

管理型海面処分場の土質系遮水材「アクアソイルーF」の開発

— 遮水材の耐海水性、透水係数などの基本物性 —

塩田耕三 久保博
甚野智子 石田道彦
(本社土木技術本部)

Development of Hydraulic Cutoff Material by Geotechnical Application of “AQUASOIL-F”

— Basic Physical Properties of Hydraulic Cutoff Material —

Kozo Shiota Hiroshi Kubo
Tomoko Jinno Michihiko Ishida

Abstract

It is very important to ensure the low permeability of the joint section of steel pipe sheet pile for sea area waste disposal. As usual, asphalt and clay are used as filling material for the joint, but they have several problems concerning construction, long-term durability, settlement and so on. The new inorganic sandy soil material “AQUASOIL-F” had been developed, which excels in filling performance, low permeability, deformation flexibility, salt resistance, bacteria resistance, UV light resistance and economical efficiency. This is a mixture of large amount of sand and salt-tolerant bentonite with seawater. The lower permeability of the whole joint was observed by applying small load on the filling material, since the material adhered tightly to the inner surface of the joint.

概要

海面における管理型埋立処分場を建設する際に、鉛直護岸の鋼管矢板継手部の遮水性を確保することは極めて重要である。この継手部に用いる遮水用充填材として、アスファルト系や粘土系があるが、それぞれ高温施工、長期耐久性、大きな沈下などの課題を抱えている。その課題となる充填性・遮水性・変形追随性・耐海水性・耐微生物性・耐紫外線性・経済性などに優れた無機系の砂質土系遮水材「アクアソイルーF」を開発した。アクアソイルーFは、比較的多量の砂とベントナイトを海水練りするものである。アクアソイルーFは、耐塩性の高いベントナイトを用いることによって、密度が大きく、かつ流動性に富み充填性に優れ、高い遮水性能を持った性状を有する。また、鋼管矢板継手部に充填された砂質土系遮水材は、わずかな上載荷重をかけることによって容器内壁面との密着性が良好になり、境界面の通水を抑制し、継手部全体としての遮水機能が向上することを確認した。

1. はじめに

廃棄物最終処分場は、立地場所から、内陸埋立地と海面埋立地に分類される。海面埋立処分場においては、港湾管理者等によって港湾活動や周辺の土地利用との整合を図りつつ、埋立護岸の整備が行われている。平成12年には「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル」が策定されている。

海面処分場は、自然堆積粘土地盤を底面の遮水層として、護岸等に配置される側面遮水工との組み合わせによって建設される。側面遮水としては、鋼管矢板を利用した鉛直遮水工が一般的で、鋼管自体は不透水であるため、鋼管継手部の遮水性能が重要になる。継手部の代表的な構造は、Fig.1 に示すとおり、二重構造として鋼管P-T継手部とそ

のバックアップ機能として継手部背面のP-C継手部からなる。この構造では、継手部背面に充填される材料の遮水性能が、海面処分場全体の遮水性能に大きく影響する。

鋼管矢板部は、波浪や潮位変動などによる力を受け、変形を生じるので、継手部に充填される材料には変形追随性の機能も要求される。また、海水にさらされるため、耐海水性も重要となる。

そこで、従来の充填遮水材料のアスファルト系や粘土系があるが、それらの問題点を改善し、海面処分場で安定した遮水性を有し、鋼管矢板の変形にも追随できる、耐海水性の砂質土系変形追随遮水材料「アクアソイルーF」を開発した。その材料の特性と配合設計に関する検討経緯と、その遮水材の低透水性、長期安定性などの物理化学的な基本物性について以下に示す。

