

現場透水試験装置の開発と締固めたベントナイト混合土への適用性

Development of Field Test Apparatus for Permeability and Its Applicability to Compacted Bentonite-soil Mixture

薫田正春^{*1} 松崎達也^{*2} 橋本一郎^{*3} 藤本英哲^{*4}
Masaharu Kunda Tatsuya Matsuzaki Icirou Hashimoto Hideaki Fujimoto
沼田淳紀^{*5} 筒井雅之^{*5}
Atsunori Numata Masayuki Tsutsui

【要旨】

最終処分場の遮水層に用いられるベントナイト混合土の品質を評価する上で、この層の遮水性を知ることが重要である。一般的に、原位置では透水性を評価することが難しいので、室内試験などで使用材料の密度と透水係数との関係を事前に求めておき、日常の品質管理では施工現場の密度を求めることで透水性の品質を評価する手法が行なわれている。

材料にバラツキがないときには、密度が透水係数を決める支配的要因ではあるが、材料にバラツキがあるときには必ずしもそうならない。特に、ベントナイト混合土は、ベントナイトと砂との混合材であるので、密度だけではなく、その配合のバラツキによっても透水係数は左右される。施工後の遮水層の性能をできるだけ厳密に評価するには、密度とともに透水係数を直接的に求めることが必要になる。このような背景から、現場で施工を止めることなく、簡易に厳密な透水係数を計測できる試験装置を新たに開発した背景と試験装置の概要、室内試験における実証実験、および浜松市平和最終処分場第二期埋立地建設工事における品質管理結果を述べる。

【キーワード】 最終処分場 透水試験 ベントナイト混合土 品質管理

1. はじめに

最終処分場の遮水層は、処分場の安全性を確保する上で極めて重要な構造物である。この遮水層の一つとしてベントナイト混合土を主体に用いる方法がある¹⁾。ベントナイト混合土の遮水性は透水係数を求めて評価することが直接的な品質管理方法であるが、現場では透水性を管理するのが難しいので、RI²⁾などを用いて求めた密度で代用している³⁾。しかし、原料土の粒度組成や混合土の配合率にバラツキがあれば、密度と透水性の関係は必ずしも一対一には対応しない。したがって、もし透水性を直接求めることが可能となれば今まで以上に安全性の検証を確実にこなせる。そこで、新たに現場で簡単にベントナイト混合土の透水係数を求める装置を開発し、締

固めたベントナイト混合土への適用性を検証した。

本論文では、現状の試験方法の長所短所を整理し、開発に当たり新しい透水試験装置の目標性能を示した。次に、開発した新しい透水試験装置の概要を示し室内実験の結果を示した。室内実験では、模型地盤を作製し、今まで現場で行われてきた現場透水試験、新たに開発した透水試験、模型地盤により不覚乱試料を採取して三軸セルにより厳密に行なった透水試験より求められた透水係数を比較検討した。以上の結果、新しい透水試験装置は、三軸セルで求めた透水係数と同等の透水係数を求めることが可能で、十分現場のベントナイト混合土の透水性を評価できることが確認できるという結論を得て、実際の施工現場において品質管理を行なった。

1. 名古屋支店 豊山下水作業所 2. 東北支店 江刺作業所 3. 広島支店 大島処分場作業所
4. 名古屋支店 ゆめが丘作業所 5. 防災R&Dセンター 技術研究所

2. 現在実施されている遮水層の透水試験方法

遮水層の透水性を評価する方法として数多くの試験方法が提案されている。これらを大きく分類すると、室内による透水試験と現場での透水試験に分けることができる。

室内での試験は、現場より不攪乱試料を採取し供試体を切り出し、それを三軸セルなどに入れ、供試体をゴムスリーブに被せ所定の拘束圧下で供試体に通水し、その通水量から透水係数を求めるというものである（以下、室内試験法と呼ぶ）。通水に要した時間とこの間の通水量から式(1)によって透水係数が求められる。この方法は Darcy の法則⁵⁾で定義される透水係数そのものなので信頼性の高い透水係数を得ることができる。

$$k = \frac{v}{i} = \frac{Q}{Ai} = \frac{1}{A} \frac{\Delta V}{\Delta t} \frac{\Delta L}{\Delta H} \quad (1)$$

ここで、 k : 透水係数(cm/s)

v : 流速(cm/s)

i : 動水勾配

Q : 流量(cm³/s)

A : 供試体の断面積(cm²)

ΔV : 所定時間の排水量(cm³)

Δt : 所定時間(s)

ΔL : 供試体長さ (高さ) (cm)

ΔH : 供試体両端面における水頭差(cm)

室内試験にはこの他にも、切り出した供試体を剛性モールドに入れ通水する場合などがある。モールドを用いる方法は、供試体とモールドとの間が水みちとなることがあり、この間を何らかの方法で止水する必要がある。

現場での透水試験は、USBR⁶⁾の方法に代表されるも

の（以下 USBR 法と呼ぶ）で、対象地盤に孔を開け、これに水を張り、この水位の低下量または一定水位を保つための通水量より透水係数を求めるものである。透水係数は、式(2)によって求められる⁷⁾。

