

ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験（その 5）動的力学特性に関する検討

ハザマ 正会員 ○雨宮清，足立有史，山田淳夫，千々松正和
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．この低透水層には，静的な外力が長期にわたって作用するほか，わが国のような地震の多い地域においては地震外力が作用する可能性が高い．地震外力に対する人工バリアシステムの健全性を検討するためには，地震応答解析や安定性解析による評価が必要であり，それらの解析に用いる動的力学特性を適切に把握することが重要である．本研究では，ベントナイト低透水層の微小ひずみから破壊までを対象とした動的力学特性に関する基礎的データの取得を目的に室内要素試験を実施した．

2. 試験概要

動的力学特性に関する試験内容一覧を表-1 に示す．表-1 に示すパラメータ取得を目的に弾性波速度試験，動的変形試験，動的強度試験の 3 種類の試験を実施した．使用したベントナイトはクニゲル GX で，最大粒径 G_{max} を 2.0mm に調整している．供試体は全て直径 50mm 高さ 100mm とし，所定の含水比に調整したベントナイト材料を 5 層に分け室内圧縮成型により作製した．変形特性試験，動的強度試験は圧密非排水条件（CU バー条件）で実施した．

3. 試験結果

(1) 弾性波速度試験

弾性波速度試験は，「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法（JGS 2110-1998）」²⁾に準拠した．ここで，飽和供試体は，飽和度 100%に相当する含水比で圧縮成型した試料を飽和セルで約 2 ヶ月間飽和したものを使用した．表-3 に試験結果一覧を示す．飽和試料における V_p は約 1750m/sec と不飽和試料($S_r=85\%$)に比べ 2 倍近い値を示しており，一般の飽和土と同等な結果となった．一方， V_s は，飽和度の増加に対して，横ばいあるいは若干の低下傾向にあるが，これは含水比の増加に伴い供試体の剛性が低下していることが想定される．図-1 に弾性波速度(V_p, V_s)と含水比の関係についてクニゲル V1 との比較を示すが， V_p, V_s とも概ね同様な傾向を示している．

(2) 変形特性試験($G/G_o \sim \gamma$ ， $h \sim \gamma$ 関係)

表-1 動的力学特性試験一覧

試験対象パラメータ	試験方法	試料条件	対象ひずみレベル
P波速度 V_p (m/sec)	弾性波速度試験	乾燥密度 $\rho_d: 1.6\text{g/cm}^3$ 含水比 $w: 21\%, 24.8\%$	10^{-4} % 程度 弾性(微小)
S波速度 V_s (m/sec)			
ポアソン比 ν			
初期せん断弾性係数 G_o (MPa)	変形特性を求めるための繰返し三軸試験	乾燥密度 $\rho_d: 1.6\text{g/cm}^3$ 含水比 $w: 21\%, 24.8\%$	$10^{-3} \sim 10^0$ % 程度 弾塑性(比較的小)
変形特性 $G/G_o - \gamma$ ， $h - \gamma$ 関係			
動的強度特性 $\sigma_d/2\sigma'_c - N_c$ 動的強度	土の繰返し非排水三軸試験 液状化強度を求める方法に倣う方法 不規則波による多段階載荷	乾燥密度 $\rho_d: 1.6\text{g/cm}^3$ 含水比 $w: 24.8\%$	$10^0 \sim 10^1$ % 程度 破壊(中～大)

表-2 試験条件（変形特性，動的強度試験）

試験名	試験方法	圧密圧力(MPa)	載荷波形	載荷周波数(Hz)
変形特性	繰返し三軸試験	0.6	正弦波	0.2
動的強度	液状化強度試験	1.0	正弦波 $\sigma_d/2\sigma'_c \approx 0.3, 0.27, 0.2$	0.1
	動的強度試験 (多段階載荷)	1.0	正弦波	1.0
			不規則波	時間軸を原波の5倍

