

膨潤圧試験中のベントナイトの膨潤圧変化に与える吸水圧縮挙動の影響

高山裕介*1 佐藤大介*2 菊池広人*2,3

放射性廃棄物の地層処分施設の緩衝材への利用が検討されているベントナイトの膨潤特性を把握するために実施される膨潤圧試験では、給水開始後の時間経過とともに膨潤圧が単調に増加する場合や、一度増加した後に低下する場合など様々な膨潤圧変化のパターンが報告されている。本研究では、複数の異なる初期含水比の供試体を用いて膨潤圧試験を実施し、試験中の X 線 CT 測定により、膨潤圧が単調に増加する場合および一時的に低下する場合における供試体内部の湿潤密度分布の時間変化のデータを得た。その結果、吸水圧縮挙動の発生の有無やその大小が膨潤圧の経時変化のパターンに影響を与えることを明らかにした。具体的には、膨潤圧試験において供試体内部での吸水圧縮による変形量が大きいほど試験途中における膨潤圧の一時的な低下量が大きく、吸水圧縮による変形が生じない場合は単調に増加するものと推測された。

Keywords: ベントナイト, X 線 CT 測定, 膨潤圧, 吸水圧縮挙動

Swelling pressure tests have been conducted to understand the swelling properties of bentonite which is planned to be used as a buffer material in repositories for the geological disposal of radioactive waste. It has been reported that the swelling pressure obtained by swelling pressure test increases monotonically or temporarily decreases after increasing with the passage of the time depending on the initial water content. In this study, swelling pressure tests were conducted under several different initial water content conditions, and the change in wet density distribution inside the specimen during the swelling pressure tests was observed by X-ray CT measurement. It was confirmed that the presence or absence of collapse behavior and its magnitude affect the shape of the change in swelling pressure. When the collapse deformation was large, the amount of temporary decrease in swelling pressure was large. On the other hand, swelling pressure increased monotonically when there was no deformation due to collapse.

Keywords: bentonite, X-ray CT, swelling pressure, collapse

1 はじめに

放射性廃棄物の地層処分施設の人工バリア構成材料の一つである緩衝材には、膨潤特性を有するベントナイトの利用が考えられている。これまで、ベントナイトの膨潤特性を把握するために数多くの膨潤圧試験が実施され（例えば [1]）、その評価式の提案がなされてきた（例えば [2]）。膨潤圧試験は、締め固めた不飽和状態のベントナイトに対して体積を拘束した状態で給水することにより発生する膨潤圧を計測する試験である。給水開始後に計測される膨潤圧は、時間経過とともに単調に増加する場合や、増加した後に一時的に低下する場合などがある。同一乾燥密度条件でも初期含水比の違いによって上記のような膨潤圧の経時変化のパターンの違いが生じることが示されている [1, 3, 4]。例えば、鈴木・高山 [4] は、初期飽和度を 80% とした高飽和度条件では乾燥密度に依らず膨潤圧が単調に増加するが、初期含水比が 7.2% の低飽和度条件では乾燥密度に依らず膨潤圧が一度増加したあとに減少し、再度増加する結果を報告している。この膨潤圧の一時的な低下現象は、不飽和土の吸水圧縮挙動として知られるコラプスが関係している可能性が指摘されてきた [5]。一般的に、コラプスは、不飽和状態において粒子接点に存在するメニスカスにより生じる粒子間力が浸水により消失することが原因であり、コラプスが生じる条件として、試料が緩い状態にあるほど、また載

荷応力が大きいほどコラプスが生じやすく、コラプス量が大きくなることが知られている [6]。高山・菊池 [7] は、膨潤圧試験中の膨潤圧の一時的な低下が生じる原因を明らかにするため、X 線 CT 測定により膨潤圧の経時変化と供試体の湿潤密度分布の時間変化の関係の把握を行っている。その結果、膨潤圧が一時的に低下する期間において、供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮挙動（コラプス）の発生が観測され、これにより膨潤圧が低下したものと推測している。しかしながら、高山・菊池 [7] は、膨潤圧が一時的に低下する条件についてのみ試験を実施しており、膨潤圧が単調に増加する条件での試験を実施していない。そのため、鈴木・高山 [4] で報告されているような初期含水比に依存した膨潤圧の経時変化のパターンの違いが、不飽和領域での吸水圧縮挙動の発生の有無によって生じているのかどうかを確認するには至っていない。また、飽和時の供試体内部の乾燥密度分布は、飽和に至るまでの供試体内部での変形挙動の結果として形成される [7]。すなわち、飽和時の緩衝材の力学的な状態をより適切に評価するためには、飽和に至る過程で生じる供試体内部での膨潤や圧縮挙動を再現可能な解析手法が必要となる。

これまで、不飽和から飽和に至るまでの膨潤圧の発生等の緩衝材の力学挙動を評価するために必要となる水理と力学の連成解析手法の開発が進められてきた（例えば [8-10]）。初期含水比に依存した膨潤圧の経時変化のパターンの違いを解析により表現した研究も報告されてきている [11, 12]。しかしながら、膨潤圧試験中に試験セル内に設置された供試体内部の飽和度や密度分布などの水理や力学に関する状態の変化を把握することが困難であるため、膨潤圧の経時変化と供試体内部の状態変化の両方の再現性を検証した事例は見当たらなかった。連成解析手法の妥当性の検証や更なる高度化には、まずは、膨潤圧が単調に増加する場合や一時的に低下する場合等の条件に対して、膨潤圧の経時変化と供試体内部の状態変化の関係を実験的に把握する必要がある。

Effect of collapse behavior on changes in swelling pressure of bentonite during swelling pressure test by Yusuke TAKAYAMA (takayama.yusuke@jaea.go.jp), Daisuke SATO and Hirohito KIKUCHI

*1 日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*2 検査開発

Inspection Development Company

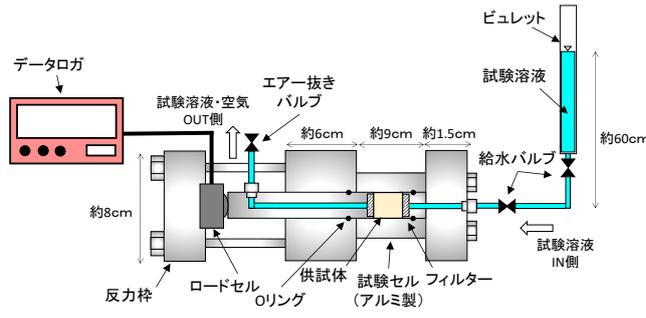
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松平原 3129-37

*3 現所属：原子力環境整備促進・資金管理センター

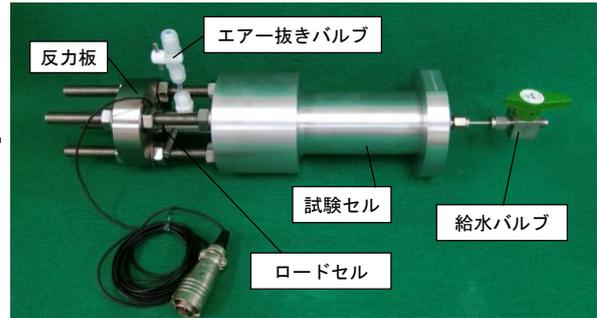
Radioactive Waste Management Funding and Research Center

〒104-0044 東京都中央区明石町 6 番 4 号 ニチレイ明石町ビル 12 階

(Received 23 April 2022; accepted 13 September 2022)



