

管理型海面処分場の土質系遮水材「アクアソイルF」の開発（その2）

—遮水材の力学特性と鋼管矢板遮水工の遮水性能評価—

鳥井原 誠 高橋 真一 山田 祐樹
西田 憲司 塩田 耕三
(本社土木技術本部)

Development of Hydraulic Cutoff Material by Geotechnical Application of “AQUASOIL-F” (Part 2)

—Mechanical Properties of Barrier Materials and Hydraulic Performance of Barrier System—

Makoto Toriihara Shinichi Takahashi Yuki Yamada
Kenji Nishida Kozo Shiota

Abstract

Waste disposal landfills need to provide good hydraulic performance. In barrier systems using sheet piles, the hydraulic performance at the joints is very important. This paper describes laboratory tests and centrifugal model tests using a newly developed hydraulic material called "AQUASOIL-F". This material is confirmed to have a very small coefficient of permeability and to provide good hydraulic performance.

概 要

近年、管理型処分場の遮水性能の確保はますます重要になっている。管理型処分場の中でも海面処分場などで適用が多い鋼管矢板を用いた遮水壁構造では、遮水性を確保する鋼管の継ぎ手部が重要なポイントとなる。鋼管矢板は、埋立て廃棄物の土圧のほか、海面処分場では潮位の変動などの繰り返し荷重によって鋼管矢板の生じる変形に対して、継ぎ手部の遮水構造も柔軟に追随し遮水性能を維持することが不可欠である。この論文では新たに開発した変形追随性遮水材「アクアソイルF」について、遮水性能を検証するために室内土質試験と鋼管矢板継ぎ手構造を有する遠心模型実験を行い、遮水材の透水係数が十分小さいこと、実物と同じ遮水構造、水圧条件を再現した状態で十分な遮水性能を発揮することを確認した。

1. はじめに

管理型処分場の遮水性能の確保は、近年ますます重要になっている。管理型処分場の中でも海上埋立て地として建設される海面処分場では、Fig. 1に示すような鋼管矢板を用いた遮水壁構造形式が多い。この遮水壁構造形式では遮水性を確保する鋼管の継ぎ手部が重要なポイントとなるが、この鋼管の継ぎ手部分は、鋼管矢板が廃棄物の埋立て荷重や潮位の変動、地震荷重などの繰り返し荷重によって生じる鋼管矢板の変形に追随して変形するため、継ぎ手部に充填する遮水材はこの遮水構造の変形に柔軟に追随し遮水性能を維持することが不可欠である。

この論文は、新たに開発した変形追随性遮水材「アクアソイルF」¹⁾について、圧密試験や繰り返し三軸試験などの室内土質試験を行って透水特性、変形追随性を確認するとともに、実際と同様の鋼管矢板継ぎ手構造を有する模型継ぎ手構造模型を用いて遠心模型実験を行い、実際と同様の水頭差の条件下で遮水性能を検証した結果について示したものである。

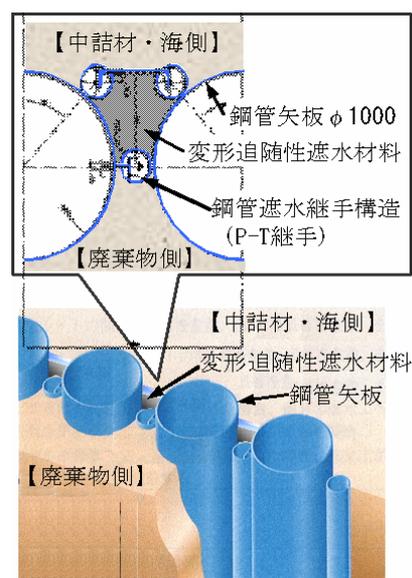


Fig. 1 鋼管矢板遮水構造
Barrier System using Sheet Piles and
Barrier Materials

2. 遮水材の力学特性

2.1 試料条件と試験条件

Table 1に遮水材料の配合を示す。「アクアソイル-F」は、耐海水性ベントナイト70kg/m³を混合した砂質土系遮水材である。Table 2には、粒度特性を示した。

