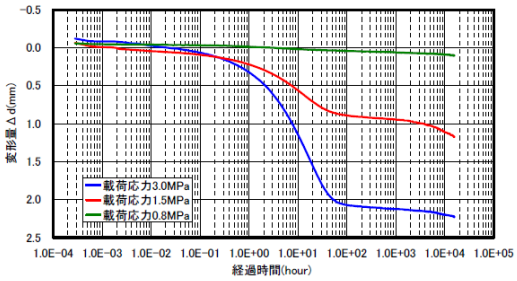
緩衝材の長期圧密挙動に関する検討（その１）二次圧密加速挙動の要因検討

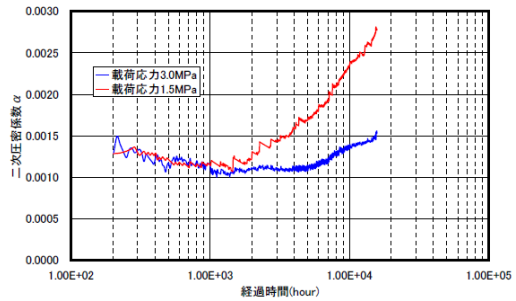
原子力発電環境整備機構　正会員　○山本　陽一　正会員　後藤　考裕
日本原子力研究開発機構　正会員　高山　裕介
検査開発株式会社　非会員　菊池　広人　非会員　宮川　龍馬

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．ベントナイトを材料とする緩衝材がこのような機能を発揮するためには，緩衝材に力学的な作用の変化が生じたとしても，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．ここで，重量物であるオーバーパックの自重の作用は粘性的な緩衝材の圧密を継続させ，オーバーパックは長期にわたって緩やかに沈下し，緩衝材の厚さが減少することが考えられている．初期設定厚さ 700 mm の緩衝材の二次圧密を考慮した既往の解析検討[1]によると，オーバーパックの自重による沈下は 1 万年後で 30 mm，10 万年後で 40 mm 程度以下と，緩衝材の安全機能の確保に影響する変形量にはならないことが示されている．一方で，緩衝材仕様のベントナイトに対して複数年にわたる長期の圧密試験を行った結果，二次圧密過程の変形が加速的に増加する傾向が報告されている[2]．この二次圧密の加速挙動がベントナイトの特性によるものであり，現象が長期間継続するとした場合，安全機能の確保に必要な緩衝材厚さが不足するような事象として顕在化することが懸念される．また，緩衝材の設計に用いるデータの信頼性確保，不確実性の低減といった観点からも要因の特定が必要な現象と考えられる．そこで，著者らは緩衝材に用いるベントナイトの二次圧密加速挙動の現象解明に向けた取り組みを開始した．本報告では，今後予定する長期圧密試験の実施にあたり，ベントナイトの二次圧密加速挙動に関する要因の分析と特定に向けた試験装置の設計および試験方法・試験条件などの対応方針について検討した結果を示す．



(a) 圧密沈下曲線



(b) 二次圧密係数の時間変化

図１　ベントナイトの長期圧密試験結果[2]

２．二次圧密加速挙動

図 1 はベントナイト緩衝材（重量比でベントナイト 70%とケイ砂 30%の混合，初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3，ベントナイトはクニゲル®V1 を使用）に対する既往の長期圧密試験結果[2]を示している．一般に粘性土の二次圧密による沈下量は時間の対数に対して比例的であり，二次圧密係数は一定値を示すことが知られている．しかしながら，図 1 の緩衝材仕様の長期圧密試験結果は，載荷応力 1.5 MPa の場合で，1000 時間を超えたあたりから二次圧密係数が時間とともに増加する傾向を示している．このような二次圧密の加速挙動が約 22 ヶ月の試験期間において継続している．

３．要因分析と対応方針

二次圧密加速挙動の理由として考えられる要因を，既往の検討[2]を参考にして外的要因と内的要因の観点から，①～⑨の要因に分類して検討した．表 1 に各要因の内容と対応方針をまとめた．表中の○は試験機の設計に反映させる項目，▲は試験手法（手順・条件等）に反映させる項目，●は圧密試験とは別に検討が必要な項目である．

ここで，外的要因とは，本来制御すべき試験機器や試験環境の初期条件や境界条件が経時的に大きな変化をしたために生じたものであり，二次圧密加速挙動が外的要因によるものであることが明らかとなれば，緩衝材の長期変形挙動評価においては考慮する必要がない現象と考えることができる．また，内的要因とは，ベントナイト材料が潜在的に有するものであり，地層処分環境でも起こりうる挙動であるため，二次圧密加速挙動が内的要因によるものであれば，長期

キーワード　ベントナイト，二次圧密，地層処分
連絡先　〒108-0014　東京都港区芝 4-1-23 三田 NN ビル 2F　原子力発電環境整備機構　技術部　TEL 03-6371-4004

