

簡易破碎方式によるベントナイト混合土を用いた遮水層の効率的施工技術

T-Combination クレイライナー工法による現地発生土の有効利用

磯 さち恵・本 島 貴 之・森 川 義 人

ベントナイト混合土の物理特性は母材によって大きく異なるため、遮水層構築のためには良質な現地発生土を母材として使用することが品質確保の上で重要とされている。良質な現地発生土が得られない場合には購入砂が用いられるが、残土処分費を含め相応のコストが必要となる。著者らは、処分場建設時に大量発生する掘削土の処理問題の解決のため、現地発生土が破碎性堆積軟岩である場合におけるベントナイト混合土への適用技術に関する研究を進めている。本稿では、施工試験で実施した簡易破碎方式によるベントナイト混合土を用いた遮水層の構築技術、T-Combination クレイライナー工法（以下「本工法」という）について施工試験結果を交えて報告する。

キーワード：ベントナイト混合土，堆積軟岩，施工性，遮水層，低透水性

1. はじめに

管理型廃棄物処分場などの遮水工は、浸出水による公共用水域や地下水の汚染ならびにこれらに起因する周辺環境への悪影響を防止することを目的とし、厚さ0.5 m 以上かつ透水係数 10^{-8} m/sec 以下の遮水層を設けることが定められている^{1), 2)}。一般に遮水層にはベントナイトの膨潤による遮水性を期待し、ベントナイト混合率 10 ~ 20% 程度のベントナイト混合土が適用される場合が多い^{3), 4)}。ベントナイト混合土は、良質な現地発生土や購入砂を母材として使用することが品質確保の上で重要とされている。著者らは、処分場建設時に大量発生する現地発生土の処理問題解決策の1つとして、堆積軟岩の特性を活かしたベントナイト混合土による遮水層の効率的施工技術について研究を進めており、堆積軟岩の破碎性を利用することによりベントナイト混合率 5% でも十分に要求性能を満足することを確認した⁵⁾。本稿では、母材の特性を活かした施工技術である本工法の特徴および施工手順について述べ、施工試験のフローおよび施工性、品質確認試験の結果について報告する。

2. 本工法の特徴

本工法は図-1の施工手順に示すように、堆積軟岩の破碎性を利用して簡易破碎（一次破碎）のみ行った母材を用いてベントナイト混合土を製造し、転圧締

固めによる破碎（二次破碎）からなる施工手順によって、密実な骨格構造を有する遮水層を構築できる特徴を有する。現地発生土を用いる場合、既存技術では必要に応じて粒度調整を行うため、その分の施工手間が生じる。本工法では、混合土の製造から転圧締固めまでの過程で母材の粒度調整がされるため、従来の施工法よりも効率的に遮水層を構築することができる。

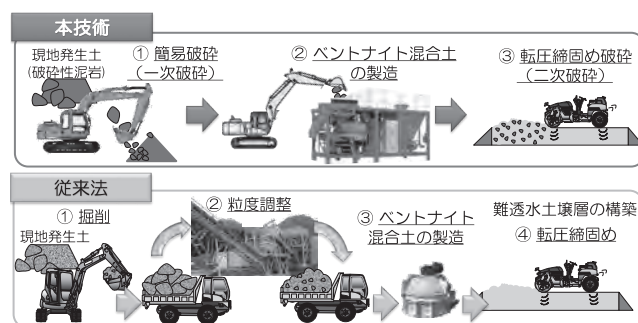


図-1 本工法と従来方法との施工手順の比較

図-2に破碎性を活かした本工法の締固めメカニズムを示す。従来法では、転圧締固めにより形成された間隙はベントナイトによって充填されるため、ベントナイトの量が少ない場合には間隙を十分に埋めることができず、ある程度のベントナイトの量が必要となる。一方本工法は、まさ土の破碎に因る締固め性質に示されるように、転圧締固め過程における現地発生土の破碎効果によって間隙を充填し密な骨格構造が形成されるため、少量のベントナイトでも十分な間隙の間詰効

