

一軸引張応力下での三城目安山岩と 田下凝灰岩の載荷速度依存性

福井勝則¹・大久保誠介²・岩野圭太³

¹正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:fukui@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻 (同上)

³正会員 東京大学大学院 工学系研究科地球システム工学専攻修士課程 (同上)

本研究では、三城目安山岩と田下凝灰岩を用いて一軸引張試験を行い、載荷速度（ひずみ速度） $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ における完全応力-ひずみ曲線を得た。一軸圧縮試験と同様に、載荷速度の増加により一軸引張強度及びヤング率が増加した。載荷速度の増加によりピーク強度以降の応力-ひずみ曲線は右側に平行移動した。さらにひずみが大きい領域まで試験を行い、残留強度の載荷速度依存性も観察した。次に応力-ひずみ曲線の載荷速度依存性を既往のクリープ試験結果と比較し、両者に密接な関係のあることを示した。最後に、試験の途中で載荷速度を変化させる試験を行い、この方法によれば載荷速度依存性を比較的容易に調べられることを示した。

Key Words : *loading rate dependency, uniaxial tension, tensile strength, creep, failure process, complete stress-strain curve*

1. はじめに

岩盤構造物の長期安定性を評価する上で、岩石の時間依存性を調べることは重要である。これまでも圧縮応力下については数多くの研究がなされてきたが、引張応力下での研究は比較的少ない。しかしながら、圧縮と引張応力下での時間依存性がともにわかってこそ、岩盤の長期安定性を正確に議論できると考える。例えば岩盤構造物の長期安定性を計算機シミュレーションによって調べる際、引張応力下での時間依存性特性をも取り扱える構成方程式の確立と検証に、引張応力下での完全応力-ひずみ曲線の載荷速度依存性は必要な基礎的データである^{1), 2)}。

岩石の引張強度の載荷速度依存性に関しては、次のような研究がある。Price and Knill³⁾は、中央に孔の開いた円筒の圧裂引張試験を行い、載荷速度を2桁増加させると圧裂引張強度は粗粒玄武岩で20%程度、砂岩で60%程度増加したとしている。

Mokhnachev and Gromova⁴⁾は、5種類の岩石を用い、 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ MPa/s}$ の間で荷重速度を変化させた一軸引張試験を行い、強度は石灰岩で2.6倍、シルト岩で1.5倍となったと報告している。勝山ら⁵⁾は、ひずみ速度 10^{-8} s^{-1} の静的（圧裂引張試験）から 10^3 s^{-1} の波動領域（衝撃引張試験）までの引張強度を実験的に求めて、載荷速度が10桁変化すると強度は2倍程度になったと報告している。大久保ら⁶⁾は、三城目安山岩を用いて、一軸引張試験における応力-ひずみ曲線の載荷速度依存性を調べ、載荷速度が大きくなると、小さい場合を内包するとしている。また、圧裂引張強度の載荷速度依存性も調べており、載荷速度の増加により強度が増加し、その増加率は一軸圧縮や一軸引張とほぼ同じであるとしている。瀬戸ら⁷⁾は、高湿度と低湿度下で圧裂引張試験を行い、高湿度下の方が強度の載荷速度依存性が大きいと報告している。堀川ら⁸⁾は、圧裂引張強度の水蒸気圧による変化と載荷速度依存性を調べ、破壊機構

として応力腐食が有力であるとしている。

破壊力学的見地から亀裂進展の時間依存性について調べた研究もいくつかある。大久保ら⁹⁾は、三城目安山岩の曲げ試験を行い、載荷速度とともに破壊じん性値や曲げ強度が増加するとしている。Lajtai and Bielus¹⁰⁾および佐野ら¹¹⁾は、ダブルトーション試験を行い、応力拡大係数と亀裂進展速度との関係を求め、それより岩石の時間依存性を考察し、応力腐食（岩石の主成分である Si と O の結合が応力下で反応物質との反応で切断されやすくなる現象）が関与している可能性が高いとしている。

以上のように、引張強度の載荷速度依存性に関しては少ないながらもいくつかの報告がなされており、載荷速度の増加により引張強度が増加することは定説となっているが、不明な点が多く残されている。例えば、一軸引張試験を行った時に、ピーク強度を過ぎた後で観察される残留強度の載荷速度依存性に関してはほとんどわかっていない。また、一軸圧縮試験では強度の載荷速度依存性とクリープ試験との間に密接な関係が存在していることが明らかとなっているが、一軸引張応力下での関係はまだわかっていない。

載荷速度依存性に限らず、岩石の引張挙動を調べた研究の多くは、圧裂引張試験と曲げ試験によるものであり、一軸引張試験に関する研究は少ない。圧裂引張試験は比較的容易に実施できるが、試験片内部の応力状態は複雑であり、引張応力下での応力-ひずみ曲線を求めるような基礎的な力学特性の検討には不向きである。また、曲げ試験は古くより行われているが、得られる曲げ強度は圧裂引張強度や一軸引張強度より大きいことが多く、解明すべき点が多く残されている。一軸引張試験は正確な応力とひずみの関係を求められる試験であるにもかかわらず、難度の高い試験であるためか報告例は少ないが、福井ら¹²⁾は、圧縮と引張試験結果の比較が容易なように、一軸圧縮試験と同一形状の円柱試験片を使用して一軸引張試験を行い、完全応力-ひずみ曲線（ピーク強度以降の特性を含めた、応力-ひずみ曲線）を求め、引張応力下においても残留強度が存在することを示した。残留強度の有無は重要で、わずかでも残留強度が存在すれば、地下構造物の天端での引張破壊の進行を和らげる効果が大きいと考えられる。

本研究では、福井ら¹²⁾にならって一軸引張試験を行い、ヤング率、強度、残留強度等の載荷速度依存性を求める。これらの時間依存性が、これまでに実施した一軸圧縮応力下での結果と異なるのかどうか

を検討する。さらに時間依存性を調べる試験としてしばしば行われるクリープ試験結果と比較し、どのような関係があるかを検討する。最後に、一軸引張応力下で載荷速度依存性を調べる簡便な方法について述べる。

2. 試料岩石と実験方法

従来から著者らが用いてきた試料岩石のうち、実績があり様々な物性を把握している、三城目安山岩および田下凝灰岩を試料として用いた。両岩石ブロックとも異方性が存在するため、次のように試験片を作製した。大久保ら⁹⁾では、流理面と垂直方向からポーリングを行った試験片を用い、三城目安山岩の一軸引張強度の載荷速度依存性を調べた。そこで本研究では、異方性の影響を調べるため、三城目安山岩は流理面と同方向からポーリングを行った。田下凝灰岩に関しては、福井ら¹³⁾と同様に流理面と垂直方向からポーリングを行った。直径約 25mm、高さ約 50mm の円柱形の試験片に整形後、温度 22±2℃、湿度 60±15% の実験室内にて 2 週間以上放置し、自然乾燥させてから実験に用いた。

