

締固めた泥岩掘削ずりの透水特性に関する 実験的検討

高下 達也^{1*}・早野 公敏²・高倉 望³・岡田 哲実⁴

¹横浜国立大学大学院 社会空間システム学専攻 (〒240-0067 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

²横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-0067 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

³東急建設株式会社 土木総本部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14 渋谷地下鉄ビル)

⁴財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

*E-mail: d08gc110@ynu.ac.jp

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設を閉鎖する際の埋戻し材には長期の健全性や遮水性が要求される。また、莫大な量が必要なため建設時に生じた掘削ずりを用いる方法が最も合理的である。硬岩・堆積軟岩系の地盤はどちらも候補地であるが、堆積軟岩を用いた埋戻し材の研究事例は少ない。そこで堆積軟岩掘削ずりの埋戻し材への適用を目的とし、締固めた掘削ずりに対して透水試験を行うための簡易な柔壁式の透水試験装置を開発した。さらにそれを用いて締固めた泥岩掘削ずりに対し透水試験を行った結果、 10^{-6} ~ 10^{-8} m/sの透水係数 k が得られた。また含水量の増加と伴に k が低下する傾向が得られたが低下の限界値は 10^{-8} m/s程度で、要求される遮水性の母岩の k のばらつきの上限值程度までしか低下しないことがわかった。

Key Words : backfill material, permeability, crush sedimentary soft rock, compaction

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の処分坑を閉鎖する際の埋戻し材には、10,000年を超える長期の健全性や力学的安定性および遮水性が要求される。また膨大な土量が必要となることが予想される。埋戻し材料としていくつかの地盤材料が想定されるが、そのなかで調達性、経済性、環境などの観点から考慮すると処分施設建設の際に発生する現地の掘削ずりを用いるのが合理的な手法の一つであると思われる。

現在、地層処分場候補地の地盤として火山性硬質地盤のほか、堆積軟岩地盤も有力なものの一つである。しかし現在までに砂質土系や硬岩系の地盤材料を用いた埋戻し材料の開発に関する研究事例はいくつか報告されているものの、堆積軟岩の掘削ずりを用いた埋戻し材に関する研究事例はないと思われる。

そこで、堆積軟岩の掘削ずりを用いた、地層処分施設の埋戻し材の開発を最終的な目的とし、本研究では神奈川県で発生した上総層群の堆積軟岩の掘削ずりを採用し、まず堆積軟岩の掘削ずりの物理化学特性の把握と課題の抽出を行った。そして、その結果を踏まえて、最大37.5mmの礫を含む締固めた掘削ずり試料の遮水性能を求めるための簡易三軸透水試験装置の作製、および締

固めた泥岩掘削ずりの透水特性を検討した。

2. 泥岩の物理特性

掘削ずりとして採取した堆積軟岩は上総層群に属し、地質年代は約150万年で、泥岩に分類される。神奈川県内の立坑および横坑のトンネル掘削時に生じたものを採取した。既往の研究から一軸圧縮強さ2.5~8MPa、ヤング率300~3500MPa、透水係数は変水位、フローポンプ、トランジェント・パルス法などにより求められており 10^{-10} ~ 10^{-8} m/s程度のばらつきの範囲にある。

採取した掘削ずりは最大300mm程度の粒径を含んでおり、まず基本的な物理・化学特性の評価を行った。得られた物理化学特性を表-1に示す。硬岩系の材料と比べて絶対密度が小さく、材料自身の透水係数が大きいと考えられる。スレーキング率¹⁾は12.5~24.1%であり、ス

表-1 泥岩の物理化学特性

絶対密度 D_s (g/cm ³)	吸水率 Q (%)	間隙率 n (%)	スレーキング率 ¹⁾ (%)	破碎率 ¹⁾ (%)	pH
1.52	30.4	41.4	12.5~24.1	42.2	5.3~7.7

レーキングが埋戻し材の品質に顕著に影響を与える材料ではないと思われる。破碎率¹⁾は42.2%と硬岩系の材料と比べて高い値であると思われる。締固め時に粒子が破碎する可能性があり、透水性に影響を与える可能性がある。

