

浸透過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する解析的検討

新潟大学 学生会員 ○飯田 輝良  
新潟大学 正会員 金澤 伸一  
西松建設(株) 正会員 吉野 修

1. 目的

地層処分では、廃棄物と岩盤との間を充填する緩衝材として、著しい吸水膨潤性と難透水性を有するベントナイトの利用が考えており、ベントナイトの膨潤特性を把握するために、これまでに多くの膨潤圧試験が実施されている。膨潤圧試験で計測される膨潤圧は、不飽和から飽和に至る過程で発生し、水理、力学的作用が複合し、相互に影響するために非常に複雑な挙動となっており、詳細なメカニズムが解明されていない。過渡期における緩衝材の力学挙動について長期的な予測を行うためには、解析的な評価が不可欠であり、長期を見据えた性能評価をより信頼性の高いものにするために、飽和に至るまでの膨潤挙動を再現可能な解析コードを構築し、初期の吸水過程における膨潤圧挙動のメカニズムを明確にすることが重要であると考え、そこで本研究では、吸水温度を一定とした膨潤圧試験を行い、その後ベントナイトの膨潤挙動の表現を可能にした弾塑性モデルを組み込んだ熱/土/水/空気溶存型連成有限要素解析プログラム (DACSAR-MP for Bentonite Materials) <sup>1)</sup>を用いて膨潤圧試験の要素解析を行い、浸透過程に着目した膨潤圧挙動と供試体内部の関係を解析的に検討することを目的とした。

2. 吸水温度を一定とした膨潤圧試験および要素解析

2. 1 水温を 30℃に制御した膨潤圧試験

図 1 に試験機の概略図、表 1 に試料条件を示す。試料はクニゲル V1 (国内産) と珪砂 8 号を 7:3 の割合で配合した珪砂混合試料を使用し、供試体は、直径 28mm、高さが 10mm、乾燥密度は 1.6Mg/m<sup>3</sup> として静的に締固めて作製した。試験中は、拘束圧を 50N とし、水温は温水循環装置を用いて 30℃に制御しながら、膨潤圧試験を行った。なお、試験期間は 5 日とした。

表 1 試料条件

|                            |                  |
|----------------------------|------------------|
|                            | クニゲル V1<br>(国内産) |
| 供試体直径・高さ (mm)              | 28・10            |
| 乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )  | 1.6              |
| 初期飽和度 (%)                  | 30               |
| 初期間隙比                      | 0.652            |
| 土粒子密度 (Mg/m <sup>3</sup> ) | 2.61             |
| モンモリロナイト含有率 (%)            | 55.0             |

図 1 試験機の概略図

2. 2 膨潤圧試験の要素解析

表 2 に解析に用いた材料パラメータ、図 2 に解析モデル、図 3 に水分特性曲線を示す。要素は全 20 要素とし、解析モデルは、直径 28mm、高さが 10mm、上端を非排水・排気境界、下端を排水・非排気境界とした。初期飽和度は 30%、乾燥密度を 1.6Mg/m<sup>3</sup> と設定し、透気係数は、棚井らが行ったガス移行試験 <sup>2)</sup>の結果から求めた値を、透水係数は松本らが行った透水試験 <sup>3)</sup>から求めた乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> での透水係数をそれぞれ用いた。モンモリロナイト含有率を表す  $\alpha_{mon}$  はベントナイトと珪砂を 7:3 の割合で配合した場合の値として 38%とした。ここで、 $\lambda$ : 圧縮指数、 $\kappa_0$ :  $S_e=0$  における膨潤指数、 $l$ : 粒状性消失を制御するパラメータ、 $n_E$ : EC モデルのフィッティングパラメータ、 $n$ ,  $a$ : 不飽和化による圧密降伏応力の倍率を決定するパラメータ、 $k_a$ : 透気係数、 $k_w$ : 透水係数である。水位の上昇は要素下端から行い、上端で生じる鉛直方向の全応力を膨潤圧として見做す。解析では、要素の温度を境界条件として膨潤圧試験と同じ 30℃に設定した。また、クニゲル V1 の熱伝導率は、1.13W/m・K と設定した。

表 2 材料パラメータ

| $\lambda$ | $\kappa_0$ | $l$   | $n_E$ | $M$           | $v'$                 |
|-----------|------------|-------|-------|---------------|----------------------|
| 0.14      | 0.01       | 2     | 1.8   | 0.5           | 0.45                 |
| $N$       | $a$        | $C_k$ | $m$   | $k_a$ (m/day) | $k_w$ (m/day)        |
| 1         | 20         | 2.61  | 2.4   | 1.39          | $4.5 \times 10^{-8}$ |