果が得られると推察している。これは、本工法における締固めメカニズムのポイントとなっている。

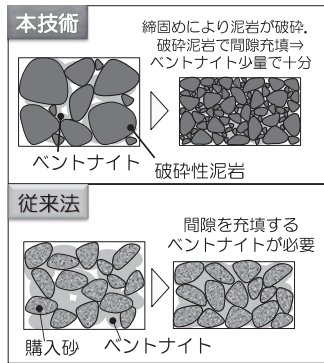


図-2 本工法の締固めメカニズム

3. 使用した材料

本試験で使用した材料の基本物性を表-1に、粒徑加積曲線を図-3に示す。母材には堆積軟岩である仙台層群向山層（以下、泥岩と記す）および比較対象として山砂を用い、添加するベントナイトはNa型（クニゲル V1：クニミネ工業製）を使用した。泥岩を構成する土粒子の密度を調べるためにJIS A 1202に準拠した密度試験と、岩塊の密度を調べるために土の密度試験（JIS A 1225：パラフィン法）⁶⁾を行った。

表-1 使用材料の基本物性

項目		泥岩	山砂	Na型ベントナイト
物理的性質	含水比 (%)	31.88	13.3	8.0
	粒子密度 (g/cm ³)	2.59 *1	1.44 *2	2.68
	スレーキング率 (%)	100.0	-	-
化学的性質	メチレンブルー吸着量 (mmol/100 g)	36	8	84

*1 JIS A 1202,

*2 JIS A 1225（「土の湿潤密度試験」パラフィン法）

これより、使用した泥岩は空隙率が45.5%と岩塊内部に多くの空隙を有している泥岩であることが確認できた。また、岩石中の粘土鉱物の割合を求めるメチレンブルー吸着量試験より、泥岩のメチレンブルー吸着量は36 mmol/100 gであり、山砂（8 mmol/100 g）と比較して非常に大きい値であり、粘土鉱物を多く含んでいる材料である。

4. 施工試験の概要および施工手順

試験ヤードは、図-4に示すように幅3.1m×長さ4.5mの試験ゾーンが2面、試験ゾーンに振動ローラがアプローチするための碎石斜路および振動ローラが試験中に一時退避可能な退避ゾーンを設置した。試験ゾーン、碎石斜路および退避ゾーンの境界は、端直角で固定し各ゾーンを縁切りしている。

図-5に施工フローを示す。試験施工の手順は、①掘削ブリの破碎（一次破碎）、②ベントナイト混合土の製造、③撒き出し・転圧締固め（二次破碎）、④試料のサンプリングの手順で実施した。本試験では、破碎から転圧まで一連の施工性を実規模レベルで実施し、採取した試料を用いて性能確認を行い室内試験結果の再現性について確認した。

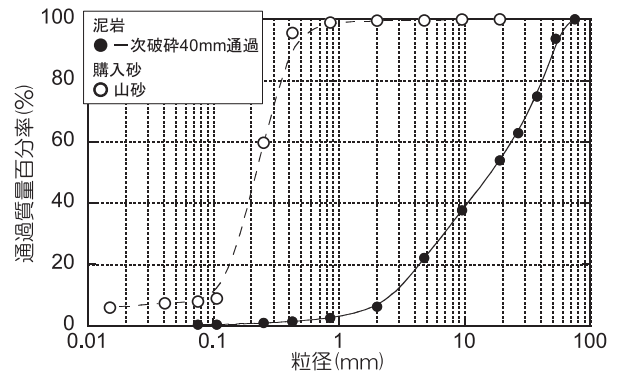
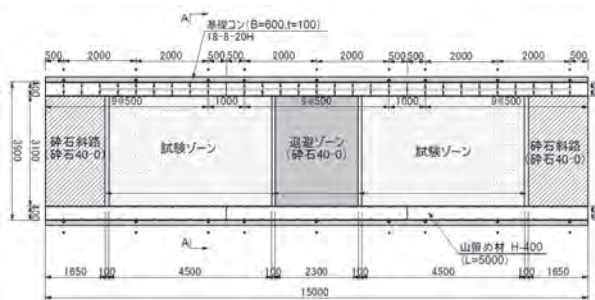


図-3 使用材料の粒徑加積曲線

土槽平面図 1:100



土槽断面図 1:50 (A-A)

