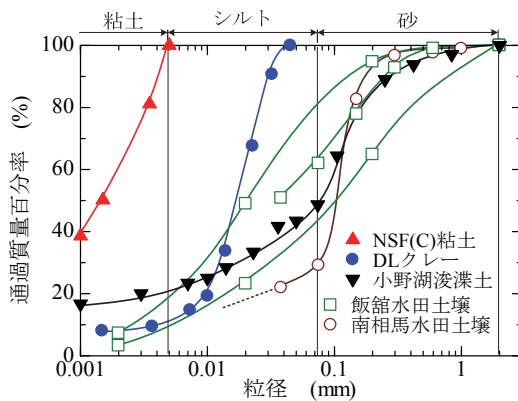


図-1 土試料の粒度分布



写真-3 凝集剤

化学合資会社)を用いた(写真-3). 合成カルシウム, アルミニウム塩, その他で形成された無機粉体であり, pH 調整は不要である.

### (2) ろ布およびろ紙の透水試験

図-2, 3に透水試験の概要を示す. ここで,  $\Delta h$  は水頭差,  $L$  は透水距離である. ろ布およびろ紙の垂直方向および面内方向の透水試験はそれぞれ定水位および変水位として実施された.

### (3) 泥水の沈降試験

メスシリンダーに, 水 1L (初期高さ 31cm), 土試料 (NSF(C)粘土および DL クレー) 33.3g を加えた泥水 (含水比約 3,000%, 浮遊物質質量  $SS=33,000$  および  $34,000\text{mg/L}$ ) に凝集剤 (1g/L) を添加した. そして, 1 分間振とうした後に静置し, 定期的に写真撮影を

山口県宇部市小野湖から採取した浚渫土(粘土分 22%, シルト分 27%, 砂分 51%,  $\rho_s=2.661\text{g/cm}^3$ ,  $w_L=58.5\%$ ,  $w_P=40.7\%$ ,  $I_p=17.8$ )を用いた. 図-1 に粒度分布を示す. 図中には飯館村および南相馬市において採取した水田土壌の粒度分布もあわせて示した. 代かきによる水田の除染作業は, 粗粒土分を沈降させて放射性セシウムの吸着した細粒土分を主に回収するものであり, 泥水中の土の粒度分布は, 図-1 に示した原土のそれよりも細粒土分側にシフトしている.

