X線CT法による ベントナイトの膨潤・均質化プロセスの分析*

佐藤 晃¹ 矢田 勤²

Analysis of Swelling and Homogenization Process of Bentonite by X-ray CT Method

by Akira SATO^a and Tsutomu YADA^b

- a. Associate Professor, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University,
Kurokami 2-39-1, Kumamoto, 860-8555, Japan
(Corresponding author, E-mail: asato@kumamoto-u.ac.jp)
- b. Manager, Nuclear Facilities Division, Taisei Corporation, 6-8-1 Nishi-Shinjyuku, shinjyuku
City, Tokyo 163-6009, Japan

Bentonite has been studied as the buffering materials in the project of the low-level radioactive waste disposal and high-level radioactive waste disposal, since bentonite has high abilities of water interception, self-sealing, absorption, chemical buffering and material migration retardation. In order to realize those abilities, it is prefer to install bentonite under the high density condition. The granular bentonite was developed which utilize the different size of bentonite particles, it make it possible to realize the easy installation under the high density condition.

In this study, swelling process of the bentonite is visualized and analyzed by X-ray CT method. The soaking tests of bentonite under the displacement constraint using acrylic molds were conducted during over 200 days. The swelling and homogenization process during soaking tests were visualized, and the soaking and swelling process were analyzed from X-ray CT image data. The parameters, such as water content ratio, wet density and dry density were also measured and the fundamental properties of the bentonite were verified. It was also found that those parameters can be accurately evaluated from X-ray CT image data. The water permeation tests under the displacement constraint and displacement free conditions were also conducted. The evaluated intrinsic permeability were low enough in both conditions, and it was confirmed that the displacement constraint does not gives crucial effects to the permeability of bentonite.

KEY WORDS: Bentonite, X-ray CT, Swelling, Homogenization, Water Permeation

1. は じ め に

ベントナイトは高い遮水性、自己シール性、物質吸着性、物質移行遅延性、化学的緩衝性など様々な特徴を有することから¹⁾、低レベル放射性廃棄物処分や高レベル放射性廃棄物地層処分において放射性廃棄物を収めたコンクリートピットや廃棄物収容器と周辺地盤との間を充填する材料としての利用が検討されてきた²⁻⁷⁾。この材料は「緩衝材」と呼ばれており、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、非常に高い止水性や膨潤によるシール性、熱伝導性等が要求される。また、ベントナイトの高い遮水性と長期安定性という特長を活かし、フィルダム、河川堤防、一般・産業廃棄物処分場の遮水材としての利用も進んでいる。実際にはベントナイトのみで実施することは経済的ではないので、比較的安

価な礫や砂をベントナイトに混合する事により透水係数の改善が図られている⁸⁾。さらには、産業廃棄物処分場などでの重金属の保持特性や酸性水対策への有効性も検討されている⁹⁾。

さて、ベントナイト系材料の初期性能を担保するには、ベントナイトの遮水性確保のため、高密度に施工することが必要とされている。低レベル放射性廃棄物処分の中で比較的放射能レベルの高い余裕深度処分では緩衝材としてベントナイトを100%使用する計画であり、その施工法としては現場締固め、ブロック状成形体の積重ね、粒状の充填、吹き付け等があり、研究が進められている。粒状ベントナイトによる充填の場合、所定の密度を達成するために大小粒径が異なる2種類の造粒された粒状ベントナイトが使用されている。この粒状ベントナイトは粗粒の粒径が16～25mm、細粒の粒径が0.5～0.7mmの2種類からなる高密度のベントナイトを組み合わせることで良好な施工性と十分な充填密度を実現することができる。なお、施工時には空隙が生じるものの、水の侵入による膨潤特性により空隙は閉鎖され、他工法と同様の止水性能が確保される。

以上のことをふまえ、粒状ベントナイトが実際に施工された状態を想定し、地下水が変位拘束下にある粒状ベントナイトに浸透することでどのような膨潤性を発揮するかそのプロセスの分析

*2011年6月2日受付 2011年11月18日受理

1. 正会員 博士(工)熊本大学大学院自然科学研究科 環境共生工学専攻 准教授

2. 大成建設(株)原子力本部 課長

[著者連絡先] TEL/FAX: 096-342-3694 (熊本大学・佐藤)

E-mail: asato@kumamoto-u.ac.jp

キーワード: ベントナイト, X線CT, 膨潤, 均質化, 透水特性

Fig.1 Composition of industrial X-ray CT scanner (TOSHIBA TOSCANER-20000RE).