(a) Schematics of swelling pressure test apparatus



(b) Photo of swelling pressure test apparatus

Fig.1 Swelling pressure test apparatus

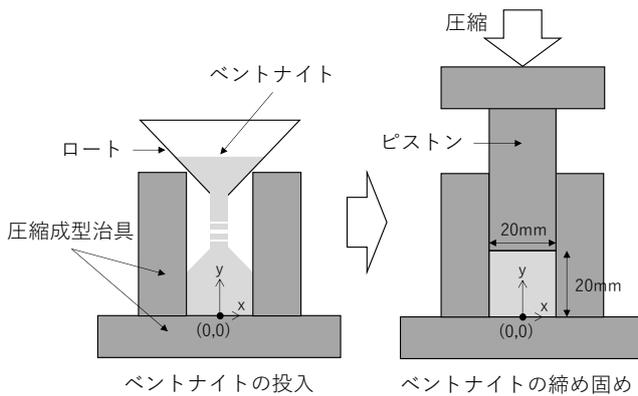


Fig.2 Schematics of compaction of bentonite

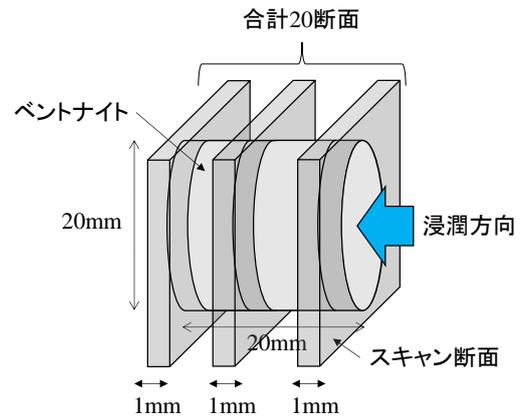


Fig.3 Conceptual diagram of X-ray CT measurement

このような背景から、本研究では、複数の異なる初期含水比の供試体を用いて膨潤圧試験を実施し、試験中の X 線 CT 測定により、膨潤圧が単調に増加する場合や一時的に低下する場合における供試体の湿潤密度分布の時間変化のデータを得た。それらを比較することにより、供試体内部の不飽和領域における吸水圧縮挙動が試験中の膨潤圧の経時変化に与える影響を明らかにした。

2 膨潤圧試験の概要

2.1 試料および試験装置

膨潤圧試験に用いるベントナイトはクニゲル®V1、供試体の乾燥密度は 1.36 Mg/m³、試験溶液は蒸留水、供試体寸法は高さ 20 mm、直径 20 mm とした。高山・菊池[7]は、初期含水比が約 8 % に対して試験を実施しており、本試験ではそれよりも初期含水比が大きい約 17 % と約 25 % の条件で、それぞれ 2 回実施した。なお、本研究で用いた乾燥密度 1.36 Mg/m³ は、緩衝材仕様として考えられているベントナイト (クニゲル®V1 とケイ砂を乾燥重量比 7:3 で混合した材料で、乾燥密度は 1.6 Mg/m³) と有効粘土密度が同等となるように設定したものである。

本研究では、高山・菊池[7]が実施した初期含水比が約 8 % に対する試験データとの比較を行うため、試験で使用する膨潤圧試験装置および X 線 CT スキャナは高山・菊池[7]と同じ装置を用い、試験温度は 22℃ とした。装置の概要を

Fig.1 に示す。試験中に X 線 CT 測定を行うため、試験容器の材質はアルミニウム、フィルターの材質はポリプロピレンとし、孔径は 70 μm のものを使用した。X 線 CT 測定には医療用 X 線 CT スキャナであるキャノンメディカルシステムズ株式会社製 Alexion Access を用いた。Alexion Access の空間分解能は 18 LP/cm である。

2.2 試験方法

膨潤圧試験で用いる供試体は、Fig.2 に示すように粉末状のベントナイトを直径 20 mm、高さ 20 mm に締め固めた時に目標の乾燥密度となるように所定の量を圧縮成型治具内に投入し、締め固めて作製した。

膨潤圧試験では、圧縮成型治具から取り出した供試体を Fig.1 に示した膨潤圧試験装置に入れ、その後浸潤を開始し、Fig.1 に示すロードセルで発生する膨潤圧を測定しながら適宜 X 線 CT 測定を行った。なお、本研究では、供試体内の高さ方向 (y 方向) に対する応力は、力の釣り合いにより、常に膨潤圧と同一となっていると仮定している。X 線 CT 測定は、Fig.3 に示すように、浸潤方向に直交する方向に 1 mm 幅ごとに 20 断面に対して行った。測定条件は、管電圧は 135 kV、管電流は 100 mA、スキャン速度は 1.0 s とした。給水は、Fig.1 に示すようにビュレットを用いて、供試体から約 60 cm の位置に初期水位を設定して行った。また、Fig.1 に示すエア抜きバルブは開放状態とし、給水面の反対側は排気境界とした。試験期間は、1,000 時間程度と

Table 1 Test cases

試験ケース	給水面 (mm)	初期含水 比(%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	初期飽和 度(%)
CASE 1-1[7]	y=20	8.5	1.36	23.3
CASE 1-2[7]	y=20	8.3	1.36	22.7
CASE 2-1[7]	y=0	8.3	1.36	22.7
CASE 2-2[7]	y=0	8.1	1.36	22.2
CASE 3-1	y=0	16.8	1.36	46.0
CASE 3-2	y=0	16.5	1.35	44.6
CASE 4-1	y=0	25.7	1.33	67.4
CASE 4-2	y=0	25.0	1.35	67.5

した。Table 1 に試験ケースを示す。Table 1 に示した試験ケースのうち、CASE1-1, CASE1-2, CASE2-1, CASE2-2 は高山・菊池[7]によって実施されたものである。CASE3 および CASE4 では、Fig.2 に示す供試体作製時にピストンと接していた圧縮面 (y=20 mm) の逆側の面 (y=0 mm) から給水を行った。なお、Table 1 の初期含水比、乾燥密度は、試験後に試料の炉乾燥により試料全体の乾燥重量を求め、それと初期に秤量した試料全体の重量や供試体体積を用いて求めた値である。

2.3 CT 値と湿潤密度の関係

X 線 CT 測定により得られる CT 値は、物体の X 線吸収の程度を示す数値であり、ベントナイトの湿潤密度と相関関係があることが報告されている[11]。本研究で用いる試料および試験装置でも同様の関係があることが確認されており、測定条件として、管電圧を 135 kV、管電流を 100 mA、スキャン速度を 1.0 s とした時に、乾燥密度や含水比の異なる複数の供試体に対する X 線 CT 測定によって CT 値と湿潤密度の関係は以下のように得られている[7]。

$$CT \text{ 値} = 808\rho_t - 388 \quad (1)$$

ρ_t : 湿潤密度[Mg/m³]

式(1)を用いることにより、X 線 CT 測定により得られる CT 値から供試体内部の湿潤密度分布が取得される。ここで、湿潤密度は、土粒子と水の重さを全体の体積で除したものであり、飽和度と乾燥密度を用いた場合には以下の式で表されるように、体積変化と水分量の変化によって変化するものである。

$$\rho_t = \frac{M_s + M_w}{V} = \rho_d + S_r \rho_w - \frac{S_r \rho_d}{G_s} \quad (2)$$

M_s : 土粒子の質量[Mg]

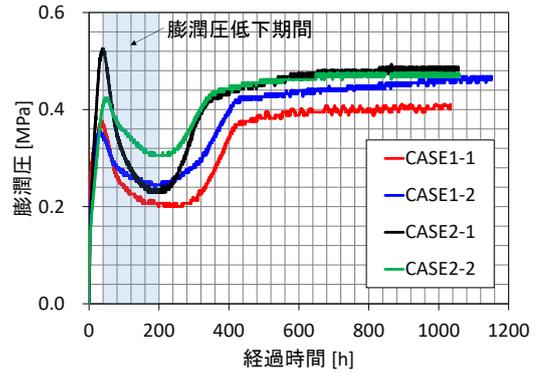
M_w : 水の質量[Mg]