表 1　ベントナイトの二次圧密加速挙動の考えられる要因と試験計画の対応方針

要　因		内　容	対応方針
外的要因	①試験機器の力学的変形	試験機自体が長期的に変形し，本来の変形量に付加されることによる見かけの変形量の増大	○供試体に対して十分な剛性を有する載荷フレームや試験容器を用い，試験機自体の変形を抑制する． ▲試験前，試験後の試験機や試験容器の寸法を計測する．
	②計測機器の長期劣化	変位計やアンプ等の計測関連機器が長期的に劣化することにより，見かけの変形量が増大	○データロガーの定期的な校正を行うため，2 台のデータロガーを交互に使用する． ○変位計などの計測センサーを複数設置する． ○試験途中で新規の計測センサーに交換する．
	③室温の変動	大幅な室温条件の変化に伴う水の粘性変化や容器の変形等により，変形量が増大	▲試験室の室温，水温を計測し，変動を把握する． ○エアコンの送風が直接試験容器や計測センサーに当たらないように試験機に風防などのカバーを設置する．
	④振動	地震等の大規模振動が生じ，試験機器設置条件が乱れることにより変形量が増大	○免振装置上に圧密試験機を設置する．
	⑤試験容器の腐食	試験容器が水との接触や応力負荷状態によって腐食し，物理的空間が変化することや供試体が化学的に変質することにより変形量が増大	○試験容器にチタンを使用することにより，試験容器の腐食の影響を低減する． ○腐食の影響を受けにくいフィルターを選定する（セラミックフィルターを使用）．
	⑥供試体の流出	ベントナイトの膨潤挙動によって載荷ピストン-圧密リング間の隙間やポーラスメタルの孔間から供試体が流出し，土粒子体積が減少することにより，変形量が増大	○流出が起こると想定される箇所に O リングを設置する． ○気孔径の小さなセラミックフィルターを使用する． ●気孔径の違うセラミックフィルターに対する透水試験により，ベントナイト成分の流出の程度を把握する． ○▲気孔径の違うセラミックフィルターを用いた圧密試験を実施し，影響を把握する． ▲試験前，試験後の供試体の質量を計測する．
内的要因	⑦過剰間隙水圧の散逸遅れ	ベントナイトは低透水材料であり，応力載荷により密度が増加するために，透水係数が低下することにより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	○供試体側面に間隙水圧計を設置する． ●透水係数の密度依存性を考慮した圧密沈下解析を実施する．
	⑧ベントナイト成分の溶脱/イオンバランスの経時変化/固着	ベントナイト内の可溶性鉱物が溶解し排水されること，溶解した間隙水の成分により交換性陽イオンの置換が生じること，溶解した成分が間隙に沈殿して固着すること等により体積が減少し，変形量が増大	○供試体から排出される試験溶液を採取し，分析する． ▲試験後の供試体を分析する（質量計測等）．
	⑨材料固有の力学的特性	二次圧密の加速挙動が上記①～⑧の要因ではなかった場合は，材料固有の力学特性と考えられる．	▲材料ごと（クニゲルV1，クニピア F，Ca 型ベントナイト，カオリンなど）の二次圧密特性を取得する． ○▲試験中の正確な応力状態を把握するため，供試体側面に土圧計を計測する． ○▲試験中の摩擦力を把握するため，供試体底面に土圧計を設置する． ▲二次圧密による先行効果を把握するため，二次圧密特性を把握した後，上載圧を増加する試験を実施する．

変形挙動の評価において何らかの反映が必要である現象と考えることができる．外的要因のうち可能性の高い要因として，⑥供試体の流出が挙げられる．これに対しては，気孔径の違うフィルターを用いた透水試験を実施し，透水係数の経時変化や試験中の排水の分析によりフィルターからの流出の程度を把握する．また，流出が想定される箇所へのOリングの設置や気孔径の小さなフィルターを使用する等の対策を実施した装置仕様と，標準的な装置仕様を用いた圧密試験を実施してそれらの結果を比較すること，さらに圧密試験中に採取する排水の成分分析によりベントナイトの流出の有無を確認することで対応する．一方，内的要因のうち，⑨材料固有の力学的特性については，いくつかの材料に対して長期圧密試験を実施して材料ごとの特性の違いを調べる．材料には，ベントナイトとして，Na 型ベントナイトであるクニピア®F とクニゲル®V1，　Ca 型ベントナイト，その他にカオリン粘土を使用することを予定している．

４．おわりに

ここでは，ベントナイトの二次圧密加速挙動の解明を目的とする長期圧密試験の実施に向けた要因分析とその対応方針を示した．長期圧密試験は 2018 年 3 月から順次開始しており，今後 10 年程度の試験継続を予定している．試験結果については今後適宜報告していく予定である．

参考文献

1) 平井他：緩衝材長期力学挙動評価モデルの検討，JNC TN8400 2003-034, 2004.
2) 高治他：緩衝材長期力学挙動の信頼性向上，JNC TJ8440 2004-011, 2005.