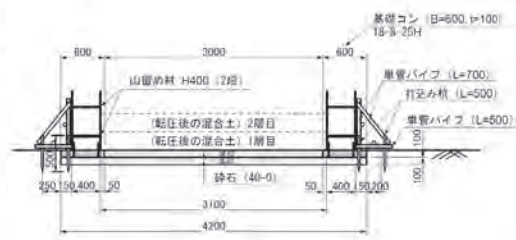


図-4 試験ヤード

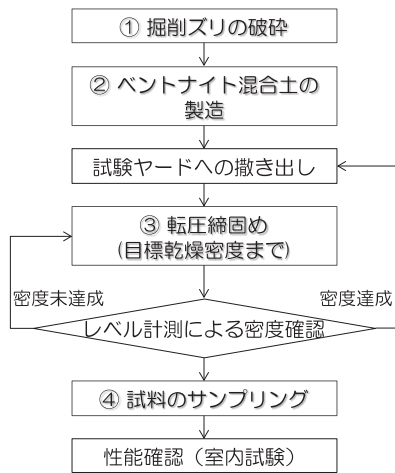
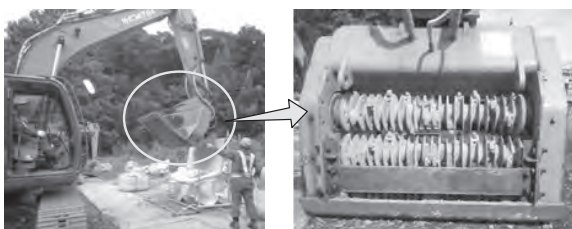


図-5 施工フロー

① 掘削ズリの破碎（一次破碎）

泥岩の一次破碎には 0.7 m³ バケツアタッチメント式の破碎機を使用した（写真-1）。フレキシブルコンテナに詰めて搬入した泥岩を1体ずつバケツ内を開封し、バケツ内の破碎ドラムを回転させることにより泥岩を所定の粒径以下に破碎した。本施工試験では、40 mm 以下を目標に破碎した（写真-2）。



アタッチメント式破碎機 破碎ドラム
写真-1 アタッチメント式の破碎機



破碎前 一次破碎（40mm以下）
写真-2 簡易破碎前後の泥岩の様子

② ベントナイト混合土の製造

ベントナイト混合土の製造には、投入搬出を一連の作業で行う移動式ユニットプラント（北川鉄工所製）を使用した。泥岩は移動式ユニットプラントのホッパーから混合ミキサ内に投入した。製造に際して、必要なベントナイトの量は投入した母材およびベントナイトの含水比に応じて配合比に基づき自動計算され、混合ミキサ内に送られる。ミキサ内でも母材同士の衝

撃により多少破碎されるため、ここでも粒度調整される。製造したベントナイト混合土は、母材の周りにベントナイトがコーティングされた造粒物の形状であり、撒き出し時のハンドリング性が良く、さらに締固め後の均質性が得られる材料である（写真-3）。



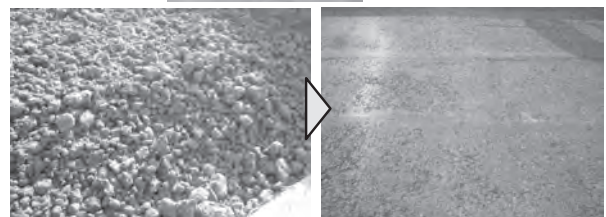
移動式ユニットプラント ベントナイト混合土
写真-3 ベントナイト混合土の製造プラントおよびベントナイト混合土

③ 撒き出し・転圧締固め（二次破碎）

製造したベントナイト混合土を試験ヤードに所定量撒き出し、レベル計測により撒き出し厚を確認した。転圧締固めには振動ローラ（4t級タンデムローラ）を使用した。締固め管理は、振動ローラによる転圧締固め1往復ごとに高さをレベル測量し、締固めに伴う乾燥密度の変化を確認し、目標乾燥密度を達成するまで繰り返した（写真-4）。試験終了後は、施工後の粒度分布の変化および要求性能を確認するため、ブロックサンプリングにより試料を採取した（写真-5）。



