

メスリンダーを用いたベントナイト系材料の 浸潤・膨潤特性の簡易実験法

小峯秀雄¹・直井優²・安原一哉³・村上哲⁴・百瀬和夫⁵・坂上武晴⁶

¹正会員 工博 茨城大学助教授 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)
E-mail: komine@civil.ibaraki.ac.jp

²学生会員 工学士 茨城大学大学院理工学研究科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

³正会員 工博 茨城大学教授 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)

⁴正会員 工博 茨城大学助手 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)

⁵正会員 工修 日本原子力発電(株)(〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町1番地1美土代ビル)

⁶正会員 工学士 日本原子力発電(株)(〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町1番地1美土代ビル)

高レベル放射性廃棄物地層処分で用いるベントナイト系緩衝材・埋戻し材を設計・製作する際には、世界各国に埋蔵されている数多くのベントナイトから、適切なベントナイトを数種類程度、選定する必要がある。その際、各ベントナイトの浸潤・透水特性や膨潤特性などの基礎データに基づき選定を行うものと考えられるが、データ取得に非常に長い時間を要するので、世界各国のベントナイトに対して実施することは困難である。そこで本研究では、浸潤特性と膨潤特性の基礎データについて簡易に計測できるメスリンダーを用いた実験方法とデータ解析するための評価法を新たに提案する。本方法により取得される実験結果の再現性を確認するとともに、塩類を含む水溶液による浸潤・膨潤特性への影響について論じる。

Key Words : bentonite, seepage, swelling, nuclear waste disposal, buffer, backfill

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材・埋戻し材として、ベントナイトの利用が有望視されている。我が国ならびに欧米各国で考えられている高レベル放射性廃棄物の有力な処分方法は、地下数百m程度の深い地盤中に、収納容器に封入した廃棄物を埋設処分する方法である^{1)~4)}。図-1は高レベル放射性廃棄物の処分施設(竖置き定置方式)の概要の一例を示している³⁾。このような処分施設の建設に際し、廃棄物収納容器と周辺地盤との間を充填する材料が必要とされている。この材料は「緩衝材」と呼ばれている。この材料に要求されている性質は、長期間にわたり廃棄物を人間の生活圏から隔離する必要性や廃棄物から発生する熱への対策等から、低透水性や膨潤性、熱伝導性等である。ベントナイトは低透水性や膨潤性を特長とする粘土材料で

あるため、緩衝材の材料として有力視されている。

一方、図-1に示す処分孔ピット間を連結する処分坑道部においても、砂・ベントナイト混合材料の利用が有望視されている。この部分に用いられる材料は、「埋戻し材」と呼ばれ、先の緩衝材と比べてベントナイトの配合量が低い混合材料の利用が検討されている。埋戻し材には、処分坑道部を充填しトンネル周辺岩盤の緩み域の拡大や過度の変形を可能な限り防ぎ、かつ埋戻し部が水みちなどの水理的な弱点にならないようにする役割が期待されている。

高レベル放射性廃棄物地層処分で用いるベントナイト系緩衝材・埋戻し材を設計・製作する際には、その施設規模から考えて、適切なベントナイトを世界各国に埋蔵されている数多くの種類のベントナイトから、数種類選定する必要があるものと考えられる。ベントナイトの選定においては、緩衝材・埋戻し材として要求される先述の性質から、各ベントナ

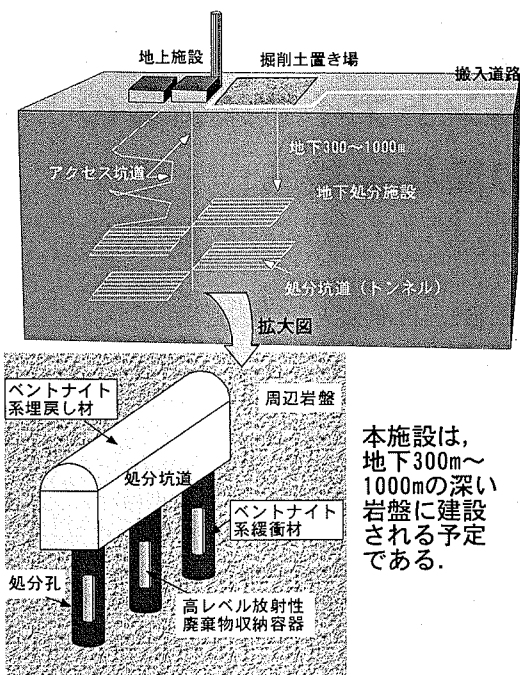


図-1 高レベル放射性廃棄物地層処分施設の概念図

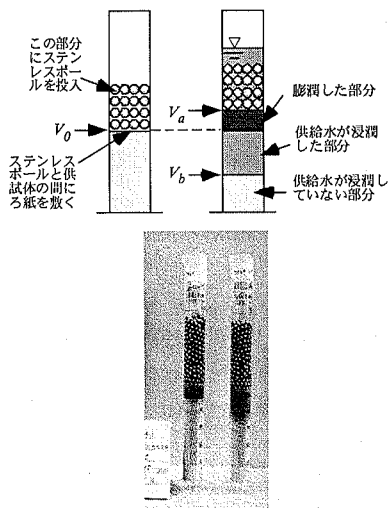


図-2 「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」の概要

イトの浸潤・透水特性や膨潤特性などの基礎データに基づくものと考えられる。しかし、このようなベントナイトの基礎的なデータを取得するには非常に長い時間を要し、現在の実験技術では世界各国の数多くのベントナイトに対して実施することはほぼ不可能であると考えられる。