なお、遠心模型実験では、比較のため母材に粘性土を用いた粘性土系遮水材を用いた実験も行った。粘性土系遮水材は、大阪港埋立地から採取した旧海底沖積粘土を含水比129% (液性限界の約2倍)に調泥し、フロー値が砂質土系遮水材とほぼ同様となるようにベントナイトを混合して作製した。

2.2 圧密・透水特性

Fig. 3~Fig. 5には、φ6cm×h2cmの供試体を用いた圧密試験から得られた圧密特性を示した。

e-logp曲線 (Fig. 3) は、初期荷重から概ね直線的に間隙比が低下し、明確な圧密降伏応力を示さず初期荷重からほぼ直線的なe-logp曲線を示す高含水比軟弱粘土と同様の特性を示している。曲線の勾配は小さな圧密荷重領域に比べて大きな圧密荷重領域の方が若干大きい。しかし曲線の勾配 (Cc) は図中に示すようにCc=0.18で、一般的な沖積粘性土やベントナイト (単体) に比べれば小さく、これらの土質材料に比べて自重や上載荷重による圧密沈下量が小さいことがわかる。

圧密係数Cv (Fig. 4) は、圧密荷重が大きくなるほど大きくなる傾向を示し、圧密荷重が小さい領域ほど圧密に時間が必要なことを示している。またその値 (Cv=200

~500cm²/d) は一般的な正規圧密状態の海底沖積粘性土 (Cv=30~100cm²/d) に比べて大きく、沈下が生じた場合比較的早く沈下が収束することがわかる。

透水係数 (Fig. 5) は、圧密荷重が大きくなるほど低下している。このことから、初期の透水係数が所定の範囲にあれば、施工後の圧密沈下によって透水係数はさらに低下する特徴を有していることがわかる。

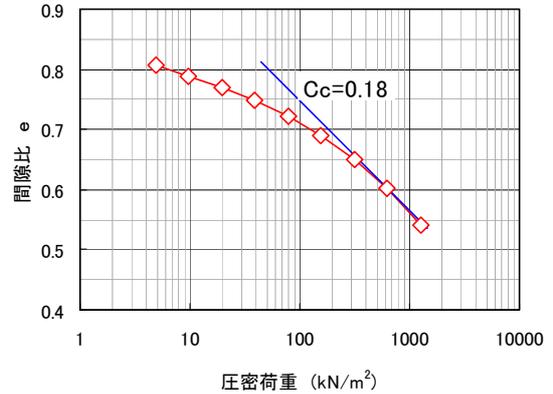


Fig. 3 間隙比 e - 圧密荷重 log p 曲線
e-log p Curve

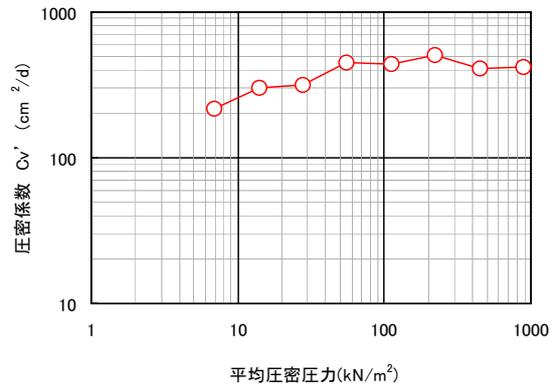


Fig. 4 圧密係数Cv-圧密荷重log p 曲線
Cv-log p Curve

Table 1 配合条件
Mixture of Materials

遮水材 No.	種類	配合 (kg)		
		母材	ベントナイト	海水
1	砂質土系遮水材	砂質土 1436	70 (耐海水性)	440
2	粘性土系遮水材	沖積粘土 598	49 (高膨潤性)	764

