

最終処分場におけるベントナイト混合土の品質保証技術 に関する研究

Quality Assurance Techniques for Bentonite Mixture Soil Liner at Final Disposal Sites

戸村 豪治 GOJI TOMURA

中田 雅夫 MASAO NAKATA

喜多 治之 HARUYUKI KITA

土木設計部 黒島 一郎 ICHIRO KUROSHIMA

最終処分場の遮水工は、埋立処分された廃棄物や浸出水が処分場外に漏洩することがないように機能することが重要であり、近年では遮水シートとベントナイト混合土の組み合わせによる複合的な遮水工の施工が増加している。このため、施工後のベントナイト混合土層の均一性を評価する手法や、原位置透水係数を早期に求める手法が望まれている。本稿ではこれらの評価手法に関する幾つかの新しい試験方法と、その妥当性に関する検討結果について報告する。

キーワード：最終処分場，ベントナイト，原位置試験，透水試験

High quality control work at the final disposal site is essential to prevent reclaimed waste and seepage water from leaking outside of the boundary. In recognition of this there has been a recent trend in the use of composite structures combining bentonite mixture soil liners and geo-membrane sheets as seepage control works. Good quality of the bentonite mixture soil demands minimal permeability and uniformity throughout, and therefore it is essential to establish methods of evaluating uniformity and in-situ permeability of the soil liner immediately after construction. In this paper, new evaluation techniques are proposed, and the verification results of the site execution are described.

Key Words: Final Disposal Site, Bentonite, In-situ Test, Permeability Test

1. はじめに

近年、管理型最終処分場では、浸出水による地下水汚染防止を目的として、遮水シートとベントナイト混合土による複合遮水構造を用いる事例が増加している。ベントナイト混合土の母材は、環境上、できるかぎり現地発生土を用いることが望ましいが、その場合、母材のばらつきを考慮したうえで適切な品質管理を行って現位置における難透水性とその均一性を確保することが重要となる。

現在、ベントナイト混合土の品質管理法としては、室内試験によってあらかじめ設定されたベントナイト添加率や含水比、密度の管理基準値を基に、混練時にベントナイトの定量試験を行うほか、施工時にはブロックサンプリングによる透水係数の確認が行われている。しかし、これらの方法は結果が得られるまでに時間がかかり、試験数量も限られるため、施工後のベントナイト混合土

の均一性を面的に評価する手法や、原位置で早期に透水係数を求める手法が望まれている。

今回、筆者らは宮崎最終処分場工事において、ベントナイト混合土の試験施工を実施して混合土の均一性と原位置透水係数の評価に関する幾つかの試験を試み、メチレンブルー試験結果やブロックサンプリングによって得られた試料の室内透水試験結果との比較を行った。本稿ではこれらの結果とその妥当性に関する検討結果について報告する。

2. 本工事の概要

品質確認試験用のための試験施工は、宮崎県廃棄物総合処理センター（仮称）整備事業の一つとして宮崎県宮崎市大瀬町に建設されている管理型最終処分場の中で実施した。本事業で整備する主要な施設は廃棄物の中間処理施設（リサイクルプラザ、焼却溶融施設）および管理

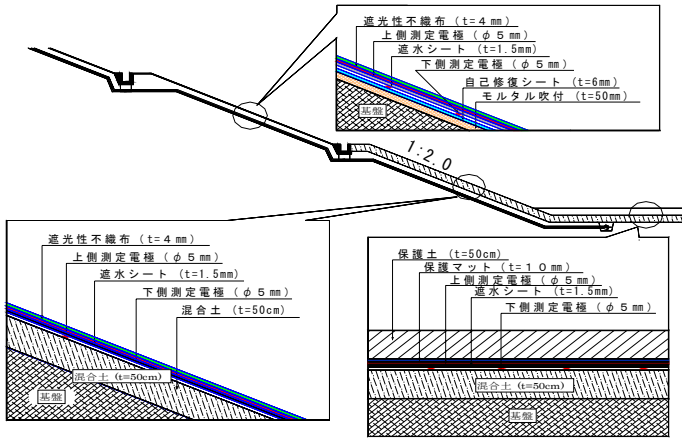


図-1 宮崎最終処分場の遮水工の構造

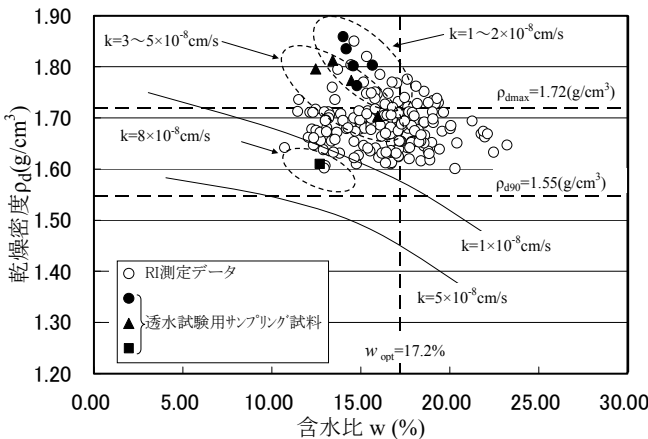


図-2 含水比と乾燥密度の相関図

型最終処分場とその関連施設である。

(1) 処分場の遮水構造

処分場の遮水構造には、遮水シートとベントナイト混合土による複合遮水構造が採用されており、遮水層の仕様は透水係数が $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 以下となっている。また、ベントナイト混合土の母材は、環境対策上、土砂等の搬出入を極力避ける意味で現地発生土を使用することが義務づけられている。遮水工構造の断面図を図-1に、本工事における混合土の配合と母材の物性値を表-1、表-2に示す。

(2) 本工事における混合土の品質管理結果

図-2に本施工で実施された混合土のRI試験によって得られた177点の含水比と乾燥密度の関係を示す。図には、施工後に原位置より切り出して採取した計10個のサンプリング試料の透水試験の結果と試験時の含水比、乾燥密度を併せて記している。混合土の施工では、底盤部に比べてのり面部の方が締固め効果が上がりにくいといえるが、試料の透水試験結果をみると、のり面採取試

表-1 混合土の配合

配合	母材	Usal 層砂
	ベントナイト	スーパークレイ
締固め特性	最大乾燥密度 $\rho_{dmax} (\text{g/cm}^3)$	1.72
	最適含水比 $w_{opt} (\%)$	17.2