2. 「アクアソイルーF」の構成材料

2.1 構成材料

アクアソイルーFは、Fig. 2 のように「砂」と「ベントナイト」、「海水」で構成される。

アクアソイルーFの特徴の一つは、砂を比較的大量に使用し、以下のような砂の性質を活用した遮水材である。

- ・砂は粒子としては非常に強固で不透水性で、しかも物理・化学的に安定な汎用性のある素材である。
- ・砂粒子相互の間隙は、ベントナイト主体のペーストで埋める。これは、コンクリートにおいて粗骨材の間隙を埋めて強度や遮水性を担っているセメントモルタルの役割に似ている。砂を1,500kg/m³程度配合した場合、砂粒子の相互が接触し、自重沈下や収縮を防止して密度の大きい充填材ができる。
- ・砂は安価であるため、砂が体積率で4~5割を占めるアクアソイルーFは経済的に有利である。
- ・砂粒子自体は不透水であるので、遮水性能はベントナイトの性質に影響される。アクアソイルーFは、海水に対し長期にわたって遮水性能が維持できるベントナイトを使用する。

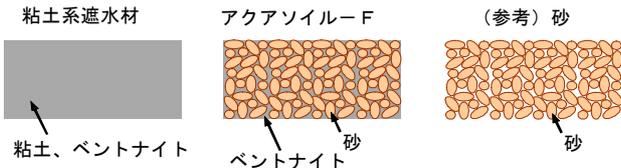


Fig. 2 材料構成の概念図
Structure Image of Sandysoil

2.2 ベントナイトの性能評価

使用したベントナイト性状をTable 1 に示す。3種類のベントナイトについて比較検討した、

- ・ベントナイトA (以下、Be-Aと示す)は、耐海水性ベントナイトである。粒度が小さく、他の2種に比べて電気伝導率(EC)が大きい。また、全有機炭素含有率(TOC)を約1%含むことが特徴である。TOCはポリマーと考えられ、海水などの塩類の影響を少なくする目的で添加されている。
- ・ベントナイトB (Be-B)は、一般的なベントナイトの中でも高膨潤性のものである。
- ・ベントナイトC (Be-C)は土木工事等に使われる最も一般的なベントナイトである。

いずれのベントナイトもpHは9~10で土粒子密度は2.6g/cm³である。主な化学組成は、いずれのベントナイトも、SiO₂が60~70%、Al₂O₃が14~19%、他に、Fe₂O₃、CaO、MgO、Na₂Oなどを含んでいる。いずれのベントナイトも主な鉱物組成は、スメクタイトである。スメクタイトはベントナイトの主成分であり、その含有量の差が膨潤性の違いとなる。その他に、Be-A、Be-Bにはクリスタル石や雲母粘土鉱物が認められ、石英や長石なども少量含まれている。Be-Cは石英も多く認められ、斜プチロル沸石やパイライトがBe-Cのみに含まれている。

Fig. 3にそれぞれのベントナイトの清水および海水によるコンシステンシーとして、液・塑性限界の結果を示す。清水練りでの液性限界は、ベントナイト種によって明瞭な差がある。特にBe-Aは液性限界900%という高い値であった。海水練りでは、いずれのベントナイトも液性限界100~

