

凝灰岩の破壊メカニズムに関する一考察

Consideration on Fracture Mechanism of Tuff.

甲村雄一* 下河内隆文* 岩本 宏* 上田貴夫**

Yuichi KOHMURA, Takafumi SHIMOGOCHI, Hiroshi IWAMOTO, Takao UEDA

In this study, fracture mechanism of brittle failure rock was discussed. At first, uni-axial compression test using ohya-tuff was carried out, and stress-strain characteristics were investigated. Non-linear strain was define as a part of circumferential strain, and it was found that non-linear strain increase to tensile value with axial stress. It was consider that the point at maximum volumetric strain means initiation of failure. In the point at maximum volumetric strain, it was found that non-linear strain equals tensile failure strain obtained by uni-axial tension test. From these results, it was estimated that tensile failure is caused circumferential direction and possible to judge failure initiation using tensile failure strain.

1. 緒 言

岩石や岩盤を対象としてこれまでに種々の破壊基準が提案されている。これまでに提案されている破壊基準の多くは応力の値により破壊を評価するものである。この場合、例えば原位置岩盤の安定性を原位置での計測値を用いて評価する際には、変位やひずみの計測値から間接的に応力を求めることが多いため、規準に適用する応力の推定値の精度に問題が残る。一方で、近年ではひずみを用いた破壊基準も提案されている。櫻井¹⁾は原位置で測定された変位から直接的にひずみを求め、地山の安定性を評価する直接ひずみ評価法を提案し、ひずみの許容値として限界ひずみを提案している。Stacey²⁾は脆性材料を対象とし、最小主応力方向(圧縮側を正)の引張ひずみにより破壊の初生を規定する Simple Extension Strain Criterion を提案している。また、藤井ら³⁾は脆性材料を対象として、最小主応力方向の引張ひずみにより破壊を規定する引張ひずみ基準を提案している。このようなひずみによる破壊基準は先に述べたような問題点を解決できる可能性があり、さらに詳細な検討を行う必要があるものと考えられる。本研究では凝灰岩を用いて一軸圧縮試験および一軸引張試験を実施し、破壊のメカニズムに関して考察を行うとともに、ひずみを用いた破壊の評価に関して検討を行った結果について述べる。

2. 一軸圧縮試験による応力-ひずみ特性の評価

2.1 試験方法

本研究に用いた試料は栃木県産の凝灰岩(通称大谷石)であり、採石場からブロックの状態で採取した。岩石は一般に力学的な異方性を示すことが知られている。本研究では弾性波(P波)伝播速度により異方性を評価し、速度が最も早い方向(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)に供試体を作製した。供試体の寸法は、 $\phi 35\text{mm} \times h 70\text{mm}$ (以下 $\phi 35$ 供試体と呼ぶ)および $\phi 50\text{mm} \times h 100\text{mm}$ (以下 $\phi 50$ 供試体と呼ぶ)とし、端面の平行度および平坦度は特に留意して整形した。作製後の供試体は実験室内で1ヶ月以上自然乾燥させた後、試験に供した。供試体の物理的性質を表-1に示す。

試験には油圧サーボ式の試験装置を用い、応力速度一定制御による一軸圧縮試験を行った。計測装置の概念図を図-1に示す。応力は供試体の上部に設置したロードセルにより供試体に作用している荷重を測定し、

* 正会員 (株)竹中工務店 技術研究所

** 正会員 (株)竹中工務店 LNG本部

表-1 供試体の物理的性質

	P波伝播速度 (km/sec)	含水比 (%)	密度 (g/cm ³)
H方向	2.52	3.9	1.65
R方向	2.32		

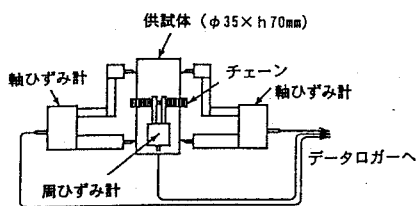
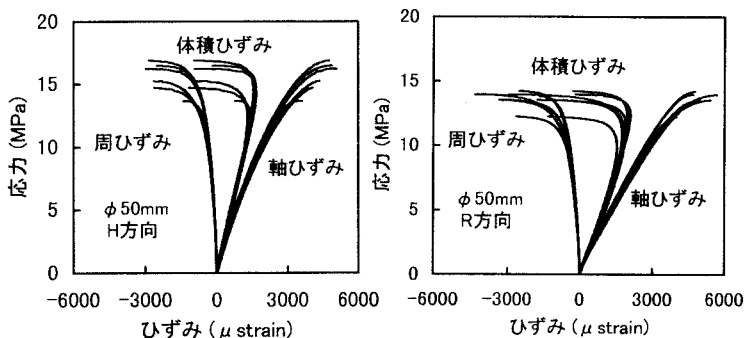


