

低透水性地盤に対する迅速透水試験装置を用いた透水性能管理手法

—室内試験における迅速透水試験装置の適用性確認—

武部 篤治 ・ 平原 龍*¹ ・ 高橋 浩 ・ 石黒 健

MANAGEMENT SYSTEM OF PERMEABILITY USING BY INSTANT PERMEABILITY TEST DEVICE FOR THE LOW PERMEABILITY GROUND

—AN APPLICATION OF INSTANT PERMEABILITY TEST DEVICE IN LABOLATRY—

Atsuji TAKEBE, Ryu HIRAHARA, Hiroshi TAKAHASHI, Takeshi ISHIGURO



写真-1 迅速透水試験装置

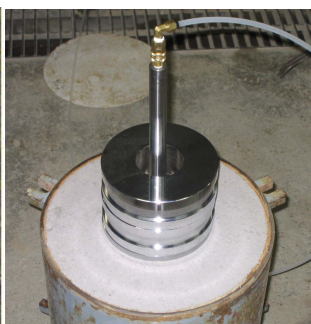


写真-2 室内試験状況

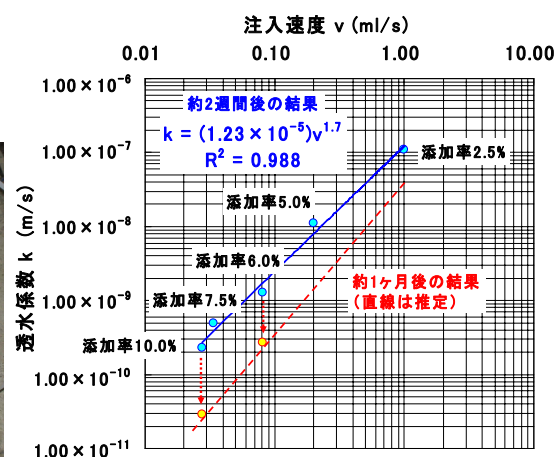


図-1 注入速度と透水係数の関係

研究の目的

最終処分場の遮水層、放射性廃棄物処分場の人工バリア、ダム の 遮水ゾーンなどの低透水地盤において、その遮水性能（目標透水係数をクリアすること）を確認することは品質管理上、非常に重要である。しかし現状の遮水性能管理手法は、密度から間接的に管理している、直接的な透水係数計測には時間がかかる、面的な管理ができない、などといった本質的な問題がある。そこで本報告では、これらの本質的な問題を解決するため、原位置にて即時のかつ多点的に透水係数を求めるための装置の開発および管理手法を提案し、さらに開発した装置をベントナイト混合土に適用した室内キャリブレーション試験の結果について述べる。

技術の説明

本研究では、現場における転圧施工後の遮水層にロッドを差込み、一定圧力の下で一定量の水を注入して計測時間から注入速度を求め、この注入速度から透水係数を即時のかつ多点的に求めるための管理手法を提案した。開発した迅速透水試験装置を写真-1 に示す。本手法は室内キャリブレーション試験による注入速度と透水係数の相関関係が良好に取得できることを前提としている。そのため、処分場などでよく用いられるベントナイト混合土を対象として、開発した迅速透水試験装置を適用した室内キャリブレーション試験（写真-2 参照）を実施し、注入速度と透水係数の相関関係を実質的に調べた。

主な結論

本研究で確認したことを以下に整理する。

- ・ 事前の透水試験の実施には、十分な時間を要して供試体を飽和・膨潤させてから試験を行う必要がある。
- ・ 室内試験により透水係数と注入速度に良好な相関関係があること確認した（図-1 参照）。その相関式と本装置による現場注入速度を用いて現場透水係数が予測できる可能性を示せた。
- ・ 貫入孔が遮水層の遮水性能に与える影響、注入ロッド貫入深さの違いによる影響について検討した結果、問題ないことが確認できた。