そこで本研究では、浸潤特性と膨潤特性の基礎データについて簡易に計測できる「メスシリンダーを

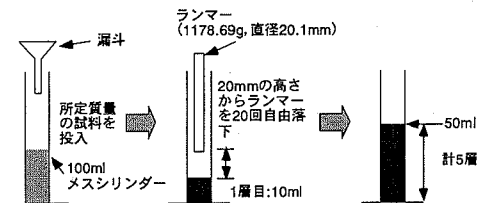


図-3 比較的乾燥密度の低い供試体の作製方法

用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」とデータ解析するための評価法を新たに提案する。一方、高レベル放射性廃棄物処分場の建設地点については、廃棄物の輸送のしやすさ等から、沿岸部に建設されることが十分に考えられる。その際、処分施設に流入すると思われる地下水には、海水起源の塩類が多く含まれると思われる。また、処分地点に塩類濃度の高い化石地下水が存在することも考えられる。そこで、緩衝材・埋戻し材の物理的特性に及ぼす塩分濃度の影響の把握が重要となる。このような背景から、本研究で提案する実験法により、5種類のベントナイトの浸潤・膨潤特性について、塩類を含む水質の影響を評価した。

2. メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法の提案

本章では、著者らが提案する「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」¹⁾の概要を説明すると共に、ベントナイト系材料の浸潤特性と膨潤特性を評価するための方法を提案する。

(1) 実験方法の概要と手順

本研究で新たに提案する「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」(以下、メスシリンダー法と記述する)の概要と実験の様子を図-2に示す。本研究で用いたメスシリンダーは、容量100mlの亚克力製のもので、内径は27.5mmであった。供試体作製方法は次の通りである。すなわち、埋戻し材を想定した比較的乾燥密度の小さい供試体の場合は、容量100mlメスシリンダーの50mlまで、ランマー(質量:1178.69g、直径20.1mm)で試料を5層に分けて突固める(図-3参照)。緩衝材の製作方法としては、工場において高密度のブロック状に製作したものを処分孔に搬入し設置する方法も有力と考えられている^{1),3)}。このような緩衝材を想定する場合は、図-4に示す静的荷重

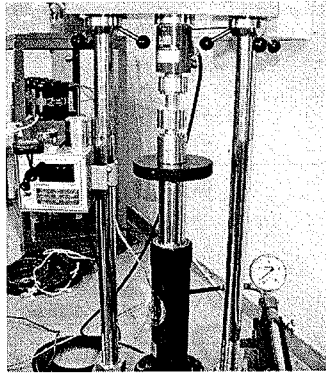
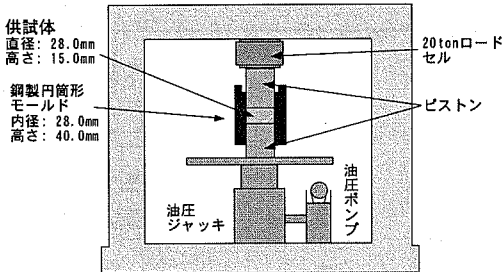


図-4 静的荷重による締固め装置(上:構成図,下:写真)

による締固め装置により供試体の作製を行った。締固め装置は、締固め圧力载荷用のフレーム、試料を投入する内径28.0mm、高さ40.0mmの鋼製円筒形モールド、ピストン、ロードセルおよび、静的荷重用油圧ジャッキ、油圧ポンプから構成されている。なお、ピストンの外径は27.9mmであり、鋼製円筒形モールドとの間には0.05mm程度の隙間が生じるので、ピストンとモールドの間の摩擦は少ないと考えられる。この装置により、直径28.0mm、高さ15.0mmを目標に供試体を製作した。製作した供試体は、そのままではメスシリンダーに投入・設置することが困難であるので、供試体側面を1000番の紙ヤスリで削り寸法の微調整を行いながら、容量100mlのメスシリンダーに50ml程度まで充填した。50ml程度まで充填するには、上記の手順で製作した供試体を5個を要した。その後、供試体上端面に定性ろ紙(No.5A)を敷き、作用させる鉛直圧として直径8.0mmのステンレスボール(1個当たりの質量は0.50~0.53gの範囲にある)を供試体上部に投入する。メスシリンダー法は、各ベントナイトの浸潤・膨潤特性を相互比較することを目的とする試験法であるので鉛直圧は一定値であれば良い。今回行った実験では鉛直圧はすべて3.1kPaとした。次に水溶液をメスシリンダー内に給水し実験開始とする。実験中は供試体の上端面(V_0)と水溶液の浸潤面(V_b)をメスシリンダーの目盛りから、最小目盛り0.5mlとして読み取る(図-2参照)。データの取得は目視に

表-1 使用したベントナイトの基本的性質

| ベントナイト | A | B | C | D | E |
|----------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| タイプ | Na型 | Na型 | Ca型 | Na交換型 | Na型 |
| 土粒子の密度(Mg/m ³) | 2.79 | 2.84 | 2.71 | 2.68 | 2.88 |
| 液性限界(%) | 458.1 | 565.0 | 128.7 | 453.3 | 437.3 |
| 塑性限界(%) | 23.7 | 47.2 | 38.4 | 42.1 | 38.0 |
| 塑性指数 | 434.4 | 517.8 | 90.3 | 411.2 | 399.3 |
| 保管時含水比(%) | 9.1~13.5 | 8.8~13.5 | 12.0~18.9 | 12.4~13.7 | 11.7~16.1 |
| モンモリロナイト含有率(%) | 57 | 71 | 84 | 71 | 80 |
| 陽イオン交換容量(meq/g) | 0.732 | 1.007 | 0.796 | 1.035 | 1.104 |
| 交換性Naイオン量(meq/g) | 0.405 | 0.566 | 0.119 | 0.620 | 0.624 |
| 交換性Caイオン量(meq/g) | 0.287 | 0.293 | 0.585 | 0.333 | 0.429 |
| 交換性Kイオン量(meq/g) | 0.009 | 0.016 | 0.019 | 0.019 | 0.024 |
| 交換性Mgイオン量(meq/g) | 0.030 | 0.132 | 0.072 | 0.063 | 0.027 |

