

ベントナイト系材料挙動に対する骨格構造概念を考慮した弾塑性構成モデルの適用性検討

株式会社大林組 正会員 ○佐藤 伸, 山本 修一, 志村 友行
名古屋大学工学研究科 正会員 中井 健太郎, フェロー会員 野田 利弘

1. 目的

放射性廃棄物処分施設の人工バリアにはベントナイト系材料の採用が有力視されており, 人工バリアの力学挙動評価では, 弾塑性構成モデルの一つである修正 Cam-Clay モデル¹⁾を用いた検討²⁾が行われている. 著者らは, 膨潤性が非常に高いベントナイト系材料への弾塑性モデルの適用性については, 力学挙動を適切に分析評価してから用いる必要があると考えている. これまでに下負荷面を考慮したモデルの検討³⁾を試みたが, この場合, 限界状態線下側におけるひずみ軟化等を表現できなかった. そこで, 日本原子力研究開発機構の緩衝材基本特性データベースで一般公開されているベントナイト系材料の一次元圧縮試験結果

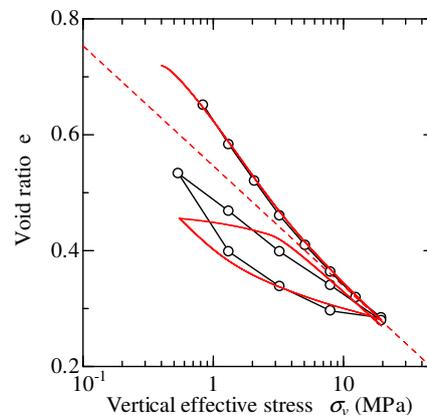


図-1 一次元圧縮試験結果

及び圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験結果を対象に圧縮及びせん断挙動を分析し, 土の骨格構造概念を記述する弾塑性構成モデル, SYS カムクレイモデル⁴⁾の適用性について検討を行った.

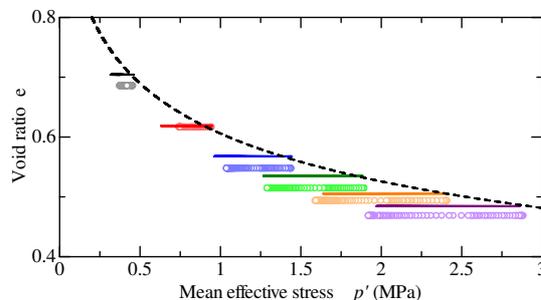
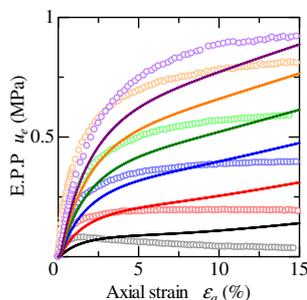
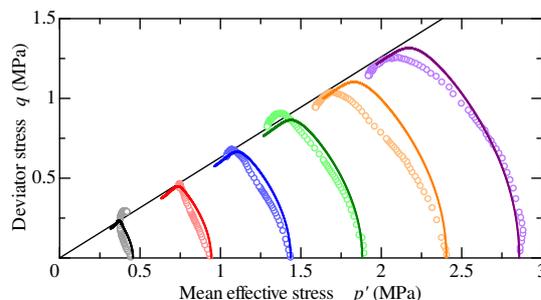
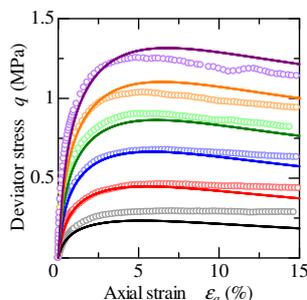


図-2 圧密非排水三軸圧縮試験結果

2. 圧縮及びせん断挙動

本検討で参照したデータは, 緩衝材基本特性データベースに公開されている高治ら⁵⁾の検討による一次元圧縮試験と圧密非排水三軸圧縮試験とした. 対象とした材料は Na 型ベントナイトクニゲル V1 を 70wt%, 珪砂を 30wt% 配合し, 乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ で圧縮成型したも

のである. 試験結果として, 図-1 に一次元圧縮試験結果, 図-2 に圧密非排水三軸圧縮試験結果を示す. ここで, マーカー表示が実験結果であり, 得られた材料パラメータは $C_c=0.27$ ($\lambda=0.117$), $C_s=0.16$ ($\kappa=0.07$), $\phi=16.6$ ($M=0.64$), 圧密降伏応力 $\sigma_{vc}=0.84\text{MPa}$ である. 図-1 の圧縮挙動より, 一般的な粘土と比べて膨潤性が高く, 圧縮指数と膨潤指数の差が小さい (一般的な粘土の膨潤指数は圧縮指数の 1/10 程度) 特性が認められる. また, 図-2 のせん断挙動に着目すると, 限界状態定数が 0.6 と一般的な粘土と比べて小さいこともわかる. 拘束圧 1.5MPa 以上の試験については, 限界状態線下側でひずみ軟化挙動を示しているが, これは鋭敏かつ軟弱な自然堆積粘土に類似した特徴である.

