

# 難透水性材料を対象とした透水試験方法の現状・課題とその対応

State of the Art for Measurement of Hydraulic Conductivity of Barrier Materials

佐藤 研一 (さとう けんいち)  
福岡大学 教授

小澤 一喜 (おざわ かずき)  
鹿島建設(株) 主任研究員

石森 洋行 (いしもり ひろゆき)  
国立環境研究所 NIES ポスドクフェロー

乾 徹 (いぬい とおる)  
京都大学 准教授

藤村 健司 (ふじむら けんじ)  
(株)アーステック東洋 専務取締役

椋木 俊文 (むくのき としふみ)  
熊本大学 准教授

## 1. はじめに

廃棄物処分場の遮水工，原位置封じ込めに用いる鉛直遮水工や覆土工等に用いる難透水性土質材料の設計，品質確認に際しては，透水試験による飽和透水係数の測定が行われる。透水試験はその実施場所によって室内透水試験<sup>1),2)</sup>，原位置透水試験<sup>3),4)</sup>に大分される。我が国では廃棄物処分場の遮水工や原位置封じ込めを目的とした鉛直遮水壁に適用される難透水性材料は透水係数が $1.0 \times 10^{-8}$  m/s 以下，欧米諸国では $1.0 \times 10^{-9}$  m/s 以下であることが求められているが，さらに，現場施工では現場配合，締固め等の施工時に生じる不確実性の影響を見込んで基準値より1オーダー低い値が目標品質として設定されることが多い。さらに透水係数が低いジオシンセティックスクレイナイター (GCL)，放射性廃棄物の地層処分に適用されるバリア材等を考慮すると， $10^{-9}$  m/s $\sim 10^{-12}$  m/s 程度の透水係数を測定しうる信頼性の高い試験方法が必要である。しかし，難透水性材料を対象とした透水試験の実施においては，図-1<sup>5)</sup>に示すように多くの課題がある。

本報では，難透水性材料を対象とした透水試験を実施している実務者，研究者に対するアンケート (図-2) の結果を紹介し，我が国で実施されている難透水性材料を対象とした透水試験の現状と課題をまとめる。さらには室内試験，現場における透水係数の評価に関する近年の研究成果をレビューし，難透水性材料を対象とした透