*添加率は母材に対する乾燥重量比

表-2 混合土母材の物性値

試料名	母材 (Usal 層砂)	
土粒子の密度 $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	2.645	
自然含水比 $w_n (\%)$	12.9	
粒度	礫分 (%)	1
	砂分 (%)	75
	シルト分 (%)	18
	粘土分 (%)	6
	均等係数 U_c	10.7
	曲率係数 U_c'	3.86
	最大粒径 (mm)	4.75
	50%粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.126
20%粒径 $D_{20}(\text{mm})$	0.00375	
液性限界 $w_L (\%)$	NP	
塑性限界 $w_p (\%)$	NP	
塑性指数 $I_p (\%)$	NP	
コンシステンシー指数 I_c	NP	

料 ($D_{c93\%}$, $w=12.5\%$)でも $8 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ と基準値を満足する値が得られている。また、その他の試料ではすべて $1 \sim 5 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ となっており、管理基準値である $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ より十分に小さい値となった。

3. 試験施工の概要

試験施工は、本工事における処分場底盤部の一画で行った。図-3に示すように、約 $6\text{m} \times 16\text{m}$ の範囲に、ベントナイト添加率を 0%, 6%, 8%, 10%, 転圧作業量を 10t 級振動ローラで 2 回転圧、6 回転圧と変えた 8 区画を設けた。ヤードの施工では、最初に基盤層の転圧を行った後、現場透水試験用に排水層として C-40 砕石と不織布を敷きつめた。その上に混合プラント(SRP-1200)を用いて製造した各配合の混合土をバックホウにて所定の位置に敷き均した後、振動ローラで長手方向に一度に転圧を行った。層厚は 50cm とし、本施工と同様に 25cm ずつの 2 層に分けて施工を行った。

試験用の区画はヤードの端部および区画境の 1m 程度を避けた中央部の $2\text{m} \times 3\text{m}$ とした。実施した試験項目の一覧を表-3に示す。

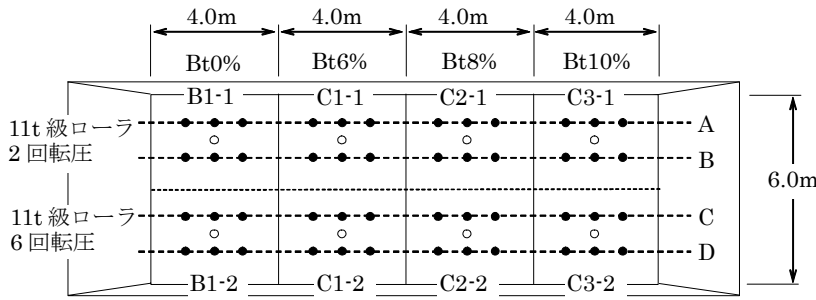


図-3 密度含水比測定位置

表-3 試験項目

試験箇所	試験項目	試験方法	試験数量
混練プラント採取試料	ベントナイト添加率	メチレンブルー吸着法 (ろ紙)	母材 3 試料、各配合混練中 3 回
	含水比	ファンネル粘性測定法	1 回につき 2 試料計 21 試料
原位置採取試料	ベントナイト添加率	メチレンブルー吸着法 (ろ紙)	各配合毎に 1 回計 4 回
	含水比	メチレンブルー吸着法 (比色計)	
原位置試験	ベントナイト添加率	誘電率計測	6 回転圧箇所各 6 点、計 24 箇所
	密度	POSAM (近赤外線スペクトル)	-
	含水比	RI 法	1 層目：各ケース 3 箇所、1 箇所 2 回
		砂置換法	1 層目：各ケース 6 箇所、1 箇所 4 回
	透水係数	定水位現場透水試験 (側壁開放型)	6 回転圧箇所、各配合 1 箇所 計 4 箇所
定水位現場透水試験 (側壁止水型)			
変水位現場透水試験 (鉛直浸透型)			
原位置サンプリング試料	サンプリング試料の室内透水試験	6 回転圧箇所、各配合 1 箇所 1 本につき上、中、下の 3 試料採取	

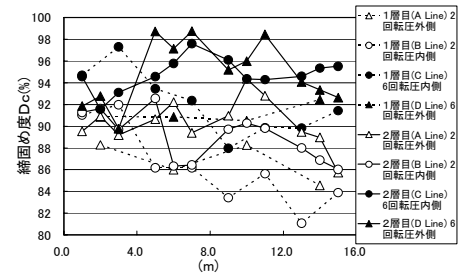


図-4 締固め度測定結果

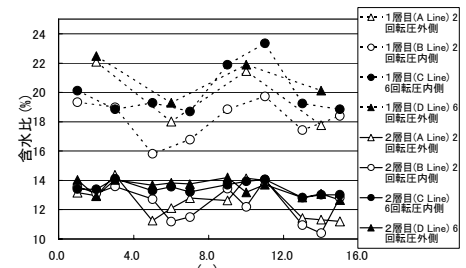


図-5 含水比測定結果

表-4 各層の締固め度，含水比平均値

回転回数	層	締固め度 Dc (%)	含水比 w (%)
2 回	1 層目	86.4	18.7
	2 層目	89.7	12.5
6 回	1 層目	91.8	20.3
	2 層目	94.8	13.5
本工事 (6 回以上)	平均	97.9	16.3

4. 密度および含水比

試験施工ヤードの品質確認のために、1 層ごとに所定の回転を行った後、RI 法 (1 層目各区画 3 点、2 層目各区画 6 点) および砂置換法 (1,2 層目とも各区画 1 点) によって密度および含水比を測定した。測定位置を図-2 に示す。また、各層の締固め度を図-4 に、含水比を図-5 に、層ごとの平均値を表-4 に示す。本工事では回転回数 6 回以上を基準としており、締固め度の平均値も 98% 程度であるが、今回の試験施工では同じ回転回数での締固め度がやや小さい値となっている。これは、添加率を変えた各区画が混ざらないようにキャタピラ等による敷き均し作業を行っていないためと考えられる。また、図-5 をみると、1 層目の含水比が 2 層目と比べてやや大きくなっているが、これは施工日によってストックヤードの母材の含水比が多少変動しているためである。

