

エタノールを利用した高密度ベントナイトスラリー（その1）

— 止水壁および止水充填モデル試験 —

浅田 素之 小川 恵道 上村 一義 石川 明 堀内 澄夫
(技術研究所) (技術研究所) (土木東京支店) (技術研究所) (技術研究所)

High Density Bentonite Slurry using Ethanol (No.1)

— Model Test of Cutoff Walls and Grouting for Seepage Barriers —

by Motoyuki Asada, Shigemichi Ogawa, Kazuyoshi Kamimura, Akira Ishikawa and Sumio Horiuchi

Abstract

Bentonites are being used in a wide range of applications in the geotechnical and environmental engineering, such as in drilling slurries grouts, clay liners and back-fill & buffer material for radioactive waste containment. To fill the void space between the bentonite blocks or between the rocks, and to mix the bentonite with the soil in situ, highly dense bentonite slurry are considered to be one of the suitable material for maintaining sufficient impermeability of all the containment systems. To increase the bentonite content, the utilization of hydrophilic organic solvent was studied. In this paper, the high applicability of ethanol bentonite slurry as seepage barriers is reported based on a series of lab test results: low permeability, smooth groutability, and sealing ability with the substitution of ethanol to water. The high potential of the ethanol/bentonite slurry for grouting was confirmed.

概 要

ベントナイトは遮水材料として掘削泥水・廃棄物処分場のクレーライナー等土木分野で広く用いられており、放射性廃棄物地層処分システムの緩衝材としての使用が検討されている。土との原位置混合攪拌、空隙充填、岩盤ゆるみ域の止水等において、スラリー状の高密度ベントナイトが要望されていた。我々は、エタノールを用いることにより 500kg/m^3 以上の高密度ベントナイトスラリーとする方法を考案した。本論文では、エタノールとベントナイトを混合した材料の特性を明らかにし、止水壁あるいは止水充填材料としての利用可能性を探ることを目的とした。エタノール/ベントナイトスラリーは低透水性、良好な注入性、水との接触・膨潤による自己修復性等の特徴を有しており、遮水材料として優れていることを確認した。

§ 1. はじめに

ベントナイトは粘性が強く、膨潤性、陽イオン交換容量が大きい¹⁾ため、止水材料として掘削泥水²⁾・廃棄物処分場のクレーライナー³⁾⁴⁾等土木分野で広く用いられており、放射性廃棄物地層処分システムの緩衝材としての使用が検討されている⁵⁾。クレーライナーでの土との混合材料、緩衝材での締め固めブロック材料には、粉末ベントナイトを利用する。一方、空隙の充填等にはスラリー状にして施工しなければならないが、水でベントナイトを高濃度にスラリー化することは困難であった。

我が国では、鉛直止水壁(Vertical Cutoff Walls)構築に、SMW 工法、TRD 工法等に代表される CB (セメントベントナイト) スラリーを用いた原位置攪拌工法が多用されている。一方、米国では、汚染地盤の遮断を目的

として、泥水掘したトレンチ内に現地発生土とベントナイトを混合した材料を流し込む SB (ソイルベントナイト) 壁の利用が盛んである⁶⁾。CB を用いた鉛直遮水壁の透水係数は SB を用いた場合より大きく⁷⁾、地盤変形への追従性に乏しくクラックが発生しやすい。そのため、CB スラリーの代わりにベントナイトスラリーを用いて十分な量のベントナイトを原位置混合攪拌できれば、地盤変形への追従性の高い、遮水性能に優れた(透水係数で $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下)鉛直止水壁を構築することができる。止水壁の透水係数を $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下にするためには、土 1m^3 に対してベントナイトを約 70kg 以上添加する必要がある⁸⁾。粉末ベントナイトは原位置混合攪拌に適しないため、ベントナイトをスラリー状にして使用する必要があるが、溶媒として水を用いた場合には土 1m^3 に対してベントナイト 20kg 以上添加するのは難しい。

緩衝材としての利用が見込まれるベントナイトブロックは、粉末ベントナイトを締め固めて高密度とする。施工を進める上でどうしてもブロック同士の間、ブロックと周辺岩盤との間に空隙が空くのは避けられず、空隙はベントナイトが膨潤力することにより塞ぐことを期待している⁹⁾。高密度のベントナイトスラリーはそういった空隙に充填することができ、システム全体の止水性をさらに高めるのに最適な材料と考えられる。

我々はベントナイトスラリーの密度を上げる方法として、水の代わりに有機溶媒を用いる方法を考案した¹⁰⁾。例えばエタノールを用いる場合、 500kg/m^3 以上の高密度ベントナイトスラリーとすることができる。モンモリロナイトはベントナイトの主要成分であり、2:1型層構造を有し、層間に水を取り込んで膨潤力を発揮する。ナトリウム型ベントナイトは自重の4~7倍の水を取り込み、5~8倍に体積が膨張する¹¹⁾。膨潤現象には粘土粒子表面の界面電氣的性質が大きく関わっており、表面電位が高ければ、それだけモンモリロナイトの膨潤量が大きいことがわかっている¹²⁾。スラリー化する際に誘電率の低い溶媒を用いることによって、モンモリロナイトの表面電位を低下させ、膨潤を抑制し、高密度のベントナイトスラリーとすることができる。エタノール等の有機溶媒が水と置換されることによって、ベントナイトは本来の膨潤力を取り戻す。

粘土と有機溶媒を混合した材料の力学的検討はSridharanら^{13),14)}が精力的に行っているが、混合材料をスラリーとして使用する例は見あたらない。

本論文では、ポンプ圧送試験、止水壁モデル試験、止水充填材モデル試験を通じて、エタノール/ベントナイトスラリーの施工性、エタノールの周辺地盤への影響、スラリーを用いた遮水構造物の性能等を明らかにすることを目的とした。ベントナイトスラリーの高密度化には、エタノール、メタノール、アセトン等多くの有機溶媒が有効であるが、今回は、微生物分解性が高く、地盤環境に与える影響が最も小さいと考えられるエタノールを用いて検討を行った。

§ 2. 実験方法

2.1 使用材料

ベントナイトはクニミネ工業社製クニゲルV1、エタノールは日本合成アルコール社製工業用エタノール95vol%、密度は 0.82g/cm^3 (15°C)である。表-1に、クニゲルV1の物性を示す。スラリーの増量材として豊浦砂を用いた。豊浦砂の平均粒径は0.2mm、土粒子密度は 2.64g/cm^3 である。

