凝灰質砂岩を対象とした岩石の熱特性,透水特性,力学特性 に関するばらつきの評価

納谷 朋広1*・中島 雅之1・岡田 哲実2・西本 壮志2・川久保 政洋3

¹ダイヤコンサルタント物性評価部(〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)
 ²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)
 ³原子力環境整備促進・資金管理センター(〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号)
 *E-mail: t.naya@diaconsult.co.jp

Key Words: thermal property, permeability, mechanical property, statistical dispersion, sandstone

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の操業から数百年の間の処分孔周辺(ニアフィールド)では,廃棄 体の発熱、地下水の再冠水、空洞の埋め戻しに伴う応力状態の変化等が起こり、これらの環境変化に伴い、 人工バリア及び周辺岩盤の物性(熱特性,水理特性,力学特性)が変化する.また,熱,水理,力学 (THM)の各特性が相互に影響を与える可能性もある.例えば、水理(透水)特性や力学特性が熱の影響 を受けることなどが報告されている ¹⁾. さらに, 耐用年数が数十年の一般的な土木構造物と比較し, 評価期 間が非常に長いため、各特性の時間依存性も考慮する必要がある。以上より、数値解析によりニアフィール ドの長期挙動を精度良く予測することは、モデル化のみならず物性評価の観点からも必ずしも容易ではない. このような複雑なニアフィールドの長期挙動を、実用的かつ合理的に評価するためには、物性のばらつきを 考慮した評価体系が必要と考えられる。例えば、重要土木構造物の耐震設計においては、設計強度の平均値 の-1σ(σ:標準偏差)を解析用物性値として使用し、強度を低下させることで、安全性を担保する場合が ある.しかし、ニアフィールドの長期挙動評価では、強度が評価項目でなく、核種の移動速度に影響を与え る要因(例えば、オーバーパックの位置や緩衝材の密度分布等)が主要な評価項目となるため、従来の土木 構造物の安全評価の概念をそのままニアフィールドの安全評価に適用することは困難である.したがって, 数値解析に入力する物性値について、

①物性値のばらつきの把握、

②物性値の相互影響、

③物性値の時間依 存性,を考慮しておくべきである.加えて,既往の試験方法によって取得される THM 特性がニアフィール ド長期挙動評価においても適用性を有するかの課題の抽出が必要である.

上記のような観点で,集中的に岩石の物性を取得した事例は見当たらない.そこで,本研究では,ニアフィールドの遠心力模型実験²⁾と数値解析³⁾に使用した岩種を対象として,現時点では試験数量は限られるものの,熱特性,透水特性,力学特性に関する物性を取得し,今回は,上記①と②の観点で試験を実施して結果を取りまとめ,課題を抽出した.

2. 試験方法

(1) 試料

対象岩盤は,新第三紀前期鮮新世の含礫凝灰質砂岩である. 亀裂が比較的少なく,主に中粒〜粗粒の砂から構成される.ゆるみ領域約30cm程度取り除いた地表付近から直径180mmの大孔径コアを採取した.

(2) 試験方法と試験手順

試験の一覧を表-1に示す.試験に使用した供試体は,各種の試験に必要な寸法に大孔径コアから再度コ ア抜きし,成形した.解析用の物性値を取得するための基本試験として,①物性値のばらつきの把握,を行 った.表中の飽和供試体とは,供試体の整形後に一週間以上蒸留水に浸水させて脱気したものである.表中 の乾燥供試体とは,湿潤状態の供試体を110℃の恒温槽で24時間程度乾燥させてから室温24℃のデシケータ ーで常温に戻したものである.一方,①の試験の後,②物性値の相互影響評価のための試験をいくつか実施 した.具体的には,各特性の中で後述する.

特性	No	物性値	試験方法	供試体寸法 (mm)	①物性値のばらつきの把握		②物性値の相互影響	
					数量	含水状態	数量	影響項目
熱特性	Т1	熱伝導率	熱伝導率測定 「ASTM D5334−14」: 準拠	φ 50 × 100	10	乾燥 供試体	38	飽和度
	Т2	比熱	「断熱法(長崎-高木法)」:参考	ϕ 16 × 31	10	乾燥 供試体	2	密度
	Т3	熱膨張 係数	ひずみゲージ貼付による 熱膨張測定:参考	ϕ 50 × 100	10	乾燥 供試体	3	飽和度
透水特性	H1	透水係数	「低透水性材料に対する 透水試験方法」:参考	ϕ 50 × 100	8	飽和供試体 拘束圧3MPa	16	拘束圧 (密度)
	H2	化学ポテンシャル (排水過程、 吸水過程)	土の保水性試験方法 サイクロメーター法 「JGS 0151-2009」: 準拠	φ 35 × 4	24	吸水過程	26	排水過程
力学特性	M 1	圧縮強さ、残留強さ、 ヤング率、ポアソン比	岩石のCD三軸圧縮試験方法 「JGS 2534ー2009」: 準拠	ϕ 50 × 100	8	飽和 供試体	8	飽和度