* 1 株式会社セントラル技研

低透水性地盤に対する迅速透水試験装置を用いた透水性能管理手法 —室内試験における迅速透水試験装置の適用性確認—

武 部 篤 治 平 原 龍*¹
高 橋 浩 石 黒 健

要 旨

最終処分場の遮水層，放射性廃棄物処分場の人工バリア，ダムの遮水ゾーンなどの低透水地盤において，その遮水性能（目標透水係数をクリアすること）を確認することは品質管理上，非常に重要である．このような低透水性材料の透水試験は飽和化や計測に極めて長い時間を要するため，①原位置における計測は施工を阻害する，②品質管理が事後確認とならざるを得ない，③試験体個数に制約がある，など幾つかの本質的な問題を有する．これらの本質的な問題を解決するため，本研究では，原位置の低透水層に一定圧力で一定量の水を注入するのに要する時間から注入速度を求め，この注入速度から透水係数を即時的かつ多点的に求めるための管理手法を提案した．さらに，注入速度の計測に必要な迅速透水試験装置を開発し，本装置をベントナイト混合土に適用した室内キャリブレーション試験の結果について報告する．

キーワード 廃棄物処分場／迅速透水試験装置／ベントナイト混合土／注入速度／透水係数／ベントナイト添加率

目 次

- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1. はじめに | 3. 室内キャリブレーション試験 |
| 2. 原位置迅速透水試験手法および
装置の概要 | 4. まとめ |

MANAGEMENT SYSTEM OF PERMEABILITY USING BY INSTANT PERMEABILITY TEST DEVICE FOR THE LOW PERMEABILITY GROUND —AN APPLICATION OF INSTANT PERMEABILITY TEST DEVICE IN LABOLATRY —

Atsuji TAKEBE Ryu HIRAHARA
Hiroshi TAKAHASHI Takeshi ISHIGURO

Synopsis:

A coefficient permeability in a low permeable ground is most important quality control item, for example a impervious zone of final disposal ground, an engineered barrier of radioactive waste disposal ground, a impervious zone of a dam, et al. The permeability test of low permeable layer takes long time for saturation and measurement, and so there are several substantial problems that a measurement in the field disturbs execution of the field, we cannot but confirm quality control after a thing, the number of an examination has a limit. To solve these substantial problems, in this study, we developed a system to measure a coefficient permeability quickly at the many points by the injection speed that we measured to inject water of a fixed quantity on a fixed pressure. By this system, we need to get relations of the injection speed and a coefficient permeability beforehand in laboratory. In this paper, we report the results that applied a suggested system to bentonite mixture soil.

* 1 株式会社セントラル技研

1. はじめに

最終処分場の遮水層、放射性廃棄物処分場の人工バリア、またダム等の遮水ゾーンなどにおいて、低透水性材料を用いた埋め戻しや転圧施工などを実施する際、その地盤の遮水性能（目標透水係数をクリアすること）を確認することは品質管理上、非常に重要である。現状における品質管理手法としては、①低透水性材料作成時に十分な混合攪拌および含水比調整を実施して材料の均質性を確保すること、②使用する低透水性材料の室内締固め試験を実施して対象材料の締固め密度と透水係数の関係を事前に取得し、現場施工時の締固め密度から透水係数を算出して遮水性能の管理を行うこと、③現場にて転圧施工後にモールドなどを用いて供試体を地盤から取り出し、室内透水試験により透水係数を計測して遮水性能の管理を行うこと、などがある。しかし上記の品質管理手法では、以下のような本質的な問題を有している。

- ① 締固め密度による品質管理だけでは、施工時および施工後の材料の均質性（例えばベントナイトの均質性）は把握不可能であり、遮水性能を完全にクリアできているか確認できない。
- ② 低透水性材料に対して室内透水試験による管理では、供試体の飽和に要する時間や計測期間が極めて長期となり、リアルタイムのチェックが不可能である。
- ③ 室内透水試験による管理では、計測する試験体個数に限界があるため、現場施工エリアに対して極めて少ない試験しか行えないので性能管理ができない。

