

ソイルレイヤー工法の新しい品質保証技術

黒島 一郎・戸村 豪治

平成 10 年度に改訂された最終処分場の構造基準では、処分場の底面や法面に構築する遮水層の構造が 3 タイプ示された。なかでも、粘土層と遮水シートを組み合わせる構造は、遮水層が厚く、また異種材料が組合わされていることから安全性の高い構造として注目されている。

このタイプにおける粘土層の要件は透水係数を 1×10^{-6} cm/sec 以下とすることであるが、通常の土質材料を締固めてこの要件を満たすことは困難である。さらに、最近では粘土層の透水係数を基準の 1/10 となる 1×10^{-7} cm/sec 以下として設計される例も多いことから、土質材料にベントナイトを混合して作製した土質遮水層（以下、ベントナイト混合土という）が一般的に用いられる。ベントナイト混合土の施工では、原位置において均一に難透水性を確保することが最も重要となるため、信頼性の高い品質管理方法の確立が技術上の大きな課題となる。

三井住友建設株式会社では、このように遮水シートの下にベントナイト混合土を施工して複合構造を構築する工法（以下、ソイルレイヤー工法という）に関して、これまでその品質保証技術の開発を行ってきた。本報文では、管理型最終処分場工事で実施した品質管理試験結果を基に、ソイルレイヤー工法の新しい品質保証技術について紹介する。

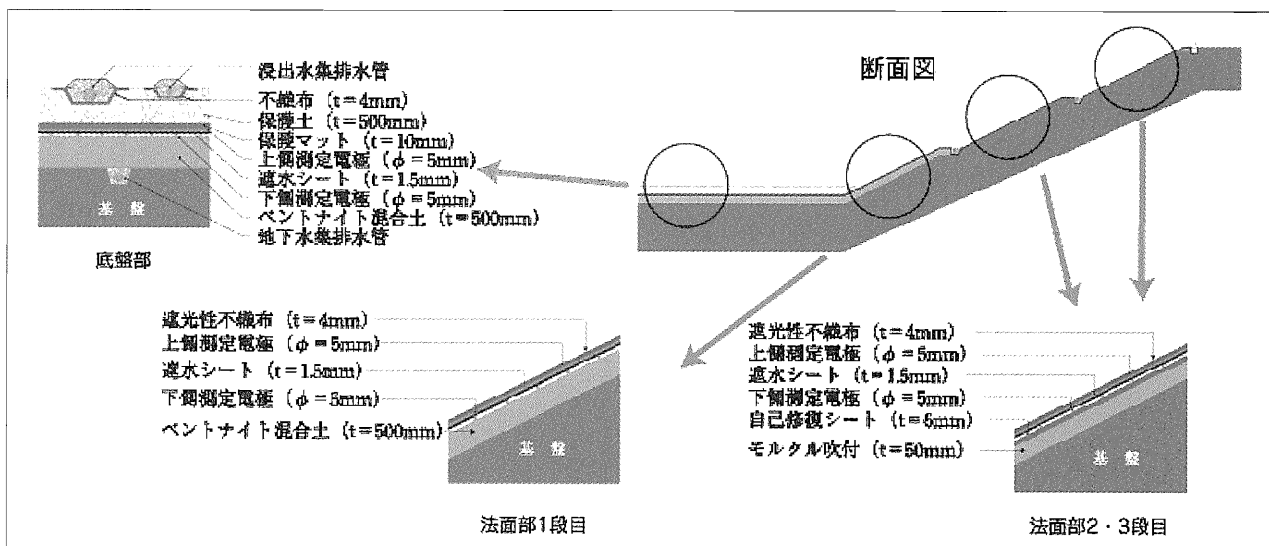
キーワード：最終処分場、遮水、品質保証、ベントナイト、環境

1. はじめに

近年、全国的に最終処分場の残余容量が逼迫するとともに、廃棄物の質の多様化に伴い最終処分場の浸出水から有害物質が検出されるなど、住民の間で廃棄物処理に対する根強い不信感が生じている。このため、平成 10 年には廃棄物処理法の一部改正によって基準の強化がなされ、以下のように 3 タイプの遮水工の構

