

地層処分的人工バリア設計における緩衝材の圧密反力について

原子力発電環境整備機構 正会員 ○山本 陽一 正会員 窪田 茂

1. はじめに 高レベル放射性廃棄物地層処分的人工バリアの設計において、緩衝材の厚さは長期の応力緩衝性に着目してオーバーバック・岩盤・緩衝材の力学的相互作用を考慮し、オーバーバックの耐圧厚さと緩衝材厚さとの関係を求めることによって設定する。具体的には、オーバーバックの腐食膨張と周辺岩盤のクリープ変形により、緩衝材は圧密されて体積減少し圧密反力の増加をもたらすことになるので、この反力と地下水静水圧とを足し合わせた応力が、オーバーバックの耐圧強度を下回るように設計する。本報では緩衝材に用いるベントナイト系材料について、既往の圧密試験結果と最新の知見に基づき、緩衝材の圧密反力の算定方法を検討した結果を示す。

2. ベントナイト系材料の圧密特性 ベントナイトの圧密試験結果^{1),2)}から、主要な圧密特性を以下のようにまとめることができる(図-1 参照)。^①圧密降伏応力を超過するまでの過圧密領域において、体積変化は概ね0のまま推移する。^②初期間隙比が大きい場合、 e - $\log p'$ 関係における圧密線は非線形性を示す。また、^③ベントナイトの正規圧密線はCa型化率によらず唯一存在する。

図-2は、ベントナイトにクニゲルV1を使用して実施されたベントナイト単体およびケイ砂との混合土に対する圧密試験結果^{1),2),3),4),5),6)}を、圧縮指数 C_c と有効粘土密度 ρ_e との関係で整理した結果を示している。圧縮指数は有効粘土密度が大きい場合に小さくなっていることが分かる。これは、上記^②の正規圧密線の非線形性を反映した結果である。また、上記^③の正規圧密線はCa型化率によらないことも示されている。砂分含有率 R_s に関しては、まだ十分なデータが揃った状態にはないが、 R_s が大きくなるほど C_c は小さくなる傾向があること、 R_s 毎の C_c と ρ_e との関係の存在をうかがわせる結果が示されている。一般に、粘土・砂混合土の圧縮性において、 C_c は R_s の増加に伴い小さくなると言われており⁷⁾、これと整合的である。

図-3のプロットは同じ圧密試験結果から、乾燥密度 ρ_d と圧密降伏応力 p'_y の関係を示したものである。密度は初期状態のものである。 p'_y は正規圧密線上にあると見なせるので、 R_s の等しいプロットを包絡した関係はそれぞれの正規圧密線を示していることになる。図中実線は、小林ほか⁸⁾により、ベントナイト単体($R_s=0\%$)の完全飽和線および正規圧密線を表すものとして、式(1)で与えられた関係を示している。実線との一致から、図-3の関係において、プロットが正規圧密線上にあることを説明している。

$$\rho_d/\rho_w = 0.156 \ln p' + 1.45 \quad (1) \quad \text{ここで、}\rho_w: \text{水の単位体積重量、} p': \text{圧密応力 (MPa)}$$