凝集剤には, 水質浄化用凝集剤 CAS-POK-S (三星

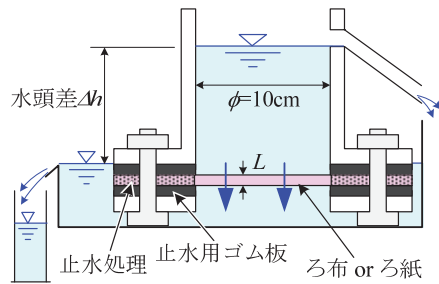


図-2 垂直方向透水試験

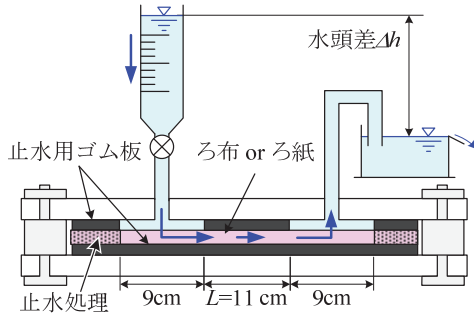


図-3 面内方向透水試験

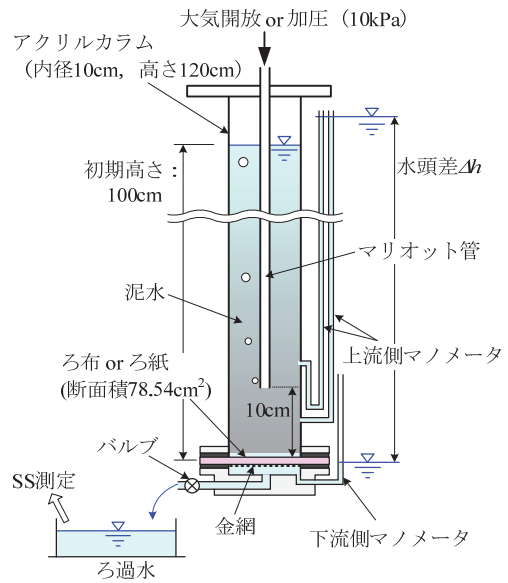


図-4 定水頭脱水ろ過実験

表-2 実験ケース（定水頭脱水ろ過実験）

	A：凝集剤なし			B：凝集剤添加（1g/L）		
	NSF(C)粘土	DL クレー		NSF(C)粘土	DL クレー	
水頭差	10cm	110cm	10cm	110cm	110cm	10cm
E型ろ布	ケース A1※	ケース A4	ケース A7	ケース B1	ケース B4	ケース B7
S型ろ布	ケース A2	ケース A5	ケース A8	ケース B2	ケース B5	ケース B8
ゼオライト機能紙	ケース A3	ケース A6	ケース A9	ケース B3	ケース B6	ケース B9

※水頭差の実測値は 2cm

行った。凝集剤を添加しない試験も実施した。

#### (4) 泥水の定水頭脱水ろ過実験

図-4に実験装置の概要を示す。アクリルカラムの下部にろ布またはろ紙を設置した。沈降試験と同様に用意した初期泥水（10L）に凝集剤を添加（1g/L）し、1分間スターラーで攪拌した後、実験装置に注入した（初期高さ100cm、初期体積7.8L）。注入開始から5分後に、装置下部のバルブを開放し、脱水ろ過実験を実施した。上流側2か所、下流側1か所に設置したマンノメータの水頭およびカラム内の水位の変化を測定した。マリョット管の上端に大気圧または10kPaの空気圧を負荷することにより、水頭差 $\Delta h$ を10cmまたは110cm程度に保持した。実験後、ろ過水のSSの分析を重量法により実施した。また、凝集剤を添加しない実験も実施した。実験ケースの一覧を表-2に示す。

#### (5) 懸垂型の袋詰脱水の模型実験<sup>2), 3)</sup>

小野湖浚渫土を  $w_L$  の約 3.4 倍の初期含水比  $w_0=200\%$ 程度で十分に練返し泥水状にして実験に用いた。図-5に実験装置の概要および実験ケースを示す。ケース1は、袋詰脱水のうち、容器の底面のみが排水面となるようにモデル化したものであり、排水距離約42cmの自重脱水である。ケース2は、懸垂型の袋詰脱水を模擬したものであり、綿袋を容器に使用した。容器の底面だけでなく周面も排水面とした自重脱水であり、排水距離が約3.3cmに短縮されている。ケース3は、ケース2の泥水内に挿入した排水パイプに真空圧を負荷することにより真空脱水を行ったものである。排水パイプの詳細については文献<sup>2), 3)</sup>を参照されたい。

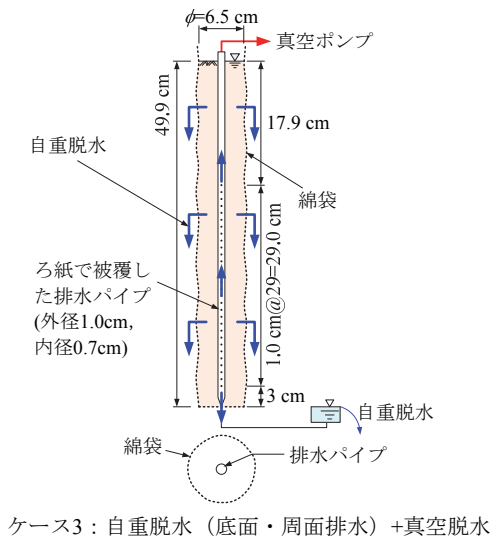
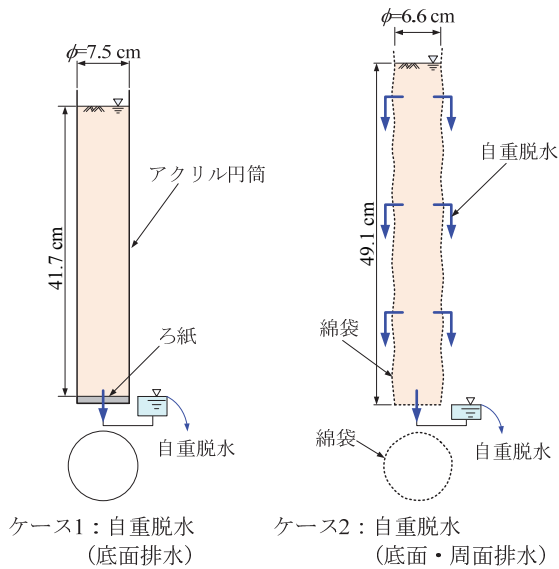