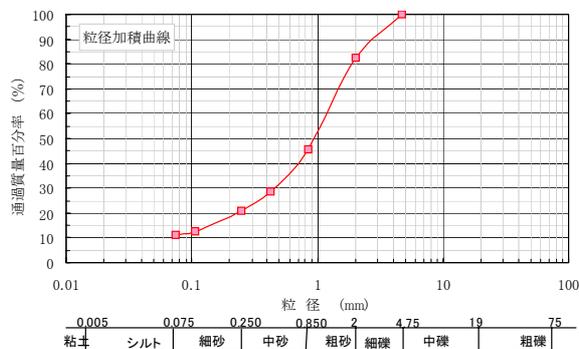


Fig. 2 粒度曲線
Grain Size Distribution

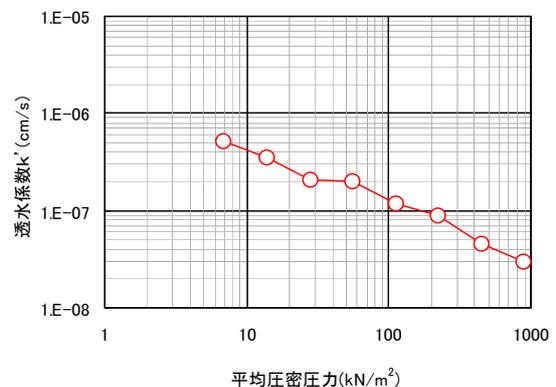


Fig. 5 透水係数k-圧密荷重log p 曲線
k-log p Curve

2.3 繰り返し変形特性

護岸構造物では、海水面の干満変動や波力など、永遠に継続する繰り返し外力が負荷される。アクアソイル-Fがこのような超長期繰り返し外力に対してどのような強度・変形特性をもっているのかを確認するために、連続繰り返し载荷試験を行った。

試験結果をFig. 6～Fig. 8に示す。一般的な砂試料では、同一の繰り返し振幅で载荷を継続していくと、ある繰り返し回数からひずみ振幅（変形量）が急激に増加し、破壊に至る。しかし、アクアソイル-Fでは砂試料のような急激なひずみ振幅の増加は生じにくく、繰り返し回数が増えても弾性的な挙動を保持し続け、繰り返し回数1,000回においてもひずみ振幅に大きな変化が生じていない。このことは材料の性状に大きな変化が生じていないことを表しており、遮水壁の変形量を想定した連続繰り返し载荷を受けても、遮水壁の変形に対する追従性を有していることが確認できた。

また、この試験とは別の動的変形試験結果によると台風や地震時の変形に相当する 1×10^{-3} 程度のひずみ量においても、アクアソイル-Fの変化は生じず、遮水性能は保持されていることを確認している。

3. 鋼管矢板遮水工の遮水性能評価

3.1 実験条件

Table 2に実験条件を示した。実験材料は、砂質を母材とする砂質系遮水材「アクアソイル-F」とともに、粘性土系遮水材を用いた実験も比較のため同時に実施した。実験の種類は、Table 2に示すように自重圧密実験と遮水性能実験の2種類である。実際の遮水壁高さ12mの構造物を想定し、1/20縮尺の地盤高さの模型地盤を準備した。

Photo 1に実験に使用した大型遠心模型実験装置を示す。実験土槽を搭載するバケットの大きさは2.2m×2.2mで、土槽のほかに給排水タンクや観察用CCDカメラ、計測アンプなどの搭載の自由度が大きい。なお、実験装置の詳細については、文献2)を参照頂きたい。

3.2 実験方法

3.2.1 自重圧密実験 内径φ135mmの亚克力円筒に試料を高さ60cmまで充填し、遠心加速度20G、24時間の連続実験を行った。亚克力円筒内周面には、圧密促進用として、濾紙を貼り付け、上下面に加えて側面方向も排水層とした。模型地盤の換算高さは12m、換算圧密時間は400日である。また、自重圧密実験は、自重圧密の進行を加速した条件で比較検討するために、層厚さの比較的小さな供試体（φ100mm×h40mm）の実験も行った。実験モードをFig. 9, Photo 2に示す。

3.2.2 鋼管矢板遮水工の遮水性能実験 Fig. 10, およびPhoto 3に実験に用いた遮水壁模型を示す。遮水壁の複雑な構造を模擬するため、平面的には1/1の大きさ、模型地盤高さは1/20で製作した。遠心実験では、遠心加