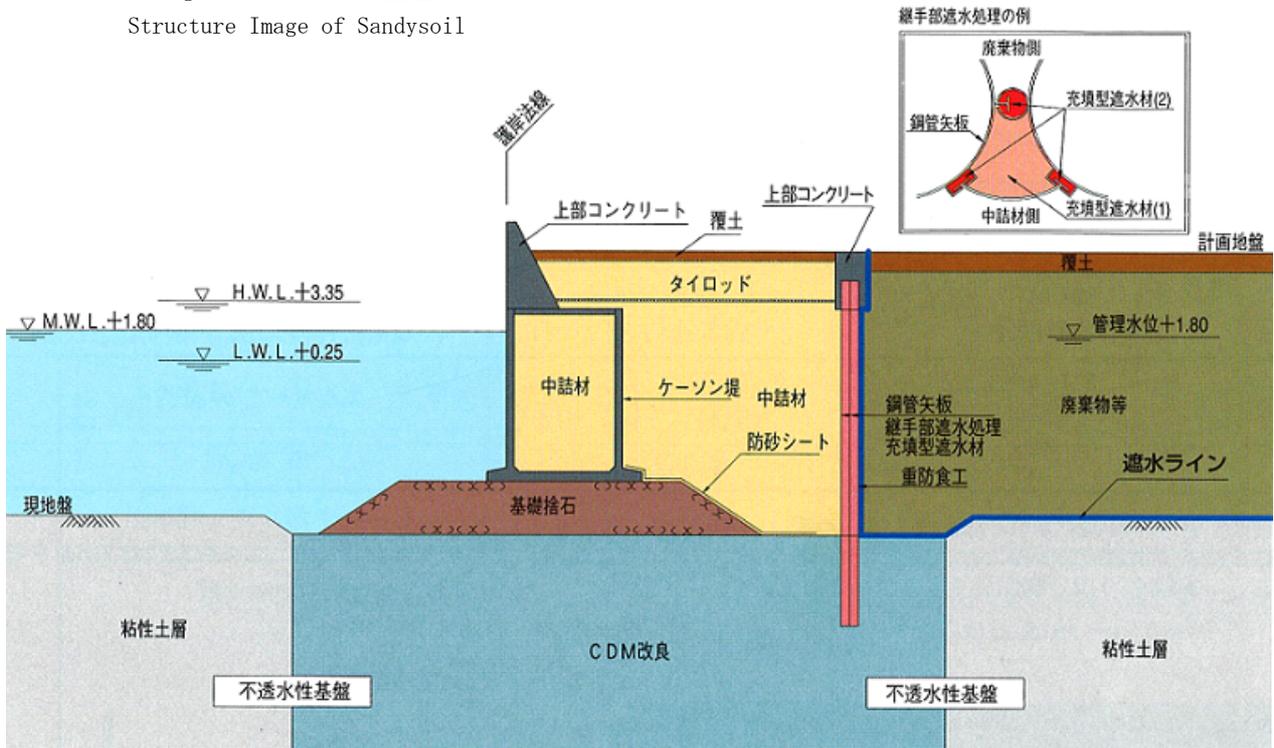


Fig. 1 管理型護岸と遮水断面
Standard Section of Sea Area Waste Disposal

Table 1 ベントナイトの性状
Properties of Bentonite

ベントナイト種	Be-A	Be-B	Be-C
特徴	耐海水性	高膨潤性	一般
含水比(%)	12.0	11.1	10.5
粒度	200メッシュ 80%以上通過	250メッシュ 90%以上通過	250メッシュ 90%以上通過
pH (1:50)	9.77	9.33	10.08
電気伝導率 EC(mS/m、1:50)	63.1	31.9	24.3
土粒子密度(g/cm ³)	2.6	2.6	2.6
膨潤度 (mL/2g、清水中)	25~30	23以上	16以上
TOC(%)	0.96	0.01	-

200%の範囲にあり、その差は小さい。このことは、海水中の塩類の影響と考えられる。塑性限界は、清水より海水での値のほうが、やや小さく差も少なかった。

2.3 砂・海水

使用した主材の粒度分布をFig. 4に示す。主材には、全国で規格が揃うコンクリート用砕砂を用いた。ここでは周南産砕砂を用い、均等係数 $U_c=D_{60}/D_{10}$ は9.3で粒度分布が良い。同図には、参考までに海成粘土とベントナイトの粒度分布も併記した。

混練用の海水中でのベントナイトの実験では人工海水を、遮水材の混練りおよび透水試験では、周南沖の天然海水をそれぞれ用いた。いずれもpH約8、EC 3.3~3.5S/m、比重1.02g/cm³であった。

3. ベントナイトの海水中での挙動

3.1 試験方法

試験方法をFig. 5に示す。混練水1000mL(海水濃度0~100%)にベントナイト30gを家庭用ジューサーミキサーで30秒間混合し、ベントナイト泥水を作った。そのファンネル粘度、減圧脱水量、沈降体積を測定した。ファンネル粘度は500mLのファンネルロートからの流下時間を測定するものである。減圧脱水量は、50mLの泥水を0.066MPaで5分間減圧したときの脱水量である。沈降体積は、泥水500mLを一日静置させたときの沈降体積である。