を目的として、X 線 CT スキャナーを用いて 230 日間の浸漬状態を維持したまま内部の密度の均質化プロセスを可視化する。また、浸漬終了後の試料に対して、含水比の測定を行い、ベントナイト施工後の基本的物性を確認する。また、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¹⁰⁾を実施し、X 線 CT 画像によって得られたデータとの比較を行う。さらに、変位拘束型および非拘束型 2 種類のベントナイト試料について透水試験を実施し 2 種類の透水特性の評価を行うとともに、X 線 CT 撮影を同時に実施し X 線 CT 撮影で得られた膨潤状態と透水特性との比較を行う。これらの測定を通して、本粒状ベントナイトの基本性能の評価と、ベントナイト膨潤過程の分析への X 線 CT 法の適用性について検討する。

2. 産業用 X 線 CT スキャナー

2・1 システムの概要

熊本大学では、1997 年より産業用 X 線 CT スキャナーを運用しており、既に亀裂開口幅の評価¹¹⁾、多孔質岩石の CO₂ 貯留特性の分析^{12, 13)}などに供されてきた。基本的なシステムの構成は Fig. 1 の通りである。本システムにインストールされている X 線管球に負荷される最大出力は 300keV/2mA である。X 線 CT スキャナーシステムで最も注目される性能が空間分解能である。1 つの CT 画像は水平方向に n 個、鉛直方向に n 個配列された要素 (pixel) により構成されており、本研究で用いた X 線 CT スキャナーの場合、最大 $n=2048$ まで設定が可能である。撮影領域は直径 150mm および 400mm の 2 通りを選択可能であるが、直径は 150mm の場合の画素の最小辺長 d は $d=0.073\text{mm}$ である。また、断層撮影法により撮影される断層の厚さは視準儀により、0.3mm, 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm, 4mm の 6 通りに設定することができる。密度が $2.0 \sim 3.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度の試料を対象とした場合、これまでの経験から断層厚さは通常 2mm を用いている。スキャンモードには half scan, full scan, double full scan の 3 通りがある。撮影に必要な時間はそれぞれおよそ 3 分, 5 分, 10 分であり、この時間が本スキャナーの時間分解能と考えることができる。

2・2 CT 値

本研究では産業用 X 線 CT スキャナーから得られる画像データ、すなわち CT 値の分布からベントナイトの膨潤・均質化プロセスの可視化と分析を行う。X 線 CT スキャナーとは物体を透過した X 線の減衰から物体内部の密度分布を可視化する装置であり、具体的には、物体の密度に比例する X 線吸収係数 f_m の分布を求める方法である。その表示方法としては、X 線吸収係数 f_m の値を適当にスケールした CT 値と呼ばれる量が用いられる。ここで、水と空気の X 線吸収係数をそれぞれ f_m^{water} および f_m^{air} と表記すると、X 線吸収係数が f_m である個所の CT 値 C は次式で表される。

(a) Large particle (approximately 20mm) (b) Small particle (approximately 0.6mm)

Fig.2 Bentonite particle indifferent size.

$$C = -K \frac{f_m - f_m^{\text{water}}}{f_m^{\text{air}} - f_m^{\text{water}}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、本研究で使用した X 線 CT スキャナーの場合 $K=1000$ である。つまり、CT 値とは水と空気の密度差を 1000 等分した量として表される。本スキャナーの場合、空気が -1000、水が 0 である。

さて近年、岩盤工学や地盤工学の分野では μ フォーカス X 線 CT スキャナーが多く適用されるようになってきた¹⁴⁾。 μ フォーカス X 線 CT スキャナーも画像を構成する際の基本原理は同じであるが、撮影の際の設定条件、例えば管電圧、管電流、X 線焦点とスキャンテーブルセンター間の距離 (FCD: Focus to scanning Center Distance)、X 線焦点と検出器の検出面間の距離 (FDD: Focus to Detector Distance) などの値や、撮影対象物の種類 (= 密度) や寸法により上述の K の値が大きく変化し、また、CT 値絶対値の変化量も本研究で用いる産業用 X 線 CT スキャナーと大きく異なり、同じ CT 画像でもそれを構成する CT 値の持つ物理的意味が異なる。これらの X 線 CT 適用に関する問題については別の機会に紹介したい。