よるデータ読み取りが可能な時間間隔として、今回は実験開始から30分経過までは5分間隔で、30分~60分経過の間は10分間隔で、60分~12時間経過までは60分間隔で行った。12時間経過以降は、6時間おきにデータの取得を行った。なお、実験期間については、全実験条件において、浸潤面の判断が十分な精度を有して行える4日間を採用した。また今回実施した全ての実験ケースにおいて、メスシリンダーと供試体の間に、供給された水溶液が浸入することはなかった。

浸潤特性については、式(1)により定義される浸潤速度(v_s)により、膨潤特性については式(2)により定義される膨潤率(ϵ_s)により評価した。

$$v_s = \frac{V_0 - V_b}{A \times t_s} \times 10 \text{ (mm/min)} \quad (1)$$

ここに、

V_0 : メスシリンダーの目盛りから読んだ供試体の初期体積(ml)

V_b : 所定時間経過したときの供試体の浸潤部の下端部のメスシリンダー読み値(ml)

A : 供試体断面積(cm²)

t_s : 経過時間(min)

表-2 人工海水の主な化学成分 (20リットル当たり)

| | | | | | | |
|-------------------|-------------------|--------|--------|---------------------------------|--------------------|-------|
| MgCl ₂ | CaCl ₂ | KCl | NaCl | Na ₂ SO ₄ | NaHCO ₃ | KBr |
| 222.3g | 30.70g | 13.89g | 490.9g | 81.88g | 4.02g | 2.01g |

(メーカー仕様書による)

表-3 使用した人工海水の Na, Ca, K, Mg イオン濃度

| 各陽イオン濃度(mol/L) | | | |
|----------------|--------|--------|--------|
| Naイオン | Caイオン | Kイオン | Mgイオン |
| 0.4847 | 0.0016 | 0.0112 | 0.0530 |

$$\varepsilon_s = \frac{V_a - V_0}{V_0 - V_b} \times 100 (\%) \quad (2)$$

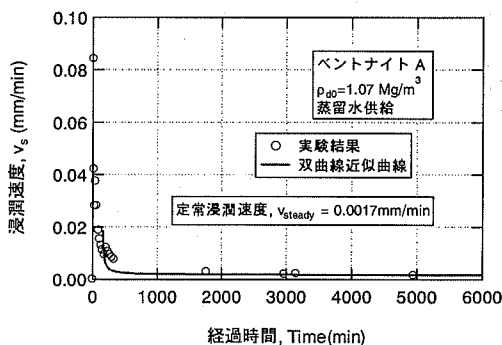
ここに,

V_a : 所定時間経過したときの供試体の上端部のメスシリンダー読み値(ml)

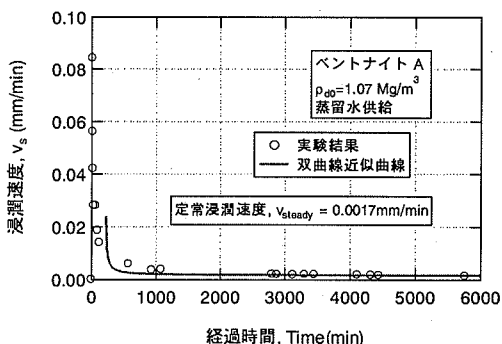
3. メスシリンダー法による各種ベントナイトの浸潤・膨潤特性

(1) 使用した試料および水溶液

本研究で使用したベントナイトは5種類である。すなわち、山形県月布産のベントナイトA (クニミネ工業), アメリカ・ワイオミング産のベントナイトB (日商岩井ベントナイト株式会社), 宮城県土浮山鉱床産のベントナイトC (クニミネ工業), 宮城県川崎町産のベントナイトD (クニミネ工業), およびアメリカ・ワイオミング産のベントナイトE (日商岩井ベントナイト株式会社)の5種類のベントナイトである。ベントナイトA, B, Eは交換性陽イオンが主にNa⁺イオンのベントナイト, すなわちNa型ベントナイトであり止水性, 膨潤性に富むベントナイトである。ベントナイトAは, 日本の高レベル放射性廃棄物処分技術に関する研究・開発において頻繁に実験等に利用されている材料である²⁾。また, ベントナイトEは, スウェーデンやスイス等における緩衝材の基本材料とされている⁴⁾。ベントナイトCは交換性陽イオンが主にCa²⁺イオンのベントナイト, すなわちCa型ベントナイトである。ベントナイトDはNa交換型ベントナイトと呼ばれ, Ca型ベントナイトに炭酸ナトリウムを加え人工的にNa型にしたベントナイトである。各ベントナイトの基本的性質は表-1に示す通りである。交換性陽イオンの種類・組成はベントナイトの浸潤, 膨潤特性に大きく影響し, 一般にNa型ベントナイト, Ca型ベントナイト, Na交換型ベントナイトの3種類に大



(a) ケース 1



(b) ケース 2

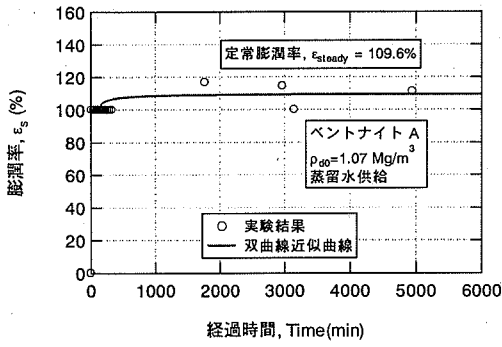
図-5 ベントナイトA 供試体の浸潤速度の時間変化

別されている。したがって, 本研究において上記のベントナイトを試料として採用した。上記のベントナイトは全て, 室温が17.7~25.6℃の室内で保管されており, このときの含水比の範囲を保管時含水比として表-1に併記した。

