

堆積性軟岩の一次元膨潤変形・膨潤圧特性における内部固結力と供給水の影響

大森慎哉^{1*}・小峯秀雄²・安原一哉²・村上哲²・中村隆浩³

¹ 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

² 茨城大学 工学部都市システム工学科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

³ 戸田建設株式会社 土木本部 岩盤技術部(〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1 新八重洲ビル)

*E-mail: 06nm804s@hcs.ibaraki.ac.jp

堆積性軟岩には、スメクタイトとよばれる膨潤性粘土鉱物が含まれることがあり、その膨潤挙動が構造物に与える影響が懸念される。しかし膨潤によって生じる岩盤の変状を定量的に評価する方法が、確立していないというのが現状である。本研究では、堆積性軟岩の風化による固結力の低下を模擬した供試体作製方法を構築し、鉛直圧と膨潤変形挙動の関係を調査した。その結果、膨潤挙動において岩石内部の固結力が大きく寄与することを明らかにした。また、人工海水環境下における一次元膨潤変形実験から、Na 型スメクタイトを含有する堆積性軟岩の場合には、膨潤変形特性が人工海水の影響を受け低下することを明らかにした。

Key Words: *sedimentary soft rock, swelling, smectite, remold specimen, water chemistry*

1. はじめに

日本の東北部を中心に広く分布する新第三紀後半以降の泥岩や凝灰岩などの堆積性軟岩は、工学的に土と岩石の中間的な性質をもち、不連続面が少なく掘削が容易であることから、ダムやトンネルなどの各種構造物の地盤材料として利用されている。しかし、熱水変質作用を受けた第三紀層の岩盤およびその破碎帯では、スメクタイトが含まれていることが多く、吸水による体積膨張が懸念される。これまでに盤膨れによる基礎の隆起や、トンネル掘削における岩盤の変形などの報告があり¹⁾、構造物に与える影響が懸念される。しかし現状では、スメクタイトを含む堆積性軟岩の膨潤挙動を定量的に評価する方法が確立されていない。例えば、原子力発電所建設予定地の表層地盤で発生した亀裂の原因を調査するにあたり、下部の風化岩盤の膨潤挙動を、ベントナイト系緩衝材・埋め戻し材の膨潤評価式（以下、膨潤特性理論評価式と記述）を適用し、評価した事例がある²⁾。しかしこの膨潤特性理論評価式は、岩石内

部の固結力を考慮しておらず、より正確に評価できる手法を確立する必要がある。また、放射性廃棄物処分事業において、処分施設の周辺の岩盤は、天然バリアとして低透水性や力学的安定性が要求されている。堆積性軟岩の地域が処分サイトとして選定された場合、施設の安定性を検討するために、周辺岩盤の安定性を把握する必要がある。

一方、近年問題となっている地球温暖化により、海面上昇や海水準の変動が懸念されている。それ起因して、今後沿岸域での構造物建設を想定した場合、新たに海水または海水起源の地下水が流入することが予想され、岩盤周辺の水質の変化が膨潤挙動へ及ぼす影響を把握する必要もある。

以上のような背景から、堆積性軟岩の膨潤挙動を定量的に把握することは、上記のような重要構造物の設計を行う場合の地点選定や安全性を検討する上で重要であると考えられる。そこで本研究では、スメクタイトを含有する堆積性軟岩の膨潤特性と鉛直圧、および供給水質との関係を実験的に調査し、岩石の内部固結力と供給水質の観点から、その膨潤メカニズムについて考察を行った。