3. ベントナイト試料および試験装置

3・1 ベントナイト

本研究では、粒状ベントナイトを用いて研究を行った。使用した粒状ベントナイトは、ベントナイトを高密度の粒状に加工したものである。一般的に、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分などの場合、所定の透水係数を確保するために施工状態での乾燥密度が $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度とする必要がある。粒状ベントナイトを用いた場合には表面に軽い振動を加えるだけで、所定の乾燥密度を満たすことができ、施工性の向上が期待できる¹⁵⁾。なお、本研究では特に断らない限り、密度とは施工あるいは設置状態での見かけの密度を意味する。異なる粒径の粒状ベントナイトを混合することで、充填率が上がり、密度を上げることができることから¹⁵⁾、Fig. 2 に示すように、本研究では粒状ベントナイトの粒径を 2 種類用意し、それらを混合して実験を行った。粗粒の粒径が 16 ~ 25mm (平均粒径 20mm)、細粒の粒径が 0.5 ~ 0.7mm (平均粒径 0.6mm) であり、粒状ベントナイト自体の乾燥密度は共にほぼ $2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。なお、本研究では粒径 16 ~ 25mm のものを粗粒、粒径が 0.5 ~ 0.7mm のものを細粒と呼ぶこととする。

3・2 ベントナイト膨潤過程可視化装置および実験方法

本研究では、変位拘束条件の下にベントナイトの湿潤・膨潤過程を X 線 CT スキャナーで可視化するためにアクリル製の円筒モールドを用いた (Fig. 3)。アクリルモールドの直径および内径は 180mm および 120mm であり、高さは 130mm である。まず、アクリル円筒容器の内側に外部からの水の浸透を均質化するために

(a) Geometry and composition of acrylic mold

(b) Tomography slice

Fig.3 Acrylic mold for visualization of swelling process of bentonite by X-ray CT scanner.

Fig.4 Permeation test system.

ポーラスストーンを設置し、その内側にろ紙を敷いた。この状態でモールドの内径および高さは、100mm および 100mm となる。この円筒容器に、まず、粗粒ベントナイトを容器の高さまで充填したのち、表面に振動を加え密実に充填を行った。次に粗粒ベントナイトの空隙部に細粒ベントナイトを充填し、粗粒ベントナイトと同様に表面に振動を加えることでほぼ均質に隙間を埋めることができる。以上の手順を経ることで、充填した粒状ベントナイトの乾燥密度は $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度となる。最後に、アクリル円筒容器上部にステンレス製のフランジを蓋としてボルトで固定した。モールド上下のフランジには直径 2mm 程度の通水用の穴が多数空けられており、モールド全体を水に浸すとこの穴からモールド内部に水が浸入していく仕組みである。本研究では、上記手順で充填したモールドを 2 個用意した。ここでは初期状態の粒状ベントナイトについて、X 線 CT 撮影を行う。撮影断面はモールドの底部に近い順に、Slice1 ~ Slice7 とし、間隔は 10mm とした (Fig. 3)。さらに、モールドを水で満たした容器内に浸漬させる。すると、モールドの上下から水が入り、さらにポーラスストーンを伝って水が浸透し、周辺部からも水がベントナイトに供給される。1 つは真空容器内で浸漬を実施し (モールド A)、もう 1 つは大気圧下で実施した (モールド B)。なお、大気圧下で実施したモールド B については、大気圧下でのみの条件では水の浸潤に時間がかかることが想定されたため、モールド A と同様に測定開始時にのみ 1 時間程度、真空容器内で浸漬を実施した。その後一定期間をおいて撮影する。撮影頻度は 1 時間、1 日、3 日、5 日、7 日、10 日、15 日、20 日、30 日、40 日、50 日、60 日、70 日、80 日、90 日、100 日、120 日、140 日、170 日、200 日、230 日経過後とした。

3・3 固有浸透率測定装置および実験方法

遮水を目的としたベントナイトの固有浸透率は非常に小さく、このような材料に対して透水試験を実施する場合には、圧力容器

(a) Appearance of aluminum permeation cell

(b) Inlet surface where the porous stone is installed at the entrance to hold bentonite

(c) Inside of permeation cell. Both large and small particles are packed

Fig.5 Aluminum permeation cell for particle bentonite sample.