造が示された。

- ①厚さ 50 cm 以上、透水係数が 1×10^{-6} cm/sec 以下である粘土層に遮水シートが敷設されていること
- ②厚さ 5 cm 以上、透水係数が 1×10^{-7} cm/sec 以下であるアスファルト・コンクリートの層に遮水シートが敷設されていること
- ③不織布その他の物の表面に二重の遮水シート（二重の遮水シートの中に双方のシートが同時に損傷することを防止できる不織布その他の物が設けられてい



図一1 ソイルレイヤー工法の遮水構造の例

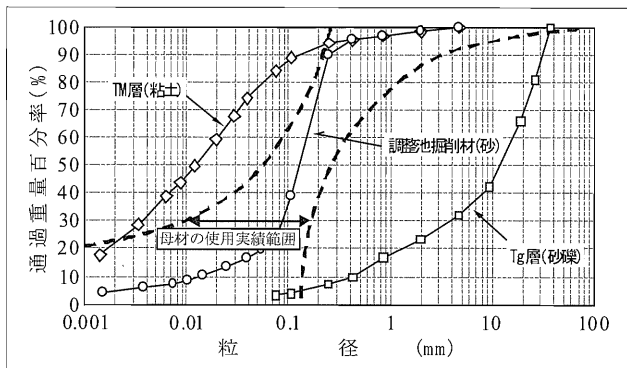
る物に限る)が敷設されていること

ソイルレイヤー工法は、この中で①の要件に対応した工法である。図一1に示すように遮水シートの下に現地発生土(以下、母材という)とベントナイトを混合して作製した粘土層を設けている。粘土層の主構成分であるベントナイトは環境負荷にならない天然の粘土鉱物であるため、恒久的に安定した粘土層を造成できる。さらに、粘土層は、地盤への追従性が良く、ひび割れ時にもベントナイトの膨潤性により自己修復する性質がある。

このように、ソイルレイヤー工法は、遮水シートが万が一破損した場合でも浸出水の拡散を防ぐ機能を持っていることから、シートの破損による漏水に対する施主、周辺住民の不安に対して説得力のある工法と考えている。

2. 配合設計

ベントナイト混合土の配合設計においては、母材とベントナイトの選定が重要となる。母材の選定にあたっては粒度分布が重要な要因であることから、従来の実績から得られた母材の粒度分布範囲を図一2に示す。



図一2 母材の粒径加積曲線(成島ら¹⁾に加筆修正)

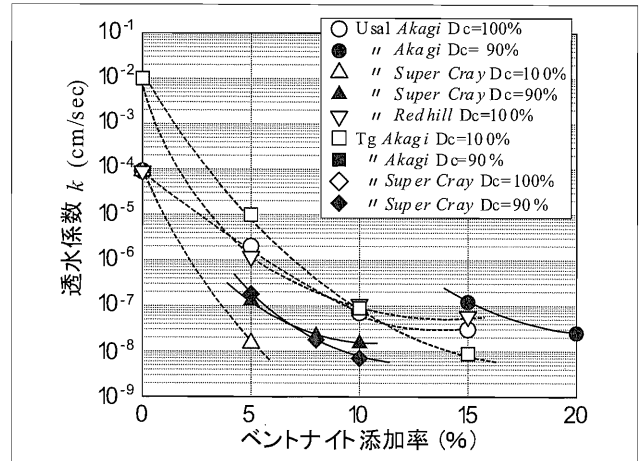
この図より、ベントナイト混合土の母材には細粒分質砂に属する物が多く使われていることがわかる。礫分の混入が多いと施工性は良いが、ベントナイトを均一に混合することが困難になる。一方、粘土質シルト分が多いとベントナイト添加率は少なくなるものの施工性が悪くなる。

ベントナイト混合土ではベントナイトの持つ膨潤特性を利用して遮水性能を発揮するため、粘土質シルト分を多く含む材料よりも、混合性および施工性の良好な材料を選定することが重要である。

