珪藻質泥岩の水分量変化に伴う 物性変化に関する研究

前川 恵輔^{1*} · 長田 昌彦²

¹独立行政法人 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門(〒319-1194 茨城県東海村村松4-33) ²国立大学法人 埼玉大学 地圏科学研究センター(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255) *E-mail: maekawa.keisuke@jaea.go.jp

地下施設建設時における坑道内の空気の循環等に伴い,坑道近傍の岩盤の透水性等の物理特性が掘削前 と異なることが知られている.地層処分場を想定した場合,これらの影響を考慮することは,施設の健全 性に加え長期に亘る安全性を評価する上で極めて重要となる.しかし,物理特性の変化の程度や範囲を評 価する手法は確立されていない.そこで,評価手法の整備の一環として,北海道幌延町の原子力機構の地 下研究施設で採取した珪藻質泥岩を用いた乾燥変形試験を実施し,乾燥に伴う岩石の変形挙動等を検討し た.その結果,乾燥変形挙動が層理面に対して異方性を示すなどの挙動の特徴を確認できた.乾燥速度の 温度依存性等から,物性試験時の留意点や挙動のモデル化に必要な基礎情報を取得できた.

Key Words : *sedimentary rocks, diatomaceous mudstone, drying-induced deformation, material property, anisotoropy*

1. 研究目的

道路や鉄道のトンネル,地下発電所,将来の建設が検 討されている放射性廃棄物の地層処分施設など,地下施 設の建設・操業時においては,作業上,坑道内の換気は 必須である.坑道内の換気に伴い,坑道の壁面近傍にお ける岩盤の透水性や強度などの物理特性は,掘削前とは 変化することが考えられる.北海道釧路炭鉱では,乾燥 に伴う岩盤の物理特性の変化により坑壁が崩落したとの 解釈が報告されている¹.

岩盤のうち,とくに強度が低い堆積岩では,乾燥によ る割れ目の発生や体積収縮が結晶質岩などに比べて顕著 であり,それらに伴って岩盤の透水性や強度の値や分布 範囲は変化するものと考えられるが,その程度や範囲を 定量的に評価する手法は確立されていない.坑道近傍の 岩盤領域は,地層処分施設の建設から閉鎖後を通じて地 下水の移行経路となり得るため,その物理特性の評価は, 地層処分施設の施設設計と長期に亘る安全評価の双方に おいて重要な要素となる.上記のことを踏まえ,本研究 では,堆積岩中に地下施設を設置する際の坑道近傍にお ける岩盤の乾燥の影響に関する調査評価手法の開発を目 的とする.

2. 研究内容

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下,原子力 機構という)が進めている幌延深地層研究計画において 建設中の地下研究施設の坑道やボーリング調査で得られ た岩石試料により乾燥の程度と岩石の物理特性の関係を 把握する.坑道近傍の岩盤の物理特性に関する調査評価 手法構築の一環として,室内試験(土粒子密度試験,水 銀圧入試験,圧裂引張試験,乾燥変形実験)を実施し, 岩石試料の物理特性を取得する.

3. 試料

試料には、原子力機構が北海道幌延町で建設中の地下 研究施設のうち、深度140mに位置する水平坑道より採 取した岩石コアを用いた(図-1).本試料は、新第三紀 の堆積岩である声問層に属する珪藻質泥岩であり、現場 での水理試験用に掘削した水平ボーリングコアの一部で ある.採取後、乾燥を防ぐためにフィルムシートに封入 し、シーラーで脱気・密封した上で保管した.試料は、 直径約64mm、長さ約30cmおよび40cmで、坑道壁面の孔 口からの距離が近い順にコア1、コア2と呼ぶ.コア2に は雁行状の割れ目が観察された.試験では供試体に割れ



図-1 試料採取位置

表-1 土粒子密度試験結果

Name	boring depth	grain density	average
	m	$\rm g/cm^3$	
core1	2.7 - 3.0	2.348	2.407
		2.443	
		2.431	
core2	5.0 - 5.4	2.419	2.382
		2.402	
		2.326	

目が含まれないようにした.

