

緩衝材長期力学挙動の検討（その1）
- 弾粘塑性構成モデルパラメータの適用性 -

(株)竹中工務店 正会員 ○高治一彦、重野喜政、下河内隆文
核燃料サイクル開発機構 非会員 棚井憲治 正会員 平井卓

1.はじめに

緩衝材には、オーバーパックの腐食膨張、自重による沈下及び周辺岩盤のクリープ変形等による外力が長期間にわたり作用すると考えられる。これらの外力に対して緩衝材を含むニアフィールドの挙動を明らかにし、緩衝材の変形やオーバーパックへの作用応力を評価することは設計や安全評価上の基盤情報を得る上で重要である。本研究では圧縮成型ベントナイトを用いた緩衝材を対象に、これまで実施された室内力学試験結果に基づいてパラメータを設定し、一般粘土に用いられている構成式を用いてシミュレーションを行い、その適用性について検討した。

2.試験概要

シミュレーション対象とした室内力学試験は、緩衝材の時間依存性が顕著にあらわれると考えられる載荷期間が約1年の長期一次元圧密試験（以下「圧密試験」）とひずみ速度を0.1%/min,0.0045%/min,0.001%/minとした3ケースの圧密非排水三軸圧縮試験（以下「三軸試験」）である。

3.パラメータの設定

圧縮成型ベントナイトの力学挙動を解析するための力学モデルとして、粘性土を対象に開発された関口 - 太田モデル¹⁾、足立 - 岡モデル²⁾を取上げた。本検討モデルにおいて必要な入力パラメータの内、弾塑性パラメータである圧縮指数 C_c 、膨潤指数 C_s 、限界状態パラメータ M は、圧密試験、三軸試験結果より決定した。多段階圧密試験による間隙比 e と圧密応力 p の関係($e-\log p$)より、 C_s は除荷時と再載荷時でその傾きが大きく異なっているが、本研究では既報³⁾で最も適用性が高かった $C_s=0.16$ を用いた。初期せん断剛性 G_0 は、三軸試験の応力 - ひずみ曲線より設定した。

圧密試験から粘性パラメータを設定する方法は、関口 - 太田モデルで提案されている手法である。設定した粘性パラメータのうち、二次圧密係数 α は、一次圧密終了後の体積ひずみと時間の対数の関係から $\alpha=0.002$ と設定した。初期体積ひずみ速度 $\dot{v}_0$ は、一次圧密終了時間 t_c を用いて、次式により設定した。

$$\dot{v}_0 = \alpha / t_c \qquad (1)$$

ただし、シミュレーション対象の排水距離が異なるので、多段階圧密試験により得られた一次圧密終了時間を37.2時間とし⁴⁾、圧密度は対象によらず同一であるとして、シミュレーション対象毎に t_c を変えている。

ひずみ速度を変えた三軸試験から粘性パラメータを設定する方法は、足立 - 岡モデルで提案されている手法である。粘性パラメータのうち、 m は、次式により求められる。

表1 試験条件

項目	内容	
試験名	長期一次元圧密試験	ひずみ速度の異なる圧密非排水三軸圧縮試験
材料	ケイ砂混合ベントナイト ベントナイト クニゲルV1（重量比：70wt%） ケイ砂 3号（重量比：15wt%）、5号（重量比：15wt%）	
寸法	直径φ60mm×高さh20mm	直径φ50mm×高さh100mm
初期初期乾燥密度	1.6g/cm ³	
試験条件	載荷荷重：0.8、1.5、3.0MPa、各1ケース 載荷期間：約1年間	有効拘束圧：約1.9MPa 軸ひずみ速度：約0.1、0.0045、0.001%/min 各1ケース
試験手順	粉末ベントナイトを所定の密度に圧縮成型 変形拘束状態で給水飽和 飽和確認後、膨潤応力を解放せず、圧密荷重載荷	粉末ベントナイトを所定の密度に圧縮成型 変形拘束状態で給水飽和 三軸試験機にセット後、拘束圧を負荷し、圧密終了後、所定の軸ひずみで荷重載荷
間隙水	純水	

キーワード：放射性廃棄物、ベントナイト、力学特性、構成モデル、弾粘塑性
連絡先：〒104-8182 東京都中央区銀座 8-21-1 TEL:03-3542-7612 FAX:03-3545-0974

表 2 解析パラメータ

パラメータ		関口 - 太田モデル		足立 - 岡モデル	
弾性	Cs	0.16			
	G ₀	圧密試験：23200kPa (膨潤応力 0.64MPa) 三軸試験：63600kPa (平均有効応力 1.90MPa)			
塑性	Cc	0.27			
	M	0.63			
粘性	A	α	2.0 × 10 ⁻³	m'	(4)式により変換
		$\dot{v}_0$	圧密：5.4 × 10 ⁻⁵ (h ⁻¹) 三軸：8.6 × 10 ⁻⁶ (h ⁻¹)	C	
	B	α	(4)式により変換	m'	98
		$\dot{v}_0$		C	2.4 × 10 ⁻¹² (h ⁻¹)