5. 混練プラントより採取した混合土のベントナイト添加率

各配合の混合土について、混練プラントの稼働時間を変えて始、中、終の 3 回に分けて採取し、それぞれメ

チレンブルー試験およびファンネル粘性試験を実施した。メチレンブルー試験の結果を図-6 に示す。混練プラントで製造された混合土は 8% および 10% 設定時にやや高い添加率となった試料があるものの、それ以外はほぼ設定どおりの添加率となった。

次に、ファンネル粘性試験とメチレンブルー試験の比較結果を図-7 に示す。ここでは自由水のしきい値を明確にするために縦軸をファンネル粘度の逆数としている。ファンネル粘性試験は、本工事でも日常管理手法として用いられているが、あらかじめ作成した検量線との相関性が高いことがわかる。添加率が 10% を超える試料に関し、ばらつきが大きくなっているが、これはファンネル粘性が 30 秒以上と測定に適した範囲を超えているためである。実際に 10% 以上の配合となる場合は試料採取量を減じ、検量線を作成し直すことで対応が可能である。

6. 比色計を用いたメチレンブルー吸着量の測定

メチレンブルー試験は、ベントナイトが他の粘土と比較して陽イオン交換容量、表面積、分散度が大きいことを利用し、メチレンブルー色素の吸着量を測定するも

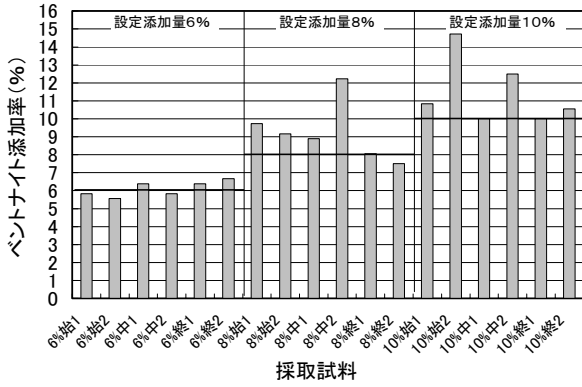


図-6 プラント採取試料のメチレンブルー試験結果

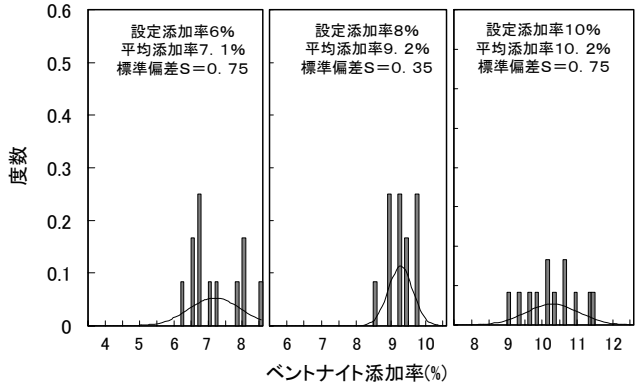


図-9 原位置試料のメチレンブルー試験結果

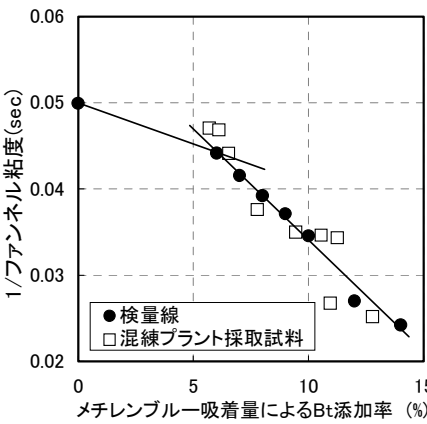


図-7 ファンネル粘性試験結果

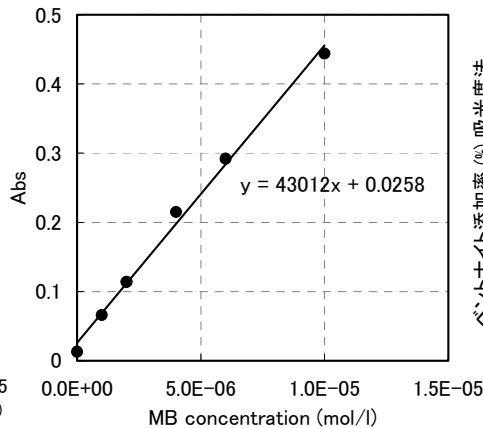


図-8 メチレンブルー濃度と吸光度

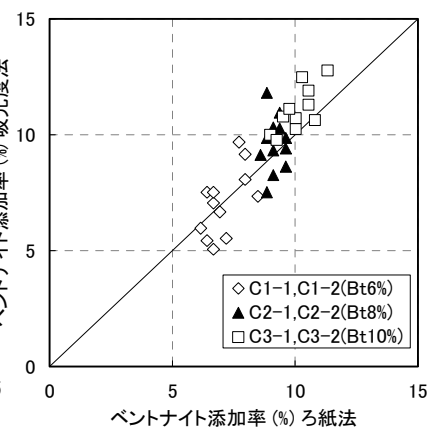


図-10 ろ紙法と吸光度法の比較

のであり、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの定量法として確立された方法である。しかし、この方法は目視による判定を含んでおり個人差が生じやすいという欠点があった。そこで、今回この欠点を補うため簡易型の比色計を用いて、過剰となったメチレンブルー色素の量を判定する方法を試みた。試験方法は、メチレンブルー溶液を加えるまでの手順は従来法と全く同様である。今回は、メチレンブルー溶液を予想される消費量10~40mlに対して50ml加えて試験を行った。その後30秒間スターラーで攪拌し、溶液100μlを分取して蒸留水で500倍に希釈した後、0.5μmのフィルターで固層を取り除いてる液の吸光度を測定した。吸光度の測定波長はメチレンブルー単量体の波長の最大吸収ピークである660nmとしている。図-8にメチレンブルー濃度と660nmの波長での吸光度(Abs)の関係を示す。図-8に示すように溶液中のメチレンブルー濃度と吸光度は線形の相関を示しており、これによってモンモリロナイトが吸着しきれない過剰量のメチレンブルーの量を求め飽和吸着量を算出した。なお、滴定の終点判定の精度を上げる目的で、メチレンブルーの飽和吸着点を吸光度計で測定する方法自体は Brindley ら¹⁾が行っており、今回は

