

ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験（その4）静的力学特性に関する検討

ハザマ 正会員 ○山田淳夫, 足立有史, 千々松正和, 雨宮清
東電設計 正会員 金子岳夫
日本原燃 正会員 伊藤裕紀, 庭瀬一仁

1. はじめに

低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設における低透水層の候補材料としてベントナイトが考えられており、その基本特性の把握を行うことが必要とされている。低透水層には種々の外力が作用することが想定されている。この外力に対する低透水層の力学・変形挙動を明らかにすることは、余裕深度処分施設に対する安全性を適切に評価する上で非常に重要となる。本研究は、施設の長期安定性を解析的に評価するために低透水層の圧密特性・せん断特性に関するパラメータを取得したのでその結果を報告する。

2. 試験の概要

本研究の試験内容を表-1 にまとめる。供試体は全て室内にて圧縮成型し初期含水比は計算上の飽和含水比とした。使用したベントナイトはクニゲル GX を、最大粒径 $G_{\max}$ を 2.0mm に調整したものを用いた（CUB-16-95a のみ $G_{\max}$ 9.5mm）。試験としては標準圧密試験、長期圧密試験、圧密非排水三軸圧縮試験（以下、CUB 試験）を行った。試験方法は JIS 規格および JGS 基準に準拠したが、圧密試験は $\phi 40\text{mm} \times h20\text{mm}$ の寸法の供試体を用い、CUB 試験は表-1 のとおりひずみ速度を変化させて数ケース行った。

3. 試験結果

(1) 標準圧密試験（SC-12, SC-14, SC-16）

表-1 に示した試験ケースのうち、初期乾燥密度 1.2, 1.4, 1.6Mg/m³ の試料を対象に標準圧密試験を行った。圧密圧力は 0.6MPa より開始し、最大圧力 4MPa までを 8 段階で载荷し、4 段階で除荷した。载荷 1 段階ごとの圧密終了は 3t 法により判断した。試験中の測定項目は沈下量と時間である。

図-1 に $e-\log P$ 曲線を示す。通常の土質試料とは異なり、曲線が S 字カーブとなる結果となった。また、SC-16 のケースでは、最終間隙比が最も高くなった。 $e-\log P$ 曲線より圧縮指数 λ , 膨潤指数 κ を求めた。初期乾燥密度と λ , κ の関係は後述する表-2 にまとめた。

(2) 長期圧密試験（SC-L）

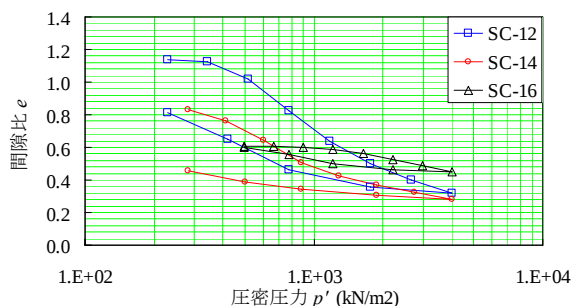
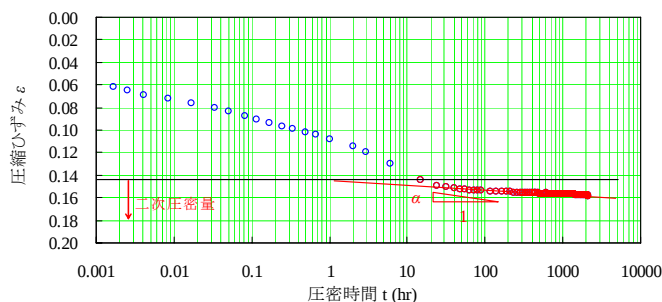
長期圧密試験は、二次圧密係数 α と初期体積ひずみ速度 $\dot{v}_0$ を取得することを目的に行った。一次圧密終了時間は $\sqrt{t}$ 法により推定した。一次圧密時間は約 15 時間であった。二次圧密係数 α は図-2 に示す圧縮ひずみ $\varepsilon-\log \sqrt{t}$ 関係より、一次圧密終了後に現われた圧密時間 300 時間以内の直線部分の勾配より求め、 $\alpha=3.15\text{E-}03$ であった。初期体積ひずみ速度 $\dot{v}_0$ は二次圧密係数 α と一次圧密終了時間より求めた。これらの値は後述する表-2 にまとめた。