振動ローラ（4t級）



撒き出し直後 転圧締固め後
写真-4 振動ローラおよび転圧締固め前後の様子



サンプリング様子 採取ブロック断面

写真-5 ブロックサンプリングの様子

5. 施工試験の結果

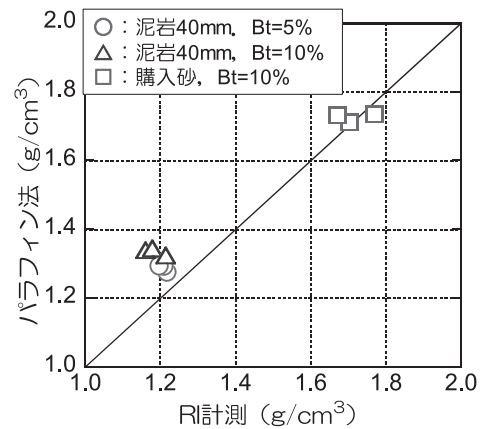
施工試験では一次破碎の最大粒径、ベントナイトの混合率および仕上がり厚をパラメータとして実施した。なお本稿では、施工試験で実施した中の一部の結果である仕上がり厚 12.5 cm、一次破碎の最大粒径 40 mm の泥岩単体、同粒径の泥岩を母材としたベントナイト混合率 5% および 10% の泥岩混合土（以下、泥岩混合土 5% および 10% と記す）と比較としてベントナイト混合率 10% の山砂混合土の結果について記述する。

(1) 施工性および密度管理

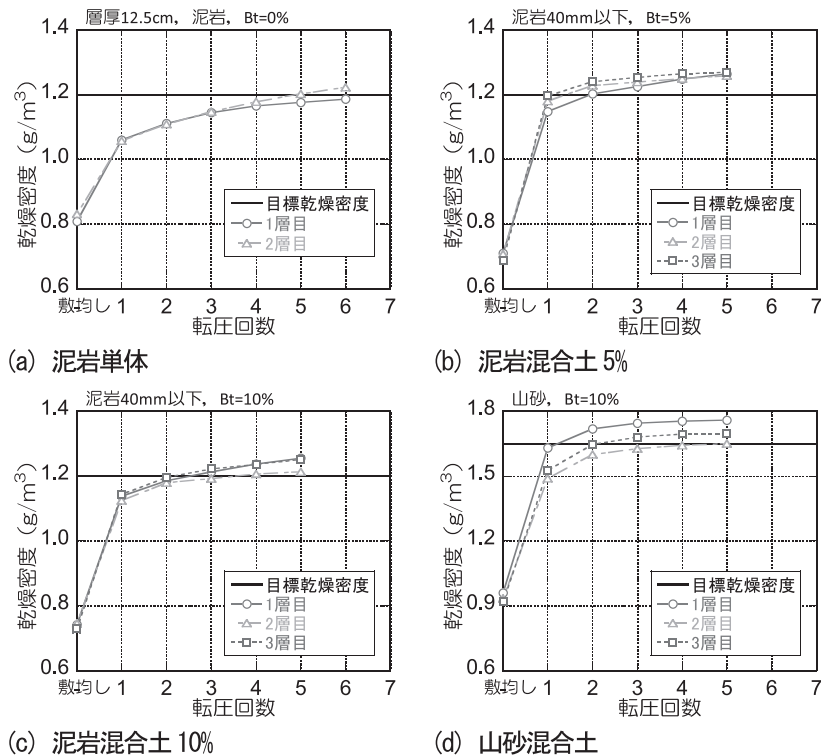
図一六に施工時の高さ測定により算出した層ごとの平均乾燥密度の変化を示す。目標乾燥密度は事前に締固め試験を実施し、泥岩混合土は 1.2 g/cm³、山砂混合土は 1.65 g/cm³ と設定した。泥岩混合土は各層で密度変化に大差なく、ベントナイト混合率に因らずいずれも転圧回数 2 回で目標乾燥密度に達した。一方で泥岩単体は、転圧回数が 5 回で目標乾燥密度に達したが、層の下部までは締固まっておらずブロックサンプリング時の自立性が乏しい状態であった。また山砂混合土は、1 層目の 1 往復のみプレートコンパクターで振動転圧し、2 層目以降は振動ローラで無振動転圧した。山砂を用いた場合、初期転圧時の転圧方法や転圧

速度の違いがその後の密度変化に多く影響を及ぼしたと考えられるが、転圧回数は 2～3 回で目標乾燥密度まで達している。以上より、転圧締固め回数などの施工性の観点から、本工法は従来法と同等な施工が可能であることが確認できた。

施工後の密度管理については、RI とブロックサンプリングにより密度を測定した。図一七に各密度測定方法による密度測定結果を示す。RI 密度およびブロックサンプリングによる密度は 1 層あたり 3 点測定した。母材を泥岩とした場合、RI 測定による乾燥密度はパラフィン法による乾燥密度に比べ、やや低めの値となった。この要因としては、母材粒子間のマクロ