図-5 懸垂型の袋詰脱水の模型実験

### 3. 試験および実験の結果と考察

#### (1) ろ布およびろ紙の透水試験

透水係数の一覧を表-3に示す。いずれのろ布およびろ紙においても、面内方向透水係数  $k_s$  は、垂直方向透水係数  $k_n$  よりも極端に小さく、面内方向にはほとんど透水しない。すなわち、袋詰脱水処理において袋の接地面および袋同士の接触面では、ほとんど透水が生じない。

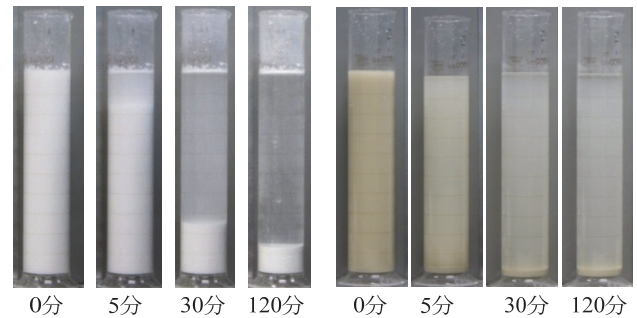
#### (2) 泥水の沈降試験

写真-4に沈降試験の結果を示す。凝集剤を添加しない場合は、土粒子の沈降速度は遅く、上澄み水には土粒子が含まれており濁っている。一方、凝集剤を添加した場合は、清澄水と沈殿物の分離が短時間で生じ、沈殿物の厚さは無添加の場合の

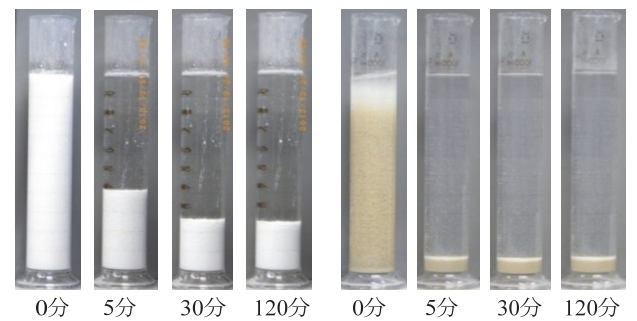
表-3 透水試験の結果

	E型ろ布	S型ろ布	ゼオライト機能紙
垂直方向透水係数 $k_n$ (m/s)	$3.5 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-5}$ ※
面内方向透水係数 $k_s$ (m/s)	$9.3 \times 10^{-8}$	$5.3 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-7}$
$k_s/k_n$	1/370	1/59	1/22

※袋全体（外袋と内袋を重ねた場合）の垂直方向透水係数： $k_n = 2.4 \times 10^{-5}$  (m/s)



(a-1)NSF(C)粘土 (a-2)DL クレー  
(a)凝集剤なし



(b-1)NSF(C)粘土 (b-2)DL クレー  
(b)凝集剤添加

写真-4 沈降試験の結果

約2倍になる。そして、減容化率は、NSF(C)粘土の場合、30分後には1/4程度、DLクレーの場合、5分後には1/10程度になる。

#### (3) 泥水の定水頭脱水ろ過実験

図-6に流量 ( $m^3/m^2$ ) の経時変化を示す。写真-5は、ろ過水の経時変化の一例とそのときのSSの値を示したものである。図-6中の  $\Delta h$  は実測した水頭差であり、上流側のマノメータの水頭の平均値と下流側マノメータの水頭から求めた値である。図-6(a)に示すように、粘土分100%のNSF(C)粘土に対して、凝集剤を添加せずにE型ろ布を用いた場合は、泥水がそのまま排水されて脱水ろ過できず、マリオット管を大気開放した場