これらの本質的な問題を全て解決するため、本報告では、迅速に透水係数を予測できる装置（低透水性材料に一定圧力の下で一定量の水を注入し、注入に要した時間を計測して注入速度を算出する装置）を開発し、その装置を用いた原位置で透水係数を即時的かつ多点的に計測可能な品質管理手法を提案した。また浅地中放射性廃棄物処分場の埋め戻し層、余裕深度処分場人工バリアの低透水層、最終処分場の遮水ゾーンに通常用いられているベントナイト混合土（土質材料を母材として、ベントナイトを添加したもの）を対象として、本試験装置を適用した室内キャリブレーション試験結果について述べる。

2. 原位置迅速透水試験手法および装置の概要

ここでは著者らが提案した迅速透水試験装置を用いた管理システムと開発した透水試験装置の詳細について述べる。

2.1 原位置迅速透水試験装置を用いた管理システム

本試験装置を用いた管理システムのフローを図-1 に示し、以下に詳細を説明する。

本システムは室内キャリブレーション試験という事前試験と原位置における試験を組み合わせることにより現場透水係数を推定する管理手法である。まず室内キャリブレーション試験について説明する。対象現場の遮水層に用いる母材を使用し、ベントナイトの添加率を変化させた混合材料を作成する。その後、添加率を変化させた材料の透水試験（定水位透水試験もしくは変水位透水試験）を実施し、各々の添加率の透水係数データを取得する。そして同様の添加率の材料に対して、例えば 30cm モールド供試体を作成し、本試験装置を用いて各々の添加率の注入速度データを取得する。2 つの試験結果から、ベントナイト添加率を変化させた時の透水係数と注入速度の相関関係を確認する。

次に原位置試験による透水性能の確認方法を説明する。転圧施工が終了した地盤面に対して原位置で迅速透水試験装置を適用し、注入速度を計測する。事前に室内キャリブレーション試験で得られていた相関関係データに照らし合わせることで、計測位置における透水係数を予測することができる。現場の管理基準を満足していれば問題はないが、満足していない場合、即座に再施工に取り掛かることができる。本システムの特徴を以下に述べる。

- ① 原位置において直接的に透水係数の計測が可能であり、ベントナイトの均質性も確認できる。
- ② 本装置を用いた計測時間は短時間（5 分程度を目標）であるため、現場施工に及ぼす影響は少ない。
- ③ 短時間計測、コンパクトな試験装置のため、多点的な計測が可能である。
- ④ GPS などを利用した位置情報と組み合わせることで、面的な透水係数の管理が容易となる。

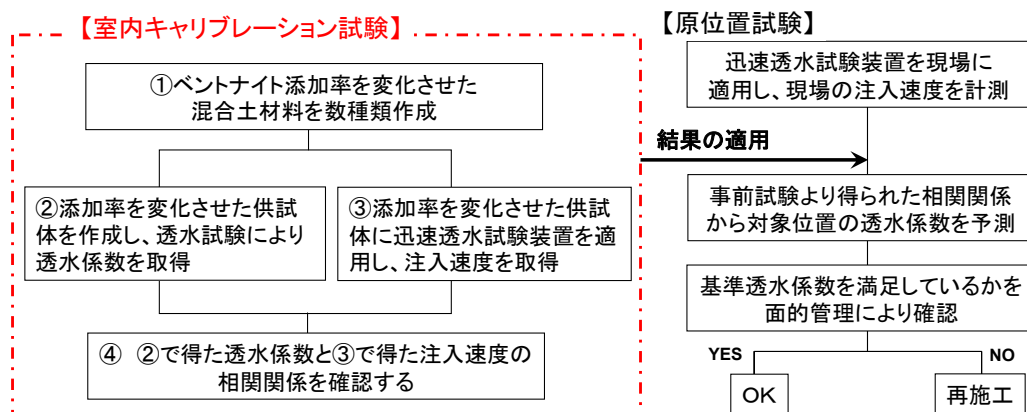


図-1 原位置迅速透水試験装置を用いた管理システムのフロー

2.2 原位置迅速透水試験装置の概要

開発した原位置迅速透水試験装置の概要図を図-2 に示す。装置は大きく注水ロッド部分と計測装置部分に分けられる。注水ロッド先端はコーン形状で、放水口はポーラスストーンを介して水を地盤内に放射状に注入可能な構造となっている。計測装置部分は簡易タンク、高圧ポンプ、流量計、アンプ、データロガー等で形成され、試験時には注水ロッド部分と計測装置部分を接続させ、定流量条件と定圧条件を満足させた注水試験を実施する。以下に試験手順を示す。