表-3 弾性波速度試験結果

供試体条件	供試体No	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	含水比 $w(\%)$	飽和度 $S_r(\%)$	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	ポアソン比 ν	せん断剛性 G (MPa)	ヤング率 E (MPa)	体積弾性係数 K (MPa)
不飽和	21-1	1.592	21.2	84	988	395	0.41	300	844	1483
	21-2	1.595	21.2	85	988	395	0.41	301	846	1486
	21-3	1.595	21.2	85	969	395	0.40	301	844	1415
飽和 (飽和セル)	24-1	1.604	25.8	105	1756	346	0.48	242	715	5896
	24-2	1.600	26.0	105	1768	323	0.48	211	624	6019
	24-3	1.597	25.1	101	1776	338	0.48	228	675	5999

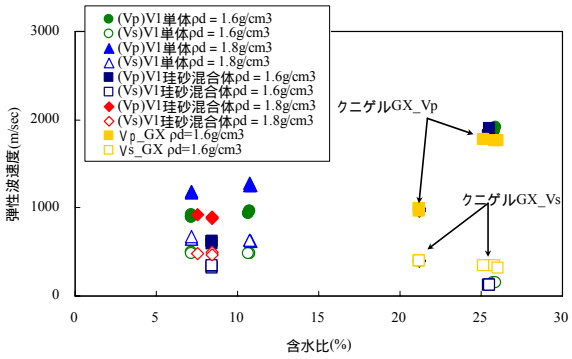


図-1 弾性波速度と含水比の関係

キーワード ベントナイト，弾性波速度，動的変形特性，動的強度

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

試験は「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法 (JGS 0542-2000)」³⁾ に準拠した。試験は2種類の含水比(飽和, 不飽和)について, 膨潤圧相当の圧密圧力に対して実施した。図-2 に $G/Go \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係を示す。また, 同図には修正 R-O モデル²⁾によるフィッティング結果も合わせて示している。

表-2 に修正 R-O モデルによるフィッティングパラメータを示す。これらの結果から $G/Go \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 曲線ともに, R-O モデルにより精度良くフィッティングされていることがわかる。

(3) 動的強度試験 (CU バー条件)

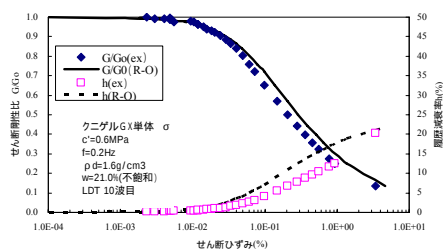
表-1 に示すの方法では, 破壊(所定の両振幅軸ひずみ DA)に達するまでの繰返し軸荷回数 N_c と繰返し応力振幅比との関係を動的強度特性ととらえ, この関係を得る試験方法として, 「土の繰返し非排水三軸試験方法 (JGS 0541-2000)」³⁾ に準拠した。一方, この方法では, 不規則波および正弦波を用い, 振幅を増加させながら供試体が破壊するまで繰返し軸荷する多段階繰返し軸荷試験とした。最大軸差応力増分は, 6 段階程度で破壊するように一定に設定した。各軸荷段階の前に繰返し軸荷の最大軸差応力の $1/2$ の軸差応力を軸荷している。なお, 不規則波入力波形を図-4 に示すが, これは, 対象とする構造物の動的応答解析結果における応答加速度波形の時間軸を5倍に引き伸ばしたのである。動的強度試験では, この波形の振幅を増加させ繰返し作用させている。動的強度試験の結果は, 同様な圧密圧力で実施された静的な三軸試験 (CU バー) との比較により, 動的強度と静的強度の関係を評価することができる。多段階軸荷試験における軸差応力 - 軸ひずみ関係を図-5 に示す。この図には, 同様な供試体条件で実施された静的三軸試験 (CU バー) の結果も併記している。動的強度試験および静的試験とも軸差応力は軸ひずみが 10% を超えるあたりからほぼ一定に値となり, その最大値は, 動的試験 (不規則) が 0.8, 動的試験 (正弦波) が 0.76, 静的試験が 0.67 となり, 動的強度が静的強度を上回る結果となった。