一軸引張試験機としては、容量 500kN のサーボ試験機を用いた。試験方法および試験機の詳細は既報^{12),13)}に示しているの、そちらを参照されたい。試験に際しては、図-1 に示すようにまず上下のプラテンをねじで固定した後、エポキシ系接着剤をプラテンおよび試験片の上下に塗布する。つぎに試験片を挿入し、圧縮荷重が数 10N 程度となるようにシリンダを動かし、1 日程度接着剤が硬化するまで放置する。接着剤の硬化を確認後、実験を開始する。

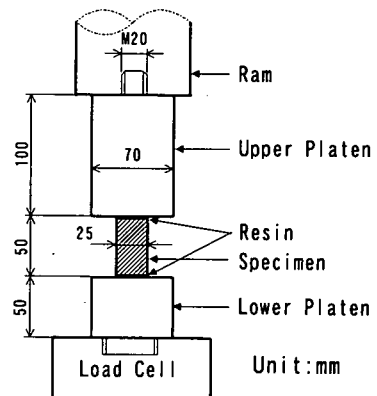


図-1 一軸引張試験装置の概略図

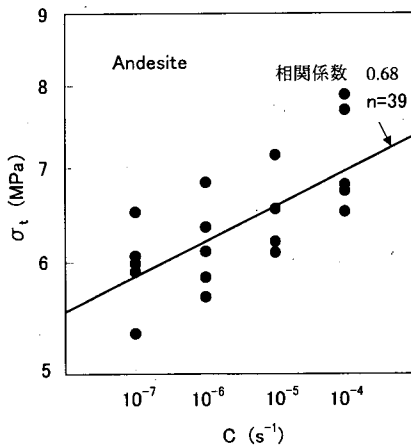
表-1 一軸引張試験結果

(a) 三城目安山岩

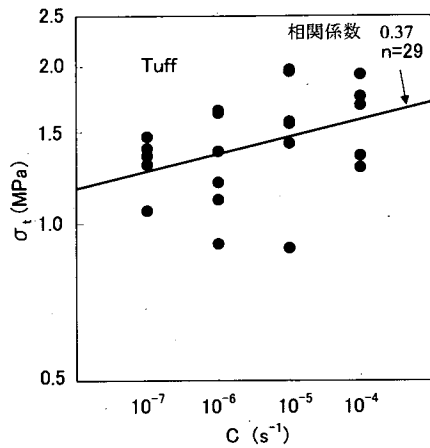
載荷速度 (s ⁻¹)	強度			初期ヤング率			50%接線ヤング率		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)
10 ⁻⁷	5.96	0.37	6.3	18.7	1.6	8.4	16.6	0.60	3.1
10 ⁻⁶	6.16	0.41	6.6	18.4	1.0	5.6	16.5	0.56	3.0
10 ⁻⁵	6.42	0.40	6.2	19.1	1.5	7.6	17.8	1.2	6.0
10 ⁻⁴	7.12	0.55	7.7	20.9	0.82	3.9	17.6	1.8	8.7

(b) 田下凝灰岩

載荷速度 (s ⁻¹)	強度			初期ヤング率			50%接線ヤング率		
	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)
10 ⁻⁷	1.31	0.14	11	3.8	0.47	12	2.3	0.28	12
10 ⁻⁶	1.31	0.27	20	4.1	1.2	29	2.5	0.38	15
10 ⁻⁵	1.56	0.36	23	4.2	0.79	19	2.8	0.47	17
10 ⁻⁴	1.60	0.25	15	4.4	1.0	24	2.8	0.37	13



(a) 三城目安山岩



(b) 田下凝灰岩

図-2 一軸引張強度の載荷速度による影響. 図には最小二乗法による近似曲線, その傾きと相関係数を示す.

荷重は図-1 に示すようにひずみゲージ式荷重計 (日本特殊測器製 LRX-20T) で計測し, 試験片の初期断面積で除して応力とした. ひずみはラムの変位を差動変圧式変位計 (新光電機製 6014) で計測し, 試験片の初期高さで除して求めた. ラムの変位には接着部の変形も含まれる. 接着部の厚さは上下あわせて高々0.1mm であり, エポキシ樹脂のヤング率を 2.4GPa とすれば, 接着部の剛性は 5GN/m となる¹²⁾. これは, 三城目安山岩の試験片の剛性 0.2GN/m と比べて十分大きいので, 接着部の変形を考慮した補正は行わなかった.

制御方法は次式で示される応力帰還制御¹⁴⁾を用いた.

$$\varepsilon - \alpha \cdot \sigma / E = C \cdot t \quad (1)$$

ただし, ε , σ , E , C , t はそれぞれひずみ, 応力, 初期ヤング率, 載荷速度及び時間である. α は応力帰還量を決める定数で, 三城目安山岩, 田下凝灰岩でそれぞれ 0.3, 0 とした. 載荷速度 C は 10⁻⁷, 10⁻⁶, 10⁻⁵, 10⁻⁴ s⁻¹ の 4 通りとし, 同一条件で 5 本以上の試験を行った.

3. 一軸引張強度・ヤング率の載荷速度依存性

(1) 引張強度

一軸引張試験結果を表-1 に, 各載荷速度による一軸引張強度を図-2 に示す.

三城目安山岩では, 一軸引張強度の変動係数は

6~8%であり、ばらつきは比較的小さい。載荷速度を 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4}s^{-1} と1桁ずつ増加すると、一軸引張強度の増分は順に 0.20MPa, 0.26MPa, 0.70MPa であり、その増加率は 3.4%, 4.2%, 10.9%であった。

強度の載荷速度依存性を表現する式としてべき乗則がよく用いられる。

$$\sigma_t \propto C^{\frac{1}{n+1}} \quad (2)$$

図-2(a)は両対数表示した一軸引張強度 σ_t と載荷速度 C の関係であり、最小二乗法により求めた近似曲線とその相関係数も図に示した。図の近似曲線の傾きから求めた三城目安山岩の n は 39 である。

従来の研究において、三城目安山岩を用い、強度の載荷速度依存性やクリープ試験などから求めた n (6), (9), (15), (21)) を表-2 に示す。大久保ら⁶⁾で使用した試験片と、今回使用した試験片はボーリング方向が異なるだけでなく、岩石ブロックも異なっており、本研究で得られた一軸引張強度は大久保ら⁶⁾に比べ、50%程度大きい。それにもかかわらず、一軸引張強度の載荷速度依存性に関しては、大久保ら⁶⁾の 36 と比較的近い値であることから、三城目安山岩の一軸引張強度の載荷速度依存性に関する限り、岩石ブロックや異方性の影響はさほどないことがわかる。

秋¹⁵⁾は、3種類の応力レベルで一軸引張クリープ試験を行い、その寿命から求めた n は 37 である。クリープ寿命と強度のばらつきとを利用した西松ら¹⁶⁾は、 $n=36$ としており、本研究で得られた値とほぼ同じである。

大久保ら⁶⁾は、3つの岩石ブロックを用い、圧裂引張強度の載荷速度依存性を調べている。圧裂引張強度は岩石ブロックによって最大 10%程度異なっているが、圧裂引張強度から求めた n は 41 であり、本研究で求めた n とほぼ同じ値である。

この他、表-2 に示したように一軸圧縮試験や三点曲げ試験で求めた n は、34~38 とほぼ本研究で求めた値と同じである。このように種々の試験で n はほぼ似通った値となっていることについて、大久保ら⁶⁾は、試験方法が異なっても亀裂の進展が破壊の主原因であるので、各試験における強度の載荷速度依存性は破壊じん性値の時間依存性に基づいているためと考えている。今回の結果はこれを支持していると考えられる。