この方法を参考としている。

試験については、試験施工ヤードの各区画の表面から採取した試料を用いて行った。採取位置は図-3に示したRI測定箇所と同位置で2層目に各区画6点ずつである。各試料のメチレンブルー試験によるベントナイト添加率の測定結果を図-9に、同じ試料によるろ紙法と吸光度法での添加率測定結果の比較を図-10に示す。図-9では採取位置による添加率のばらつきがみられるが、この測定結果には母材自体のメチレンブルー吸着量のばらつきのほか、試験による誤差等もある程度含まれているものと考えられる。図-10をみると、両試験法には相関性が認められるものの、ろ紙法による測定結果を基準とした場合、吸光度法による測定結果には、数%程度のばらつきが見られる。

今回、吸光度法による測定では滴定の作業を省力化するために、予想されるメチレンブルー消費量に対して過剰量を加え1回で測定する方法を用いた。そのため濃度によって吸光度との相関性に違いがみられた。また、スターラーによる攪拌時間の違い等も試験結果に大きな影響を与えている。本方法の実用化に当たっては今後、さらに試験方法を改良することが必要であると考え

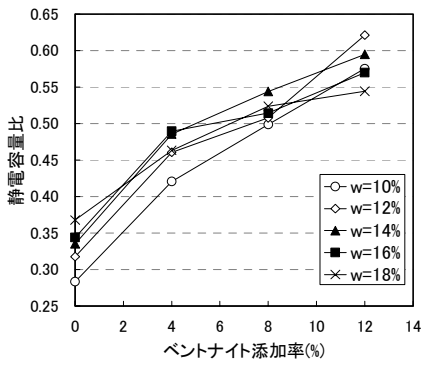


図-11 添加率と誘電率 (Dc95%)

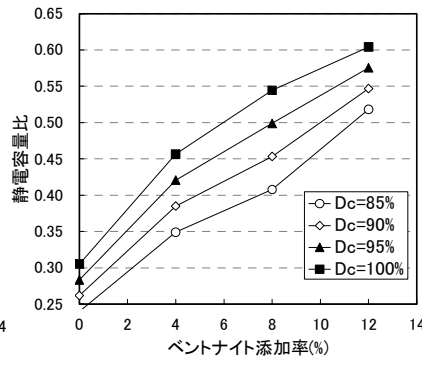


図-12 添加率と誘電率(w=10%)

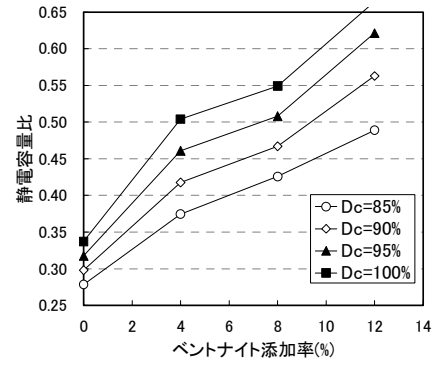


図-13 添加率と誘電率(w=12%)



写真-1 誘電率測定

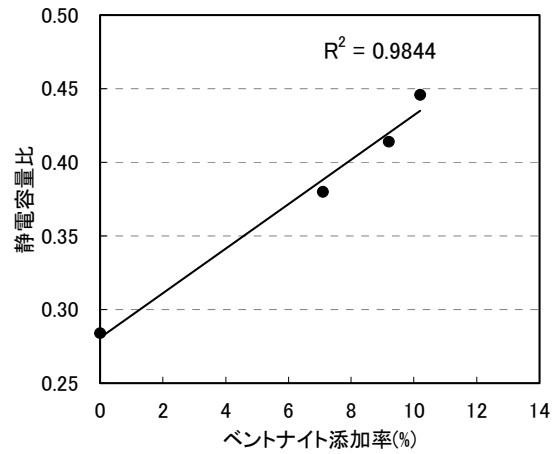


図-14 添加率と誘電率 (試験施工ヤード)

7. 誘電率によるベントナイト添加率の原位置測定

混合土に対するベントナイト添加率の管理は、通常、混練プラントで製造された試料に対して日常管理として実施しているが、施工されたベントナイト混合土に対する原位置での均一性評価は行っていない。しかし、ベントナイト混合土の目的は難透水性が遮水層全体として均一に確保されることであり、施工後の混合土に対する面的な品質管理も重要であると考えられる。そのため、今回、混合土の混合状態を施工後に原位置で簡易かつ迅速に測定する方法として、誘電率によってベントナイト量を定量する方法を試みた。

土の誘電率は、土中の水分量のほか、密度や温度、含まれる鉱物の種類によって異なる。本方法は、誘電率測定方式の水分計を使用して、通常の砂とベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの誘電率が同じ含水状態においても差があることを利用し、混合土地盤の表面誘電率を測定することによって混合土中に含まれるベントナイト量の定量を行うものである。原位置測定状況を写真-1に示す。

最初に、施工中の混合土と同じ材料を使用して、ベ

ントナイト添加率および含水比(w)、締固め度(Dc)を変化させた試料をφ10cmのモールド中に作成し、静電容量で誘電率を測定する方式の簡易型土壤水分計を用いて表面誘電率の室内測定を行った。図-11～13に測定結果を示す。試験は1試料に対し8回の測定を行ってその平均を計測値としている。図で縦軸の静電容量比は水分計に設定されている静電容量の範囲に対する測定値の比を表している。

これによると、混合土の表面誘電率は含水比や試料の乾燥密度だけでなく、試料のベントナイト添加率とも高い相関性があることがわかる。したがって、あらかじめ室内試験によって含水比および締固め度を変えた検量線を作成し、現地においてRI法等による密度、含水比測定と同時に本測定を行うことによって、ベントナイト添加率を算出することができるものと考えられる。

次に、試験施工ヤードにおいて実施した誘電率の計測結果を図-14に示す。本来、RI測定箇所において計測を行い、同位置で採取した試料のメチレンブルー試験より得られたベントナイト添加率との相関を求めるべきであるが、誘電率測定時とRI測定時の施工ヤードの表面乾燥状態に違いが見られたことと、それぞれの試験法