図一2には実際の管理型最終処分場にて選定対象となった3種類の現地発生土の粒度分布を記している。この現場では最終的に調整池掘削材を採用している。

混合土の透水性は管理基準があり、ベントナイトの添加率のほか、施工時の含水比や締固め度に影響される。配合の決定に当たってはこれらの条件を変化させて室内透水試験を行う。

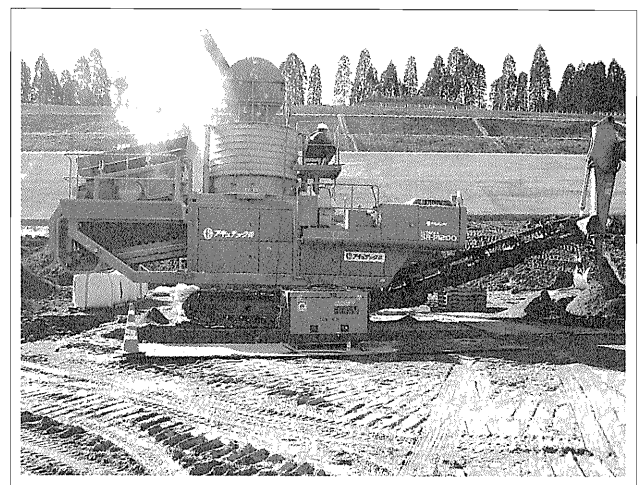
図一3に示した例のように、添加率の増加に伴って透水係数が低下し、ある添加量から透水係数がほとんど一定になることがわかる。この値はしきい値と呼ばれ、ベントナイトの添加率は、このしきい値以上の配合とすることになる。



図一3 室内透水試験結果の例

3. 施工方法

ベントナイト混合土の製造方法には原位置混合とプラント混合があるが、近年では、移動式プラント混合機を用いた方法が主流となっている(写真一1)。



写真一1 自走式混練プラント

製造された混合土は、ダンプトラックによって現地へ運搬し、ブルドーザによる敷均し、振動ローラ等による転圧を行う。また、法面に施工を行う場合は、勾配によって異なるが一般的に3割勾配では振動ローラ、



写真-2 ベントナイト混合土の施工（法面部）

2割勾配の場合はバックホウによる転圧を行う（写真-2）。

施工時の留意点としては、降雨の影響が挙げられる。ベントナイト混合土が吸水・膨潤し泥土化すると、含水比を低下させることは困難である。このため1mm/h以上の降雨量になると直ちに施工を中止し、まだ締固めされていない状態であれば直ちに締固めて養生シートなどで全面養生を行う必要がある。また、混合土の施工では、遮水シートとの密着性を確保するため、平坦性が要求される。締固めた混合土は粘着力により高い硬度を有し、モータグレーダによる削取りが困難であるので、敷均し時には入念な厚さ管理が必要となる。

透水係数と密接な関係にある締固め度について、実際の管理型最終処分場で実施した試験施工における転圧回数と締固め度との関係を図-4に示す。

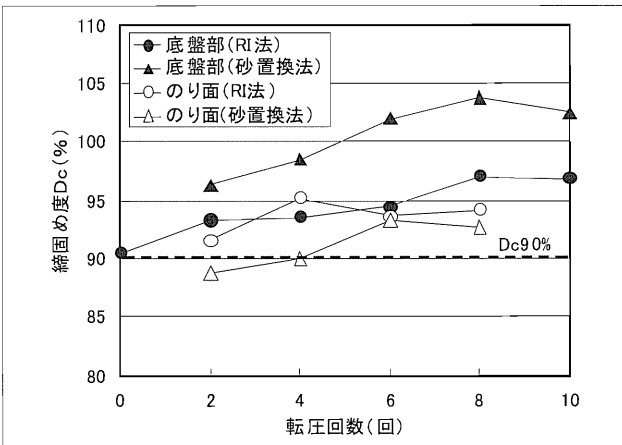


図-4 転圧回数と締固め度

図-4に示すように、法面の転圧は底盤部に比べて締固め効果が上がりにくいいため特に入念な作業が必要である。この現場では、2割以上の勾配を持つ法面に

対しては、登坂型振動ローラによる転圧も実施している。登坂型振動ローラは締固め部が面状のクローラ式のため深層部まで均一な締固めが行えるほか、転圧後の法面整形作業が不要となるなど良好な結果が得られている。

