「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol. 55, No. 3, pp. 323-328, Mar. 2006
論　　文

載荷速度が凝灰岩の応力－ひずみ特性に及ぼす影響†

甲 村 雄 一* 稲 田 善 紀**

The Effect of the Loading Rate on Stress-Strain Characteristics of Tuff

by

Yuichi KOHMURA* and Yoshinori INADA**

Much research has been carried out on the time-dependent behavior of rocks. It is well known that uni axial compressive strength increases as the strain rate becomes larger. Rock in general mainly contains microscopic cracks. In process to failure, cracks seem to develop parallel to the loading direction from the tip of microscopic cracks. Therefore, it is important to pay attention to the behavior of the circumferential strain when the time-dependency of stress-strain characteristics of rocks is examined. In this study the uni axial compression test are carried out using tuff , and the effect of stress rate on the stress-strain behavior is described.

Key words : Stress rate, Tuff, Stress-strain characteristics, Uni axial compression test, Time-dependency

1 緒　　言

岩石の時間依存性挙動に関してはこれまでに多くの研究が行われてきており，一軸圧縮試験において，ひずみ速度が速いほど一軸圧縮強度が大きくなることは良く知られている．たとえば，西松ら[1]は三城目安山岩を用いてひずみ速度を 10^{-3} ～ 10^{-6}strain/s の範囲で変化させた試験を行い，載荷軸方向の応力－ひずみ曲線を求めるとともに，ひずみ速度が大きいほど一軸圧縮強度が大きくなることを報告している．また，大久保ら[2]は応力帰還制御で載荷速度を変化させた試験を行い，クラスⅡ岩石も含めた種々の岩石で Post Failure 領域を含めた載荷軸方向の応力－ひずみ曲線を求め，載荷速度が大きいほど一軸圧縮強度強度が大きくなることを報告している．

一方で，圧縮応力下における岩石の破壊現象を考える場合，岩石は以下のような過程を経て破壊に至るものと考えられている．[3]

過程Ⅰ： 荷重－変位曲線の下に凸な領域で，潜在クラックの閉塞による体積減少を示す過程．

過程Ⅱ： 荷重－変位曲線の直線領域で，破壊開始までのほぼ完全な線形弾性過程．

過程Ⅲ： 荷重－変位曲線の上に凸な領域で最大荷重までをいい，軸方向クラック（後半にはせん断クラックも含む）の安定な成長過程．AE の増加と Vp の低下に見られるように，クラックの増加によって体積増加を示す．

過程Ⅳ： 最大荷重後の荷重降下域．

一般的に岩石は潜在的なクラックを多く含んでおり，最終的な破壊に至る過程において，まず，潜在クラックの先端から載荷軸に平行な方向に引張クラックが進展すると考えられる．このため，微視的な引張クラックの進展によるひずみは，載荷軸に垂直な方向に生じると考えられる．その後これらのクラックが互いに連結してせん断面を形成し，最終的な破壊に至るものと考えられるが，載荷速度により一軸圧縮強度が変化するといった岩石の時間依存性を検討する上で，ひずみの挙動に着目することは重要であり，載荷軸方向のひずみだけではなく，載荷軸に垂直な方向の応力－ひずみ挙動に着目することも重要であると考えられる．

本研究では，凝灰岩を用いた一軸圧縮試験を実施し，主に載荷軸に垂直な方向の応力－ひずみ挙動に着目し，載荷速度が応力－ひずみ挙動に及ぼす影響について検討した結果について述べる．

2 試 験 方 法

本研究で用いた試料は，栃木県産の凝灰岩（通称大谷石）である．試料は採石場の岩盤から目視観察により風化がほとんど生じていないと判断される部分から約 250mm 角の寸法でブロック状に採取した．岩石は一般的に異方性を示すことが知られている．まず，弾性波速度の計測により異方性の評価を行い，弾性波速度が最も速い方向（以下 H 方向と呼ぶ）および最も遅い方向（以下 R 方向と呼ぶ）を求めた．H 方向は天地方向に，R 方向は水平方向にほぼ一致した．供試体はこれらの方向に ϕ35mm × h70mm の円柱形に作製した．端面の平行度および平坦度は特に留意して成形し，高低差を ± 1/100mm 以内に抑えた．作製後の供試体は室内で 3 ヶ月以上自然乾燥した後，室温下 (25℃) での一軸圧縮試験に供した．供試体の物理的性質を Table 1 に示す．