2.2 エタノール/ベントナイトスラリー圧送試験

エタノール/ベントナイトスラリーおよびこれに増量材を混合したスラリーを、裏込材や地盤改良材として注入する場合、ポンプによる圧送が不可欠となる。ここでの問題点は、スラリー圧送に必要なポンプの選定と、圧力に見合った配管径の決定である。施工設計を行うために、スラリーの基本的な粘度特性を室内検討によって把握し、さらに実際に配管内を圧送して単位圧送距離あたりの圧力低下を把握しておく必要がある。そこで、スラリーの配合を変えて粘度特性と圧力損失とを実験によって確認し、スラリー圧送設計に反映させることを目的とした。

まず、0、40、60、92.5wt%に濃度を調整したエタノール水溶液とベントナイトを混合し、固液比、あるいはベントナイト乾燥密度と粘度の関係を把握した。

次に、スラリー配合を表-2に示すとおり調整し、圧送試験を行った。配管は3種類(1/2インチ、1インチ、2インチ)の配管径のものを用意し、図-1のとおり8mの管を6本つないで計48mの配管長とした。ポンプ出口、配管8mごとに圧力計を設け、6ヶ所で圧力を測定した。ポンプは、一軸スクリューポンプ(小坂研究所社製)2種(吐出量 $1\text{m}^3/\text{h}$ 、 $10\text{m}^3/\text{h}$)を用いた。最大吐出圧は1MPaであった。

項目	値
水分(%)	7.3
膨潤力(ml/g)	20
pH	10.3
導電率($\mu\text{S/cm}$)	424
比表面積(m^2/g)	16.9
50%粒径(μm)	6.6
土粒子密度(g/cm^3)	2.79
液性限界(%)	370
メチレンブルー吸着量($\text{mmol}/100\text{g}$)	74
陽イオン交換容量($\text{meq}/100\text{g}$)	72.1

表-1 クニゲルV1の物性

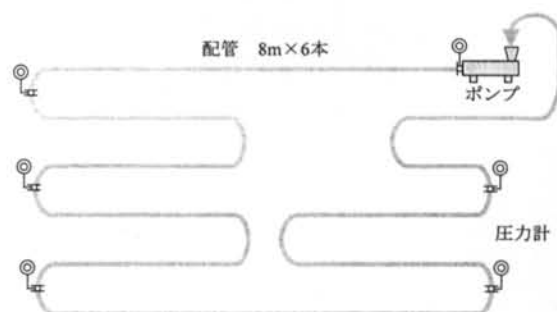


図-1 圧力測定の概要

スラリーの粘度は、圧送性と密接に関連する。粘度に応じて、回転粘度計 2 種 (B 型粘度計 (単一回転円筒型粘度計)、およびペーストコントローラー (共軸二重回転円筒型粘度計))、ファンネル粘度計、P ロート、J14 ロートによってスラリーの粘度を計測した。また、スラリー比重、含水比も併せて計測した。

B 型粘度計については全試料を計測し、ペーストコントローラーについては供回り部分に砂が噛み込んでしまうため、砂を加えない試料にのみ使用した。ファンネル粘度は、日本ベントナイト工業会標準試験方法 (JBAS-108-77) に準拠し、500mL ファンネル粘度計を用いた。排出口が 4.76mm と小さいため、比較的粘度の小さい試料の現場管理用に用いられる。

P ロートは、プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験 (JSCE-F521-1994) に用いられ、排出口が 13mm と大きいので、比較的粘性の高いスラリーの粘性を現場管理するのに便利である。J14 ロートは、PC グラウトの流動性試験方法 (JSCE-F531-1994) であり、排出口が 14mm と大きく、P ロートと同様な用い方ができる。

2.3 20m³ 止水壁モデル土槽施工試験

エタノール/ベントナイトスラリーは、ポンプで圧送するときにはエタノール濃度が高いためベントナイトの膨潤が抑えられている。土とスラリーを原位置混合した場合、地下水とスラリーとが混合することで、エタノール濃度は低下する。それに伴い、ベントナイトはエタノールにより抑えられていた本来の膨潤力を

発揮する。したがって、エタノール/ベントナイトスラリーをソイルベントナイト壁の材料として使用すれば、少ないスラリー注入量でより多くのベントナイトを土と攪拌することができ、エタノール濃度の低下に伴いベントナイトが膨潤して遮水性の高い止水壁を構築することができると考えられる。そこで、エタノールベントナイトスラリーを用いたソイルベントナイト鉛直止水壁の性能、周辺環境への影響を明らかにするために、20m³ の土槽中に鉛直止水壁を構築した。

図-2 にモデル土槽を示す。土槽の寸法は、縦 2m × 横 6m × 高さ 2m で、止水壁厚さを 60cm とした。使用材料は、砂質土として十分洗浄し細粒分を除去した千葉県産の洗浄砂を、現実の地盤を再現するために水として東京都台東区の現場より採取した地下水を、ベントナイトとしてクニゲル VI を用いた。

土槽の製作方法は以下のとおりである。まず、写真-1 のように幅 60cm の止水壁部分を空間として残すために、水槽中央に 2 枚の仕切り板を設けた。仕切り板外側に排水用砂利を厚さ 5cm になるように敷き詰め後、洗浄後の砂を、密度を確認しながら転圧し、高さ 185cm の均質な地盤を作成した。なお、砂地盤中には、間隙水および間隙気体をサンプリングするためのサンプリングチューブを埋めておいた。サンプリングのポイントは、底面より 20cm、70cm、120cm、170cm の高さで、止水壁から 5cm、10cm、20cm、50cm、100cm、180cm (200cm) 離れたところとした。

止水壁の作成方法は以下のとおりである。写真-2 のようにエタノール/ベントナイトスラリーと洗浄砂を所定の割合 (質量比で砂 100、水 24、ベントナイト 10、エタノール 8) でボルテックスミキサーを用いて混合し、混練した材料を仕切中に投入した後、仕切り板を引き抜いて止水壁とした。ベントナイト量は、土の乾燥質量あたり 10% (130kg/m³) となるように調製している。スラリー量は 2.4m³ (約 4t) である。

締め固め後の砂地盤の乾燥密度は 1.628~1.642g/cm³、湿潤密度 2.29g/cm³、土粒子の密度 2.748g/cm³、間隙比

No.	配合(kg/m ³)				エタノール濃度(wt%)	粘度 (mPa·s)
	ベントナイト	エタノール	水	砂		
1-1	136	0	950	0	0.0	860
1-2	112	0	959	0	0.0	93
1-3	97	0	964	0	0.0	35
1-4	129	0	904	129	0.0	870
1-5	118	0	823	353	0.0	970
1-6	108	0	538	541	0.0	1070
2-1	746	596	0	0	92.5	480
2-2	630	630	0	0	92.5	220
3-1	625	438	236	0	60.0	1460
3-2	564	450	244	0	60.0	1290
3-3	512	461	249	0	60.0	260
3-4	509	408	220	255	60.0	1000
3-5	463	372	201	463	60.0	960
3-6	395	316	171	791	60.0	1500
4-1	418	335	438	0	40.0	5050
4-2	349	349	446	0	40.0	980