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\ln \left[\frac{h}{r_0} + \left\{ \left(\frac{h}{r_0} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] - \left\{ \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{r_0}{h} \right) \right] \quad (2)$$

ここで、 k : 透水係数(cm/s)

Q : 流量(cm³/s)

h : 試験孔内水深(cm)

r_0 : 試験孔の半径(cm)

現場での透水試験として、水位低下をできるだけ厳密に電氣的に測定するもの、飽和条件を満たすために工夫されたもの、水頭を大きくかけられるようにしたものなど USBR 法の欠点を補うために様々な工夫が施されたものが提案されている。USBR 法と室内試験法はさらに細かく様々な方法が提案されているが、基本的にはこの2つに分類できる。両者の長短所をまとめると表-1のようになる。

3. 目標性能

前述のように実際に施工された遮水層の透水係数を現場で計測することは難しいので、まず室内試験や現場盛立試験などで透水係数と密度や含水比の関係を求め、施工時には所定の透水係数に対応する密度や含水比の関係を求め、施工時には所定の透水係数に対応する密度や含水比を設定し、現場ではこれを満足していることを品質管理試験により確認すること³⁾が多い。これは、材料の粒度組成や締固め含水比、混合土の場合は配合率などの材料特性が変化しなければ、一般に透水係数は乾燥密度

表-1 USBR法と室内試験法の長所と短所

| | USBR 法 | 室内試験法 |
|----|--|--|
| 長所 | ①実際に施工された地盤のおおよその評価が可能であり、水みちなどの不良箇所を面的に見つけやすい。 ②比較的安価である。 | ①境界条件が明確で厳密な試験が実施可能である。 ②種々の拘束条件を設定可能である。 ③不攪乱試料の採取を行ってしまえば、施工をあまり止めないですむ。 |
| 短所 | ①水の流れが理論と必ずしも一致しない。 ②飽和状態が不明瞭である。 ③計測に長時間を要し、施工に支障がある。 ④斜面部では計測が不可能である。 | ①高価な設備が必要で、実現場では困難である。 ②数多くの試験を実施することは難しい。 ③乱さない試料の採取と整形が面倒である。 ④原地盤の点の情報しか得られない。 |

や間隙比との相関が高いため、両者の関係を室内試験などで求め現場の透水試験を類推するというものである。具体的には、室内試験により種々の粒度組成や配合率の材料を用いて締固め試験を行い、同じ供試体について透水試験より透水係数を求める。そして、設計仕様に対応する透水係数に対する材料特性や施工条件を決め、これを満足するように現場を管理することが現在行なわれている。

遮水層にとっても透水係数は最も重要な値であり、これが直接求められれば施工方法や締固め密度などの検討は極論すれば品質管理には必要ないといえる。直接透水係数を評価することが現実できれば、最終処分場におけるベントナイト混合土の遮水性の実状を定量的に知ることが可能となり、遮水層の信頼性が高まるものとともに合理的な施工法への期待もできる。

そこで、実際に施工される最終処分場の遮水層の透水係数を多数正確に直接求めることで、面的に遮水層の品質を評価できないかと考えた。開発に当たっては、現在行なわれている遮水層における透水試験方法を踏まえ、実際の現場施工の中で無理なく正確な透水係数を求められることを念頭に置き、以下の性能を目標とした。

- (1)現場施工の障害とならにために、試験地点における拘束時間が極めて短いこと。
- (2)試験装置は、小型コンパクト、単純かつ操作が容易でしかも丈夫なこと。
- (3)現地および測定では電気や特殊な道具が不要であること。
- (4)水平および鉛直方向を含めた傾斜部や狭隘部の社水層の透水係数を求めることが可能なこと。
- (5)求められた透水係数の試験精度が室内試験と同等に高いこと。
- (6)原地盤を乱さない状態での遮水層の透水性を求めることが可能なこと。
- (7)Darcy の法則の定義にあった理論式が十分適用可能なこと。
- (8)求めたい原地盤の応力状態を再現可能なこと。
- (9)原位置の透水係数を面的に評価できるように、多くの試験点数にも対応可能なこと。

装置の開発にあたり、特に重視したのは(1)～(3)の現場の意向である。このように現場の意向を重視したのは、

施工を実際に行っている現場で新しい試験方法が容易に取り入れられなければ、施工した遮水層の透水係数を面的に評価するということが現実できないと考えたからである。

4. 開発した現場透水試験装置

4.1 装置の概要

開発した現場透水試験装置の概要を図-1に示す。(a)に示す空圧式の装置(以下、A型と呼ぶ)と、(b)に示すばね式(以下S型と呼ぶ)の2種類の装置を開発した。本装置は、ある程度の礫も切って貫入できるような刃先を持つサンプラー部と、その内部に貫入されてきた試料に圧力を載荷できるピストンからできている。A型は空気圧により、S型はばねにより載荷する。A型は空圧式だが、現場では小さな圧力タンクより圧力を供給するので、電源など不要である。載荷ピストンを付けたのは以下の理由による。