- ① 注水ロッド部分を低透水性地盤に貫入する。
- ② 注水ロッド部分と計測装置を連結する。
- ③ 一定量の水（10ml 程度）を定圧で地盤内に注入し、注入に要した時間からその注入速度を算出する。
- ④ あらかじめ室内キャリブレーション試験によって求めておいた注入速度～飽和透水係数の相関関係式を用いて、③で得た注入速度から対象とする位置の透水係数を求める。

写真-1 は本試験装置の使用状況の一例である。上記の試験手順と 2.1 で述べたシステムにより、施工時のベントナイトの均質性と遮水性を短時間で確認でき、かつ多点計測による面的管理も可能と考える。ただし本手法は室内キャリブレーション試験による注入速度と透水係数の相関関係が良好に取得できることを前提としている。次節では、ベントナイト混合土を対象として本試験装置を用いた室内キャリブレーション試験結果を報告する。

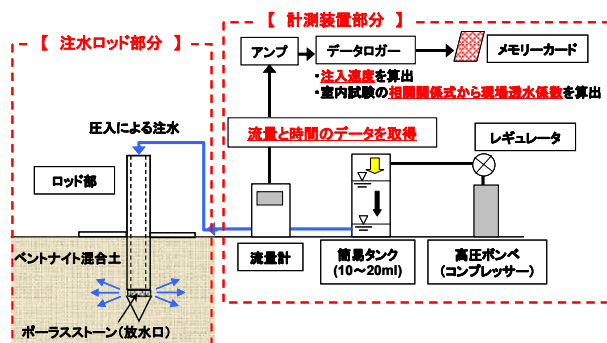


図-2 原位置迅速透水試験装置の概要



写真-1 迅速透水試験装置と使用状況

3. 室内キャリブレーション試験

ここでは、本手法で前提条件とした室内キャリブレーション試験による注入速度と透水係数の良好な相関関係が取得できることを、ベントナイト混合土を用いて確認する。

3.1 変水位透水試験

(1) 試験概要

変水位透水試験は、室内キャリブレーション試験のうち、ベントナイト添加率と透水係数の関係を把握することを目的として実施する試験であり、迅速透水試験による注入速度データとの相関関係を得るための試験である。試験に用いた材料諸元を表-1 に示す。ベントナイト混合土には、母材として珪砂 8 号を、ベントナイトにはクニゲル V1 を用いた。ベントナイト添加率を 0.0%、2.5%、5.0%、6.0%、7.5%、10.0%、15.0%、20.0%、30.0%、100.0%の 10 水準変化させた混合土を用いて、JIS A 1210 に従ってモールド中に突き固めて、 $\phi 100\text{mm} \times h127\text{mm}$ 、乾燥密度約 1.4Mg/m^3 の供試体を作成した。また本試験は JIS A 1218 に従って透水係数を求めた。

(2) 試験結果

変水位透水試験結果から得られたベントナイト添加率と透水係数の関係を図-3 に示す。本研究では飽和開始から約 2 週間後に変水位透水試験を実施した。図-3 に示す通り添加率の増加とともに透水係数の減少傾向が見られたが、2 週間後の結果（図中青丸）と 1 ヶ月後の結果（図中黄丸）を比較すると、さらに透水係数が 1～2 オーダー減少している。これは、供試体の飽和状態、もしくはベントナイトの膨潤特性が原因であると考えられる。

本試験における供試体飽和確認方法としては、透水試験開始前後の供試体重量から飽和度を算出すること、またある動水勾配で供試体入口側の計測流入量が一定になったことを確認すること、とした。ベントナイト混合土を用いた既往の研究¹⁾でも、本試験と同様に、時間当たりの透過流量と試験終了後の飽和度により飽和状態を確認しており、本試験に用いた供試体も飽和していたと判断できる。