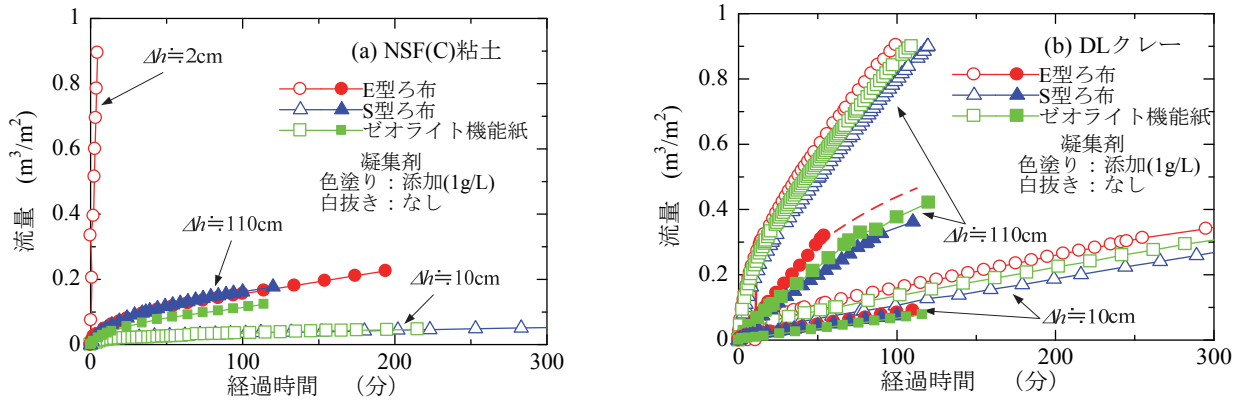


図-6 流量の経時変化 (定水頭脱水ろ過実験)

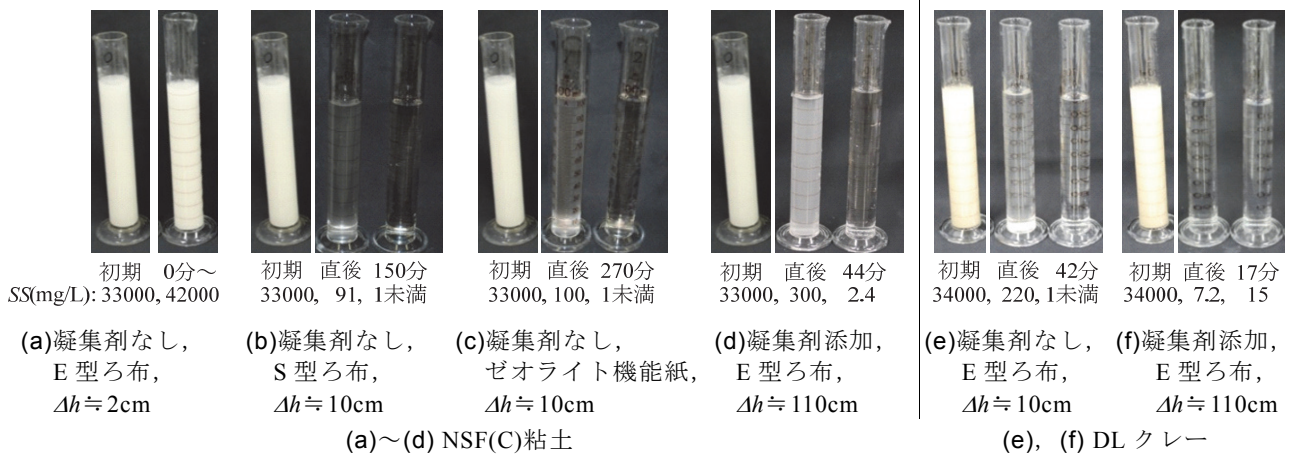


写真-5 ろ過水とSSの経時変化の一例 (定水頭脱水ろ過実験)

合においても、下流側の水頭が上昇し、 $\Delta h$ を2cm程度以上とすることができなかつた。このときの排水は、写真-5(a)に示すように、初期泥水と同様の泥水である。しかし、図-6(a)に示すように、S型ろ布およびゼオライト機能紙の場合は、凝集剤を添加しなくても、ろ布およびろ紙の表面に沈殿物(粘土フィルター)が生じ、10cm程度の水頭差が保持され、脱水ろ過することが可能である。写真-5(b), (c)に示すように、透明度が高く、SSは基準値<sup>4)</sup>(200mg/L)以下である。一方、凝集剤を添加(1g/L)した場合は、図-6(a)に示すように、E型およびS型ろ布、ゼオライト機能紙のいずれにおいても、110cm程度の水頭差が保持されて脱水ろ過することが可能である。ただし、E型ろ布の場合には、ろ過開始直後に濁ったろ過水(SS=300mg/L)が排水される(写真-5(d))。シルト分の多いDLクレーの場合は、図-6(b)に示すように、すべてのケースにおいて、凝集剤を添加しなくても一定の水頭差が保持されて脱水ろ過が可能である。ただし、E型ろ布の場合、ろ過開始