図一七 RI 試験結果およびパラフィン法の相関関係



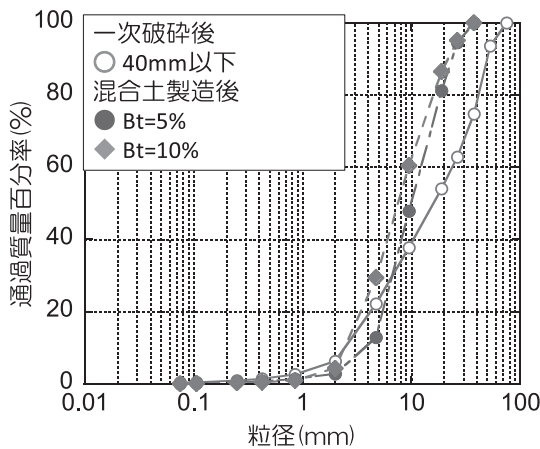
図一六 高さ測定より算出した層ごとの平均乾燥密度の変化

な間隙や、RI 測定器の線源棒と挿入孔との隙間などを経由して、線源棒から放出されるガンマ線のうち土中であまり減衰されないまま地表面に到達することによる影響や含水比が設定時より変化した可能性などが考えられる。一方、購入砂を母材とした場合には両者の乾燥密度に比較的相関が認められた。

(2) 室内試験による品質の確認

(a) 破碎性の確認

一次破碎後と混合土製造後の粒度分布を図一八に示す。混合土製造前後では粗礫分（粒径 19 mm 超）が 46%から 19%に減少し、中礫分（粒径 4.75 ~ 19 mm）



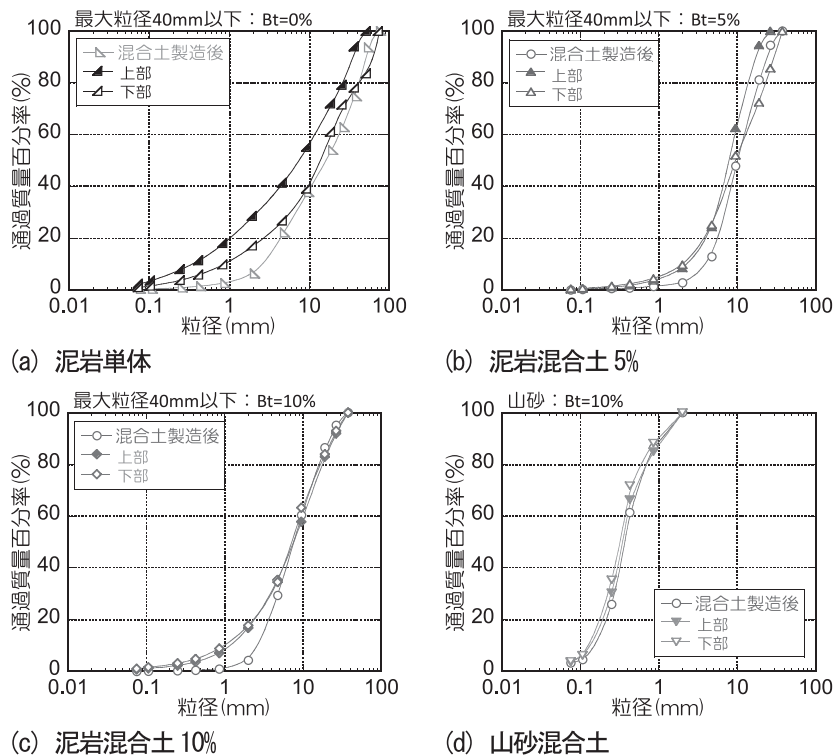
図一八 一次破碎後と混合土製造後の粒度分布

が 32%から 68%に増加している。これは、混合土製造過程においても泥岩が破碎されていることを示している。また混合土製造後に粒径 2 mm 以下の減少が見られるが、ベントナイトを含むことによる小径土粒子の団粒化の影響が考えられる。