3. 簡易三軸透水試験装置の開発

堆積軟岩の掘削ずりを用いた埋戻し材料の開発に際しては、遮水性能をいかに確保するかが重要な課題である。

そこで物理化学試験の実施後、掘削ずりの遮水性能を精度よく評価でき、かつ簡便な透水試験装置を製作した。以下に開発した透水試験装置の概要について述べる。

(1) 埋戻し材を対象とした既往の透水試験装置

試験装置は、なるべく原位置での埋戻し材料の挙動を再現でき、かつ精度よく遮水性能を評価できる必要がある。原位置での挙動を考えると、処分坑内に充填された埋戻し材料は、その後、地下水の浸入を受ける。したがって体積変化を拘束された状態で飽和化されるので、そのような状態で遮水性能を評価することが必要になり、既往の研究において様々な工夫がなされている。既往の埋戻し材に関する研究で用いられた透水試験装置の概要を表-2に示す。

まず、透水セルの境界条件で二つのタイプに分類される。一つは締固めに用いたモールドをそのまま用いる剛壁タイプ、もう一方はメンブレンとセル圧により止水する柔壁式のタイプである。剛壁タイプは、供試体が全方位で拘束されるため、体積変化の拘束が容易である利点があるが、特に本研究で対象とする掘削ずりのような粒径の大きなものを含む場合、モールドと試料の境界が水みちとなる恐れがある。

一方、柔壁式の透水セルの場合、供試体との境界が水みちとなる可能性は剛壁式に比べ低いが、水平方向への供試体の膨張を抑える必要がある。小峯・緒方(2002)²⁾は三軸セル内に内セルを設け、内セル内の水位の変化を測定することにより体積膨張を測定し、セル圧の調整により供試体の体積変化を抑えている。また、小峯・緒方(2002)²⁾では、鉛直方向の供試体の変位を固定し、膨潤圧をロードセルによって測定しており、膨潤圧が一定となったところで透水試験を開始している。

(2) 中型簡易透水セルの作製

上記の小峯・緒方(2002)²⁾の透水試験装置を参考にして柔壁式の簡易な三軸透水セルを作製した。ただし本研究では、掘削ずりを用いた埋戻し材として最大粒径が既往のものより大きいものが想定される。したがって既往の研究に比べて供試体の寸法を大きくする必要があるが、一般的な三軸セルを用いたセルをそのまま延長していくと大型になり、その場合、試験作業が煩雑になりまた経済的でもない。

そこで、図-1に示す機構の透水セルを作製した。供試体の寸法は掘削ずりの最大粒径は37.5mmを予定しているため $\phi 150 \times 125\text{mm}$ ($\phi 150\text{mm}$ モールドの寸法)とした。内径155mm、厚さ13mmの塩化ビニル製の円筒容器に厚さ0.5mmのメンブレンをかぶせ、円筒容器とメンブレンの間にセル水を充填し、セル圧 p_c を加える柔壁式の透水セルとした。供試体の鉛直方向の変位を固定してロードセルで鉛直圧 p_v を測定し、水平方向に生じる体積変化量 ΔV はセル水の増減量をセルに接続したビュレットで測定し、セル圧で体積変化を抑える機構にした。この機構で 120cm^3 (供試体の体積の5.4%)の体積膨張を測定することができる。

また図-2にシステムの全体概要を示す。試験方法は定水位透水試験とした。入水側、排水側に設置した畜圧

表-2 既往の研究での透水試験装置

		永友ら(2004) ³⁾	田中・戸井田(2008) ⁴⁾	小峯・緒方(2002) ²⁾
透水試験方法		変水位		定水位
供試体	試料	礫混入ベントナイト混合土		ベントナイト混合土(砂質土)
	最大粒径(mm)	37.5	40	0.6
	寸法(mm)	$\phi 100 \times 127$		$\phi 60 \times 10$
透水セル	タイプ	柔壁式(三軸セル)	鋼製モールド	柔壁式(三軸セル)
	体積変化		無し(全方向拘束)	無し(セル内に内セルを設けて、内セル内の水位の変化で体積変化量を計測し、セル圧で制御)
	膨潤圧	測定なし		ロードセルで計測
その他	-	-	-	入・排水量を測定

タンクに圧力差を与えて透水させ、蓄圧タンクの水位の変化量から入水量 Q_{in} 、排水量 Q_{out} を測定する。供試体両端の差圧 Δp は圧力計で測定される入水側圧力 p_{in} 、排水側圧力 p_{out} の差として求める。

