

III-244

載荷速度が岩石の変形・強度特性に与える影響

清水建設(株) 正会員 ○石塚与志雄・安部透 北海道大学 児玉淳一  
 中部電力(株) 正会員 東側豊二・新実佳朗・河村精一

1. はじめに 岩石の圧縮強度は載荷速度に依存し、載荷速度の増加とともに強度も増加する<sup>1)</sup>。この現象は、応力腐食による岩石内部の微小亀裂の伸長とひずみ速度とを関係づけたモデル<sup>2) 3)</sup>などにより説明されてきている。また、それを発展させた連続体損傷モデル<sup>4)</sup>も提案されている。本研究では、3岩種について岩石試験を行い、含水状態および側圧による強度のひずみ速度依存性を調べるとともに、非弾性体積ひずみを損傷変数と選び、載荷速度・応力状態をパラメータとして岩石の損傷発展について議論する。

2. 岩石と試験概要 軟岩・中硬岩・硬岩として大谷石(栃木県宇都宮)、三城目安山岩(福島県須賀川)、伊奈川花崗岩(愛知県足助)を選んだ。各岩石の気乾状態の物理・力学定数を表-1に示す。ここで、一軸圧縮強度はひずみ速度が $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の時の値である。試験は一軸圧縮とし載荷方法は応力制御とした。ひずみ速度で $10^{-7} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲になるように、応力速度 $\dot{\sigma}$ を100MPa/sから0.002MPa/sの範囲で変化させた。含水状態は、気乾と飽和の2条件である。三軸圧縮試験は気乾状態の伊奈川花崗岩について実施した。側圧は5, 10, 15MPaの3ケースである。

3. 試験結果と考察

(1) 載荷速度による圧縮強度の変化 大谷石、三城目安山岩の静的強度-ひずみ速度関係を図-1, 2に、三軸圧縮下の伊奈川花崗岩のひずみ速度依存性を図-3に示す。いずれも、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ または応力速度 $\dot{\sigma}$ を対数したグラフ上で線形関係となり、つぎのような式( $\sigma_c = a + b \log \dot{\epsilon}$  (1))で表すことができる。三軸圧縮下は最大差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )である。

含水状態の影響	【大谷石】	【三城目安山岩】	【伊奈川花崗岩】
● 気乾状態	$16.03 + 0.678 \log \dot{\epsilon}$	$130.4 + 5.734 \log \dot{\epsilon}$	$238.0 + 13.75 \log \dot{\epsilon}$
● 飽和状態	$9.05 + 0.688 \log \dot{\epsilon}$	$102.7 + 6.871 \log \dot{\epsilon}$	$202.0 + 12.56 \log \dot{\epsilon}$

側圧の効果(伊奈川花崗岩, 気乾状態)

5MPa:  $285.7 + 7.48 \log \dot{\epsilon}$     10MPa:  $346.6 + 10.44 \log \dot{\epsilon}$     15MPa:  $398.2 + 11.21 \log \dot{\epsilon}$

載荷速度の減少による強度低下が最も高いのは伊奈川花崗岩であり、 $\dot{\epsilon}$ が $10^{-4}$ 低下すると約30%低下する。一方、大谷石では約20%の低下である。気乾と飽和とを比較すると、大谷石では1/2以下、三城安山岩では30~40%低下する。このよ

表-1 岩石の物性

岩石	単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> )	一軸圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	P波速度 (km/sec)	有効間隙率 (%)
大谷石	1.47	12.8	1.8	3.09	2.14	36.7
三城目安山岩	2.21	103.6	6.2	14.2	3.64	16.0
伊奈川花崗岩	2.70	169.0	7.5	58.9	4.46	0.6

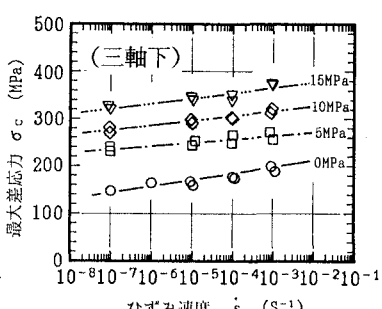
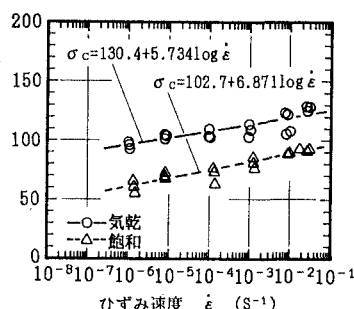
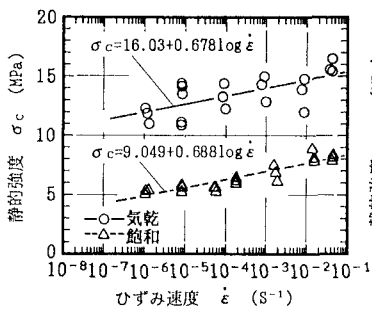


図-1 大谷石の $\sigma_c - \dot{\epsilon}$ 関係 図-2 三城目安山岩の $\sigma_c - \dot{\epsilon}$ 関係 図-3 伊奈川花崗岩の $\sigma_c - \dot{\epsilon}$ 関係

うに、載荷速度・含水状態による強度変化は岩種により異なる。三軸下では各載荷速度ともモール・クーロン則に従って強度は増加するが、ひずみ速度依存性は一軸圧縮下と比べて若干小さくなる。