図-1 ひずみ計測方法の概念図



(a) H方向

(b) R方向

図-2 φ50 供試体で得られた応力-ひずみ曲線

これを供試体の初期断面積で除すことにより求めた。加圧軸方向のひずみ（以下軸ひずみと呼ぶ）の測定は、図-1に示すように供試体に2点（測定間隔50mm）を点接触させるひずみ計を供試体の中央部に対角状に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、加圧軸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、体積ひずみについては軸ひずみおよび周ひずみの測定値から(1)式を用いて求めた。

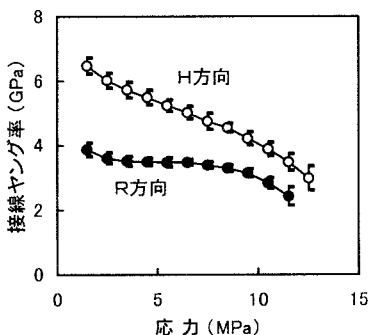


図-3 接線ヤング率と
応力との関係

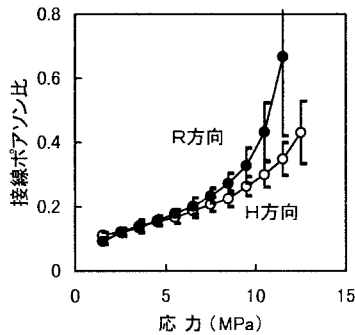


図-4 接線ポアソン比と
応力との関係

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

ここで、 ε_v : 体積ひずみ、 ε_a : 軸ひずみ、 ε_c : 周ひずみ

2.2 異方性に関する検討

φ50 供試体を用いてH方向およびR方向に各6本の試験を行って得られたすべての応力-ひずみ曲線を図-2(a), (b)に示す。なお、試験時の応力速度は0.01MPa/secとした。凝灰岩はclass-Iに分類される岩石であるため、ひずみ速度一定制御で試験を行う場合にはピーク応力に達した後の応力減少過程における応力-ひずみ関係の評価も可能である。しかし、今回の試験は応力速度一定制御としたために、ピーク応力に達するまでの応力-ひずみ関係の評価を行っていることを断っておく。H方向とR方向を比較するとH方向の方が一軸圧縮強度が大きいことがわかる。応力が1MPa 間隔ごとの接線ヤング率の平均値および標準偏差を求めた結果を図-3に示したが、H方向とR方向では値が大きく異なることがわかる。また、1MPa 毎の増分のひずみを用いて求めたポアソン比（以下接線ポアソン比と呼ぶ）の値を図-4に示す。応力の増加により接線ポアソン比の値は増加していくが、R方向の方が増加する割合が大きい。これらの結果から大谷凝灰岩は力学的な異方性を有することがわかる。また、ポアソン比の値が破壊点近傍で急激に増加することから、破壊のメカニズムを考察する上で周方向のひずみに着目することが重要であると考えられる。

