

17. ベントナイト混合土による土質遮水層の品質管理

Quality Control of Compacted Clay Liner by Bentonite Mixing Soil

市川 隆文*

浅田 毅*

要 旨

一般に廃棄物最終処分場の遮水構造である土質遮水層は、現地発生土に遮水性のあるベントナイトを混合した材料を締固めて築造される。今回、実施工の現場において、ベントナイト混合土中のベントナイト混合率測定にファンネル粘性測定法と、混合土の締固め管理にキャスボルを採用して品質管理を行った。その結果、透水性の低い高品質な土質遮水層を築造することができた。

キーワード：廃棄物最終処分場／ベントナイト混合土／品質管理／キャスボル

1. はじめに

平成10年6月に総理府および厚生省より「一般廃棄物の最終処分場および産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令」が公布された。新基準では、廃棄物最終処分場の遮水構造に関して、「厚さ50cm以上、透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下である粘土等の層に遮水シートが敷設されていること。」が新たに加わった。この粘土層と遮水シートの組合せによる複合遮水構造は、遮水性能を格段に向上させる構造であり、近年、採用実績が増加している。

しかしながら、透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下の粘土は、日本国内では入手が難しいことから、現地発生土にベントナイトを混合することで、透水性の非常に低い粘性土を人工的に製造する手法が適用されている。また、ベントナイト混合土による土質遮水層は、現場で発生する土とベントナイトを混合して築造されるため、土質、混合機械、施工法などの違いによって、その遮水性能に与える影響は異なる。

したがって、ベントナイト混合土による土質遮水層の品質管理は、まず室内において、含水比と締固め密度を変えた供試体について透水試験を行い、その結果から管理基準値を定める。その上で、現場では、混合土の締固め密度と含水比について、それらの管理基準値を遵守するように施工管理を行う必要がある。また、築造された土質遮水層の現場密度測定方法には、一般に砂置換法が採用されているが、測定に時間を要したり、土質遮水層の破損を伴うことが問題となっている。

以上のことから、当社が施工した廃棄物最終処分場

(産業技術センター産業廃棄物最終処分場)において、ベントナイト混合土の製造方法を確立し、土の締固め密度の測定に非破壊で迅速に測定できる衝撃加速度測定器(以下、キャスボルと記す。)を採用して、品質管理を行った。本報では、これらの結果を報告する。

2. ベントナイト混合土の製造方法

2.1 混合方法

ベントナイトと現地発生土の混合方法には、(1)プラント混合、(2)フィールド混合、(3)自走式混合機混合があり、各混合方法の特徴を以下に示す。

(1) プラント混合

- ①現地発生土を振動フルイで転石・ゴミを除去した後プラントにて混合攪拌する方式である。
- ②自動制御装置により、高品質な混合土を安定供給でき、施工速度が速い。
- ③プラント設置に係わる費用がかかり、設置のためのフィールドが必要になる。

(2) フィールド混合

- ①スタビライザーや攪拌翼を装備したバックホウによって混合攪拌する方式である。
- ②既存の機械で施工でき、ローコストである。
- ③混合状態が不均一になりやすく、粉塵対策が必要である。

(3) 自走式混合機混合

- ①プラント混合の設備をコンパクトにした方式である。
- ②自走式であるため、施工箇所の適当な場所へ移動が可能である。

*土木構造研究室

③粉塵飛散が非常に少ない。

④混合攪拌と同時に定量の水を散水することで含水比を調整することができる。

以上のことから、今回の建設現場では、混合状態の均一性、混合土の製造量、ベントナイトの飛散などを考慮して、自走式混合機による混合方式を採用した。

2.2 自走式混合機による混合土の製造

自走式混合機（日立建機：SR-P1200）の外観と、その主要機器の構成図を写真－１、図－１に示す。自走式混合機によるベントナイト混合土の製造方法は、まず現地発生土をバックホウにて土砂ホッパに投入する。投入された現地発生土は土砂フィーダによって定量搬送され、それらにベントナイトフィーダから所定量のベントナイトを添加し、２軸パドルミキサーで混合する。さらに、混合されたベントナイト混合土は、排出ベルトコンベヤで運搬車に直接積み込み、施工箇所へ運搬する。