4. 品質管理

締固めたベントナイト混合土の品質管理は、本来、透水係数で行う必要がある。しかし、実際には施工後に全面水張り試験を行うことは不可能であり、通常は室内試験から得られたベントナイト添加率および密度、含水比の品質管理図を用いた間接的手法によって品質管理を行うほか、サンプリング試料の室内透水試験を実施する。

ベントナイト混合土の品質管理を行う際には、施工時のトラフィックビリティ確保に必要な含水比の管理幅を求める必要がある、含水比および締固め度を変えた供試体によるコーン指数試験を実施する。

ダンプトラックの走行に必要なコーン指数の値である1,176 kN/m²を基準として、D_c 90%における含水比の範囲を求める。次に、含水比と密度を変えた試料の透水試験を実施して、締固め管理グラフを作成する。

図-5に品質管理図の例を示す。ここでは、強度と透水係数の管理基準をそれぞれ、コーン指数 q_u = 1,176 kN/m²以上、室内透水試験による透水係数 5 × 10⁻⁸ cm/sec以下とし、D_c 90%以上、w = 8~20%を管理目標に設定している。

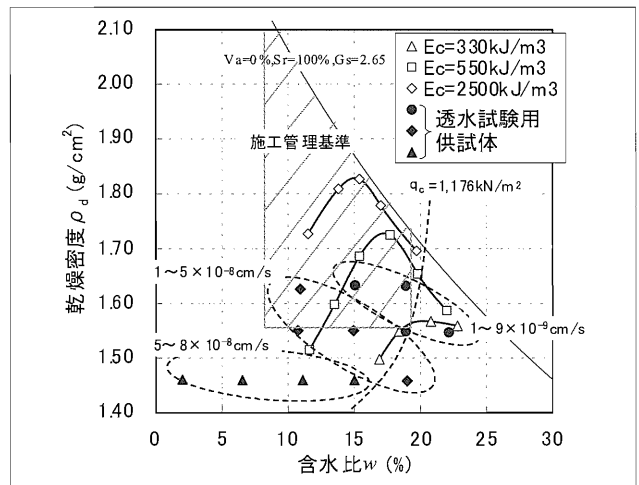


図-5 品質管理図の例

実際の施工においては、通常、密度と含水比の管理に通常透過型のRI法が用いられる。図-6にRI試験を用いた品質管理試験結果の例を示す。このように含水比と乾燥密度の関係から間接的に透水係数の管理

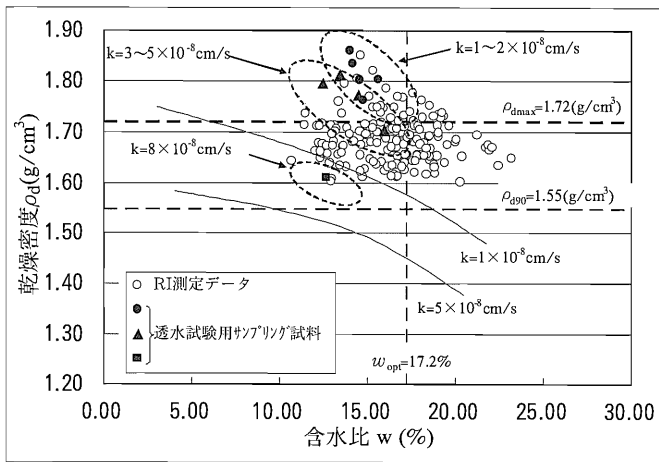


図-6 RIによる品質管理試験結果の例

が行われる。

しかしながらこれらの方法には、以下に示す課題が挙げられる。

①所定の透水係数を得るためには、密度および含水比の他、施工後に混合土中のベントナイトの均一性が確保されている必要がある。

しかし、ベントナイト量の確認は混合土の製造時に行うのみである。

②施工後にブロックサンプリングを行って室内透水試験を実施しているが、結果が得られるまでに長時間を要し（1週間以上）、試験数量も限られるため、施工管理への迅速なフィードバックならびに面的な管理が困難である。