3.2 粘性・脱水性・沈降性

各ベントナイト泥水の海水濃度の関係をファンネル粘度で検討した結果、いずれのベントナイトでも海水濃度の増大に伴って低下した。Be-Aは清水練りで他の2倍近い値を示し、海水練りでも他の清水練りと同等の22秒前後で維持され、他のベントナイトに比べて高いレベルの粘性になった。

Be-BとBe-Cは海水100%では、約20秒に低下した。このことは、ベントナイト粒子が海水の塩類濃度の上昇によって、膨潤・分散が抑制されたためと思われる。Be-Aのファ

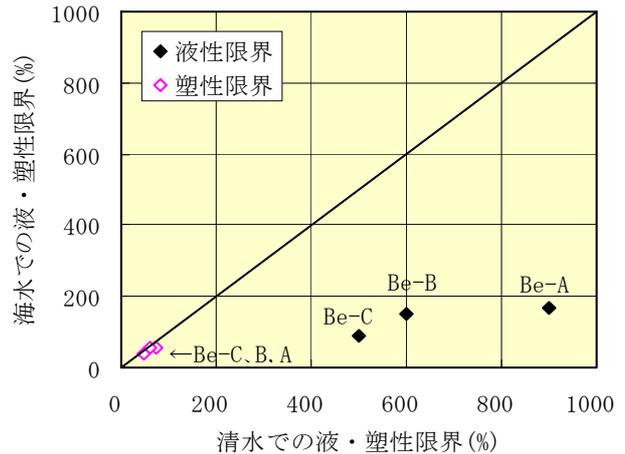


Fig. 3 各ベントナイトの清水および海水によるコンシステンシーの比較
Consistency Comparison of Bentonite using Tap Water and Seawater

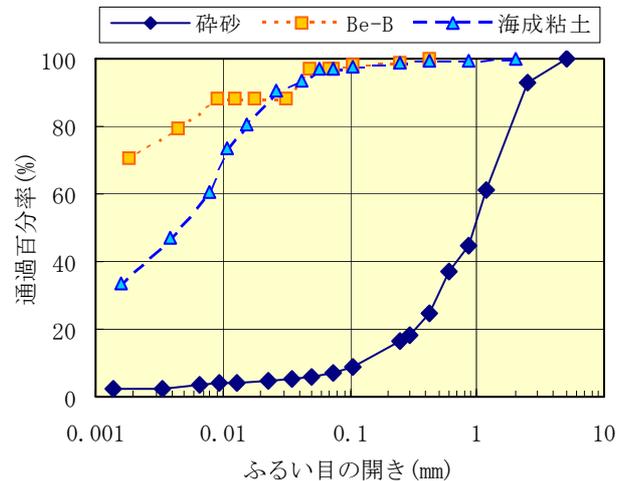


Fig. 4 使用した主材の粒度分布
Grain Size Distribution of the Used Main Material

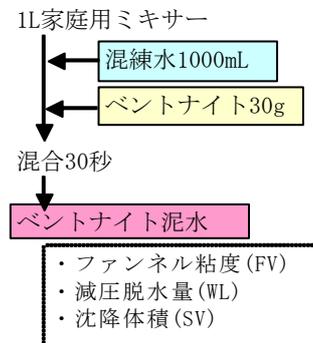


Fig. 5 海水練りベントナイト泥水のコロイド試験方法
Test Methods on the Colloidal Behavior of Bentonite Slurry mixed by Seawater

ンネル粘度が他のベントナイトよりも大きいのは、海水の塩分濃度の影響が少なく、粒子がよく分散するため、極少量のポリマー添加による効果によると考えられる。

各ベントナイト泥水の海水濃度と減圧脱水量の関係を Fig. 6 に示す。清水練りの場合、いずれのベントナイトでも減圧脱水量が0.5~4mLであった。しかし、Be-BおよびBe-Cは海水濃度の増大に伴って泥水が凝集状態になり不良泥膜しか形成できず、遮水機能が著しく低下し脱水量が大きくなる。減圧脱水量が小さいほど、泥水中のベントナイトはよく分散し、ろ紙上に低透水性の泥膜を形成し遮水される。Be-Aは海水100%でも良好な泥膜を形成し、遮水機能を十分に維持できる。Be-AとBe-BおよびBe-Cの大きな差異は、ポリマーの添加の有無である。