2.3 自走式混合機の初期設定

現地発生土に設定量のベントナイトを添加するため、ベントナイト混合土の製造前に、自走式混合機の初期設定を行う。初期設定は、ベントナイトフィーダとコンベヤスケールのキャリブレーションで行う。キャリブレーションの方法を以下に示す。

(1) ベントナイトフィーダのキャリブレーション

ベントナイトフィーダの１回転当たりの切出し容積（ $5,500\text{cm}^3$ ）とベントナイトのかさ比重からベントナイトフィーダの回転数を設定する。設定した回転数で運転した時に所定量のベントナイトが供給されるか否かを確認する。

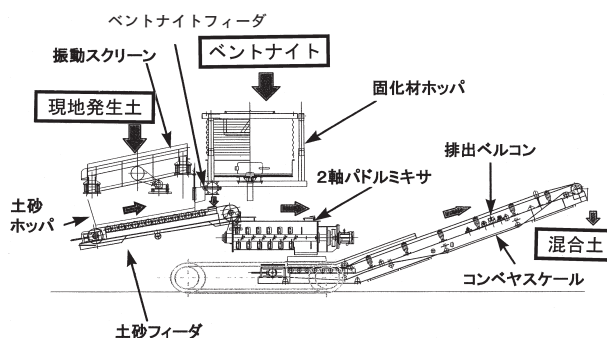
(2) コンベヤスケールのキャリブレーション

排出ベルトコンベヤに内蔵されたコンベヤスケールにて単位時間当たりに排出される土砂重量を測定し、同時に排出される発生土を10tonダンプで荷受けしトラックスケールにて重量を測定する。

今回、採用した自走式混合機（日立建機：SR-P1200）には、コンベヤスケールで計測された混合土の重量に対して、供給装置から決められた量のベントナイトが供給されるようになっている。供給される発生土の重量が増減した場合はベントナイトフィーダの回転速度が自動的に増減して、混合率を一定に保つことができる。また、現地発生土の含水比に応じてベントナイトの添加量を変える必要があるが、この混合機では、含水比を入力することで添加量を調整することができる。



写真－１ 自走式混合機



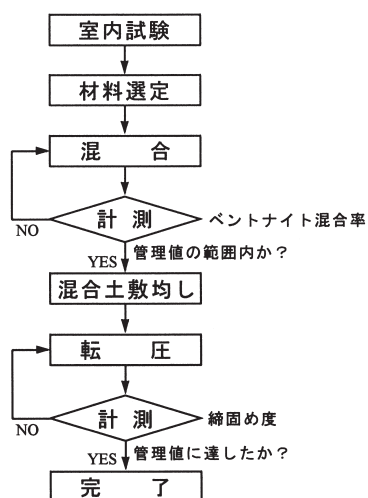
図－１ 主要機器構成図

3. ベントナイト混合土の品質管理

3.1 品質管理項目

ベントナイト混合土による土質遮水層の施工フローを図－２に示す。

施工フローの各工程における試験項目を表－１に示す。品質管理上、特に重要な試験項目は、混合時におけるベントナイト混合率と、転圧時における現場密度試験であり、次項に詳述する。



図－２ ベントナイト混合土施工フロー

表－１ 試験項目

区 分	試 験 項 目
材料選定	密度試験、含水比試験、粒度試験、 締固め試験、透水試験、 液性限界・塑性限界試験
混合時	ベントナイト混合率、含水比試験
混合土敷均し	敷均し厚さ、含水比試験
転圧中	転圧回数、仕上がり厚さ
転圧後	現場密度試験
完了	透水試験