キーワード ベントナイト, 圧密試験, 三軸圧縮試験

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 ハザマ技術研究所 TEL:029-858-8813

表-1 試験ケースと試験条件

	ケース名	供試体寸法		初期乾燥密度 Mg/m ³	含水比 %	圧密圧力 MPa	せん断速度 %/min
		直径 mm	高さ mm				
圧密試験	SC-12	40	20	1.2	45.6	0.6~4.0	—
	SC-14			1.4	33.7	8段階载荷	
	SC-16			1.6	24.8	4段階除荷	
	SC-L			1.6	24.8	3.5	
三軸圧縮試験	CUB-12-20a	50	100	1.2	45.6	1.0, 2.5, 4.0	0.01
	CUB-14-20a			1.4	33.7	1.0, 2.5, 4.0	0.01
	CUB-16-20a			1.6	24.8	1.0, 2.5, 4.0	0.01
	CUB-16-20b			1.6	24.8	1.0, 2.5, 4.0	0.05
	CUB-16-20c			1.6	24.8	1.0, 2.5, 4.0	0.1
	CUB-16-20d			1.6	24.8	1.0, 2.5, 4.0	0.001
	CUB-16-20a2			1.6	24.8	1.0, 2.5, 4.0	0.01
	CUB-16-95a			1.6	24.8	1.0, 2.5, 4.0	0.01

図-1 標準圧密試験の $e-\log P$ 曲線図-2 長期圧密試験の $\varepsilon-\log t$ 曲線

(3) 圧密非排水三軸圧縮試験（CUB 試験）

図-3 に有効応力経路の結果を示す．試験条件の違いによる影響は初期乾燥密度が大きいほど，粒径が大きいほど，また，軸ひずみ速度が大きいほど強度定数が大きくなる傾向となった．表-2 に CUB 試験で得られた粘着力 c' ，内部摩擦角 ϕ' ，限界状態パラメータ M をまとめた．

今回の試験では，軸圧縮応力 q を有効応力 p' で正規化した値 q/p' と軸ひずみ速度関係を，圧密圧力が 2.5MPa のときと 4.0MPa のケースについて整理した．図-4 に 2.5MPa のときの例を示す．同図では，有効応力 p' を有効圧密応力（圧密圧力） p_0' で正規化した値 p'/p_0' が 0.95, 0.90, 0.85 のときの q/p' の値をプロットしている．足立-岡モデルの粘塑性パラメータを図-4 の直線の勾配（圧密圧力 2.5MPa と 4.0MPa）より求めた結果と，長期圧密試験で得られた関口 - 太田モデルのパラメータと足立 - 岡モデルとの相関性より推定した推定値を，表-2 にまとめた．

4. 取得パラメータの評価

表-2 に圧密試験および三軸圧縮試験によって取得したパラメータの一覧を示す．今回の試験は初期乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ を基本として行った．既往のクニゲル V1 に関する研究で得られた結果^{1), 2), 3), 4)}と比較すると，圧縮指数 λ ，膨潤指数 κ ，二次圧密係数 α ，限界状態パラメータ M の値は同等の値が取得できた．しかし，粘塑性パラメータ m' は既往の研究より一桁小さく， C は十桁大きい値となった．これらの値を用いて既往の研究と同様の解析³⁾を行った場合，自重沈下などの変形速度は大きくなることが予想される．しかし，既往の研究結果³⁾では長期の沈下量自体が 10000 年後で $1.0\times10^{-3}\text{mm}$ と小さいことから，パラメータを変更した場合でも解析結果に大きな変化が生じる可能性は小さいと考えられる．

5. まとめ

クニゲル GX を対象とした力学特性のパラメータ取得を目的として圧密試験，圧密非排水三軸圧縮試験を行い，乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ を中心としたパラメータの取得を行った．クニゲル V1 を対象とした既往研究との比較を行った結果，粘塑性パラメータ (m' 、 C) に差異が見られたが，その他の力学特性パラメータについては概ね整合する値が得られた．

参考文献

1) 石川ほか：緩衝材の圧密特性，PNC TN8410 97-051, 1997.2
2) 株式会社竹中工務店：緩衝材長期力学挙動の信頼性向上（核燃料サイクル開発機構業務委託報告書），JNC TJ8440 2004-011, 2005.2
3) 堀越ほか：余裕深度処分施設におけるベントナイト低透水層の長期安定性に関する検討，土木学会第62回年次学術講演会，CS5-021, 2007.9
4) 石川ほか：緩衝材のせん断特性 1，PNC TN8410 97-074, 1997.2

