

ひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験による岩石の载荷速度依存性の評価

応用地質(株) 正会員 ○小野正樹
 東京大学 羽柴公博

鹿島建設(株) フェロー会員 瀬尾昭治 正会員 石橋正祐紀
 原子力発電環境整備機構 國丸貴紀
 電力中央研究所 佐藤 稔 西本壮志

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下 300m 以深の安定した岩盤への処分が行われる¹⁾。地下構造物の力学的安定性の観点から、岩盤を構成している岩石のクリープ変形や応力緩和といった時間依存性挙動を把握することは重要であり、特に長期間の岩盤の安定性評価を求められる地層処分システム的设计においては、この時間依存性を適切に評価することが求められる。本稿では、岩石の時間依存性挙動の一種である岩石強度の载荷速度依存性に着目し、国内の新第三紀凝灰質砂岩とスイスのオパリナスクレイに対してひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験を行い、これら岩石の载荷速度依存性を検討した結果について報告する。

2. 岩石の载荷速度依存性

岩石の破壊強度は载荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例することが知られている²⁾。 n は载荷速度依存性の程度を表す定数であり、これまでの研究からクリープ寿命の応力依存性などもこの n を用いて表現できることが明らかになっている³⁾。従来の研究では、異なる複数の载荷速度で多くの圧縮試験を行うことにより n が求めてられてきたが、ボーリング掘削で同一箇所の同一深度で多数の圧縮試験用コア供試体を採用することは困難である。このため本研究では、大久保ら⁴⁾が提案したひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験により n を求めた。本手法では、図-1 に示したように圧縮試験中に2種類のひずみ速度 C_1 、 C_2 を交互に変化させ、それぞれのひずみ速度に対応した応力～ひずみ曲線を滑らかに繋ぐことで各ひずみ速度に対応した応力～ひずみの近似曲線を描く。 n はこれら近似曲線の最大応力 σ_1 、 σ_2 から式(1)により得ることができる³⁾。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{\frac{1}{n+1}} \cdots (1)$$

3. 供試体と試験条件

供試体と試験条件を一覧にして表-1 に示す。試験には、スイスの放射性廃棄物管理共同組合 (Nagra) より提供を受けたオパリナスクレイ (硬質泥岩) と電力中央研究所横須賀地区構内でのボーリング試験で得られた三浦層群のコア (新第三紀凝灰質砂岩) の2岩種を用い、各岩種で一軸試験4本、三軸試験2本の試験を行った。一軸試験のひずみ速度は岩種によらず $1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ を基本

とし、 C_2/C_1 が 2.5 または 10 となるように設定した。三軸試験のひずみ速度は、オパリナスクレイについては、せん断中の間隙水圧を正確に測定するために既往研究^{5),6)}を参考にして $C_1=3.3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に設定し、 C_2/C_1 を 2.5 とした。

キーワード 岩石, 圧縮試験, 载荷速度依存性, 時間依存性

連絡先 〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2 応用地質(株) コアラボ試験センター TEL 048-663-8611