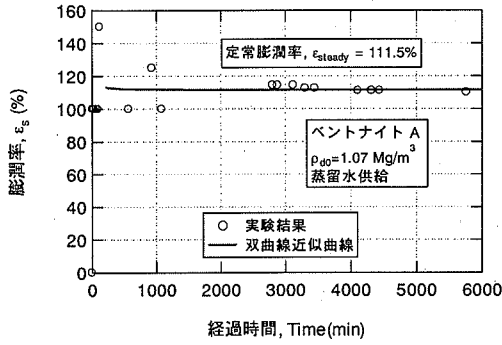
これらのベントナイト試料に供給する水溶液には, 蒸留水と人工海水 (八洲薬品(株)製・アクアマリン)の2種類を用いた。表-2にメーカーから提供されている人工海水の化学成分表を, 表-3にプラズマ(ICP)発光分析装置により測定した人工海水のNa, Ca, K, Mgイオン濃度を示す。

(2) 実験結果とデータの再現性

本研究で提案するメスシリンダー法により取得されるデータの再現性を確認するため, ベントナイトAを用いて作製した供試体4種類に対してメスシリンダー法による実験を実施した。ケース1, 2は供試体乾燥密度がともに1.07 Mg/m³であり, ケース3, 4の供試体乾燥密度はそれぞれ1.20, 1.16 Mg/m³であった。図-5, 6は取得したデータのケース1および2について, それぞれ膨潤率および浸潤速度の時間変化として整理した例を示す。図-5, 6から, ケース1, 2



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-6 ベントナイト A 供試体の膨潤率の時間変化

ともほぼ同様の結果が得られていることが分かる。このことから、メスシリンダー法で得られる結果は、良好な再現性を有した実験方法であると判断される。これらの図に示される浸潤特性と膨潤特性を、定量的に評価するために、下記の式(3)~(6)に定義する定常浸潤速度と定常膨潤率により整理した。これらのパラメータは、膨潤率および浸潤速度が時間経過と共に一定の値に収束する傾向が認められることから、定常状態に到達した状態における浸潤速度と膨潤率として定義した。

定常浸潤速度とは、浸潤速度の経時変化に対して式(3)で表示される双曲線で近似し、その漸近線から式(4)により求められる。

$$v_s(\text{time}) = \frac{\text{time}}{a + b \text{ time}} \quad (\text{mm/min}) \quad (3)$$

$$v_{\text{steady}} = \lim_{\text{time} \rightarrow \infty} v_s(\text{time}) = \frac{1}{b} \quad (\text{mm/min}) \quad (4)$$

ここに、time: 時間(min), $v_s(\text{time})$: 時間timeにおける浸潤速度(mm/min), v_{steady} : 定常浸潤速度(mm/min), a, b: 近似により定められる定数

表-4 ベントナイト A の定常浸潤速度と定常膨潤率

| ケース | ρ_{d0} (Mg/m ³) | v_{steady} (mm/min) | ϵ_{steady} (%) |
|-----|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 1.07 | 0.0017 | 109.6 |
| 2 | 1.07 | 0.0017 | 111.5 |
| 3 | 1.20 | 0.0013 | 151.9 |
| 4 | 1.16 | 0.0013 | 140.2 |

ρ_{d0} : 乾燥密度, v_{steady} : 定常浸潤速度, ϵ_{steady} : 定常膨潤率

表-5 メスシリンダー法における実験条件

| ケース | ベントナイト | 供給水溶液 | ρ_{d0} (Mg/m ³) | 締めめ方法 |
|-----|--------|-------|----------------------------------|-------|
| A-1 | A | 蒸留水 | 1.07 | ランマ |
| A-2 | A | 人工海水 | 1.06 | |
| B-1 | B | 蒸留水 | 1.12 | |
| B-2 | B | 人工海水 | 1.13 | |
| C-1 | C | 蒸留水 | 0.86 | |
| C-2 | C | 人工海水 | 0.89 | |
| D-1 | D | 蒸留水 | 0.93 | |
| D-2 | D | 人工海水 | 0.90 | |
| E-1 | E | 蒸留水 | 1.13 | |
| E-2 | E | 人工海水 | 1.13 | |
| A-3 | A | 蒸留水 | 1.89 | 静的荷重 |
| A-4 | A | 人工海水 | 1.87 | |
| B-3 | B | 蒸留水 | 1.76 | |
| B-4 | B | 人工海水 | 1.75 | |

ρ_{d0} : 乾燥密度

定常膨潤率も同様に、膨潤率の経時変化に対して式(5)で表示される双曲線で近似し、その漸近線から式(6)により求められる。

$$\epsilon_s(\text{time}) = \frac{\text{time}}{A + B \text{ time}} \quad (\%) \quad (5)$$

$$\epsilon_{\text{steady}} = \lim_{\text{time} \rightarrow \infty} \epsilon_s(\text{time}) = \frac{1}{B} \quad (\%) \quad (6)$$

ここに、 $\epsilon_s(\text{time})$: 時間timeにおける膨潤率(%), ϵ_{steady} : 定常膨潤率(%), A, B: 近似により定められる定数

図-5, 6中に、上記の各近似双曲線を曲線として併記するとともに、各定常浸潤速度および定常膨潤率を示した。

ベントナイトAを用いた4ケースの実験で得られた定常浸潤速度と定常膨潤率は表-4に示す通りであり、この結果からも、先述の通り比較的良好な再現性を有する結果が得られたと考えられる。また、乾燥密度の増加に伴い、定常浸潤速度は小さくなる傾