3. 適用する弾塑性構成モデルと検討概要

ベントナイト系材料の力学挙動を表現するために, 本検討では, 土の骨格構造概念 (構造・過圧密・異方性) を記述する SYS カムクレイモデル⁴⁾を適用する. 本モデルの特徴は次の通り. 練返し正規圧密線の外側 (いわゆる不可能領域) に応力状態を取る構造の発達した土の力学挙動を記述するために, 正規降伏面の外側に相似な上負荷面を導入する. 上負荷面に対する正規降伏面の相似比 R^* が構造の程度を表す. 続いて, 過圧密土の力学挙動を記述す

キーワード ベントナイト, 有効応力解析法, ひずみ軟化

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組生産技術本部設計第二部 TEL 03-5769-1307

るために、上負荷面の内側に相似な下負荷面を設ける。上負荷面に対する下負荷面の相似比 R が過圧密の程度を表し、逆数 $1/R$ は過圧密比と等しい。3つの降伏面（正規降伏面、上負荷面、下負荷面）の位置関係を図-3に示す。一般に土は構造および過圧密が発達した状態で存在するが、载荷などの塑性変形の進展とともに、構造・過圧密は次第に低位化し、練返し正規圧密状態になる。SYS カムクレイモデルでは、塑性変形の進展に伴う R^* 及び R の発展則が定義されるが、単位塑性変形当たりのこの構造劣化および過圧密解消の程度の大小によって、粘土から砂までの広範な土の力学挙動を1つの理論的枠組みの中で記述可能である。また、一組の材料定数群と初期値群で、圧縮からせん断までの広範な土の力学挙動を統一的に記述できる点が本モデルの特徴である。

4. 検討結果

実験結果の再現にあたり、供試体成型時（拘束圧 10kPa の等方状態と仮定）をすべての試験結果に対する共通の初期状態とした。初期状態設定後、一次元圧縮試験はそのまま载荷試験を実施し、圧密非排水三軸圧縮試験については所定の圧密圧力まで等方圧密したのち、そのまま非排水せん断を実施した。解析結果として、一次元圧縮試験の再現結果を図-1の実線、圧密非排水三軸圧縮試験の再現結果を図-2の実線、同定された弾塑性性状（弾塑性パラメータ、発展則パラメータ、初期値）を表-1に示す。再現結果を見ると、圧縮挙動における高い膨潤性からせん断挙動における限界状態線下側でのひずみ軟化挙動まで、一組の材料定数群と共通の初期値でベントナイト系材料の力学挙動の特徴をよく再現できている。なお、図-1中の破線は、同定した弾塑性性状から得られた練返し正規圧密線である。一次元圧縮試験結果が正規圧密線よりも外側の高張った状態にあることから、圧縮成型されたベントナイト混合土は初期に構造を有する材料（表-1を見ると、初期構造の程度は870と非常に大きい）であることがわかる。载荷が進むにつれて構造は次第に低位化し、練返し正規圧密線に漸近していく。また、本モデルでは、構造劣化は塑性圧縮に働く。図-2を見ると明らかなように、せん断に伴う構造劣化によって、ひずみ軟化挙動が再現されている。以上、骨格構造概念を記述するSYSカムクレイモデルを用いることで、圧縮挙動における高い膨潤性やせん断挙動におけるひずみ軟化挙動といった特徴的な力学挙動を再現することができ、ベントナイト系材料は高位構造を有する土としてモデル化可能であることを示した。ただし、一次元圧縮試験における除荷から再载荷時のループ挙動や間隙水圧の载荷初期の挙動については若干、再現性が劣っている。繰返し载荷試験などの他の試験結果も含めて精査することで、再現性を高めることを今後の課題として考えている。

5. 結論

本検討では、放射性廃棄物処分施設の人工バリアの緩衝材の候補材料であるベントナイト混合土の標準圧密試験及び圧密非排水三軸試験結果を分析し、その挙動を表現するモデルとして構造・過圧密・異方性概念を有するSYSカムクレイモデルの適用性を検討した。検討の結果、若干の課題はあるものの、一組の材料定数群と初期値群を用いて、ひずみ軟化挙動などの特徴的な挙動を再現することができた。今後はさらなるモデルの高度化も含めた検討を行っていきたい。

参考文献 1)Roscoe, K. H., et.al.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609,1968. 2)原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告書レビュー版, 2018年.3) 佐藤ら: ベントナイト系材料の過圧密挙動及び繰返し挙動に対する弾塑性構成モデルの適用性, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年. 4)Asaoka, A. et. Al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanism of soil, Soils and foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002. 5)高治ら: 緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041, 1999.

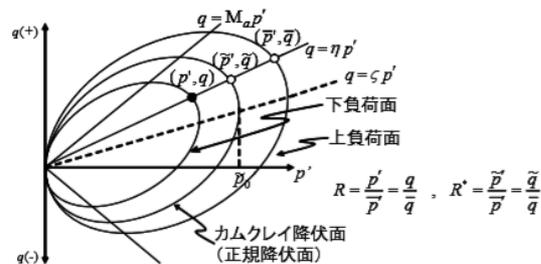


図-3 上下負荷面カムクレイ降伏面⁴⁾

表-1 同定された弾塑性性状一覧

弾塑性	NCLの切片 N	1.74
	限界状態定数 M	0.68
	圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.09
	膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.07
	ポアソン比 ν	0.10
発展則	R^* の発展則パラメータ c_s	0.12
	構造劣化指数 a	1.15
	正規圧密土化指数 m	0.10
	回転硬化指数 b_r	0.00
	回転硬化限界面 m_b	0.00
初期値	間隙比 e_0	0.72
	応力比 η_0	0.00
	平均有効応力 p'_0 (kPa)	10.00
	構造の程度 $1/R^*_0$	870.00
	過圧密比 $1/R_0$	15.50
	異方性の程度 ζ_0	0.00