V : 体積[m³]

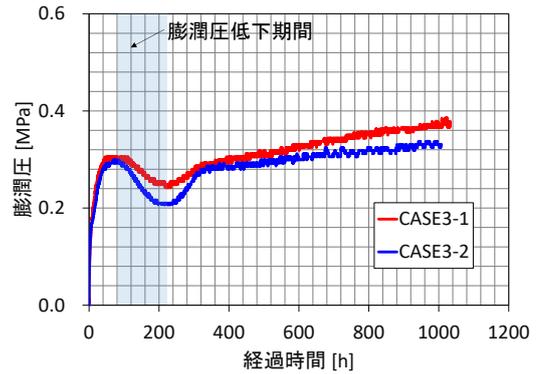
ρ_d : 乾燥密度[Mg/m³]

S_r : 飽和度[-]

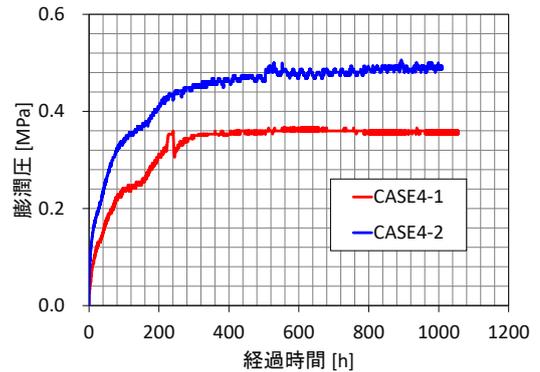
ρ_w : 水の密度[Mg/m³]



(a) CASE1, CASE2



(b) CASE3



(c) CASE4

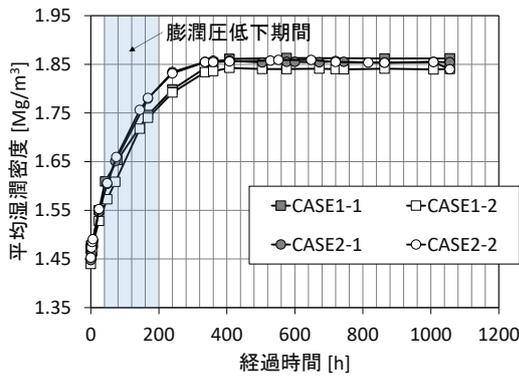
Fig.4 Changes in swelling pressure

G_s : 土粒子比重[-]

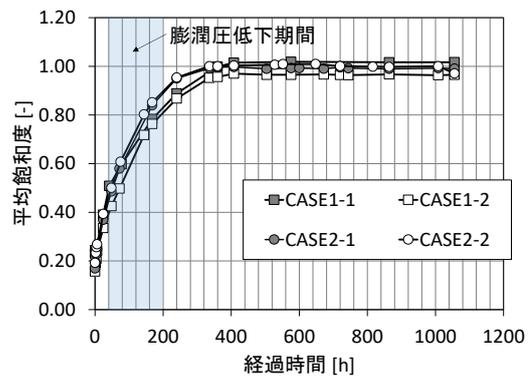
3 膨潤圧試験の結果

3.1 膨潤圧・平均湿潤密度・平均飽和度の経時変化

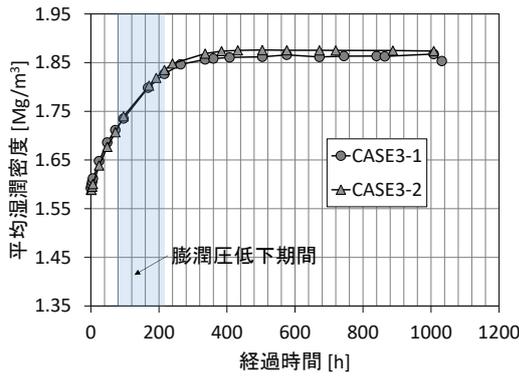
膨潤圧試験により得られた膨潤圧の経時変化を Fig.4 に示す。CASE1, CASE2 および CASE3 では、比較的初期に膨潤圧が増加した後、一時的に膨潤圧が低下し、再度膨潤圧が増加している。この膨潤圧の低下が見られた期間を図中では青く示している。また、CASE3 は、CASE1 や CASE2 と比較すると、膨潤圧の低下が生じ始める時の膨潤圧の値や、膨潤圧の一時的な低下量はやや小さい。一方、初期含水比が約 25 % の CASE4 では、概ね単調に膨潤圧が増加しており、初期含水比の違いによって膨潤圧の経時変化のパターンが異なることがわかる。このような初期含水比が高



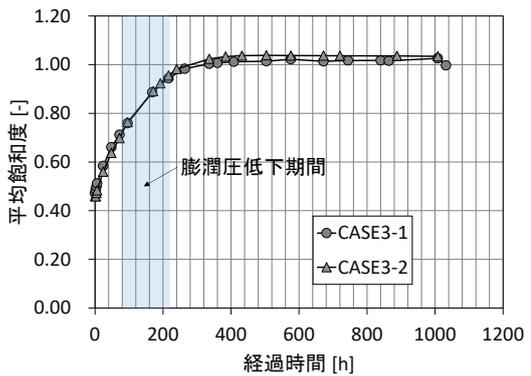
(a) CASE1, CASE 2



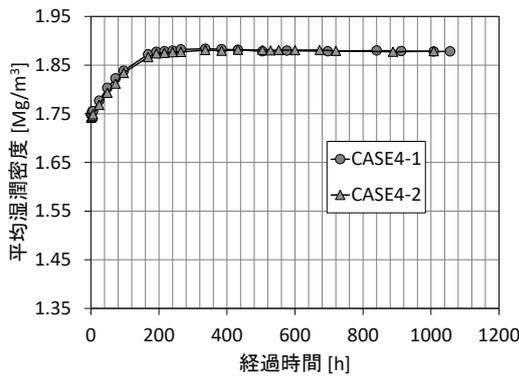
(a) CASE1, CASE2



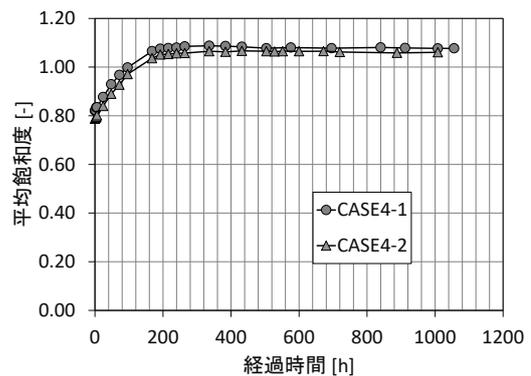
(b) CASE3



(b) CASE3



(c) CASE4



(c) CASE4

Fig.5 Changes in average wet density

Fig.6 Changes in average degree of saturation

い条件では膨潤圧が単調に増加する傾向は、鈴木・高山[4]と整合的である。最終的な膨潤圧は約 0.3 から 0.5 MPa 程度であった。棚井ら[13]は、飽和時の膨潤圧に対する初期含水比の影響を調べた結果、本研究のような有効粘土密度が低い条件では初期含水比の影響は小さいことを報告している。CASE1 および CASE2 と比較すると CASE3-2 などでは最終的な膨潤圧はやや小さいが、本研究でも最終的な膨潤圧に明確な初期含水比依存性は見られなかった。

