

緩衝材の長期圧密挙動に関する検討（その2） 予備長期圧密試験の実施と過剰間隙水圧の散逸遅れに関する解析的検討

日本原子力研究開発機構 正会員 ○高山 裕介

検査開発株式会社 非会員 菊池 広人 非会員 宮川 龍馬

原子力発電環境整備機構 正会員 山本 陽一 正会員 後藤 考裕

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分システムの安全評価の期間においてオーバーパック周囲に設置される緩衝材には、核種移行を抑制する機能など人工バリアとして重要な安全機能を設定している。緩衝材がこのような機能を発揮するためには、緩衝材に力学的な擾乱が生じたとしても、数万年以上の長期にわたって必要な厚さや密度を確保できるように設計する必要がある。オーバーパックの自重の作用による緩衝材の長期変形挙動に関しては、従来は粘性的に増加する変形量も含めて時間の経過とともに収束と考えられていたが、緩衝材仕様のベントナイトに対して複数年にわたる圧密試験を行った結果、二次圧密による変形が加速的に増加する傾向が報告されている¹⁾。この二次圧密の加速挙動については、試験容器の腐食の影響等いくつか要因が考えられ、これらの各要因について検討を行う必要がある。もし二次圧密の加速挙動がベントナイト自体が有する力学特性であった場合、一定の時間が経過した後に安全機能に必要な緩衝材厚さが不足することが懸念される。二次圧密が加速した要因の1つとして、载荷による密度の増加によって生じる排水面付近の透水性の低下によって、過剰間隙水圧の散逸が遅れ、本来一次圧密と定義されていた現象が二次圧密以降も継続している可能性が考えられる。本研究では、二次圧密の加速挙動を確認するために比較的長期の圧密試験（1年程度）を実施するとともに、透水係数の密度依存性を考慮した圧密試験の再現解析を実施し、本来一次圧密と定義されていた現象が二次圧密以降も継続しているかどうか検証した。

2 ベントナイトの圧密試験

図1に試験装置概要、表1に試験条件を示す。試験装置については、試験容器の腐食の影響を低減するために耐食性を考慮して、試験カラムに純チタン2種材、フィルタはセラミック製、配管系統はテフロン製の材料を用いた。試験においては、まず変形を拘束した状態で給水し、供試体の膨潤圧を計測した（図2）。膨潤圧が一定となった段階で供試体が飽和したとみなし（約3000h）、所定の応力を载荷した。図3に圧密沈下量 Δh の経時変化を示す。10時間程度で一次圧密が終了し、二次圧密に移行しているのが確認でき、1000時間程度までは $\log t$ に対して線形的に沈下が生じている。さらに、1000時間以降は沈下曲線の傾きが増加しており、既往の研究と同様、二次圧密の加速挙動が確認された。

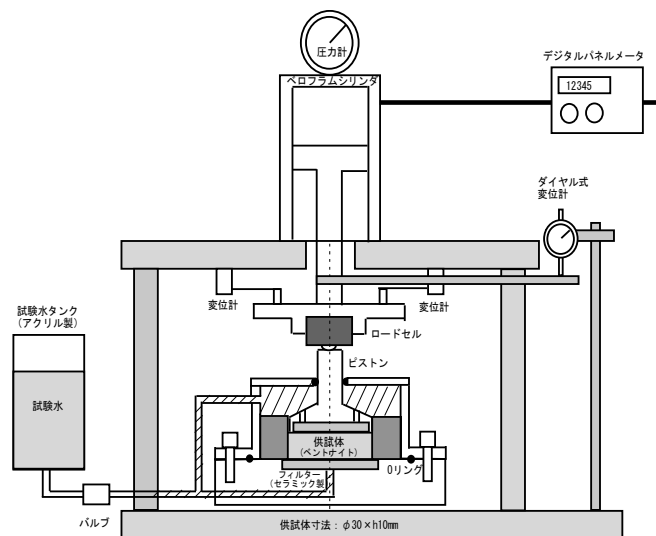


図1 圧密試験装置概要

表1 試験条件

材料(ベントナイト)	クニゲル®V1
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.60
供試体寸法 [mm]	D30×h10
载荷応力 [MPa]	3.0
試験温度 [°C]	22±1°C
試験溶液	蒸留水

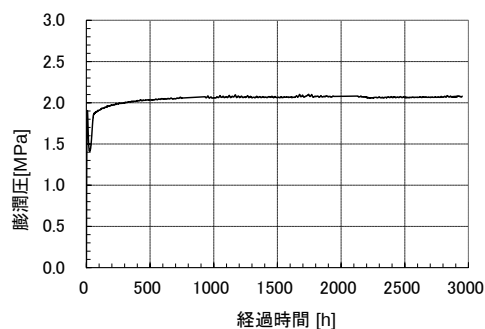


図2 膨潤圧の経時変化

キーワード ベントナイト, 二次圧密

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 日本原子力研究開発機構 TEL 029-282-1133 (内線 67604)