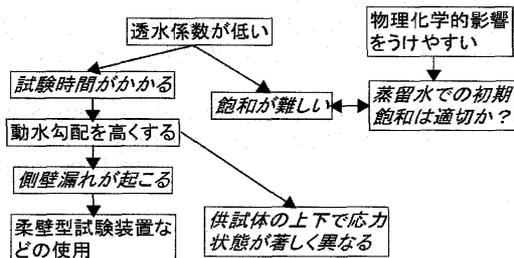


図-1 難透水性土質材料の透水試験における問題点の整理 (勝見・嘉門 2004)<sup>5)</sup>

水試験手法の制度化に向けた問題点とその対応を，近年の研究成果を交えながら議論する。

<p><b>試験材料について</b></p> <p>(1) どのような材料を対象に試験を実施されていますか？ (単位は m/s)</p> <p>1) 想定される透水係数 <math>k</math>: a) <math>k &gt; 1 \times 10^{-7}</math>, b) <math>1 \times 10^{-7} \geq k &gt; 1 \times 10^{-11}</math>, c) <math>k \leq 1 \times 10^{-11}</math></p> <p>2) 材料の配合: a) 粘性土, b) 混合土, c) 処理土, d) その他 (具体的に )</p> <p>(2) 透水溶液にはどのようなものを使用されていますか？</p> <p>a) 蒸留水, b) 処分場浸出水, c) 人工海水, d) その他 (具体的に )</p> <p><b>室内透水試験方法について</b></p> <p>(1) 試験装置について</p> <p>1) どのような装置を利用されていますか？</p> <p>a) 柔壁型試験装置, b) 三軸試験装置, c) 剛壁型試験装置・圧密試験機, d) その他 (具体的に )</p> <p>2) 1) で a), b) と回答された方: メンブレンの透水性は考慮していますか？</p> <p>a) 考慮している (具体的に ), b) 特に考慮していない</p> <p>3) 1) で c) と回答された方: 壁面と供試体の境界で生じるバイパスフローについて考慮していますか？</p> <p>a) 考慮している (具体的に ), b) 特に考慮していない</p> <p>(2) 供試体はどのように作製しますか？ (例: 圧密リングを使用して予備圧密等)</p> <p>(3) 供試体の寸法はどの程度ですか？ (例: 60mm 径×20mm 高)</p> <p>(4) 飽和操作について</p> <p>1) 供試体の飽和操作はどのようにおこなっていますか？その際，飽和度はどのように確認していますか？</p> <p>2) 経路中における気泡の発生などは透水係数の計測値に影響を及ぼしますが対策をとっていますか？</p> <p>a) 対策をとっている (具体的に ), b) 特に対策はとっていない</p> <p>(5) 水量測定について</p> <p>1) 微小な排水量 (outflow), 通水量 (inflow) を測定するにあたって配慮，工夫されていることはありますか？ (電子天秤を用いて質量で水量を測定する等)</p> <p>2) 蒸発に対する対策をとっていますか？</p> <p>a) 対策をとっている (具体的に ), b) 対策をとっていない</p> <p>(6) 拘束圧 (セル圧) はどの程度の値に設定されていますか？</p> <p>a) 現場想定, b) その他 (具体的に )</p> <p>(7) 動水勾配はどの程度の値に設定されていますか？</p> <p>a) 現場想定, b) その他 (具体的に )</p> <p>(8) 試験時の温度 (水温) は管理されていますか？</p> <p>a) 管理している (具体的に ), b) 特に管理していない</p> <p>(9) ろ紙，ポーラスストーン等の供試体の上下端に設置されるフィルター材について</p> <p>1) このフィルター材の目詰まり等への配慮はされているでしょうか？</p> <p>a) 配慮している (具体的に ), b) 特に配慮していない</p> <p>2) フィルター材にはどのような材料を使用されていますか？ (ろ紙などについては可能であれば，孔径など詳細な情報をご記入ください。)</p> <p>(10) 試験終了は何か判断基準にしていますか？ (通水量，通水時間など)</p> <p>(11) 供試体高さについて</p> <p>1) 試験中の供試体高さの変化の測定していますか？ (特に，柔壁型試験装置を用いる場合)</p> <p>a) 測定している, b) 測定していない</p> <p>2) 1) で a) と回答された方: どのように測定していますか？</p> <p>(12) 試験中の圧密の影響 (供試体中の間隙比や間隙水圧変化，透水係数の分布等) を考慮していますか？</p> <p>a) 考慮している (具体的に ), b) 特に考慮していない</p> <p>(13) その他，試験方法について問題に感じられることがあればご自由に記載ください。</p> <p><b>現場での透水係数の評価について</b></p> <p>(1) 現場における透水係数の考え方，管理にはどのような方法を適用されていますか？該当するものにチェックしてください (複数回答可)。</p> <p><input type="checkbox"/> 要求される透水係数に応じて室内試験での目標透水係数を設定し，その透水係数を満たす配合，密度等で施工を行う。</p> <p><input type="checkbox"/> 現場で配合したサンプルの再構成試料やコアサンプルを対象に室内透水試験を実施する。</p> <p><input type="checkbox"/> 密度，含水比，ペントナイト等の配合量などを現場で測定し，間接的な管理を行う。</p> <p><input type="checkbox"/> 現場透水試験を実施する。</p> <p><input type="checkbox"/> その他 (内容: )</p> <p>(2) 1) の設問において，「現場透水試験を実施する」と回答された場合，具体的な方法を可能な範囲でご回答ください。また，過去に測定を実施した現場の概要を差し支えない範囲で教えてください。</p> <p>難透水性土質材料を対象とした透水試験方法に関して，地盤工学会に期待することがあればご自由にご回答ください。</p>
--