全断面での湿潤密度の平均値と飽和度の平均値の経時変化を Fig.5 および Fig.6 に示す。湿潤密度の平均値は、各測定断面での CT 値の平均値から式(1)により各断面での湿潤密度を求め、それらの平均値とした。ここで、試験セルやフィルターと供試体が接している供試体外側や両端部では、測定領域に異種材料が混在することにより、得られる CT 値が変化することが懸念される。そのため、各測定断面に

おける CT 値の平均値を求める際、Fig.7 に示すように供試体の少し内側の直径 15 mm 程度の領域の平均値とした。なお、Fig.7 に示した X 線 CT 画像および CT 値分布は、CASE2-2 での供試体が飽和した状態での測定例[7]を示している。また、供試体の両端面での CT 値は、他の断面と比べて CT 値が極端に小さくなったため、平均値の算出の際に両端面での測定値は除いた。一方、飽和度の平均値は、湿潤密度の平均値と Table 1 に示した供試体全体の平均的な乾燥密度を用いて算出した。

いずれのケースでも、時間の経過とともに湿潤密度と飽和度は単調に増加していることから、供試体への水の浸潤が継続的に生じていることが確認できる。CASE1 および CASE2 では、供試体全体での飽和度が 40~50 %程度から 80~90 %程度に増加する期間において膨潤圧の低下が生じ、350~400 時間程度で供試体が飽和に至っている。

CASE3 では、供試体全体での飽和度が 70 %程度から 90 %程度に増加する期間において膨潤圧の低下が生じ、400 時間程度で供試体が飽和に至っている。CASE4 では、300 時間程度で飽和に至っており、他のケースと比較すると飽和までに要する時間は短かった。また、Fig.4 および Fig.6 より、各ケースの供試体が飽和に至った時期と膨潤圧の変化がほとんどなくなる時期はほぼ一致している。一方、供試体が飽和に達したと考えられる時間以降も、ほとんどのケースにおいて膨潤圧はなだらかに上昇している (Fig.4)。本測定では正確に把握できなかった供試体の端面付近で不飽和領域が残存していた可能性や、飽和後の粘性的な力学挙動が生じている可能性が考えられる。例えば、圧密試験では、荷重時には沈下量が収束せずに増加する二次圧密が生じ、除荷時には、膨潤量が収束せずに増加する[14]等、飽和したペントナイトは粘性的な力学挙動が生じる材料であることが知られている。

3.2 供試体内部の湿潤密度変化

各測定断面での CT 値の平均値から式(1)により変換して得られた供試体高さごとの湿潤密度の分布の時間変化を Fig.8 に示す。ここで、供試体の両端面での CT 値は、他の断面と比べて CT 値が極端に小さくなったため図には示していない。また、Fig.8 に示す供試体高さ y は、Fig.2 に示したように、供試体作製時の供試体下端を $y=0$ mm、ピストンと接していた供試体上端を $y=20$ mm としている。

給水開始時の初期状態では、いずれのケースでも、締め固め時にピストンと接していた圧縮面 ($y=20$ mm) の近くの湿潤密度が高く、より締め固められた状態であった。

時間の経過に伴い給水面から徐々に湿潤密度が増加し、水が浸潤している様子がわかる。また、CASE1 では約 400 時間、CASE2 では約 360 時間、CASE3 では約 400 時間、CASE4 では約 260 時間以降、湿潤密度の変化はほとんど生じていない。これらの時間は、Fig.6 に示した供試体が飽和状態に達した時間とほぼ一致している。

供試体の高さごとの湿潤密度の時間変化を Fig.9 に示す。膨潤圧の一時的な低下が生じた CASE1~CASE3 における給水面に近い断面 (CASE1 では $y=18.5$ mm、CASE2 および CASE3 では $y=1.5$ mm) での湿潤密度の時間変化を見ると、試験開始後に湿潤密度が増加した後、一時的に低下し、その後湿潤密度が再度増加している。この給水面付近での湿潤密度の一時的な低下が見られた期間と膨潤圧の低下期間はほぼ一致している。

初期含水比が約 25 %の CASE4 での給水面付近 ($y=1.5$ mm) では、比較的初期に大きく増加した後、供試体全体が飽和するまでなだらかに増加しており、他のケースで見られたような低下傾向は見られない。

3.3 膨潤圧の経時変化と供試体内部の不飽和領域における吸水圧縮挙動の関係

Fig.9 で示した CASE1~CASE3 での給水面に近い断面での最初の湿潤密度の増加は水の浸潤に伴う飽和度の増加が支配的と考えられ、比較的初期に飽和に達したと推測される。なお、この比較的初期の給水面付近では、飽和度の増

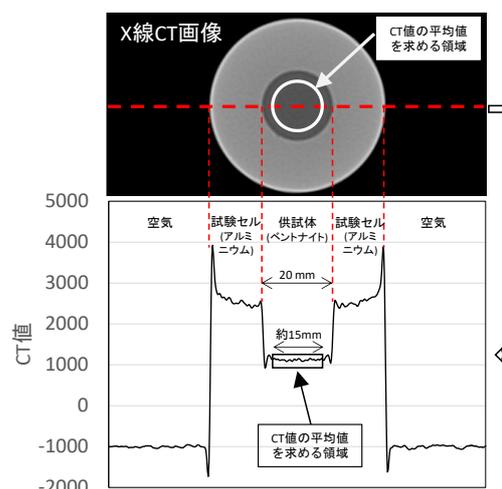
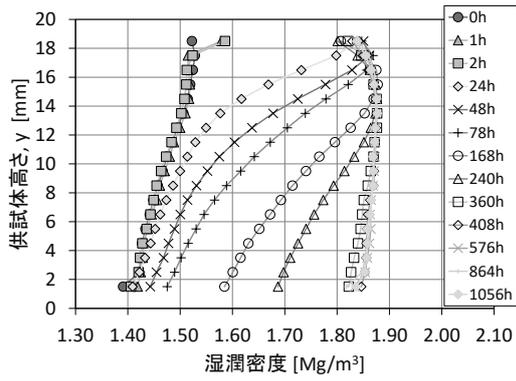


Fig.7 Area for calculating the average CT value

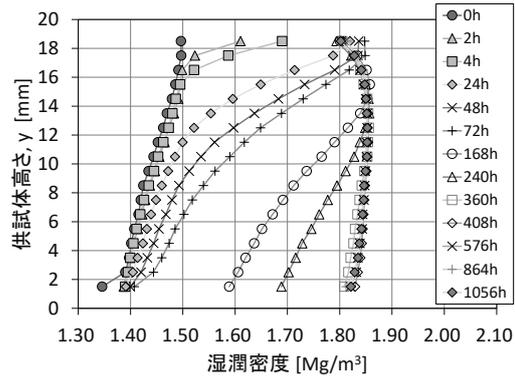
加に伴う膨潤挙動 (乾燥密度の低下) も同時に生じていると推測され、それにより膨潤圧の増加が生じたと考えられる。その後の給水面付近の湿潤密度の一時的な低下については、式(2)で示したように飽和度や乾燥密度に依存して低下していることとなる。Fig.6 で示したように、供試体への水の浸潤が継続して生じている状況であることや、50 時間程度かけて湿潤密度が増加して飽和状態と推測される状態となった後に生じていることから、飽和度が低下することは考えにくい。湿潤密度の一時的な低下は乾燥密度の低下によって生じていると推測される。ここで、乾燥密度の低下は体積膨張を意味する。また、その後の湿潤密度の再増加については、十分に時間が経過した段階で生じていることから、飽和度の増加によるものではなく乾燥密度の増加によるものと推測される。