表-1 試験基準の一覧表

(3) 熱特性

a) 熱伝導率

ASTM D 5334-14に準拠した非定常法ニードル方式の試験装置を用いた. 熱伝導率計の測定範囲は, 0.1 ~6W/m/Kとなる. 供試体の中心に直径約 φ 1mm, 長さ約90mmの計測孔を穿孔して発熱体(金属製プローブ)を挿入し, 熱伝導率を測定した. なお, 熱電伝導率は, 温度と時間の関係から(1)式で表される.

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \{ \ln(t) + B \}$$
(1)

ここに、ΔTは温度、Qはヒーターの出力、tは加熱時間、λは熱伝導率、Bは定数となる、今回は、ΔTは 約0.1℃、Qは約5.5W、tは100sで試験を実施した.表-1に示すように、①物性値のばらつきの把握のために、 乾燥状態の供試体を使用した.加えて、②物性値の相互影響のうち、飽和度の影響を調べるために、乾燥状 態の熱伝導率を測定後に噴霧器で供試体に給水を行い、任意の含水状態とした後に、室温24℃で12時間以 上放置してから熱伝導率を測定した.なお、12時間程度放置することが適切かどうかは明確ではない.

b)比熱

断熱走査型の測定装置を用いた.本装置では断熱法(長崎-高木法)⁴⁾による測定が可能である. 試料の 温度が $\Delta\theta$ ℃だけ温度上昇するのに Δt 秒の時間を要したとすると,試料の θ ℃における定圧比熱 C_p は, (2)式 で表される.

$$c_p = \frac{w\Delta t}{M\Delta\theta} \tag{2}$$

ここで、wは加熱用の内部ヒーターの電力、Mは試料の重さ、θは試料の温度、tは時間となる. 試料の重さ は10g程度で、0.5℃間隔で測定を実施した. ①物性値のばらつきの把握のために、乾燥状態の供試体を使用 した. 岩石の比熱特性では、加熱試験することで間隙中の水分が蒸発することによる温度依存性が存在する が、解析プログラムLOSTUF³⁾では、固相と液相の比熱は間隙率と密度の関係に基づき別々に計算されるた め今回は乾燥状態のみの試験を実施した. 加えて、②物性値の相互影響のうち、密度の減少による影響を把 握するために、固体の試料をすり鉢で粉砕して粒状体にした試料でも比熱を測定した.

c) 熱膨張係数

熱膨張係数では、ひずみゲージを貼付した供試体を恒温槽内で加熱する方法を用いた. ①物性値のばら つきの把握のために、乾燥状態の供試体を使用した.供試体の中央高さの対面する2か所にひずみゲージを 貼付し、加熱速度0.5℃/min程度で試験を実施した.ひずみゲージの加熱によるひずみが発生するため、文 献⁵⁾を参考に熱膨張ひずみを補正した.加えて、②物性値の相互影響のうち、熱膨張係数の水分の影響を把 握するために、飽和供試体でも試験を実施した.直径16mm、高さ18mmの供試体を作製し、蒸留水中で一 週間以上保管して飽和させた.試験方法は押し棒式⁶⁾を使用し、昇温速度は5℃/minとした.

(4) 透水特性

a)透水係数

透水試験では、①物性値のばらつきの把握のために、文献⁷⁾を参考にして三軸セル内で拘束圧1.5MPaの条件で飽和状態の供試体に対して変水位透水試験を実施した.加えて、②物性値の相互影響のうち、拘束圧 (すなわち密度)の増加の影響を確認するために、拘束圧を段階的に増加させて透水試験を実施した.流入 側と流失側の流量がほぼ同じになった時に供試体が飽和したと考え、流入側圧力0.4MPa,流出側圧力 0.35MPaで試験を開始した.透水係数の算定は、地盤工学会の低透水性材料に対する透水試験方法の基準案 の式⁸⁾を用いた.