この定水位透水試験装置では流量の測定をタンクからピュレットに変更することなどによって、 $10^{-11}m/s$ 程度の透水係数まで測定可能である。

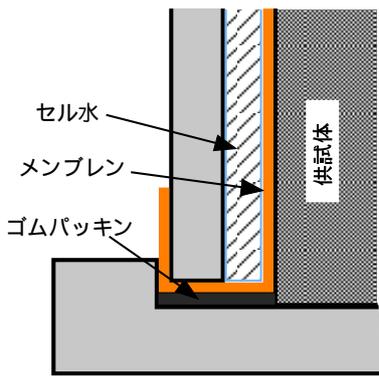
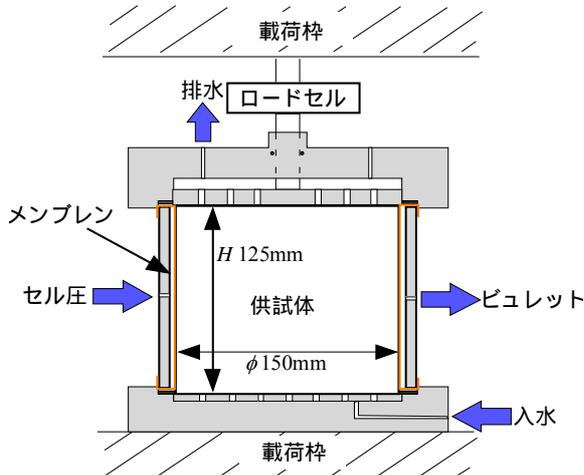


図-1 簡易三軸透水セル

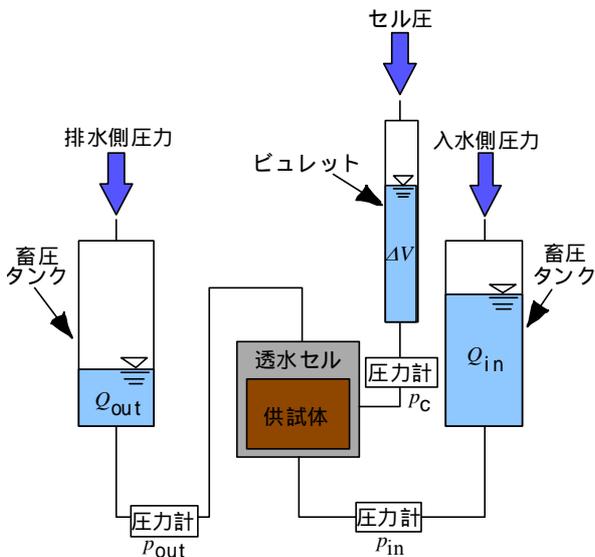


図-2 透水試験装置概要

4. 締固めた泥岩掘削ずりの透水特性

泥岩掘削ずりの締固め特性の把握、および作製した透水試験装置を用いて締固めた泥岩掘削ずりの透水特性の把握を行った。

(1) 締固め特性

締固め試験を日本工業規格「突固めによる土の締固め試験方法」(JIS A 1200:1999)に準拠し、表-3 に示す締固め条件で行った。良く締固まった試料ほど遮水性が向上すると考えられるので、粒度分布は締固めが良く効くとされる Talbot の曲線に基づき設定した。Talbot の曲線は以下の式で表わされる。

$$P=(d/d_{max})^n \times 100 (\%)$$

ここに、 P ：通過質量百分率(%), d ：粒径(mm), d_{max} ：最大粒径(mm), n ：指数

今回の実験では n の値が $1/4$, $1/3$, $1/2$ の供試体を準備した。供試体の粒度分布を図-3 に示す。

締固め試験の結果を図-4 に示す。最大乾燥密度 ρ_{dmax} は $n=1/4, 1/3, 1/2$ の順に大きく、 $1.51, 1.50, 1.49g/cm^3$ であった。最適含水比は $n=1/4, 1/3, 1/2$ の順に $24.5\%, 22.5\%, 19\%$ と小さくなった。