表-1 および図-2(b)より、田下凝灰岩の場合も載荷速度の増加によって、おおむね一軸引張強度は増加しているといえる。式(2)に基づいて最小二乗法

によって n を求めると、29 であった。秋¹⁵⁾は、一軸圧縮強度の載荷速度依存性から $n=39$ 、一軸圧縮クリープ試験におけるクリープ寿命の応力依存性から $n=43$ であったと報告している。本研究で求めた $n=29$ との差はかなり大きい。表-1 からわかるように田下凝灰岩の実験結果のばらつきは大きく、求められた n の値についても再検討する必要がある。そこで、別の手法で載荷速度依存性を調べることとし、6. でその結果について述べる。

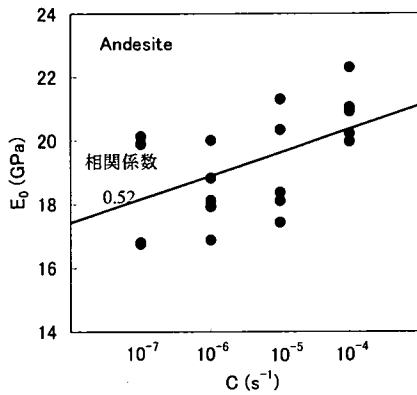
(2) ヤング率

三城目安山岩の初期ヤング率 E_0 の載荷速度依存性を図-3(a)に示す。ここで、初期ヤング率とは応力 0 での応力-ひずみ曲線の接線勾配である。表-1 に示すように、載荷速度を 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4}s^{-1} と1桁ずつ増加させると、初期ヤング率の増分は順に -0.3GPa, 0.7GPa, 1.8GPa であり、その増加率は -1.6%, 3.8%, 9.4%であった。なお、初期ヤング率の変動係数は 4~8% とばらつきは比較的小さかった。載荷速度 10^{-7}s^{-1} での初期ヤング率は実験誤差のためか多少大きめであったが、全体としてみれば載荷速度の増加によって初期ヤング率は増加している傾向が見られる。

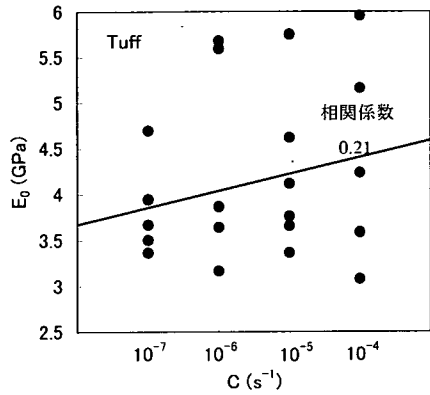
三城目安山岩の 50%接線ヤング率 E_{50} の載荷速度による変化を図-4(a)に示すが、初期ヤング率と同じように、載荷速度の増加によって 50%接線ヤング率は増加している。大久保ら²²⁾では一軸圧縮試験における三城目安山岩の 50%割線ヤング率の載荷速度依存性を調べており、 10^{-4}s^{-1} の時の値で正規化したヤング率 E_{50}^* を次

表-2 三城目安山岩の n

試験方法	n の求め方	n	文献
一軸引張	載荷速度 4 桁変化	39	本研究
	載荷速度 4 桁変化	36	大久保ら ⁶⁾
	クリープ寿命	37	秋 ¹⁵⁾
	クリープ寿命と強度のばらつきを利用	36	西松ら ¹⁶⁾
圧裂引張	載荷速度 4 桁変化	41	大久保ら ⁶⁾
一軸圧縮	載荷速度 4 桁変化	35	山口ら ¹⁷⁾
	載荷速度 4 桁変化	35	大久保ら ¹⁸⁾
	ピーク強度直前で載荷速度 1 桁変化	38	大久保ら ¹⁸⁾
	載荷速度 4 桁変化	37	大久保ら ¹⁹⁾
	クリープ寿命	35	大久保ら ²⁰⁾
	クリープ寿命	36	趙ら ²¹⁾
三点曲げ	載荷速度 6 桁変化 (破壊じん性値)	34	大久保ら ⁹⁾

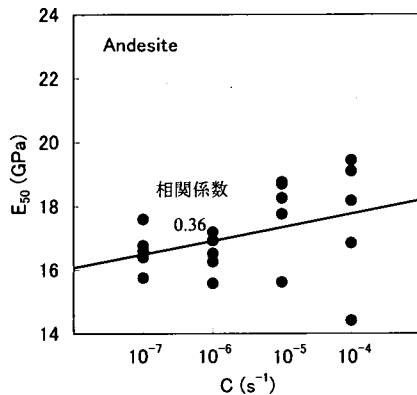


(a) 三城目安山岩

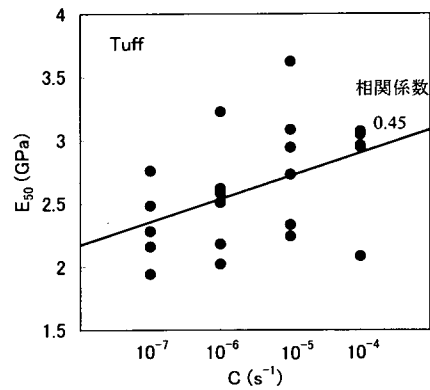


(b) 田下凝灰岩

図-3 初期ヤング率の載荷速度による影響



(a) 三城目安山岩



(b) 田下凝灰岩

図-4 50%接線ヤング率の載荷速度による影響

の実験式で表している。

$$E_{50}^* = 0.021 \log(C) + 1.08 \quad (\text{一軸圧縮試験}) \quad (3)$$

また、大久保ら²²⁾では秋¹⁵⁾に示されている50%接線ヤング率を整理し、以下の関係も示している。

$$E_{50}^* = 0.019 \log(C) + 1.08 \quad (\text{一軸圧縮試験}) \quad (4)$$

本研究の結果も同様の処理を行うと、次式が得られる。

$$E_{50}^* = 0.024 \log(C) + 1.11 \quad (\text{一軸引張試験}) \quad (5)$$

1桁載荷速度が変化すると、50%ヤング率の増加は一軸圧縮試験で1.9%~2.1%であるのに対して、一軸引張試験では2.4%と、両者の差は比較的小さいことがわかる。

以上のように一軸引張応力下での三城目安山岩の強度とヤング率の載荷速度依存性は、一軸圧縮応力下の場合と類似した結果となった。

田下凝灰岩の初期ヤング率および50%ヤング率の載荷速度による変化をそれぞれ図-3(b)、図-4(b)に示す。強度と同様に変動係数が大きく確たることはいえないが、表-1に示した平均値から見ると、載荷速度の増加により、ヤング率は増加している傾向がうかがわれる。

