

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008 年～2009 年
 課題番号：20760312
 研究課題名（和文） マイクロ X 線 CT による不飽和ベントナイト膨潤過程の可視化と弾粘塑性モデル化
 研究課題名（英文） Visualization of swelling process of unsaturated bentonite by microfocus X-ray CT and elasto-viscoplastic modeling
 研究代表者
 肥後 陽介（HIGO YOSUKE）
 京都大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：10444449

研究成果の概要（和文）：

放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイト人工バリア設計のための基礎的研究として、ベントナイトの浸透・膨潤過程の可視化を通して、そのメカニズムを明らかにすると共に、メカニズムに立脚した不飽和ベントナイト弾粘塑性モデルの導出を行った。ミクロンレベルの分解能を持つマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ装置を用い、ベントナイトの膨潤過程を可視化した。さらに、膨潤メカニズムに基づき層間水の増加に起因した粘塑性膨潤ひずみを陽に記述し、ベントナイトの浸透・膨潤過程のシミュレーション法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

As a fundamental study for the design of bentonite barrier of radioactive waste disposal field, the mechanism of seepage-swelling behavior of bentonite has been studied through visualization by microfocus X-ray CT, and an elasto-viscoplastic model and a numerical simulation method for analyzing seepage-swelling behavior of bentonite has been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：マイクロ X 線 CT，ベントナイト，膨潤，浸透，可視化，弾粘塑性構成式，3 相連成解析

1. 研究開始当初の背景

ベントナイトは、放射性廃棄物の地層処分における人工バリアとして期待されている材料である。不飽和ベントナイトは浸透・膨

潤しその低透水性や自己シール性を発揮するが、浸透速度が非常に遅く、人工バリアの性能の実証には 100 年以上を要するため、設計は数値シミュレーションにより行うのが

現状である。したがって、ベントナイト人工バリアの設計には、不飽和ベントナイトの膨潤メカニズムに基づいた合理的な構成式と解析法が必要であるが、現在までの研究では、その構成特性が十分モデル化されるに至っていない。

2. 研究の目的

ベントナイト人工バリア設計のための基礎的研究として、ベントナイトの浸透・膨潤過程の可視化を通して、そのメカニズムを明らかにすると共に、メカニズムに立脚した不飽和ベントナイト弾粘塑性モデルの導出を目的とする。可視化には、供試体内部の密度分布をミクロンレベルの分解能で得る事ができるマイクロフォーカスX線CT装置（以下、「マイクロX線CT装置」）を用いる。モデル化では、膨潤メカニズムに基づき層間水の増加に起因した粘塑性膨潤ひずみを陽に記述する。さらに、構成式を用いた3相浸透-変形連成解析法により浸透・膨潤過程をシミュレーションする。

3. 研究の方法

可視化には、供試体内部の密度分布をミクロンレベルの分解能で得る事ができるマイクロフォーカスX線CT装置（以下、「マイクロX線CT装置」）を用いる。モデル化では、膨潤メカニズムに基づき層間水の増加に起因した粘塑性膨潤ひずみを陽に記述する。さらに、構成式を用いた3相浸透-変形連成解析法により浸透・膨潤過程をシミュレーションする。

本研究で用いるマイクロX線CT装置は、最高空間分解能 $5\mu\text{m}$ を有する第三世代X線CTで、地盤工学分野で主流であったミリフォーカスX線CT装置と比べて、高分解能での可視化が可能である。また、膨潤試験容器を装置に設置し、実験の応力状態のままスキニングできる事も特徴の1つである。ベントナイトに限らず、不飽和土の供試体内部における浸透過程の可視化は新しい試みである。これらの事から、不飽和ベントナイトの浸透・膨潤過程における微視的挙動について新たな知見が得られると考えられる。

本研究の独創的な点は、構成式で層間水の増加量を直接モデル化し粘塑性膨潤体積ひずみを陽に記述する点である。また、その構成式を適用した3相浸透-変形連成問題を解くため、浸透に伴う膨潤メカニズムに立脚した物理的に有意なモデル化を行っている点である。さらに、本研究ではベントナイトの初期サクシオンを、層間水と層間陽イオンの結合によるものと、土粒子構造と水とのメニスカスによるものに分けて考える。ベントナイトのサクシオンは数MPaとされているが、大気圧下で全てがマトリックサクシオンと

は考えにくい。マトリックサクシオンが占める量を評価すれば、サクシオンの土粒子骨格結合への寄与を記述する構成式のパラメータにフィードバックする事ができる。また、本解析法を境界値問題へ適用する事により、廃棄物処分場の人工バリアの設計に貢献できると考えられる。