各ベントナイト泥水の海水濃度と沈降体積の結果を Photo 2 に示す。Be-BおよびBe-Cは、海水濃度の増大とともに沈降体積が減少し凝集状態になった。特にBe-Cは、海水濃度10%でも凝集し、40~100%では完全に凝集状態であった。Be-Bは、Be-Cよりは沈降体積が大きく、Be-Cより凝集に対する抵抗性がある。Be-Aは海水濃度が増大しても分散状態を維持していた。このことから、海水条件下で遮水材に用いるにはBe-Aが最適と判断される。

4. 海水練り遮水材の配合と性能

4.1 試験方法

砂質土系遮水材料として、砂(砕砂)と粘土(ベントナイト)と現地天然海水で構成し、ベントナイトは、前述の3種類を採用した。具体的配合と諸性状をTable 2 に示す。ベントナイトの3種について、混合量を70~300kg/m³とした。その配合の遮水材料の流動性、ブリーディング率、含水比、密度、透水試験等を比較検討した。

流動性については、水中での充填性を高めるために密度を大きくする目的で、加水量を控ええJHシリンダーフロー(Φ8×h8cm)で、練り混ぜ直後の計測値で10.5~12.5cm(ポンプ圧送の基準:10~16cm)で充填した。

動水勾配は、4(現地での平均潮位での水頭差)~30(変水位透水試験の上限値³⁾)で透水試験を行った。



Photo 1 減圧脱水試験装置
Vacuum Dehydration Test

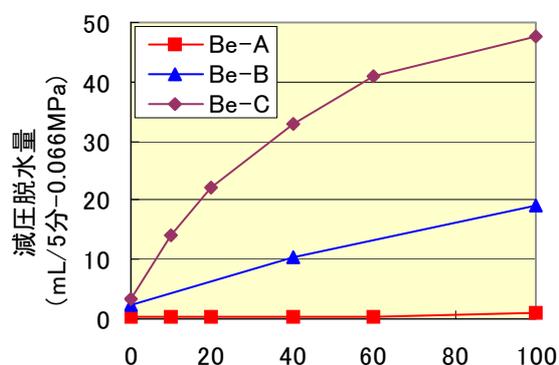


Fig. 6 各ベントナイト泥水の海水濃度と減圧脱水量の関係
Relation between Density of Seawater and Amount of Dehydration of Bentonite Slurry

4.2 最適配合の遮水材料の各種性状

各種配合毎の諸性状をTable 2 に示す。ブリーディング率は、Be-Aでは、ほとんど確認できない。Be-B, Be-Cは、添加量が70kg/m³では水を抱えきれず2~3%程度分離してくる。230kg/m³を超えると、ブリーディング水もほとんど無くなる。ただし、ベントナイト量を増やすと同じ流動性を得るのに大量の水を必要とし、密度はおのずと下がり、充填性が悪くなる。

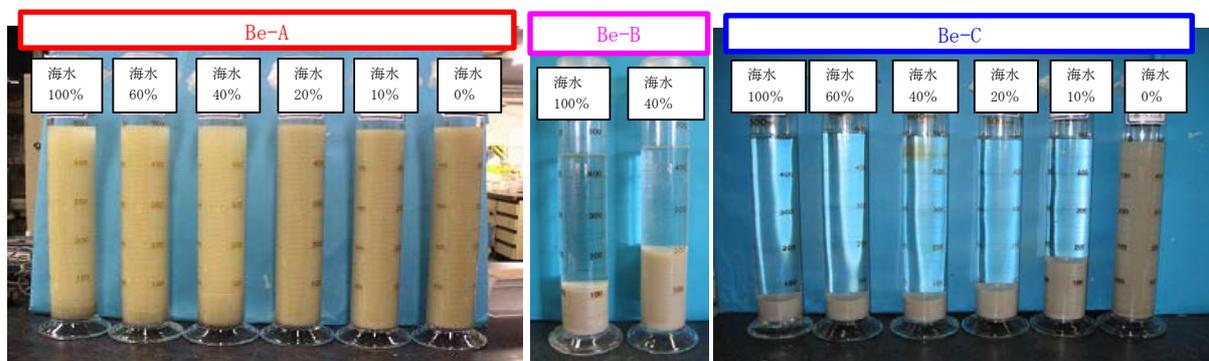


Photo 2 海水濃度による各ベントナイト泥水の分散・凝集状態(1日後)
Dispersion and Aggregation Behavior of Bentonite Slurries under Different Concentration