試験には油圧サーボ試験機（MTS 社製 815 Rock mechanics test system）を用いた．試験は応力速度一定の条件で一軸圧縮破壊に至るまで試験を実施した．載荷軸方向のひずみ（以下軸ひずみと呼ぶ）の測定は，Fig. 1 に示すように供試体に 2 点（測定間隔 50mm）を

†　原稿受理　平成 17 年 9 月 8 日　Received Sep. 8, 2005
＊　正 会 員　㈱竹中工務店技術研究所　〒270-1395　印西市大塚，Takenaka R & D Inst., Ohtsuka, Inzai, 270-1395
＊＊　正 会 員　愛媛大学工学部環境建設工学科　〒790-8577　松山市文京町，Dept. of Civil & Environmental Eng., Faculty of Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

Table 1 Physical Properties of tuff.

	P-wave velocity (km/s)	Density (g/cm^3)	Porocity (%)
H-direction	2.52	1.65	37
R-direction	2.32		

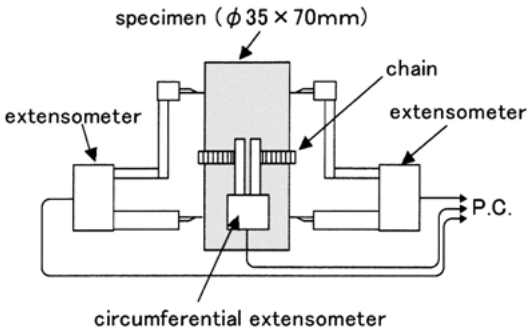


Fig. 1 Schematic diagram of the tests.

Table 2 Test results.

	Stress rate (MPa/s)	Peak stress: Compressive strength (MPa)	Peak stress: εa (×10⁻³)	Peak stress: εc (×10⁻³)	Diratancy initiation stress: Stress (MPa)	Diratancy initiation stress: εa (×10⁻³)	Diratancy initiation stress: εc (×10⁻³)
H-direction	0.001	15.6	4.75	−3.51	12.9	2.73	−0.58
		14.6	4.66	−3.63	11.1	2.32	−0.60
		14.2	6.20	−4.60	11.8	2.96	−0.65
		15.3	4.88	−3.30	13.0	2.84	−0.56
		12.7	4.49	−1.99	11.5	2.97	−0.72
	0.01	16.6	5.55	−3.40	14.8	3.47	−0.85
		14.2	4.99	−2.09	12.7	3.38	−0.78
	0.1	17.2	4.30	−2.76	14.1	2.69	−0.67
		14.1	4.16	−3.00	11.1	2.30	−0.53
		15.9	4.67	−2.85	13.3	2.86	−0.64
		16.3	4.64	−1.75	15.3	3.71	−0.87
	1	13.9	4.28	−1.90	12.2	2.94	−0.69
		16.2	4.19	−1.92	14.4	3.02	−0.67
		17.0	4.77	−2.92	13.8	2.78	−0.66
		17.2	4.32	−2.44	14.3	2.79	−0.73
		14.9	4.46	−2.13	12.8	3.03	−0.72
R-direction	0.001	13.9	5.40	−3.15	11.7	3.34	−0.64
		13.4	4.90	−3.77	10.5	2.93	−0.63
		14.6	5.01	−3.64	12.2	3.25	−0.69
	0.01	16.1	5.05	−2.57	14.3	3.80	−0.62
		16.3	5.37	−2.63	14.5	3.95	−0.70
		16.8	4.91	−3.00	13.5	3.22	−0.71
		14.4	4.61	−2.60	12.5	3.18	−0.62
	0.1	16.9	4.94	−2.63	14.3	3.49	−0.80
		12.0	4.47	−2.73	8.9	2.65	−0.52
		13.6	4.58	−2.13	11.6	3.22	−0.71
	1	15.2	4.87	−2.46	12.8	3.34	−0.66
		17.4	4.80	−2.36	14.8	3.40	−0.75
		17.1	4.55	−2.27	14.2	3.25	−0.67