部分の許容圧力は出来るだけ高い方が望ましい。また、本学で運用している X 線 CT スキャナーでの透水過程の可視化も考慮すると、圧力容器内部には密度の小さい材料を使用する事が望ましい。そこで本研究では、耐圧容器の主要成分として高引張強度を有し、かつ、密度の小さいカーボン樹脂製 (CFRP) のチューブを用いた透水試験装置を用いた (Fig. 4)。本透水試験装置は既に佐藤らが用いた X 線 CT 用超臨界 CO_2 流動試験システム^{12,13)}を流用したものである。このシステムは台座部分を合わせた重量は約 7kg と軽量であり、X 線 CT スキャナーでの撮影も含めハンドリングが非常に容易である。流体の圧入・流出の制御および計測は、圧力容器の両端部に接続された 2 台のシリンジポンプ (ISCO シリンジポンプ 500D) とそれを制御するコントローラーで行う。このポンプのシリンジ部の容量は 500ml であり、最大で 25MPa まで加圧することができる。2 台のシリンジポンプはそれぞれ条件に応じて流量制御、圧力制御いずれの場合も選択が可能である。

ベントナイト試料は Fig. 5 で示すように圧力容器に設置できるように設計された、アルミ製透水セルを用いた。Fig. 5 (b) に示すように流入口をアルミ製の蓋とポーラスストーンにより、粒状のベントナイトを保持するとともに、膨潤したベントナイトの挙動を拘束することができる。また、Fig. 5 (c) のように流入口を開放した状態でも実験可能である。

4. ベントナイト膨潤過程の可視化と分析

4・1 X 線 CT 原画像

真空容器内で浸漬を実施したモールド A について、Slice 2 に

Fig.6 X-ray CT images during swelling process in the case of mold A.

あたる断面で得られた画像を Fig. 6 に示す。試料周辺部に白く見えているのがポーラスストーンであり、これらの画像は同じ Window level=500 Window width=1000 で画像化している。Fig. 6 の明るい部分は見かけ密度の大きい領域であり暗い部分は密度が低い領域である。初期画像では、密度の高い粗粒がはっきりと確認できるが、時間経過と共に試料に水が徐々に浸透し、見かけ密度（湿潤密度）が均質化している様子が確認できる。モールド A の Slice 2 について、アクリルをファントムとして CT 値から試料全体の乾燥密度を算出すると、初期状態で約 $1.61 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ となりモールドに充填した時の密度とほぼ一致していた。このことより、CT 値データからほぼ正確に試料内部の乾燥密度を算出することが出来る。以後、モールド A では 100 日目で約 $1.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、230 日目で約 $1.99 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ となっていた。230 日経過後でも粗粒と細粒の境界は確認できるが、粗粒部と細粒部では湿潤密度にして約 $0.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の違いがある。先に述べたように、モールド A は真空状態で水を浸透させ、もう一方のモールド B は大気圧下で水を浸透させた。しかし、X 線 CT 画像では両モールドに大きな違いは見られなかった。これは、ベントナイトに水が浸透するとそこから次々と低透水層が形成されるため、1 気圧程度の減圧では、浸透速度に大きな影響を与えることができないからだと考えられる。

4・2 X線CT画像による密度均質化過程の分析

Fig. 6 で得られた CT 原画像から、湿潤・膨潤過程における密度分布を求める。まず、試料の中心を原点として Fig. 7 のように極座標を設定する。 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の方向に関して、CT 値から評価した密度の半径方向分布を Fig. 8 に示す。ここでは、密度のパラツキを見るために 4 方向の密度分布を同じグラフに示してある。また、データは半径方向に 27 画素ごとの平均値をとった。1 日目 (Fig. 8 (b)) と 5 日目 (Fig. 8 (c)) の分布から分かるように、試料の周辺部 ($r=50\text{mm}$ 付近) から徐々に密度が上

Fig.7 Polar coordinates system which is set on the CT image.