図-2 実施したアンケートの調査項目

## 2. 難透水性材料を対象とした室内透水試験の現状とその課題

### 2.1 アンケート調査の概要

日本国内の試験機関、研究機関に所属する試験担当者に対して図-2に示す質問項目についてアンケートを行い、難透水性材料を対象とした透水試験の実施状況の現状を調査した。回答件数は22件であり、統計的有意性はないものの、現在国内で実施されている試験の現状を知る上では意義があると考えられる。調査項目は、①試験材料、②室内透水試験方法、③現場での品質管理・保証の方法についてに大分した。透水試験においては、一般的に温度管理や飽和度の上昇といったことが試験の信頼性の確保の上で重要となる。特に、難透水性の場合には飽和操作が難しいことがアンケートからも伺えるが、一般的な手法を用いて、長期間飽和操作を行っているのが現状である。本報では、図-1に示した供試体の低透水性に起因する問題点との概要とアンケート結果に基づく各機関での試験実施の現状、および近年の研究成果を含めた対応状況に絞って説明する。

### 2.2 高動水勾配に起因する課題とその対応

透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$  m/sの透水係数を有する100 mm高さ、間隙率0.4の粘性土供試体に間隙体積2倍の透水溶液を流下させるためには、動水勾配を $i$ とすると約 $4600/i$ 日の時間が必要となり、動水勾配を30としても約150日を要する。したがって高い動水勾配を作用させることが一般的であるが、透水力に起因する供試体上下での有効応力の差異の発生<sup>6)</sup>、細粒分の流失<sup>5)</sup>、および側壁漏れの発生が問題となる。

有効応力の差異については、透水試験時の動水勾配と供試体中心と端部での有効応力の差の関係を供試体高さ毎にプロットしたものを図-3<sup>6)</sup>に示す。実際には供試体の上下端ではこの2倍の有効応力の差が生じることになる。試験の実施にあたっては、拘束圧の大きさを考慮しつつ過大な応力差が発生しないよう配慮する必要があるが、今回のアンケート結果からは各機関ともに100~200といった高動水勾配を作用させる場合には10~20 mm高さの低い供試体を使用しており、有効応力差に関

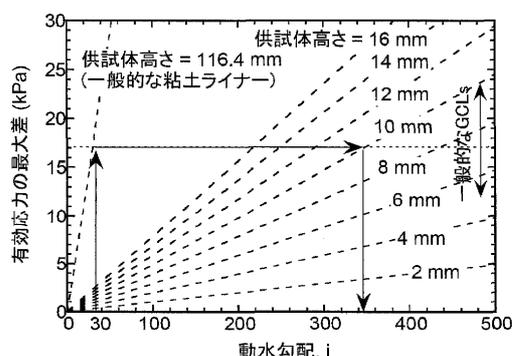


図-3 透水試験時の動水勾配に起因する供試体中心と端部における有効応力差に供試体高さが及ぼす影響 (Shackelford et al. 2000を和訳)<sup>6)</sup>

しては配慮がなされているのが現状である。また、同じ動水勾配を付与する際でも Kodikara & Rahman (2002)<sup>7)</sup>が理論解、実験値に基づいて透水係数に影響が生じにくい高動水勾配の与え方について検討していることから、参考にされたい。

細粒分の流失については、流失によって透水係数が増加する事例<sup>8)</sup>、および流出による閉そくによって見かけの透水係数が低下する例<sup>9)</sup>の双方が報告されている。細粒分の流出については下流側のポーラス材や濾紙の仕様によっても試験結果に大きな影響を及ぼすが、現時点では仕様が決められておらず、アンケートにおいても試験者から適切な仕様に関する疑問が寄せられた。

側壁漏れについては各試験・研究機関とも意識が高く、三軸試験装置を含む柔壁型装置<sup>2)</sup>の使用、およびメンブレンへのグリースの塗布といった方法が普及しており、セル圧の調整によって供試体に作用する有効応力を制御できる利点を含めて柔壁型を利用する機関が多い。その一方で、一般的な柔壁型装置においては、動水勾配に大きな影響を及ぼす供試体高さが測定できない、もしくは難しいことが問題点として挙げられている。特に GCL 等の供試体高さが小さく、圧縮性を持つ材料については留意が必要である。剛壁型装置を使用している場合は高密度のベントナイトといった側壁漏れの可能性が考えにくい材料を対象に実施されている。さらには、同じ剛壁型でも、側壁部分の流量と供試体中心部の流量を個別に計測し、側壁漏れの影響を考慮できるダブルリング型の透水試験装置の使用例も報告されている<sup>10),11)</sup>。