表-1 試験に用いた材料諸元

試料母材	珪砂 8 号
添加材	ベントナイト（クニゲル V1）
透水媒体	脱気水
供試体寸法	$\phi 100\text{mm} \times h127\text{mm}$
乾燥密度	約 1.4Mg/m^3
試験水準 (添加率)	0.0%、2.5%、5.0%、6.0%、7.5%、 10.0%、15.0%、20.0%、30.0%、 100.0%の 10 水準
試験方法	変水位透水試験（JIS A 1218）

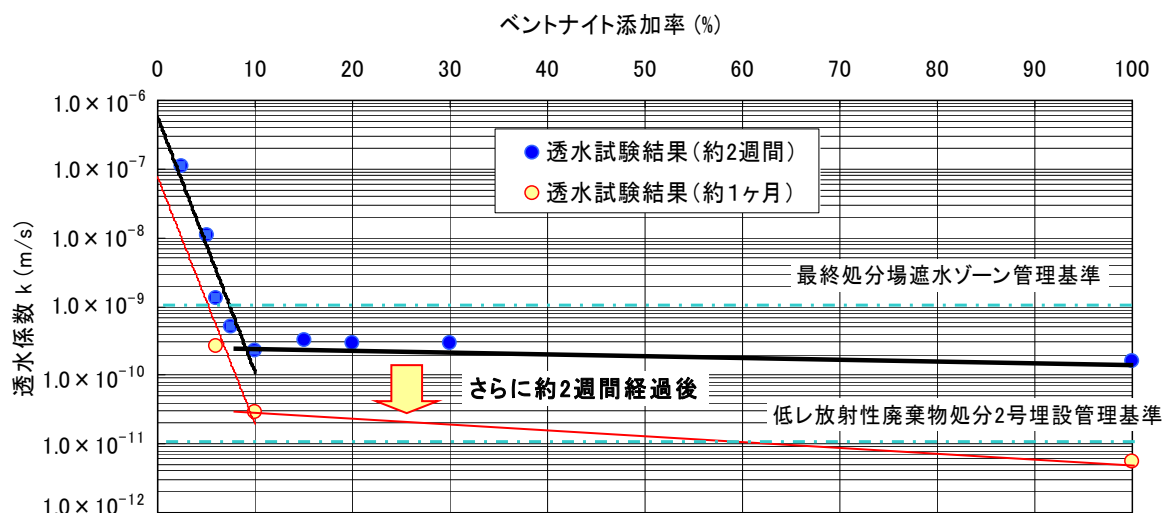


図-3 変水位透水試験から得られたベントナイト添加率と透水係数の関係

このことから試験中の透水係数の低下は、ベントナイトの膨潤特性が原因と考えられる。ベントナイトは膨潤すると遮水性能が向上するため、膨潤させるのに十分な時間が必要である。しかし本試験では十分な時間を確保していなかったため、試験中にベントナイトが膨潤して透水性が低下したと思われる。今後は供試体飽和時間を十分にとること、膨潤圧などの別の視点からも飽和不飽和を判断することに留意する必要があると考える。

以上のように供試体の膨潤に十分な時間を確保しなかったという問題があったが、本試験で得られたベントナイト添加率と透水係数の関係について、高い透水係数で評価することは安全側の評価であること、設計要領²⁾と同様の減少傾向が見られること、本試験で得られたベントナイト添加率 10%までの透水係数の低下傾向には線形性が見られることから、室内キャリブレーション試験データとして使用可能であると判断した。

3.2 迅速透水試験装置を用いた注水試験

変水位透水試験結果では、ベントナイト添加率 10%付近に透水係数の閾値が表れたことから、迅速透水試験の適用範囲を添加率 2.5～10.0%に絞り試験を実施することにした。以下にその試験概要と試験結果を報告する。

表-2 迅速透水試験諸元

試料母材	珪砂 8 号
添加材	ベントナイト (クニゲル V1)
供試体寸法	φ 300mm×h350mm
乾燥密度	約 1.4Mg/m ³
含水比	約 27% (最適含水比近傍)
試験水準 (添加率)	2.5%, 5.0%, 6.0%, 7.5%, 10.0%の 5 水準
注入圧	10 kPa
ロッド貫入深さ	放水口で 80mm

