

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

株式会社大林組 正会員 ○佐藤 伸, 山本 修一, 伊藤 浩二
名古屋大学工学研究科 正会員 中井 健太郎, 野田 利弘

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設の人工バリアに使用されるベントナイト系材料は再冠水により飽和した時点では過圧密状態であると推定される¹⁾。飽和後の長期の状態を考えると、廃棄体の腐食膨張による圧密や地震等による繰返し荷重をベントナイト系材料は受けることになる。そのため、長期挙動評価に用いられる材料構成モデルは、過圧密から正規圧密状態への移行や、繰返し荷重への対応が求められる。本報では過圧密から正規圧密への移行を滑らかに表現することが可能で、繰返し荷重に対する変形特性を考慮可能な弾塑性構成モデル（下負荷面モデル）の適用性について、非排水三軸圧縮試験及び繰返し非排水三軸試験の再現解析に基づいて検討した。

2. 使用する材料構成モデル、対象とする試験及び解析方法

使用する材料構成モデルは弾性から塑性域への滑らかな遷移の表現が可能で、土の誘導異方性及び繰返し負荷挙動を表現可能な橋口²⁾が提案した下負荷面モデルを適用する。比較のため、単調荷重の三軸圧縮試験に対しては修正 Cam-Clay モデルでも検討を行う。なお、本報で用いる下負荷面モデルは修正 Cam-Clay モデルを基にしており、下負荷面モデル固有のパラメータを設定しなければ両者の結果は概ね一致する。

対象とする試験は、日本原子力研究開発機構（JAEA）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・ケイ砂 30wt% 混合供試体の乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ の圧密非排水（ $\overline{CU}$ ）三軸圧縮試験及び繰返し非排水三軸試験とした。

使用した解析コードは Abaqus であり、下負荷面モデルについては Abaqus の User Subroutine 機能を用いて考慮した。解析には立方体の三次元単位要素を用いた。三軸圧縮試験の再現解析は、側圧一定条件で軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ までの変位制御で行い、動的三軸試験については側圧一定条件で上面から応力制御による繰返し荷重を载荷する解析を行った。なお、排水条件については全て非排水条件としている。

3. 三軸試験の再現解析結果と弾塑性パラメータの同定

図-1 に、非排水三軸圧縮試験結果と再現解析から得られた有効応力経路を比較して示した。表-1 は図-1 の解析で使ったパラメータを示す。ここで、圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ 及び内部摩擦角 ϕ については、圧密試験及び三軸試験から得られた値¹⁾を用いた。先行圧密降伏応力 P_0 については、圧密試験から得られた圧密降伏応力の平均値を採用している。ポアソン比 ν と $U(R)$ の発展則パラメータ u は再現解析に基づいて同定した。始めに、図-1 の正規圧密状態における結果を見ると、下負荷面モデルは正規圧密状態では基本的には修正

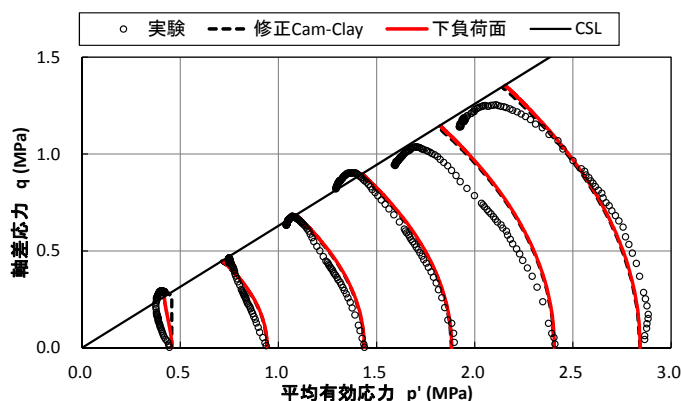


図-1 非排水三軸試験の有効応力経路

表-1 非排水三軸試験から決定したパラメータ

項目	記号	単位	値
圧縮指数	λ		0.117
膨潤指数	κ		0.07
ポアソン比	ν		0.20
内部摩擦角	ϕ	°	16.6
先行圧密降伏応力	P_0	MPa	0.84
$U(R)$ の発展則の定数	u		50.0
回転硬化限界定数	ϕ_b	°	—
回転硬化発展則の定数	b_r		—
せん断硬化軟化程度の定数	μ		—
せん断硬化軟化境界の定数	ϕ_d	°	—
移動硬化則の定数	c		—

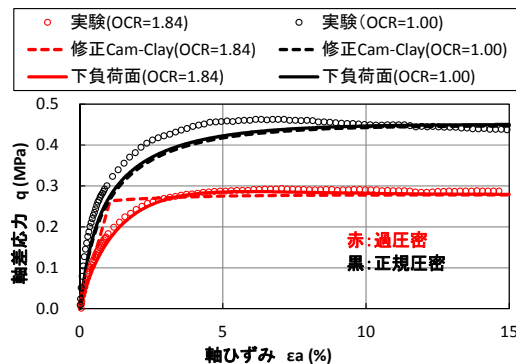


図-2 非排水三軸試験の応力ひずみ曲線

キーワード 人工バリア, 弾塑性構成モデル, ベントナイト

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

Cam-Clay モデルと等価となることから、両者の結果はほぼ一致し、実験を概ね表現できている。次に、過圧密状態 ($\text{OCR}=1.84$) に着目する。図-2 に試験から得られた応力ひずみ曲線を示す。ここで、正規圧密状態 ($\text{OCR}=1.0$) に関するものは下負荷面モデル及び修正 Cam-Clay モデルともに実験結果を再現している。しかし、過圧密状態 ($\text{OCR}=1.84$) の場合、修正 Cam-Clay モデルは降伏曲面に達するまでは弾性挙動を示すことから、降伏点で応力ひずみ関係が折れ曲がる結果となる。下負荷面モデルについては、過圧密から正規圧密へ滑らかに移行するための発展則が考慮されているため、非常によく実験を再現できることが分かる。この時、同定された $U(R)$ の発展則パラメータ u は 50.0 であった。以上から、下負荷面モデルを用いることにより、過圧密から正規圧密への滑らかな移行を表現できる。