表-2 圧送試験の配合

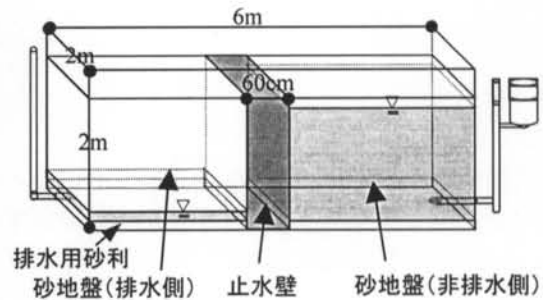


図-2 止水壁モデル土槽



写真-1 仕切り板による止水壁部分の構築



写真-2 ボルテックスミキサーを用いたエタノール/ベントナイトスラリーと砂との混合

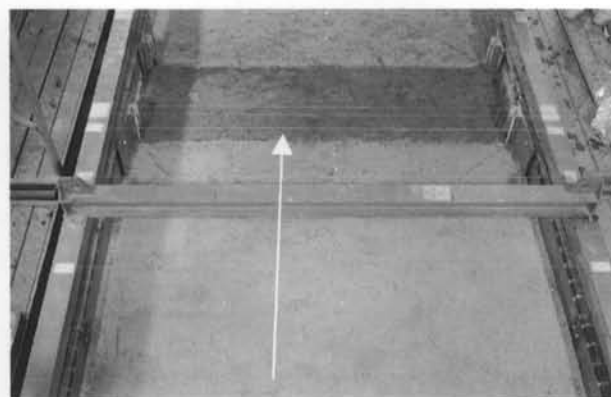


写真-3 止水壁を上から見た様子

0.69、透水係数は $4.0 \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。砂の粒径加積曲線を図-3に示す。止水壁の湿潤密度は 1.80 g/cm^3 、含水比 29.3%、間隙水のエタノール濃度約 20%であった。

止水壁を打設し終わった後、止水壁両側の砂地盤に下部から地下水を浸透させて、最終の水位を 180cm ま

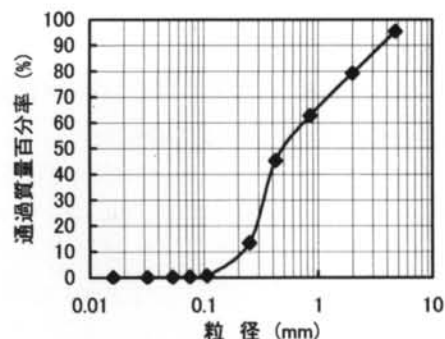


図-3 砂の粒径加積曲線

で上昇させた。止水壁の上部に蒸発防止用のシートを密着させたのち、土槽全体に蓋を掛けた。このままの状態に 12 日静置しながら間隙水をサンプリングして、エタノール濃度分布を測定した。12 日間静置後、排水側 (図-2 の左側) の水を排水し、水位を高さ 20cm まで低下させた。

以降 1 週間ごとに、非排水側では間隙水を、排水側では間隙中の気体をサンプリングして、それぞれに含まれているエタノール濃度を測定した (写真-4)。また、地盤の水平・鉛直変位量を定期的に測定した。間隙水のエタノール濃度分析には、高速液体クロマトグラフを用い、間隙中の気体濃度分析には、検知管を用いた。

3 ヶ月放置後、試料を解体しながら止水壁部分のサンプリングを行った。サンプルの測定項目は、地盤内と止水壁内のエタノールの分布、強度分布、圧密特性、三軸圧縮特性、透水係数である。

2.4 止水充填材モデル試験

エタノール/ベントナイトスラリーの止水充填材としての性能を明らかにするために、地盤内の空隙を模擬した型枠を作成し、スラリーをポンプで注入する試験を実施した。図-4 のとおり、 6 m^3 水槽 (奥行き 1.5m



写真-4 間隙水のサンプリング

×横4m×高さ1m)を4槽(1槽の寸法は奥行き0.75m×横2m×高さ1m)に分割し、それぞれに充填空間を模擬した型枠(内法 奥行き0.4m×横1.6(0.9)m×厚さ0.1~0.2m)を1つずつ置き、水を満した状態でスラリーを充填した。多様な空隙を模擬するため、型枠を0°、30°、60°にそれぞれ傾斜させた。空隙の厚さは10cm、20cmとした。ここに表-3に示す仕様の充填材を水中打設した。スラリーの増量材として豊浦砂を用いた。注入時には、注入圧力を測定したほか、アクリル型枠を通して注入形状を観察した。型枠下部は、けい砂3号に質量比で3%のエポキシ樹脂を混合し固めたポラスストーンをはめ込み、実際と同様に水とスラリーが接するようになった。

打設後水中で1ヶ月放置し、注入試料の形状変化を観察するとともに、透水型枠板に埋設した土圧計によって、充填材の膨潤圧を測定した。打設後28日で試料を解体し、強度分布、密度分布、エタノール濃度、含水比を測定し、水とエタノールの置換によるベントナイトの膨潤性能を調べた。

No	配合 (kg/m ³)				型枠厚 (cm)	型枠角度
	ベントナイト	エタノール	水	砂		
1	564	450	244	0	10	30°
2	564	450	244	0	20	30°
3	564	450	244	0	10	60°
4	564	450	244	0	10	0°
5	746	596	0	0	10	30°
6	463	372	201	463	10	30°
7	395	316	171	791	10	30°
8	625	438	236	0	10	30°

表-3 充填材モデル試験配合

§3. 実験結果

3.1 エタノール/ベントナイトスラリー圧送試験

図-5にアルコール濃度、固液比(L/S)とベントナイトスラリーのペーストコントローラーで測定した粘度の関係を示す。ポンプで圧送可能なスラリー粘度は概ね1000~1500mPa・sの範囲である。水で作液したベントナイトスラリーでは、上記の粘度にするにはL/S=6~7程度にしか固液比を下げる事ができない。一方、40%エタノール水溶液ではL/S=2程度、60%エタノール水溶液でL/S=1程度に下げることができる。60wt%を越えるエタノール水溶液は消防法での危険物になるため、一般的な現場では60wt%以下のエタノール水溶液を用いることとなる。粘度の結果からも、60wt%を下回る濃度では粘度条件を満たす固液比が急激に上がるが、60wt%より濃いエタノール水溶液でも、60wt%のものに比べて固液比を極端に下げることができない。したがって、60wt%エタノール水溶液を用いたスラリーが最も現実的な配合と考える。