キーワード 放射性廃棄物処分、ベントナイト、混合土、圧密試験、圧縮指数、有効粘土密度

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

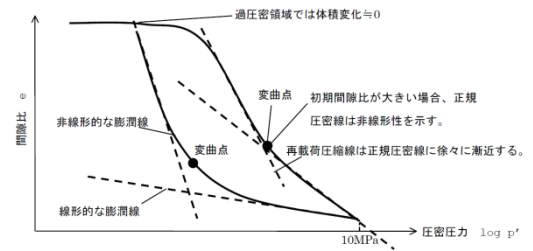


図-1 ベントナイトの圧密特性²⁾

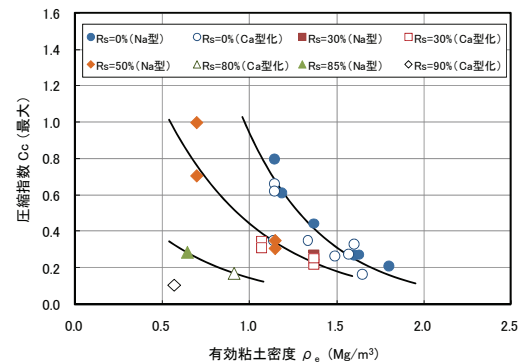


図-2 圧縮指数と有効粘土密度の関係

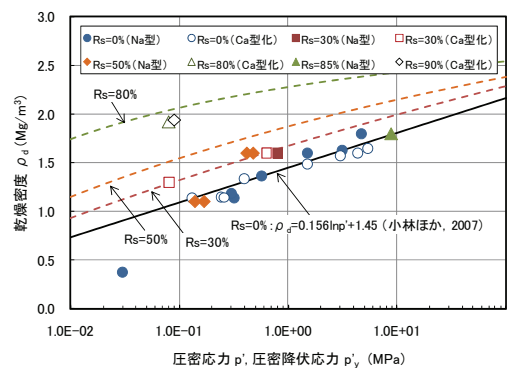


図-3 乾燥密度と圧密応力の関係

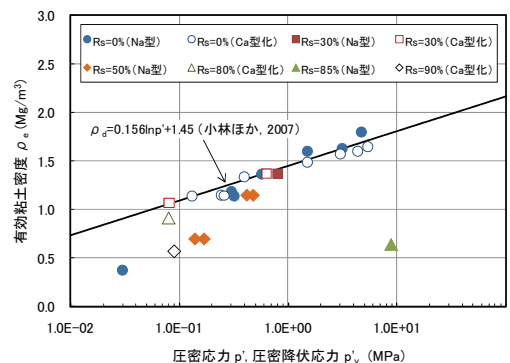


図-4 有効粘土密度と圧密応力の関係

図-3 のデータを, ρ_e と p'_y の関係で整理すると, 図-4 の関係になる. 混合土の結果にばらつきが見られるが, 有効粘土密度に対して砂分含有率によらず正規圧密線は唯一存在することを示唆する結果が得られている. 今後試験を充足する際のポイントに挙げられよう. 兵動ほか⁹⁾は, 粘土と砂の混合土において, $R_s=80\%$ 付近を境に砂と粘土のそれぞれが構造の主体となる領域が分けられ, $R_s=80\%$ が砂と粘土の力学的な境界になること, $R_s<70\%$ で非排水せん断強度が一定となることを示している. 粘土が構造の主体となる領域では砂分の影響を受けない粘土自体の強度が発現されており, 図-4 の有効粘土密度に対する結果は圧縮性についても同様である可能性が十分に考えられる.

図-5 に間隙比 e と圧密降伏応力 p'_y の関係をプロットした. 図中の実線は, 式(1)の乾燥密度を間隙比に変換して描いたものを示している. この関係と $R_s=0\%$ のプロットとの一致から, 式(1)の関係が高間隙比から低間隙比までのベントナイトの非線形な正規圧密線を良く表していることが分かる. 図-3 と図-5 の図中破線は, 式(1)の乾燥密度を有効粘土密度に読み替え, $\rho_e - \ln p'$ 関係で表される正規圧密線に R_s によらない直線関係が成立するとして, 砂分含有率から $R_s=30\%, 50\%, 80\%$ の時の ρ_e を, ρ_d と e に変換してそれぞれ描いている. これらの対応関係から少なくとも $R_s=0\%, 30\%$ の結果は, $\rho_e - \ln p'$ におけるユニークな直線関係が成立することを示している. この仮定が成立範囲において, 図-2 に示した圧縮指数や図-5 の間隙比との関係は, 有効粘土密度を R_s に応じた間隙比に変換して表示したことによる違いに過ぎず, ベントナイト系材料の圧密特性の本質を表すものではない可能性が考えられる.