点接触させるひずみ計を供試体の中央高さに対面状に2個取り付けることにより行い，その平均値を軸ひずみとした．また，載荷軸方向に垂直な方向のひずみ（以下周ひずみと呼ぶ）は供試体中央部の側面にチェーンを巻き付け，チェーン両端部の変位を測定した結果から，供試体断面が均一に同心円状に変形しているものと仮定して計算により求めた．なお，体積ひずみ ε_v については軸ひずみ ε_a および周ひずみ ε_c の測定値から式 (1) を用いて計算により求めた．

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_c \qquad (1)$$

3 試 験 結 果

3・1 応力速度と一軸圧縮強度との関係

試験はH方向およびR方向の供試体を用い，応力速度はデータのサンプリング間隔や応力の制御能力等の試験装置の性能の観点から，信頼性が高いデータが得られると判断した0.001MPa/s，0.01MPa/s，0.1MPa/sおよび1MPa/sの4種類とし，H方向には合計で16本，R方向には合計で13本の供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した．試験で得られたすべての供試体の一軸圧縮強度，一軸圧縮破壊時の軸ひずみおよび周ひずみの値をTable 2にまとめて示す．応力ーひずみ曲線の一例とし

て，H 方向に 0.001MPa/s で載荷した場合に得られたすべての供試体の応力ーひずみ曲線を Fig. 2 に示す．軸ひずみおよび周ひずみは応力の増加にともない単調に増加するが，体積ひずみは値が一旦増加した後に極大値を示し，その後減少に転じている．なお，Table 2 には，体積ひずみが極大値を示す点（以下ダイレイタンシー開始応力とよぶ）での応力，軸ひずみおよび周ひずみについてもあわせて示した．

各条件で得られた一軸圧縮強度の平均値と応力速度との関係をまとめたものを Fig. 3 に示す．応力速度の増加に伴い，H 方向の一軸圧縮強度はやや増加する傾向が見られる．また，R 方向については応力速度ごとの値のばらつきが大きいが，同様に応力速度の増加とともに，一軸圧縮強度がやや増加する傾向が見られる．Fig. 3 にはダイレイタンシー開始応力の平均値もあわせて示した．応力速度ごとの値のばらつきが大きいが，H 方向および R 方向ともに，一軸圧縮強度と同様に応力速度の増加によりダイレイタンシー開始応力はわずかに増加する傾向が見られた．

3・2　応力速度とひずみとの関係

応力速度と軸ひずみの平均値との関係をまとめたものを Fig. 4 に示す．H 方向，R 方向ともに，応力速度の増加とともに，ピーク応力時の軸ひずみの平均値は減少し，時間依存性が見られることがわかる．一方，ダイレイタンシー開始応力における軸ひずみの平均値は，応力速度にほとんど依存せず，H 方向，R 方向ともにほぼ同程度の値を示した．このことから，ピーク応力時の軸ひずみは時間依存性が大きいが，ダイレイタンシー開始応力における軸ひずみは時間依存性が小さいことがわかる．

また，応力速度と周ひずみの平均値との関係をまとめたものを Fig. 5 に示す．ピーク応力時の周ひずみの平均値は応力速度の増加に伴い，H 方向および R 方向ともに減少することがわかる．一方，ダイレイタンシー開始応力における周ひずみの平均値は応力速度に依存せず，H 方向および R 方向ともにほぼ一定の値を示した．このことから，軸ひずみと同様に，周ひずみについてもピーク応力時はひずみの時間依存性が大きいが，ダイレイタンシー開始応力では時間依存性が小さいことがわかる．