Fig.8 Density distribution in radius direction after soaking.

昇し、かつ、バラツキが小さくなっている。また、この領域は時間とともに中心方向に広がっていき、50 日程度経過後は全体として密度が均質化している様子が確認できる。また、本研究で用いたモールド A および B ではほとんど差が見られなかった。

次に、密度の均質化の度合いを示す指標として均質化度を設定する。CT 画像から得られる初期状態の密度の下限を m_{low0} 、上限を m_{up0} とすると、先に図で示したように下限 $m_{low0}=1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、上限 $m_{up0}=2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度である。一方、湿潤、膨潤過程にある密度の下限および上限を m_{low} 、 m_{up} として均質化度 R_H を次のように定義する。

$$R_H = \frac{m_{up} - m_{low}}{m_{up0} - m_{low0}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) の関係から求めたモールド A およびモールド B 全体の均質化度の分布を併せて Fig. 9 に示す。グラフから、今回使用した直径 100mm 程度の試料では、モールド A およびモールド B とともに均質化は 16 日前後でほぼ終わり、その後一定の値をとることが分かる。また、モールドの浸漬状況による違いはほとんどないことが分かる。

先に述べたようにモールド内部へは上下に設置された蓋部から水が内部に浸透する。また、ベントナイト周辺部にはポーラスストーンが設置されているので周囲から水が供給されるものの、上下の蓋に近い部分とモールド中心部とでは、蓋に近い部分の方が、水が供給されやすいと考えられる。そこで、最下部と中心付近で撮影した CT 画像を用いて、半径方向距離が均質化度に及ぼす影響について調べた。その結果を Fig. 10 に示す。図中の領域 A および B に注目すると、下端に近い Slice 1 (Fig. 10 (a)) では半

径方向に関係なくほぼ一様に均質化しているのに対して、Slice 4 (Fig. 10 (b)) では周辺部 ($r=40\text{mm}$) が先に均質化、遅れて中心部 ($r=10\text{mm}$) が均質化していく様子が見て取れる。しかし、50 日以降では均質化度はいずれもほぼ等しいと見なすことができる。

4・3 画像間差分法による CT 値増分の抽出

前項で示したとおり、X 線 CT 画像より、ベントナイトに水が浸透する際の膨潤・均質化プロセスを確認できる。このような画像データから CT 値の変化、つまり湿潤密度の変化のみを取り出す方法としては画像間差分法が有効である。また、X 線 CT 法に関するこれまでの研究から、X 線 CT 画像に含まれるノイズを除去すると共に、CT 画像が必然的に有するカップング効果を軽減する方法としても有効であることが示されている¹¹⁻¹³⁾。本研究においてもこの画像間差分法を適用し、ノイズの軽減と共に CT 値の変化の抽出を試みる。

本研究で適用した画像間差分法の手順は以下の通りである。まず、先に述べたようにベントナイト試料充填後の初期状態で撮影を実施している。この初期画像と、実験開始後の同断面で撮影した画像との間で差分をとった。ベントナイトについては水の浸透により膨潤する性質があるが、このモールドは周囲をアクリル容器とステンレス製の蓋で変位拘束しているため膨潤による変形は若干あるもののそれほど大きな影響はないため画像間差分を適用することは十分可能である。Fig. 6 で示した画像について画像間差分を実施した結果を Fig. 11 に示す。このように、原画像から

Fig.9 Mean homogenization ratio during swelling process of bentonite (mold A and B).

Fig.10 Homogenization ratio during swelling process of bentonite at each radius (mold A).

Fig.11 X-ray CT images after image subtraction by the initial image in the case of mold A.

Fig.12 Schematic model of simplified swelling test.