- ①採取した試料に亀裂などが生じないように10～15kPa程度の圧力を載荷できるようにすること。
- ②処分場の遮水層がその機能を発揮するのは一般に廃棄物の載荷がある程度行なわれた状態のときであり、このような応力状態を再現する必要があること。
- ③鉛直有効応力を σ_v' とすると水平方向の有効応力は σ_h' は、 $K_0\sigma_v'$ となり、水平方向の有効応力が透水試験時サンプラー内壁と供試体との間の止水効果が大きく寄与すること(ただし k_0 は、静止土圧係数)。

また、ベントナイト混合土に対しては、通水により膨潤するので拘束圧を付加できることは重要である。

ピストン下端の載荷板にはポーラスストーンが付けられており試料への通水が可能になっている。また、載荷板とサンプラー内壁との接触面はオーリングで止水されている。図-1は、それぞれサンプラーを底板にセットした状態を示している。底板にもポーラスストーンが設置され排水可能となっている。底板とサンプラー外壁との接触面は、オーリングによって止水されている。なお、本装置にはピストンの移動量読み取りスケールが付いており、供試体の厚さが常に分かるようになっている。

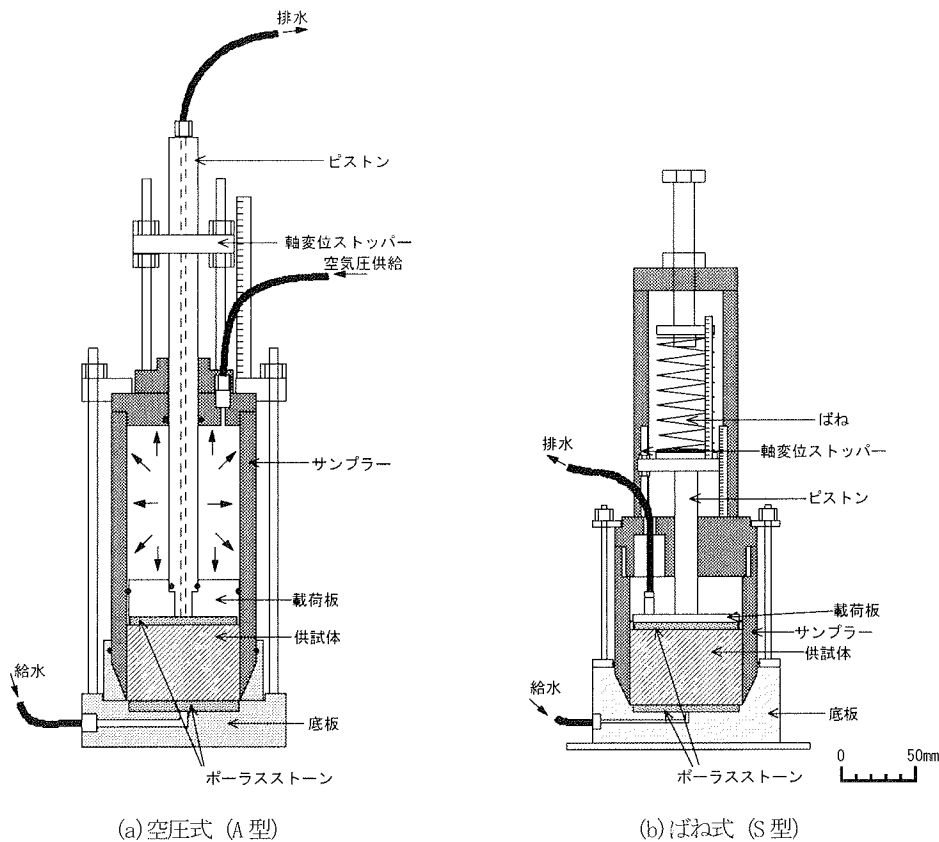


図-1 現場透水試験装置

4.2 試験手順

図-2は、試験手順をフロー図にしたものである。

この装置を平滑に仕上げたベントナイト混合土表面の調査したい位置にあて、打撃により打ち込むことで試料をサンプラーに取り込む。試料採取後、荷重ピストンを固定し、サンプラーごと試料を掘り起こす。この時点で、試験現場から離れることが可能である。ベントナイト混合土の施工表面は平滑な場合が多く、このような場所における採取には1分もかからずすぐに現場から離れることが可能である。地表面下数十cmの深度の試料を採取する場合は、ある程度地盤を掘り込み、その面を平滑に仕上げしてから採取を行なう。この場合も慣れれば30分程度で採取が可能である。

次に、掘り起こしたサンプラー周囲の不要な土を取り除き、下端面を平滑に仕上げる。その後サンプラーを底板にセットし、ピストンの固定を解除し所定の圧力を載荷し、通水を行い透水試験を開始する。透水試験時のセットも、10分もあれば簡単に行なえる。