大久保ら²²⁾では一軸圧縮応力下での田下凝灰岩の50%割線ヤング率の載荷速度依存性も調べており、次の実験式を示している。

$$E_{50}^* = 0.047 \log(C) + 1.18 \quad (\text{一軸圧縮試験}) \quad (6)$$

本研究の結果を同様に整理すると、以下のようになる。

$$E_{50}^* = 0.063 \log(C) + 1.28 \quad (\text{一軸引張試験}) \quad (7)$$

載荷速度が1桁変化すると、50%ヤング率の増加は一軸圧縮試験で4.7%であるのに対して、一軸引張試験では6.3%であった。

4. 応力-ひずみ曲線と残留強度の载荷速度依存性

(1) 応力-ひずみ曲線

三城目安山岩の各载荷速度における、平均的な応力-ひずみ曲線を図-5 に示す。ここで平均的な応力-ひずみ曲線とは、同一条件で得られた応力-ひずみ曲線を重ね合わせ平均化した曲線である。最初、ひずみに比例して応力は増加し、強度の70%付近から、徐々に直線からずれ始め、やがてピーク強度を迎える。ピーク強度以降は、ひずみの増減がほとんどないまま、応力が急激に低下する。強度の30%程度まで低下すると、応力の変化は小さくなり、残留強度が現れる。

载荷速度による変化については、次の2点の特徴があげられる。

- 1) 载荷速度の大きい場合の応力-ひずみ曲線が、小さい場合のそれを内包する。
- 2) 応力-ひずみ曲線の立ち上がりにおいて、载荷速度の大きい場合の応力-ひずみ曲線の方が、傾きが大きくなる。

次に、本研究で得られた三城目安山岩のピーク強度での応力とひずみの関係を図-6 に示す。図では強度の大きいものは、ひずみも大きい傾向が見られる。図には応力-ひずみ曲線の一例と、別の試験片を用いたピーク強度からの除荷曲線も示した。なお、除荷曲線とは、試験の途中でひずみを一定速度で減少させた時に得られる応力とひずみの関係である¹³⁾。図ではばらつきは大きいものの、除荷曲線と平行な帯状の領域内にデータが並ぶ。

図-7 は 10^{-7} および 10^{-4} s^{-1} の载荷速度における田下凝灰岩の応力-ひずみ曲線である。田下凝灰岩の場合、試験片ごとのばらつきが大きかったため、

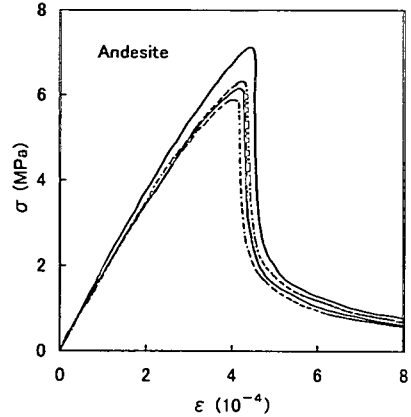


図-5 各载荷速度における応力-ひずみ曲線 (三城目安山岩)。上から下へ载荷速度 10^{-7} 、 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-4} s^{-1} 。

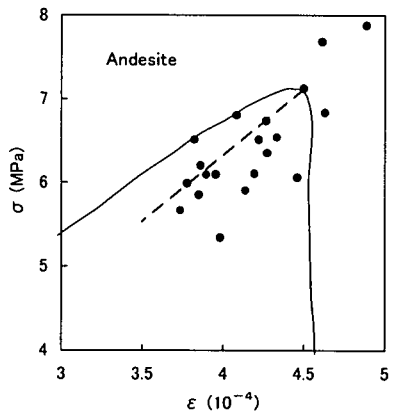
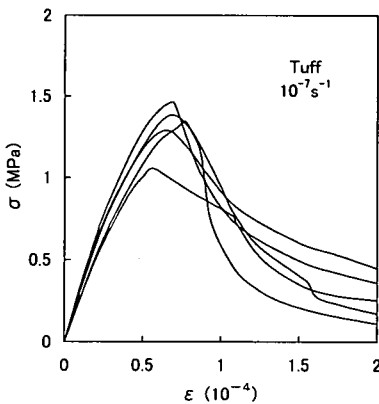
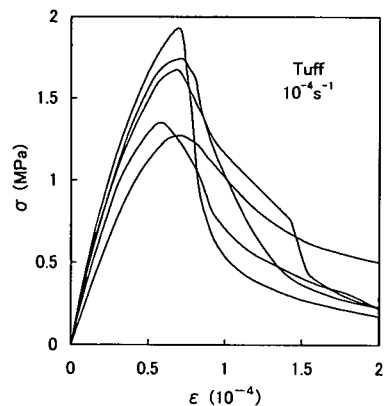


図-6 ピーク強度での応力とひずみの関係 (三城目安山岩)。図には応力-ひずみ曲線の一例と、ピーク強度からの除荷曲線 (破線) を示す。



(a) 载荷速度 10^{-7} s^{-1}



(b) 载荷速度 10^{-4} s^{-1}

図-7 応力-ひずみ曲線 (田下凝灰岩)

2通りの荷速度で行った試験結果をすべて表示した。応力-ひずみ曲線の特徴としては次のとおりである。応力が作用し始めた直後から応力-ひずみ曲線の傾きは徐々に小さくなり、一軸引張強度の70%程度からはその低下は顕著となり、やがてピーク強度を迎える。前述の三城目安山岩と異なり、ピーク強度以降も応力は急激に低下することなく、上に凸の曲線を描きながら緩やかに低下していく。そして、応力が一軸引張強度の40~60%で変曲点を迎え、下に凸の曲線となる。その後も、次第に応力は低下していくが、ひずみが 2×10^{-3} を越えても残留強度が残っている。なお、ここでいう残留強度とは、ピーク強度以降の応力-ひずみ曲線が下に凸となった後に、応力の低下が比較的緩慢になった時の応力を指す。かなりの任意性があるが、例えば三城目安山岩と田下凝灰岩ではひずみがそれぞれ 5×10^{-4} と 10×10^{-4} を越えた後の応力を指すものとする。

同じ荷速度の結果を見ると次の特徴が見受けられる。

- 1) 初期ヤング率や50%接線ヤング率の大きい試験片は、一軸引張強度も大きい。
- 2) 一軸引張強度の大きい試験片は小さい試験片に比べ、ピーク強度以降、脆性的な挙動を示す傾向がある。

荷速度の影響であるが、 10^{-7} および 10^{-4} s^{-1} の結果を見比べるとヤング率、強度だけでなく、残留強度も大きくなっているように見えるが、ばらつきが多く定量的な評価は難しい。

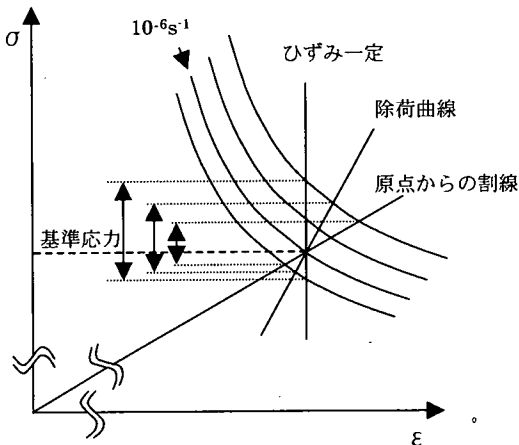


図-8 残留強度の比較方法の概念図

(2) 残留強度

図-5 に示したように、三城目安山岩では残留強度に荷速度依存性が見られる。一軸圧縮試験においては、大久保ら¹⁸⁾が述べているように、残留強度は荷速度依存性を示すことが知られているが、一軸引張試験においても、残留強度に荷速度依存性が存在することを本研究で示した。