b) 化学ポテンシャル

化学ポテンシャルの測定については、サイクロメータ法を使用して試験を実施した. ①物性値のばらつ きの把握のために、ニアフィールで主に発生する吸水過程において、110℃の恒温槽で絶乾させた試料を多 数用意し、噴霧器で含水を調整した後に、密閉容器に入れた試料を24℃の恒温槽に12時間程度放置してか ら、供試体の温度と含水状態を一定にして試験を実施した. なお、12時間程度放置することが適切かどう かについては明確ではない. 一方、ニアフィールドでは、熱の影響で排水過程が生じる可能性もあるため、 排水過程についても試験した. 試料は、一週間以上蒸留水に浸水させて脱気させた飽和状態の供試体を多数 用意し、110℃の恒温槽で水分を強制排水させて様々な含水比の試料を作製した. その後、密閉容器に入れ た試料を24℃の恒温槽に12時間程度放置してから、供試体の温度と含水を一定状態にして試験を実施した.

(4) 力学特性

a) 圧密排水三軸圧縮試験

圧密排水三軸圧縮試験では、①物性値のばらつきの把握のために、飽和状態を基本の物性として試験を 実施した.加えて、②物性値の相互影響のうち、飽和度の影響を把握するために乾燥状態の供試体を使用し て圧密非排水三軸圧縮試験を実施した.

3. 試験結果

(1) 熱特性

a) 熱伝導率

①物性値のばらつきの把握のための試験結果のヒストグラムを図-1a)に示す. 乾燥供試体の熱伝導率の 算術平均は, 0.48W/m/Kで変動係数は0.09となった. 文献¹⁾の凝灰岩の熱伝導率では, 1~2W/m/K程度のば らつきを示しているが、本研究ではそれよりかなり小さい.また、②物性値の相互影響として、熱伝導率と 飽和度との関係を図-2に示す.図中の、線形最小二乗法でフィッティングした飽和度と熱伝導率の関係よ り、概ね線形近似は妥当であることがわかる.熱伝導率を図-2の回帰式で除した値のヒストグラムを図-1b)に示す.変動係数は0.11と若干大きくなるが、分布形状は正規分布に近い形状を示している.

b)比熱

全試験結果から得られた比熱と温度の関係を図-3に示す.温度の上昇とともに若干ではあるが比熱も逓 増している傾向がみられる.また,測定値のばらつきは大きいが,これは測定間隔を0.5℃と小さく設定し たためと考えられる.そこで,比熱の物性値は,個々の試験結果を25~100℃までのすべての値の算術平均 値とした.①物性値のばらつきの把握のためのヒストグラムを図-1c)に示す.現在の試験数量では,分布 形状は明確ではない.また,②物性値の相互影響として密度の減少の影響を見るために実施した粉砕した供 試体の比熱が図-3に示されているが,固体の供試体と大きな違いは見られない.

c) 熱膨張係数

全試験結果から得られた熱膨張係数と温度の関係を図-4に示す.①物性値のばらつきの把握のために実施した乾燥供試体の熱膨張係数は、温度の上昇とともに逓減する傾向が見られる.そこで、比熱の物性値は、 個々の試験結果を25~100℃までのすべての値の算術平均値とした.この①物性値のばらつきの把握のため のヒストグラムを図-1d)に示す.現在の試験数量では、分布形状は明確ではない.一方、②物性値の相互 影響のうち、熱膨張特性の水分の影響を把握するために実施した飽和状態の供試体の試験結果も図-4中に 示されているが、乾燥状態より熱膨張係数が小さい.この違いが飽和度の影響であるか、試験方法の影響で あるかは、現時点では明確ではない.



図-1 各物性値のヒストグラム

(2)透水特性

a)透水係数

全試験結果から得られた透水係数と拘束圧の関係を図-5に示す.供試体ごとの透水係数では,拘束圧(密度)の上昇とともに低下がみられる.拘束圧3MPaの時の①物性値のばらつきの把握のためのヒストグラムを図-1e)に示す.現在の試験数量では,分布形状は明確でない.また,変動係数も他の物性値と比較して大きい.

b) 化学ポテンシャル

化学ポテンシャルと飽和度の関係を図-6に示す.保水特性として,化学ポテンシャルと飽和度の関係をvan Genuchtenの式⁹⁾で回帰した.岩石についても排水過程と吸水過程のヒステリシスが確認できる.①物性値の ばらつきの把握のため,吸水過程の保水特性をvan Genuchtenの式で除した値のヒストグラムを図-1f)に示す.これより,試験個数24個で分布形状は正規分布に近い形状を示している.