3.2 ベントナイト混合率の測定

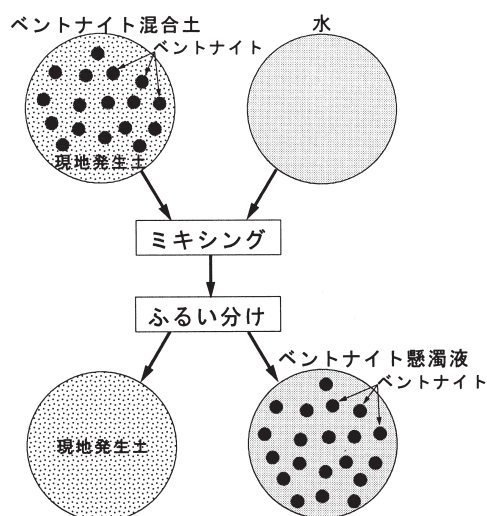
(1) ベントナイト混合率の測定方法

ベントナイトの混合率を測定する方法は、メチレンブルー吸着量試験法、イオン電極法、X線回析などがある。これらの測定法は、試験室での測定のため、結果が得られるのに時間がかかり、即時に測定結果が必要な現場測定への適用が課題であった。そこで、現場で簡易な測定法としてファンネル粘性測定法を提案し、現場測定に適用した。

(2) ファンネル粘性測定法の測定原理

ファンネル粘性測定法の測定原理は、ベントナイト混合土に加水・攪拌して得られるベントナイト懸濁液の粘性を測定して、ベントナイト混合率を求める。測定原理の概念図を図－３に示す。ベントナイトの混合率が高ければ懸濁液の粘性は高く、逆に混合率が低ければ粘性が低くなる。

あらかじめ試験室において、ベントナイトの混合率を変えてベントナイト懸濁液の粘度を測定し、ベントナイト混合率と粘度の検量線を求めておく。そして、現場測定では、懸濁液の粘度を測定し、検量線からベントナイト混合率を求める。



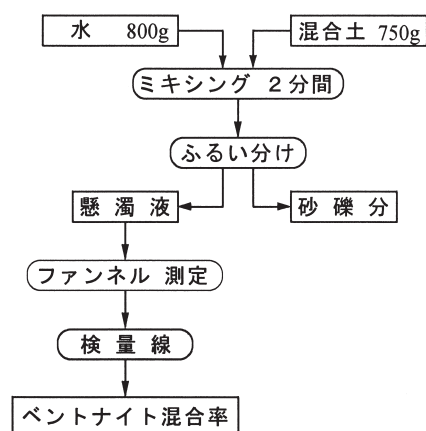
図－３ 測定原理概念図

(3) 測定手順

ファンネル粘性測定法に用いる測定器具を写真－２に示す。写真－２の左側から、0.85mmふるい、ポリバケツ（５リットル）、ハンドミキサー、ファンネル粘度計を示している。ファンネル粘度計は、現場で簡易な測定方法として用いられており、回転粘度計との比較から、ファンネル粘度が20秒～30秒程度であれば相関性があり、粘性の指標となる。また、ベントナイト混合率の測定フローを図－４に示す。



写真－２ 測定器具



図－４ 測定フロー

測定の手順を以下に示す。

- ①水800gをポリバケツ（５リットル）に計量する。
- ②ベントナイト混合土750gを量り取り、ポリバケツ内の水に静かに投入する。
- ③ポリバケツ内の混合土と水をハンドミキサーで、2分間攪拌する。
- ④ポリバケツを静置し砂礫分を沈降させ、懸濁液を0.85mmふるいに通過させ、別の容器に移す。
- ⑤ファンネル粘度計の流出口を指で押さえ、懸濁液500mlを粘度計に注入する。
- ⑥粘度計の流出口を解放し、懸濁液が全部流出するま

での時間（秒）をストップウォッチで計測し、ファンネル粘度とする。

- ⑦ファンネル粘度と検量線を対比させ、ベントナイト混合率を求める。

(4) 検量線の作成

試験室において、ベントナイト混合率8.0～12.0%のベントナイト混合土を製造する。ファンネル粘性測定法に従い懸濁液のファンネル粘度を測定し、ベントナイト混合率とファンネル粘度の検量線を作成する。

今回、特に留意した点は、ベントナイト混合土の含水比である。ベントナイト混合土の含水比は、現地発生土の含水比に依存し、一定でない。そのため、同重量のベントナイト混合土でも、含水比の違いにより、混合土を構成する現地発生土、ベントナイト、水の割合が異なる。そこで、この問題点に対処するために、あらかじめ試験室において、ベントナイト混合土の含水比16,20,24,28%の検量線を求めておき、現場測定では、混合土の含水比に応じて検量線を選択することにした。現場測定に用いた検量線を図-5に示す。