4. 研究成果

(1) マイクロX線CT装置による膨潤実験中の浸透・膨潤過程の可視化

アクリル製マイクロX線CT装置用の膨潤実験容器を作成し、不飽和ベントナイトの膨潤圧実験を行った。材料には既往の実験データが多いクニゲルV1を用いた。実験中に容器をマイクロX線CT装置に設置し、断続的にCT画像を撮影する事により、膨潤過程のベントナイト供試体内部を3次的に可視化した。水、空気、乾燥したベントナイト粒子、湿潤したベントナイト粒子のそれぞれの単体のCT値をもとに、供試体中の浸透・膨潤した領域を特定し、浸透・膨潤過程を可視化する事に成功した。

図1はマイクロCT装置用膨潤試験装置である。セルを密度の小さいアクリルで作成する事によりX線の減衰を抑え、より精細なCT画像を得る事ができるようになっている。図2には膨潤量試験中のCT画像を示す。供試体上部から水を供給しており、供給開始後、1時間のCT画像である。水が浸透した箇所は急激に膨張しようとするため、浸透していない部分との間に変形のギャップが生じ、これに起因して供試体上部にクラックが発生している事がわかる。

ただし、締め固められたベントナイト浸透による密度変化は小さく、浸透領域と不飽和領域のCT値の差も小さいものとなるため、今後は水による減衰が土に比べて非常に大きいニュートロントモグラフィなどの手法による、さらに精細な可視化が望まれる。



図1 マイクロCTによるベントナイト膨潤試験の様子

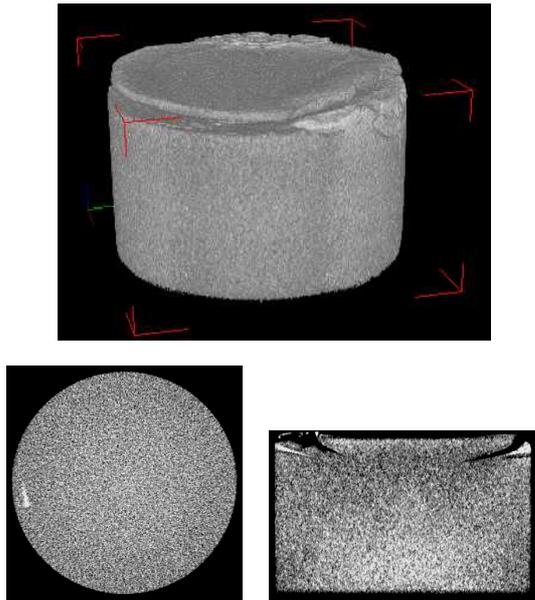


図2 膨潤変形試験時のベントナイトのCT画像（上：3次元CT画像，左下：供試体中央水平断面，右下：供試体中央鉛直断面）

(2) 不飽和ベントナイトの膨潤メカニズムを考慮した弾粘塑性構成式の導出

現在までに研究してきた不飽和土の弾粘塑性構成式は、時間依存性挙動、内部構造変化によるひずみ軟化、サクシオンによる強度増加を表現可能である。これを拡張し、不飽和ベントナイトの膨潤メカニズムに基づいた弾粘塑性構成式を導出した。具体的には、層間水の増加量を内部変数 H とし、 H に関する微分方程式を導出すると共に、 H の増加による膨潤塑性体積ひずみを定式化した。さらに、膨潤塑性体積ひずみの発生による硬化則を定義し、骨格構造の強度増加への影響を考慮した。

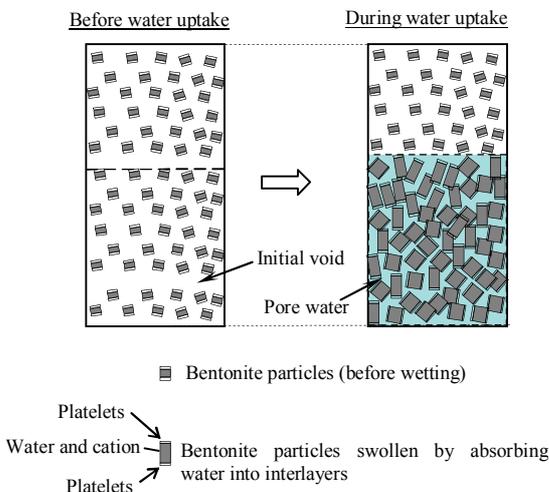


図3 ベントナイト膨潤メカニズム

(3) 3相浸透－変形連成解析法による膨潤実験のシミュレーション

導出した構成式を空気－水－土 3 相浸透－変形連成解析法に適用し、膨潤実験のシミュレーションを行った。透水係数、水分特性曲線のパラメータも既往のデータから決定し解析を行った結果、既往の実験結果を精度良く再現する事ができた。