### 2.3 微小流量の計測に起因する課題とその対応

透水試験を終了するための判断基準としては、一般に、一定の通水量が得られること、時間あたりの通水量が一定することが挙げられ、多くの機関でもこの2点が適用されている。しかしながら、ASTMの試験規格<sup>5)</sup>にあるように、①流入量と流出量がほぼ等しくなること(相対差が25%以内)、②透水計数値が安定すること(計測値4回以上について25~50%以内の変動)の条件に準じる機関が多く、透水溶液中の化学物質と供試体との間で物理化学的作用が生じる場合には、③供試体の間隙体積の2倍の流出量を得ること、④流出水と流入水の化学特性がほぼ等しくなること、によって化学物質と供試体の反応が十分に進んだことを保証する必要がある。低透水性材料を対象とする場合、微小な流量を精度良く測定する方法が重要となるが、その精度についての疑問が今回のアンケート調査で目立った。

上述②に示したように25~50%の透水係数の変動が許容されていることを考慮すると、多少の誤差は許容されるものの、例えば透水係数が $1.0 \times 10^{-10}$  m/s、6 cm径の供試体に対して動水勾配30で試験を実施したときの流量は高々 $0.03 \text{ cm}^3/\text{時}$ である。一方、湿度や温度、空調の状況にもよるが室内における水の蒸発速度がおおよそ $0.01 \text{ kg/m}^2/\text{時}$ オーダーであることを考慮すると、例えば5 cm径の容器で流出水を貯留する場合、流量と同オーダーでの蒸発が予測され、蒸発への対策は必須であ

報告

る。このことから、ASTM規格<sup>2)</sup>では水銀を用いた密封系での流量測定を行い、蒸発の影響を厳密に除去することが記載されているが、今回のアンケートでは、コントロール試験の実施による蒸発量の評価、ビュレット表面に油を浮かべる等の一般的な対策に留まっているのが現状である。さらには、④で示す化学的特性の計測の精度についても、十分な流量が確保できないこと、蒸発による化学物質濃度の過大評価への懸念が指摘されている。

2.4 その他の課題

アンケート調査においては他にも以下のような問題点が指摘されており、今後の試験方法のガイドライン化、基準化においては留意が必要である。

- 長期にわたって試験を実施する中で、経路の飽和維持、空気溜まり除去
- 柔壁型装置を用いて長期にわたって試験を実施する際のメンブレンを通過する水、ペDESTALとメンブレンの境界部から侵入する水への対処

3. 現場における品質保証・管理

3.1 土質遮水工の一般的な品質管理の基本的考え方

締固め粘土やベントナイト混合土等の遮水工の現場における品質管理も通常の土工と同様に締固め管理が一般的である。低透水性を担保する観点からは、通常の土工で重視される密度管理に加えて含水比管理が重要となり、図-4に示す考え方が適用される<sup>12)</sup>。図-4(a)、(b)に締固め仕事量による締固め曲線と含水比-透水係数の関係を示す。最適含水比よりも湿潤側で透水係数が低くなるのが一般的であるため、同じ密度で締固めても乾燥側では透水係数が高くなる。図-4(b)に示した許容透水係数以下となる供試体を締固め曲線に黒印でプロットすると図-4(c)となり、ハッチで示した部分が透水係数の基準を満たす含水比と乾燥密度の範囲となる。さらに、透水係数に加えて、せん断強度やトラフィカビリティ等を確保できる密度、含水比を考慮すると図-4(d)のような管理範囲となる。