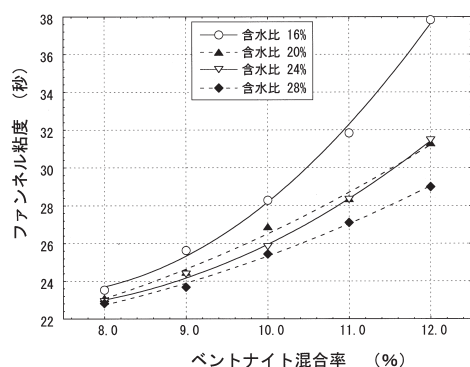


図-5 検量線

(5) 測定結果および考察

現場でのベントナイト混合率の測定結果を、以下に述べる。ベントナイト混合率の測定頻度は、1施工日に午前・午後の2回を原則とし、混合開始直後に測定を行う。ファンネル粘性測定法の測定結果と自走式混合機のコンベヤスケールの値から算出した結果を図-6に示す。

ファンネル粘度測定法によるベントナイト混合率は、10～11%の範囲内であり、仕様書の10%を超え、混合のばらつきが少なく、均質な混合土が製造されていることが確認できた。

また、ファンネル粘性測定法は、測定時間が約10分程度であり、測定結果を迅速にフィードバックでき、ベントナイト混合土の品質管理に有効な手法であることが確認できた。

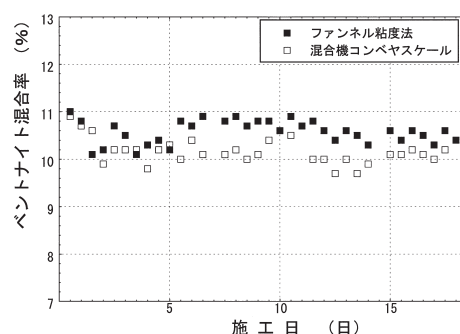


図-6 ベントナイト混合率の測定結果

3.3 ベントナイト混合土の締固め管理

(1) キャスポルの原理および構造

衝撃加速度法は、一定の高さからランマーを地盤に自由落下させて生ずる衝撃加速度の最大値と地盤の強度定数、密度などを相関させる方法である。キャスポルは、この衝撃加速度法を用いた締固め管理試験器である。

キャスポルの構造図を図-7に示す。キャスポルは本体部と表示部とから構成されており、直径50mm、質量4.5kgのランマーを高さ45cmから自由落下させ、ランマー内蔵の加速度計で衝撃加速度を測定し、表示器のディスプレイ上に測定値を表示するシステムになっている。

キャスポルは、砂置換法、R I法などの現場密度試験に比べ、土の締固め状況を即座に判定し、その結果を直ちに施工に反映させることができる利点がある。また、この方法によれば短時間内に多くの測点を測定できることから、面的に信頼性の高い土質遮水層を築造することができる。

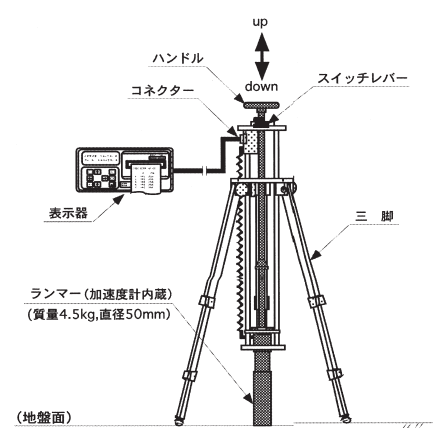


図-7 キャスポルの構造図

(2) 締固め管理の概要

ベントナイト混合土の締固め度の測定を、砂置換法、R I法、キャスポルによる衝撃加速度法で行った。R I法では、線源棒を土質遮水層に打ち込まない散乱型R I

水分密度計を採用した。各測定方法の測定頻度と測点数を表－２に示す。

表－２ 測定頻度

項 目	測 定 頻 度	測 点 数
砂置換法	500cm ³ 毎に一箇所	6
R I 法	25cm ³ 毎に一箇所	102
キャスボル	10cm ³ 毎に一箇所	255

表－３ 物理試験結果

日本統一土質分類による分類	密 度 $\rho_s(\text{kN/m}^3)$	液性限界 WL (%)	塑性限界 WP (%)	均等係数 (U_c)	曲率係数 (U_c')
(SC)	24.7	63.4	35.8	355.0	26.5