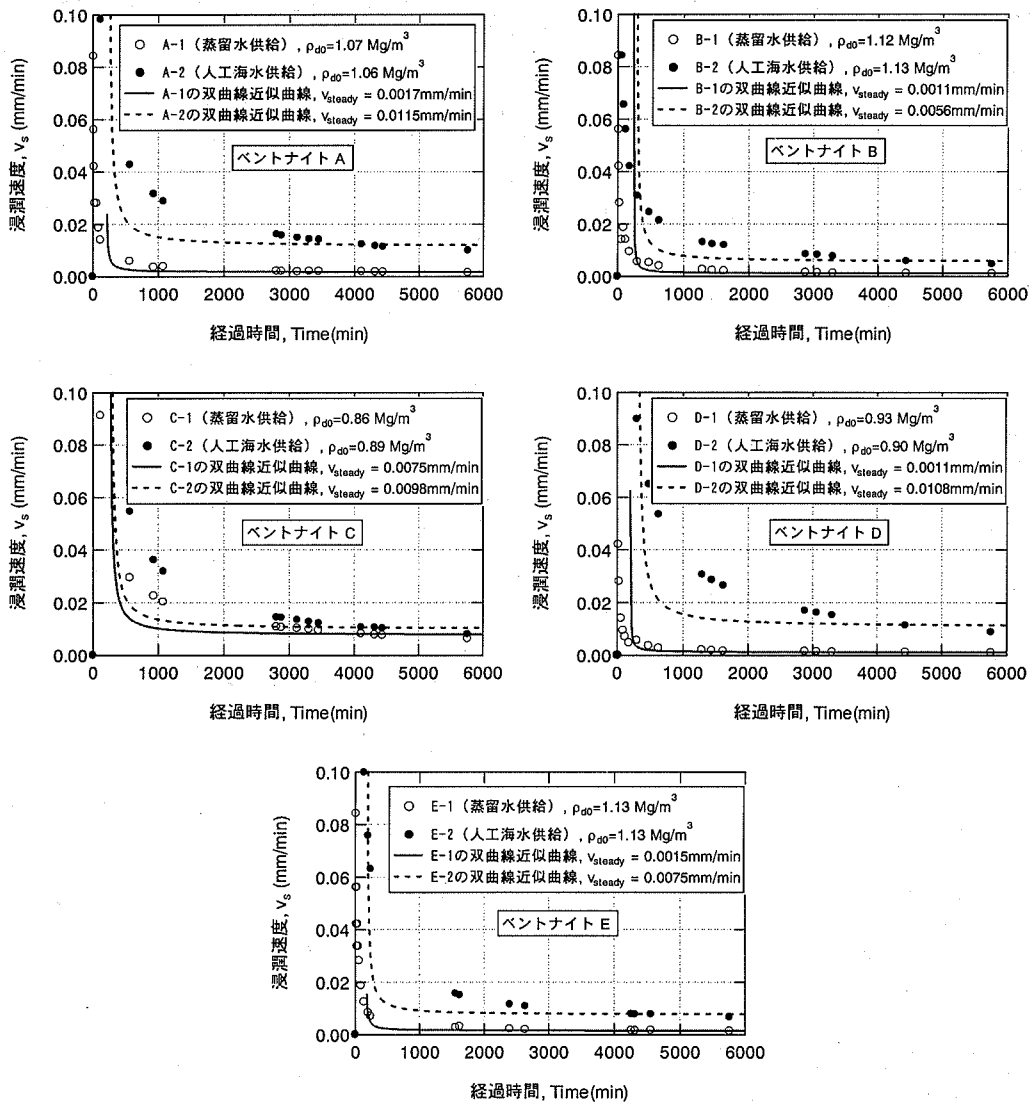


図-7 各種ベントナイトの浸潤速度と供給水溶液の水質の影響

向にあり、また、定常膨潤率も増加する傾向が認められる。

以上の実験結果から、メスシリンダー法は比較的良好な精度を有し再現性がある結果を示すものと考えられ、実験方法として有効な方法と考えられる。

(3) 各種ベントナイトの浸潤特性・膨潤特性

ベントナイトA～Eを用いて作製した供試体に対して蒸留水および人工海水を供給したときの浸潤・膨潤特性を、メスシリンダー法により調査した。実験条件は表-5に示すとおりである。

図-7および図-8は、表-5に示すケースA-1～E-2のメスシリンダー法により取得した実験結果をベント

ナイトの種類ごとに例示したものである。図-7は各種ベントナイトの浸潤特性を、図-8には膨潤特性を比較したものである。各図には、蒸留水と人工海水を供給した場合の実験結果を併記するとともに、それぞれの実験結果に対して式(3)～(6)を適用し求めた双曲線近似曲線も併記している。

図-7から、蒸留水を供給した場合の各種ベントナイトの浸潤特性は、Na型（ベントナイトA, B, E）もしくはNa交換型（ベントナイトD）の場合、定常浸潤速度 v_{steady} は、0.0011～0.0017mm/minの範囲にあった。一方、Ca型のベントナイトCの場合は、 $v_{steady}=0.0075 \text{ mm/min}$ であり、Na型もしくはNa交換型のベントナイトの約4～7倍の浸潤速度を有するも