含水比・湿潤密度は、Be-A の場合、最も密度が高く含水比30%、湿潤密度2.0程度で流動性・遮水性を得る最適配合となる。Be-Bでは、ベントナイトの添加量を増やすことで密度が2.0から1.6にまで下がる。Be-Cでは、密度をBe-Bとほぼ同じにしても遮水基準値を満たさない。

4.3 透水試験

試験結果をTable 2 とFig. 7~10に示す。上載圧を加えない状態 (P=0kN/m²) の場合、ベントナイト70kg/m³の配合では耐海水性のBe-Aのみが基準値の1×10⁻⁶cm/sec以下²⁾を満たし3~5×10⁻⁷cm/secとなった。Be-BとBe-Cは、浸透圧での搾り出しに似た現象による遮水材の体積収縮¹⁾が、Photo 3 に示すように側壁との隙間に界面透水を発生させ、透水途中で急激に遮水性が損なわれた。

浸透圧による体積収縮が生じにくい状況を想定して、水中で0.5m厚さの土被り圧を想定し、5kN/m²の上載圧をかけると、Be-Bは150kg/m³にしたとき基準値を満たす。最も廉価な膨潤性の低いBe-Cでは、量を150kg/m³とし、上載圧を2倍の10kN/m²にしても基準値を満足しない。

Fig. 7 は、それぞれのベントナイトで最適な添加量として、Be-A, Be-B, Be-Cをそれぞれ70, 150, 150kg/m³とし、動水勾配を30で通水した。土中の間隙の50%に相当する部分が自由水として透水に寄与すると想定し、通水回数を横軸に整理した。透水開始から徐々に透水性が低下し、0.5~1.0回の海水の交換で、遮水性が損なわれるもの(Be-B, Be-C)と、そうでないもの(Be-A)に分れた。

上述の遮水性が損なわれたBe-Bについて、ベントナイト量を増やすことで、界面透水を防止できるかどうか調べた。Fig. 8 から、添加量に関係なくほとんど0.5回程度の海水の交換で遮水性が損なわれることが分かった。

Be-Bに水中での土被りを想定して、0, 5, 10, 15kN/m²の上載荷重を載せて現地で想定される動水勾配7~4で透水した結果をFig. 9に示す。5kN/m²の上載圧で良好な値を示し、それ以上の上載圧による差は見受けられない。この安定した値(3×10⁻⁷cm/sec)がBe-Bの真の値と思われる。

また、Be-Bの上載圧(5kN/m²)を一定にし、ベントナイトの添加量を70, 120, 150, 180, 230, 300kg/m³に変化させ、動水勾配7~4で試験した結果、添加量120kg/m³で基準値(10⁻⁶cm/sec)前後となった。現地では、安全を考慮して150kg/m³程度の添加が適当と思われる。それ以上の添加による差はほとんど認められない。

Fig. 10は、Be-Aの上載圧無しの長期にわたる透水試験結果である。70~85kg/m³の添加で極めて良好で安定した遮水性を示すことが判明した。現状の標準断面で解析した結果、5×10⁻⁷cm/secの透水係数で、間隙水が1回入れ替わ



Photo 3 界面透水状況
Boundary Water Route



Photo 4 上載圧透水試験
Permeability Test
under Loading

Table 2 砂質土系土質系遮水材の配合と諸性状
Characteristics of Sandysoil added Bentonite under Loading