得られた結果を定量的に検討してみる。どの時点での残留強度を比較するかにはいくつかの方法が考えられる。ここでは、図-8 に示すような3つの方法によって検討を行う。

- 1) ひずみが同じ値での残留強度を比較する方法
(図-8 に示すように、各残留強度時の荷速度 10^{-6} s^{-1} でのひずみを基準)
- 2) 原点を通る割線を用い、その交点の残留強度を比較する方法
- 3) 除荷曲線を用い、その交点の残留強度を比較する方法

なお、除荷曲線は直線で近似し、その傾きは福井ら¹³⁾で求めた値を用いた。

残留強度の荷速度依存性の整理方法であるが、一軸引張強度と同様に、残留強度 σ_{RE} と荷速度 C との間に式(8)が成立するとして、 n を求めることにする。

$$\sigma_{RE} \propto C^{\frac{1}{n+1}} \quad (8)$$

図-5 に示した三城目安山岩の結果より求めた n を表-3 に示す。1)の方法では、応力によって n はほとんど変化せず、21程度である。2)の方法から求めた n は応力によって、86から53へと変化している。3)の方法から求めた n は、応力1.5MPaの時、若干大きな値となっているが、それ以外は、35~38とほぼ同じ値である。3.で述べたように一軸引張強度の n は39であり、今回採用した3つの方法で、除荷曲線を用いる方法が最も近い値を示した。

残留強度の荷速度依存性は今回初めて指摘した事実であり、図-5 からわかるようにその依存性はかなり微妙な差であることから今後、より定量的な検討を進める必要があると考える。

表-3 三城目安山岩の残留強度の n

方法	残留強度(MPa)				
	1.5	1.1	0.9	0.7	0.5
1)ひずみ一定	22	20	21	23	20
2)割線勾配との交点	86	64	64	62	53
3)除荷曲線との交点	47	38	35	36	35

5. クリープ試験結果との比較

強度試験とクリープ試験との破壊機構の差については不明な点が多いが、一軸圧縮応力下に関する限り次のようなことが最近になってわかってきた。

・大久保ら¹⁸⁾は三城目安山岩を用い、荷重速度を変化させて一軸圧縮試験を行った結果、図-9(a)に示すように、荷重速度が1桁増すと応力-ひずみ曲線はひずみにして約 0.3×10^{-3} ずつ右側にシフトすると報告している。

福井ら²³⁾はいくつかの応力レベルでクリープ試験を行い、図-9(b)に示すように、三次クリープでひずみ速度が等しくなった時の位置をつないだ等クリープひずみ速度曲線を求め、クリープひずみ速度が1桁増すと約 0.3×10^{-3} ずつ右側にシフトすると報告している。同図には荷重速度 10^{-5} s^{-1} で得られた応力-歪曲線も示したが、ピーク強度以降の部分が、クリープひずみ速度 10^{-5} s^{-1} のときの等クリープひずみ速度曲線とほぼ重なる。他の荷重速度やクリープひずみ速度でもほぼ同じことがいえた。

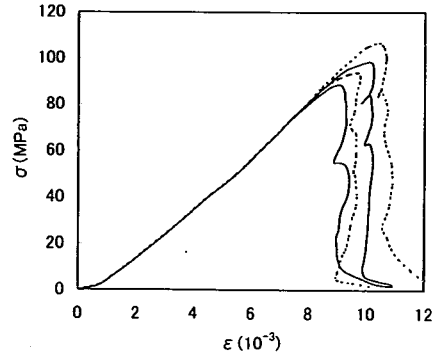
クリープ試験では図-9(c)に示す破線にそってクリープひずみが増大していくが、破壊1s前における位置は、ピーク強度以降の応力-ひずみ曲線の近傍となることを、福井らは示した²⁴⁾。

これらの事項は整理が不十分で、互いの関係も必ずしも明瞭と言えないが、一軸圧縮応力下では強度試験結果とクリープ試験結果との間に密接な結びつきのあることをうかがわせる。両者の関係が明らかになれば、クリープ挙動を一軸圧縮試験結果からある程度推定することが可能となるし、引張と圧縮の両応力下で、かつ強度試験、クリープ試験、応力緩和試験に適用できる構成方程式や、その構成方程式を用いた数値シミュレーションも可能になると考える。

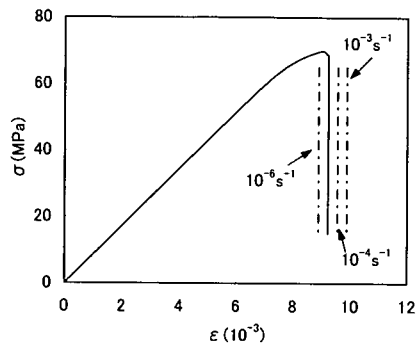
一軸引張応力下における強度試験結果とクリープ試験結果との関係は、一軸圧縮応力下よりさらに不明な点が多いが、既往の研究と今回の実験結果とをあわせて考えてみると、次のことが言える。

図-9(a)に対応する図-5で、荷重速度が1桁増すごとに、応力-ひずみ曲線はひずみにして約 1.2×10^{-5} ずつ右側にシフトしている。

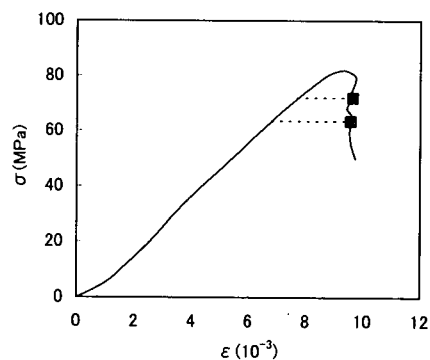
・図-9(b)に対応するクリープ試験結果は、秋ら²⁵⁾と福井²⁶⁾で報告されている。秋ら²⁵⁾によれば、クリープひずみ速度が1桁増すのに要するクリープひずみは、クリープ応力レベル82%の時 1.7×10^{-5} 、88%の時 1.5×10^{-5} である。福井²⁶⁾では、クリープ応力レベル95%の時、約 1.7×10^{-5} である。



(a) 応力-ひずみ曲線（三城目安山岩）. 図の4本の曲線は内側より荷重速度 10^{-6} s^{-1} 、 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} . 大久保ら¹⁸⁾より引用.



(b) クリープ試験より求めた等クリープひずみ速度曲線（三城目安山岩）. 実線は荷重速度 10^{-5} s^{-1} で得られた応力-ひずみ曲線. 福井ら²³⁾より引用.



(c) 応力-ひずみ曲線（荷重速度 10^{-5} s^{-1} ）とクリープ特性の関係（三城目安山岩）. ■は破壊1s前での応力-ひずみ線図上での位置を表す. 福井ら²⁴⁾より引用.