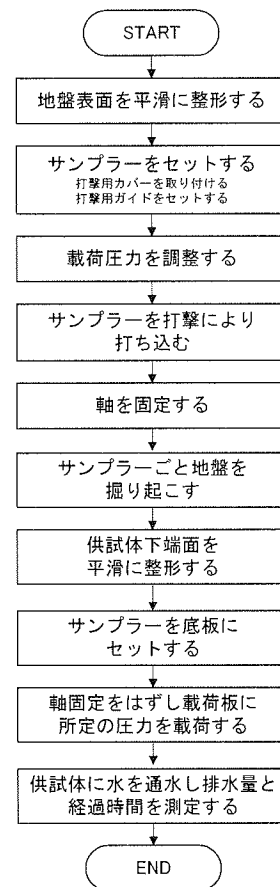


図-2 現場透水試験のフロー図

4.3 透水試験方法

透水試験のシステム図を図-3に示す。基本的にJIS A 1218 に示される透水試験と同じであり単純なシステムとなっている。給水タンクからの水を供試体下部より通水し、供試体上部からの排水量を計測する。給水タンクの水位を一定に保ち排水量を計測すれば定水位試験となり、給水側にビュレットを置き、排水先の水位を一定に保てば変水位試験となる。

ベントナイト混合土の透水試験はかなり小さいので、動水勾配が小さいと通水にかなりの時間を要する。このため数百以上の大きな動水勾配をつけて試験を行なう。動水勾配を大きくするには、給水タンク位置を5m程度以上に高く保ち、排水量をビュレットなどの水位が変化するものを用いて計測することが考えられる。ビュレットの水位が変化するので変水位試験になるが、ビュレット水位の変化はせいぜい数十cm程度なので、大きい動水勾配に対しては、ビュレット側の水位を一定と仮定し定水位試験として計測しても透水係数にはほとんど影響されない。

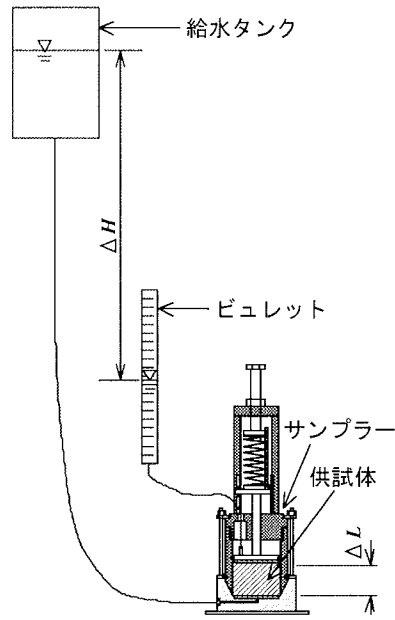


図-3 透水試験システム図

表-2 用いた試料の物理的性質

| | | 母材 (火山灰) | ベントナイト (スパークレイ) | 混合土 (配合率=14.3%) |
|--------------------|---------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 土粒子の密度(粒径2.00mm以下) | ρ_s g/cm ³ | 2.442 | 2.586 | 2.489 |
| 土粒子の密度(粒径9.52mm以下) | ρ_s g/cm ³ | 2.375 | — | 2.418 |
| 土粒子の密度(粒径37.5mm以下) | ρ_s g/cm ³ | 2.364 | — | 2.396 |
| 礫真比重(粒径2.00mm以上) | G_s | 2.136 | — | — |
| 礫絶対比重(粒径2.00mm以上) | G_p | 1.435 | — | — |
| 礫表乾比重(粒径2.00mm以上) | G_b | 1.763 | — | — |
| 礫吸水率(粒径2.00mm以上) | Q % | 22.9 | — | — |
| 含水比 | w % | 13.2 (自然状態) | 11.5 (自然状態) | 15.3 (調整後) |
| 液性限界 | w_L % | — | 673 | 79 |
| 塑性限界 | w_p % | — | 39 | 25 |
| 塑性指数 | I_p | — | 634 | 54 |
| 最大粒径 | D_{max} mm | 38 | — | 38 |
| 礫分含有率 | P_G % | 25 | — | 15 |
| 砂分含有率 | P_S % | 55 | — | 43 |
| シルト分含有率 | P_M % | 15 | — | 17 |
| 粘土分含有率 | P_C % | 5 | — | 25 |
| 細粒分含有率 | P_F % | 20 | — | 42 |
| 60%粒径 | D_{60} | 0.80 | — | 0.25 |
| 50%粒径 | D_{50} | 0.50 | — | 0.125 |
| 30%粒径 | D_{30} | 0.135 | — | 0.011 |
| 10%粒径 | D_{10} | 0.027 | — | — |
| 均等係数 | U_c | 30 | — | — |
| 曲率係数 | U_c | 0.8 | — | — |
| 最大乾燥密度(1Ec) | ρ_{dmax} g/cm ³ | 1.339 | — | 1.546 |
| 最適含水比(1Ec) | w_{opt} % | 23.0 | — | 16.4 |

配合率(%)=ベントナイト乾燥質量/母材乾燥質量×100

5. 試験装置の室内試験

5.1 試料

試料は、旭川市廃棄物処分場の実際の施工で用いられたものである^{1) 3)}。表-2と図-4に用いた試料の物理的性質と粒度組成を示す。母材は最大粒径38mm、粒度配合の良い礫質砂の北海道産火山灰⁴⁾である。ベントナイトは、塑性指数が600を超えるアメリカワイオミング産のスパークレイである。両者をそれぞれ単体で試験室に搬入し試料が均一となるように十分調整した後、配合率 $\alpha=14.3\%$ (α :ベントナイト乾燥質量/母材乾燥質量×100%)で両者を配合し、目標含水比 $w=15\%$ になるように噴霧器で加水しながら混合機で十分攪拌し混合土を作製した。ここで配合率14.3%は、配合試験より得られた14%に、多少の余裕を持たせて施工時に用いられた値である。また含水比は、施工時のベントナイト混合土の平均値が最適含水比より1.4%乾燥側であったので³⁾、ここで用いた試料について求められた最適含水比より1.4%乾燥側を目標値とした。結果的に試料調整後は、 $w=15.3\%$ となった。図-5に母材と混合土の締固め特性を示す。締固めエネルギーは、JIS A 1210に準拠し