に誤差を含むため、今回は添加率ごとのヤードにおける誘電率測定値の平均値とベントナイト添加率の相関のみを求めた。測定はすべて2層目の6回転圧箇所を実施し、RI法による密度の測定箇所の周辺で1点につき10回の計測を行った。したがって図中の点は60回の計測の平均値を表している。測定時の含水比および締固め度はそれぞれ $w=10\sim 14\%$ 、 $D_c=85\sim 100\%$ の範囲でばらつきがあるが、平均値はベントナイト添加率との高い相関性が認められる。本測定法の問題点として混合土の含水比が高くなると計測不能もしくは精度が極端に悪くなることが挙げられるが、実際の施工では混合土の含水比は最適含水比付近になるように常時管理されているほか、シート敷設前には表面の含水比がほぼ一定となっており、極端に高い含水状態で測定を行うことはない。また、本測定は1点当たりの計測時間が数秒と極く短時間であるため、一度に多くの測定を実施することが可能である。したがって今回の測定のようにあらかじめ検量線を作成したうえで、原位置において多くの計測を行い、その平均値をとることによってベントナイト添加率の定量化が可能であるものとする。

8. 現場透水試験

施工されたベントナイト混合土の透水係数の確認方法としては、現在、主に定期的にサンプリングした試料を用いた室内透水試験が実施されている。具体的に宮崎最終処分場では、 $2,000\text{m}^3$ ごとに転圧後の混合土のサンプリングを実施して透水係数を求めている。しかし、この方法は結果が出るまでに時間がかかるため、これらの試験は主に施工後の品質確認を目的としたものとなり、日常の施工管理には直接反映されていない。したがって、短時間で原位置の透水係数を測定できればより緻密な品質管理が行えるものとする。

ベントナイト混合土の現場透水試験を行う場合、従来の方法を用いた場合の問題点として、時間がかかりすぎるもののほか、締固めた地盤の異方性の問題などが挙げられる。一方、不飽和地盤の鉛直方向の透水係数の原位置測定方法としては、Green-Amptモデルを用いる方法や西垣ら²⁾が提案した原位置での変水位透水試験方法等があるが、ベントナイト混合土地盤ではベントナイトの膨潤によって透水係数が時間依存性を持つことやサクシオン測定の実験の困難さなどが指摘されている³⁾。そこで、最初にベントナイトの添加率や初期含水比の異なる混合土についてケーシングを用いた簡易型透水試験器による室内試験を行い、その適用性について検討した。

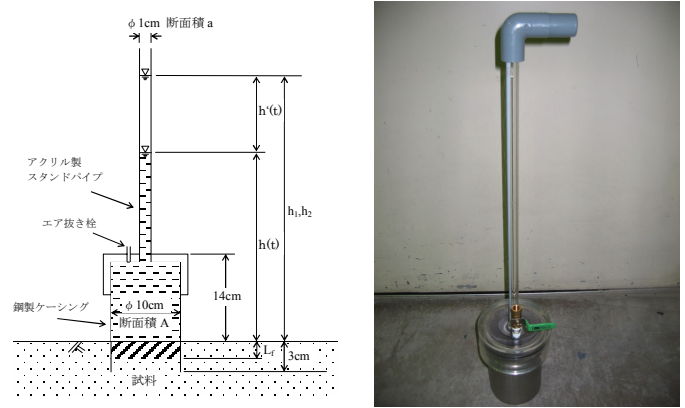


図-15 現位置変水位透水試験 写真-2 簡易現場透水試験器

(1) 室内試験による簡易型透水試験の検討

a) 使用材料

室内試験は試験施工に用いたものと同じ材料を用いて行った。試料の配合を表-1に示す。

b) 試験方法

試験装置を写真-2、試験の模式図を図-15に示す。供試体は、あらかじめ含水比を調整した試料を所定の密度となるように静的締固めにより作成した。最初に鋼製ケーシングをハンマーにて地盤中に3cm程度打ち込み、その後スタンドパイプを設置して注水し速やかに測定を開始する。測定時間は24時間程度を目安とした。

c) 結果の整理

不飽和土の透水係数とその変化は初期含水比とサクシオンに依存するが、Green-Amptモデルでは地盤のサクシオンが常に一定であると仮定しており、時間経過に伴う浸潤領域の増加とともにサクシオンの影響が減少して重力の影響が卓越するため、この勾配を求めることによって地盤の飽和透水係数を得ることができる。これについて西垣らは以下の方法を公表している⁴⁾。

図-15に示す鉛直方向の浸透のGreen-Amptモデルは次式で表せる。

$$v = k \frac{H_0 + H_f + L_f}{L_f} \quad (1)$$

ここに、 v :浸透流速(cm/sec)

k :透水係数(cm/sec)

H_0 :地表面の圧力水頭(cm)

H_f :浸潤前線のサクシオン水頭(cm)

L_f :浸潤領域の長さ(cm)

図-1より、 $H_0 = h(t)$, $v = \frac{a}{A} \frac{dh'(t)}{dt}$, $L_f = \frac{ah'(t)}{A\beta}$

β :有効間隙率

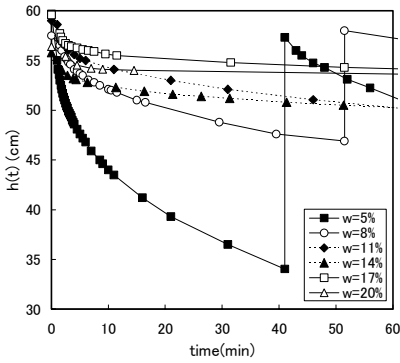


図-16 t~h(t)関係の例(Bt8%)

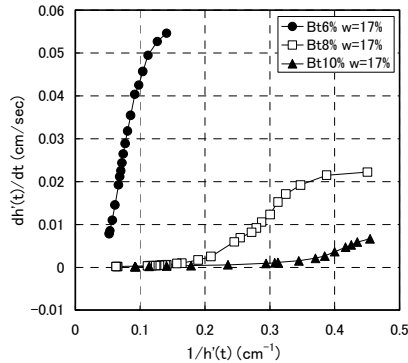


図-17 1/h'(t)~dh'(t)/dt 関係の例 (w=17%)

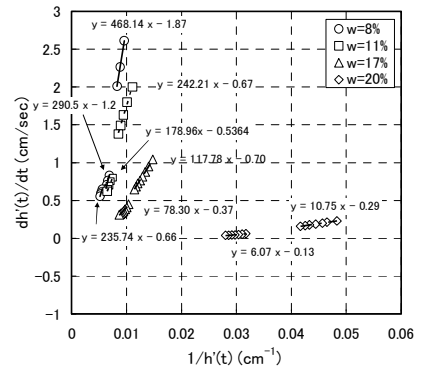


図-18 試験結果(Bt0%)