2.3 供試体間での試験結果のばらつきに関する検討

図-2(a),(b)に示すように、今回の試験で得られた応力-ひずみ曲線は供試体間でのばらつきが大きい。

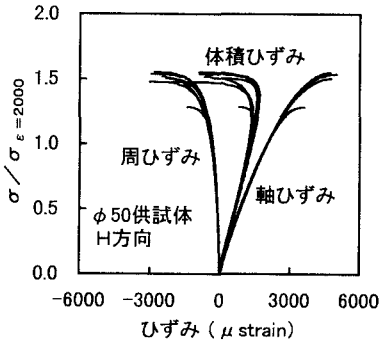


図-5 φ50 供試体の正規化応力-ひずみ曲線

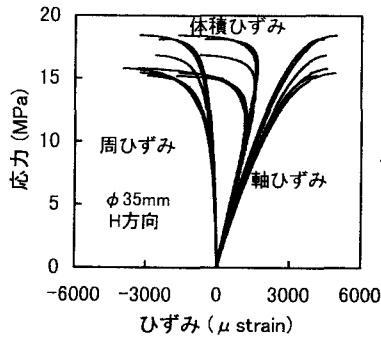


図-6 φ35 供試体の応力-ひずみ曲線

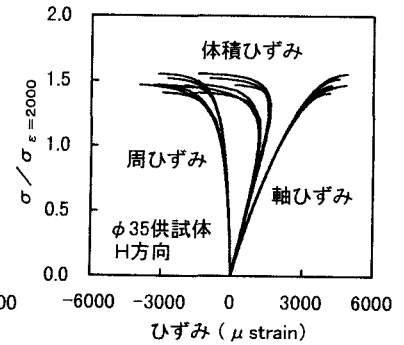


図-7 φ35 供試体の正規化応力-ひずみ曲線

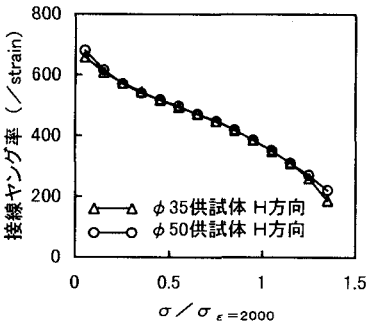


図-8 接線ヤング率の比較

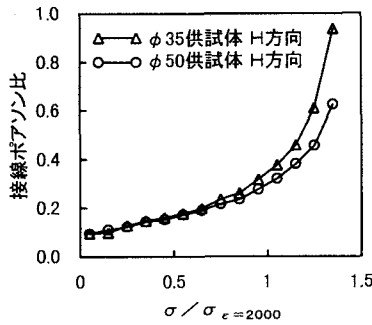


図-9 接線ポアソン比の比較

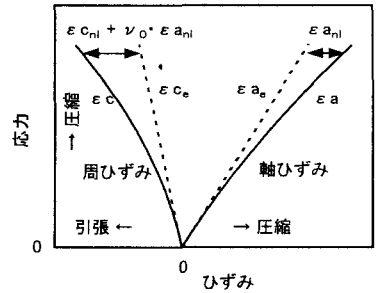


図-10 応力-ひずみ曲線の模式図

この理由として以下のようなことが考えられる。すなわち、軸方向の応力は供試体に作用する荷重を見かけの断面積で除すことにより計算したが、今回の試験に用いた凝灰岩は空隙を多く含む岩石であり、実際に荷重を支持し得る実質部の断面積（以下有効断面積と呼ぶ）はみかけの断面積に比較して小さいことが考えられる。このため、供試体に作用する軸方向応力を正確に評価するためには供試体に作用する荷重を有効断面積で除すことにより評価すべきであると考えられるが、供試体毎に有効断面積を正確に評価することは困難である。一方、軸ひずみの値は有効断面積の影響を受け難いものと考えられるためひずみを基準とし、軸ひずみが 2000 μ ひずみ生じた時の応力を 1 として正規化した応力-ひずみ曲線（以下正規化応力-ひずみ曲線と呼ぶ）を求めた。φ50 供試体の H 方向について求めた正規化応力-ひずみ曲線を図-5 に示す。正規化応力-ひずみ曲線は応力の値が小さい領域では供試体間でのばらつきが小さく、また、1 供試体のみ強度が極端に小さいものが見られたが、破壊点近傍におけるばらつきも図-2(a) に比較して小さいことがわかる。このことから、今回試験に用いた凝灰岩の応力-ひずみ関係を正確に検討する場合には有効断面積を考慮する必要があると考えられる。

2.4 供試体の寸法が試験結果に与える影響

φ35 供試体を用いて H 方向に 6 本の試験を行って得られたすべての応力-ひずみ曲線を図-6 に、また、正規化応力-ひずみ曲線を図-7 に示す。なお、応力速度は同様に 0.01MPa/sec として試験を実施した。図-6 に示すように応力-ひずみ曲線は φ50 供試体と同様に供試体間でのばらつきが大きい、図-7 に示す正規化応力-ひずみ曲線では図-6 に比較して供試体間でのばらつきは小さいという結果が得られた。また、φ50 供試体と φ35 供試体の正規化応力-ひずみ曲線を用いて接線ヤング率および接線ポアソン比の平均値を求め比較した結果を図-8 および図-9 に示す。接線ヤング率の値は両供試体で良く一致しており、軸方向に関しては両供試体でほぼ同様の応力-ひずみ特性を示していることがわかる。一方、接線ポアソン