そこで、今回新しい品質管理手法により、施工後の混合土に対する面的な品質保証技術として管理施工後に原位置で

- ・誘電率によるベントナイト添加率の原位置測定方法
- ・簡易現場透水試験

の2種類の方法を実施した。

(1) 誘電率によるベントナイト添加率の原位置測定
土の誘電率は、土中の水分量の他、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事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。現位置測定状況を写真-3に示す。

図-7～図-9に、室内試験によってベントナイト添加率及び含水比、締固め度を変化させた試料の表面誘電率の測定を行った結果を示す。

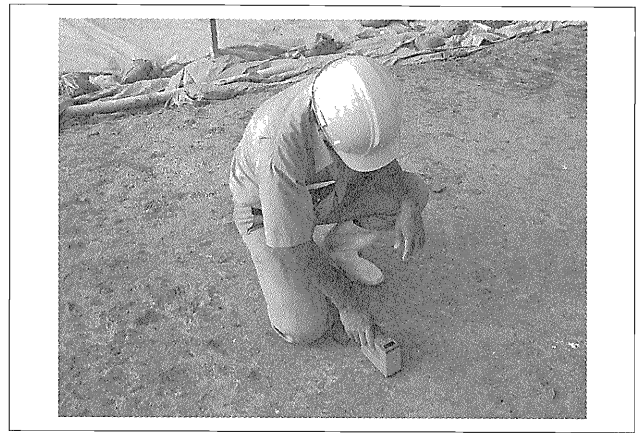


写真-3 誘電率測定状況

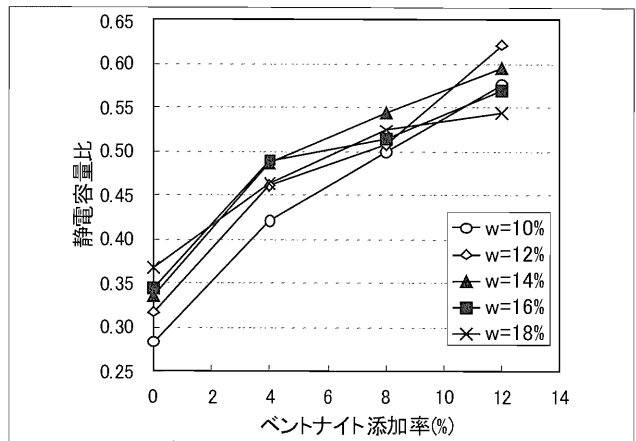


図-7 添加率と誘電率 (D_c: 95%)

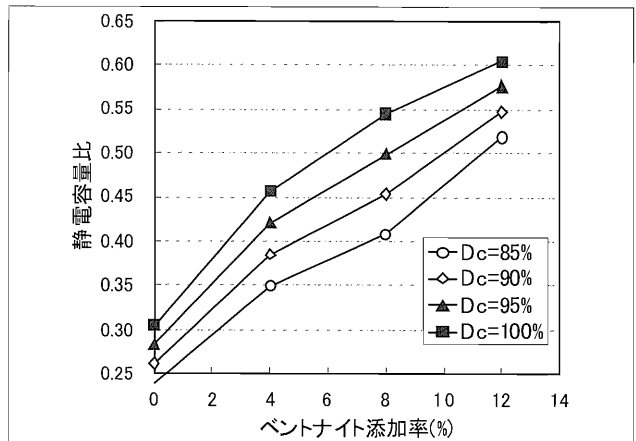


図-8 添加率と誘電率 (w=10%)