3 過剰間隙水圧の散逸遅れに関する解析的検討

前述の圧密試験を解析対象とし、解析ケースとして透水係数を常に一定値とするケース（解析1）と、透水係数の密度依存性を考慮するケース（解析2）について行った。解析には土/水連成解析コード DACSAR²⁾を使用した。構成モデルは EC モデル³⁾を適用した。EC モデルはカムクレイモデルを拡張した弾塑性構成モデルであり、降伏関数は以下の式で表現される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_c} + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{n_E} \left(\frac{q}{p'_c M} \right)^{n_E} = 0$$

ここで、 λ : 圧縮指数, κ : 膨潤指数, e_0 : 初期間隙比, p' : 平均有効主応力, p'_c : 降伏応力, n_E : フィッティングパラメータ, M : 限界応力比, q : 軸差応力である。解析に用いたパラメータ, 初期条件を表2に示す。ここで、 ν' : ポアソン比, k_i : 初期透水係数, p'_i : 初期有効応力である。構成モデルに関するパラメータについては、既往の研究⁴⁾を基に決定した。透水係数については、既往のクニゲル[®]V1の透水試験結果⁵⁾（図4）から最小二乗法により以下の式を設定し、間隙比変化に伴い透水係数が変化することとした。

$$k = 3e^{3.6215} \times 10^{-13}$$

ここで、 k : 透水係数[m/sec], e : 間隙比である。解析条件を図5に示す。要素数は12とし、下・上端を排水境界、下端を変位固定境界、側面を横方向変位固定境界とした。図3に解析により得られた圧密沈下量の時間変化を示す。一次圧密が終了する時間は実験と解析でほぼ同等の時間となっている。解析値は実験よりもやや沈下量が大きくなっているが、これについては、初期応力状態を等方・均一と仮定したことによる影響や解析パラメータ設定における材料ごとのばらつきの影響等が考えられる。解析1と解析2の結果を比較すると、透水係数の密度依存性を考慮した場合、一次圧密終了時間にはほとんど差がないことが分かる。本解析における供試体中心要素における間隙比変化を見ると0.744から0.712に変化する程度であり、この程度の変化であれば圧密沈下に与える透水性変化の影響は小さいものと考えられる。以上から、今回設定した解析条件においては、透水性の変化により本来一次圧密と定義されていた現象が二次圧密以降も継続している挙動は確認できなかった。

4. まとめ

本研究では、二次圧密の加速挙動を確認するために比較的長期の圧密試験を実施した。その結果、既往の研究と同様、二次圧密の加速挙動が確認された。また、透水係数の密度依存性を考慮した再現解析を実施し、本来一次圧密と定義されていた現象が二次圧密以降も継続しているかどうか検討を行った。その結果、今回設定した解析条件においては、透水性の変化により本来一次圧密と定義されていた現象が二次圧密以降も継続している挙動は確認できなかった。今後は、試験中のベントナイトの成分流出の影響の検討や、10年程度に及ぶ長期圧密試験を実施していくとともに、二次圧密の加速挙動が内的要因によるものであれば、緩衝材の長期挙動評価モデルを構築していく予定である。

参考文献

- 1) 高治他：緩衝材長期力学挙動の信頼性向上, JNC TJ8440 2004-011, 2005. 2) Iizuka et al.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987. 3) 大野他：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集 vol.9, pp.407-414, 2006. 4) 笹倉他：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査, JNC TJ8400-2002-025, 2002. 5) 松本他：緩衝材の飽和透水特性, PNC-TN8410 97-296, 1997.

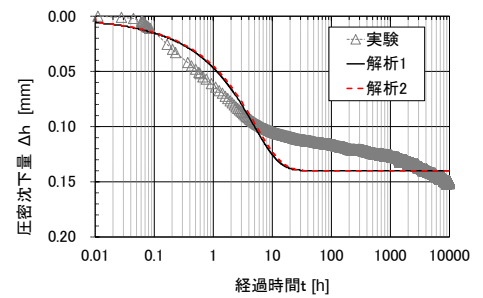


図3 圧密沈下量の経時変化

表2 解析パラメータ, 初期条件

λ	0.14	p'_c [MPa]	2.33
κ	0.04	k_i [m/sec]	2.27×10^{-13}
M	0.5	e_0	0.744
n_E	4.0	p'_i [MPa]	2.1
ν'	0.42		

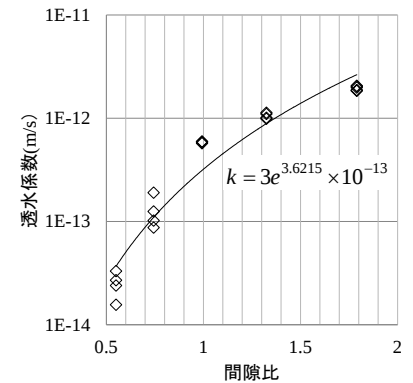


図4 透水係数-間隙比関係

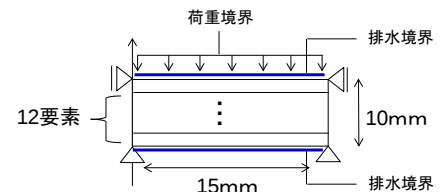


図5 解析条件