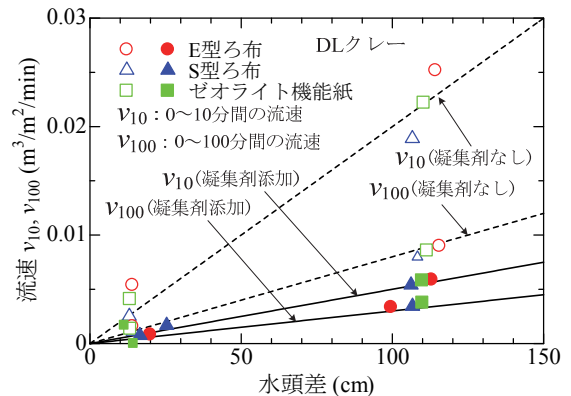


図-7 水頭差と流速の関係 (定水頭脱水ろ過実験)

直後に少し濁ったろ過水(SS=220mg/L)が排水される(写真-5(e))。しかし、凝集剤を添加すると開始直後のろ過水の濁り(SS=7.2~15mg/L)も改善される(写真-5(f))。

図-7にDLクレーの場合における水頭差と流速( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ )の関係を示す。流速は、0~10分間および0~100分間の平均流速をそれぞれ $v_{10}$ および $v_{100}$ として示したものである。凝集剤を添加し

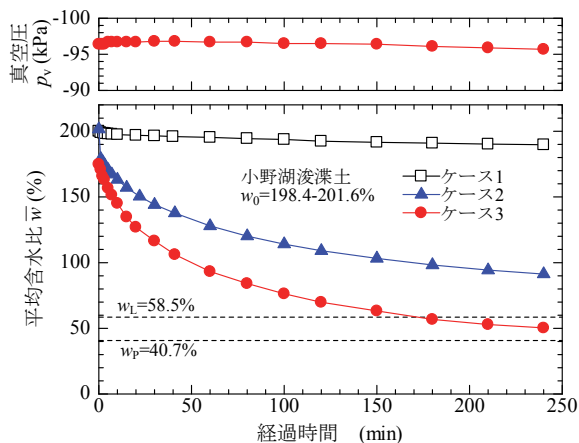


図-8 真空圧および平均含水比の経時変化  
(懸垂型の袋詰脱水の模型実験)

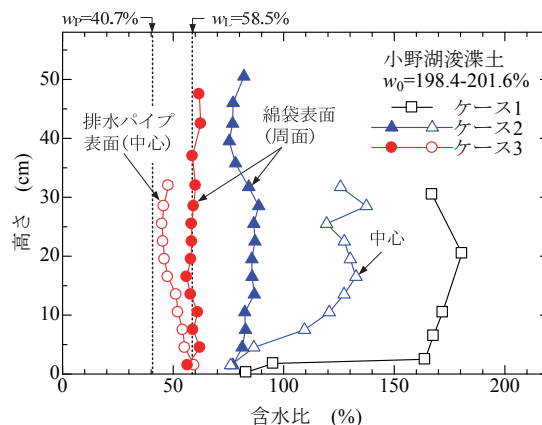


図-9 4時間脱水後の含水比分布  
(懸垂型の袋詰脱水の模型実験)

た場合、沈殿物（粘土フィルター）の透水性が小さいため脱水速度は遅くなる。したがって、凝集剤を添加した場合は、粘土フィルター上部の清澄水は、粘土フィルターを通して排水するのではなく、直接排水する必要がある。また、凝集剤を添加した場合には、粘土フィルターが厚く堆積するので、ろ布やろ紙の透水性能の影響が小さくなる。凝集剤の有無にかかわらず、 $v_{10}$  および  $v_{100}$  は水頭差に比例して大きくなる。水頭差を大きくすることにより脱水ろ過時間を短縮することができる。