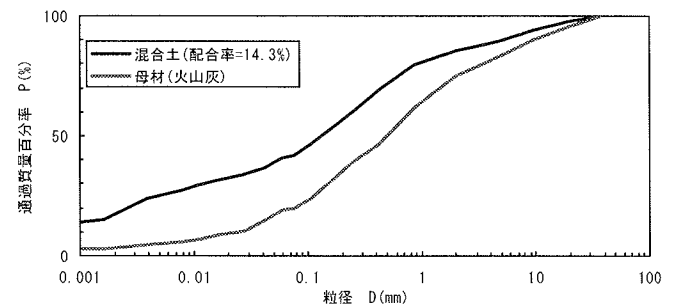


図-4 用いた試料の粒度組成

550KJ/m³とした。図中には、各供試体の乾燥密度も併記した。母材単体では平坦な突固め曲線であったが、ベントナイトを混合することで格段に乾燥密度が増し上に凸な突き固め曲線になっていることがわかる。

5.2 実験方法

開発した現場透水試験装置より求められた透水係数の妥当性、および、実用性の検証を目的として、矩形土槽に模型地盤を作製し現場透水試験装置を用いて透水係数を求めた。これと比較するために同じ地盤より不覚乱試料を採取し、三軸セルを用いて透水係数を求めた。さらに、同じ試料を用いて再度同密度の模型地盤を作製し、USBR法により透水係数を求めた。

図-6に、模型地盤作製に用いた矩形土槽の概略図を示す。矩形土槽は鋼製で、内寸は高さ40cm×幅60cm×奥行き60cmであり、土槽下部には排水口が設けられている。この土槽に混合土を4層に分けて投入し、各槽ごとに模型地盤全体の密度が目標密度となるように締固めた。目標密度は、現場での締固め仕様を参考に図-5に示した最大乾燥密度の90%とした。また締固めは、主に質量10kgの大型突固め試験用ランマーを使い、落下高さを30cmとし、目標密度となるまで突固めた。USBR法による試験を実施する際には、土槽内側に排水層として厚さ約0.4cmの不織布を張り付けた。模型地盤製作後、A型とS型サンプラーによる試料採取を行い、直ちに透水試験を行なった。供試体寸法は直径7.5cmで厚さは当初約5cmとしたが、約2週間経過後も水が通らなかったため、途中供試体をサンプラーより数センチメートル押し出し厚さを約2cmに薄くした。透水試験時の水等差 ΔH は、A型で788cm、S型で738cmであった。この時の動水勾配*i*はそれぞれA型で365とS型で365と同じであった。また、透水試験時の供試体の鉛直方向の拘束圧は98kPaとした。98kPaとしたのは、この程度の上載圧は実際にも十分想定されることと、標準的な値としたため、特に具体的な目標値があったわけではない。実際の品質管理においては、想定される上載荷重を設定し、その条件で試験を行なうことになる。