一般に、堆積岩の透水性や変形・強度特性は、堆積面 の方向によって異なる. 圧裂引張試験や乾燥変形試験に おいても、この異方性を考慮することが必須であること から、試料の堆積面方向を認定することは重要である. 幌延地域で採取された珪藻質泥岩においても、物性値に 異方性がある可能性が報告されている².

今回の試料を採取した地層の走向傾斜はほぼ水平であり,試料表面の炭化物の跡とみられる黒いシーム状の物 質に基づき堆積面を観察したところ,コアの軸方向と平 行な堆積面を確認した.

4. 実施内容

(1) 土粒子密度試験

各コアの末端部から試料を採取し,乳鉢ですりつぶ した後,地盤工学会編「土質試験 基本と手引き」に従 い土粒子密度を測定した.

測定結果(表-1)にはややバラツキがみられるが、これは岩石自体が局所的に不均質であることに起因するものと考えられる.

(2) 水銀圧入試験

測定には、各コアから採取し、5mm角程度の大きさに 整形したものを用いた。各コアから2試料、合計4試料に ついて測定を行った。測定結果は(1)式により等価な間 隙半径を算出した。

 $r = -(1/P) 2 \gamma \cos \phi \tag{1}$



図-2 間隙半径分布(コア1)

表−2 圧裂引張試験に用いた試料の諸量と載荷方向

sample name	initial weight without gauges (g)	initial diameter (cm)	initial height (cm)	initial volume (cc)	$\begin{array}{c} { m natural} \\ { m density} \\ { m (g/cm^3)} \end{array}$	loading direction
HNMS2a	338.85	6.39	6.68	214.22	1.58	//bed
HNMS2b	342.58	6.39	6.85	219.68	1.56	$\perp \mathrm{bed}$

表-3 圧裂引張試験結果のまとめ

sample name	tensile	strain		Principal strain	
(loading direction)	$\operatorname{strength}$	at failure	average	at failure	average
	(kN/m^2)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)
IINMS2a	356.0	1593	1568	1962	1993
(//bed)		1542		2023	
HNMS2b	409.2	2732	2654	2858	2855
$(\perp bed)$		2576		2851	

r:間隙半径, P: 圧力, γ :表面張力(485 dynes/cm), ϕ :接触角(130 degree)

試験結果の例を図-2に示す. 図中には水銀圧入試験で 求められた間隙率等を併せて示した. 横軸は間隙半径の 常用対数,縦軸は間隙半径の全間隙に占める区間ごとの 百分率を示しており,全領域で積分すると100%となる. 間隙半径分布の特徴としては,0.1μm付近に大きな単一 ピークを有することが挙げられる.

(3) 圧裂引張試験

試料は2供試体とし、それぞれ堆積面方向に対して圧 縮方向を変えている(表-2).

供試体両端面にロゼットゲージを貼り付け,試験時の 供試体の変形を記録した.載荷にはオルゼン型汎用載荷 装置(容量 2トン)を用い,2つの変位計をロードヘッ ドに接触させて,載荷軸方向の変位を計測した.ひずみ ゲージからの出力は,圧縮が負,引張が正となるように とっている.載荷軸方向が主ひずみの0 degree方向とな るように計算している.

試験結果(表-3)から,堆積面の直交方向に引っ張ら れた方が強度が低く,破壊時のひずみは小さいことがわ かる.

表-4 乾燥変形実験試料一覧

sample name	incubator set T (°C)	incubator set RH (%)	initial diameter (cm)	initial height (cm)	initial volume (cc)	initial weight without gauge (g)
HNMS1-001	25	50	6.39	3.28	105.19	14
HNMS1-002	40	50	6.39	3.27	104.87	-
HNMS1-003	40	50	6.39	3.50	112.24	179.27
HNMS1-004	40	50	6.39	3.42	109.68	172.49

(4) 乾燥変形実験

a)実験装置

乾燥変形実験装置は、インキュベータ、データロガー およびスイッチボックス、電子天秤、データ収録用PC から成る.この装置により、インキュベータの温度・湿 度、供試体の質量、供試体に貼り付けたロゼット型ひず みゲージ(3ゲージ×4枚)によるひずみをそれぞれ計測 した.