密度変化のみを抽出した。差画像で黒い部分はCT値の変化が少ない領域であり、白い部分ほどCT値が大きく変化した領域である。これらの画像から、まず、水が周辺部から供給され周辺部のCT値が上昇している。しかし、原画像ではよく確認できなかったが、粗粒部分については実験開始後230日に至るも密度の変化はほとんど無かったことになる。次に、Fig. 11に示した領域AあるいはBに注目する。これは粗粒部分を示しているが、差画像データから粗粒内部の隙間と思われる部分のCT値に変化が見られる。これは、粗粒内部に水が浸透し、膨潤したためと考えられる。この水の浸透は外周部の粗粒部分については、実験開始時に1時間程度、真空容器内で浸漬を実施した後の段階から観察される。

4・4 膨潤速度および膨潤率

ベントナイトの基本的性質として膨潤速度および膨潤率がある。これらの量を評価する方法として、小峯らはベントナイト系材料の浸潤・膨潤特性の簡易試験法¹⁰⁾を提案している。この試験は、メスシリンダーを用いてベントナイトを膨潤させることにより膨潤速度および膨潤率を簡易に測定することができる。実験方法としては、まずメスシリンダーにベントナイトを充填する。その後、ベントナイト上にろ紙を敷き、その上からステンレスボールを充填する。測定はベントナイトの上面のメスシリンダーの値を読み取り、これを V_0 とする（単位は体積）。さらに水を加え一定期間において水の浸透部と非浸透部の境界の値を読み取り、それぞれ V_a , V_b [ml]とする。湿潤日数を t_n [day], メスシリンダーの面積を A [cm²]とすると、湿潤速度 v_n および膨潤率 ε_n は次式で表される。

$$v_n = \frac{V_0 - V_b}{A \times t_n} \times 10 \quad (\text{mm/day}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_n = \frac{V_a - V_0}{V_0 - V_b} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

なお、本研究ではベントナイトができるだけ同じ状態になるように、X線CT撮影に用いたモールドと同じ充填方法で行う。さらに、粒状ベントナイトの粗粒と細粒の違いを見るために、X線CT撮影で用いたモールドと同じ状態である粗粒と細粒を混合したものと、細粒のみを充填したもの2種類を用意した。

上述の考えを基に、X線CT画像から同様に膨潤速度ならびに膨潤率を測定する方法について考える。まず、本研究のようにモールドを用いた場合、基本的に膨潤は円柱外縁から中心方向に進行する。また、先にFig. 9で示したように均質化の経時変化は、収束に至る30日程度まではほぼ一定である。そこで、試料の周辺部（ポーラスストーンとの接触面）の中心からの距離を r_0 、水が浸

(a) Simplified swelling tests

(b) CT image observation in Mold A

Fig.13 Comparison of evaluated swelling velocity.

Fig.14 Comparison of swelling ratio.

透した境界面までの距離を r_f 、湿潤日数を t として、湿潤速度 v_n を次のように定義する。

$$v_n = \frac{r_0 - r_f}{t} \quad (5)$$

次に、CT画像中で膨潤が確認された粗粒ベントナイトについて膨潤率の評価を試みる。ここでは、形状が画像上で明瞭に確認できる粗粒子に注目する。撮影断面中の粗粒ベントナイトに対して、初期状態の面積 S_0 、膨潤後の面積を S とし、面積の変化率によって以下のように膨潤率 ε_n を定義する。

$$\varepsilon_n = \frac{S}{S_0} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

上述の関係により求めた湿潤速度の経時変化をFig. 13に示す。同じく膨潤率の経時変化をFig. 14に示す。まず、湿潤速度について見ると、簡易試験とモールドによる結果を比較すると両者の

Fig.15 Observation of bentonite core sample after swelling tests.

Table 1 Comparison of properties evaluated by drilled bentonite core sample and CT value.

		Water content (%)	Wet density (10^3 kg/m^3)	Dry density (10^3 kg/m^3)	Wet density, translated from CT value (10^3 kg/m^3)	Dry density, translated from CT value (10^3 kg/m^3)
	Mean	30.1	1.90	1.46	1.97	1.51
Mold A (Vacuum)	Large particle	30.4	—	—	1.99	1.53
	Small Particle	32.7	—	—	1.94	1.46
	Mean	30.3	1.96	1.50	1.96	1.50
Mold B (Air pressure)	Large particle	29.3	—	—	1.99	1.54
	Small Particle	36.3	—	—	1.92	1.41