三軸透水試験用の不覚乱試料は、表層付近から厚さ約20cmのブロックサンプルを2箇所採取し、それ

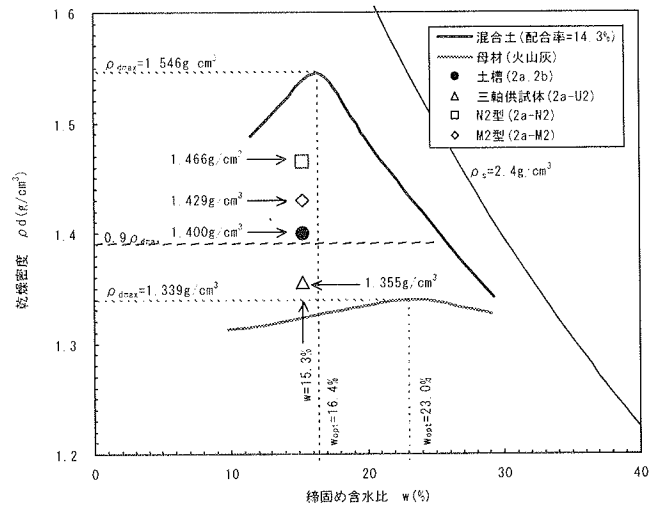


図-5 用いた試料の締固め特性

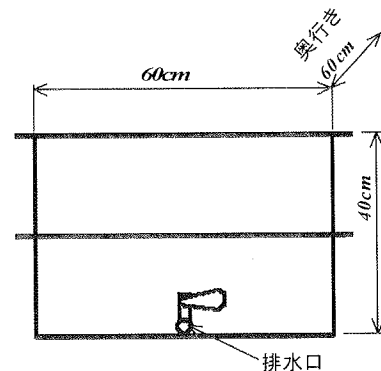


図-6 矩形土槽の概略図

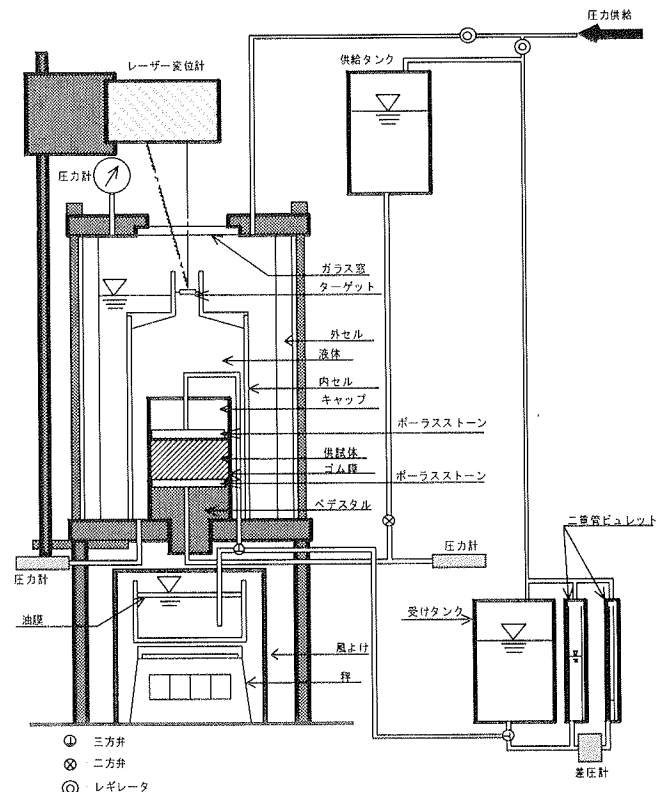


図-7 三軸圧密透水試験装置⁸⁾

より直径 10 cm×厚さ 2 cmの供試体と、直径は同じで厚さが 5cm の供試体を切り出した。三軸圧密透水試験時の透水方向と、A 型と S 型の試料における透水方向とが一致するように切り出した供試体を図-7 に示す三軸圧密透水試験装置 8) にセットした。この試験装置は、種々の拘束圧下における透水係数と圧密特性を正確に求めるために別途開発したものである。供試体からの排水量と同時に、供試体の体積変化量を内セル内の液位変化を基に正確に計測できる。給水タンクは 30kPa で加圧され、透水試験時の水頭差 ΔH は 486 である。この時の動水勾配 i は、供試体の高さが 2cm と 5cm の場合それぞれ 207 と 97 であった。また、透水試験時の等方の拘束圧はサンプラーの上載圧と同じ 98kPa とした。拘束圧 0kPa から 98kPa 載荷時の約 3 日経過後の供試体の間隙変化量と体積ひずみは、厚さ 2 cm の供試体の場合 $\Delta e=0.318$, $\varepsilon v=18\%$ であった。なお、厚さが 5cm の供試体は、試験開始約 2 ヶ月経過後も通水されなかった。

USBR 法による試験では、模型地盤の表面中央に直径 15cm、深さ 20cm の孔を掘り、ここに砂を投入後、水を表面より約 1.5cm の高さまで満たし、この水位が変化しないように注水できる装置を設置し、定水位試験を実施した。試験孔からの水の蒸発を避けるために、土槽はビニルシートで覆った。

5.3 実験結果

図-8 にそれぞれの方法で求められた透水係数の経時変化を示す。それぞれの透水係数は、式(3)により 15°C の透水係数に換算してある。

$$k_{15} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (3)$$

ここで、 k_{15} : 15°Cにおける透水係数 (cm/s)

k_T : T°Cにおける透水係数 (cm/s)

η_T/η_{15} : 15°Cに対する T°Cの粘性係数の比

USBR 法により求めた透水係数は、 1×10^{-5} cm/S 程度から徐々に低下傾向にあり、他の方法と比較すると 3 オーダー程度大きいことがわかる。写真-1 は、USBR 法により透水試験を実施した後の模型地盤の断面状況である。表面が 2.5cm 程度盛り上がっていることがわかる。USBR 法では、上載圧がないのでベントナイトが膨潤しこれにより試験孔内の水が消費されたものと考えられ、透水試験ではこれも含めた注水量を測定していたことになる。断面観察によれば、地盤表面はかなり含水比が高くヘドロに近い状態であった。しかし、地表面から 5~10cm 以深のところでは地盤は比較的固く、ヘドロ状となるような大きな膨潤は観察されなかった。また、土槽下部に設置された排水口からは全く計測されなかった。図-8 に示される USBR 法の結果が大きく波を打っているのは、地盤表面が膨潤により膨れあがり供給用のパ