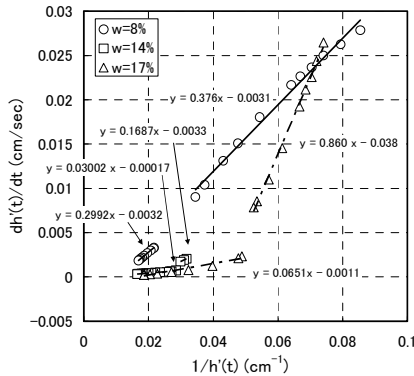


図-19 試験結果(Bt6%)

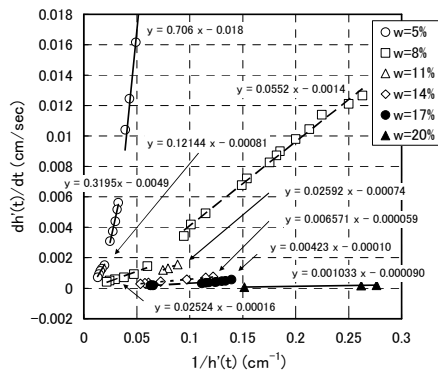


図-20 試験結果(Bt8%)

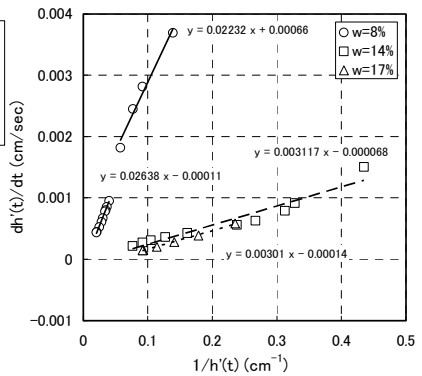


図-21 試験結果(Bt10%)

表-5 試験結果

$$\begin{aligned} \frac{dh'(t)}{dt} &= \frac{A}{a} k \frac{h(t) + H_f + L_f}{L_f} \\ &= \frac{A^2 \beta}{a^2} k \frac{h_1 - h'(t) + H_f}{h'(t)} + \frac{A}{a} k \\ &= \frac{A^2 \beta}{a^2} k \frac{h_1 + H_f}{h'(t_0)} + \frac{A}{a} k \left(1 - \frac{A\beta}{a}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで dh(t)/dt と 1/h'(t) の関係をプロットすると y 切片が $\frac{A}{a} k \left(1 - \frac{A\beta}{a}\right)$ となる直線が得られる。

この方法では試験中に水位を変化させることにより、直線の傾きを変え、k の他、β、H_f を求めることができるが、今回は、あらかじめ室内試験により得られた β の値を用いて k および H_f を求めた。

d) 試験結果

図-16 に試験開始時から 60 分後までの h(t) の経時変化の例を、図-17 に dh(t)/dt と 1/h'(t) 関係の一例を示す。図-17 をみると、時間経過とともに式(2)の傾きが変化しており、Green-Ampt モデルの仮定が必ずしも満足されていないことがわかる。これは H_f あるいは k が時間とともに変化していることを表しており、拘束を受けない地表面付近のベントナイトの吸水による膨潤過程の影

Bt 添加率 (%)	初期含水比 w(%)	H _f (cm)	k(cm/sec)	k(cm/sec) (室内試験)
0	8	116	2.4 × 10 ⁻⁴	-
	11	137	2.3 × 10 ⁻⁴	-
	17	44	2.6 × 10 ⁻⁴	6.7 × 10 ⁻⁴
	20	-43	1.3 × 10 ⁻⁴	-
6	8	3	1.1 × 10 ⁻⁶	-
	14	76	8.9 × 10 ⁻⁸	-
8	17	-22	7.7 × 10 ⁻⁷	1.2 × 10 ⁻⁷
	5	46	2.5 × 10 ⁻⁷	7.2 × 10 ⁻⁸
	8	83	5.7 × 10 ⁻⁸	5.2 × 10 ⁻⁸
	11	-25	2.1 × 10 ⁻⁸	6.3 × 10 ⁻⁸
	14	50	3.2 × 10 ⁻⁸	-
10	17	-20	9.8 × 10 ⁻⁸	2.1 × 10 ⁻⁸
	20	-46	9.6 × 10 ⁻⁸	8.3 × 10 ⁻⁹
	8	104	3.8 × 10 ⁻⁸	-
10	14	-16	3.6 × 10 ⁻⁸	-
	17	-39	9.7 × 10 ⁻⁸	1.5 × 10 ⁻⁸

響が大きいものと考えられる。図-18~21 に式(2)のプロット結果をベントナイト添加率ごとに示す。図に示すように、式(2)がほぼ直線とみなせるまでの水位低下量(浸透量)は、ベントナイトの添加率や初期含水比によって異なっている。今後、地盤の条件に合わせた適正な測定時間あるいは浸透量を求める必要があるが、今回は約 5 時間経過後から 24 時間程度までの計測値を用いて k および H_f を求めた。得られた試験結果を表-5 に示す。

表には同配合の別試料の室内透水試験結果を記入している。両者を比較すると、本試験法によって得られた透水係数は室内透水試験の結果と近い値となっていることがわかる。

また、表には式(2)より求めた H_f も記入した。サクシオンメータを用いて別に求めた地盤のサクシオンは 100~400cm であり、 H_f はこれらの値と比べて非常に小さい値となり、また、高含水比の試料では計算上 H_f が負の値となるケースもみられた。 H_f は本来正の値となるはずであり、今後の検討課題とする。

(2) 試験施工ヤードにおける現場透水試験

試験施工ヤードでの透水試験は、ベントナイト添加率の異なるヤードで3種類の現場透水試験を実施するほか、サンプリングした試料の室内透水試験を実施して各試験法の有効性について検討を行った。

実施した3種類の現場透水試験の試験条件の模式図を図-22に、試験状況を写真-3に示す。

a) A法 (側壁開放型)

図でA法(側壁開放型)はJGS 1316-2003に準じた方法であり、今回の試験ではφ20cm×h20cmの試験孔を使用した。透水係数の計算式は境界条件によって異なるが、今回は試験期間を約1日としており、境界条件の影響はほとんどないと考えられることと、B法による試験結果との整合性を図るため式(3)を用いた。

$$k_h = \frac{Q}{2\pi L^2} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{L}{r_0} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{L} \right)^2} + \frac{r_0}{L} \right] \quad (3)$$