傾向には大きな違いが無いことが分かる。先に示したように、簡易試験はステンレスボールにより荷重をかけているものの、基本的に変位は拘束されていない。一方、モールド試験の場合には変位拘束されているが、水が浸透して密度が均質化する速度はこのような拘束の影響を受けないことが分かる。また、簡易試験の粗粒と細粒の混合、細粒のみの2つの違いもほとんど無い。

一方、膨潤率に関しては、簡易試験とモールド試験で大きく異なる。つまり、モールド試験は変位拘束を受けている分、膨潤率は小さくなる結果となった。なお、簡易試験での粗粒と細粒の混合、細粒のみの場合の2つの膨潤率の変化はほぼ同じであり、ここでも粒子の大きさによる違いは見られなかった。

4・5 モールド開封後の諸測定

230日間試料を浸漬した後、モールドを開封し、ベントナイトコアを取り出した。これを用いて、表面・内部の観察、含水比、湿潤密度、乾燥密度の測定を行った。まず、試料の表面を観察した結果を Fig. 15 に示す。このように X 線 CT 原画像 (Fig. 15 (b)) で確認できた粗粒部分 (写真のやや濃い部分) と細粒部分 (写真のやや淡い部分) のわずかな違いが目視で確認できた (Fig. 15 (a) および (c))。次に、CT 画像とコアの比較を行う。差画像をとることで、230日間の浸漬で粗粒部分の密度変化がほとんどないことが確認できた。一方、コア切断面で確認したところ、粗粒部分を始め試料全体に水は浸透しており、初期状態で存在した粗粒部分の亀裂と思われる部分については膨潤により塞がっていた。これらより、粗粒部分では水の浸透による密度の増加と膨潤による密度の低下が並行して発生したため、乾燥状態と湿潤状態の間で密度としてはほとんど差が発生していなかったものと推測された。また、X 線 CT 撮影を行った断面でコアを切断し、切断面を確認したところ、Fig. 15 (c) に示すように、X 線 CT 原画像と同

Fig.16 Change of intrinsic permeability of bentonite with time.

じパターンが確認できた。次に、切り出したコアからさらに小片を切り出し、含水比の測定を行った。その結果を Table 1 に示す。ここでは、CT 値と含水比測定結果より換算した湿潤・乾燥密度も併せて示す。コア全体の湿潤密度と CT 値からの湿潤密度換算値を比較すると、両モールド共にその差が小さいことから、CT 画像から十分に湿潤密度を評価できることが分かった。また、各モールドの粗粒および細粒の CT 値からの乾燥密度換算値を比較すると、細粒のほうが $0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度小さい結果となっていることから、粗粒部分と細粒部分の乾燥密度の均一化までには至っていないことが示唆された。

4・6 透水試験

ベントナイトについて評価した固有浸透率と湿潤日数との関係をまとめて Fig. 16 に示す。先に述べたように、透水試験ではアルミ製透水セルにベントナイトを充填し実験を実施するが、流入

Fig.17 X-ray CT images during permeation tests.

口については開放型と拘束型の2種類を準備した。2つの結果をまとめて図中に示す。さらに、透水試験中にX線CTによりベントナイトの内部観察を実施した。その例をFig. 17に示す。まずFig. 16の固有浸透率の評価結果から、開放型ベントナイトと拘束型ベントナイトいずれの場合もほぼ同じ傾向を示しており、拘束の有無にかかわらず固有浸透率は急激に減少し、3日目以降については固有浸透率は 10^{-19}m^2 (透水係数に換算して 10^{-12}m/sec)程度のオーダーの値になっていた。このように、本研究で用いたベントナイト試料の場合、十分に変位拘束ができない場合についても膨潤により十分な遮水性能が発揮されることが分かった。この点は十分な遮水性能を発揮させる意味において、施工時の自由度を高める点で有利な性質であると考えられる。開放型の試料の場合、 10^{-19}m^2 のオーダーながら値の変動が拘束型に比べてやや大きい。これは、Fig. 17 (a)でも見られるように、膨潤することによりベントナイトの粒子が移動し、ベントナイト試料内に隙間が出来たためと考えられる。このような隙間は先に示したメスシリンダーを用いた簡易試験においても観察された。また、Fig. 17 (b)に示す拘束型の場合、流入口付近では粒子の形状が確認できないほどベントナイトが均質化していることが確認できる。この部分により試料全体の低い固有浸透率が達成されたものと考えられる。