#### (4) 懸垂型の袋詰脱水の模型実験

図-8 にすべてのケースにおける試料全体の平均含水比  $\bar{w}$  とケース 3 における真空圧  $p_v$  の経時変化を示す。底面からのみの自重脱水であるケース 1 においては、4 時間後の含水比低下は極めて小さく、脱水速度はかなり遅い。一方、底面に加えて袋の周面からも排水することができるケース 2 においては、4 時間後においてケース 1 の 1/2 程度まで含水比低下が生じている。さらに、真空脱水を併用したケース 3 においては、泥水に排水パイプを挿入するだけで高い真空圧が保たれ、含水比は、ケース 1 の 1/4 程度、ケース 2 の 1/2 程度まで低下しており、ケース 2 よりも脱水速度がさらに向上している。

図-9 に実験後に測定した含水比分布を示す。ケース 1 では、排水面（底面）から 3cm 程度しか脱水されておらず、底面に付着する粘土フィルターの透水性は低く、その上部には大部分が初期の泥水に近い状態で残っている。懸垂型の袋詰脱水を模擬したケース 2 では、排水面である底面も周面も含水比は 100% 以下に低下している。ただし、周

面から 3cm 程度離れた試料中心の含水比は 120% 程度であり、20% 程度高い。一方、真空脱水を併用したケース 3 では、試料のほぼ全体が  $w_L$  以下まで低下しており、高い脱水効果が得られている。

#### 4. 現状の問題点と効率化の提案

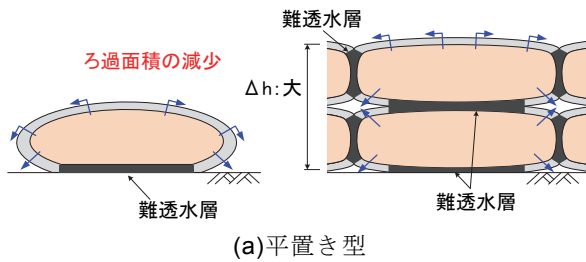
本文の考察に基づく、袋詰脱水の現状の問題点と効率化の提案は、図-10、11 に示すとおりである。

##### (1) 袋詰脱水の現状の問題点

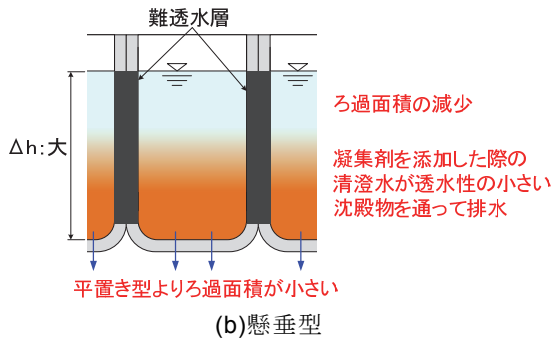
- ① ろ布およびろ紙の面内方向透水係数は垂直方向透水係数よりも極端に小さく、袋の接地面および袋同士の接触面は難透水層となる。その場合、平置き型、懸垂型のいずれの場合もろ過面積が減少して、脱水ろ過に長時間を要する。
- ② 平置き型を積み上げた場合や懸垂型を用いることにより自重（水頭差）を増加させても、袋同士が接触してろ過面積の改善が行われない場合は、その効果が十分得られない。
- ③ 懸垂型において凝集剤を添加した場合、脱水袋の底部に透水性の低い粘土フィルターが形成され、清澄水が粘土フィルターを通して排水される場合には、脱水ろ過に長時間を要する。

##### (2) 袋詰脱水の効率化のための提案

- ① 平置き型および懸垂型において、排水層として袋の接地面および袋同士の接触面に排水材や砂層などおよび排水材やスペーサーなどを設置して、ろ過面積の減少を防止することにより、無対策の場合よりも脱水ろ過時間を大