ここで、 $\dot{\epsilon}_{11}$ は、軸ひずみ速度、 p は平均有効応力、 q は軸差応力である。上付指標(1),(2)は、各試験ケースを表す。式より、等粘塑性体積ひずみを持つ点の応力比とひずみ速度の関係から m が求められる。また、 C は次式により求められる。

$$C = \frac{\epsilon_{11}}{\sqrt{2/3} \exp \left\{ m' \left[\frac{q}{Mp'} + \frac{\lambda}{\lambda - \kappa} \ln(p'/p_0') \right] \right\}}$$

(3)

また、足立 - 岡モデルと関口 - 太田モデルの粘性パラメータは、初期状態において次式の関係を持つ。

$$m' = \frac{\lambda - \kappa}{\alpha(1 + e_0)} \quad C = \frac{\dot{v}_0}{M}$$

(4)

表 2 に解析に用いたパラメータを示す。各モデルを用いて前述した室内試験結果のシミュレーションを行い (FEM 解析コード MuDIAN⁵⁾ を使用) その適用性の検討を行った。

3.シミュレーション結果

図 1 に圧密試験のシミュレーション結果 (圧密沈下量の経時変化) を示す。両モデルによる解析結果に大きな差がなかったため、ここでは、関口 - 太田モデルの結果を示す。粘性パラメータ A は、本試験による二次圧密挙動から求めているため、二次圧密領域の時間-変位関係の相対的な傾きは、良く一致している。パラメータ B は粘性パラメータが小さく二次圧密挙動がほとんど出ず、弾塑性的な挙動となっている。

図 2 に三軸試験のシミュレーション結果 (平均有効応力で正規化した応力経路) を示す。両モデルによる解析結果に大きな差がなかったため、ここでは、足立 - 岡モデルの結果を示す。図の試験結果を見て分かるように、ひずみ速度を 100 倍変えても正規化応力履歴はほとんど同一曲線を描いており、せん断クリープ挙動がほとんど生じていない。したがって、粘性パラメータの小さい B の結果がよく一致し、粘性が大きいパラメータ A の結果は、実験値に比して強い時間依存性挙動を示す。

4.おわりに

本研究では、既存の構成モデルを用いて長期一次元圧密試験、ひずみ速度の異なる圧密非排水三軸圧縮試験から粘性パラメータを設定し、シミュレーション解析を行った。その結果、本研究で設定した 2 ケースのパラメータセットでは体積クリープ、せん断クリープどちらか片方に対する適用性は高いが、他方の挙動に対しては若干異なる挙動を示した。その 2 では、両パラメータセットによる初期値・境界値問題のシミュレーション解析により、パラメータの適用性について検討を行う。

【参考文献】

1) Sekiguchi, H., Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clays. *Proc. 9th ICSMFE*, special session9, pp.229-237,1997

2) 岡二三生 : 地盤の粘弾塑性構成式, 森北出版, pp.44-62,2000

3) 高治一彦他 : 緩衝材長期挙動構成モデルの検討 (その 1), 土木学会第58回年次学術講演会, pp.367-368,2003

4) 高治一彦他 : 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041,1999

5) Siomi, T., Shigeno, Y., Zienkiewicz, O.C. : Numerical prediction for model No.1. *Proc. of the Int. conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems /Davis California USA/* pp.218-220, 1993

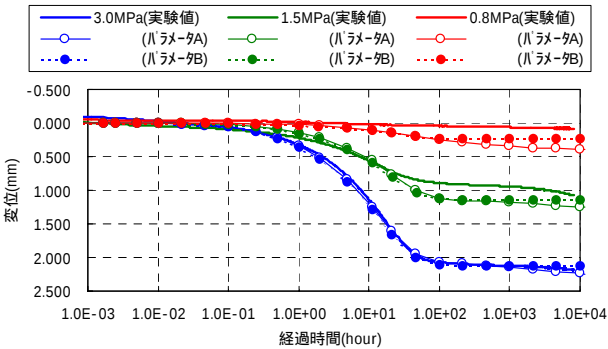


図 1 圧密試験による時間 - 変位関係

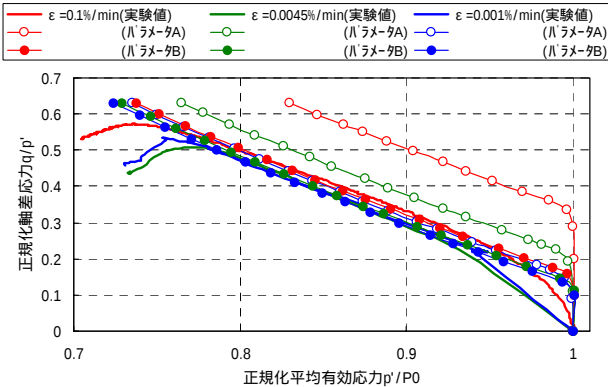


図 2 ひずみ速度の異なる三軸試験による正規化応力履歴