これらのセンサーからの出力は、PC上で計測用のソフトウェアを用いて、各出力信号を一つのファイルにまとめて保存できるようにした.計測の間隔は120秒とした.

b)供試体

測定には、コア1から再コアリングし、整形したもの を使用した(表-4).

供試体は、乾燥を防ぐために、整形後濡れタオルに包ん で保存し、試験開始2時間前に、寸法測定、写真撮影、 質量計測、堆積面の認定を行った後、ロゼット型ひずみ ゲージを円柱軸に対して対称に貼り付けた.ひずみゲー ジを接着後、供試体側面全体にシリコンゴムを塗布した 上で、ひずみゲージをデータロガーに接続した.これら の一連の作業中も、供試体を随時濡れタオルで覆った.



c)試験条件

本研究では、供試体の変形挙動における温度変化の影響を考慮するために、乾燥変形実験を室内の温度・湿度の状態から開始した.供試体HNMS1-001は試料を採取した地下研究施設内の温度変化データ(24.8~15.3℃へ緩やかに低下)を参照して温度25℃、相対湿度50%とした. その他の供試体では温度変化の違いを考慮するために、温度40℃、相対湿度50%とした.

d) 試験結果

試験結果の例として、初期状態を単位円としたときの ひずみ楕円の経時変化を図-3に示す.図には、乾燥変形 実験の模式図およびひずみゲージの貼り付け位置を併せ て記載した.この結果から、乾燥に伴って供試体が収縮 する傾向とともに、変形挙動が堆積面に対して異方性を 有していることがわかる.堆積面に対する水平等方性で はなく、直交する3方向で異なる可能性が高い.

5. 考察

(1) 既往データとの比較(真密度,間隙率)

本研究で実施した土粒子密度試験および水銀圧入試験 結果と,既往データ³との比較検討を行った(図-4). 300m以浅が声問層,300m以深が稚内層に相当する.

真密度は声問層と稚内層を通じて2.0~2.5 g/cm³程度で あり、声問層で若干小さい傾向がある.本研究で用いた 試料は深度140mから採取されたことから2.2 g/cm³程度と 推測される.本研究で実施した土粒子密度試験から得ら れた真密度は平均値で2.4 g/cm³程度(表-1),水銀圧入 試験で求められた真密度は2.0~2.2 g/cm³程度であり、い ずれも既往の声問層の範囲内であった.

間隙率は、声問層で50~60%、稚内層で30~40%、深 度140mレベルでは50%強である(図-4右).本研究で実 施した水銀王入試験から求められる間隙率は52~57%で あり、既往の範囲内のデータであった.

以上より,土粒子密度試験および水銀圧入試験で得ら れた真密度,間隙率は既往の報告とほぼ同程度の値であ り,当該岩盤を代表する試料であることを確認した.





(図中の1~4は供試体番号を示す)

(2) 乾燥変形実験での質量の経時変化

乾燥変形実験において、供試体からの蒸発量に対する 設定温度の影響を検討するために、供試体の質量を初期 の供試体の体積で除した値の経時変化を図-5に示す.

試料を飽和させた状態から実験を開始し、十分に時間 が経過した後の質量を初期の試料の体積で除した値は、 供試体 HNMS1-002 (図中の番号 2)を除き、0.5~0.6 g/cm³の値に漸近する結果となった.このことから、試 験開始時に供試体HNMS1-002は若干乾燥が進んでいた可 能性が示唆される.