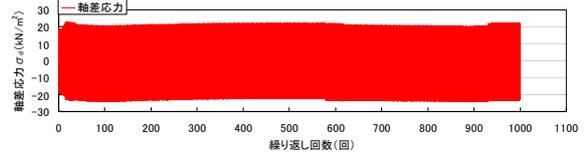


Fig. 6 载荷荷重条件
Loading Conditions

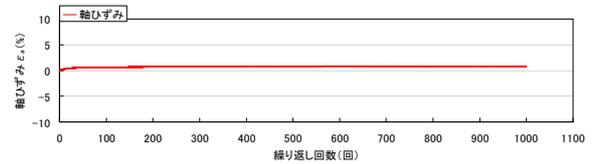


Fig. 7 荷重繰り返し回数とひずみ
Cyclic loading Number and Deformation

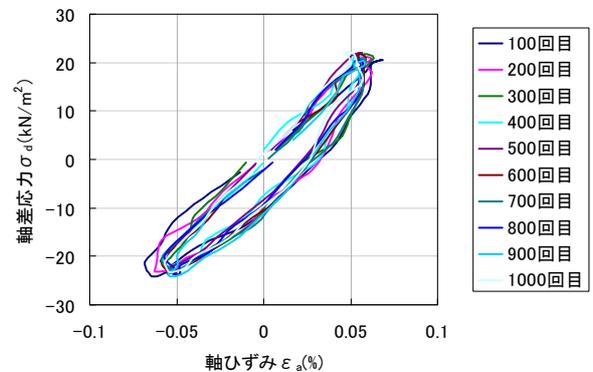


Fig. 8 応力-ひずみ曲線
Stress Strain Curve

Table 2 実験条件
Model Test Conditions

		アクアソイル-F 砂質土系遮水材	粘性土系 遮水材
自重圧密	H60cm供試体	Case 1	Case 2
	H4cm供試体	Case 3	Case 4
鋼管矢板遮水工の遮水性能		遮水壁模型	



Photo 1 遠心模型実験装置
Centrifuge Facility

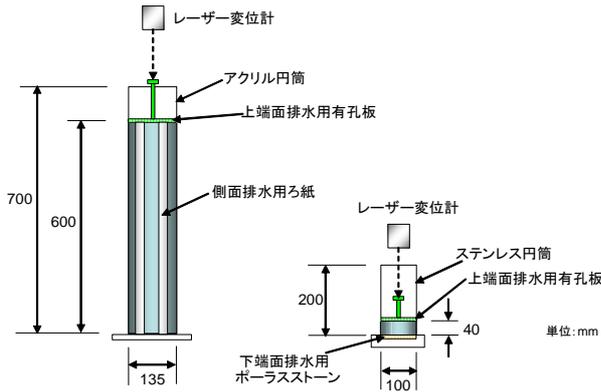
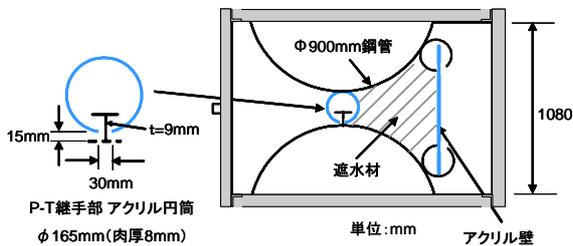


Fig. 9 自重圧密実験用モールド
Models of Self Weight Consolidation Tests



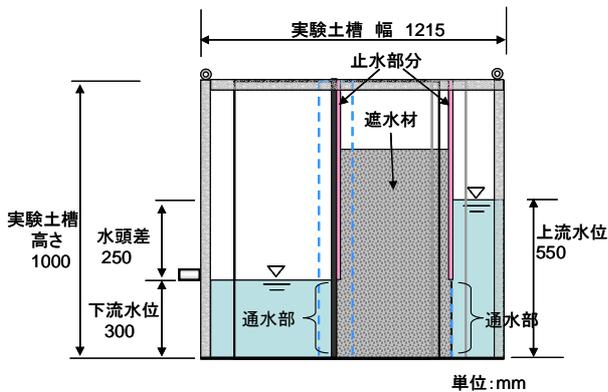
Photo 2 自重圧密実験用モールド
Models of Self Weight Consolidation Tests