(3) ベントナイト混合土の土質試験結果

現地発生土に、乾燥重量比で10%のベントナイトを混合したベントナイト混合土の物理試験結果を表－３に示す。また、締固め試験の結果、最大乾燥密度は、 $\rho_{dmax} = 12.74\text{kN/m}^3$ 、最適含水比は、 $w_{opt} = 29.8\%$ である。

(4) 締固め管理値 (I_a) の決定

締固め管理値を定めるために、室内において締固め度90%で、含水比をそれぞれ19%,24%,29%とした供試体を作製し、それらについて変水位透水試験を行った。その結果、全ての供試体の透水係数が $2.64 \times 10^{-7} \sim 3.40 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ の範囲にあり、規定の透水係数 ($1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$) 以下であった。したがってベントナイト混合土の締固め管理値を、含水比19.0%~29.0%で締固め度90%以上とした。

締固め管理は、キャスボルを用いて行い、「簡易支持力測定器による試験法 (国土交通省近畿地方整備局)」に準拠して行った。その締固め管理値 (I_a) は、上記の透水試験によって求められた含水比19.0%~29.0%で締固め度90%以上の結果に基づいて、10.3以上とした。



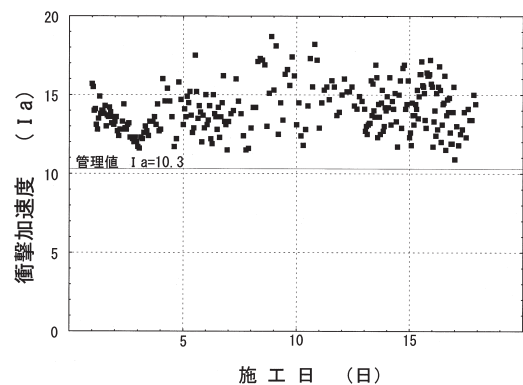
写真－３ キャスボルによる測定状況

(5) 測定結果および考察

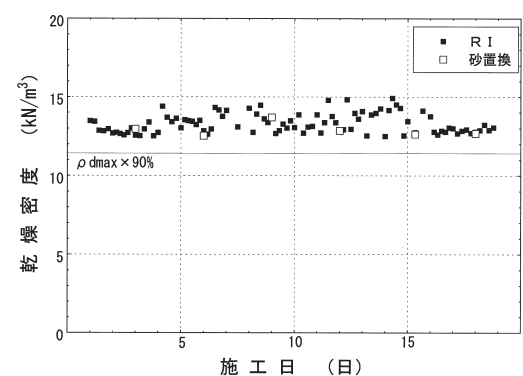
キャスボルを用いてベントナイト混合土の締固め管理を行っている状況を写真－３に示す。

実施工におけるキャスボルの測定結果を図－８に、砂置換法とR I法の測定結果を図－９に示す。また、キャスボルによる衝撃加速度 (I_a) と砂置換法による乾燥密度の関係を図－10に示す。

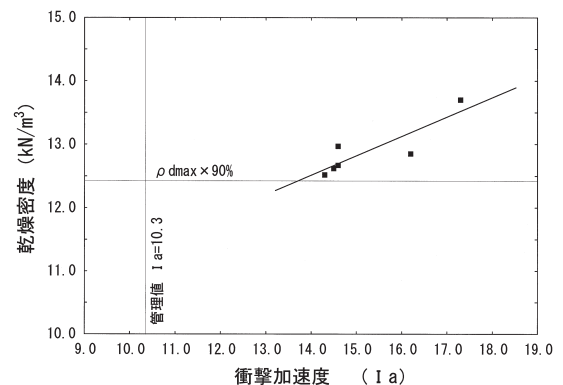
図－８，９より、キャスボル、砂置換法、R I法のいずれの測定方法においても、測定結果が管理値以上であり、締固め度90%以上の土質遮水層が構築されていることが確認された。