なお，今回の試験では応力，軸ひずみおよび周ひずみのいずれにおいても H 方向と R 方向での値の差は小さく，これらの値に関して載荷方向による異方性は小さいという結果であった．

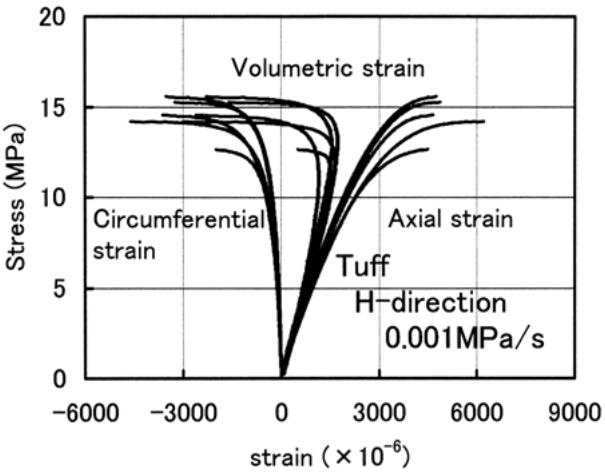


Fig. 2　Stress-strain curves obtained by uni-axial compression tests.

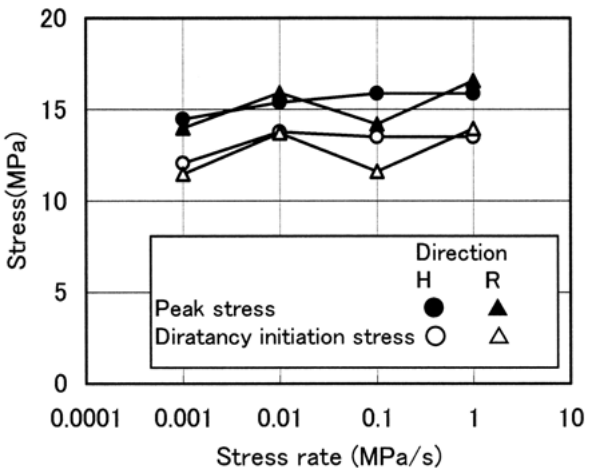


Fig. 3　Relation between stress rate and stress.

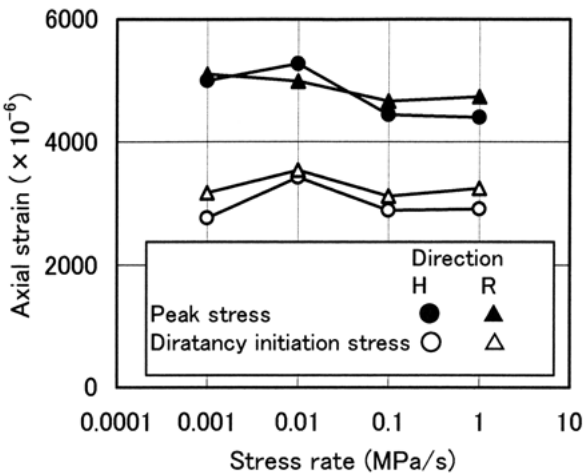


Fig. 4　Relation between stress rate and axial strain.

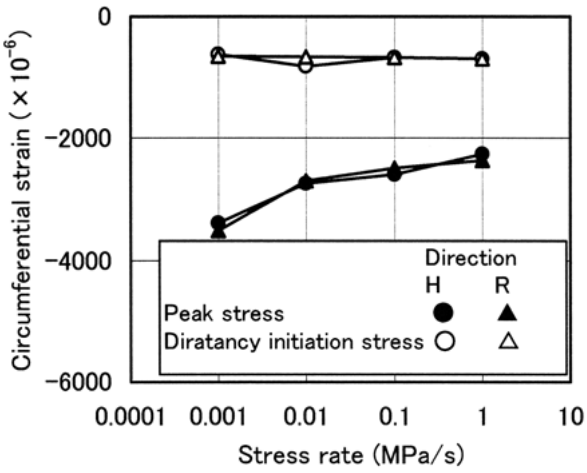


Fig. 5　Relation between stress rate and circumferential strain.