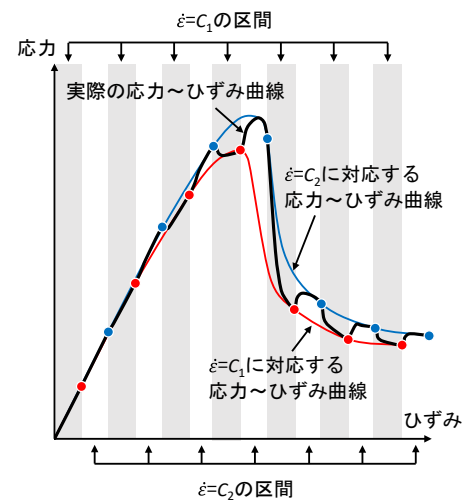


図-1 ひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験の概念図

表-1 試験に用いた供試体と試験条件

岩種	供試体	試験種別	圧密応力 σ_c MN/m ²	ひずみ速度		速度切替え間隔	
				C_1 s ⁻¹	C_2 s ⁻¹	$\Delta \epsilon_1$	$\Delta \epsilon_2$
オパリナスクレイ	OPA-U1	一軸	0.0	1.7×10^{-5}	4.3×10^{-5}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	OPA-U2			1.7×10^{-5}	4.3×10^{-5}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	OPA-U3			1.7×10^{-5}	1.7×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	OPA-U4			1.7×10^{-5}	1.7×10^{-4}	5×10^{-4}	1.5×10^{-3}
	OPA-T1	三軸CUB	4.0	3.3×10^{-7}	8.3×10^{-7}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	OPA-T2			3.3×10^{-7}	8.3×10^{-7}	1×10^{-3}	1×10^{-3}
三浦層群	MIURA-U1	一軸	0.0	1.7×10^{-5}	4.3×10^{-5}	3×10^{-3}	3×10^{-3}
	MIURA-U2			1.7×10^{-5}	4.3×10^{-5}	5×10^{-4}	5×10^{-4}
	MIURA-U3			1.7×10^{-5}	1.7×10^{-4}	3×10^{-3}	3×10^{-3}
	MIURA-U4			1.7×10^{-5}	1.7×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}
	MIURA-T1	三軸CD	1.46	8.3×10^{-7}	2.1×10^{-6}	5×10^{-3}	5×10^{-3}
	MIURA-T2			8.3×10^{-7}	2.1×10^{-6}	5×10^{-3}	5×10^{-3}

三浦層群については、JGS2534「岩石の圧密排水（CD）三軸圧縮試験」の平均的なひずみ速度である $8.3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ を C_1 とし、 C_2/C_1 はオパリナスクレイと同様に 2.5 とした。ひずみ速度切替え間隔 $\Delta \varepsilon$ は、事前に実施した通常の一軸または三軸試験の破壊ひずみを参考にして設定し、試験結果に応じて後続の試験の切替え間隔を適宜調整した。

4. 試験結果

一軸条件下で実施したひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験結果の例を図-2 に示す。各ひずみ速度に対応した応力～ひずみ曲線の近似は、羽柴ら⁷⁾を参考にして3次スプライン補間により行った。どちらの試験でも近似曲線は応力～ひずみ曲線とよく重なっており、それぞれのひずみ速度を代表する応力～ひずみ曲線を得ることができた。オパリナスクレイでは OPA-U1～U4 の全てで n を得ることができ、平均 n は 54（最小 48，最大 65）であった。三浦層群では、MIURA-U1，U3 の結果を踏まえて速度切替え間隔を短くした MIURA-U2，U4 の結果から n を求めることができ、平均 n は 32（最小 29，最大 35）であった。三軸条件で実施した試験結果の例を図-3 に示す。一軸試験と同様に、各ひずみ速度に対応する近似曲線を得ることができた。オパリナスクレイでは、OPA-T1 の結果を踏まえて実施した OPA-T2 で応力～ひずみ曲線をきれいに近似することができ、得られた n は 36 であった。三浦層群の MIURA-T1，T2 については平均 n が 35（最小 34，最大 35）となった。結果をまとめると、三浦層群では一軸と三軸の n にそれほど差が生じなかった。一方、オパリナスクレイでは拘束圧を加えた三軸条件のピーク強度が一軸条件よりも低くなり、 n も三軸条件のほうが小さくなった。オパリナスクレイの強度特性は含水状態に強く依存し、含水比が低いほど強度が高いことが知られている⁸⁾。今回の三軸試験では、水飽和過程でサクシジョンの消失による強度低下が生じ、これが n の差として現れたのではないかと推察される。