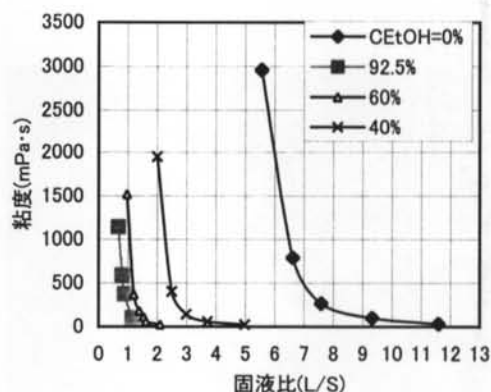


図-5 固液比と粘度の関係

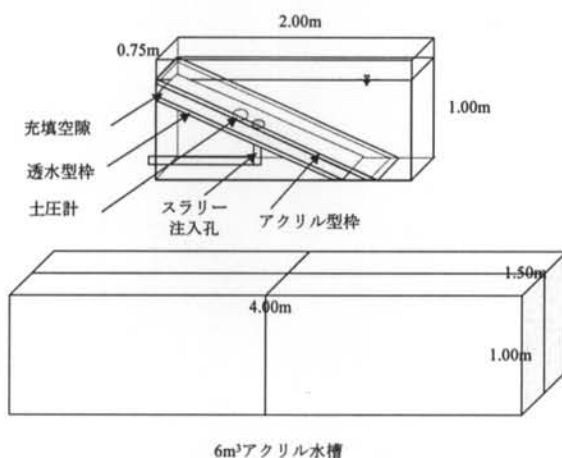


図-4 止水充填材試験の概要

図-6に、アルコール濃度、ベントナイトの乾燥密度とベントナイトスラリーの粘度の関係を示す。水スラリーでは乾燥密度を 0.2g/cm^3 以上に上げることはでき

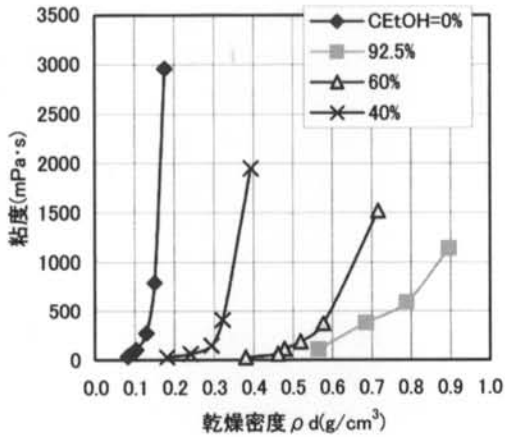


図-6 ベントナイトの乾燥密度と粘度の関係

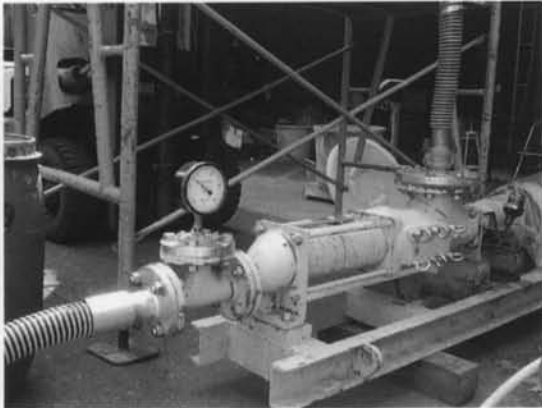


写真-5 圧送試験用ポンプ



写真-6 圧送中のスラリー

きない。エタノール濃度 60wt%では、 $0.6\sim 0.7\text{g/cm}^3$ 、92.5wt%では $0.8\sim 0.95\text{g/cm}^3$ にまで密度を高めることができる。

写真-5、6にポンプ圧送試験の様子を示す。図-7にポンプ圧送試験でのスラリーのレイノルズ数と、圧力損失から計算した管摩擦係数との関係を示す。

円管内壁面の摩擦による圧力損失は、Fanning の式で表される。

$$\Delta p = 4f(\rho u_a^2 / 2)(L/d) \quad (1)$$

ここで、 Δp : 圧力損失(Pa)、 f : 管摩擦係数、 ρ : スラリーの密度(kg/m^3)、 u_a : 管内平均流速(m/s)、 L : 管長(m)、 d : 管の内径(m)

レイノルズ数は、次式で表される。

$$\text{Re} = \rho u_a d / \mu \quad (2)$$

ここで、 μ : 粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

層流条件である $f \times \text{Re} = 16$ の直線に、ほとんどの配合のスラリーが近似できており、エタノールベントナイトスラリー、あるいは砂を増量材としたスラリーであっても、粘度と密度がわかれば圧力損失を推定できる。配管および圧送計画が可能となる。

例えば、管径 2 インチの配管で 200m 圧送した時の圧力損失を 1MPa 以下に制御する場合を考える。この条件を満足するのに、水を用いたスラリーではベントナイト密度を 136kg/m^3 にまでしか上げることができないが、40wt%エタノール水溶液で 418kg/m^3 、60wt%エタノール水溶液で 625kg/m^3 、92.5wt%エタノール水溶液で 746kg/m^3 にすることができる。

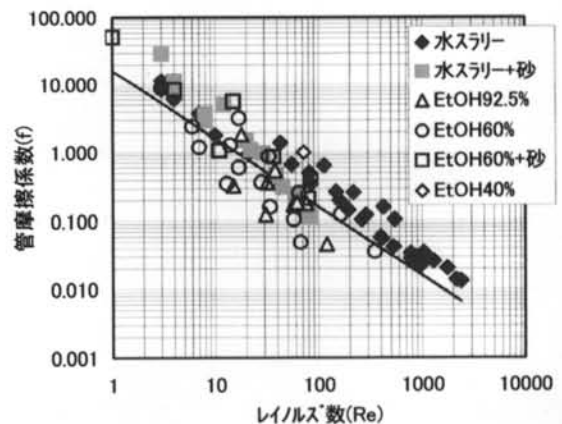


図-7 レイノルズ数と管摩擦係数の関係

3.2 20m³ 止水壁モデル土槽施工試験

3.2.1 アルコール濃度分布

モデル土槽の全景を写真-7に示す。中心の黒い部分が幅 60cm の止水壁で間隙中のエタノール濃度は約 20% (200,000mg/L) である。止水壁の両側には黒ゴムパッキン、その外側に砂地盤が見える。砂地盤は、右側が非排水側、左側が排水側である。