(1) 試験概要

迅速透水試験装置を用いた注水試験諸元を表-2 に示す。試験で用いるベントナイト混合土供試体は、変水位透水試験と同様の材料を用い、同様の攪拌・混合方法および突き固め方法により、乾燥密度約 1.4Mg/m³ に調整して作成した。ただし注入ロッドを貫入して注水するため、使用するモールドは変水位透水試験のモールドより大きなモールド (φ 300mm×h350mm) に変更した。ベントナイト添加率は、前述したとおり 2.5～10.0%区間を対象とし、2.5%, 5.0%, 6.0%, 7.5%, 10.0%の 5 水準とした。供試体の含水比は、JIS A 1210 に従ったベントナイト添加率 15%の締固め試験結果 (図-4 参照) を参考に、最大乾燥密度となる約 27%に調整した。以上の条件に合わせて迅速透水試験に用いる供試体を 5 つ作成した。

前述の供試体に迅速透水試験装置を適用した室内注水試験の概要図を図-5 に、試験状況を写真-2 に示す。一般的に廃棄物処分場の現場で遮水層を施工する場合、仕上がり層厚約 50cm を 2～3 層にわけて締固めている。そのため注入ロッドの貫入深さは、遮水層仕上がり層厚の中

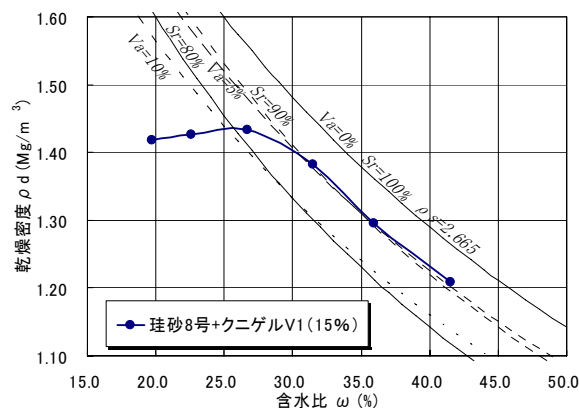


図-4 ベントナイト混合土 (添加率 15%) の締固め試験結果

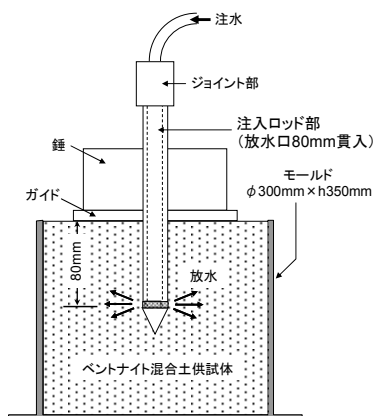


図-5 迅速透水試験装置を用いた注水試験の概要図



写真-2 迅速透水試験装置を用いた注水試験状況

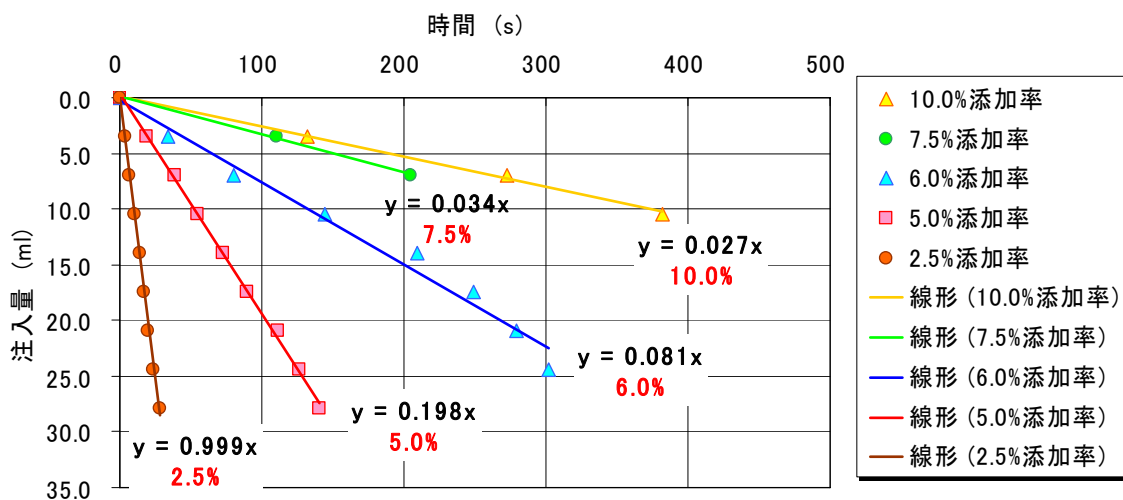


図-6 ペントナイト添加率と注入速度の関係：2.5～10.0%区間

心位置を想定して、ロッド放水口が供試体表面から 80mm 位置にくるように設置した。水の注入圧に関しては、試験中は定圧であることが絶対条件である。そのため供試体内への注入圧が高すぎて水が噴出さない程度、かつ注入圧が低すぎて相当の計測時間を要することがない程度の圧力を試行錯誤しながら検討し、10kPa に決定した。