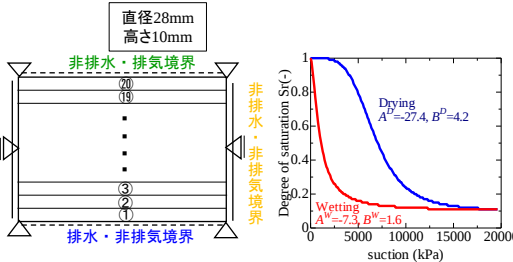


図 2 解析モデル

図 3 水分特性曲線

キーワード 地層処分, ベントナイト, 膨潤圧, コラプス

連絡先 〒950-2181 新潟県新潟市西区 2 の町 8050 番地 新潟大学工学部工学科地盤環境工学研究室  
TEL 025-262-7479

### 3. 解析結果

図4に水温30°Cでの膨潤圧試験結果と、解析結果を示す。解析の結果、緩衝材を不飽和土として捉え、緩衝材を構成するベントナイトの膨潤特性を表現できる構成モデルを使用することで、膨潤圧挙動を定性的に再現可能であり、初期膨潤圧と平衡膨潤圧は実験値とほぼ同等になることが確認できる。初期膨潤圧から一度膨潤圧が低下する期間が少し異なる要因として、供試体の高さが10mmと小さく、水が早い時間で流入し供試体の内部構造の変化が早いことが考えられる。

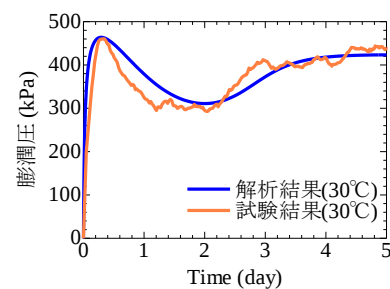


図4 膨潤圧の経時変化

### 4. 膨潤圧の経時変化と供試体内部の関係

再現解析で得られた結果を基に、膨潤圧の経時変化について検討する。図2の解析領域において要素は給水面から1, 4, 8, 12, 16, 20の計6要素を取り、各要素における飽和度、間隙比、有効応力の経時変化を図5に示す。

給水開始後、要素1では間隙比と有効応力が急激に低下していることが確認できる。比較的初期に飽和に達し、急激な飽和度の上昇に伴い吸水圧縮挙動であるコラプスが生じていると考えられる。一方浸潤面付近（供試体下部）以外の領域（要素12, 16, 20）では、少しずつ飽和度が上昇し間隙比が増加（膨潤）している。供試体下部ではコラプスに伴い圧縮し、上部では吸水によって膨張することにより膨潤圧が増加していると考えられる。

供試体上部が吸水により間隙比が増加し、膨潤圧が高くなった状態でさらに水が浸潤すると供試体中央部および上部において間隙比が低下しており、有効応力も減少していることが確認できる。それに対して供試体下部ではコラプスによる間隙比の低下後、吸水に伴い再び間隙比が上昇している。浸潤に伴いコラプスが起る範囲が少しずつ供試体上部へと変遷し、供試体下部では吸水に伴い再度膨張しているが、供試体中央部から上部までコラプスが起る範囲が大きく、供試体上部が全体的に圧縮されることで膨潤圧が低下したと考えられる。

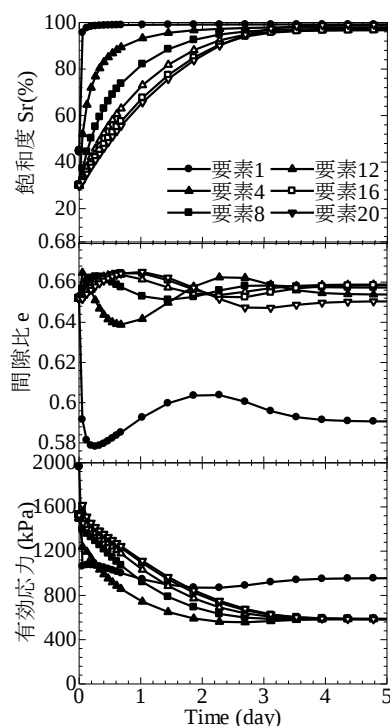


図5 各要素の経時変化

膨潤圧が低下した後、さらに浸潤が進むと、供試体上部では吸水に伴い再び間隙比が増加し、下部では間隙比が低下している。供試体上部において、コラプスによる間隙比の低下後、再度吸水により膨張することで、再び膨潤圧が増加しており、その後は平衡膨潤圧となる。平衡膨潤圧に達し、定常状態になった際の間隙比を見ると、同一に収束していないことが分かる。飽和度が高くなると空気が封入され、空気だまりができるため、間隙比が一定にならなかったと考えられる。これらをまとめると、膨潤圧の経時変化は、吸水による膨潤と吸水圧縮挙動（コラプス）が供試体内部で相互に変遷することで発生し、その膨潤変形挙動は微視的な間隙比の変化によって起こると解釈できる。

### 5. 終わりに

本研究により、膨潤圧の経時変化と供試体内部の関係を定性的に把握することができた。今後は、温度変化を考慮した膨潤圧試験に関するデータベースを構築し、高温環境化での膨潤特性を把握すると同時に、解析コードの高度化を図る。また、処分坑道断面の再冠水シミュレーションを行い、再冠水期間中に緩衝材内部で生じる現象の把握を検討し、地層処分の長期安全性に関わる知見を得ていく。

### 参考文献

- ・市川希, 金澤伸一, 武藤尚樹, 石山宏二: 熱/土/水/空気連成解析を用いたベントナイト緩衝材の再冠水挙動に関する解析的検討, 日本原子力学会 2018 年秋の大会 2F07 (2018)
- ・棚井憲治: 緩衝材中ガス移行試験データベース, JAEA-DATA/Code 2008-028, 2008.
- ・松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明: 緩衝材の飽和透水特性, JAEA-DATA/PNC TN8410 970296, 1997.