2. 本研究で使用了した試料

本研究では、スメクタイトを含有する試料として、珪藻質泥岩、海底部から採取された火山礫凝灰岩および陸上部の火山礫凝灰岩の3種類を選定した、以下、珪藻質泥岩（Ca 型）、海底部凝灰岩（Na 型）、陸上部凝灰岩（Ca 型）と記述する。表-1 に各実験試料の基本的な物性を示す。スメクタイト含有率は、メチレンブルー吸着量試験³⁾により、各交換性陽イオン量（EXC）は、プラズマ発光分析装置（ICP）⁴⁾により測定した。また、陽イオン交換容量（CEC）は各 EXC の総和とし、その組成割合から、各試料のスメクタイトの種類を分類した。試料の特徴として、海底部凝灰岩（Na 型）および珪藻質泥岩（Ca 型）は、風化の程度が小さく比較的緻密であるが、陸上部凝灰岩（Ca 型）は風化が進んでおり、自然状態で亀裂が数多く見られ、軟質である。また、海底部凝灰岩（Na 型）と陸上部凝灰岩（Ca 型）は同一地域の海底と陸上から採取された試料である。

3. 不攪乱供試体および再調整供試体を用いた膨潤特性実験による内部固結力の影響の検討

岩石には、土粒子間に沈殿・付着して粒子組織の強度・変形性に寄与するセメンテーションがあり、その力学的・化学的性質が、堆積性軟岩の力学的性質、スレーキング・膨潤などの性質に大きな影響を与える⁵⁾。本章では、このセメンテーションによる内部固結力が、膨潤特性に及ぼす影響を把握するために、一次元膨潤変形実験および膨潤圧実験を、2 種類の円柱形供試体を用いて行った。2 種類の供試体とは、不攪乱供試体および一度粉末にしたのちに、不攪乱供試体の乾燥密度に締固めた供試体（以下、再調整供試体と記述する）である。これは、将来的な風化による内部固結力の低下を想定し、膨潤挙動を比較するために作製した供試体である。供試体寸法は、直径 28mm、高さ 10mm を目標に作製した。

（1）不攪乱供試体の作製方法

不攪乱供試体の作製方法を以下に記述する。岩塊からコアリング、またはハンマーを用いて採取した試料を、60℃、24 時間の炉乾燥を行い、密

表-1 実験試料の基本的性質

試料名	珪藻質 泥岩	海底部 凝灰岩	陸上部 凝灰岩
採取地点	石川県	青森県	青森県
スメクタイトの種類	Ca 型	Na 型	Ca 型
スメクタイト含有率(%)	21	15	15
土粒子密度(g/cm ³)	2.298	2.609	2.696
乾燥密度(g/cm ³)	0.64～ 0.67	1.17～ 1.25	1.04～ 1.05
自然含水比(%)	87～96	32～37	55～60
一軸圧縮強さ(kPa)	1461	3945	702
陽イオン交換容量 (meq./g)	0.354	0.540	0.597
交換性 Na (meq./g)	0.027	0.236	0.040
交換性 Ca (meq./g)	0.228	0.157	0.327
交換性 K (meq./g)	0.024	0.045	0.056
交換性 Mg (meq./g)	0.075	0.102	0.174

閉容器で 24 時間保管する。実験直前に、直径 28mm 用トリマーおよびマイターボックスを用いて成形する。また、供試体をリングに設置する際は、供試体とリング内面の間に局所的な摩擦力が生じないように、サンドペーパーを用いて適宜成形した。なお、陸上部凝灰岩（Ca 型）は、風化の進行が著しく乾燥状態での成形が困難であった。そのため、はじめに成形を行い、その後同様の炉乾燥および密閉容器での保管を行った。不攪乱供試体の実験直前の含水比は、珪藻質泥岩（Ca 型）は 5.9%～7.2%、海底部凝灰岩（Na 型）は 4.2%～7.7%、陸上部凝灰岩（Ca 型）は 2.1%～4.8% の範囲であった。