(2) 非弾性体積ひずみと岩石の損傷 伊奈川花崗岩の応力 $\sigma$ -体積ひずみ $\epsilon_v$  曲線を図-4に示す。点Iまでは弾性範囲(領域II)であるが、I点から岩石内部の亀裂伸長に伴う体積膨張が開始するようになる。点Yを超えると体積膨張が著しくなり破壊に至る。弾性の体積ひずみと実際の体積ひずみとの差である非弾性体積ひずみ $\epsilon_{iv}$ (図-4参照)は岩石内部の損傷に対応する物理量と考えられる<sup>2)</sup>。各岩石の非弾性体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{iv}$ (損傷の増加率)と載荷応力 $\sigma$ の関係は図-5, 6, 7のようになる。領域IIIにおける $\log \dot{\epsilon}_{iv}$ と $\sigma$ の関係は線形関係となり、次式のように各載荷速度( $\dot{\epsilon}$ )毎に応力( $\sigma$ )の関数として表すことができる。

$$\log \dot{\epsilon}_{iv} = c + d\sigma \quad (2)$$

各岩石の載荷速度に対する定数 $c, d$ を表-2に示す。載荷速度が増大すると $c$ も増大し、同一応力でも載荷速度が大きいほど単位時間当たりの損傷は大きい。一方、 $d$ は載荷速度によらず各岩石、側圧でほぼ同一となる。応力増分に対する損傷発展率は載荷速度に係わらず一定と言える。領域IIIに生じる非弾性体積ひずみを各載荷速度について求める(式(2)を点I~Y間で積分)と、その値はほぼ一定値(表-2の下段参照)となる。よって、領域IIIにおける岩石の累積損傷は載荷速度によらず一定と推定される。

#### 4. おわりに

岩石強度の載荷速度依存性は岩種によらず同一の式(1)で表すことができるが、載荷速度、含水状態による強度変化は岩種によって大きく異なる。一方、損傷発展率(非弾性体積ひずみ速度)は載荷速度と応力状態をパラメータとして表現できる。また、損傷が急増する点(点Y)までの累積損傷は載荷速度によらず一定となる。

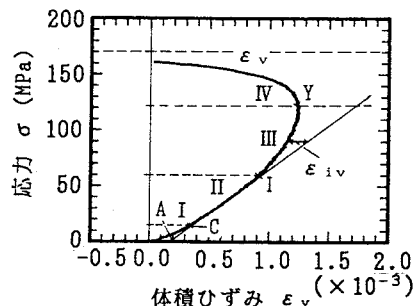


図-4 応力-体積ひずみ関係

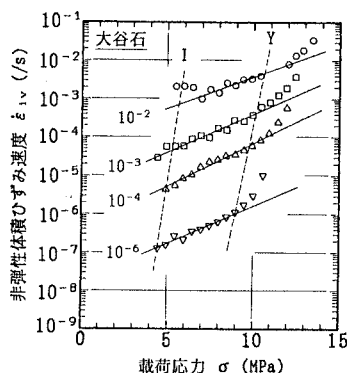


図-5 大谷石の $\dot{\epsilon}_{iv}$ - $\sigma$ 関係

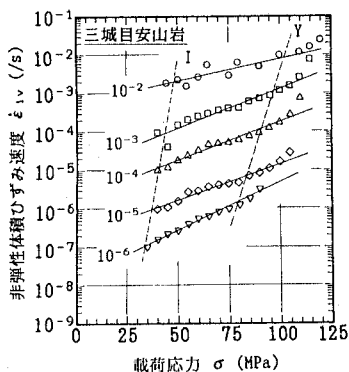


図-6 三城目安山岩の $\dot{\epsilon}_{iv}$ - $\sigma$ 関係

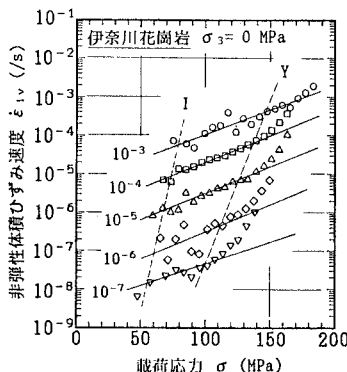


図-7 伊奈川花崗岩の $\dot{\epsilon}_{iv}$ - $\sigma$ 関係

表-2 各岩石・側圧の載荷速度に対する $c, d$

ひずみ速度	大谷石		三城目安山岩		伊奈川花崗岩 (0 MPa)		伊奈川花崗岩 (5 MPa)		伊奈川花崗岩 (15 MPa)	
	c	d	c	d	c	d	c	d	c	d
$10^{-3}$	-5.39	0.199	-4.93	0.0205	-5.25	0.0127	-6.10	0.0140	-5.48	0.00825
$10^{-4}$	-6.40	0.224	-5.71	0.0198	-6.08	0.0138	-6.65	0.0134	-6.93	0.0102
$10^{-5}$	—	—	-6.70	0.0187	-6.89	0.0138	-8.45	0.0159	-7.75	0.00969
$10^{-6}$	-7.74	0.194	-7.79	0.0249	-7.92	0.0141	—	—	—	—
$10^{-7}$	—	—	—	—	-8.48	0.0114	-9.94	0.0159	-8.92	0.00645
$\epsilon_{iv}$	$5.404 \times 10^{-4}$		$1.239 \times 10^{-3}$		$2.997 \times 10^{-4}$		$3.356 \times 10^{-4}$		$4.547 \times 10^{-4}$	

#### 【参考文献】

- (1) R. H. Schmidtke et al. (1985): Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 6, pp. 461-465.
- (2) 佐野, 他(1989): 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 1-5.
- (3) C. H. Scholz(1972): J. Geophys. Res., Vol. 77, No. 11, pp. 2104-2114.
- (4) L. S. Costin et al. (1986): 24th U. S. Symp. on Rock Mechanics, pp. 385-394.