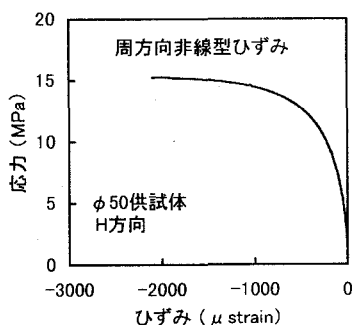


図-11 $\epsilon_{c_{n1}}$ と応力との関係の代表例

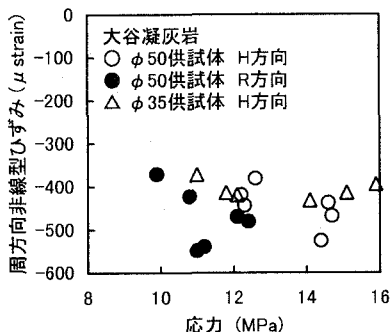


図-12 ダイラタンシー開始点における $\epsilon_{c_{n1}}$ の値

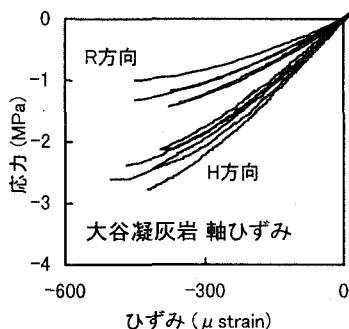


図-13 一軸引張試験で得られた軸方向の応力ひずみ曲線

比の値に関しては応力が小さい領域では両供試体で同様の値を示しているが、応力が大きくなるに従い両者の値に若干の差が生じている。これらの結果から、今回試験を行った2種類の寸法の供試体で寸法効果が応力-ひずみ特性に及ぼす影響は、周方向で若干見られるものの比較的小さいものと考えられる。

3. 破壊のメカニズムに関する考察

3.1 非線型ひずみの定義

ヤング率およびポアソン比の値が応力状態に依存せず一定である線形弾性体材料を用いて一軸圧縮試験を実施した場合、供試体の軸方向および周方向の応力-ひずみ関係は(2)式および(3)式で示すような関係が得られ、これを図示すると図-10の破線のようになる。

$$\epsilon_{a_e} = \sigma_a / E_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{c_e} = -\nu_0 \cdot (\epsilon_{a_e}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ϵ_{a_e} ：軸方向の弾性ひずみ、 ϵ_{c_e} ：周方向の弾性ひずみ、 σ_a ：軸方向応力、 E_0 ：線形弾性体のヤング率、 ν_0 ：線形弾性体のポアソン比

一方、今回試験を行った岩石の応力-ひずみ曲線は図-10に実線で模式的に示したような値であり、線形弾性体と仮定した場合に比較して軸方向には過剰な圧縮ひずみが生じ、また、周方向には過剰な引張ひずみが生じている。このような過剰なひずみを非線形ひずみと呼ぶこととし、一軸圧縮試験時の周方向の非線形ひずみを(4)式で定義する。

$$\epsilon_{c_{n1}} = \epsilon_c + \nu_0 \cdot (\epsilon_{a_e} + \epsilon_{a_{n1}}) = \epsilon_c + \nu_0 \cdot \epsilon_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\epsilon'_{c_{n1}}$ ：周方向非線形ひずみ、 $\epsilon_{a_{n1}}$ ：軸方向非線形ひずみ ($\epsilon_{a_{n1}} = \epsilon_a - \epsilon_{a_e}$)

3.2 周方向非線型ひずみに関する考察

実験結果から(4)式を用いて $\epsilon_{c_{n1}}$ を求める場合、 ν_0 は線形弾性体の値を用いる必要がある。 ν_0 の値は図-4に示した接線ポアソン比が直線的に増加する領域を直線で近似し、応力が0におけるポアソン比を外挿して求めた。先に述べた試験結果について $\epsilon_{c_{n1}}$ の値を求めた結果の代表例を図-11に示す。 $\epsilon_{c_{n1}}$ の値は軸方向応力の増加に伴い加速度的に増加することがわかる。岩石の破壊は微小な潜在クラック近辺での局所的な破壊に始まり、クラックの進展や新たな発生を経て最終的な破壊に至るものと考えられ、このようなクラックの進展や発生が、ダイラタンシーを生じる主要な原因の一つであると考えられる。体積ひずみが極大値を示す点をダイラタンシー開始点と定義し、この点における軸方向応力と $\epsilon_{c_{n1}}$ との関係をもとめてものを図-12に示す。ダイラタンシー開始点における軸方向応力は供試体間でのばらつきが大きいものの $\epsilon_{c_{n1}}$ の値は加圧方向や供試体のサイズに関わらずほぼ一定の値を示すことがわかる。また、 $\epsilon_{c_{n1}}$ は引張ひずみであり、周方向には引張応力が生じていることが推察される。