12日目までは、壁の右側、左側とも地下水で飽和されており、エタノールの比重が水より小さいため、壁両側の水面近くに上昇、拡散した。12日目の段階で左側の砂地盤の水を抜き、水位を底板近くまで下げた。そのため、水を抜いた後は主に右側（非排水側）に止水壁からのエタノールが上昇、拡散した。排水側には、水位差により押し出されたため、底面近くのエタノール濃度が高くなっていた。また、排水側の止水壁近くの空気中にも蒸発したエタノールが観察された。



写真-7 モデル土槽の全景

中央の白い部分が止水壁、右側が非排水側、左側が排水側の砂地盤

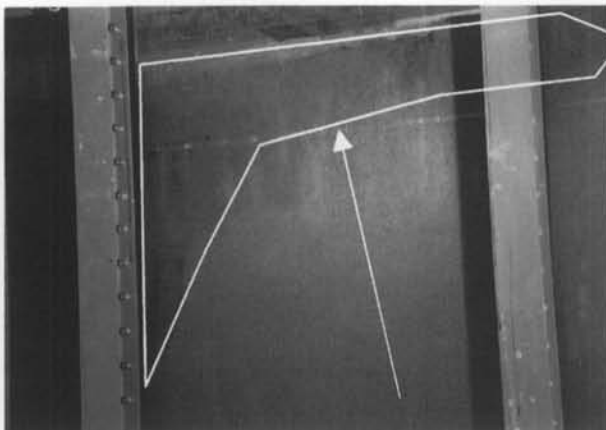


写真-8 微生物によるエタノールの分解

47日目にはエタノール拡散域が最大となり、止水壁から 1.5m離れた地下水面にまで拡散した。その後は、エタノール拡散域の減少が見られ、3ヶ月目には、右側（非排水側）水面付近のエタノールの濃度も最大時より低くなっていた。地下水には現場より採取した水を使っており、写真-8のように微生物活性が高いため分解されたと考えられる。

この試験結果より、エタノール濃度の拡散は最大でも止水壁から 1.5m の範囲に限定されること、拡散したエタノールは土中微生物により徐々に分解されること、排水側のガス中にもエタノールが蒸発・拡散することが判明した。エタノール拡散の数値解析による予測手法については、その2で議論する。

3.2.2 地盤面の沈下と変位

図-8、9に、止水壁打設直後、19日目、解体直前（3ヶ月目）での土槽を上から見たときの地盤沈下量、および変位量の変化を示す。混合土を仕切り板に投入し引き抜いたときに、壁近傍の砂地盤が壁方向に10mm程度変位し、10mm程度沈下した。図-8のように地盤面には円弧滑りが観察された。

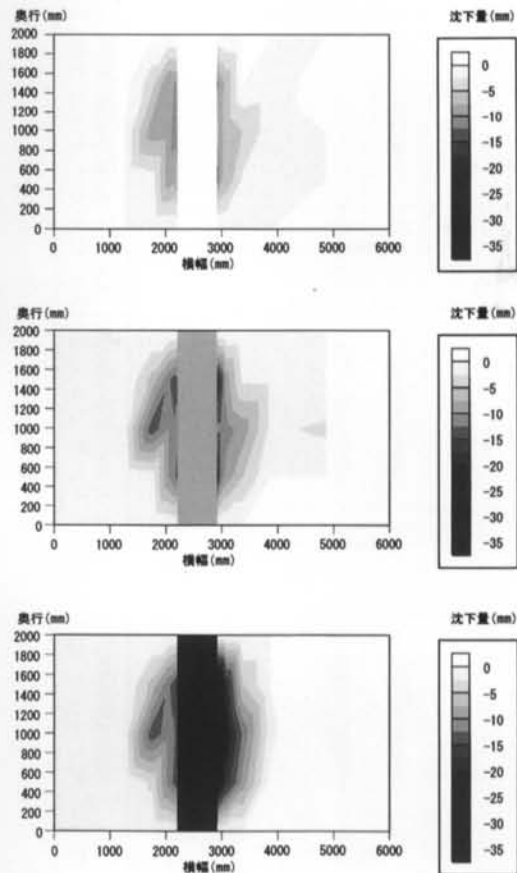


図-8 止水壁打設直後（上）、19日目（中）、解体直前（3ヶ月目）の地盤面の沈下量

その後、止水壁は自重、砂地盤の土圧、水圧によって少しずつ沈下、変形し、19日目には約10mm、解体直前には約25mmの沈下が見られた。心配していた止水壁部分での大きな圧密沈下は観察されなかった。

3.2.3 止水壁中のエタノール濃度、含水比、せん断強度、乾燥密度分布

土槽解体時における、止水壁内のせん断強度、乾燥密度、含水比、エタノール濃度分布を図-10に示す。

エタノール濃度について、非排水側に接している部分のエタノールは、地下水中に拡散し10% (100,000mg/L)以下に低下した。排水側に接している部分についても、砂層にエタノールが移動し濃度が低くなっている。

含水比は、非排水側で打設時より高くなっており、ベントナイトの吸水膨張が見られる。

せん断強度は、排水側で高くなっているが、これは

水圧による圧密の影響と考えられる。

乾燥密度は、高さ1,000mm以上の壁中心部近くで高くなっており、砂地盤により止水壁中心方向に押されたためと考えられる。

止水壁の透水係数は、排水量から計算すると、 $4.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 、採取したサンプルの三軸室内透水試験結果では、 $5.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ であった。したがって、エタノールと水の置換が十分でない状態でも、透水係数は 10^{-8}cm/s オーダーと高い遮水性能を持つことが確認された。

3.2.4 20m³土槽施工試験サンプルの物性試験

20m³土槽施工試験での止水壁部分のサンプルを利用し、三軸圧縮特性を把握した。土の圧密非排水(CU-)三軸圧縮試験は、JSF T 523に準じた。1試料3拘束圧とし、拘束圧は98、196、392kN/m²とした。圧密終了は3t法によった。ひずみ速度は0.05%/minとした。