(1) 平面図



Photo 3 遮水壁模型土槽
Model of Barrier System



(2) 断面図

Fig. 10 遮水壁の模型
Schematic Diagram of Barrier System Model



Photo 4 遮水材の充填状況
Barrier System Model filled with
Barrier Materials

速度20Gの条件で、現実と同じ圧力差を再現する。実物遮水壁と同じ断面を有する模型土槽に遮水材を充填し、遠心模型実験装置により原位置相当の水圧ならびに水頭差を遮水壁模型に作用させ、透水量を計測し、遮水性能の確認を行った。

土槽内への試料投入は、遮水壁模型土槽内への遮水材の充填状況を確認するため、模型土層内に30cm高さの海水を満ちし、トレミー管を用いて所定の試料高さまで打設して作製した。遮水材打設後、模型を遠心模型実験装置に搭載し、水頭差を25cmに設定した後、遠心加速度20Gで24時間の連続運転を行った。なお、遠心場における相

似則により、換算水頭差は5m相当となる。実験では、下流側タンクの水位高さを計測し、遮水壁からの透水量の経時変化を把握した。

3.3 実験結果

3.3.1 自重圧密実験 Fig. 11に、遠心実験Case 1, 2より得られた自重圧密沈下量の経時変化を示す。図中には、双曲線法により求めた最終沈下量を併せて示した。粘性土系遮水材の自重沈下は、遠心载荷直後から徐々に生じ始め、24時間载荷後（実験終了時）においても継続している。一方、アクアソイル-F（砂質土系遮水材）

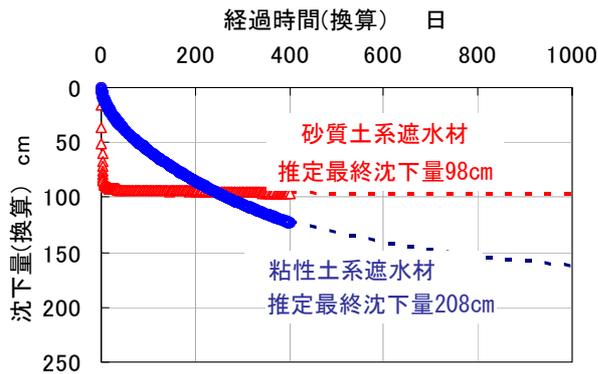


Fig. 11 モールド模型の自重圧密沈下(Case 1, 2)
Settlement Curve of Self Weight Consolidation Tests

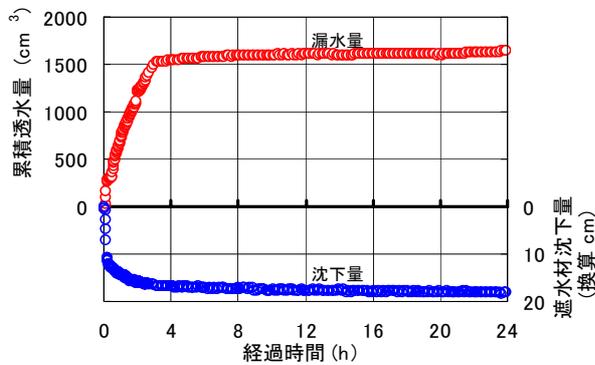


Fig. 12 遮水壁モデルの透水量と遮水材沈下
Permeability of Barrier System and Settlement of
Barrier Materials

では遠心载荷直後に沈下は大きく生じるものの、実験初期段階で収束している。アクアソイルーFは、粘性土系遮水材に比べ最終沈下量は約半分程度、初期の沈下挙動は施工期間中に大半が含まれると考えられることから、実施工を考慮した場合には、残留沈下は小さく、長期沈下特性は非常に優れていると考えられる。

3.3.2 遮水壁遮水性能実験 Photo 4は、遮水壁模型土槽への遮水材の充填状況である。遮水壁の模型は複雑な形状であったにも係わらず、施工性ならびに遮水材の充填性ともに極めて良好であった。