図-9 一軸圧縮応力下での応力-ひずみ曲線とクリープ特性の関係

図-5 に示した応力-ひずみ曲線の移動量が約 1.2×10^{-5} であったのに対して、クリープ試験結果では $1.5 \sim 1.7 \times 10^{-5}$ と両者の差は比較的小さいといえる。

この関係を解析的に検討してみることにする。
コンプライアンス λ は次のように書ける。

$$\lambda = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (9)$$

クリープの場合、応力一定であるため、 $\dot{\sigma} = 0$ である。式(9)より

$$\dot{\epsilon} = \dot{\lambda} \cdot \sigma \quad (10)$$

と表される。ここで応力-ひずみ曲線上に任意の 2 点を考え、それぞれを下付の 1, 2 で表示すると、次の関係が成り立つ。

$$\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} = \frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \quad (11)$$

定ひずみ速度試験では、 $\dot{\epsilon} = \dot{\lambda} \cdot \sigma + \lambda \cdot \dot{\sigma}$ である。また、応力-ひずみ曲線の傾きを $-b$ とすると、

$$\dot{\sigma} = -b \cdot \dot{\epsilon} \quad (12)$$

が成り立つので、次式を得る。

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\lambda} \cdot \sigma}{1 + b \cdot \lambda} \quad (13)$$

よって 2 つの応力-ひずみ曲線上での 2 点に対して次式が成り立つ。

$$\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} = \frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \cdot \frac{1 + b_2 \lambda_2}{1 + b_1 \lambda_1} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (14)$$

となる。ここで $\sigma_1 = \sigma_2$ の 2 点を考えると、次式が成り立つ。

$$\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} = \frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \cdot \frac{1 + b_2 \lambda_2}{1 + b_1 \lambda_1} \quad (15)$$

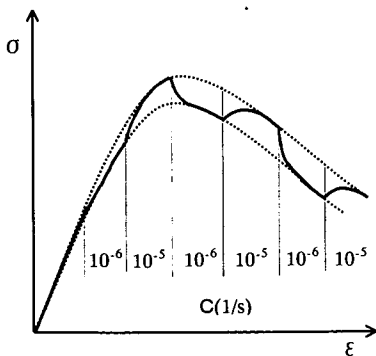


図-10 載荷速度を変化させた時の応力-ひずみ曲線の概念図

ピーク強度以降で応力-ひずみ曲線の傾きが急な場合には、 $b_1 \lambda_1 \gg 1, b_2 \lambda_2 \gg 1$ なので次式を得る。

$$\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} = \frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \cdot \frac{b_2}{b_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (16)$$

以上の検討結果を三城目安山岩に適用してみる。図-5 によれば、応力が 2MPa 以上であれば、応力-ひずみ曲線の傾きが十分に急といえる。近似的に、

$b_1 = b_2$ かつ $\lambda_1 = \lambda_2$ なので次式が成り立つ。

$$\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} = \frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \quad (17)$$

さらに、式(11)とあわせて考えると、次式が成り立つ。

(クリープで $\dot{\epsilon}$ が m 倍となる時のひずみ増分)
 \approx ($\dot{\epsilon}$ を m 倍とした時の応力-ひずみ曲線の
水平方向の移動量) (18)

6. 載荷速度依存性を調べる簡便な手法

今までは、載荷速度を 4 段階に変えて強度試験をおこなうことにより、載荷速度依存性を調べた結果について述べてきた。この方法によれば、1 ヶ月以上をかけて 20 本程度の試験片を用いた試験を行う必要があり、研究であれば実行可能であるが、実務的な手法としては実施が困難である。また、原位置での岩石の時間依存性を調べようとした場合、今回使用した田下凝灰岩以上に強度のばらつきが生じる可能性もあり、有意な結果を得るためには試験片数も 20 本以上必要になる可能性がある。そのため、大久保ら¹⁸⁾では、ピーク強度の直前にひずみ速度を増加し、その時の応力の増加から載荷速度依存性を推定する手法を提案した。この手法によれば、試験片ごとの強度のばらつきの影響がなく、1 本の試験片から容易に載荷速度依存性を調べることができる。しかしながら、この方法の実施にあたっては、載荷速度を増加するタイミングの選定に工夫を要するなど、実験者がかなり試験方法に習熟している必要があった。大久保ら²⁰⁾では図-10 に模式的に描くように、試験途中でひずみが一定だけ増加することに、載荷速度を 10^{-5} s^{-1} と 10^{-6} s^{-1} とで交互に変化させ、それぞれの載荷速度で描く応力-ひずみ曲線をなめらかに繋いだ。こうしてもとめた 2 本の曲線を、近似的にそれぞれの載荷速度で得られた応力-ひずみ曲線とみなす方法を提案し、土丹の一軸圧縮応力

下での時間依存性に関して調べた。この手法によれば、載荷速度の増減を機械的に行うだけでよく、実験技術の難易度は大幅に低下する。これに近い手法²⁸⁾⁻³⁰⁾は、砂や粘土を対象とした三軸圧縮試験やせん断試験においては古くから実施されており、試験片ごとのばらつきの影響を小さくするとの報告がなされている²⁹⁾。

そこで、本研究でもこの方法を用いて実験を行った。実験では、載荷速度 10^{-5} s^{-1} で 10s、 10^{-6} s^{-1} で 100s 保持し、交互に変化させた。すなわち、式(1)の C_1 を 10^{-4} ごとに載荷速度を変化させる実験を行った。同一条件で3本の試験を行った。

図-11(a)に三城目安山岩を用いて得られた応力-ひずみ曲線の実線を示す。実線の結果をもとになめらかに繋いで推定した載荷速度 10^{-5} s^{-1} および 10^{-6} s^{-1} の応力-ひずみ曲線を破線で示した。図では応力 7.5MPa 付近で載荷速度を 10^{-5} s^{-1} から 10^{-6} s^{-1} に変化させることにより、応力が増加している様子がわかる。また、残留強度においても、載荷速度の変化により、応力-ひずみ曲線が変化している様子が見て取れ、残留強度に載荷速度依存性が見られることがわかる。

田下凝灰岩の場合、強度のばらつきが見られたため、図-11(b)には2つの結果を示した。図ではピーク強度以前、強度の50%付近で載荷速度の変化によって、応力-ひずみ曲線に変化が見られ始めており、載荷速度依存性が三城目安山岩に比べ、強く現れていることがわかる。これは3.で述べたヤング率の載荷速度依存性の結果と同じである。ピーク強度およびそれ以降では、載荷速度を変化させること

によって、明瞭に応力-ひずみ曲線が変化しており、強度および残留強度の載荷速度依存性も観察された。

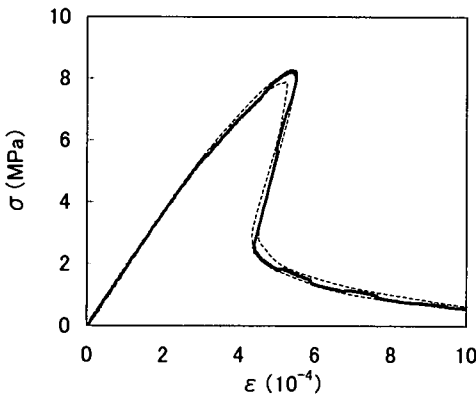
表-4に推定した載荷速度 10^{-5} s^{-1} および 10^{-6} s^{-1} の応力-ひずみ曲線から求めた、一軸引張強度を示す。三城目安山岩では、強度の増加率は5.8%、 n は40であり、3.で述べた結果とほぼ同じである。よって、本試験方法は簡便に n を求める方法といえるであろう。