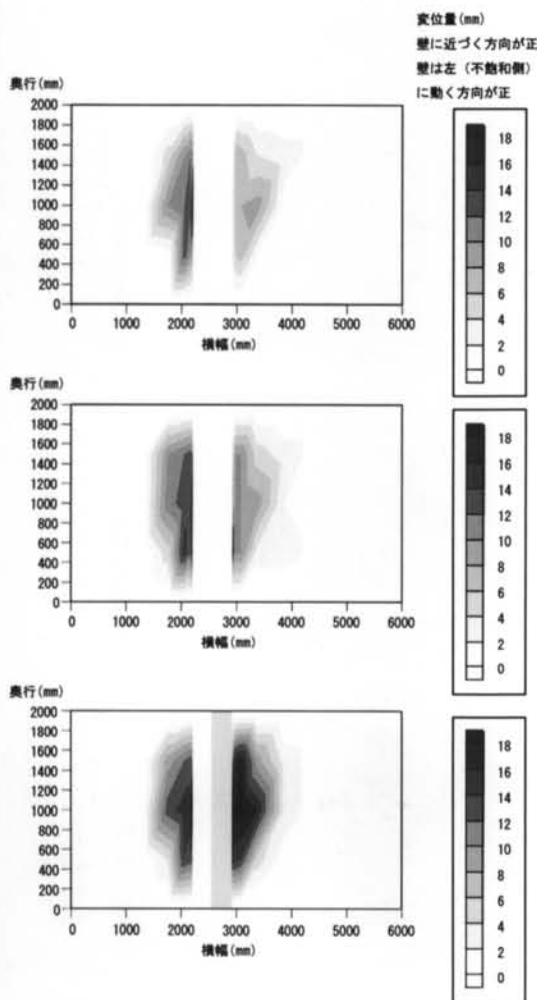


図-9 止水壁打設直後(上)、19日目(中)、解体直前(3ヶ月目)の地盤面の変位量

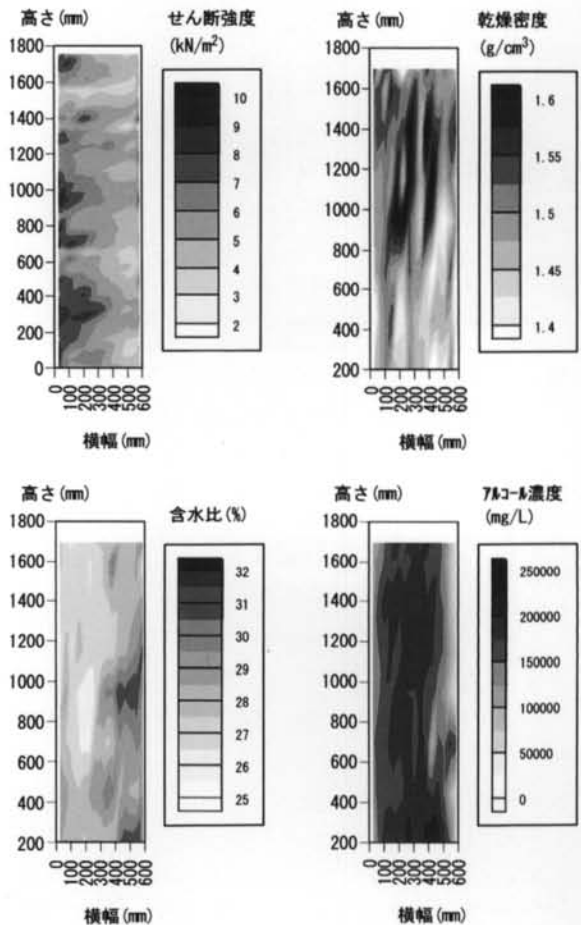


図-10 止水壁内のせん断強度、乾燥密度、含水比、エタノール濃度分布

図-11 に、20m³土槽試験の止水壁部分の高さ 20、70、120、170cm から採取した試料の、圧密応力 392kN/m²での圧密非排水(CU-)三軸圧縮試験の応力ひずみ関係を示す。図-12 に間隙水圧とひずみの関係を、図-13 に有効応力経路を示す。

ベントナイトを加え含水比、間隙比が増加、砂の相対密度が減少しているため、軸ひずみが小さい時点でベントナイトの粘着力による主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)の極大点が見られた後は、間隙水圧が増大するものの、砂粒子同士の摩擦が見られず、主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)は小さいままで試料は歪んでいくと考えられる。高さの違いによる有効応力経路の違いは見られなかった。混合土は、粘土の粘着力と砂の強度を併せ持っていることが確認できた。

3.2.5 止水壁モデル試験のまとめ

エタノールと水の置換が十分でなくとも、透水係数は 10⁻⁸cm/s オーダーと高い遮水性能を持つことが確認された。また、エタノール濃度の拡散は最大でも止水壁から 1.5m の範囲に限定されることが判明した。土とスラリーの混合性が非常によく、原地盤に均一にベントナイトを混合できることもわかった。以上の試験結果より、エタノール/ベントナイトスラリーはソイルベントナイト壁の材料として適していることが示された。一方、止水壁モデル試験では、時間の制約上 3 ヶ月放置後解体しなければならなかったため、止水壁内のエタノールと水との置換が途中の状態(約 10%のエタノールが水と置換)で試験を終了せざるを得ず、ベントナイトを膨潤させ、十分な強度を発揮する状態とすることはできなかった。

今後は、遠心模型実験等により耐震特性を明らかにすることで、我が国の地盤に適応したソイルベントナイト壁の設計方法を検証していく必要がある。

3.3 止水充填モデル試験

写真-9、10 に充填モデル試験の様子を示す。各スラリーを、一軸スクリーポンプを用い 1 インチホースを通して 4.3~4.7L/min の速度で充填した。型枠の内体積に対するスラリーの注入率は 94~100%であった。いずれの配合であっても非常に均質に水中打設できることが判明した。また、1mm 程度の狭い空間にも充填できた。

図-14 に型枠形状の違いによる膨潤圧の経時変化を示す。30 日後には、ポーラスストーンを通して水とエタノールの置換が起こり、ベントナイトが膨潤するので、圧力を発揮するようになる。30° 10cm の型枠(No.1)で 6.0kN/m² ともっとも大きい膨潤圧を発揮し、60° (No.3)、0° (No.4)の順に小さくなる。30° 20cm の型枠(No.2)では、30° 10cm(No.1)の場合に比べると 1/4~1/5

の膨潤圧である。スラリーが厚い分 No.2 の方がエタノールと水の置換が進みにくかったため、膨潤圧も小さ

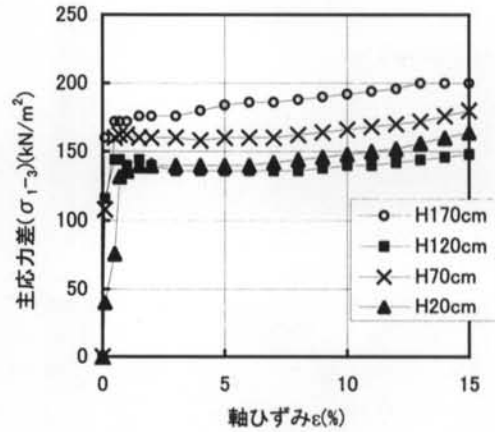


図-11 応力ひずみ関係(圧密応力 392kN/m²)