5. おわりに

硬質泥岩と凝灰質砂岩を用いて一軸および三軸条件下でひずみ速度を交互に切り替える圧縮試験を行った。得られた応力～ひずみ曲線に3次スプライン補間を適用することにより、1本の供試体から n を評価することができた。また、従来はひずみ速度 C_1 、 C_2 の切替え間隔を一定にした試験が行われてきたが、本研究では C_1 、 C_2 の切替え間隔を別々に設定した試験も行った。このような工夫により、実際の応力～ひずみ曲線に対応した高品質な近似曲線が得られる場合があることを確認できた。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構：放射性廃棄物の地層処分，2020。
- 2) Brace, W. F. and Jones, A. H.: Comparison of uniaxial deformation in shock and static loading of three rocks, Geophys, Vol.76, pp.4913-4921, 1971.
- 3) 羽柴公博，福井勝則：岩石の時間依存性を表す指標とその利用に関する一考察，Journal of MMJ, Vol.129, pp.553-558, 2013.
- 4) 大久保誠介，福井勝則，木村有仁：土丹の力学的特性と構成方程式，トンネルと地下，Vol.33, No.1, pp.45-50, 2002.
- 5) Amann, F. and Vogelhuber, M.: Assessment of Geotechnical Properties of Intact Opalinus clay. ENSI, 2015.
- 6) Minardi, A., Giger, S., Ewy, R., Stankovic, R., Stenebråten, J., Soldal, M., Rosone, M., Ferrara, A. and Laloui, L.: Benchmark study of undrained triaxial testing of Opalinus Clay shale: Results and implications for robust testing, Geomechanics for Energy and the Environment, 25, 2021.
- 7) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則：岩石のピーク強度および残留強度の載荷速度依存性，Journal of MMJ, Vol.121, pp.11-18, 2005.
- 8) Florian Amann, Katrin M. Wild, Simon Loew, Salina Yong, Reto Thoeny, Erik Frank: Geomechanical behaviour of Opalinus Clay at multiple scales: results from Mont Terri rock laboratory (Switzerland), Swiss Journal of Geosciences, Vol.110, pp.151-171, 2017.

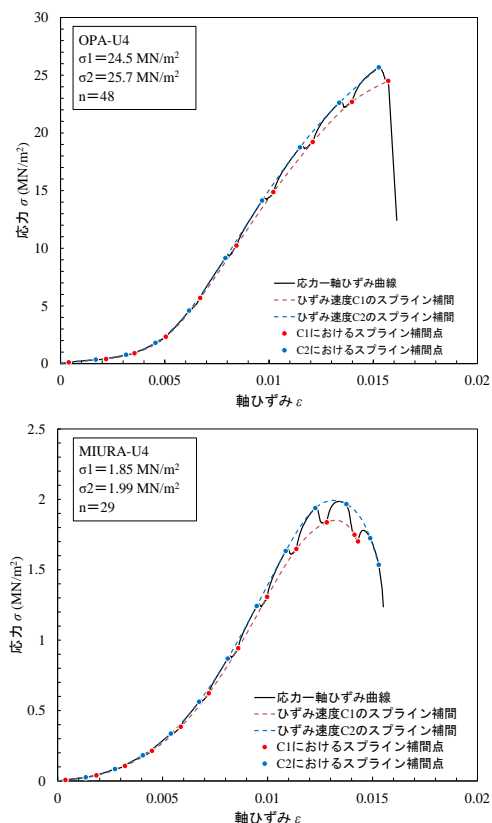


図-2 一軸条件での試験結果
(上:オパリナスクレイ, 下:三浦層群)

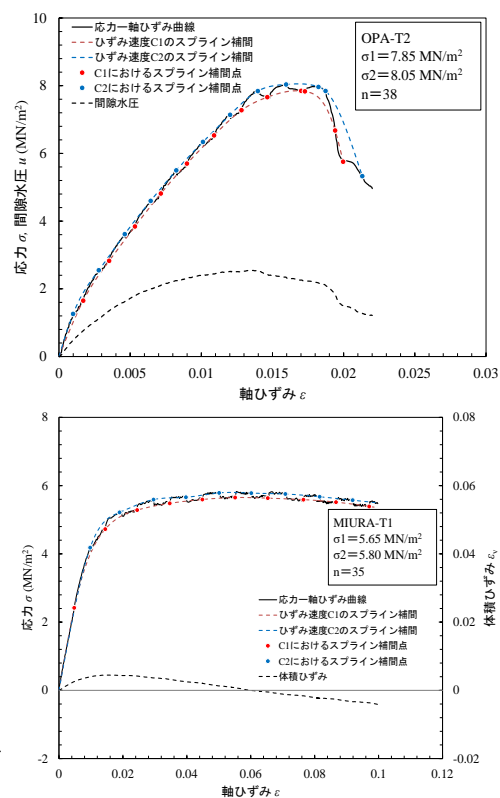


図-3 三軸条件での試験結果
(上:オパリナスクレイ, 下:三浦層群)