田下凝灰岩の場合には、強度の増加率は5.1%、 n は46である。3.で求めた n は29であったのに対して、かなり大きな値となった。田下凝灰岩では試験片ごとの強度のばらつきが大きく、3.で示した手法ではばらつきの影響が大きく表れ、求めた n は正確に載荷速度依存性を表していないことが考えられる。

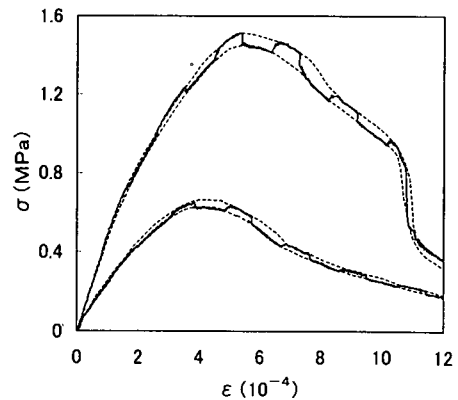
表-4 載荷速度を途中で変化させる試験より求めた一軸引張強度

(a)三城目安山岩				
試験番号	一軸引張強度(MPa)		強度の増加率(%)	n
	10^{-6} s^{-1}	10^{-5} s^{-1}		
1	6.56	6.94	5.8	40
2	7.01	7.44	6.1	38
3	7.78	8.21	5.5	42

(b)田下凝灰岩				
試験番号	一軸引張強度(MPa)		強度の増加率(%)	n
	10^{-6} s^{-1}	10^{-5} s^{-1}		
1	1.45	1.52	4.8	48
2	0.625	0.66	5.6	41
3	1.45	1.52	4.8	48



(a)三城目安山岩



(b)田下凝灰岩

図-11 載荷速度を変化させて得た応力-ひずみ曲線。実線が応力-ひずみ曲線。破線は 10^{-5} s^{-1} および 10^{-6} s^{-1} の推定した曲線

表-5 田下凝灰岩の残留強度の荷速度依存性 n
荷速度を途中で変更する手法より求めた。

試験番号	方法	残留強度(MPa)						
		1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3
1	1) ひずみ一定	30	32	30	21	17	16	20
	2) 割線勾配との交点	62	67	113	90	90	59	67
2	1) ひずみ一定	—	—	—	—	44	44	32
	2) 割線勾配との交点	—	—	—	—	67	90	67
3	1) ひずみ一定	38	32	36	44	20	20	20
	2) 割線勾配との交点	62	67	74	90	67	90	67

同一試験片より荷速度依存性を求める本手法は試験片ごとの強度のばらつきの影響を除去できるため、得られた $n=46$ の方が信頼できる。秋¹⁵⁾では、一軸圧縮強度の荷速度依存性から $n=39$ 、一軸圧縮クリープ試験におけるクリープ寿命の応力依存性から $n=43$ としており、本手法で求めた値に比べて、若干小さいが比較的近い値であり、田下凝灰岩でも一軸圧縮強度と一軸引張強度の荷速度依存性は似たような特性を示すことがわかる。

次に田下凝灰岩の残留強度の荷速度依存性について、表-5 に示す。田下凝灰岩の場合、試験毎のばらつきが大きいため、福井ら¹³⁾で求めた除荷曲線のデータを用いることができなかった。そのため、ここでは、図-7 に示した次の 2 つの方法によって検討を行った。

- 1) ひずみが同じ値での残留強度を比較する方法
- 2) 原点を通る割線を用い、その交点の残留強度を比較する方法

表-5 より 1) の方法では残留強度が小さくなるに従い、 n が小さくなる傾向があり、 n は 20~40 程度である。2) の方法ではばらつきが多く、残留強度の大きさによる傾向は見取れないが、 n は 60~90 程度である。除荷曲線より求める手法は断念したが、1) と 2) の方法の中間的な値となるため、40~60 程度の値となることが予想できる。一軸引張強度の n は 46 であったので、田下凝灰岩でも除荷曲線より求められる n に近い値である。

本手法は、比較的容易に強度、残留強度、ヤング率などの情報を含む応力-ひずみ曲線の荷速度依存性を求めることができる。また、図-11(b)を見てわかるとおり、田下凝灰岩のようにピーク強度以降、徐々に応力が低下する岩石では、強度付近での応力-ひずみ曲線の推定が容易である。しかしながら、図-11(a)の三城目安山岩のようにピーク強度以降、急激に応力が低下するような岩石の場合、ピーク強度付近での応力-ひずみ曲線の推定は難しい。今回

は、マニュアル操作で応力-ひずみ曲線を推定したが、今後は得られた結果から、容易に各荷速度の応力-ひずみ曲線を求める手法の検討が必要であろう。

荷速度の切り替え数も設定が難しかった。図-10 に示したように、荷速度を切り替えると、もう一方の応力-ひずみ曲線に移行しようとするが、それには若干の時間を要する。この観点からは、荷速度を頻りに切り替えない方が望ましい。他方、荷速度の切り替え数が少ないと、補間によって、2本の応力-ひずみ曲線を推定することが困難になる。今回は試行錯誤の結果、ピーク強度までの切り替え数を約 5 回としたが、今後の検討を要する点の一つと考える。

7. まとめ

本研究では、一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の荷速度依存性について述べてきた。一軸引張強度の荷速度依存性に関しては、数多くの文献で指摘されていることであるが、残留強度を含めた応力-ひずみ曲線の荷速度依存性を調べたことは本研究での成果である。本研究で得られた事項をまとめると次のようになる。

- 1) 一軸引張強度の荷速度依存性を確認した。荷速度が一桁増加したときの増加率は、一軸圧縮強度の場合とほぼ同じであった。
- 2) ヤング率の荷速度依存性を確認した。荷速度が一桁増加したときの増加率は、一軸圧縮強度の場合とほぼ同じであった。
- 3) 残留強度の荷速度依存性を明らかにした。整理方法により若干異なるが、増加率は一軸引張強度と同程度となることを示した。
- 4) ピーク強度以降の応力-ひずみ曲線の荷速度依存性と、既往の研究^{23), 26)}で示されているクリープ

試験における三次クリープのクリープひずみ速度の増加傾向との間に、関係があることを示した。

- 5) 載荷速度依存性をより簡便に求めるため、載荷速度を交互に変える方法を試み、ほぼ従来の方法と同じ結果となることを示した。田下凝灰岩のように試験片ごとの強度のばらつきが大きい場合には特に有効な方法であることを示した。

本研究は2種類の岩石を使用した結果であり、今後、得られた知見が他の岩石でも成立するかどうかを調べる必要がある。また、本研究で用いた試験方法(2.あるいは6.で述べた方法)は、他の脆性材料にも容易に適用できるので^{31),32)}、コンクリートやモルタルの引張軟化特性やその時間依存性の解明も視野においた研究をしていく予定である。