略号	上載圧の有無 (kN/m ²)	遮水材料 1 m ³ 当たりの配合			遮水材量の性状(透水係数は概略地)					
		砂 (kg)	ベントナ イト (kg)	海水 (L)	流動性 JH7 _{ロー} 値 (cm)	ブリーディング 率 (%)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	初期透水 係数 (cm/sec)	後期透水 係数 (cm/sec)
Be-A-70	0	1436	70	440	11.6	0	29.2	1.95	2×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷
Be-A-85	0	1380	85	455	12.4	0	31.1	1.92	2×10 ⁻⁷	5×10 ⁻⁷
Be-B-70	0	1517	70	410	10.5	2.3	25.8	2.00	6×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁵
Be-B-70	5	1517	70	410	10.5	2.3	25.8	2.00	5×10 ⁻⁶	6×10 ⁻⁶
Be-B-120	0	1355	120	450	11.9	0.8	30.5	1.93	4×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶
Be-B-120	5	1355	120	450	11.9	0.8	30.5	1.93	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶
Be-B-150	0	1269	150	470	12.2	1.3	33.1	1.89	8×10 ⁻⁷	9×10 ⁻⁶
Be-B-150	5	1269	150	470	12.2	1.3	33.1	1.89	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷
Be-B-150	10	1269	150	470	12.2	1.3	33.1	1.89	3×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁷
Be-B-150	15	1269	150	470	12.2	1.3	33.1	1.89	3×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁷
Be-B-180	0	1156	180	500	12.5	0.8	37.4	1.84	6×10 ⁻⁷	9×10 ⁻⁶
Be-B-180	5	1156	180	500	12.5	0.8	37.4	1.84	4×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷
Be-B-230	0	940	230	560	12.1	0.3	47.9	1.73	4×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁵
Be-B-230	5	940	230	560	12.1	0.3	47.9	1.73	3×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁷
Be-B-300	0	675	300	630	11.7	0	64.6	1.61	3×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁶
Be-B-300	5	675	300	630	11.7	0	64.6	1.61	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁷
Be-C-150	0	1431	150	410	10.7	2.6	25.9	1.99	3×10 ⁻⁶	9×10 ⁻⁶
Be-C-150	10	1431	150	410	10.7	2.6	25.9	1.99	4×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁶

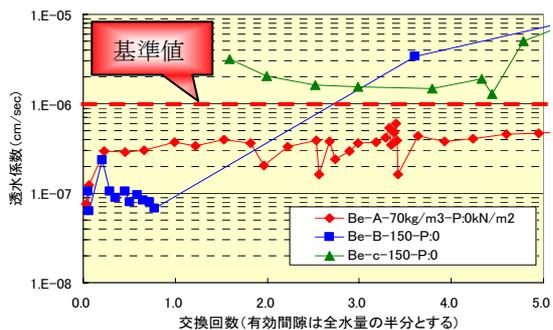


Fig. 7 透水係数 (i=30) ~ベントナイト種(無載荷)
Permeability of Sandysoil added Bentonite(No Load)

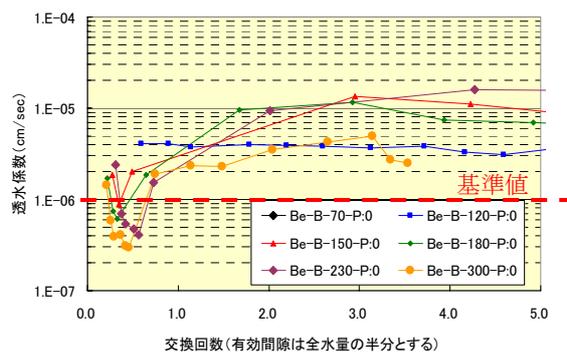


Fig. 8 砂+(Be-B)の配合別透水係数 (無載荷)
Permeability of Sandysoil added Bentonite-B(No Load)