また,温度の違いにより,蒸発速度(初期の直線部分の傾き)が異なり,温度が低い場合(図中の番号1)は 蒸発が緩やかに生じていることがわかる.インキュベー タ内の湿度は50%に設定したが,温度が異なるため絶対 湿度は異なる.飽和絶対湿度は25℃で23.0 g/m³,40℃で 51.1 g/m³である.温度25℃に設定した供試体HNMS1-001 では,最終段階の相対湿度が約80%と計測されており, 絶対湿度は約18.4 g/m³となる.他の供試体(温度40℃, 相対湿度50%,絶対湿度25.6 g/m³)の場合と比較して乾 燥が進んでいるものと解釈できる.

(3) 乾燥変形時のひずみと引張ひずみとの関係

乾燥変形実験時のひずみと, 圧裂引張試験で得られた 最大主ひずみ(引張ひずみ)(表-3)との比較を図-6に 示す.乾燥変形実験時のひずみは,供試体軸方向のひず み(axl),直交方向のひずみ(circ1, circ2. いずれかが 堆積面に一致する)および体積ひずみ(Vol)を用いた.

供試体HNMS1-001は、試験開始3日後にひずみが大き く変化した.供試体円周方向のひずみ(circ2)が堆積面 に平行に載荷した圧裂引張時の最大引張ひずみ(二点鎖 線)と同程度の変化が生じた時点で、ひずみが大きく変 化している(図-6(a)).このような急激なひずみ変化 を示した供試体は内部に割れ目が生じた可能性があるが、





図-7 X線CT画像(HNMS1-001. 試料中央付近横断面)

試験後の肉眼観察では表面に割れ目は観察されなかった. 試験後X線CT測定を行ったが,内部に明瞭な割れ目が生 じていることは確認できなかった(図-7).

供試体HNMS1-002~004は、いずれも類似したひずみ の変化傾向を示し、常に周方向のひずみが圧裂引張時の 最大引張ひずみを超えており、軸方向のひずみの変化が 小さいことがわかる.このことから、今回設定した温 度・湿度、供試体寸法では、14日以上の試験を実施する ことが望ましいと考えられる.設定温度を40℃とした場 合に急激なひずみの変化が生じなかったことは、この程 度の温度増加により、供試体自体が硬化した可能性も考 えられる.今後、設定温度の低い状態での追加試験によ り確認しておく必要がある.これらの結果より、今回用 いた試料は、乾燥変形により割れ目が生じる可能性が高 いことが示された.

(4) 最大収縮ひずみとピーク間隙半径との関係

長田⁵は、堆積岩試料における乾燥変形実験の最大収 縮ひずみ量と、間隙半径分布のピークとの関係をまとめ ており、その結果、最大収縮ひずみ量は小さい間隙半径 の分布に依存し、両者は両対数表示で直線上にプロット される傾向にあることを示している.本稿では、上述の 結果に、本研究で実施した水銀圧入試験による間隙半径 分布のピークと最大収縮ひずみ量との関係をプロットし た(図-8).水銀圧入試験による間隙半径分布では、田 下凝灰岩の2番目のピークにほぼ一致する0.1 µm付近に ピークを有するが、最大収縮ひずみ量は、スイス・モン テリ地下研究所で採取されたオパリナスクレイと同程度 かそれ以上の値(10,000 µ 程度)を示しており,図中■ の領域にプロットされる. このことは、岩盤の最大収縮 ひずみ量を見積もる上で、間隙半径分布のピークにおけ る値も合わせて考慮する必要があることを示していると 考えられる.

6. 結論

本研究では、幌延の地下研究施設のボーリング調査で



図-8 最大収縮ひずみと間隙半径のピークとの関係

得られた岩石試料を用いて,乾燥に伴う変形挙動を把握 する一環として,土粒子密度試験,水銀圧入試験,圧裂 引張試験,乾燥変形実験を実施した.得られた結果は以 下のようにまとめられる.