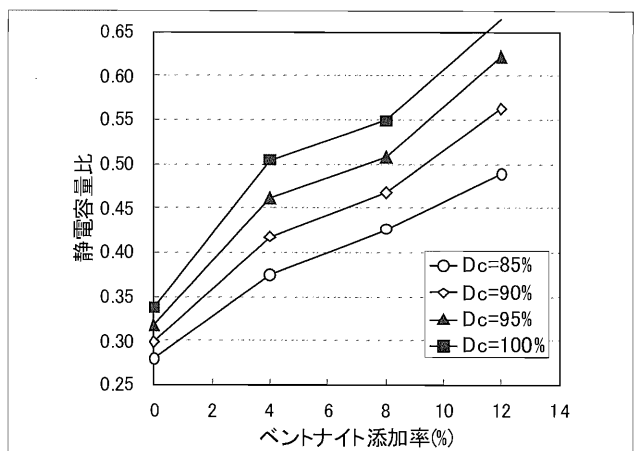


図-9 添加率と誘電率 (w=12%)

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及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ことになる。

次に、実際の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-10に示す。

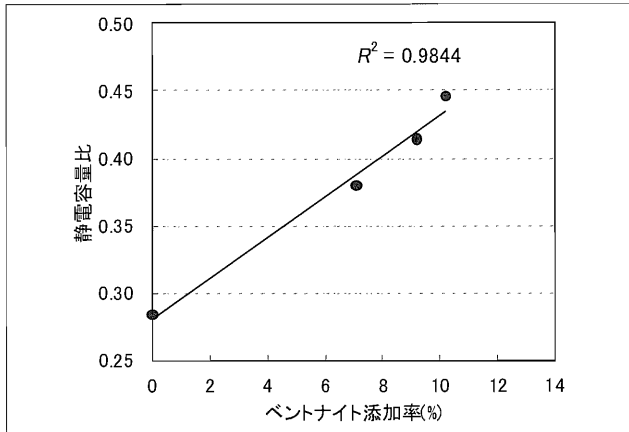


図-10 添加率と誘電率 (実施ヤード)

図-10は、RI法による密度の測定箇所の周辺で1点につき10回の計測を行い、その平均値を表している。測定時の含水比及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、ベントナイト混合土の施工では施工時の含水比管理を常時行っているほか、シート敷設前には表面の含水比はほぼ一定となっている。また、本測定は

1点当たりの計測時間が数秒と極短時間であるため、一度に多くの測定を実施することが可能である。

したがってあらかじめ検量線を作成したうえで、原位置においてある程度の計測を行い、その平均値をとることによって施工後の混合土の均一性について面的な品質管理を行うことができた。

(2) 簡易現場透水試験

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 (例えば $1/2,000\text{ m}^3$) にサンプリングした試料の室内透水試験が実施されている。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には反映されていない。

また、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、難透水性の不飽和土の透水係数を求めることが困難であることや、締固めた地盤の透水性に関する異方性の問題が挙げられる。

図-11、図-12に実際の管理型処分場における試験施工で実施した3種類の現場透水試験の模式図と各試験法によって得られた透水係数の値を示す。

図-12に示した水平方向透水係数の値はC法で得られた値が鉛直方向の透水係数を表したものと考えて、A法とC法の結果より松本ら²⁾の方法で算出したものである。図-12にはサンプリング試料の室内透水試験の結果も併せて示しているが、A法 (側壁開放型) あるいはB法 (側壁止水型) 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。