4. 繰返し挙動に対するパラメータの同定

対象とした繰返し非排水三軸試験は JAEA 緩衝材データベースで公開されている、高治ら³⁾の検討による有効拘束圧 0.49MPa のケースとした。再現解析は応力制御による 10 回繰返し载荷を行い、10 波目の履歴ループから G/G_0 、 h - γ 関係を算出し、実験結果と比較した。検討結果を図-3 に示し、0.9%ひずみ時に得られた応力ひずみ曲線を図-4 に示す。また、使用した下負荷面モデルパラメータを表-2 に示す。パラメータの設定方法は λ 、 κ 、 ν 、 ϕ 及び P_0 については試験値あるいは三軸試験の再現解析と同一の値とし、それ以外の下負荷面モデル固有のパラメータについては G/G_0 、 h - γ 関係(実験値)を表現可能な値を再現解析より同定した。図-3 を見ると、0.5%以上の剛性低下率は実験結果と良く一致しているが、それ以下のひずみ領域の再現性は低下する。減衰については、ひずみ領域 0.8%未満が実験よりも過小評価されている。繰返し荷重に対しては、図-4 に示すように履歴ループが表れており、伸張側については一般的に良く見られるひずみのドリフトが表現できている。しかし、三軸圧縮試験で同定された $U(R)$ の発展則パラメータ u を変更 (50.0 $\rightarrow$ 1.0) しなければ G/G_0 、 h - γ 関係を良く再現できない結果となった。以上から、応力ひずみ関係の実験データがなく、繰返し変形挙動自体の再現性の評価ができていない点と、単調载荷から繰返し载荷まで表現できる一貫性が今後の課題となる。

5. おわりに

本報では飽和時には過圧密状態にあると思われるベントナイト系材料に対して、過圧密から正規圧密への滑らかな遷移の表現が可能で、さらに繰返し挙動についても表現可能な下負荷面モデルを適用することの有効性と、下負荷面モデルのパラメータの設定方法の一例を示した。しかし、ベントナイト系材料の力学試験データが少なく、本報で決定したパラメータの適用限界については検討不足であり、ベントナイト系材料の各種力学試験データの拡充が課題である。また、今後は SYS カムクレイモデル等の他の弾塑性構成モデルに対しても適用性検討を進めていく予定である。

参考文献 1)高治一彦, 鈴木英明:緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041, 1999 年,2) Hashiguchi and Chen : Elastoplastic constitutive equation of soil with the subloading surface and rotational hardening, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., vol.22, 197-227, 1998.,3)高治一彦, 谷口航:緩衝材の動的力学特性, JNC TN8400 99-042, 1999 年

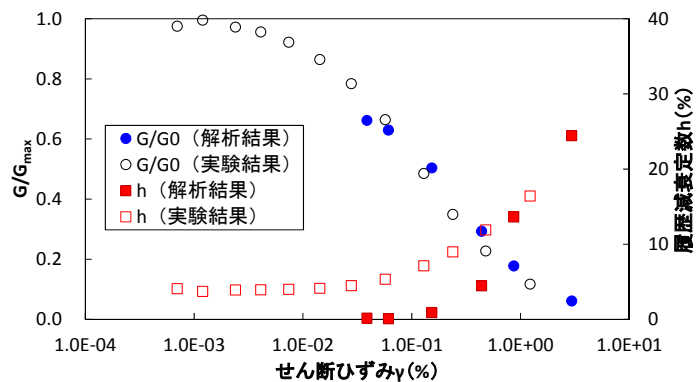


図-3 繰返し非排水三軸試験から得られた G/G_0 、 h - γ 関係

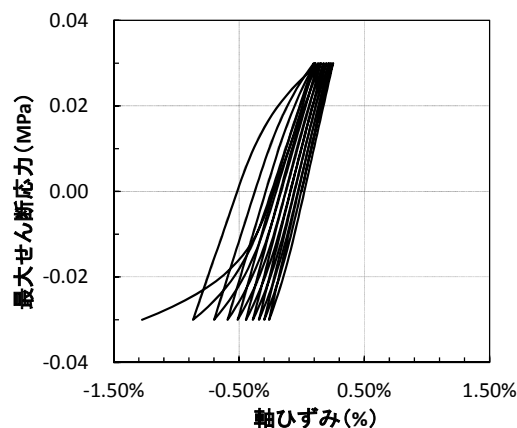


図-4 せん断ひずみ0.9%ケースの応力ひずみ関係

表-2 繰返し三軸試験に用いたパラメータ

項目	記号	単位	値
圧縮指数	λ		0.117
膨潤指数	κ		0.07
ポアソン比	ν		0.20
内部摩擦角	ϕ	$^{\circ}$	16.6
先行圧密降伏応力	P_0	MPa	0.84
$U(R)$ の発展則の定数	u		1.0
回転硬化限界定数	ϕ_b	$^{\circ}$	8.0
回転硬化発展則の定数	b_r		1.0
せん断硬化軟化程度の定数	μ		0.0
せん断硬化軟化境界の定数	ϕ_d	$^{\circ}$	0.0
移動硬化則の定数	c		15.0