本研究で扱ったのは一軸引張応力下での強度や応力-ひずみ曲線である。一軸引張応力下以外の特性に関しては、知見がさらに不足している。例えば、三軸状態で主応力の一つが引張となった場合の破壊条件は今後解明すべき重要な事項と考えている。

一軸引張応力下で残留強度をどの程度期待できるかは、岩盤構造物の設計において重要な事項である。今後、残留強度領域で応力緩和試験などの試験を実施して、より詳細に時間依存性を調べる必要がある。

謝辞：実験の一部に関して、東京大学地球システム工学科佐藤新氏に手伝っていただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 趙頭, 大久保誠介, 福井勝則: 岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.9, pp.595-600, 1995.
- 2) 趙頭, 大久保誠介, 福井勝則: 強度のばらつきを考慮した一軸引張試験の計算機シミュレーション, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.13, pp.907-912, 1995.
- 3) Price, D. G. and Knill, J. L.: A study of the tensile strength of isotropic rocks, Proc. 1st Cong, Int. Soc. Rock Mech., Vol.1, pp.439-442, Lisbon, 1966.
- 4) Mokhnachev, M. P. and Gromova, N. V.: Laws of variation of tensile strength indices and deformation properties of rocks with rate and duration of loading, Sov. Min. Sci., No.6, pp.609-612, 1970.
- 5) 勝山邦久, 和田有司, 瀬戸政宏, 昔哲基: 静的から波動領域までの引張強度の荷重速度依存性, 資源・素材学会春季大会講演要旨集, pp.35-36, 1993.
- 6) 大久保誠介, 金豊年, 秋山政雄: 一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性, 資源・素材学会誌, Vol.109, No.11, pp.865-869, 1993.
- 7) 瀬戸政宏, Vutukuri, V. A., 歌川学, 勝山邦久: 岩石の引張強度に及ぼす環境条件の影響, 資源・素材学会春季大会講演要旨集, pp.35-36, 1994.
- 8) 堀川英樹, 尾原祐三: 岩石強度と水蒸気圧の関係, 資源・素材学会春季大会講演要旨集, p.174, 1996.
- 9) 大久保誠介, 新孝一, 西松裕一: 時間効果を考慮したき裂進展のモデル-三城目安山岩の場合-, 材料, Vol.33, No.370, pp.882-887, 1984.
- 10) Lajtai, E. Z. and Bielus, L. P.: Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet Granite in tension and compression, Rock Mech. Rock Eng., Vol.19, pp.71-86, 1986.
- 11) 佐野修, 工藤洋三, 水田義明: 岩石の破壊挙動の時間依存性に関する統一的理解, 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, 1989.
- 12) 福井勝則, 金豊年, 大久保誠介: 一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲線, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.1, pp.25-29, 1995.
- 13) 福井勝則, 大久保誠介, 清水剛: 一軸引張応力下での岩石の破壊過程に関する研究, 資源・素材学会誌, Vol.114, No.12, pp.925-930, 1998.
- 14) 大久保誠介, 西松裕一: 応力速度の Negative Feedback を用いた岩石の一軸圧縮試験, 日本鉱業会誌, Vol.100, No.11, pp.1052-1056, 1984.
- 15) 秋哲淵: 岩石の湿潤状態における時間依存性, 東京大学学位論文, 付録, pp.3-6 および p.15, 1995.
- 16) 西松裕一, 山口勉: 岩石の引張遅れ破壊寿命の分布特性に関する確率過程論的研究, 材料, Vol.29, No.317, pp.192-197, 1980.
- 17) 山口勉, 大久保誠介, 西松裕一, 小泉昇三: 三城目安山岩の三軸圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響-岩石の破壊および変形における時間依存性の研究(第1報), 日本鉱業会誌, Vol.99, No.2, pp.87-92, 1983.
- 18) 大久保誠介, 何昌榮, 西松裕一: 一軸圧縮応力下における時間依存性挙動, 日本鉱業会誌, Vol.103, No.3, pp.177-181, 1987.
- 19) 大久保誠介, 秋哲淵: 気燥状態と湿潤状態での一軸圧縮強度とクリープ寿命の分布特性, 資源・素材学会誌, Vol.110, No.7, pp.533-538, 1994.
- 20) 大久保誠介, 西松裕一: 三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性, 日本鉱業会誌, Vol.102, No.7, pp.395-400, 1986.
- 21) 趙頭, 大久保誠介, 福井勝則: 周圧下での三城目安山岩のクリープ, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.7, pp.543-548, 1995.
- 22) 大久保誠介, 福井勝則, 許江: 岩石のヤング率の載荷速度依存性, 資源・素材学会誌, Vol.117, No.1,

- pp.29-35, 2001.
- 23)福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一: 強度破壊点以降での岩石のクリープ特性, 資源・素材学会誌, Vol.109, No.5, pp.361-366, 1993.
- 24)福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一: 岩石のクリープ試験におけるサーボ試験機の制御特性, 資源・素材学会誌, Vol.105, No.7, pp.521-526, 1989.
- 25)秋哲淵, 大久保誠介, 福井勝則: 一軸引張応力下での三城目安山岩のクリープ, 資源・素材学会誌, Vol.111, No.1, pp.31-36, 1995.
- 26)福井勝則: 複数の荷重下における岩石のクリープ及び遅れ破壊, 東京大学学位論文, 5章, pp.218-282, 1990.
- 27)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.32, No.1, pp.45-50, 2002.
- 28)Richardson, A. M. and Whitman, R. V. : Effect of stress-rate upon undrained shear resistance of a saturated remoulded fat clay, *Geotechnique*, Vol.13, pp.310-324, 1963.
- 29)Graham, J. , Crooks, J. H. A. and Bell, A.L. : Time effect on the stress-strain behaviour of natural soft, *Geotechnique*, Vol.33, pp.327-340, 1983.
- 30)Di Benedetto, H., Tatsuoka, F. and Ishihara, F. : Time-dependent shear deformation characteristics of sand and their constitutive modelling, *Soils and foundations*, Vol.42, pp.103-129, 2002.
- 31)大久保誠介, 福井勝則, 楊勤: 吹き付けた鋼繊維補強モルタルの力学特性, トンネルと地下, Vol.28, No.10, pp.739-744, 1997.
- 32)福井勝則, 大久保誠介, 楊勤, 越智恒男: 吹き付けた鋼繊維補強モルタルの一軸引張特性, 資源・素材学会誌, Vol.112, No.2, pp.69-74, 1996.

(2002. 4. 26 受付)

LOADING RATE DEPENDENCY OF SANJOME ANDESITE AND TAGE TUFF IN UNIAXIAL TENSION

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO and Keita IWANO

Uniaxial tension tests of Sanjome andesite and Tage tuff were conducted under the four strain rates. A servo-controlled testing machine was used to obtain complete stress-strain curves up to the residual strength region. The results indicate that the Young's modulus increases and the stress-strain curve in the post-failure region shifts to the right-hand side in associate with the increase of strain rate. The results were compared with the creep testing results previously published and the relations between the two were discussed. Finally, uniaxial tension tests in which strain rate was changed between low and high alternatively were attempted and the results were compared with the strain rate dependency.