以上の試験条件から迅速透水試験装置を用いた室内注水試験を実施し、ペントナイト添加率をパラメータとした注入速度データを取得した。今回の試験では注入量 3.5ml 毎に時間を計測し、全注水量が約 30ml に達した時、もしくは急激に注水量が上昇した時（ロッド側部からの噴上げ時）に試験を終了した。

(2) 試験結果

迅速透水試験装置を適用した室内注水試験結果から得られたペントナイト添加率と注水速度の関係を図-6 に示す。全ケースにおいて注入量と時間に線形関係が見られることから、均一に一定速度で注水されていることがわかる。また図-6 で得られた線形関係の傾きが注入速度で

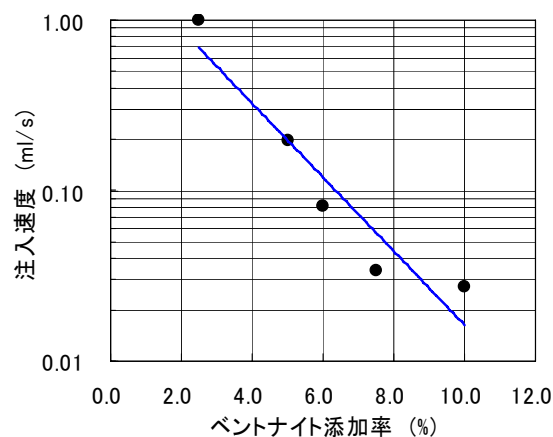


図-7 ペントナイト添加率と注入速度の関係

ある。そこでペントナイト添加率と注入速度の関係を整理したものが図-7 である。添加率の増加とともに注入速度が低下し、両者の間に相関関係があることが確認できた。

3.3 室内キャリブレーション試験結果

変水位透水試験結果から得られた透水係数と、迅速透水試験装置を用いた室内注水試験から得られた注水速度の関係を、ベントナイト添加率ごとにまとめたものが図-8である。参考のため約1ヵ月後の透水試験の結果も併記している。ベントナイト添加率の変化による注入速度と透水係数は両対数紙上でほぼ線形の関係が得られている。これは、例えばベントナイト添加率の微妙な変動を、本試験装置の注入速度の変化によって捉えることが可能であることを示している。

また図中には近似曲線により得られた注入速度と透水係数の相関式を記している。原位置にて迅速透水試験装置を室内試験と同条件で適用し、対象とする遮水層の注入速度を取得すれば、室内キャリブレーション試験から得られた相関式により透水係数を推定することが可能である。このことから、推定された透水係数と現場の管理基準値を照査することにより、より確実な現場施工管理が実現できると考える。