これは、特に締固めた地盤で多くみられる現象であるが、鉛直方向に比べて水平方向の透水係数が大きくなる傾向を示すため、実際の地盤の遮水性を表す鉛直

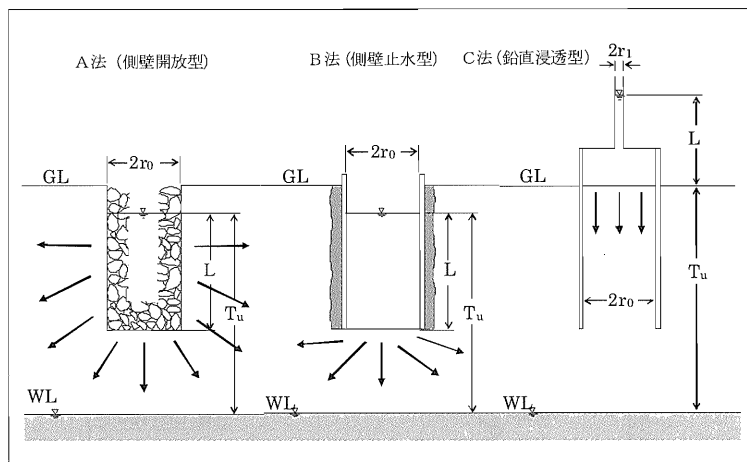


図-11 現場透水試験条件の模式図

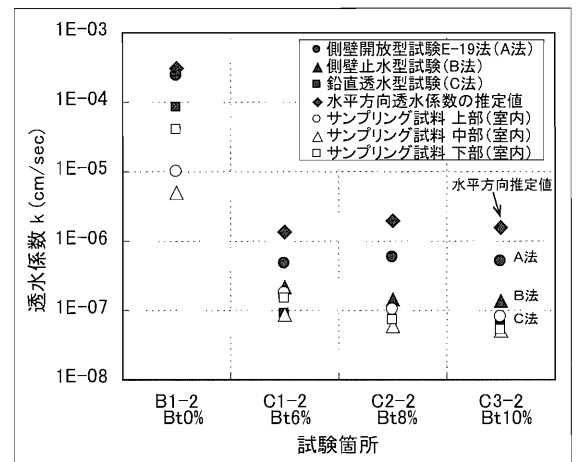
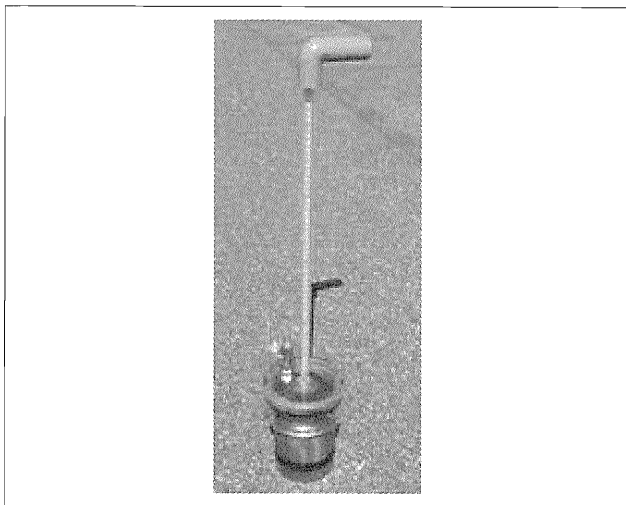


図-12 現場透水試験結果の比較

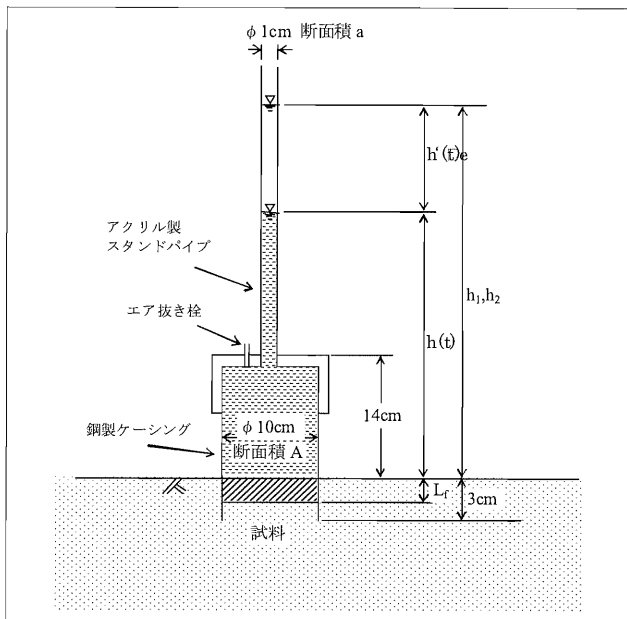
方向の透水係数を求めるためには、C法（鉛直浸透型）のようにケーシングを用いた方法が有効であることがわかる。