（2）再調整供試体の作製方法

再調整供試体の作製方法を以下に記述する。まず岩塊を粉碎し、60℃、24 時間の炉乾燥をする。その後細かくすりつぶし、密閉容器に保管する。粒径の目安として、本研究では宮城らの研究⁶⁾を参考に 475μm のふるいを通過させた。通過試料は、底部に蒸留水を張ったデシケータ内で保管して、含水比を調節した。再調整供試体作製のための締固めの手順を以下に記す。締固めには、内径 28mm、高さ 50mm の供試体作製用鋼製円筒形モールド（以下、モールドと記述する）およびピストンから構成されている締固め装置⁷⁾を使用した。まず、不攪乱供試体の乾燥密度を参考に、試料の投入量を算出し、モールドに投入する。その後目標の乾燥密度になるように荷重を調整し 15 分間かけて締固める。その後、一次元膨潤変形実験および膨潤圧実験に用いるステンレス製リング（以下、リングと記述する）に供

試体を移動させる．再調整供試体の実験直前の含水比は，珪藻質泥岩（Ca 型）は 6.4%～9.3%，海底部凝灰岩（Na 型）は 4.6%～6.25%，陸上部凝灰岩（Ca 型）は 6.7%～11.5% の範囲であった．

（３）一次元膨潤変形実験

本実験では，供試体に一定の鉛直圧を作用させた状態で水溶液を供給し，膨潤による鉛直方向の変形量を，変位計を用いて経時的に測定する．図-1 は，実験装置の概略図である．この装置には，耐腐食性に優れた SUS-316L を使用している．鉛直圧は，計量した鉛玉またはステンレスボールを入れた容器を載荷板に載せる方式を採用した．実験期間は，膨潤変形が収束する期間として 7 日間と設定し，供給水として蒸留水を用いた．実験の手順を以下に記述する．供試体を設置したリングをペデスタルに設置し，装置を組み立てた後，鉛直荷重を載荷する．15 分後，測定を開始し，アクリル製水槽に蒸留水を供給する．実験期間中は，水槽内の水位を一定保つように，適宜給水した．測定終了後に取り出した供試体の一部は，含水比測定に用い，供試体の飽和状態を調査した．

結果の整理方法を以下に記述する．変位計で測定した一次元変形量から，式(1)を用いて鉛直方向のひずみに相当する膨潤率 ε_s （％）を算出する．

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで， ΔS ：一次元変形量(mm)， H_0 ：実験開始時の供試体高さ(mm)

また，膨潤率の最大値を最大膨潤率 ε_{smax} （％）と定義し，膨潤率の経時変化に対して式(2)で表示される双曲線で近似し，その漸近線から式(3)を用いて求めた⁷⁾．

$$\varepsilon_s(t) = \frac{t}{a + b \times t} (\%) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{smax} = \lim_{time \rightarrow \infty} \varepsilon_s(t) = \frac{1}{b} (\%) \quad (3)$$

ここで， $\varepsilon_s(t)$ ：時間 t における膨潤率(%)， a ， b ：近似により定められる定数

（４）膨潤圧実験

供試体の膨潤変形を拘束した状態で発生する圧力の最大値，すなわち最大膨潤圧を把握するために，膨潤圧実験を行った．また，一次元膨潤変形実験の結果と併せて整理することにより，鉛直圧と最大膨潤率の関係の把握を行った．膨潤圧の測定には，ペロフラムシリンダーおよび最大荷重