3・3 応力速度とヤング率およびポアソン比との関係

H 方向および R 方向で，応力速度が最も速い 1MPa/s と最も遅い 0.001MPa/s でヤング率の平均値を比較した結果を Fig. 6 に示す．なお，ここでは，各応力レベルと応力が 0 である原点との間で求めた割線ヤング率を示した．H 方向と R 方向を比較すると，H 方向の方が割線ヤング率の値が大きく，また，曲線の形状に違いが見られることから，割線ヤング率には載荷方向による異方性が見られる．また，H 方向および R 方向ともに応力速度の値によって割線ヤング率の値は異なり，応力速度が速い方が割線ヤング率の値が大きい．このことから，軸ひずみの値には時間依存性が見られ，応力速度が速いほど軸ひずみの発生量は小さくなることがわかる．また，応力レベルが比較的小さい領域では，H 方向および R 方向ともに，応力速度が速い場合と遅い場合における割線ヤング率の値の差には大きな変化が見られないのに対して，応力レベルが大きくなり破壊に近づくにつれて応力速度が遅いほど割線ヤング率の値は小さくなり，割線ヤング率の値の差が大きくなる．このことから，応力レベルが大きいほど軸ひずみの時間依存性は大きくなり，応力速度が遅いほど，軸ひずみの発生量が大きくなるものと考えられる．

割線ヤング率と同様に，H 方向および R 方向で，応力速度が最も速い 1MPa/s と最も遅い 0.001MPa/s でのポアソン比の平均値を比較した結果を Fig. 7 に示す．なお，ここで示したポアソン比は，応力が 1MPa 間隔ごとのひずみの増分を用いて計算した接線ポアソン比である．H 方向と R 方向を比較すると，応力レベルが比較的小さい領域では接線ポアソン比の値には大きな差は見られず，H 方向と R 方向での異方性は小さい．一方，H 方向および R 方向ともに応力速度が速くなると，応力レベルが比較的大きい領域では接線ポアソン比の値は小さな値を示す．このことから，応力レベルが比較的大きい領域では周ひずみは時間依存性を示すことがわかる．

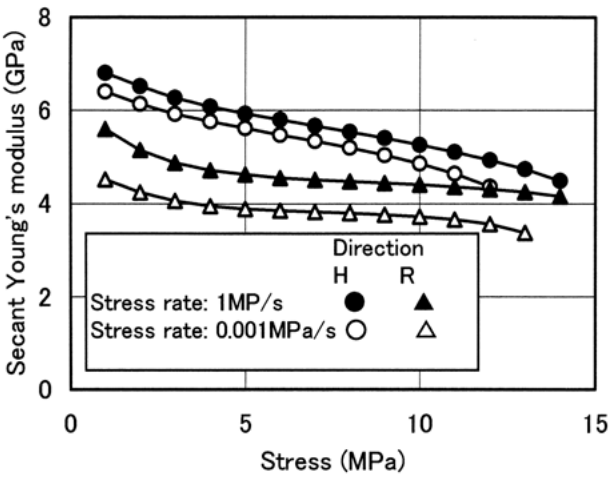


Fig. 6 Relation between stress and secant Younng's modulus.

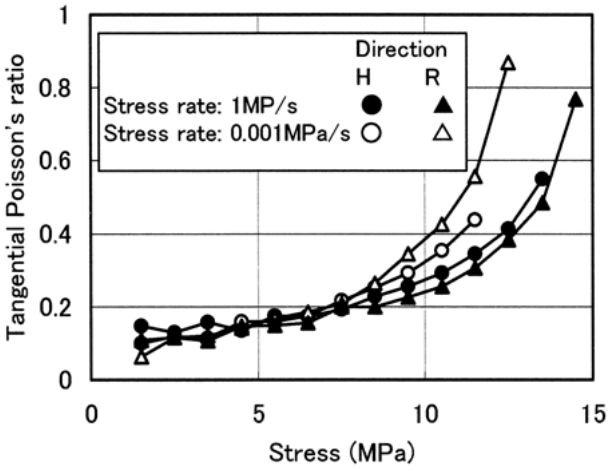


Fig. 7 Relation between stress and Poisson's ratio.