表-3 締固め条件

ランマー重量(kg)	モールド内径(mm)	突き固め層数	1層当たりの突固め回数	許容最大粒径(mm)
2.5	150	3	55	37.5

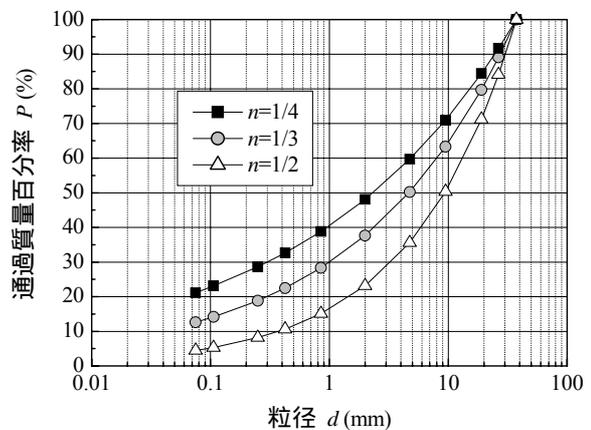


図-3 粒度分布

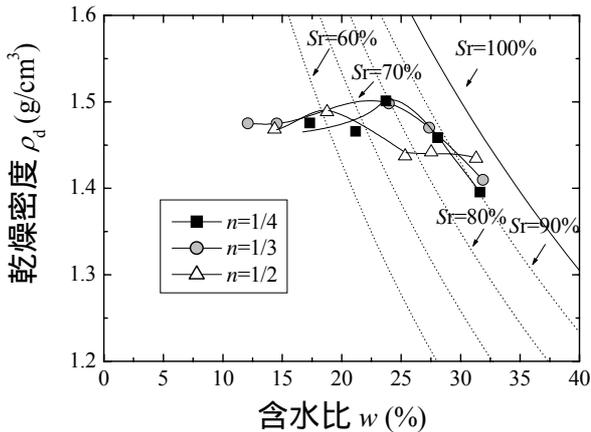


図-4 締固め曲線

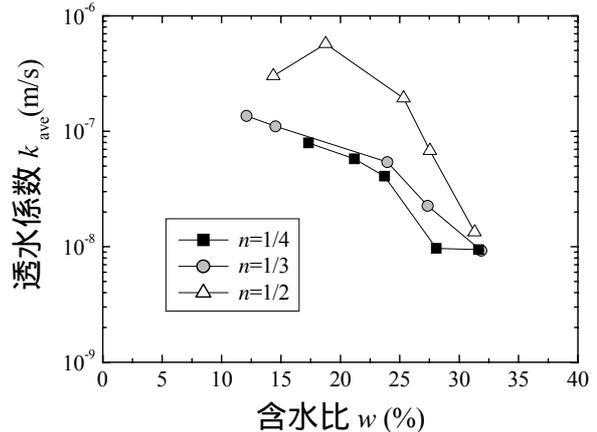


図-5 透水係数と含水比の関係

表-4 通水時の供試体の体積膨張の有無

粒度分布	含水比 w(%)	体積膨張	調整後セル圧
Talbot n=1/4	17.3	あり	63
	21.2	あり	56
	23.7	あり	55
	28.1	なし	—
	31.6	なし	—
Talbot n=1/3	12.1	あり	52
	14.5	あり	52
	24.0	あり	48
	27.4	なし	—
	31.9	なし	—
Talbot n=1/2	14.4	あり	62
	18.8	あり	58
	25.3	あり	52
	27.5	あり	56
	31.3	なし	—

(2) 透水試験

a) 試験方法

締固めに用いた供試体を用いて定水位透水試験を行った。供試体はセルに設置後、供試体中央での有効拘束圧ができる限り小さくなるような条件で $p_c=45\text{kPa}$ 、 $p_n=30$ or 40kPa 、 $p_{out}=0\text{kPa}$ で通水し飽和させた。通水時には Q_n 、 p_n 、 p_c 、 ΔV 、 p_v を測定した。また、通水時に供試体に体積膨張が測定された場合は p_c を調整し膨張を抑えた。表-4 に各供試体での通水時の体積膨張の有無と調整後のセル圧を示す。含水量の少ない試料ほど体積膨張する傾向が得られた。しかし、それほど顕著な体積膨張は見られていない。また、ロードセルによって測定される供試体鉛直方向の圧力 p_v の変化量が小さかったことから同じことが言える。