Q: 全注入流量

b) B法 (側壁止水型)

B法(側壁止水型)はA法による試験終了後に同じ孔を使用して行った。試験孔にφ14cmの塩ビ管(VP管)をセットし、ASTM D6391-99(2ステージ法)を参考に塩ビ管と地盤の隙間に高膨潤性の粒状ベントナイトを1cm程度詰め、突き固めと注水による膨潤を繰り返して供試体の上部まで側壁を止水した。その後ベントナイトを半日以上膨潤させて試験を開始した。B法における透水係数の計算式は式(3)と同様にピット中心軸上の点湧源からの放射流を仮定した式(4)を用いた。式(4)は式(3)において点湧源がピット最下端のみであると仮定した式である。

$$k = \frac{Q}{4\pi L r_0} \quad (4)$$

c) C法 (鉛直浸透型)

C法は前述の室内試験と同様の方法を用いて24時間

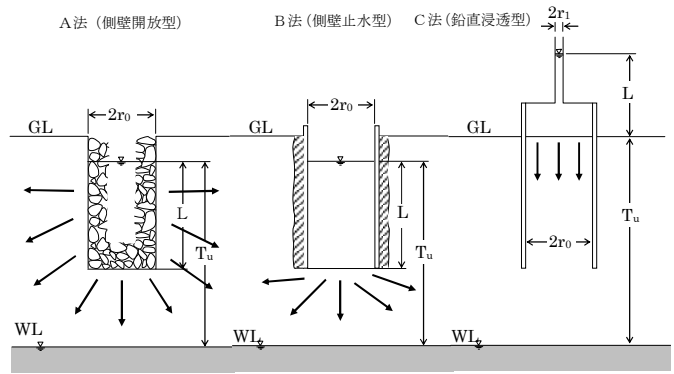


図-22 実施した現場透水試験条件



写真-3 現場透水試験状況

の測定を行った。

d) 水平方向透水係数の推定

A法とC法の結果より水平方向の透水係数 k_h を以下に示す方法⁵⁾で算出した。

等方性土中の三次元浸透流の基本方程式は以下のとおりである。

$$k_i \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (5)$$

ここに、 k_i : 等方性土中の透水係数

Φ : 流れのポテンシャル

一方、水平(x,y)方向透水係数 k_h 、鉛直(z)方向透水係数 k_v をもつ異方性土中の三次元浸透流の基本方程式は以下のとおりである。

$$k_h \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + k_h \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + k_v \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

いま、上述の異方性土中の浸透流に対して以下の座標変換を考える。

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x}{m}, y' = \frac{y}{m}, z' = z \\ m &= \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入すると以下ようになる。

$$k_i \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z'^2} \right) = 0 \quad (8)$$

以上より、異方性土中の浸透流も水平方向のものを m で除することにより、等方性土中の浸透流と同じ式で表せることが示された。

いま、ここで示した変換則を式(8)に適用すると次式が得られる。

$$k_h = \frac{Q}{2\pi L^2} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{mL}{r_0} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{mL} \right)^2} + \frac{r_0}{mL} \right] \quad (9)$$

e) 試験結果

表-6 に試験施工ヤードからサンプリングした試料の試験結果を示す。また、試料のサンプリング状況を写真-4 に示す。表-6 をみると、それぞれの試料の含水比や乾燥密度にはばらつきがあり、ベントナイト添加率による透水係数の違いもほとんど確認できない。しかし、サンプリング試料の採取高さによる違いでは1層目、あるいは2層目と比べて、中部の層境を含む試料の透水係数がやや低くなっている。これは、1層目と2層目の層境にベントナイトによる止水層ができたためと考えられる。

図-23 に各試験法によって得られた試験施工ヤードの区画ごとの透水係数と本施工箇所における透水係数の値を、サンプリング試料の室内透水試験の結果と併せて示す。

それぞれの試験法による値を比較すると、A法で得られた透水係数は水平方向の値に大きな影響を受けていることがわかる。またB法で得られた値についてもA法よりは小さいものの同様の傾向が認められる。また、これらの異方性は、本施工箇所と比べて試験施工ヤードでより卓越した傾向を示している。これは、試験施工ヤードでは添加率の異なる区画を連続して造成するために、転圧前の敷き均しの際にブルドーザ等のキャタピラによる練り返しを行わずに、各層でバックホウによる上部からの転圧のみで一度に成型を行ったためと考えられる。このため、母材に含まれる粘土塊や砂礫が十分にほぐれず、締固め度を大きくしても水平方向への水みちが残ったものと思われる。このことは、特に現地発生土のように不均一な粒径を含む材料を用いて混合土の施工を行う際に、キャタピラやタンピングローラなどで混合土の練り返しを行ってから転圧を行うことが、水みちのない均一な遮水層を作るために重要であることを示唆している。

また、試験施工箇所と同様に、本施工箇所でもA法で得られた値はサンプリング試料に比べて大きな透水係

表-6 サンプリング試料の試験結果

採取位置		含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	透水係数 (cm/s)
B1-2 (Bt 0%)	上部	24.1	1.610	1.0E-05
	中部	11.5	1.757	5.0E-06
	下部	15.7	1.362	4.0E-05
C1-2 (Bt 6%)	上部	11.2	1.601	1.8E-07
	中部	19.2	1.560	8.7E-08
	下部	11.9	1.708	1.5E-07
C2-2 (Bt 8%)	上部	6.7	1.692	1.0E-07
	中部	14.0	1.630	5.9E-08
	下部	14.0	1.714	7.2E-08
C3-2 (Bt 10%)	上部	12.2	1.563	8.0E-08
	中部	15.4	1.584	5.1E-08
	下部	14.4	1.653	5.2E-08