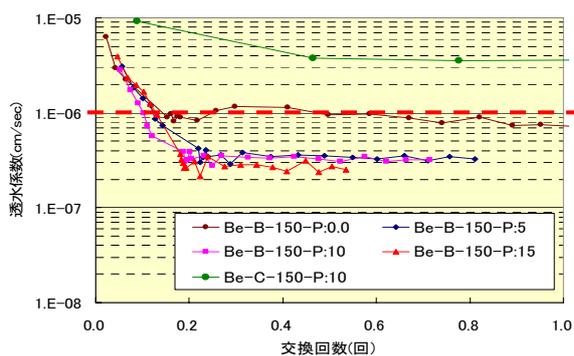


Fig. 9 上載荷重条件下の通水回数と透水係数
Permeability of Sandysoil
added Bentonite under Loading

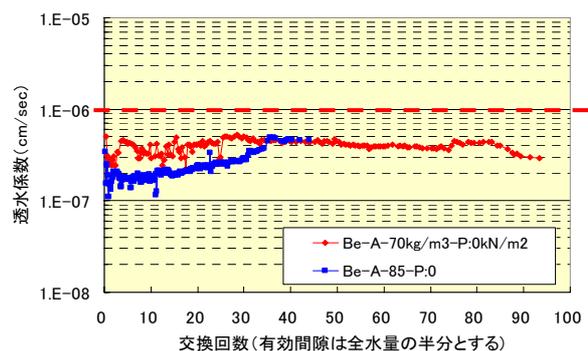


Fig. 10 長期透水 (i=30) による透水係数の変化
Long-Period Permeability of Sandysoil
added Bentonite-A

るのに5年程度かかると試算されている⁶⁾。当試験では90回以上連続して通水してもその遮水性が維持されている。一年間の透水試験結果での計算ではあるが、90回は450年に相当し、長期における高遮水性能が期待できる。

5. まとめ

管理型海面埋立処分場の遮水材として、今回開発した砂を主材とした土質系遮水材「アクアソイル-F」は、以下のような特徴のあることがわかった。

- 1) 砂を骨格とすることで、流動性を持ちながら遮水材の湿潤密度が大きく1.8~2.0g/cm³程度になり、粘土系の場合の1.3~1.6g/cm³に比べ水中重量が大きく密実に充填できると共に、沈下も少なくなる。
- 2) 海水による通水がベントナイトの凝集を引き起こし遮水性能に変化をもたらすことが判明した。このため、海水練りによって海水との接触や浸透による物性変化を事前に促し、所定の性能(流動性・ブリーディング抵抗性・遮水性)を確保することが重要である。
- 3) 砂質土の隙間を埋めるベントナイトとしては、耐海水性ベントナイト(Be-A)が海水練りでも高い膨潤性を維持し、遮水材として重要な遮水性能を発揮できる。配合は70~85kg/m³で基準値 1×10^{-6} cm/sec以下を極めて長期に亘り維持する。一方、高膨潤ベントナイト(Be-B)は、海水条件下でも上載荷重(5kN/m²)程度をかけ、添加量を150kg/m³にすると基準値を満たすことが判明し

た。また、膨潤性の低い一般ベントナイト(Be-C)を用いた海水練りの遮水材は塩類の影響を受け、添加量を150kg/m³にし、上載荷重を10kN/m²にしても遮水基準を満たさない。

参考文献

- 1) 高田直俊, 他:浸透圧密試験について, 第29回土質工学研究発表会, pp355-356, 1994.
- 2) 「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル」運輸省港湾局, 2000. 11.
- 3) Daisaku Matsushita and Masashi Kamon: Effects of Non-Prehydration and Bentonite Content on the Hydraulic Barrier Performance of Soil-Bentonite Mixture Cut-Off Wall, Geo-Environmental Engineering 2006. 4.
- 4) 塩田耕三, 他: 海面埋立処分場の鉛直遮水継手部充填材の開発(その1)耐海水性土質系遮水材の基本物性, 第61回土木学会年次学術講演会, 2006. 9.
- 5) 鳥井原誠, 他: 4)と同題(その2)耐海水性土質系遮水材の圧密特性と遮水性能, 4)と同講演会, 2006. 9.
- 6) 西田憲司, 他: 4)と同題(その3)耐海水性土質系遮水材の施工性, 4)と同講演会, 2006. 9.
- 7) 甚野智子, 他: ベントナイトを用いた土質系遮水材における塩分濃度の影響に関する研究, 第50回粘土科学討論会, 2006. 9.