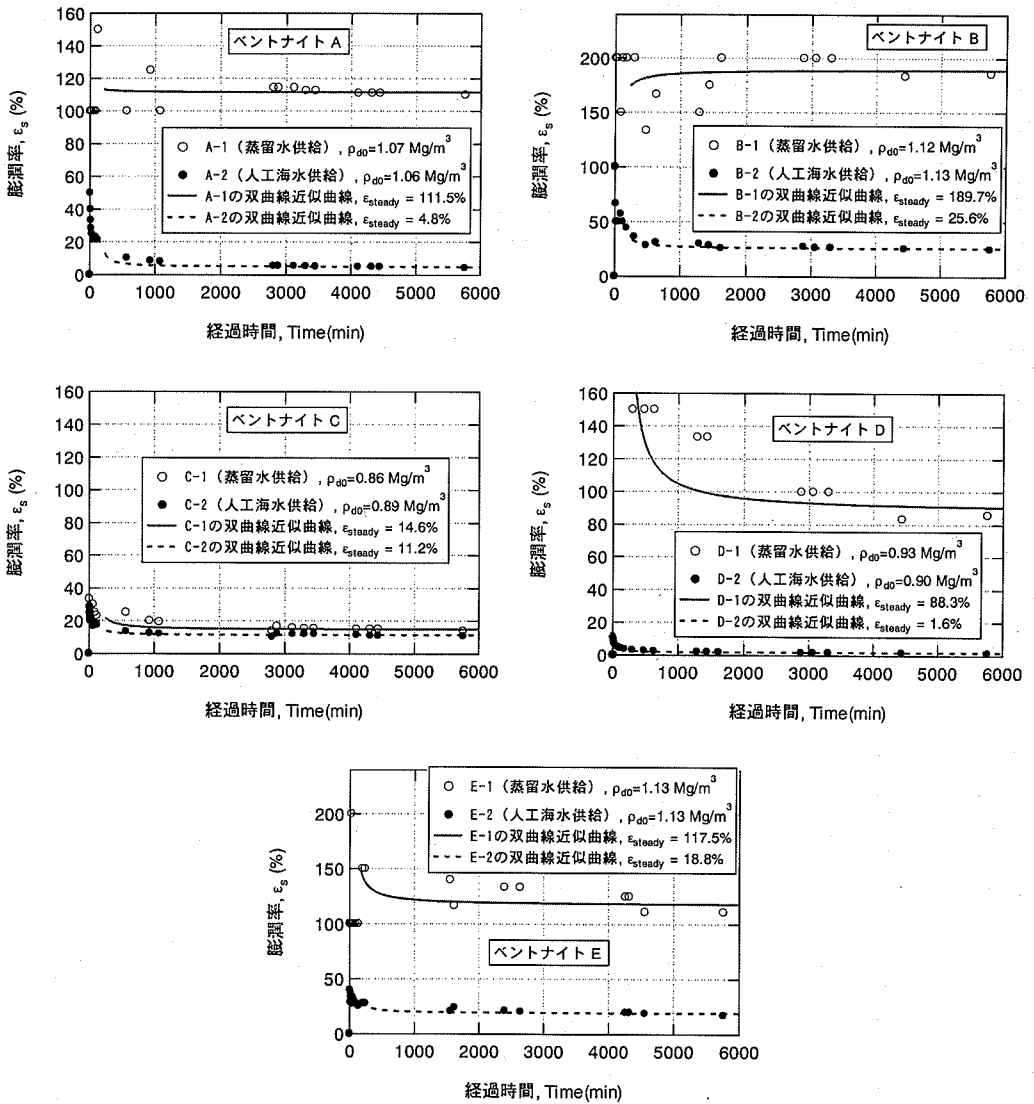


図-8 各種ベントナイトの膨潤率と供給水溶液の水質の影響

のと考えられる。

さらに図-7からは、各種ベントナイトの浸潤速度に対する供給水溶液の水質の影響を検討することができる。Na型もしくはNa交換型のベントナイトの場合、供給水溶液を人工海水にすると、いずれも浸潤速度が増加する傾向にある。しかし、Ca型のベントナイトCでは、供給水溶液の違いに依らず、ほぼ同様な浸潤特性を示すことがわかる。

図-8に示す各種ベントナイトの膨潤特性から、蒸留水を供給した場合の各種ベントナイトの膨潤率は、Na型（ベントナイトA, B, E）もしくはNa交換型（ベントナイトD）の場合、定常膨潤率 ϵ_{steady} は、88.3~189.7%の範囲にあった。一方、Ca型のベント

ナイトCの場合は、 $\epsilon_{steady}=14.6\%$ と他のベントナイトと比べて小さい膨潤率を示した。また、図-8に示す膨潤特性の各種ベントナイト間における相互比較結果は、参考文献6)で報告された各種ベントナイトの膨潤変形特性の傾向と整合している。

一方、各種ベントナイトの膨潤率に対する供給水溶液の影響の観点からは、浸潤速度の場合と同様に、Na型もしくはNa交換型のベントナイトでは、供給水溶液を人工海水にすると、いずれも膨潤率が著しく低下することがわかる。しかし、Ca型のベントナイトCでは、蒸留水および人工海水のいずれを供給しても、ほぼ同じような膨潤率を示している。

以上のことから、本研究で提案する新しい簡易実

表-6 メスシリンダー法実験結果一覧

| ケース | 供給水溶液 | ρ_{d0} (Mg/m^3) | v_{steady} (mm/min) | ϵ_{steady} (%) | 締固め方法 |
|-----|-------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|-------|
| A-1 | 蒸留水 | 1.07 | 0.0017 | 111.5 | ランマー |
| A-2 | 人工海水 | 1.06 | 0.0115 | 4.8 | |
| B-1 | 蒸留水 | 1.12 | 0.0011 | 189.7 | |
| B-2 | 人工海水 | 1.13 | 0.0056 | 25.6 | |
| C-1 | 蒸留水 | 0.86 | 0.0075 | 14.6 | |
| C-2 | 人工海水 | 0.89 | 0.0098 | 11.2 | |
| D-1 | 蒸留水 | 0.93 | 0.0011 | 88.3 | |
| D-2 | 人工海水 | 0.90 | 0.0108 | 1.6 | |
| E-1 | 蒸留水 | 1.13 | 0.0015 | 117.5 | |
| E-2 | 人工海水 | 1.13 | 0.0075 | 18.8 | |
| A-3 | 蒸留水 | 1.89 | 0.0014 | 188.7 | 静的荷重 |
| A-4 | 人工海水 | 1.87 | 0.0036 | 40.7 | |
| B-3 | 蒸留水 | 1.76 | 0.0013 | 196.1 | |
| B-4 | 人工海水 | 1.75 | 0.0024 | 79.4 | |