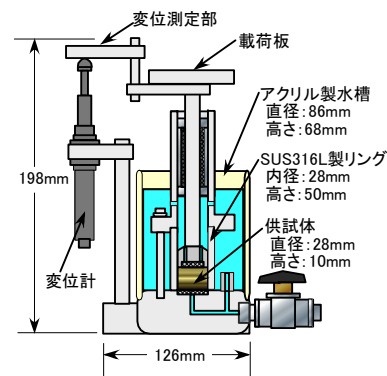


図-1 一次元膨潤変形実験装置の概略図

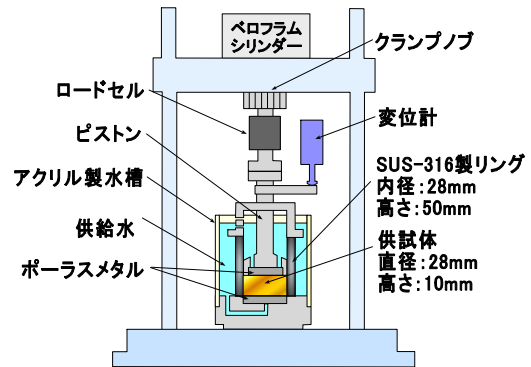
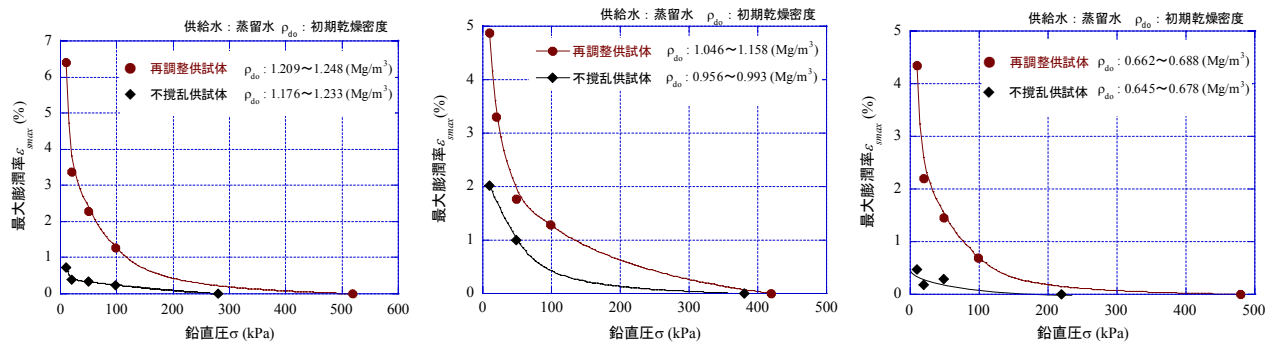


図-2 膨潤圧実験装置の概略図

10kN，15kN のロードセルを使用した，SUS-316L 製の 4 連式膨潤圧実験装置を用いて，各供試体の膨潤圧の時間変化を測定した．図-2 は装置の概略図である．供試体寸法および実験期間は，一次元膨潤変形実験と同様である．実験手順を以下に示す．一次元膨潤変形実験と同様に，供試体をステンレス製リングに設置し，装置を組み立てる．その後，装置を載荷フレームに設置し，ピストンを供試体に密着させ，クランプノブを固定する．計測を開始し，蒸留水を供給する．

（５）内部固結力による膨潤抑制効果

図-3(a)～(c)に，各試料の不攪乱供試体および再調整供試体の最大膨潤率と鉛直圧の関係を示す．鉛直圧 9.8kPa から 98kPa の範囲の結果が一次元膨潤変形実験から，最大膨潤率がゼロのときの結果が膨潤圧試験から得られた結果である．全ての試料において，再調整供試体の最大膨潤率が，不攪乱供試体に比べて増加している．風化の程度が小さい海底部凝灰岩（Na 型）および珪藻質泥岩（Ca 型）は，鉛直圧 9.8kPa の最大膨潤率が約 10 倍近い増加を示した．最大膨潤圧についても，不攪乱供試体では 200kPa から 300kPa の範囲であったが，再調整供試体では約 500kPa と増加した．一方，陸上部凝灰岩（Ca 型）は各鉛直圧下での最大膨潤率および最大膨潤圧の差が相対的に小さいことが明らかになっ



(a) 海底部凝灰岩 (Na 型) (b) 陸上部凝灰岩 (Ca 型) (c) 珪藻質泥岩 (Ca 型)