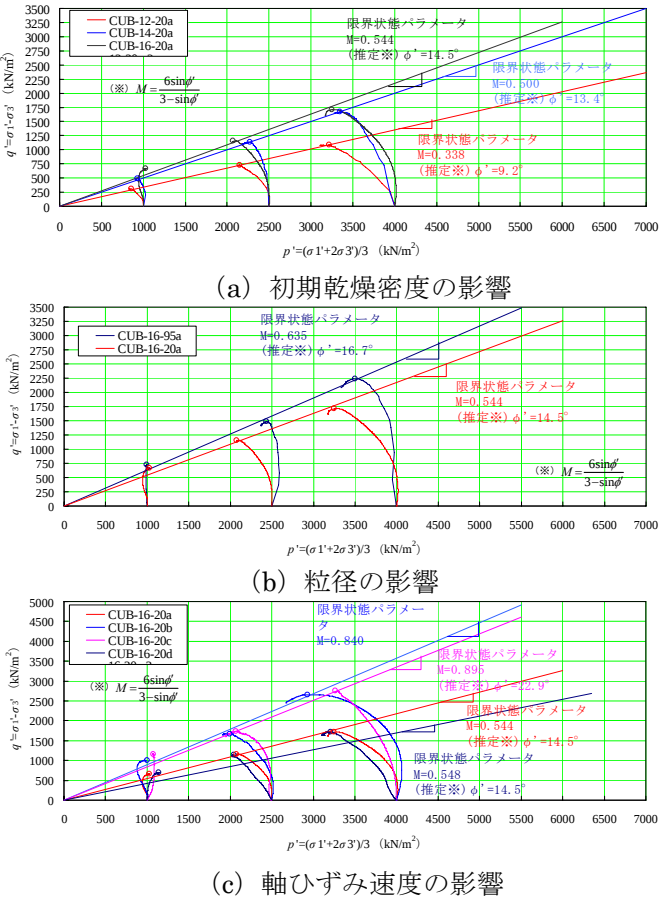


図-3 有効応力経路

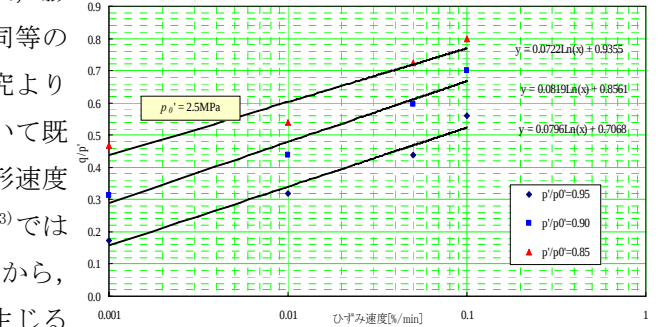


図-4 q/p' -軸ひずみ速度関係の例

表-2 取得パラメーター一覧

初期乾燥密度	圧密試験				CUB試験					
	圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	二次圧密係数 α	初期体積ひずみ速度 $\dot{v}_0$ (%/hr)	軸ひずみ速度 (%/min)	限界状態パラメータ M	粘着力 c' (kPa)	内部摩擦角 ϕ' (deg)	粘塑性パラメータ	
									m'	C (1/hr)
ρ_d (Mg/m ³)										
1.2	0.391	0.265	-	-	0.01	0.338	16.6	8.9	-	-
1.4	0.252	0.061	-	-	0.01	0.500	18.3	13	-	-
1.6 (Gmax2.0mm)	0.117	0.087	3.15E-03	1.05E-05	0.01	0.544	334	17.7	9.09	7.92E-04
					0.01	0.551	60.4	13.4	(実験 2.5MPa)	(実験 2.5MPa)
					0.05	0.895	62.9	21.5	7.69	1.18E-03
					0.1	0.839	156	18.8	(実験 4.0MPa)	(実験 4.0MPa)
					0.001	0.548	68.9	13.1	5.88 (推定値)	1.82E-05 (推定値)
1.6 (Gmax9.5mm)	-	-	-	-	0.01	0.635	45.1	15.9	-	-