通水量が供試体の体積の3倍となった時点で通水を終了した⁵⁾。

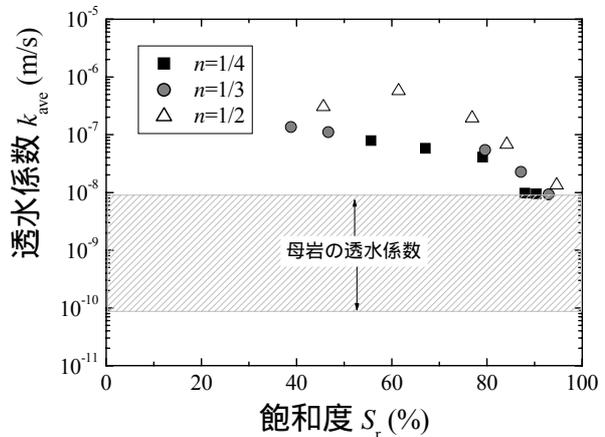


図-6 透水係数と締固め時の飽和度の関係

通水終了後、 $p_n=40\text{kPa}$ 、 $p_{out}=10\text{kPa}$ で定水位透水試験を行った。セル圧は通水時に体積膨張が見られなかった供試体では $p_c=50\text{kPa}$ 、体積膨張が見られた供試体では通水時のままで試験を行った。試験は入水量 Q_{in} 、排水量 Q_{out} と時間 t との間に線形関係が得られるまで行い、線形関係からダルシーの法則を用いて入水側、排水側の透水係数をそれぞれ求めた。入水側と排水側の透水係数の平均値を k_{ave} とした。

b) 試験結果

図-5 に k_{ave} と w の関係を示す。 n の値が小さいほど低い k_{ave} が得られた。良く締固めが効くとされる $n=1/4 \sim 1/2$ の範囲では、 $n=1/4$ が最も遮水性を発揮することが分かった。また、含水比の増加に伴い k_{ave} が低下する傾向が得られたが、 $n=1/4$ の試料では $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ で k_{ave} の低下が頭打ちとなった。遮水性の向上のためにこれ以上高含水にしまうと、埋戻し材として必要な力学的安定性が損なわれてしまう可能性がある。

c) 締固めた泥岩掘削ずりの透水係数の限界値

k_{ave} を締固め時の飽和度 S_r で整理したものを図-6 に示

す．上に述べたように，飽和度の増加に伴い k_{ave} は一様に低下する傾向にある．通常，最適含水比より少し湿潤側で最小の透水係数を得られるが，仮に飽和度を増加させ透水係数が一様に低下すると仮定すると， $S_r=100\%$ での k_{ave} が透水係数の低下の限界値となる．図より $S_r=100\%$ での k_{ave} は $5 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度と考えられる．このことから締固めた泥岩掘削ずりのみでは既往の研究から求められている母岩の透水係数のばらつきの上限值程度までしか遮水性が向上しないことがわかった．要求される透水係数は母岩と同程度以下であるため，遮水性向上のために添加材を加えるなどの工夫が必要だと考えられる．

5. まとめ

地層処分施設の埋め戻し材への堆積軟岩の現地発生土の適用を念頭に，最大粒径 37.5mm の締固めた供試体に対応した簡易透水試験装置を作製した．さらに作製した透水試験機を用いて締固めた泥岩掘削ずりの透水特性を検討した．その結果， $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ の透水係数が得られ，

含水比の増加に伴って透水係数が低下する傾向が得られたが，低下の限界値は 10^{-8}m/s 程度であり，埋戻し材に要求される母岩の透水係数の上限値程度までしか低下しないことがわかった．そのため，添加材を加えるなどの工夫が必要であると考えられる．

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：試験方法 第一編 土質関係試験方法，2007．
- 2) 小峯秀雄，緒方信英：ベントナイト緩衝材・埋戻し材の透水特性と簡易評価方法，土木学会論文集，No.708/-59, pp.133-144，2002．
- 3) 永友大彰，今泉繁良，土居洋一，中田雅夫，戸村豪治：現地発生度を利用したベントナイト混合土の配合設計と実施例，第6回環境地盤工学シンポジウム，pp.325-330，2005．
- 4) 田中俊之，戸井田克：礫-砂-ベントナイト混合土の透水特性と透水係数の評価方法，土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.101-110，2008．
- 5) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説 -第一回改訂版-，pp.460，2000．

EXPERIMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF PERMEABILITY OF COMPACTED CRUSH MUDSTONES

Tatsuya KOUGE, Kimitoshi HAYANO, Nozomu TAKAKURA and Tetsuji OKADA

Few studies have been done on the crush sedimentary soft rocks to be applied as backfill materials for the tunnels made for repository of high level radioactive wastes. Therefore in this study crushed sedimentary mudstones were collected from an excavation site and first their fundamental physical properties were investigated. Then a simple triaxial permeability cell was newly developed to examine their permeability. Preliminary tests results showed that the lowest coefficient of permeability of compacted crush mudstone is about 10^{-8}m/s . However it is still higher than that of intact rocks. So additional improvement method may be required to achieve the impermeability same as that of intact rock.