図-3(a)～(c) 各試料の最大膨潤率と鉛直圧の関係

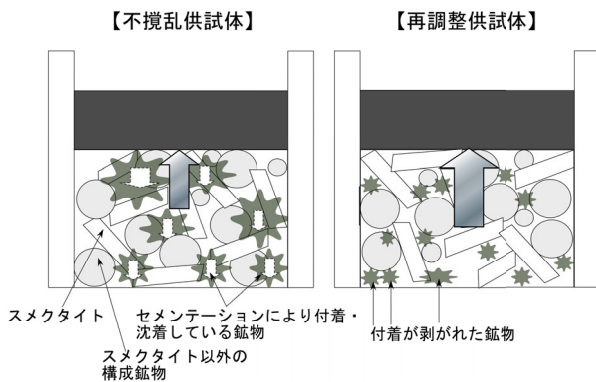


図-4 不攪乱供試体と再調整供試体の吸水時の膨潤挙動の違いの模式図

た。また、陸上部凝灰岩 (Ca 型) は風化が進行した試料であることから、風化の程度が膨潤変形挙動および膨潤圧に影響を与えている事が推察される。

図-4 に不攪乱供試体と再調整供試体の吸水時の膨潤挙動のイメージを模式的に示す。不攪乱供試体では、吸水に伴い鉛直上方向に膨潤圧が発生する際に、セメンテーションにより、それを抑制する方向に合力が働く。これにより、供試体全体の発生圧力が抑制されるのではないと推察される。一方、再調整供試体は、粉碎することにより付着が剥がれた状態であり、抑制する方向に働く合力が小さく、膨潤による供試体全体の発生圧力が大きくなると考えられる。また、スメクタイト結晶の供給水との接触面積が増えることにより、スメクタイト固有の膨潤変形が発生していると考えられる。

4. 堆積性軟岩の一次元膨潤変形特性に及ぼす供給水の水質の影響

スメクタイトを多量に含むベントナイトに関する既往の研究から、鉛直圧 1000kPa の条件下に

表-2 人工海水の主な化学成分 (20L あたり、メーカー仕様書より)

NaCl	490.90g	NaHCO ₃	4.02g
MgCl ₂	222.30g	KBr	2.01g
Na ₂ SO ₄	81.88g	SrCl ₂	0.85g
CaCl ₂	30.70g	H ₃ BO ₃	0.54g
KCl	13.89g	NaF	0.06g

表-3 使用した人工海水の各種陽イオン濃度 (単位: mol/m³)

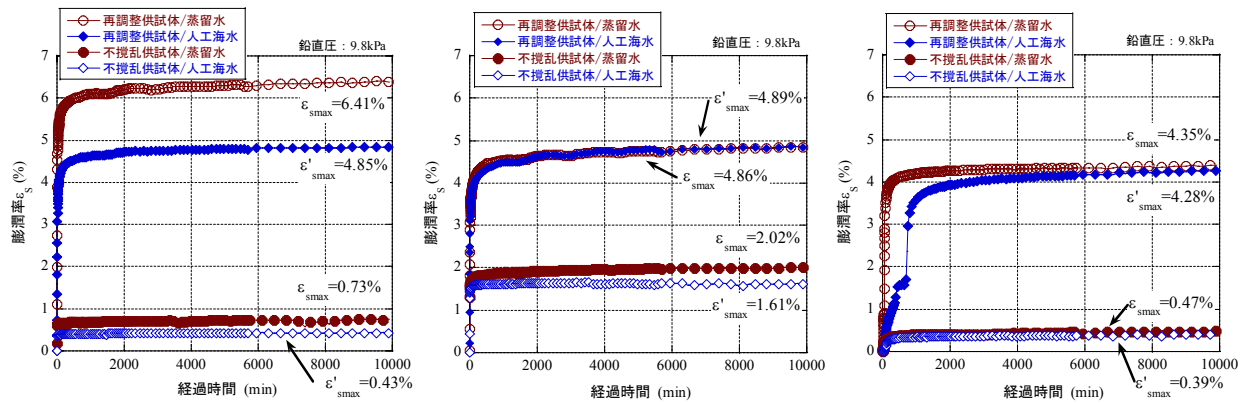
Na イオン	K イオン	Mg イオン	Ca イオン
841.70	6.40	34.97	10.00