膨潤圧試験では、試験期間を通じて供試体全体の体積は一定に保たれる。そのため、給水面に近い領域以外では上記と逆の変形が生じていることとなる。つまり、給水面に近い領域が飽和して膨潤圧が高くなった状態で、給水面から離れた不飽和領域までさらに水の浸潤が進むと、給水面から離れた不飽和領域では体積圧縮、すなわち吸水圧縮が生じていることになる。それにより給水面に近い領域の乾燥密度および湿潤密度が低下し、膨潤圧も低下していく。膨潤圧が低下した状態でさらに浸潤が進むと給水面に近い領域以外では膨潤が生じ、それにより給水面付近の乾燥密度および湿潤密度が再度増加し、膨潤圧も再度増加したことになる。

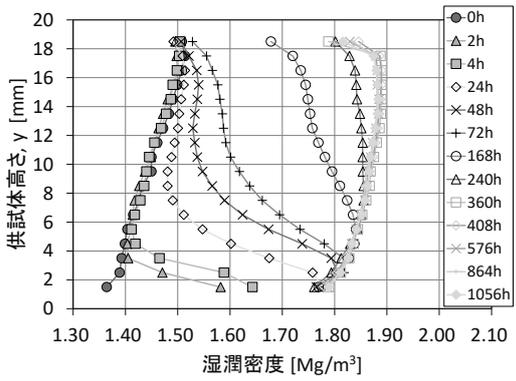
上記の挙動は、高山・菊池[7]によって説明されたものである。本研究ではさらに、給水面付近における湿潤密度の低下量と膨潤圧の低下量との関係を明らかにした。CASE3 での給水面付近における湿潤密度の一時的な低下量は、CASE1 や CASE2 と比較すると小さい傾向がある。つまり、CASE1 や CASE2 と比較すると、CASE3 は供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮による変形量は小さい可能性が示唆され、それにより、Fig.4 に示したように CASE3 の膨潤圧の一時的な低下量は CASE1, CASE2 と比較すると小さくなったと考えられる。



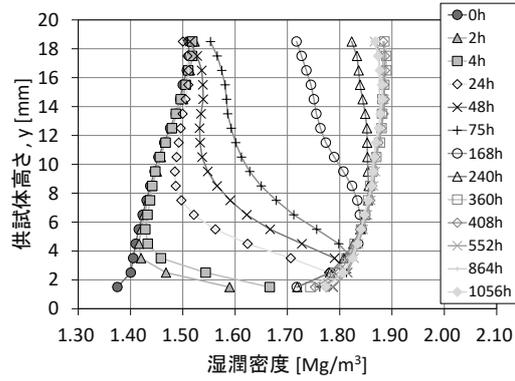
(a) CASE1-1



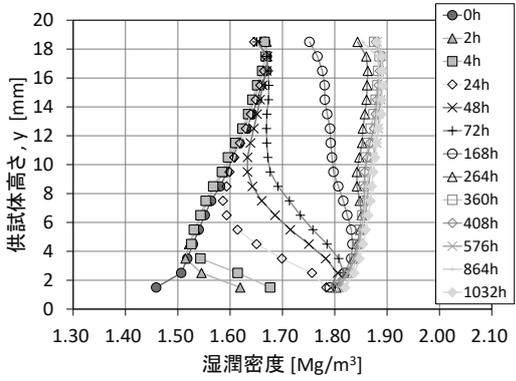
(b) CASE1-2



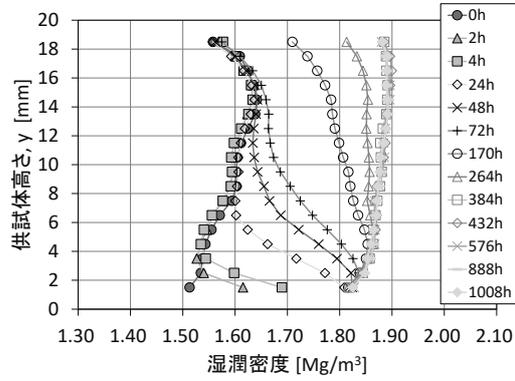
(c) CASE2-1



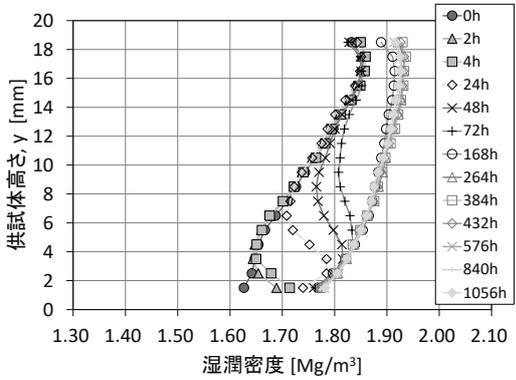
(d) CASE2-2



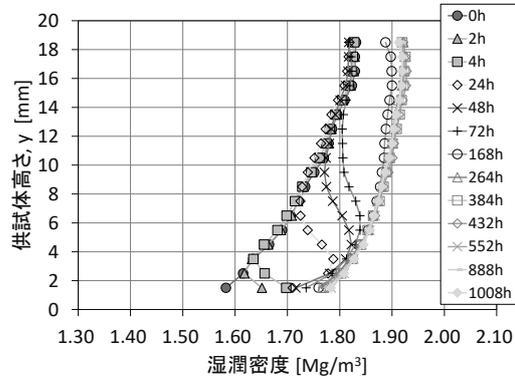
(e) CASE3-1



(f) CASE3-2

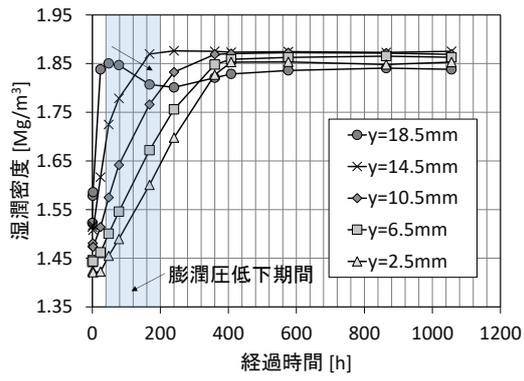


(g) CASE4-1

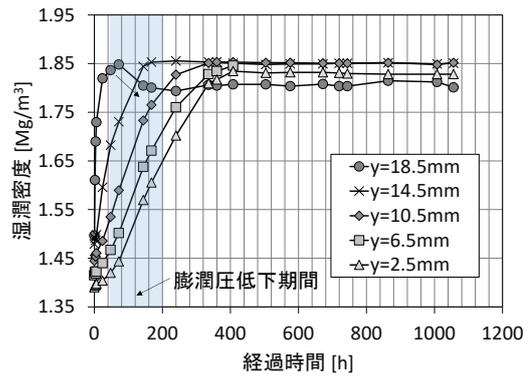


(h) CASE4-2

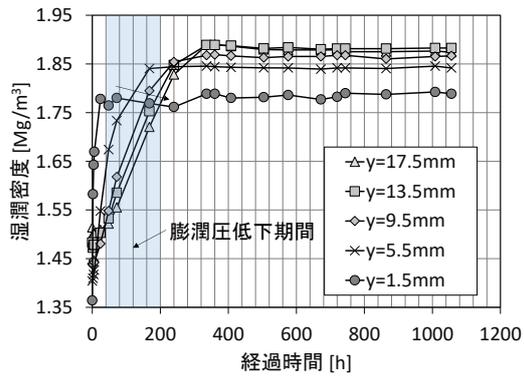
Fig.8 Changes in wet density distribution