4 試験結果の考察

4・1 ダイレイタンシー開始応力における周ひずみ

ここでは，ダイレイタンシー開始応力の時点に着目し，周ひずみと破壊機構との関係について考察する．Fig. 7 に示したとおり，ポアソン比は応力の増加とともに値が増加していくことから，軸ひずみと周ひずみでは最終的な破壊に近づくに従い，周ひずみの増加する割合が顕著になる．これは，微視的なクラックを多く含む岩石では，応力の増加に伴い，まず，岩石内に潜在的に存在するクラックの端部に応力集中を生じ，載荷軸に平行な方向に引張クラックが進展する[4]ことに起因しているものと考えられる．さらに応力が増加すると，このような引張クラックが進展するとともに引張クラック同士が次第に連結してせん断面を形成し，巨視的な強度破壊であるせん断破壊に至るものと考えられる．

Fig. 5 に示したダイレイタンシー開始応力における周ひずみの値には軸ひずみのポアソン比分だけ発生するひずみが含まれている．ここでは，周ひずみから軸ひずみのポアソン比分のひずみを差し引いたひずみを式 (2)に示すように非弾性周ひずみ ε_c' と定義する．

$$\varepsilon_c' = \varepsilon_c + \nu \cdot \varepsilon_a \qquad (2)$$

ここで，ε_c は周ひずみ，ε_a は軸ひずみ，ν はポアソン比である．なお，非弾性周ひずみは，微視的な引張り破壊等に起因して生じるひずみと考えられる．実験結果から式 (2)を用いて ε_c' を求める場合，ポアソン比が必要となる．今回の試験では，応力－ひずみ曲線に非線形性が強く見られたため，ここでは，Fig. 7 に示した接線ポアソン比が応力レベルが小さい領域で直線的に増加する領域を直線近似し，応力が 0 におけるポアソン比を外挿して求めた値を用いた．

H 方向および R 方向で載荷速度ごとに非弾性周ひずみの値を求めた結果を Fig. 8 に示す．各応力速度ごとに値にばらつきがあるものの，平均的には載荷方向や応力速度によらずほぼ同程度の値を示していることがわかる．非弾性周ひずみは，ダイレイタンシー開始応力の時点で応力速度に依存せず，各供試体で同程度の値を示していることから，ダイレイタンシー開始応力の時点では，微

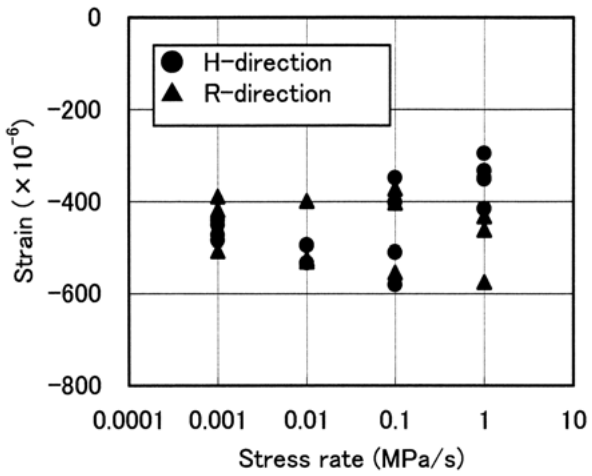


Fig. 8　Non-elastic circumferential strain when dilatancy initiation stress.