において、Na 型および Na 交換型ベントナイトの膨潤変形特性は人工海水の影響を受け低下することが確認されている⁷⁾。本章では、海水または海水起源の地下水が新たに流入する場合を想定し、供給水の水質の違いによる堆積性軟岩の膨潤変形特性への影響を定量的に把握するために、蒸留水および人工海水を用いた一次元膨潤変形実験を行った。今回は、鉛直圧を 9.8kPa に設定して実験を行った。

(1) 実験概要および供給する水溶液

本章では、3 章と同様の実験装置、供試体作製および実験手順で、一次元膨潤変形実験を行った。

供給水は、蒸留水および人工海水 (八洲薬品製アクアマリン) を用いた。天然の海水は、採取場所により微量の化学成分の種類や組成が異なる場合がある。またプランクトンなどの有機物を多量に含有するため、長期間の実験において、それらの増殖や腐乱が考えられる。そのため一定した条件を再現できないと考え、人工海水を用いた。表-2 に人工海水の主な化学成分、表-3 にイオンクロマトグラフィ (東亜 DKK 製 IA-100) による主な陽イオンの濃度測定結果を示す。



(a) 海底部凝灰岩 (Na 型) (b) 陸上部凝灰岩 (Ca 型) (c) 珪藻質泥岩 (Ca 型)

図-5 (a) ~ (c) 各試料の膨潤率の時間変化⁸⁾

(2) 結果の整理方法

本研究で使用したスメクタイト含有率の低い堆積性軟岩においても、同様の傾向を発現することが考えられるため、以下の方法により一次元膨潤変形実験の結果を整理した。すなわち、式(1)、式(2)および式(3)を用いて最大膨潤率(%)を算出し、さらに蒸留水環境下での最大膨潤率を基準として、人工海水環境下における最大膨潤率の低下率を求めた。人工海水による最大膨潤率の低下率 R (%)は、式(4)のように定義した⁸⁾。

$$R = \frac{\varepsilon_{smax} - \varepsilon'_{smax}}{\varepsilon_{smax}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

ここで、 ε_{smax} ：蒸留水環境下での最大膨潤率(%)

ε'_{smax} ：人工海水環境下での最大膨潤率(%)

(3) 供給水の水质が膨潤変形特性に及ぼす影響

図-5(a)~(c)に、一次元膨潤変形実験より得られた各供試体の膨潤率の時間変化曲線を示す。縦軸が膨潤率(%)、横軸が経過時間(min)である。また、表-4に各供試体の最大膨潤率と人工海水による最大膨潤率の低下率をまとめている。不攪乱供試体については、全ての試料において人工海水環境下で膨潤率が低下した。特に海底部凝灰岩(Na型)の低下率が41.1%と大きく、図-5(a)に示すように明確な差異が確認できる。また、再調整供試体においても、海底部凝灰岩(Na型)は、不攪乱供試体と同様に人工海水環境下で24.3%の最大膨潤率の低下が認められた。これは、陽イオン濃度が高い海水環境では、膨潤に起因するスメクタイトの結晶層間と周辺の陽イオン濃度差が、蒸留水環境と比べて小さくなることに起因すると考えられる。以上のように海底部凝灰岩(Na

表-4 各供試体の最大膨潤率および最大膨潤率の低下率(単位：%)

供試体名		蒸留水 ε_{smax}	人工海水 ε'_{smax}	低下率 R
海底部凝灰岩 (Na型)	不攪乱	0.73	0.43	41.1
	再調整	6.41	4.85	24.3
陸上部凝灰岩 (Ca型)	不攪乱	2.02	1.61	20.3
	再調整	4.86	4.89	-0.6
珪藻質泥岩 (Ca型)	不攪乱	0.47	0.39	17.0
	再調整	4.35	4.28	1.6

型)は、不攪乱および再調整供試体において人工海水の影響を大きく受ける結果となり、Na型のスメクタイトを含有する堆積性軟岩の膨潤変形特性は、海水環境下で大きく低下することが分かった。