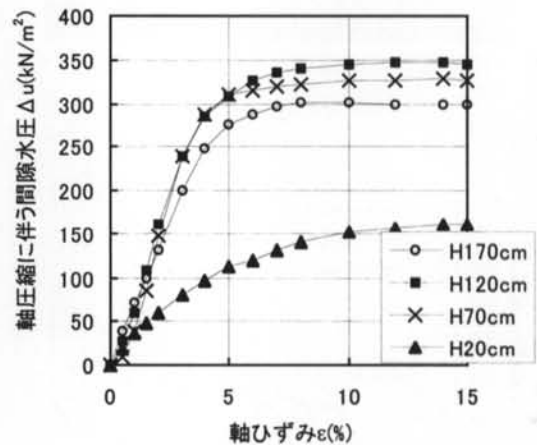


図-12 間隙水圧とひずみの関係(圧密応力 392kN/m²)

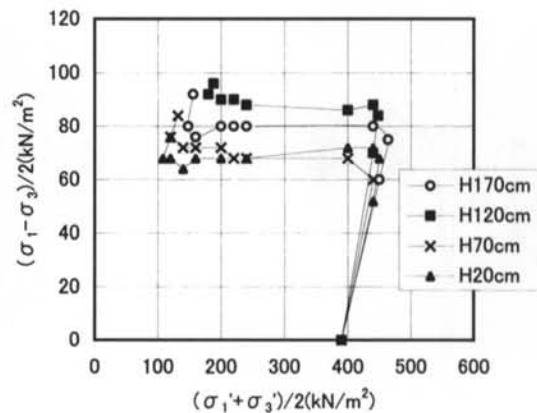


図-13 有効応力経路(圧密応力 392kN/m²)



写真-9 スラリーの水中打設状況 (傾斜角 30°)



写真-10 スラリー解体時のサンプリングとベーンせん断試験

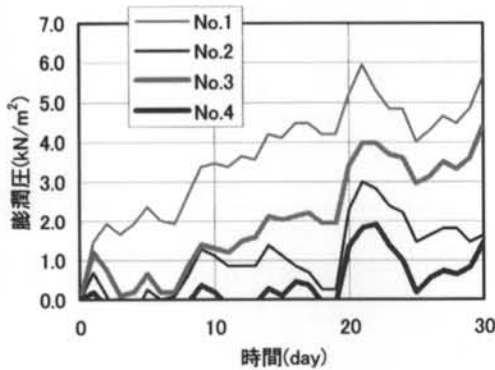


図-14 型枠形状の違いによる膨潤圧の経時変化

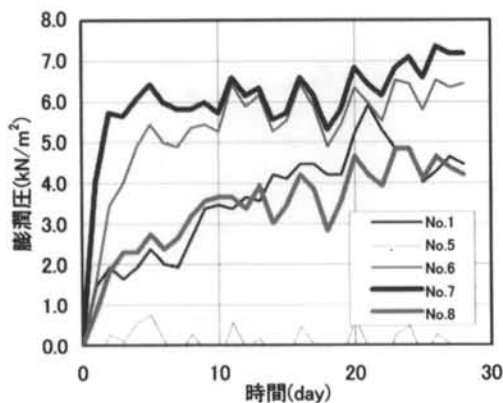


図-15 スラリー配合の違いによる膨潤圧変化

い。型枠の角度、厚さによってスラリーと水との置換速度に違いがあり、膨潤圧の違いが生じたと考えられる。

図-15にスラリー配合の違いによる膨潤圧の変化を示す。水を加えないスラリー(No.5)ではほとんど膨潤圧を発生していない。これは、エタノール濃度が高いため水との置換が不十分であり、膨潤圧を発生するまで至らなかったためと考えられる。

図-16に、充填したスラリー(No.1)の解体時の乾燥密度、含水比、エタノール濃度、せん断強度分布を示す。ポーラスストーンに接した下の部分からエタノールと水の置換が起こり、含水比が増加しエタノール濃度が減少する。それに従い湿潤密度もポーラスストーンに接している部分で減少するのが観察された。せん断強度は中央部分に極大値が見られ、膨潤するベントナイトと型枠に挟まれて強度が上がったものと考えられる。エタノール濃度の低下に伴いベントナイトの膨潤圧が経時的に増加した。注入時には流動性を示した