(3) 力学特性

a) 三軸試験における強度変形特性

飽和状態および乾燥状態の圧密排水三軸試験のピーク強度と残留強度を図-7に示す.乾燥状態のピーク 強度は、飽和状態の供試体と比較して大きい.しかし、残留強度では、その差は小さい. 飽和供試体につい ては、これらの関係を最小二乗法で直線回帰し、ピーク強度と残留強度を回帰式で除した値のヒストグラム を図-1g)、図-1h)に示す.ともに、分布形状はあまり明確でないが、変動係数はかなり小さい.



一方,割線ヤング率Es,50と拘束圧の関係を図-8に示す.Es,50については,強度と同様に乾燥状態の方が大きい.しかしながら,強度と異なり,飽和状態でも乾燥状態でも拘束圧の影響が見られない.そこで,飽和時のEs,50については,全拘束圧の算術平均値のヒストグラムを示した(図-1i)).強度と同様に,分布形状はあまり明確でない.しかし,強度と異なり,変動係数は大きい.

5. おわりに

(1)物性値のばらつきの把握について

現在の試験数量では、熱伝導率、および保水特性以外では、ヒストグラムから物性値の分布形状を把握 するのは困難であった.一方、強度や比熱の変動係数が小さく、透水係数やヤング率の変動係数が大きい 結果となった.各特性の物性値のばらつきを評価するためには、20個を超える試験数量が必要である可能 性が高い.また、ばらつきの評価において供試体寸法は統一すべきであるが、試験基準により供試体寸法が 異なるため解釈が困難である.また、各物性の物性相関については個別の試験を行っているため不明である.

(2)物性値の相互影響について

熱伝導率と飽和度は概ね線形の関係が見られる.比熱と熱膨張係数については温度依存性が見られる. 一方,熱伝導率に温度依存性があるかどうかを判断することは、今回の試験方法では困難である.また,熱 膨張係数には、飽和度依存性が見られるが、試験法の違いによる影響の可能性もある.透水係数は拘束圧の 増加とともに低下する傾向が見られる.一方,化学ポテンシャルから求められる不飽和の保水特性と不飽和 の透水試験結果を比較して検討を行った方が良い.飽和時と比較して乾燥時の強度と剛性は増加するが、現 時点では不飽和時の強度と剛性は不明である.同様に、力学特性や透水特性の温度依存性も現時点では不明 である.

(3) その他の今後の課題

物性値の時間依存性のうち、力学特性についてはクリープ試験等で評価可能であるが、熱特性や透水特 性の時間依存性については、考慮する必要があるかどうかを含めて検討する必要がある.ばらつきを含んだ 各特性値の把握にはかなりの数量の試験が必要となるが、供試体のサイズの影響も考慮した合理的な物性取 得・整理方法の開発が望まれる.

謝辞:本研究は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成27-28年度地層処分技術調査等事業(処分シ ステム工学確証技術開発)」及び「平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (処分システム工学確証技術開発)」の成果の一部である.

参考文献

- 1) 土木学会編, 熱環境下の地下岩盤施設の開発を目指して-熱物性と解析-, pp.16-35, 2006
- 2) 西本壮志,荒井郁岳,橋爪秀夫,岩谷隆文,地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM 長期挙動評価 手法の構築に向けて(その 5) - 遠心力模型実験 - ,第 52 回地盤工学研究発表会, 2017
- 3) 渡辺高志, 弘中秀至, 澤田昌孝, 西本壮志, 石井智子, 地層処分場の人工バリアと周辺岩盤の THM 長期 挙動評価手法の構築に向けて(その2) - 遠心力模型実験の数値解析 - ,第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.
- 4) 長崎誠三, 高木豊, 高温に於ける比熱の測定法について, 応用物理, 17, 5, pp.104-108, 1948.
- 5) 平野公平,岡田哲実,澤田昌孝,高倉望,池野谷尚史,谷和夫,田中悠一,温度が変化する条件下における岩盤内部のひずみ計測結果の補正,第45回地盤工学研究発表会,2010.
- 6) 日本規格協会, JIS A 1325 建築材料の線膨張率測定方法, 1995.
- 7) 川崎了,中川加明一郎,小泉和広,堆積岩の圧密現象に着目した透水係数推定の試み,応用地質, Vol.39, No.3, pp.273-281, 1998.
- 8) 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する委員会,低透水性材料に対する透水試験方法(基準 案),第60回地盤工学シンポジウム,2016.
- V. Genuchten, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 5, pp.892-898, 1980.