Fig. 12に下流側で計測した透水量と経過時間の関係を示す。初期段階では、遮水材の自重圧密に伴う排水も加わり、大きな排水量が計測されているが、実験開始後3時間経過以降では、ほぼ安定して定常状態となっている。定常状態における透水量は、 $2.3 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{s}$ であった。

3.3.3 数値解析による遮水性実験結果の考察 Fig. 13に示す108cm間隔の鋼管矢板の継手部遮水構造に関する解析モデルをFig. 14のようにモデル化した。すなわち、鋼材は全て不透水とし、継手部に生じる隙間のみ浸透できるものと仮定し、充填遮水材料のみを解析対象とした。

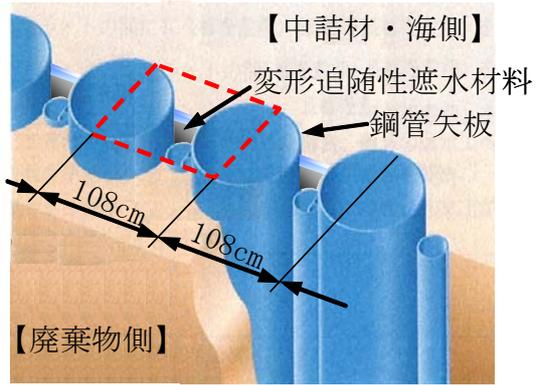


Fig. 13 遮水壁の解析範囲
Barrier System and Numerical Analysis Model

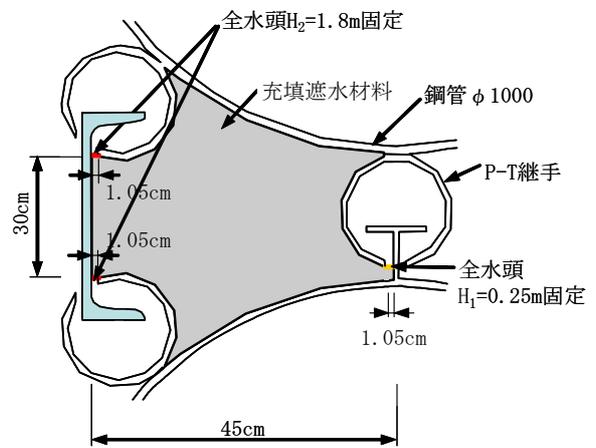


Fig. 14 遮水壁の解析モデル
Simulation Model

なお、平面形状は実遮水構造と同じとしている。解析は平面二次元有限要素の定常浸透流解析とし、要素分割は節点数2762、要素数2749である。

流入および流出境界における水頭は、潮位差の例を参考にFig. 14に示すように流入境界部で $H_1=1.8\text{m}$ 、流出境界部で $H_2=0.25\text{m}$ 、すなわち全水頭差 $\Delta H=1.8-0.25=1.55\text{m}$ とした。なお、奥行きは単位高さである。

地盤の透水係数を一定とした解析条件では、解析で得られた浸透量は、全水頭差や遮水材料透水係数に比例する関係と考えられることから、解析結果の遮水材料透水係数と浸透量の関係を遠心力模型実験条件、すなわち全水頭差25cm、遮水壁模型高さ30cm、遠心加速度20Gに変換してグラフ化した結果をFig. 15に示す。遠心力模型実験結果の平均透水量は、 $2.3 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{s}$ であったため、これに対応する遮水材料透水係数は $k=7.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ となる。充填遮水材料に要求される品質として十分と考えられる。

最終処分場の構造基準を定めている、改正命令³⁾および海面処分場の技術マニュアル⁴⁾では、遮水材の構造として厚さ0.5m以上かつ透水係数が 10^{-8}cm/s 以下の連続壁が不透水性地層まで設けられていること、と定められている。