3. 緩衝材の圧密反力の算定 上記のベントナイト系材料の圧密特性に対する考察から, ベントナイトが緩衝材構造の主体となる範囲において, 有効粘土密度と圧密反力の間には砂分含有率や密度によらない, 式(1)で与えられるユニークな関係が成立すると仮定する. この関係に基づき, 図-6 に示すような手順でオーバーバックの腐食膨張等による緩衝材の圧密反力を算定する. ここで, 上記①を理由に, 初期→降伏時の密度, 間隙比は変化しないものとする. オーバーバック厚さを 19cm とし, この内 4cm が腐食膨張とした場合の, 緩衝材の厚さと圧密反力の関係を求めた例を, 図-7 に示す. 現時点で緩衝材仕様のレファレンスとする $R_s=30\%$, $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ のケースにおいて, 緩衝材厚さ 70cm の時の圧密反力は 0.90MPa となり, 既往の方法による算定結果の 0.86MPa とほぼ同じ結果であった.

4. おわりに 緩衝材に用いるベントナイト系材料について, 既往の圧密試験結果から, 有効粘土密度に対して砂分含有率によらず正規圧密線は唯一存在することが示唆された. そして, $\rho_e - \ln p'$ 関係の間にユニークな直線関係が成立するとして, 任意の配合条件に対する緩衝材の圧密反力の算定方法を提案した. 今後, 様々な配合条件による試験結果を蓄積してこの仮定の成立性を確認することが必要である.

参考文献 1) 笹倉ほか: 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. 2) 笹倉ほか: ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得Ⅱ, JNC TJ8400 2003-048, 2003. 3) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999. 4) 戸井田ほか: 人工バリア材料の力学的物性取得試験, JNC TJ8400 2004-036, 2005. 5) 齋藤ほか: ニアフィールドの長期力学連成解析手法の構築 (Ⅱ), JAEA-Research 2009-065, 2010. 6) 佐川ほか: 長期浸透を受けた Na 型ベントナイト混合砂の力学特性に及ぼす Ca 化の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.43-56, 2008. 7) 落合, 大嶺: 砂と粘土の混合土の圧縮および強度特性, 土と基礎, Vol.41, No.7, pp.11-16, 1993. 8) 小林ほか: 等含水比線と等飽和度線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.4, pp.1065-1078, 2007. 9) 兵動ほか: 砂・粘土混合土の非排水せん断強度特性に及ぼす細粒分の影響, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.215-225, 2010.

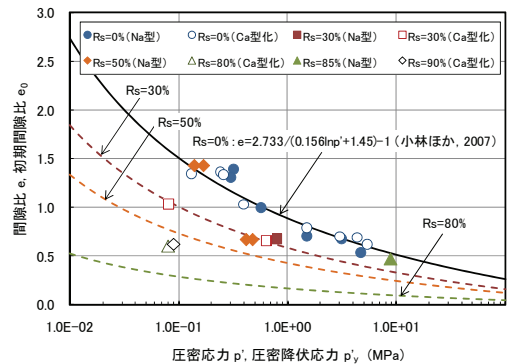


図-5 間隙比と圧密応力の関係

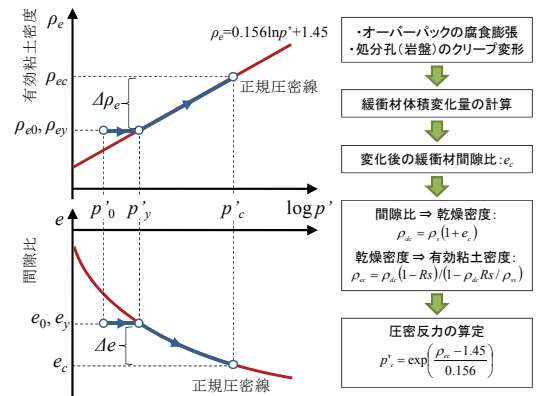


図-6 圧密反力算定の概念図

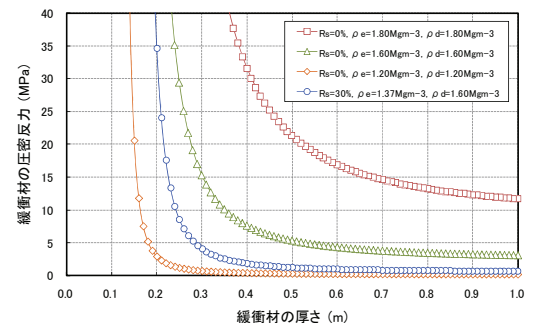


図-7 緩衝材厚さと圧密反力の算定結果