また、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 1×10^{-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ず、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^{3),4)}。

そこで今回新たにC法の試験条件を元に簡易型の透水試験機を開発した（写真—3）。また図—13に試験の概要を示す。



写真—3 簡易透水試験器



図—13 簡易透水試験の原理

この試験法は、Green-Amptモデルに基づき、不飽和地盤中への水の浸潤速度から鉛直方向の透水係数を求めるものである。

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⁵⁾。

試験方法は最初に $\phi 10$ cmのケーシングを地盤中に2~3 cmたたき込み、その後スタンドパイプをセットして空気を抜きながら注水して、スタンドパイプの時間あたりの水位変化を目視で記録する。

本試験法によってベントナイト添加率および初期含水比を変えて実施した試験の結果を表—1に示す。

表—1 簡易現場透水試験結果

Bt 添加率 (%)	初期含水比 w (%)	Hf (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}	—
	17	-22	7.7×10^{-7}	1.2×10^{-7}
8	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}	—
	17	-20	9.8×10^{-8}	2.1×10^{-8}
10	20	-46	9.6×10^{-8}	8.3×10^{-9}
	8	104	3.8×10^{-8}	—
	14	-16	3.6×10^{-8}	—
	17	-39	9.7×10^{-8}	1.5×10^{-8}

表—1には同配合での室内透水試験の結果も記入しているが、両者を比較すると、本試験はベントナイト混合土地盤の透水係数を比較的正確に測定していると考えられる。

今回の試験では約5時間経過後から24時間程度までの計測値を用いて透水係数を求めているが、このように翌日には試験結果が得られることがわかる。また試験装置も簡便で、多くの測定が可能のため、試験結果を日々の施工にフィードバックすることが可能であると考えられる。

5. おわりに

ベントナイト混合土を用いた遮水構造はシートの破損による漏水に対する施工主、周辺住民の不安に対して、フェールセーフの観点からも安全性に対する説得力が大きいものといえる。しかし、安全性を保障するため、他の工事と比べても特に施工時の品質管理が重要であ

る。

今回紹介したソイルレイヤー工法の新しい品質保証技術については、今後も実績を積重ねて、改良していきたいと考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 成島誠一，他：ベントナイト混合土を用いた複合ライナーの品質管理とデザインに関する研究，第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.83-88，2003.
- 2) 松本徳久，山口嘉一：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）
- 3) 地盤工学会基準，JGS 1316-1995：締め固めた地盤の透水試験方法
- 4) ASTM D 6391-99: Standard Test Method for Field Measurement of Hydraulic Conductivity Limits of Porous Materials Using Two Stages of Infiltration from a Borehole.
- 5) 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

【筆者紹介】

黒島 一郎（くろしま いちろう）
三井住友建設株式会社
土木本部
土木設計部
担当部長



戸村 豪治（とむら たけはる）
三井住友建設株式会社
技術研究所
土木研究開発部
地盤研究グループ
主任研究員



建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」（環境庁告示）が平成8年度に改正され，平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については，その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等，騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに，建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく，建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と，円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

■掲載内容：

- 総論（建設工事と公害，現行法令，調査・予測と対策の基本，現地調査）
- 各論（土木，コンクリート工，シールド・推進工，運搬工，塗装工，地盤処理工，岩石掘削工，鋼構造物工，仮設工，基礎工，構造物とりこわし工，定置機械（空気圧縮機，動発電機），土留工，トンネル工）
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法，建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説，環境騒音の表示・測定方法（JIS Z 8731），振動レベル測定方法（JIS Z 8735）

■体 裁：B5判，340頁，表紙上製

■定 価：会 員 5,880円（本体5,600円）送料 600円
非会員 6,300円（本体6,000円）送料 600円

・「会員」本協会の本部，支部全員及び官公庁，学校等公的機関

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289