(a)平置き型



(b)懸垂型

図-10 袋詰脱水の現状の問題点

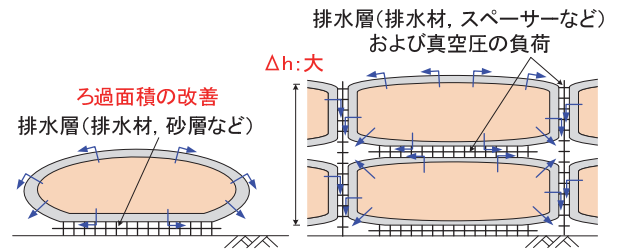
幅に短縮することができる。

- ② 懸垂型において泥水に凝集剤を直接添加する場合は、袋同士の接触面に排水層を設置することにより、清澄水を袋の周面から直接排水できるので、脱水時間を短縮することができる。この場合、凝集タンクは不要である。
- ③ 懸垂型の袋詰脱水において、泥水中に排水パイプを挿入する真空脱水を併用することにより、脱水ろ過時間をさらに大幅に短縮することができる。
- ④ 平置き型を積み上げた場合において、上下の袋の接触面の排水材に真空圧を負荷することにより<sup>5)</sup>、脱水ろ過時間を短縮することができる。ただし、排水材が完全に上下の袋により被覆されるように、その大きさや設置方法を工夫する必要がある。

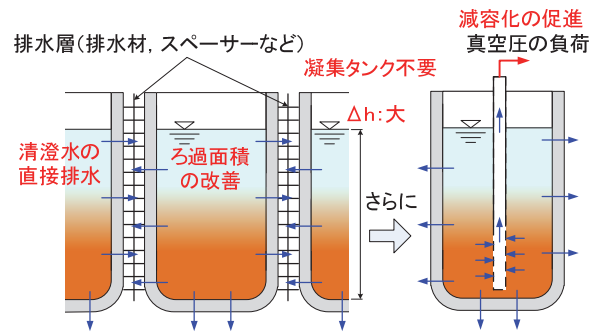
## 5. まとめ

得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) ろ布およびろ紙の面内方向透水係数は、垂直方向透水係数よりも極端に小さいため、面内方向にはほとんど透水しない。すなわち、袋詰脱水において、袋の接地面および袋同士の接触面では、ほとんど透水が生じない。
- (2) 凝集剤を添加した場合には、沈殿物が厚く堆積するので、ろ布やろ紙の透水性能の影響が小さくなる。
- (3) 凝集剤の有無にかかわらず、脱水ろ過速度は



(a)平置き型



(b)懸垂型

図-11 袋詰脱水の効率化のための提案

水頭差に比例するが、凝集剤を添加した場合の方が速度は小さい。

- (4) 凝集剤を添加した場合、短時間で清澄水と沈殿物（粘土フィルター）に分離されるが、粘土フィルターの透水性は小さいので、粘土フィルターを通して排水するのではなく、清澄水を直接排水する必要がある。
- (5) 平置き型および懸垂型の袋詰脱水においては、袋の接地面および袋同士の接触面に排水層を設置することにより、脱水ろ過時間を短縮することができる。
- (6) 懸垂型において、さらに、泥水中に排水パイプを挿入する真空脱水を併用することにより、脱水ろ過時間をさらに大幅に短縮することができる。
- (7) 平置き型を積み上げた場合において、上下の袋の接触面の排水材に真空圧を負荷することにより、脱水ろ過時間を短縮することができる。ただし、排水材が完全に上下の袋により被覆されるように、その大きさや設置方法を工夫する必要がある。

**謝辞** ろ布およびろ紙の透水試験、泥水の沈降試験および定水頭脱水ろ過実験は、農林水産省委託プロジェクト研究 平成 25 年度「農地等の放射性物質の

除去・低減技術の開発」のうち「大規模水田における土壌攪拌による放射性物質低減技術体系の構築」の業務委託の一環として実施された。ここに付記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 梅崎健夫, 河村 隆, 西田健吾, 早川 典, 石井大悟, 志賀信彦: ゼオライト機能紙とジオシンセティックスを用いた浄化システム, ジオシンセティックス論文集, 第27巻, pp.25-30, 2012.
- 2) 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.

- 3) 梅崎健夫, 河村 隆, 河野剛志, 河崎 彰: 重力と大気圧を利用した高含水比浚渫土の脱水処理法, 第39回地盤工学研究発表会, pp.973-974, 2004.
- 4) 環境省, 水・土壌・地盤環境の保全, 水環境関係, 一律排水基準.
- 5) 梅崎健夫, 河村 隆, 岡村昭彦, 倉田正博, 大寺正志: 袋詰真空脱水法による高含水比土の脱水減容化 (その3), ジオシンセティックス論文集, 第25巻, pp.259-266, 2010.

(原稿受付 2014. 3. 30)