5. 結 言

本論文では、ベントナイトの浸漬による膨潤・均質化プロセス

を対象として、X線CT法により得られた画像をもとに解析を行い、画像間差分法により試料内部の密度の増分の抽出を行った。さらに、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を実施し、得られたデータとX線CT法によって得られたデータとの比較を行った。また、封圧型透水試験システムを適用し、ベントナイトの透水特性を評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) X線CT撮影による測定と実際の試料を用いた密度測定の結果から、X線CT法により、浸漬状態を維持したまま内部の湿潤密度変化を明らかにすることが可能であることが確認できた。
- (2) 本研究で使用した直径100mmの試料では、中心部まで湿潤するのに変位拘束した状態で約2週間程度の期間を要することがわかった。また、大気圧下と真空状態で浸漬を行った結果両者に違いは見られず、0.1MPa程度の差圧では湿潤プロセスに大きな影響を与えることができないことが確認できた。
- (3) 今回使用した粒状ベントナイトにおいては、変位拘束を行った状態では、粗粒、細粒ともに、内部まで湿潤してはいるものの、試料全体の密度変化には細粒部分のみが関与しており、粗粒部分の湿潤による密度変化はないことがわかった。
- (4) 変位拘束した状態と開放した状態では、湿潤速度の経時変化に大きな違いは見られなかったが、膨潤率は約2〜3倍程度の違いが確認された。
- (5) 開放型および拘束型2つのタイプについて透水試験を実施した結果、いずれの場合も固有浸透率は 10^{-19}m^2 のオーダーの値が得られ、拘束の有無に関係なく十分な遮水性能を発揮されることが確認された。

謝辞 粒状ベントナイト製造にご協力いただいた(株)神戸製鋼所竹内泰典氏、研究にご協力いただいた京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 西山哲准教授、矢野隆夫技術専門員に謝意を表します。

References

- 1) H. Sato: Journal of MMIJ, **125** (2009), 1-12.
- 2) JNC: JNC Technical Report, JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute) TN1410 2000-001 (2000).
- 3) H. Suzuki, M. Shibata, J. Yamagata, I. Hirose, K. Terakado: PNC Report, PNC TN8410 92-057 (1992).
- 4) H. Kikuchi, K. Tanai, K. Matsumoto, H. Sato, K. Ueno and T. Tetsu, JNC Tech. Rep, JNC TN8430 2003-002(2003).
- 5) A. Inoue, M. Kawano, Y. Kuwahara, T. Kozaki, H. Komine, T. Sato and K. Tsukimura: The Cray Science Society of Japan, **45** (2005), 31-61.
- 6) H. Komine and N. Ogata: Proceedings of JSCE, No.708/III-59 (2002), pp. 133-144.
- 7) RWMC: Demonstration test of underground cavern type disposal facilities report, RWMC (Radioactive waste management funding and research center)2005
- 8) T. Tanaka and M. Toida: Proceedings of JSCE C, **64** (2008), 101-110.
- 9) A. Naka, Z. Li, T. Inui, T. Katsumi and H. Mogami: Geosynthetics Engineering Journal, **25** (2010), 233-240.
- 10) H. Komine, Y. Naoi, K. Yasuhara, S. Murakami, K. Momose and T. Sakagami: Proceedings of JSCE, No.771/III-68 (2004), pp. 225-234.
- 11) A. Sato, D. Fukahori, A. Sawada and K. Sugawara: Journal of MMIJ, **120** (2004), 365-371.
- 12) A. Sato, T. Arimizu, K. Tanaka and T. Shiote: Journal of MMIJ, **125** (2009), 437-444.
- 13) A. Sato, K. Tanaka and T. Shiote: Journal of MMIJ, **126** (2010), 640-646.
- 14) M. Takahashi, M. Kato, Y. Urushimatsu and H. Park: J. Japan Society of Engineering Geology, **50** (2009), 280-288.
- 15) T. Yamamoto, T. Yada, T. Fujiwara, T. Nishimura, Y. Takeuchi: Japan Society of Civil Engineers 2010 Annual Meeting, CS5-036.