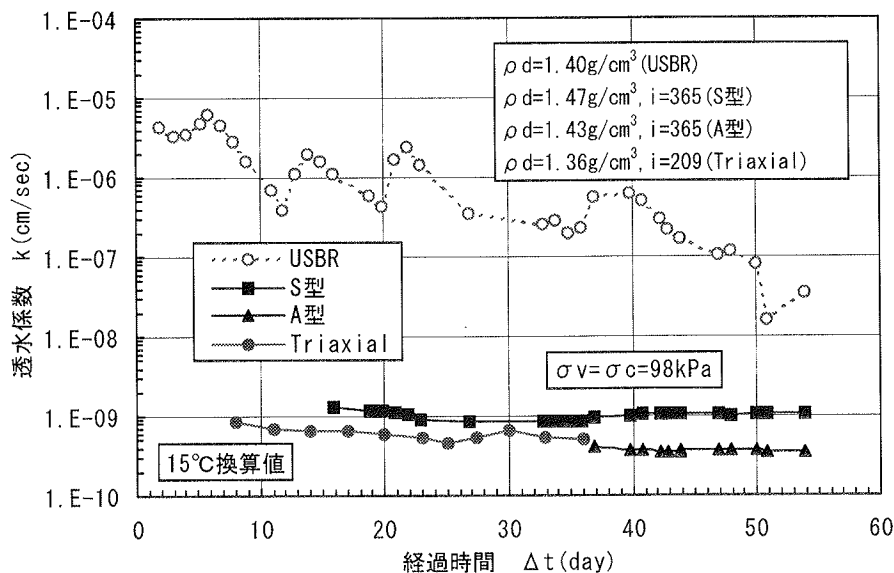


図-8 透水試験結果

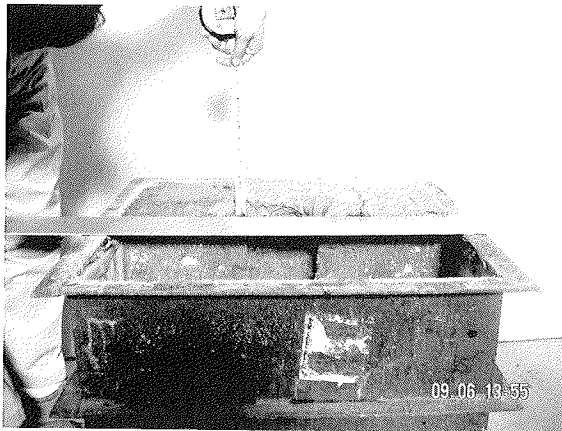


写真-1 USBR法による透水試験後の地盤の状況

イプが地盤にめり込み水みちになりかけるので、数回にわたり装置を再セットし水位を調整したためである。地盤表面が膨れあがり、水が予想以上に注入され安定しないという同様の現象は、類似の USBR 法を用いた実際の現場計測でも観測された。このように USBR 法では、特に拘束がないためベントナイトが吸収膨張し、これにより水が消費され数週間程度では安定した状態とならないので、求められた透水係数はかなり大きく（今回の結果では3 オーダー程度大きく）評価され、実際の透水係数が求められないという問題があることがわかった。

今回開発したA型とS型の透水試験装置より求めた透水係数は、A型で $4 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ 、S型で $1 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ 程度であった。A型とS型の供試体の乾燥密度は、それぞれ 1.43g/cm^3 、 1.47g/cm^3 であり密なS型の透水係数が小さくなってはいない。写真-2は、S型で透水試験実施後の供試体断面を観察したものである。粒径2cm程度の礫が供試体端部に存在するが、サンプラーが完全に礫を切り貫入していることがわかる。

このように、今回用いた火山灰のような礫であればサンプラーは礫を切って貫入される。A型の供試体には大きな礫が存在しないことから、S型の透水係数が大きいのは礫の存在が考えられる。このような若干のばらつきがあるものの、両者の透水係数はオーダー的にはほぼ同じ値が得られた。なお供試体の断面観察によれば、水が部分的に通っているようなことはなく、一様に湿り気を持った色調であった。したがって、透水試験時の試料はほぼ飽和状態であったものと推察される。

三軸セルにより厳密に透水係数を求めた結果は、 $6 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ 程度でA型とS型の間間的な値であり、オー