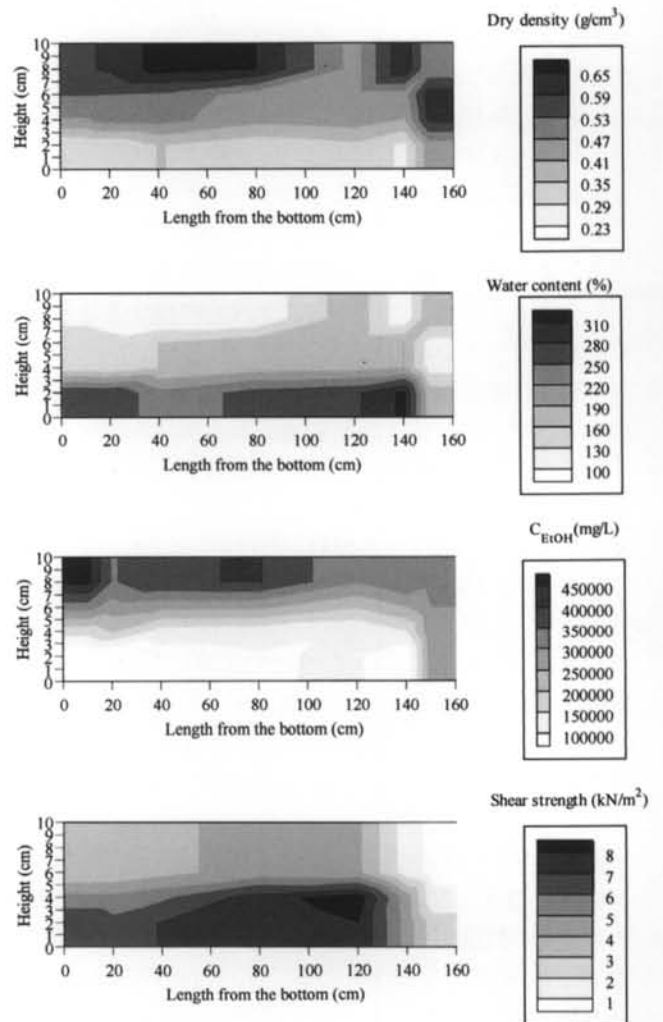


図-16 スラリー(No.1)の解体時の乾燥密度、含水比、エタノール濃度、せん断強度分布

スラリーは、解体時には 6kN/m^2 まで強度が増加した。

この時点で 1/3 のエタノールが水と置換しており、間隙中のエタノールがすべて水と置換すると膨潤圧は約 20kN/m^2 と予測できる。

間隙液の誘電率が高いほど土のせん断強度が低く、誘電率が低いほどせん断強度が高くなる¹⁴⁾。25°Cでのエタノールと水の誘電率はそれぞれ 24.3 と 80.4 である。密度の影響を考慮する必要はあるものの、スラリーのせん断強度増加にはエタノール濃度低下が大きく影響していることがわかる。

解体試料のほぼ中央から採取した試料の圧密試験結果では、圧密降伏応力 $p_c=11.8(\text{kN/m}^2)$ 、そのときの乾燥密度 $\rho_d=0.32(\text{g/cm}^3)$ であった。この結果は、土圧計による膨潤圧測定結果である 6kN/m^2 とオーダー的にはほぼ一致している。また、乾燥密度についても、図-16の乾燥密度の結果とほぼ一致している。したがって、エタノール/ベントナイトスラリーは、水とエタノールが置換し強度を発現するため、圧密試験で通常の土と同様の取り扱いが可能であることを確認した。

図-17にベントナイト乾燥密度と透水係数の関係を示す。エタノール/ベントナイトスラリーの透水係数は $k=4 \times 10^{-10}(\text{cm/s})$ であり、三原¹⁵⁾の結果と一致している。エタノールはベントナイトの止水性能に影響を与えないことが確認できた。

§ 4. おわりに

本論文では、ポンプ圧送試験、止水壁モデル試験、止水充填材モデル試験を通じて、エタノール/ベントナイトスラリーの施工性、エタノールの周辺地盤への影響、スラリーを用いた遮水構造物の性能等を明らかにすることを目的とし、以下の結果を得た。

- (1) 60wt%エタノール水溶液を用いてスラリー化すれば、ベントナイトの乾燥密度を $0.6 \sim 0.7\text{g/cm}^3$ まで

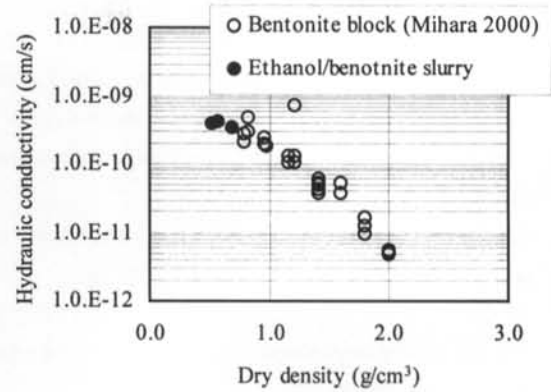


図-17 ベントナイトの乾燥密度と透水係数の関係

- 高められ、管径 2 インチの配管 200m を圧力損失 1MPa 以下で圧送可能である。
- (2) エタノール/ベントナイトスラリーを用いた止水壁は、透水係数 10^{-8}cm/s 程度と高い止水性能を持つこと、少ないスラリー注入量で均一に土との混合が可能であること等の特徴により、ソイルベントナイト壁として適している。
- (3) エタノール/ベントナイトスラリーのモデル充填試験では、空隙中に隙間なく水中充填でき、エタノールと水との置換にともなって強度と膨潤圧が増加し、透水係数は 10^{-10}cm/s 程度と高い止水性能を確保できる。

以上のことから、エタノール/ベントナイトスラリーの実用性が確認できたと考える。今後は現場試験を通じて有効性を実証したいと考えている。

謝辞

本研究はアルコール専売事業特別会計研究開発委託費により経済産業省からの委託事業として実施しており、発表に際し許可をいただいた経済産業省に感謝致します。

<参考文献>

- 1) 日本粘土学会：“粘土ハンドブック，第2版”，技報堂出版，1987。
- 2) 土木工法辞典編集委員会：“土木工法辞典，第4版”，産業調査会，1988。
- 3) Chapuis, R. P.: “Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests.” Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, pp47-57, 1990.
- 4) 勝見武, Benson, C. H., 嘉門雅史：“ベントナイトを用いた遮水ライナーの耐化学性について”，土と基礎，Vol.49, No.2, pp21-24, 2001。
- 5) (財)電力中央研究所：“ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤・透水特性—処分施設の設計・建設のための研究—”，電中研レビュー，40, pp28-32, 2000。
- 6) D'Appolonia, D. J.: “Soil-bentonite slurry trench cutoffs.” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.106, No.4, pp339-417, 1980.
- 7) Oweis, I., Khera, R.: “Geotechnology of waste management.” Boston, PWS Publishing Company, pp258-271, 1998.

- 8) Kenney, T. C., van Veen, W. A., Swallow, M. A., Sungaila, M. A.: "Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, pp364-374, 1992.
- 9) Komine, H., Ogata, N., Takao, H., Nakashima, A., Osada, T., Ueda, H.: "Self-sealing ability of buffer materials containing bentonite for HLW disposal," *Clay Science for Engineering*, Rotterdam, A. A. Balkema, pp543-551, 2001.
- 10) Asada, M., Ishikawa, A., Horiuchi, S.: Cutoff wall construction using bentonite/ethanol slurry, *Clay Science for Engineering*, Rotterdam, A. A. Balkema, pp511-516, 2001.
- 11) Egloffstein, T.: "Properties and test methods to assess bentonite used in Geosynthetic clay liners, Geosynthetic clay liners." Rotterdam, A. A. Balkema, pp51-72, 1995.
- 12) 堀内澄夫, 浅田素之: "エタノール/ベントナイトスラリーの性質と界面電気現象", 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp1269-1270, 2001.
- 13) Sridharan, A., Venkatappa Rao, G.: "Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept." *Geotechnique* Vol.23, No.3, pp359-382, 1973.
- 14) Sridharan, A., Venkatappa Rao, G.: "Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept." *Geotechnique* Vol.29, No.2, pp177-193, 1979.
- 15) 三原守弘: "ナトリウム型ベントナイトのカルシウム型化に伴う透水係数及び核種の実効拡散係数の変化", *サイクル機構技報*, 6, pp61-68, 2000.