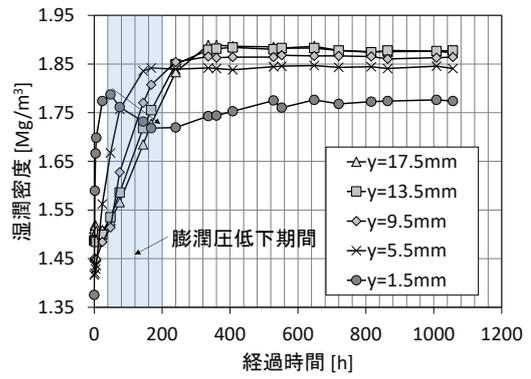
(a) CASE1-1



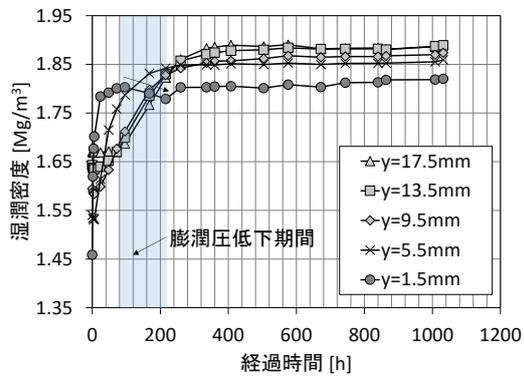
(b) CASE1-2



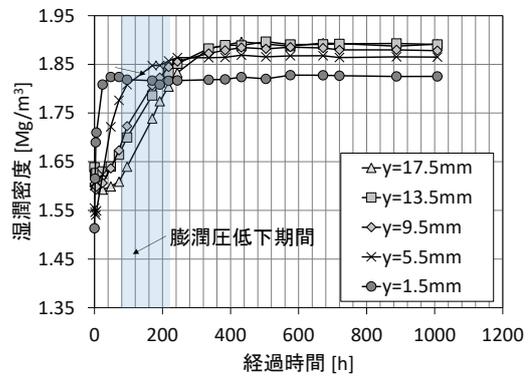
(c) CASE2-1



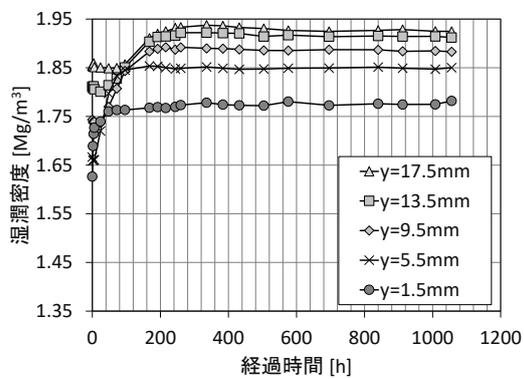
(d) CASE2-2



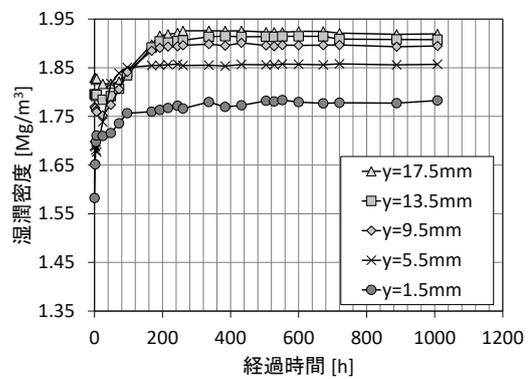
(e) CASE3-1



(f) CASE3-2



(g) CASE4-1

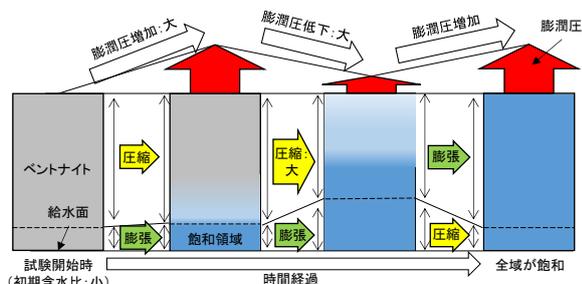


(h) CASE4-2

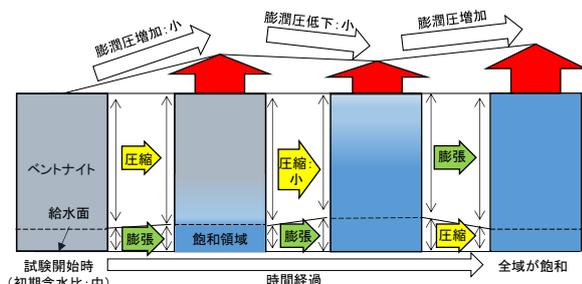
Fig.9 Wet density change for each height of specimen

Table 2 Relationship between initial water content, temporary decrease in swelling pressure and collapse

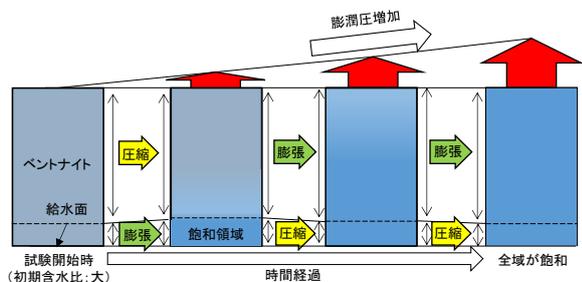
初期含水比	膨潤圧の一時的な低下量	供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮による変形量
小	大	大
中	小	小
大	無	無



(a) Initial water content: small



(b) Initial water content: middle



(c) Initial water content: large

Fig.10 Conceptual diagram of state transition of specimen during swelling pressure test for each initial water content

初期含水比が約 25 % の CASE4 での給水面付近では、比較的初期に湿潤密度が大きく増加した後、供試体全域が飽和するまでなだらかに増加を続けており、CASE1～CASE3 で見られたような給水面付近での湿潤密度の一時的な低下は確認できなかった。CASE1～CASE3 と同様、比較的初期の給水面付近の湿潤密度の大きな増加は、水の浸潤による飽和度の増加が支配的と考えられる。なお、この比較的初期の給水面付近では、CASE1～CASE3 と同様、飽和度の増加に伴う膨潤挙動（乾燥密度の低下）も同時に生じていると推測され、それにより膨潤圧の上昇が生じていると考え

られる。CASE1～CASE3 ではその後、給水面付近では乾燥密度の低下によるものと考えられる湿潤密度の一時的な低下が生じたが、CASE4 では湿潤密度がなだらかに増加している。つまり、CASE4 の供試体内部の給水面付近以外の不飽和領域においては、試験期間を通じて CASE1～CASE3 のような吸水圧縮挙動が生じておらず、吸水膨潤挙動のみが生じ、それにより給水面付近が圧縮されることにより湿潤密度がなだらかに増加したと推測される。そのため、膨潤圧の一時的な低下も生じなかったと考えられる。

これらのことから、不飽和領域での吸水圧縮挙動の発生の有無やその大小が膨潤圧の経時変化のパターンに影響を与えることが示唆された。本研究によって得られたこれらの関係をまとめたものを **Table 2** に、初期含水比ごとの膨潤圧試験中の供試体の状態変化の概念図を **Fig.10** にまとめる。膨潤圧試験において供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮による変形量が大きいほど膨潤圧の一時的な低下量は小さくなる。一方、不飽和領域での吸水圧縮による変形が生じないような場合には膨潤圧が単調に増加する。さらに、同一の乾燥密度条件では、初期含水比が低いほど膨潤圧試験中の供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮による変形量は大きく、それにより、膨潤圧の一時的な低下量は大きくなる。