視的な破壊の進展状況は各供試体でほぼ同様であることが推察される．

4・2　非弾性周ひずみと引張破壊時のひずみの比較

一方，凝灰岩を用いた一軸引張り試験[5]を実施し，引張破壊時のひずみを求めた結果を Fig. 9 に示す．なお，一軸引張試験に用いた凝灰岩は，本研究で採取した岩石ブロックと同一地点から採取した別のブロックから ϕ35 × h100mm で供試体を作製した．供試体端面の平行度，平坦度等の供試体の作製条件やひずみの計測方法は本研究と同様である．[5]Fig. 8 と Fig. 9 を比較すると，一軸圧縮試験におけるダイレイタンシー開始応力における非弾性周ひずみの値と，一軸引張試験時の破壊ひずみはほぼ同程度の値であることがわかる．このことから，一軸圧縮試験時におけるダイレイタンシー開始応力の時点では，周方向には引張破壊を生じているものと考えられる．

大久保ら[6]は一軸引張試験時の強度破壊点における軸ひずみと一軸圧縮試験における強度破壊点の周ひずみの間に何らかの関係があるものと考え，複数の種類の岩石について両者の比較を行っている．このうち，一軸引張試験時の強度破壊点の軸ひずみよりも一軸圧縮試験における強度破壊点における周ひずみの方が 2 倍から 3 倍と大きな値を示す岩石が 5 種類の岩石でみられ多数派を占めたことを報告している．この原因として，これらの岩石では一軸圧縮試験時の周ひずみは，応力レベルの低い段階で一軸引張試験時の強度破壊点のひずみに達し，一軸圧縮試験時には供試体内の複数の箇所で引張亀裂が同時並行して進展しているものと考察している．一方，他の 2 種類の岩石については一軸引張試験時の強度破壊点における軸ひずみと一軸圧縮試験時の強度破壊点の周ひずみの値がほぼ同程度の値を示した．これは，一軸圧縮試験時の引張亀裂が局所化しており，この引張亀裂の進展が直ちに供試体の全体の破壊に繋がるためと考察している．大久保らの研究と本研究では，一軸圧縮試験時に載荷軸に垂直な方向に引張破壊を生じるという考え方は同じであるが，本研究では周ひずみから軸ひずみのポアソン比分だけ発生するひずみを差し引いた非弾性周ひずみと引張破壊ひずみが等しくなる場合に，載荷軸に垂直な方向の引張破壊を生じると考えている点で大久保らの研究と異なっている．

なお，Fig. 4 や Fig. 5 に示したとおり，ダイレイタンシー開始応力時における軸ひずみや周ひずみは応力速度によらずほぼ一定の値を示し，時間依存性は小さいという結果が得られたことから，載荷軸に垂直な方向の引張破壊が卓越していると考えられるダイレイタンシー開始応力では，ひずみの時間依存性は小さいものと推察される．

4・3　ダイレイタンシー開始応力後の応力ーひずみ挙動

一軸圧縮試験を実施した供試体で，応力と主せん断ひずみおよび体積ひずみの計算値を示した結果の一例を Fig. 10 に示す．ダイレイタンシー開始応力を超え巨視的な強度破壊に近づくにつれて，主せん断ひずみの値は急激に大きくなり，せん断破壊が支配的となっていくものと考えられる．これは，載荷軸に平行な方向に生じた引張クラックが互いに連結してせん断面を形成していくためと考えられる．Fig. 4 および Fig. 5 に示したとおり，ピーク応力時の軸ひずみや周ひずみの値は，応力速度に依存するという結果が得られた．このことから，せん断

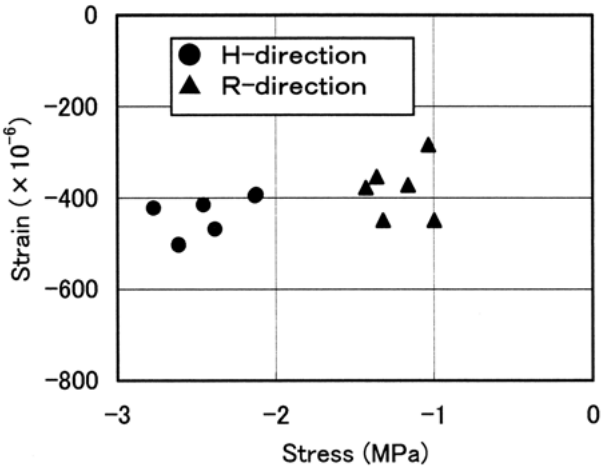


Fig. 9　Fracture strain obtained by uni-axial tension tests.