写真-4 試料のサンプリング

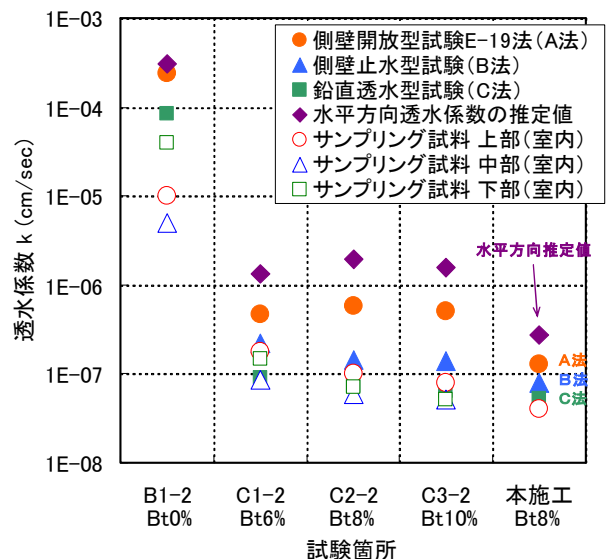


図-23 現場透水試験結果

数となっている。もともとA法による計測では定常状態となるまでの時間が地盤の透水係数に比例するため、理論的に 1.0×10^{-7} cm/sec 以下の地盤では数日で定常状態に至っているとはいえ、この方法で短時間に 10^{-8} cm/sec オーダーの透水係数を求めることは非常に困難

であると考えられる。ただ、C法においても、ほぼ24時間の計測の中で得られた値には、室内試験の場合と同様に時間依存性がみられた。これは、室内試験で明らかになったように、ベントナイト混合土はベントナイト自体の膨潤過程によってその初期含水比が通常の不飽和土以上に浸潤過程に大きな影響を及ぼすためと考えられる。

9. ケロシンによるベントナイト混合土の透水試験

ベントナイト混合土は含まれるベントナイトが水との相互作用によって膨潤し間隙を埋めることによって透水係数が変化する。ケロシン等の非極性流体を用いて短時間で現場透水試験を行うことを目的として、ベントナイト添加率と締固め度および初期含水比による透水係数の違いを室内試験によって調べた。

供試体はあらかじめ設定含水比に調整された試料を12時間以上おいた後、設定密度となるように静的締固め法により剛壁モールドに詰めて作成した。試験結果を図-24に示す。これによると、ケロシンによる透水係数はベントナイト添加率よりも含水比と密度が大きく影響していることがわかる。これは、ケロシンなどの非極性流体ではベントナイトの膨潤が阻害されるため、ベントナイトがあらかじめ膨潤した後の間隙比のみによって透水係数が決まるためと考えられる。

10. まとめ

主に宮崎最終処分場で幾つかの新しい品質確認試験を実施し、以下のような結果が得られた。

- ①誘電率によるベントナイト定量については均一性の評価手法として有効であることが確認された。今後は様々な種類の母材やベントナイトを用いた場合のデータが必要と考える。
- ②比色計を用いたメチレンブルー試験については、濃度による吸光度とメチレンブルー吸着量の相関性に違いがみられたことや、スターラーによる攪拌時間の違いも試験結果に影響を与えることから、実用化に当たっては、さらに試験方法を改良することが必要である。
- ③ベントナイト混合土は、施工法によって水平方向と鉛直方向の透水係数に大きな差(10~20倍)が出るため鉛直方向の透水係数を測定することが必要である。
- ④Green-Amptモデルに基づく簡易型現場透水試験によって得られた透水係数は室内透水試験の結果と近い値となり、短時間で鉛直方向の透水係数を測

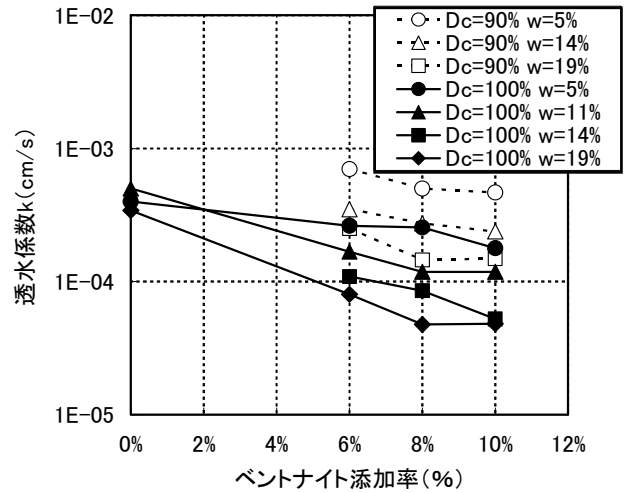


図-24 ケロシンを用いた透水試験結果

定する方法として有効である。ただし、ベントナイト自体の膨潤過程によってその初期含水比が通常の不飽和土以上に浸潤過程に大きな影響を及ぼす。そのため測定値には時間依存性がみられ、今後さらなる研究が必要である。

本稿で述べたこれらの試験は幾つかの課題もあるが、特に、原位置の測定では簡便な試験法で多くのデータを得ることも意味のあることであると考えており、今後も研究を継続していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Phan Thi Hang and G.W. Brindley: Methylene blue absorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities (Clay-organic studies XVIII). Clays and Clay Minerals, 1970.
- 2) 西垣誠, 竹下祐二, 織田敦史: 現位置における不飽和土の透水係数の測定法, 第26回土質研究発表会講演集, 1991.
- 3) 西垣誠他: 不飽和土原位置浸透特性試験の実施例, 第17回土質工学研究発表会
- 4) Waste Containment Facilities Guidance for Construction Quality Assurance and Quality Control of Liner and Cover System by David E. Daniel and Robert M. Koerner, American Society of Civil Engineers, 1995.
- 5) 松本徳久他: フィルダムコア材の異方性透水係数の現位置測定, 土木技術資料 28-10(1986).
- 6) ASTM: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, 2001 ASTM D5084-90, 1990.
- 7) ASTM: Standard Test Method for Field Measurement

of Hydraulic Conductivity Limits of Porous Materials
Using Two Stages of Infiltration from a
Borehole, ASTM D6391-99.

- 8) (社)地盤工学会：締め固めた地盤の透水試験方法
地盤工学会基準, JGS1316-1995.
- 9) 星野寛, 佐藤道明, 水野克己, 岡田朋子, 本郷隆夫, 藤原照
幸：最終処分場におけるベントナイト混合土の製造
と施工事例, 平成 14 年度施工技術報告会, 最近の建設
技術と施工事例, (社)日本建設機械化協会関西支部
- 10) 土居洋一, 須川智久, 黒島一郎, 戸村豪治, 今泉繁
良, 飯塚正樹：限界添加率に基づくベントナイト混
合土の配合設計と現場施工実験, 第 5 回環境地盤工
学シンポジウム発表論文集, pp.89-94, 2003.