3.4 初期の乾燥密度分布と飽和時の乾燥密度分布の比較

Fig.11 に、初期と試験終了時の乾燥密度分布をケースごとに比較した結果を示す。ここで、初期の乾燥密度分布は、**Fig.8** に示した初期の湿潤密度分布から初期の含水比分布が均一と仮定することで求め、試験終了後の乾燥密度分布は、**Fig.8** に示した試験終了時の湿潤密度分布から飽和度を 100 % と仮定し、水の密度を 1.0 Mg/m³、土粒子比重を 2.7 として計算している。なお、試験終了時の状態は **Table 3** に示すように、いずれのケースでも飽和状態であったことを確認している。ここで、**Table 3** に示した飽和度が 100 % よりもやや大きな値となった原因として、供試体周辺に付着した水分を含水比測定の際に加算していることによる影響や、モンモリロナイト周辺の水分子の密度の増加に起因している可能性[15]などが考えられる。なお、モンモリロナイト周辺の水分子の密度が増加している場合、水の密度は 1.0 Mg/m³ 以上を用いる必要があるが、後述の CT 値から求めた平均乾燥密度と実測値により求めた平均乾燥密度は概ね同等の値が得られたため、本研究では水の密度は 1.0 Mg/m³ としている。

初期の乾燥密度分布は、いずれのケースでも締め固め時にピストンと接していた圧縮面 (y=20 mm) の近くほど乾燥密度が高くなっている。CASE1 や CASE2 では、初期と試験終了時の分布形状は異なっており、飽和に至る過程において供試体内部で変形挙動が生じていたことが確認できる。CASE3 でも初期と試験終了時の分布形状は異なっているものの、CASE1 や CASE2 と比較するとその差異はやや小さい。CASE4 では、初期と試験終了時の分布形状にほとんど差異は見られず、飽和に至る過程での供試体内部での変形量は小さかった可能性が示唆される。

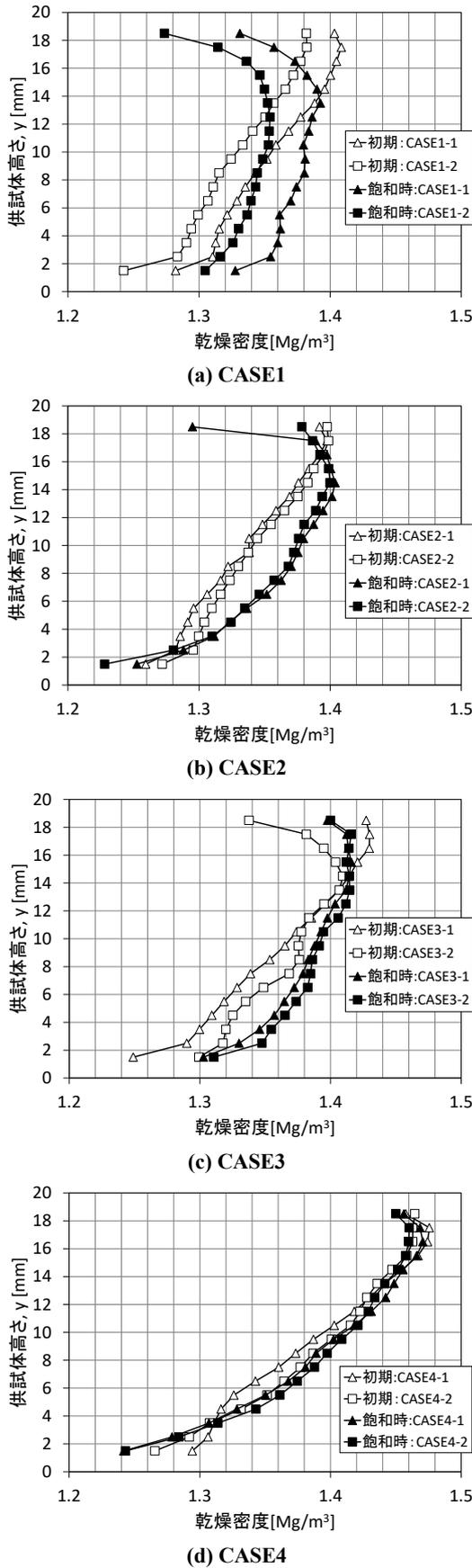


Fig.11 Comparison of dry density distribution between initial state and end of test at each case

Table 3 Degree of saturation at the end of test

試験ケース	飽和度(%)
CASE1-1	116.4
CASE 1-2	100.9
CASE 2-1	106.1
CASE 2-2	108.6
CASE3-1	102.2
CASE 3-2	106.9
CASE 4-1	102.6
CASE 4-2	106.2

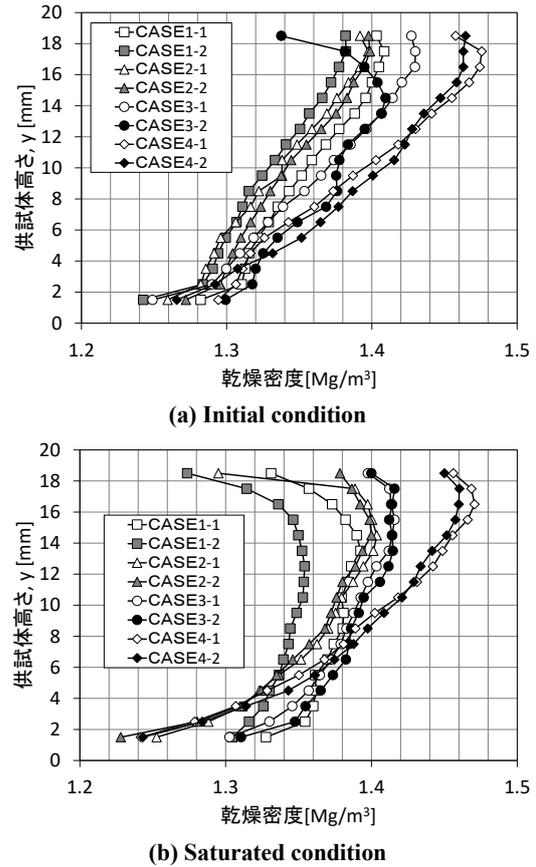


Fig.12 Comparison of dry density distribution of each case at initial and saturated condition

Fig.12 に各ケースの乾燥密度分布を初期および試験終了時ごとに比較した結果を示す。初期状態では、締め固め時にピストンと接していた圧縮面 ($y=20$ mm) の近くほど乾燥密度が高くなっているものの、初期含水比の違いによってやや形状が異なる。これまでも不均一な初期乾燥密度分布を有する供試体への浸潤試験が実施され、飽和時には不均一な乾燥密度分布が残存することが報告されており(例えば, [16]), 本試験でも同様に、試験終了時の乾燥密度分布はいずれのケースでも不均一な乾燥密度分布が形成されている。

また, Fig.12 に示すように、各ケースの飽和時の乾燥密度分布を比較した際、CASE1 と CASE2 で乾燥密度分布の形状が異なることや、CASE4 では供試体内部での乾燥密度の差が大きい等、飽和時の乾燥密度分布は初期状態や給水の

Table 4 Dry density calculated from CT value

試験ケース	実測による平均乾燥密度(Mg/m ³)	初期 CT 値から求めた平均乾燥密度(Mg/m ³)	飽和時 CT 値から求めた平均乾燥密度(Mg/m ³)
CASE 1-1	1.36	1.36	1.37
CASE 1-2	1.36	1.33	1.33
CASE 2-1	1.36	1.34	1.36
CASE 2-2	1.36	1.34	1.36
CASE 3-1	1.36	1.36	1.38
CASE 3-2	1.35	1.36	1.39
CASE 4-1	1.33	1.39	1.39
CASE 4-2	1.35	1.39	1.40