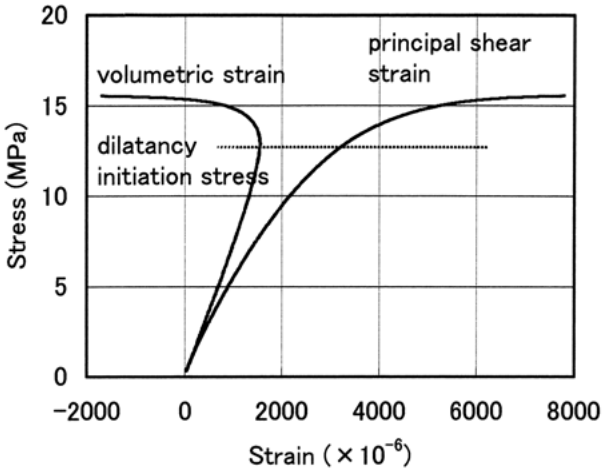


Fig. 10　Principal shear strain obtained by uni-axial compression tests.

破壊が支配的なピーク応力時においては，ひずみの時間依存性が比較的大きいものと推察される．

5 結　　言

本研究では，凝灰岩を用いて一軸圧縮試験を行い，応力速度が応力－ひずみ特性に及ぼす影響を検討した．本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである．

(1)　従来の研究と同様に，本研究で用いた大谷凝灰岩においても，応力速度が大きくなると一軸圧縮強度が大きくなる傾向がみられた．

(2)　一軸圧縮試験におけるダイレイタンシー開始応力においては，非弾性周ひずみの値と，一軸引張破壊時のひずみがほぼ同程度の値を示しており，載荷軸に垂直な方向に引張り破壊が生じているものと考えられる．

(3)　ピーク応力時における軸ひずみおよび周ひずみの値は，応力速度が大きくなると値が小さくなる．一方，ダイレイタンシー開始応力においては軸ひずみおよび周ひずみの値は応力速度に依存せずほぼ一定の値を示す．このことから，応力－ひずみ曲線の時間依存性は，ダイレイタンシー開始応力以降のせん断破壊が卓越した領域で大きいものと推察される．

参 考 文 献

1） Y. Nishimatsu, T. Yamaguchi and S. Okubo, “Effect of Strain Rate on Strength in Uniaxial Compression Test of Rocks”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.29, No.324, pp.935-940 (1980).

2） S. Okubo, Y. Nishimatsu, C. He and S. Y. Chu, “Loading Rate Dependency of Uniaxial Compressive Strength of Rock Under Water-Saturated Condition”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.41, No.463, pp.403-409 (1992).

3） The Society of Materials Science, Japan, “Iwa-no-Rikigaku Kiso-kara-Ouyou-made”, pp.100-101 (1993) Maruzen.

4） The Society of Materials Science, Japan, “Iwa-no-Rikigaku Kiso-kara-Ouyou-made”, pp.90-93 (1993) Maruzen.

5） Y. Kohmura and Y. Inada, “Stress-Strain Characterization of Rocks under Tensile and Compressive Stress”, Proceedings of the 11th International Conference of IACMAG, Vol.2. pp.89-96 (2005).

6） S. Okubo, K. Fukui and T, Ogino, “Attenuation of Elastic Wave Velocity/Height and Lateral Strain in Uniaxial － Compression test with special attention to the results of uniaxial tension test －”, Shigen-to-Sozai, Vol.116, No.2, pp.97-104 (2000).