4. まとめ

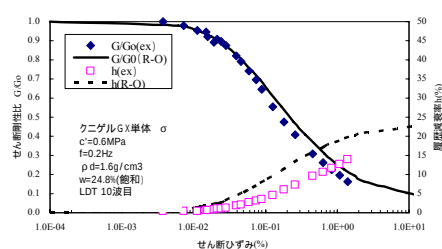
ベントナイト(クニゲル GX)の基礎的な動的力学特性を把握するため, 弾性波速度試験, 変形特性試験, 動的強度試験を実施し, 地震応答解析に用いる材料パラメータの取得を行った。本試験の主な結果は, 弾性波速度はクニゲル V1 と同程度であり, 動的強度は静的強度を上回るものであった。

参考文献

- 1) 高治一彦, 谷口航: 緩衝材の動的力学特性, JNC TN8400 99-042, 1999.
- 2) 社団法人地盤工学会: 岩の試験・調査方法の基準・解説書 - 平成 14 年度版 -, pp1-18, 2003.
- 3) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説 - 第一回改訂版 -, 2000.
- 4) 足立紀尚, 龍岡文夫: 新体系土木工学 18 土の力学() 技報堂出版, pp. 204-250, 1981.



(a) 不飽和($w=21.0\%$)



(b) 飽和($w=24.8\%$)

図-2 変形特性($G/Go \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係)

表-2 R-O パラメータ設定

供試体種別	飽和 ($\rho_d = 1.6\text{Mg/m}^3$)	不飽和 ($\rho_d = 1.6\text{Mg/m}^3$)
含水比 $w(\%)$	24.8	21.0
飽和度 $S_r(\%)$	100	85
R-O パラメータ	$h_{\max}$	0.25
	$\tau_f(\text{MPa})$	0.254
	α	4.643
	β	2.293

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left(1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right) \quad \text{減衰定数} \quad h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)$$

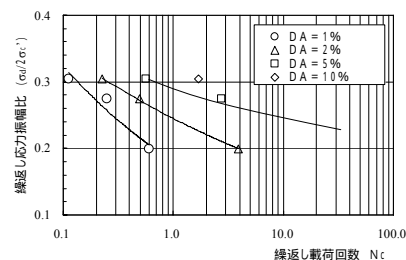


図-3 繰返し回数 - 繰返し振幅比
($\sigma_c = 1.0\text{MPa}$)

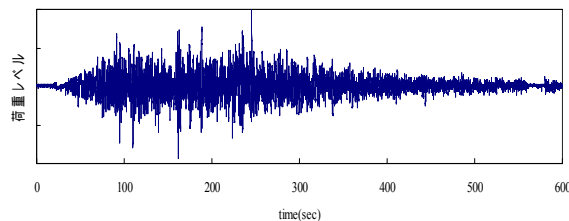
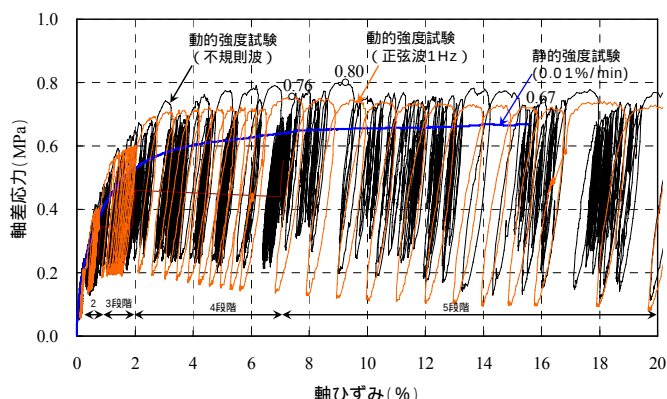


図-4 不規則波入力波形



(表中 “ $\leftrightarrow$ ”は不規則波軸荷時の軸荷段階を示す)
図-5 軸差応力-軸ひずみ関係($\sigma_c = 1.0\text{MPa}$)