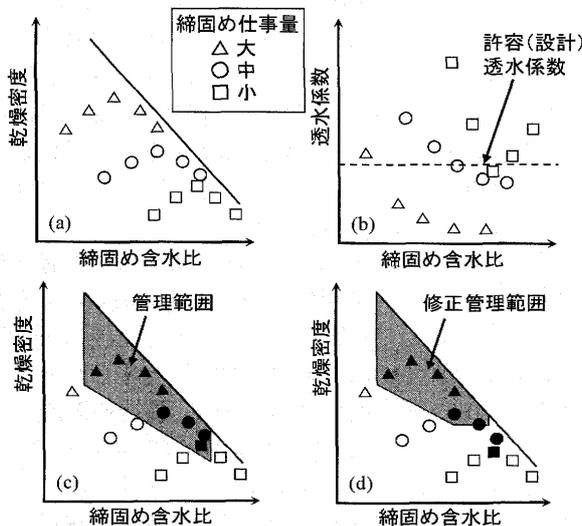


図-4 土質遮水工の現場における品質管理の考え方<sup>12)</sup>

3.2 廃棄物処分場遮水工の品質管理例

廃棄物処分場の土質遮水工(主にベントナイト混合土)やセメント改良土による遮水壁等の施工については前述のように法令基準で規定される透水係数よりも1オーダー低い値が目標品質として設定されることが多い。これらのうち、特に、ベントナイト混合土については、ベントナイト添加量や混合土の性状と透水係数の関係が詳細に検討されており<sup>5),6)</sup>、室内配合試験においては経済的な配合において所定の透水係数(遮水性)を達成することがほぼ可能であると考えられる。一方で、現場で構築した遮水工については、施工面に試験孔を設置することが難しく、施工表面で短時間に行える高精度簡易現場透水試験法が無いことなどから、原位置での透水係数の確認はほとんど行われていないのが現状である。アンケート調査においても原位置透水試験を日常的に実施している機関はない状況であった。また、室内配合と比較して、混合や締固めの不均質性が発生しやすい等、品質管理上の不確定要素が多い。

そこで土質遮水工の施工時には、現場内で別途、試験施工を行い、3.1に示した基本的考え方に基づいた締固め含水比と使用予定重機による転圧回数と締固め度の関係や締固め後の試料について透水係数を測定し、その結果を基に締固め度(転圧回数)による管理<sup>8)~10)</sup>を行うことが多い。図-5に文献<sup>10)</sup>の管理基準(乾燥密度、透水係数と含水比の関係)を一例として示す。

ここで、図-5に示す締固め度による管理は材料となる混合土が均質であることが前提であるが、文献<sup>16)</sup>では、試験施工において、重機によって現場混合した試料とミキサーによってプラント混合した試料の透水係数を比較しており、前者と後者の間には1~2オーダーの差異が見られるが、後者については室内試験とほぼ同等な遮水性を担保できることを報告している。プラント混合については混合土の原料となる現場発生土の性状(粘性土、砂質土、礫質土等)により適切な混合機械が異なるため、実際の現場発生土について複数の混合機械の適用

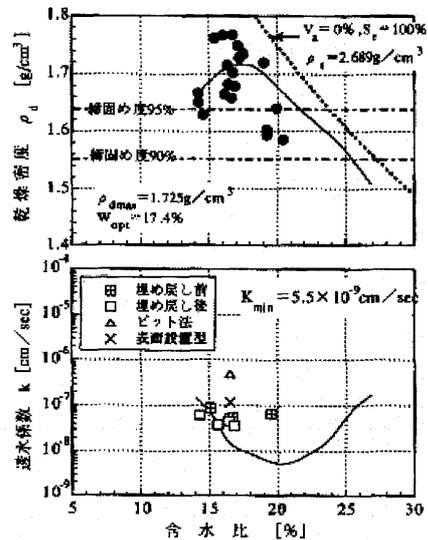


図-5 締固め度による管理基準の一例<sup>10)</sup>

性を比較, 検討することも重要である。

このように土質遮水工の施工に関して, 現状では現場に構築した実物について直接透水係数を測定することなく, 締固め度や混合均一性等の観点から管理目標達成への努力が続けられている。今後, このような試験施工データの集積によって, 締固め管理による透水性確保の適用性が確立されると共に, 室内試験による安全率と, 現場における不確定性が数値的に評価できるシステムの確立が望まれる。