図－８ キャスボルの測定結果



図－９ 砂置換法とR I法の測定結果



図－10 衝撃加速度 (I_a) と乾燥密度の関係

図-10より、衝撃加速度（ I_a ）と乾燥密度の両方の値とも管理値をクリアしており、両者には非常に高い相関性が認められた。

施工完了後、土質遮水層の透水係数を確認するため、現場試料を採取し、室内で透水試験を行った。試料の採取方法は、ブロックサンプリング法（釘打込み法）を採用した。サンプリング状況を写真-4に示す。サンプリングした試料は、トリミング法により成形した。透水試験は、水浸脱気法で飽和度を高め、三軸セルを用いた変水位透水試験装置（拘束圧20kPa）により行った。透水試験の結果を表-4に示す。

試験結果より、ベントナイト混合土による土質遮水層の透水係数は、 $1.5 \times 10^{-8} \sim 5.1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ であり、全ての測点において設計の透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を下回り、透水性の非常に低い高品質な土質遮水層が構築されていることが確認できた。

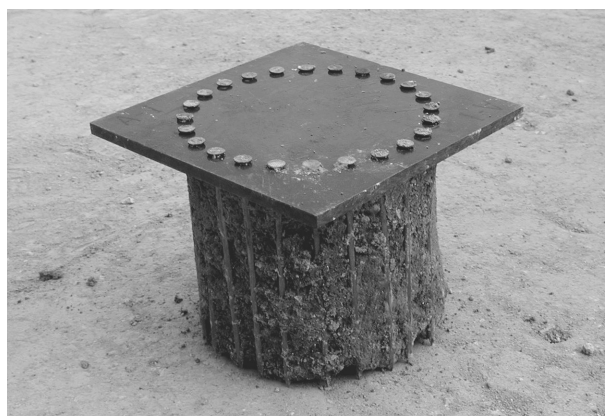


写真-4 サンプルング状況

表-4 透水試験結果

試料番号	透水係数
No.1	$3.9 \times 10^{-8} \text{cm/s}$
No.2	$3.3 \times 10^{-8} \text{cm/s}$
No.3	$2.5 \times 10^{-8} \text{cm/s}$
No.4	$1.5 \times 10^{-8} \text{cm/s}$
No.5	$5.1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$
No.6	$4.6 \times 10^{-8} \text{cm/s}$

4. まとめ

ベントナイト混合土による土質遮水層を実現場で施工した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 自走式混合機を用いたベントナイトと現地発生土の混合方法によると、混合むらが少なく、均質なベントナイト混合土が製造できる。
- (2) ファンネル粘度測定法は、現場でベントナイトの混合率を測定する方法として有効な方法である。

- (3) キャスポルによる締固め管理は、多くの測点を計測できることから、砂置換法などの密度管理試験に比べ、より面的な管理を行うことができる。

- (4) 実現場ではキャスポルを用いて品質管理を行うことで、所定の透水係数以下の信頼性の高い土質遮水層を築造することができる。

ベントナイト混合土による土質遮水層は、ベントナイトが持つ高い遮水性能から、放射性廃棄物処分施設の緩衝材として利用が期待されており、透水係数も $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 以下とより高い性能を要求され、その品質管理においても、キャスポルによる衝撃加速度法は、有効な品質管理手法であり、今後、適用を図っていきたい。

[謝辞]

ベントナイト混合土の品質管理を行うに当たり、貴重なご助言を頂いた(財)地域地盤環境研究所 本郷隆夫氏、(株)ホーゲン古賀慎氏・水野克己氏に対し、感謝の意を表します。また、測定を行うに当たり、ご協力を頂いた(株)浅沼組東北支店土木部前川義孝氏および職員の方々に謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 成島誠一・竹本光慶・本郷隆夫・水野克己・市川隆文他：移動式プラント混合機を用いたベントナイト混合土実証実験、第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.964-967、1999.
- 2) 広瀬由幸・古賀慎・市川隆文・西山勝栄・大塚義一・小嶋平三他：ベントナイト混合土による土質遮水層の品質管理方法に関する研究、第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.1004-1006、2000.
- 3) 須山泰宏・深沢栄造・平和男・田中俊行：礫混入ベントナイト混合土中のベントナイト量の簡易測定法、土木学会第50回年次学術講演会概要集、VI-166、1995.
- 4) 井上義幸・樋口雄一・古賀慎：ベントナイト混合土の製造法・品質管理と急勾配法面への敷設、第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.1007-1009、2000.