方向といった境界条件に依存して異なっていることがわかる。そのため、解析により飽和時の緩衝材の力学的な状態をより適切に評価するためには、吸水による膨潤や圧縮挙動を評価できる水理と力学の連成解析技術を用いる必要がある。その際には、現実の条件に即した初期条件や境界条件の設定が必要となる。従って、締固め時や施工時に生じる乾燥密度や飽和度の不均一性を把握することは、飽和時の緩衝材の力学的な状態を適切に評価するために重要となる可能性が示唆される。また、初期条件や境界条件に依存して、飽和時には Fig.12 に示したような不均一な乾燥密度分布が形成されるメカニズムについては、更なる実験的、解析的検討による解明が必要と考える。

Table 4 に、各ケースの初期および飽和時の CT 値から求めた平均乾燥密度と実測値との比較を示す。CT 値から求めた平均乾燥密度は実測値と比較すると、やや大きな値を示すケースも存在するが、概ね同程度の値となっている。

Fig.11 や Fig.12 に示したように、乾燥密度の分布形状は、ほとんどのケースにおいて供試体の両端面近くでは乾燥密度が小さくなる形状となっている。CT 値から求めた平均乾燥密度は、供試体端面での計測値を除いた平均値となっている。端面付近での乾燥密度は小さくなっている可能性が想定されることから、それにより、CT 値から求めた平均乾燥密度は実測値と比較すると、やや大きな値を示した可能性が考えられる。

4 結論

これまで、ベントナイトの膨潤特性を把握するために数多くの膨潤圧試験が実施されてきた。給水開始後に計測される膨潤圧は、時間経過とともに単調に増加する場合や、増加した後で一時的に低下する場合などがあり、膨潤圧の一時的な低下が生じる原因は、供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮挙動の発生によるものであることがこれまでに明らかにされている[7]。本研究ではさらに、複数の異なる初期含水比の供試体を用いて膨潤圧試験を実施し、試験中の X 線 CT 測定により、膨潤圧が単調に増加する場合に対しても供試体の湿潤密度分布の時間変化のデータを取得した。既往の試験データ[7]も活用して、それらを比較するこ

とにより、膨潤圧試験中の供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮挙動の発生の有無やその大小が膨潤圧の経時変化に与える影響を明らかにした。

以下に結論を列挙する。

- 1) 初期含水比が約 8% の CASE1, CASE2 および約 17% の CASE3 では膨潤圧の一時的な低下が見られ、初期含水比が約 25% の CASE4 では膨潤圧が単調に増加した。また、CASE3 は CASE1 や CASE2 と比較すると膨潤圧の一時的な低下量はやや小さく、初期含水比の違いによって膨潤圧の経時変化の形状が異なることがわかった。また、最終的な膨潤圧には顕著な初期含水比依存性は見られなかった。
- 2) 膨潤圧が単調に増加した CASE4 では、給水面付近の湿潤密度は時間経過に伴い概ね単調に増加したのに対し、膨潤圧の一時的な低下が見られた CASE1～CASE3 では、試験開始後に給水面付近の湿潤密度が増加した後一度低下し、その後再度湿潤密度が増加した。この湿潤密度の一時的な低下は供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮挙動によって生じており[7]、その低下量は、CASE1 や CASE2 と比較すると CASE3 は小さい傾向があった。つまり、CASE1 や CASE2 と比較すると、CASE3 は供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮による変形量は小さい可能性が示唆された。
- 3) 上記のような膨潤圧の変化と供試体内部の湿潤密度の変化の関係から、不飽和領域での吸水圧縮挙動の発生の有無やその大小が膨潤圧の経時変化の形状に影響を与えることが示唆された。すなわち、膨潤圧試験において供試体内部の不飽和領域での吸水圧縮による変形量が大きいほど膨潤圧の一時的な低下量が大きく、吸水圧縮が生じないような場合には膨潤圧が単調に増加するものと推測された。
- 4) 初期および試験終了時の各ケースの乾燥密度分布の比較から、試験終了時の乾燥密度分布はいずれのケースでも不均一な乾燥密度分布が形成され、その分布形状は初期状態や境界条件に依存することがわかった。
- 5) これらの実験結果から、解析により飽和時の緩衝材の力学的な状態をより適切に評価するためには、吸水による膨潤や圧縮挙動を評価できる水理と力学の連成解析技術を用いる必要がある。その際には、現実の条件に即した初期条件や境界条件の設定が必要となることが示唆された。

今後、本研究により得られた初期含水比の異なる条件での膨潤圧と供試体内部の湿潤密度分布の時間変化の試験データは、不飽和～飽和状態の過渡期における水理と力学の連成解析コードの妥当性の検証のためのデータとして活用する予定である。

謝辞

本研究は、経済産業省から日本原子力研究開発機構が受託した「令和 3 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (JPJ007597) (ニアフィールドシステム評価確証技術開発)」の成果の一部である。

参考文献

- [1] 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の膨潤特性. JNC TN8400 99-038, 核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [2] Komine, H., Ogata, N.: New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, **40**, pp. 460-475 (2003).
- [3] 渡邊保貴, 田中幸久: 締固め時の含水比に着目した微小変位制御によるベントナイトの膨潤特性試験. 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, CS13-030, pp. 59-60 (2016).
- [4] 鈴木英明, 高山裕介: 過渡期の熱-水-応力連成現象に及ぼす緩衝材の密度変化の影響評価. JAEA-Research 2020-015, 日本原子力研究開発機構 (2020).
- [5] Wang, H., Shirakawabe, T., Komine, H., Ito, D., Gotoh, T., Ichikawa, Y., Chen, Q.: Movement of water in compacted bentonite and its relation with swelling pressure. *Canadian Geotechnical Journal*, **57**(6). pp. 921-932 (2020).
- [6] 地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価. 丸善 (2004).
- [7] 高山裕介, 菊池広人: X 線 CT 測定による膨潤圧試験中のベントナイトの吸水圧縮挙動の観察. 土木学会論文集 C (地圏工学) **77** (3), pp.302-313 (2021).
- [8] 操上広志, 千々松正和, 小峯秀雄, 小林晃, 大西有三: 膨潤評価式を適用した熱-水-応力連成解析. 土木学会論文集, **771**, pp. 21-31 (2004).
- [9] 澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨: 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発—緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築—. 電力中央研究所研究報告: N05028, 電力中央研究所研究 (2006).
- [10] 山本修一, 中岡健一, 納多勝, Alonso, E. E.: 人工バリアシステムの熱・水・応力・ガス連成解析. 土木学会第 62 回年次学術講演会, CS5-054, pp. 267-268, (2007).
- [11] Tanai, K., Yamamoto, M.: Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite. JNC TN8400 2003-024, Japan Nuclear Cycle Development Institute (2003).
- [12] 伊藤真司: 膨潤性地盤材料の構成則開発とベントナイト緩衝材の品質評価への適用. 神戸大学博士論文, 神戸大学 (2020).
- [13] 棚井憲治, 菊池広人, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦: ベントナイト系材料の標準的室内試験法構築に向けての試験法の現状調査と試験による検討. 日本原子力研究開発機構/電力中央研究所共同研究報告書(共同研究), JAEA-Research 2010-025, 日本原子力研究開発機構 (2010).
- [14] 菊池広人, 棚井憲治: 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験. JNC-TN8430 2004-005, 核燃料サイクル開発機構 (2004).
- [15] 小峯秀雄: 一次元自己シール実験の既往データに基づくモンモリロナイト結晶層間中の水の密度に関する帰納的考察. 第 48 回地盤工学研究発表会論文集, pp.459-460 (2013).
- [16] 山下亮, 雨宮清, 塚田泰博, 長屋淳一, 中島均, 朝野英一: 緩衝材の再冠水に伴う密度変化に関する検討. ハザマ研究年報, **42**(5), pp.1-8 (2010).