3.3 一軸引張試験による引張破壊ひずみの評価

引張応力下における応力-ひずみ特性を評価する目的で一軸引張試験を実施した。供試体寸法はφ35mm×h100mmとし、供試体に0.5kNの圧縮荷重をかけた状態で上下加圧版と供試体間をエポキシ樹脂系接着剤で接着した後、応力速度一定条件(0.01MPa/sec)で試験を実施した。ひずみの計測方法は前述の一軸圧縮試験と同様である。H方向およびR方向に試験を実施して得られた軸方向の応力-ひずみ曲線を図-13に示す。各方向で応力ひずみ曲線は大きく異なり、一軸引張強度に大きな差が見られることがわかる。引張破壊時における軸ひずみ(以下、引張破壊ひずみと呼ぶ)を求めた結果を図-14に示す。図-14と図-12を比較すると一軸圧縮試験時におけるダイラタンシー開始点での $\varepsilon_{c_{n1}}$ の値は引張破壊ひずみの値とほぼ一致することがわかる。すなわち、一軸圧縮試験のダイラタンシー開始点においては周方向に引張破壊を生じていることが推察される。

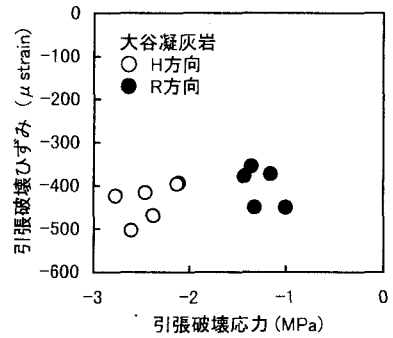


図-14 一軸引張試験で得られた引張破壊ひずみ

3.4 ひずみに着目したダイラタンシー開始点での引張破壊の評価

これまでの検討結果から一軸圧縮応力下では周方向、すなわち最小主応力方向の非線型ひずみを求め引張破壊ひずみと比較することで引張破壊を評価することができるものと推察される。本研究と同様に最小主応力方向のひずみに着目した破壊規準として、ピーク応力時における破壊を規定するものと推察される藤井らの引張ひずみ規準³⁾があり、破壊時の状態は(5)式で表される。

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{T0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ε_T : 最小主応力方向の引張ひずみ、 ε_{T0} : 限界引張ひずみ

藤井らは ε_{T0} の値をピーク応力時の最小主応力方向のひずみとして求め、岩石に固有な強度定数と説明している。一方、Stacey²⁾は定義が曖昧であるが破壊の初生を規定する規準として(5)式と同様な式を提案し、限界引張ひずみに相当する値を一軸および三軸圧縮試験で得られた軸ひずみ-周ひずみ曲線を近似した2本の直線の交点で求めている。これらの規準で規定する破壊の状態は異なっているが、限界引張りひずみの値を最小主応力方向のひずみと比較して破壊の評価を行う点は同様である。一方、本研究で提案した破壊の評価はこれらとは異なり、引張破壊ひずみと最小主応力方向のひずみの一部である非線型ひずみとを比較して、ダイラタンシー開始点における引張破壊の評価を行おうとするものである。ダイラタンシー開始点以降では亀裂等の不連続面の発達に起因して体積ひずみが増加するものと考えられ、また、応力-ひずみ曲線の供試体間でのばらつきが大きくなることから力学的に不安定な状態であることが推察され、ダイラタンシー開始点を評価することは重要であると考えられる。

4. 結 言

本研究では大谷凝灰岩の応力-ひずみ特性に関する検討を行うとともに、破壊のメカニズムに関する考察を行った。その結果、一軸圧縮試験においてはダイラタンシー開始点において周方向に引張破壊を生じていることが推察され、最小主応力方向の非線型ひずみと引張破壊ひずみとを比較することにより破壊の評価を行う方法を提案した。本研究では一軸状態における応力-ひずみ特性の評価結果をもとに考察を行ったが、三軸応力状態における検討も必要である。また、破壊の評価を行うためには、ひずみの計測結果から最小主応力方向の非線型ひずみの値を精度良く推定する必要がある。これらについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文報告集，No.317，pp.93-100，1982.
- 2) T.R.Stacey：A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock，Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.18,pp.469-474,1981.
- 3) 藤井義明・石島洋二：引張ひずみ規準に関する研究，資源と素材，Vol.110，No.3，pp.211-214，1994.