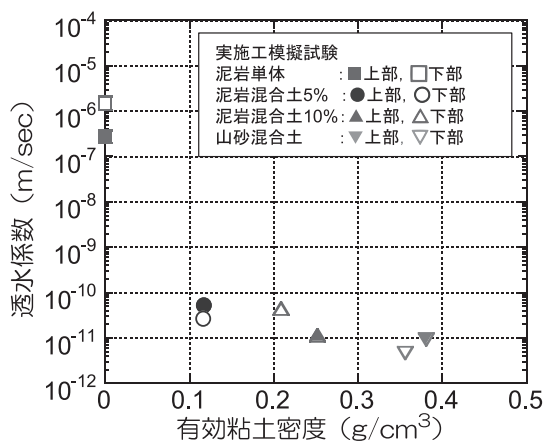
次に、混合土製造後と転圧締固め後の粒度分布の比較を図一九に示す。泥岩単体では、転圧前後で粒度分布が大きく変化していることが確認でき、層の上部がより顕著に破碎されていることが分かる。泥岩混合土ではベントナイト混合率が 5%および 10%においても粒度分布が変化しており、転圧締固めによる泥岩の破碎効果が確認できた。また転圧締固めによる破碎効果は、ベントナイト混合率が低いほど大きくなる傾向であった。なお山砂混合土は、転圧締固め後も粒度分布はほぼ一致しており、破碎性がないことを確認した。

(b) 遮水性の確認

サンプリングした試料を用いて変水位透水試験⁶⁾を実施した。層内での透水係数の差を確認するために採取した1層分の上部と下部2種類の供試体と比較した。図一十に透水係数と有効粘土密度の関係を示す。ここで有効粘土密度とは、単位体積当たりに含まれるベントナイト分の重量をそれ自身の体積で除すことにより得られる純粋なベントナイト分の密度を示している。泥岩単体の透水係数は 10^{-7} m/sec と非常に大きい値であった。これはベントナイトを混合していないため層



図一九 混合土製造後と転圧締固め後の粒度分布の比較



図一 10 透水係数と有効粘土密度の関係

内の粘着力がなく、サンプリングしたブロックの自立が難しかったこと、転圧締固めの均質性が得られなかったこと等が要因と考えられる。次に泥岩混合土でベントナイト混合率5%の場合の透水係数は10⁻¹¹ m/secオーダー、ベントナイト混合率10%では透水係数10⁻¹¹~10⁻¹² m/secオーダーであった。この結果より、ベントナイト混合率が5%であっても、ベントナイトの遮水性のみならず泥岩の破碎効果による密な骨格構造の形成によってさらに遮水性が確保され、山砂混合土10%と同等な透水係数を有することが出来たと考えられる。以上より、本工法により要求性能を満足する遮水層を構築できることが確認できた。

6. おわりに

本稿で報告した本工法 T-Combination クレイライナー工法は、現地掘削土として発生した破碎性堆積軟岩の有効利用を目指しベントナイト混合土の母材として利用することを目的とした施工技術である。

上述した施工試験結果より、粒度調整プラントで粒

度調整をしない簡易な破碎のみでも転圧締固め時の破碎効果を利用することによって、少ない転圧回数でも目標とする乾燥密度を達成し、従来法と同等な施工が可能であることが分かった。また本工法で使用した泥岩の場合には、破碎により構築された密実な骨格構造により、ベントナイト混合率5%でも遮水層に要求される透水係数を十分に満足する10⁻¹¹ m/secオーダーを確認できた。なお、本結果は母材に新第三系鮮新統の仙台層群向山層を用いて実施した結果であり、現在は特徴の異なる数種類の堆積軟岩を用いてベントナイト混合土としての特性について検証を続けており、物理化学的性質の観点からメカニズムについても検証する予定である。

JCMA

【参考文献】

- 1) 総理府・厚生省令：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分に係る技術上の基準を定める命令，環境省令第三号 2013. 2. 21.
- 2) 土木学会建設技術研究委員会 建設技術体系化小委員会 遮水工ワーキンググループ：管理型最終処分場の構造基準に適合した「遮水工の体系化」，平成 26 年 10 月.
- 3) 水野克巳：最終処分場における 3 層構造しゃ水工システムの開発及び施工例，第 8 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.824-827, 1997.
- 4) 小峯秀雄，緒方信英：ベントナイト緩衝材・埋戻し材の透水特性と簡易評価法の提案，土木学会論文集，No.708/Ⅲ-59, 133-144, 2002.
- 5) 磯さち恵，木ノ村幸士，森川義人：破碎性堆積軟岩を母材に用いたベントナイト混合土による遮水層の効率的施工方法の実証事業，地盤工学会誌，Vol.64, No7, Ser.No.702, 2016.
- 6) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-，2009.

【筆者紹介】

磯 さち恵 (いそ さちえ)
大成建設(株)
原子力本部 原子力技術第三部

本島 貴之 (もとしま たかゆき)
大成建設(株)
原子力本部 原子力技術第三部

森川 義人 (もりかわ よしと)
大成建設(株)
関西支店