#### 4. おわりに

本報告は, 試験法・調査法ワーキング (WG) 内に設置された難透水性材料の透水試験サブ WG の活動報告を取りまとめたものである。サブ WG では, 難しいとされている難透水性材料を対象とした透水試験法の現状と課題, 実験から得られる結果の精度, 室内試験の結果と遮水工現場における品質保証と管理法について様々な議論を重ねてきた。そして活動の一環として今回は難透水性材料を対象とした透水試験を実施している実務者, 研究者にアンケート調査を行い, 現状の把握を行った。その結果, 室内透水試験の現状と課題では, 難透水性材料特有の高動水勾配に伴って生じる有効応力の差異の発生, 細粒分の流失, 側壁漏れについて課題や疑問があることが分かった。そこで, この報告では, 各課題に対してその対応状況について既往の研究も含めて言及し, 難透水性材料の室内透水実験を行う際の注意点を明らかにした。一方, 現場における品質保証・管理の現状と課題では, 現場管理の方法が明らかになった。現場内では別途, あらかじめ試験施工を行い, 基本的考え方に基づいた締固め含水比と使用予定重機による転圧回数と締固め度の関係や締固め後の試料について透水係数を測定し, その結果を基に締固め度 (転圧回数) による管理を行うことが多いことが示された。その一方で現場透水試験を日常的に行って施工管理をしている機関がないことも明らかになった。しかしながら, 現場では締固め度や混合均一性等の観点から管理目標達成への努力が続けられていることも示された。

今回のサブ WG 検討から難透水性材料の透水係数の決定における現状とその課題が明らかになった。透水係数は, 遮水工の基準に用いられる重要な値であり, その信頼性が要求されている。今後, 各機関において①現場におけるデータの集積, ②締固め管理による遮水性確保の検討, ③室内試験結果の現場への適用方法の確立についてさらなる検討を進める必要があると思われる。また, 学会として難透水性材料の透水試験法の基準化も視野に入れながら今年度始まる委員会の中でも継続的に議論を進めていく予定である。

本報の執筆に際して, アンケート調査にご協力いただいた日本国内の研究・試験機関の担当者の皆様に心より謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 例えば, 日本工業規格: 土の透水試験方法 (JIS A 1218), 2009.
- 2) 例えば, ASTM International: *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*, ASTM Designation: D 5084~00, 2000.
- 3) 例えば, Rowe, R. K. et al.: *Barrier Systems for Waste Disposal 2nd Edition*, Spon Press, pp. 107~123, 2004.
- 4) 例えば, 西垣 誠・小松 満: ベントナイト混合土ライナーの原位置透水試験法に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol. 63, pp. 299~311, 2008.
- 5) 勝見 武・嘉門雅史: 粘土ライナーの透水試験と遮水性能の評価について, 土と基礎, Vol. 51, No. 8, pp. 23~24, 2003.
- 6) Shackelford, C. D. et al.: Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, Nos. 2-3, pp. 133~161, 2000.
- 7) Kodikara, J. K. and Rahman, F.: Effects of specimen consolidation on the laboratory hydraulic conductivity measurement, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, pp. 908~923, 2002.
- 8) Imamura, S. et al.: Long term stability of bentonite/sand mixtures at L.L.R.W. storage, *Environmental Geotechnics*, M. Kamon (ed.), Balkema, pp. 545~550, 1996.
- 9) Khilar, K. C. et al.: Model for piping-plugging in earthen structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, pp. 833~846, 1985.
- 10) Petrov, R. J. et al.: Comparison of laboratory-measured GCL hydraulic conductivity based on three permeameter types, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 20, pp. 49~62, 1997.
- 11) 富士暁之・勝見 武・嘉門雅史・乾 徹: 改良型透水試験装置を用いた鋼管杭-粘土境界面における透水量の評価, 第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp. 281~286, 2007.
- 12) Daniel, D. E. and Benson, C. H. (1990): Water content-density criteria for compacted soil liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 12, pp. 1811~1830.
- 13) 田中俊行・深沢栄造・平 和男・須山泰宏: 礫混入ベントナイト混合土の礫混入率が透水係数に及ぼす影響, 第30回土質工学研究発表会, D-10, pp. 1837~1838, 1995.
- 14) 土弘道夫・八畝 昇・三品 徹・反目好男: ソイルセメントを用いた廃棄物処分場の遮水材の検討, 第29回土質工学研究発表会, B-12, pp. 115~116, 1994.
- 15) 石原輝之・五十嵐孝文・今村 徹・谷澤房郎: ベントナイト・砂混合土の現場施工性, 第31回地盤工学研究発表会, B-12, pp. 335~336, 1996.
- 16) 下村泰造・相川孝之・小林貴之・日高正人: 管理型最終処分場のシャ水工の施工その3 —ベントナイト混合土の施工—, 土木学会第53回年次学術講演回, III-B415, pp. 830~831, 1998.

(原稿受理 2011.5.19)