解析法は、空気－水－土 3 相浸透－変形連成の有限要素法であり、変位には 8 節点アイソパラメトリック要素、間隙水圧と間隙空気圧にはそれぞれ 4 節点アイソパラメトリック要素を用いた。膨潤圧試験のシミュレーションとして行った解析の有限要素メッシュと境界条件を図 4 に示す。供試体下部の境界は 10kPa の水頭を持つ湿潤境界とし水の浸透を模擬した。その他の境界は非排気・非排水境界と仮定している。

本解析では、ベントナイトの初期サクシオンを 100kPa と仮定した。これは測定されているベントナイトのサクシオンよりも小さいものであるが、本研究では土粒子間のメニスカスのみによるマトリックスサクシオンと層間水として水を吸着するサクシオンを分けて考え、前者は土の場合 100kPa 程度であると考えている。

ベントナイトの膨潤挙動を調べるために様々な膨潤圧試験が行われている。小野ら(2006)は、実験にクニゲル GX というベントナイト試料を用い、乾燥密度と初期飽和度をパラメータとして膨潤圧試験を行った。その実験結果の一部と提案手法によるシミュレーション結果を図 5 に示す。

ケース SW2 は SW3 に比べて乾燥密度が小さいため発生する膨潤圧も小さい。また、いずれのケースも一度膨潤圧が上昇した後に減少し、十分時間がたった後に膨潤圧は安定している事がわかる。シミュレーション結果をみるとこれらの実験で見られた傾向が精度良く再現されている事がわかる。

表 1 実験条件

Case No.	Dry density	Water content	Degree of saturation
SW2	1.6	6.5	27%
SW3	1.8	6.5	39%

* Ono et al. (2006)

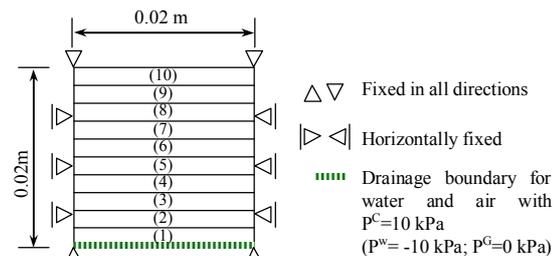
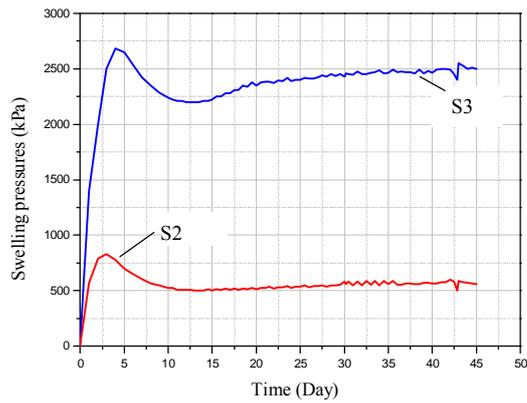
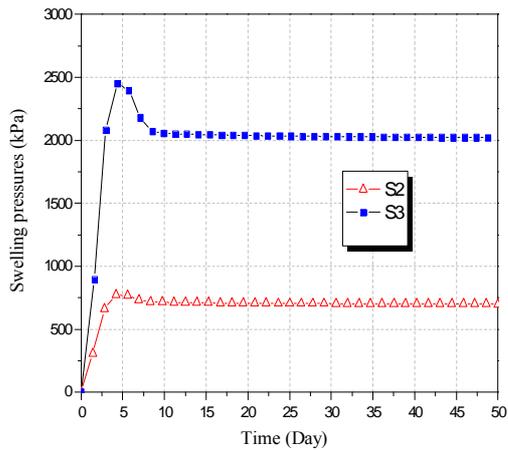


図4 解析条件（膨潤圧試験）



(a) experiment(Ono et al.2006)



(b) simulation

図5 膨潤圧試験のシミュレーション結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

F. Oka, H. Feng, S. Kimoto and Y. Higo,
An elasto-viscoplastic numerical
analysis of the swelling process of
unsaturated bentonite, Journal of
Applied Mechanics, JSCE, 査読有, Vol.
11, 2008, 369-376.

[学会発表](計1件)

F. Oka, S. Kimoto, Y. Higo and H. Feng,
Elasto-viscoplastic constitutive
modeling of the swelling process of
unsaturated clay, 4th Asia-Pacific
Conference on Unsaturated Soils,
November 23rd 2009, Newcastle,
Australia.

6. 研究組織

(1)研究代表者

肥後 陽介 (HIGO YOSUKE)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10444449