3.4 迅速透水試験装置の問題点とその検討結果

開発した迅速透水試験装置の使用に際していくつかの問題点が考えられた。以下にその問題点と検討した結果を報告する。

(1) 迅速透水試験の貫入孔の影響

迅速透水試験によりできた貫入孔は試験後に埋め戻すが、これが遮水層の遮水性能に影響を及ぼすことが懸念される。そこで貫入孔を埋め戻した後の供試体透水係数と貫入孔のない供試体透水係数の比較により貫入孔の影響を確認した。その結果、貫入孔のないケースでは $2.30 \times 10^{-10}(\text{m/s})$ 、埋め戻したケースでは $2.17 \times 10^{-10}(\text{m/s})$ となり、遮水層に大きな影響を及ぼさないことが確認できた。

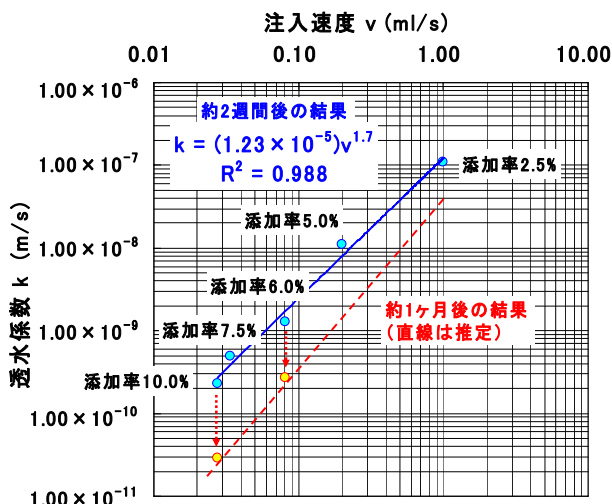


図-8 ベントナイト添加率ごとの注入速度と透水係数の関係

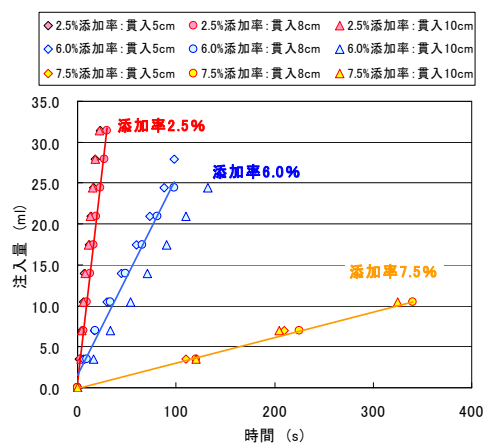


図-9 貫入深さの違いによる注水試験結果

(2) 注入ロッド貫入深さの影響

注入速度のデータに対する注入ロッドの貫入深さの影響を調べるため、その確認試験を実施した。その結果を図-9に示す。代表として添加率 2.5%、6.0%、7.5%の3ケースで実施した。添加率 6%のケースでわずかなばらつきが見られるものの、ロッド貫入深さに依存しない結果が得られていることがわかる。これにより、本試験装置は貫入深さによる影響を受けないことが確認された。

4. まとめ

開発した迅速透水試験装置を用いてベントナイト混合土を対象とした適用性の検討を室内試験レベルで試みた。その結果、以下のことが確認できた。

- ① 事前の透水試験では、十分な時間を要して供試体を飽和・膨潤させてから試験を行う必要がある。
- ② 室内試験により透水係数と注入速度に良好な相関関係があること確認した。その相関式と本装置による現場注入速度を用いて現場透水係数が予測できる可能性を示せた。
- ③ 貫入孔が遮水層の遮水性能に与える影響、注入ロッド貫入深さの違いによる影響について検討した結果、問題ないことが確認できた。

以上から迅速透水試験装置の適用性を室内試験により確認することができた。今後、実地盤における本試験装置の実用性の確認および提案した管理システムの検証を第一に考え、より確実な透水試験の実施、位置情報と組み合わせた面的管理の適用性など、室内・原位置試験両面から更なる詳細な検証を実施していく所存である。

参考文献

- 1) 松本一浩，菅野毅，藤田朝雄，鈴木英明：緩衝材の飽和透水特性，動燃技術資料，PNC TN8410 97-296，1997。
- 2) 社団法人全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領，pp.269-276，2001。