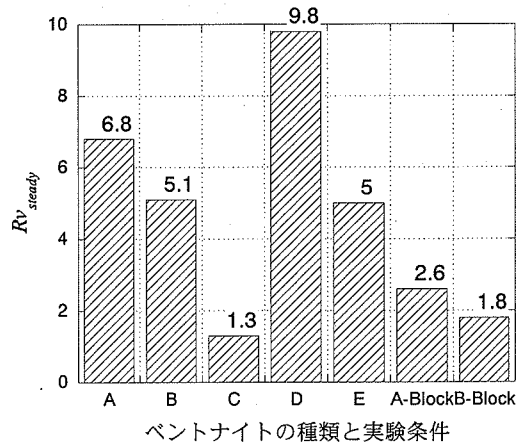
ρ_{d0} :乾燥密度, v_{steady} :定常浸潤速度, ϵ_{steady} :定常膨潤率

験法「メスシリンダーを用いたベントナイト系緩衝材の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」によれば、種々のベントナイトに対して同時に、かつ比較的簡易に浸潤速度や膨潤率を評価することができる。これにより、多くの種類のベントナイトを、浸潤・膨潤特性の観点から相互比較できる。また、図-7, 8に例示されるように、定性的にはあるが、供給水溶液の水質の変化に対する浸潤特性や膨潤特性の耐性が、ベントナイトの種類ごとに比較することができる。

4. 各種ベントナイトの浸潤・膨潤特性に対する人工海水の影響評価

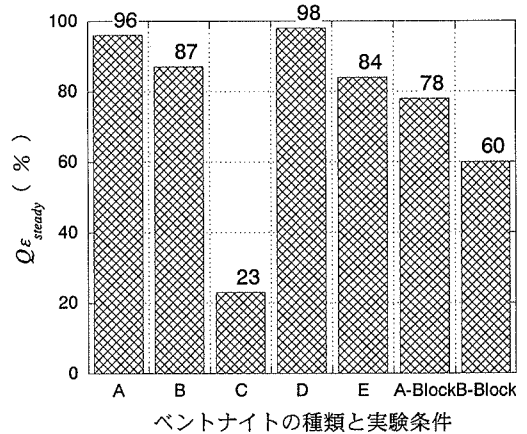
本章では、第3章で述べてきた実験結果を再整理することにより、各種ベントナイトの浸潤・膨潤特性に対する水質変化の耐性について検討する。

表-6は、本研究で実施したメスシリンダー法により求められた定常浸潤速度と定常膨潤率を示したものである。また、定常浸潤速度と定常膨潤率の各値から、各種ベントナイトの浸潤・膨潤特性に対する水質変化の耐性を評価するために、人工海水による浸潤速度増加比 Rv_{steady} と人工海水による膨潤率低下率 $Q\epsilon_{steady}$ (%)を導入した。各定義式は以下の通りである。すなわち、 Rv_{steady} は、人工海水が浸潤するときの速度を、蒸留水の浸潤速度の倍率で表示したものである。また、 $Q\epsilon_{steady}$ は、人工海水を供給した



①縦軸 Rv_{steady} の値が大きいことは、人工海水による浸潤速度の増加が大きいことを意味する。 $Rv_{steady}=1$ は浸潤速度は変化しないことを意味する。
②横軸 A~E は、表-5 に示す各ベントナイトを意味する。A-Block, B-Block は、それぞれ表-5 に示すケース A-3, 4 および B-3, 4 の結果を示している。

図-9 各実験条件における人工海水による浸潤速度増加比



①縦軸 $Q\epsilon_{steady}$ の値は 0~100%の値をとり、その値が大きいほど、人工海水による膨潤率の低下が著しい。 $Q\epsilon_{steady}=0\%$ は定常膨潤率は変化しないことを意味する。
②横軸 A~E は、表-5 に示す各ベントナイトを意味する。A-Block, B-Block は、それぞれ表-5 に示すケース A-3, 4 および B-3, 4 の結果を示している。

図-10 各実験条件における人工海水による膨潤率低下率

ときの膨潤率が、蒸留水供給のときの膨潤率に対する低下割合を百分率で表示したものである。

$$Rv_{steady} = \frac{(v_{steady})_{seawater}}{(v_{steady})_{distilledwater}} \quad (7)$$

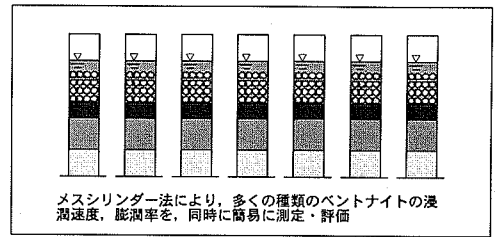
$$Q\varepsilon_{steady} = \frac{(\varepsilon_{steady})_{distilledwater} - (\varepsilon_{steady})_{seawater}}{(\varepsilon_{steady})_{distilledwater}} \quad (8)$$

ここに、 $(v_{steady})_{distilledwater}$: 蒸留水を供給した場合の定常浸潤速度(mm/min), $(v_{steady})_{seawater}$: 人工海水を供給した場合の定常浸潤速度(mm/min), $(\varepsilon_{steady})_{distilledwater}$: 蒸留水を供給した場合の定常膨潤率(%), $(\varepsilon_{steady})_{seawater}$: 人工海水を供給した場合の定常膨潤率(%)

図-9は、各実験条件における人工海水による浸潤速度増加比を示したものである。この図から、日本の高レベル放射性廃棄物処分技術研究において頻繁に実験に利用されるベントナイトAよりも、ベントナイトBやEの浸潤速度の方が、水質変化に対する耐性がやや高いことが分かる。また、Na交換型のベントナイトDは、人工海水により浸潤速度は著しく増加することが分かる。また、Ca型のベントナイトCの浸潤速度は、人工海水でも蒸留水でも大きく変化しないことが分かる。また、図-9のAとA-Blockのデータ比較およびBとB-Blockのデータを比較した結果、ベントナイトを締め、乾燥密度を増加させることにより、人工海水による浸潤速度の増加を約1/3程度に低減させられることが分かる。