一方、Ca型スメクタイトを含有する珪藻質泥岩(Ca型)および陸上部凝灰岩(Ca型)の人工海水による最大膨潤率の低下率においては、不攪乱供試体では17.0~20.3%、再調整供試体では-0.6~1.6%という結果になっているが、図-5(b)、(c)に示すように、蒸留水環境と人工海水環境において最大膨潤率の差はほとんど生じなかった。これはCa型ベントナイトにおける人工海水環境下での膨潤変形特性と整合する傾向であり⁷⁾、実際の堆積性軟岩でも、Ca型スメクタイトが人工海水の影響を受けにくい特性であることが分かった。

5. まとめ

本研究では、スメクタイトを含む堆積性軟岩の膨潤挙動メカニズムおよび供給水の影響を明らかにすることを目的に、一次元膨潤変形実験および膨潤圧実験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 堆積性軟岩の膨潤挙動メカニズムを把握するために、風化による内部固結力の低下を模擬した再調整供試体の作製方法を構築した。
- 2) 不攪乱供試体および再調整供試体を用いて、一次元膨潤変形実験、膨潤圧実験を行い、鉛直圧と最大膨潤率の関係を調査した。その結果、堆積性軟岩の膨潤挙動には、軟岩の内部固結力による膨潤抑制効果が存在することが推察される。
- 3) 蒸留水および人工海水を用いた一次元膨潤変形実験の結果から、Na 型スメクタイトを含有する堆積性軟岩の場合には、膨潤変形特性が人工海水の影響を受け低下することを明らかにした。一方、Ca 型スメクタイトを含有する堆積性軟岩の膨潤変形特性に対しては、人工海水の影響は比較的小さかった。
- 2) 三和公, 橋本修一, 松下芳浩: 岩盤表層部の膨潤変形現象について, 日本応用地質学会東北支部第9回研究発表会, pp.27-30, 2001.
- 3) 日本ベントナイト工業会標準試験方法: ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定法, JBAS-107-91.
- 4) 土壌環境分析法編集委員会: 土壌環境分析法, 株式会社博友社, pp.179-185, 2003.
- 5) 地盤工学会: 堆積軟岩の工学的性質とその応用, 社団法人地盤工学会, p.74, 1998.
- 6) 宮城調勝, 小宮康明: 島尻層泥岩の膨潤特性 I (乾燥泥岩の膨潤特性), 琉球大学農学部学術報告 29, pp.153-159, 1982.
- 7) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴: 各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性における人工海水の影響, 土木学会論文集 No.785/III-70, 39-49, 2005.
- 8) 大森慎哉, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 関根一郎, 中村隆浩: 蒸留水および人工海水環境下における堆積性軟岩の一次元膨潤変形特性, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, 3-026, 2006.

謝辞: 本研究で使用した実験試料の一部は、電源開発株式会社原子力事業部より提供して頂きました。末筆ながら感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田村栄治, 浄内明, 松崎伸一, 長谷川修一: 結晶片岩中のスメクタイト含有破砕帯の膨潤特性と隆起メカニズム, 応用地質第 48 巻第 2 号, pp.80-81, 2007.

INFLUENCES OF COHESION AND WATER CHEMISTRY TO A ONE-DIMENSIONAL SWELLING CHARACTERISTIC OF SEDIMENTARY SOFT ROCK

Shinya OMORI, Hideo KOMINE, Kazuya YASUHARA, Satoshi MURAKAMI and Takahiro NAKAMURA

Sedimentary soft rock may contain the smectite which is the swelling clay mineral. It is apprehended that the swelling behavior of soft rock affects the stability of micro structures of sedimentary rocks. However, to solve the problems about stability of rock micro structures and construction-site selection, it is important to establish a quantitative method for evaluating deformation of bedrocks due to swelling behavior of soft rocks. This study proposed a method for producing specimens which can simulate weathered rocks, and investigated relation between vertical pressure and behavior of swelling deformation.