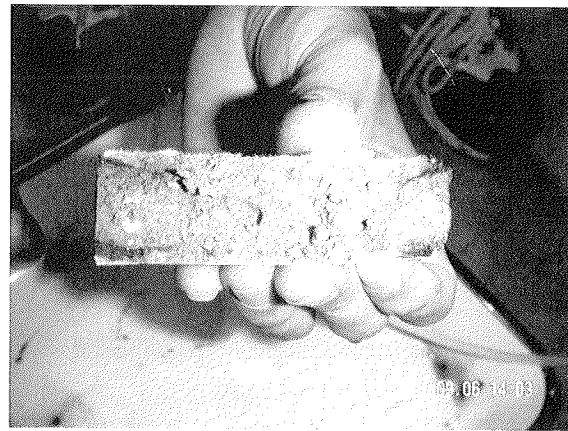


写真-2 S型による供試体の採取状況

ダー的には三者は一致した。当初、今回開発した透水試験装置のサンプラー内壁と供試体との間に水みちができることが懸念されたが、A型とS型の透水係数は三軸セルにより求めた値とほぼ一致したことから、本装置による透水試験では水みちができたとは考えられない。なお、この時の三軸供試体の乾燥密度は 1.36g/cm^3 であり他と比べて小さいが、他と比較し透水係数が極端に大きくなることはなかった。今回の供試体の厚さは2cmと薄く、密度よりもむしろ大きな礫をどの程度含んでいるかにより透水係数のばらつきが生じる可能性がある。しかしながら、USBR法と比較すれば、今回開発した透水試験装置で求めた透水係数は、三軸セルで求めた透水係数と良く一致しており、このようなばらつきはオーダー的にはほとんど無視できる。供試体を厚くすればこのようなばらつきを小さくすることも可能であるが、試験に要する時間が長くなるので、供試体を厚くすることは現場には受け入れられにくい。礫などの混入により透水係数に2倍程度のばらつきが生じるが、この程度のばらつきはほとんど問題にならないので、精度向上のために供試体を厚くし試験時間をかけるよりも、多少のばらつきを許し精度を多少下げても試験時間を少なくすることの方が実際の品質管理には現実的である。以上のように、現場での品質管理に今回開発した透水試験装置を用いることにより透水係数を直接かつ正確に求められることがわかった。

今回の試験では透水係数を求めるのに2ヶ月弱を要した。試験時間をさらに短縮するには、動水勾配を大きくすることが考えられる。今回の試験での最大動水勾配は365とかかなり大きいですが、動水勾配が透水係数におよぼす

影響は今後の検討課題である。

6. まとめ

- (1) サンプラーは火山灰礫も切って貫入しており、不攪乱試料の採取状況は良好であった。
- (2) 現場での採取時間は、1分程度あれば十分であり現場施工に支障をおよぼす可能性は低い。
- (3) 透水試験へのセットも10分程度以下であり現場で容易に試験が可能である。
- (4) 求められた透水係数に影響をおよぼすようなサンプラー内壁と供試体との間の通水は考えられない。
- (5) USBR法は、数週間以上の試験初期段階でベントナイトの吸水膨張が生じていると考えられ、精度の高い透水係数は計測不可能である。
- (6) 新しく開発した透水試験装置で得られた透水係数は、三軸セルを用いて厳密に求めた透水係数と同等であり、この方法で原地盤の透水係数を計測可能である。

今後、他材料を用いた実験を行い汎用性の検証を行うとともに、実現場での実験を行い実施工での適用性の検証を行っていきたい。

本論文は、地盤工学会 第6回環境地盤工学シンポジウム投稿論文⁹⁾を再編集したものである。

謝辞：実験は、有限会社TNSの染谷昇氏、防災R&Dセンター 技術研究所 第二研究室、知久倫子氏に実施して戴いた。ここに記して心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 星野 實, 佐藤 道明, 富田 大学, 水野 克己, 嘉門 雅史: 旭川市芳野廃棄物最終処分場(仮称)における設計事例, 第5回環境地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp.101-106(2003)
- 2) 地盤工学会: 第6章 RIによる土の密度管理, 地盤調査法, pp.420-432(1995)
- 3) 氏家 康博, 星野 實, 岡田 朋子, 藤原 照幸, 水野 克己, 嘉門 雅史: 最終処分場におけるベントナイト混合土の性能と品質評価に関する研究, 第5回環境地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp.71-76(2003)
- 4) 三村 卓, 水野 克己, 新井 靖典, 原島 誠一: 火山灰を用いたベントナイト混合土の研究, 第37回地盤工学研究発表会, pp.2399-2400(2002)
- 5) 最上 武雄編著: 2.3.1 Darcyの法則, 土質力学, 技報堂, pp.98-99(1969)
- 6) U.S. Bureau of Reclamation: Earth manual, p.253(1958)
- 7) 地盤工学会: 第8章締め固めた地盤の透水試験, 地盤調査の方法と解説, 丸善, pp.413-422(2004)
- 8) 筒井 雅行, 沼田 淳紀, 染谷 昇, 松崎 達也: 難透水性材料のための圧密透水試験装置の開発, 第39回地盤工学研究発表会, pp.1215-1216(2004)
- 9) 松崎達也, 沼田淳紀, 筒井雅行, 花村哲也, 平松勝二, 薫田正春: 現場透水試験装置の開発と締め固めたベントナイト混合土への適用性, 第6回環境地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp.317-324(2005)

Summary When evaluating the quality of bentonite soil used as the water-shielding layer of a waste disposal site, it is important to grasp the water-shielding capability of the layer. Since the permeability of a water-shielding layer is difficult to evaluate in-situ, routine quality control regarding permeability is generally practiced by measuring the density at the construction site and estimating the permeability using the relationship between the material density and permeability determined beforehand based on laboratory testing.

While the material quality is constant, its density is a governing factor for determining its permeability, but it is not necessarily the case when the material quality fluctuates. The permeability of bentonite soil, which is a blend of bentonite and sand, is particularly sensitive to not only its density but also the fluctuation of its proportions. In order to precisely evaluate the performance of a water-shielding layer after construction, it is necessary to directly determine its permeability coefficient together with its density. Accordingly, this paper reports on the background of the development of a test apparatus that can simply measure the permeability coefficient on site without stopping the construction work. The outline of the apparatus, laboratory verification tests, and the results of quality control during the construction of Heiwa Waste Disposal Site in Hamamatsu City are also reported.

【Keywords】 waste disposal site, permeability test, bentonite soil, quality control