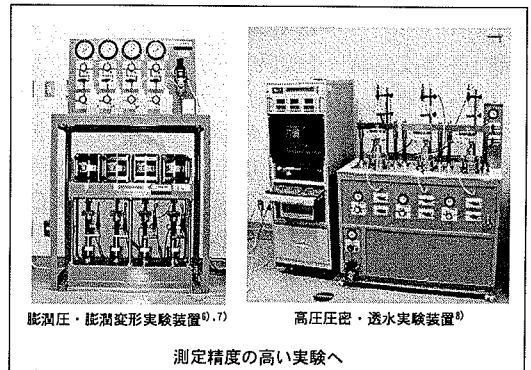
一方、図-10に示す各実験条件における人工海水による膨潤率低下率から、次のことが分かる。すなわち、Na型およびNa交換型ベントナイトのA, B, D, Eの場合、いずれも人工海水により著しく膨潤率が低下することが分かる。そのに対して、Ca型のベントナイトCは、膨潤率の観点からも水質変化に対する高い耐性が認められる。また、図-10のAとA-BlockのデータおよびBとB-Blockのデータを比較した結果、ベントナイトを締め、乾燥密度を増加させることにより、人工海水による膨潤率の低下をやや軽減させられることが分かる。なお、A-Block, B-Blockは、それぞれ表-5に示すケースA-3, 4およびB-3, 4の結果を整理したものを示している。

以上のように、「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」は、多くのベントナイト供試体に対して簡便に、浸潤速度と膨潤率を測定することが可能である。したがって、浸潤速度と膨潤率の観点から、各種ベントナイトを相互比較することができ、緩衝材に適するか否かを定性的ではあるが判断することができる。これにより、多くの種類のベントナイトから緩衝材として適性のあるベントナイトを選別し、参考文献6)~10)で実施されているような詳細な膨潤圧・膨潤変形実験や浸潤・透水特性実験を行えば、緩衝材の材



メスシリンダー法により、多くの種類のベントナイトの浸潤速度、膨潤率を、同時に簡易に測定・評価

緩衝材としての適性を評価し、高精度な実験に供するベントナイトを選別



膨潤圧・膨潤変形実験装置^{9), 7)}

高圧圧密・透水実験装置⁹⁾

測定精度の高い実験へ

精度の高い実験データに基づく緩衝材の材料選定・仕様設計へ

図-11 緩衝材の材料選定や仕様設計を効率的に進める上での「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」の位置付け

料選定や仕様設計を効率的に進めることができる(図-11参照)。

5. 結論

本研究の主な成果は以下の通りである。

- (1) 「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」を提案すると共に、使用する簡易測定器具、測定方法および浸潤速度と膨潤率の簡易算出方法を提示した。
- (2) 実際のベントナイトを用いて、「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」により測定される浸潤速度と膨潤率の再現性を確認し、実験方法としての妥当性を示した。
- (3) 5種類のベントナイトを用いて、「メスシリン

ダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」により、人工海水を供給した場合の浸潤速度、膨潤率を測定した結果、ベントナイトの交換性陽イオンの種類の違いにより、浸潤速度と膨潤率の水質変化に対する耐性を概観した。また、高密度に締固めることにより、水質変化に対する耐性が向上することを明らかにした。

- (4) 緩衝材の材料選定や仕様設計を効率的に進める上での「メスシリンダーを用いたベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易実験法」の役割を図-11のように示した。

謝辞：本論文における実験データの多くは、井上誠氏（現・東亜建設工業（株））が、茨城大学工学部都市システム工学科防災・環境地盤工学研究室在学中に取得したものである。また、本研究の一部は、（財）東電記念科学技術研究所の研究助成および文部科学省科学研究費基盤研究B(2)により実施した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート，JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022, 1999.
- 3) （財）電力中央研究所，電気事業連合会：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術，1999.
- 4) Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.: SKB91 Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety, *SKB Technical Report* 92-20, 1992.
- 5) 小峯秀雄，安原一哉，村上哲，大久保嘉雄，坂上武晴：ベントナイト系材料の浸潤体積と膨潤体積の簡易測定器具，その測定方法及びその器具を使用した該ベントナイト系材料の浸潤速度と膨潤率の簡易算出方法，特願2003-188645, 2003.
- 6) 小峯秀雄，緒方信英：砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性，土木学会論文集，No.701号/III-58, pp.373-385, 2002.
- 7) Komine, H. and Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 460-475, 2003.
- 8) 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法の提案，土木学会論文集，No.708号/III-59, pp.133-144, 2002.
- 9) 千々松正和，谷口航，鈴木英明，西垣誠：熱—水—応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価，土木学会論文集，No. 687/III-56, pp.9-25, 2001.
- 10) Mata, C. and Ledesma, A. : Permeability of bentonite-crushed granite rock mixture using different experimental techniques, *Geotechnique*, Vol. 53, No. 8, pp.747-758, 2003.

(2003.12.10 受付)

SIMPLIFIED EXPERIMENTATION ON SEEPAGE AND SWELLING CHARACTERISTICS OF BENTONITE MATERIAL USING MEASURING CYLINDER

Hideo KOMINE, Yutaka NAOI, Kazuya YASUHARA, Satoshi MURAKAMI,
Kazuo MOMOSE and Takeharu SAKAGAMI

In the design for buffer and backfill materials for repositories of high-level nuclear waste, we must choose the adequate bentonite among many kinds of bentonite in the world. To select the adequate bentonite, we have to get the fundamental properties such as seepage and swelling of many kind of bentonite. To solve this problem, the study proposed the new simplified experimentation using measuring cylinder and new analysis method for seepage and swelling properties. We investigate the validity of new method by the laboratory tests using five kinds of bentonite. Furthermore, this study describes the influences of water-chemistry to the seepage and swelling properties of bentonites on the basis of the experimental data obtained by new method.