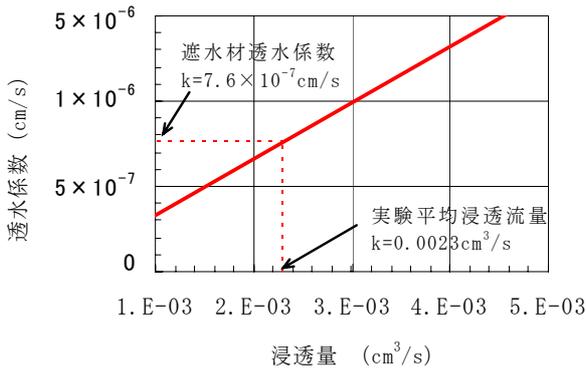


Fig. 15 透水量と遮水材の透水係数の関係
Quantity of Seepage and
Coefficient of Permeability

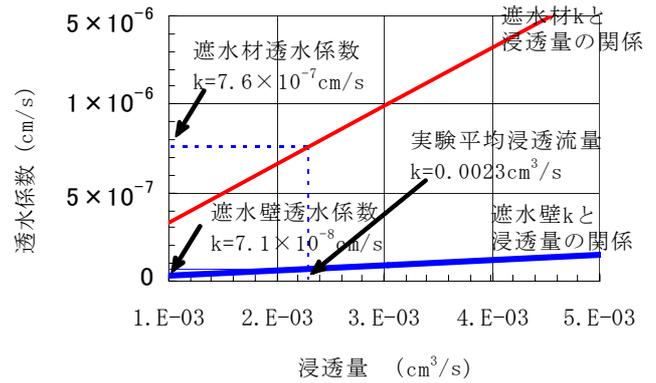


Fig. 17 透水量と換算遮水材透水係数
Quantity of Seepage and
Conversed Coefficient of Permeability

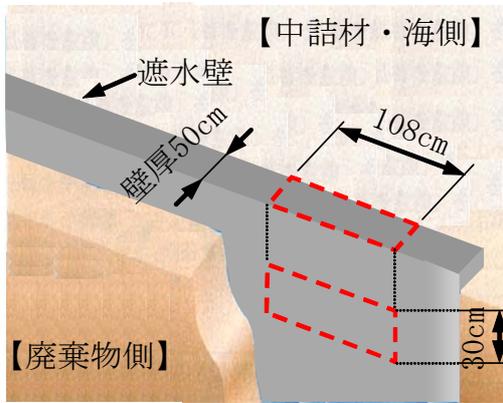


Fig. 16 一様厚さの遮水構造
Barrier System with Same Thickness Wall

そのため、鉛直遮水壁全体の遮水能力に換算して確認した。

Fig. 17には、解析結果に基づき、遮水壁全体の透水係数（壁厚50cm換算）と透水量の関係を図中に太線で示した。遠心実験の浸透流シミュレーション解析結果（壁厚45cm×横108cmの鉛直遮水壁の浸透量）を、一様厚さの遮水構造の浸透量（壁厚50cm×水平延長108cmの均質な遮水壁の浸透量）に換算すると、遮水壁の平均透水係数は $k = 7.1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ となり、前述の 10^{-8}cm/s 以下とする遮水壁の構造基準で規定された透水係数より小さく、十分な遮水性能を有しているといえる。

4. まとめ

耐海水性土質系遮水材の自重による圧密沈下特性ならびに遮水性能を確認することを目的として遠心模型実験を行った。以下に結果を述べる。①砂質土系遮水材の沈下は初期の沈下がほとんどであり、長期沈下特性に優れていると考えられる。②遮水壁模型土槽を用いた砂質土系遮水材打設は、施工性・充填性ともに良好であった。③遠心実験結果より得られた透水量より推定される遮水材の透水係数は $k = 7.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ であり、十分な遮水性能を有することが確認できた。

参考文献

- 1) 塩田, 他: 管理型海面処分場の土質系遮水材「アクアソイル-F」の開発（その1）— 遮水材の耐海水性, 透水係数などの基本物性 —, 大林組技術研究所報, No. 70, (2006)
- 2) 遠心模型実験装置の活用事例, 大林組技術研究所報, No. 66, (2003)
- 3) 総理府・厚生省令: 一般廃棄物の最終処分及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令, (1988)
- 4) (財) 港湾空間高度化センター: 管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル, (2000)