- ・土粒子密度試験および水銀圧入試験から、本研究で用いた試料は当該岩盤を代表する真密度および間隙率を有し、間隙径分布は 0.1 μ m付近に急峻な単一ピークを有する.
- ・圧裂引張試験から、強度変形特性に異方性を有しており、堆積面に直交方向に引っ張られた方が強度が低く、破壊時の引張ひずみも小さい。
- ・乾燥変形実験から、乾燥速度は温度に依存し、今回用 いた供試体(直径6.4cm,高さ3cm程度)では、温度 40℃,相対湿度50%の条件下で、ひずみが定常に至る までに14日以上を要する.
- ・乾燥初期の供試体内部の温度変化の影響を除去した場合、ひずみが定常に至った段階で10,000 μ (1%) 程度の体積ひずみ(収縮)を示す.この値は、スイス・モンテリ地下研究所のオパリナスクレイに匹敵するか、それ以上に相当する.圧裂引張試験時の最大引張ひずみ量と乾燥変形時のひずみ量を比較した場合、乾燥に伴い、割れ目を生じうる可能性が高い.
 ・乾燥時の変形挙動は、堆積面に対して異方性を有している.ひずみデータからは、堆積面に関する水平等方性ではなく、3方向で異なる可能性が高い.

以上より、本試料は適切な温度湿度管理を行わないと、 乾燥割れ目を生じうる材料であることが明らかとなった. また、コアを用いる様々な試験では、温度と乾燥変形の 影響を考慮しないと、データを誤って解釈する可能性が 高い.

今後、乾燥に伴う変形挙動のメカニズムをモデル化す

る必要がある.そのためには、熱伝導と水分移動を考慮 した数値解析を実施することが第一歩と考えられる.本 研究により、乾燥変形挙動の傾向を捉えることができた が、さらにデータを拡充するとともに、異なる寸法の供 試体を用いた試験や、乾燥後に再び湿潤状態となった際 の試料の挙動を検討することにより、実際の現場での条 件に近いデータが取得できるものと考えられる.

謝辞:本研究では、データの解析にScilab version 5.2.2を 使用した.埼玉大学工学部建設工学科4年澤田翔氏には、 本研究で実施した一連の実験にご尽力いただいた.また、 清水建設株式会社・技術研究所の熊坂博夫博士、多田浩 幸博士には、研究の進め方やトンネル工事、室内実験で の具体的な事例などについてご教示いただき、貴重な示 唆をいただいた.ここに感謝の意を表する.

参考文献

- 石島洋二,藤井義明,市原義久,児玉淳一:釧路コー ルマインに見られる旧坑の閉塞状況と閉塞機構, Journal of MMIJ, 124, pp.435-444, 2008.
- Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T. and Ota, K. :Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan, *Journal of Structual Geology*, Vol.32, No.11, pp.1792-1805, 2010.
- 3) 大成・大林特定建設工事共同事業体報告書: 幌延深地 層研究計画における試錐調査(HDB-6,7,8 孔)のうち HDB-6 孔, TJ5400 2005-004, 2004.
- 4) 山本卓也,松井裕哉,堀内康光,冨永英治:幌延深地層研 究計画における堆積軟岩の熱特性について,第35回岩盤 力学に関するシンポジウム,2005.
- 5) 長田昌彦:各種岩石の乾燥変形現象の比較によるその 支配要因の検討,第40回岩盤力学に関するシンポジ ウム,2011.

A STUDY ON MATERIAL PROPERTIES OF DIATOMACIOUS MADSTONE WITH CHANGING WATER CONTENT

Keisuke MAEKAWA and Masahiko OSADA

It has been known that the rock material properties would be different from the condition before excavation due to air-ventilation into the shaft. The phenomena would be significant to assess a long-term geological disposal safety. But any methodologies to understand the effect have not been established yet.

This paper shows the results of rock tests for engineering properties including drying-induced deformation experiment as one part of establishing research and assessment methodologies of the sedimentary rock material properties. As a result we show the tendency of drying-induced deformation of diatomaceous mudstone and the significant points of rock tests for engineering properties.