凝灰岩が巨視的破壊に至るまでの 微視的な破壊挙動に関する考察*

甲 村 雄 一¹ 稲 田 善 紀²

Consideration of the Microscopic Failure Prior to the Macroscopic Failure of Tuff

by Yuichi KOHMURA^a and Yoshinori INADA^b

- a. Research & Development Institute, Takenaka Corporation (Corresponding author E-mail: kouchura.yuuichi@takenaka.co.jp)
b. Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University

In this study, the behavior of the microscopic failure prior to the macroscopic failure for Tuff is examined. Firstly, uni-axial tension tests were carried out and stress-strain characteristics were investigated. It was found that the anisotropy was small for the strain in the tensile fracture, while the anisotropy was remarkable for the tensile strength.

Secondly, uni-axial compression tests were carried out and various physical properties of the macroscopic failure were examined. It was found that the anisotropy was small for the strain in the compressive failure, while the anisotropy was remarkable for the compressive strength, Young's modulus and Poisson's ratio.

Inelastic strain was defined as a part of circumferential strain. At the point of maximum volumetric strain, it was found that inelastic strain almost equals tensile failure strain obtained by the uni-axial tension test. From these results, it is estimated that microscopic failure is caused by circumferential direction.

KEY WORDS: Tuff, Brittle failure, Microscopic Failure, Tensile Failure Strain

1. 結 言

岩石のような多くの潜在クラックを含む脆性材料は、一軸圧縮応力下においては一般的に以下のような過程を経て巨視的な破壊に至るものと考えられている¹⁾。

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 V_p 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。

以上の考え方では、過程Ⅳで巨視的な強度破壊に至るまでに、過程Ⅲにおいて微視的な破壊が進行する。このような微視的な破壊は、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ものと考えられている²⁾。このような引張クラックが進展していくと、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。すなわち、

巨視的破壊に先立って生じる微視的破壊は主として引張破壊であると考えられるため、圧縮応力下における岩石の破壊現象を解明していく上で、引張応力下の応力－ひずみ特性に着目することも重要であると考えられる。しかし、これまでの引張応力下における研究例は少ない。Novaら³⁾は片麻岩を用いてひずみ速度一定制御の一軸引張試験を行い、一軸引張強度および破断面と層理面との関係を求めた。福井ら⁴⁾は一軸引張応力下での載荷方向の完全応力－ひずみ曲線を求め、引張破壊時においても残留強度が存在すること等を報告している。しかしながら、圧縮応力下の応力－ひずみ特性に関して得られている知見に比較して、引張応力下における知見はわずかであると言わざるを得ない。

本研究では岩石の中では比較的多孔質な岩石である凝灰岩を対象として、凝灰岩が巨視的な強度破壊に至るまでの微視的な破壊の挙動について検討する。岩石は一般的に力学的な異方性を示すことが知られている。まず、一軸引張試験を行い引張応力下における応力－ひずみ曲線を求めるとともに、引張破壊時の応力やひずみの異方性について考察する。次に、一軸圧縮試験を実施して圧縮応力下における応力－ひずみ曲線を求め、巨視的な強度破壊に至るまでの種々の物性について考察を行う。さらに、微視的な破壊と載荷軸に垂直な方向に生じるひずみとの関係に着目して、一軸圧縮応力下における微視的な破壊現象について異方性の影響を含めて考察した結果について述べる。

2. 一軸引張応力下における応力－ひずみ特性

2・1 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

*2005年5月25日受付 11月21日受理

1.(株)竹中工務店技術研究所 研究主任

2.愛媛大学 工学部 環境建設工学科 教授

【著者連絡先】FAX: 0476-47-6460 (竹中工務店・甲村)

E-mail: kouchura.yuuichi@takenaka.co.jp

キーワード：凝灰岩、脆性破壊、微視的破壊、引張破壊ひずみ

Table 1 Physical properties of tuff.

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

Fig.1 Schematic diagram of the tests.

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、供試体はこれらの方向に $\phi 35\text{mm} \times h100\text{mm}$ の円柱形に作製した。なお、H 方向は天地方向に一致した。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 $\pm 1/100\text{mm}$ 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°C) での一軸引張試験に供した。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 Fig.1(a) に示すように、供試体の端面と加圧盤間および上部加圧盤に設けた球座部を 0.5kN の圧縮荷重を作用させた状態でエポキシ樹脂系の接着剤により接着した後、応力速度一定 (0.01MPa/s) の条件で一軸引張破壊に至るまで試験を実施した。応力は供試体に作用している荷重を供試体の初期断面積で除すことにより求めた。載荷軸方向のひずみ（以下軸ひずみと呼ぶ）の測定は、Fig.1(b) 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。

2・2 試験結果

H 方向および R 方向で各 6 本の供試体を用いて得られたすべての応力-ひずみ曲線を Fig.2(a) ~ (d) に示す。応力およびひずみは圧縮側を正として示してある。なお、試験終了時の破断面は軸ひずみの測定区間の外側に発生したものが各方向とも 2/3 を占めた。なお、応力-ひずみ曲線には供試体間でややばらつきが見られたが、破断面の発生位置による応力-ひずみ曲線の偏りは見られなかった。また、軸ひずみは 2 個のひずみ計で計測したが、その差は最大で 10% 程度であった。Fig.2(a),(b) には H 方向および R 方向の軸ひずみを示した。両者を比較すると一軸引張強度は H 方向で明らかに大きく、載荷方向による異方性が明らかに見られるが、一軸引張破壊時の軸ひずみについては H 方向と R 方向で

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

Fig.3 Tangential Young's modulus obtained by uni-axial tension tests.

大きな差はみられなかった。また、各供試体の計測値のばらつきは、H 方向および R 方向ともに比較的小さいという結果が得られた。Fig.2(c),(d) には、H 方向と R 方向の一軸引張試験時における周ひずみの計測値を示した。周ひずみの値は軸ひずみに比べて明らかに小さい。H 方向と R 方向を比較すると、一軸引張破壊時の周ひずみはいずれも $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 程度の範囲にあり、H 方向と R 方向で大きな差はみられず、また、各供試体間のばらつきも比較的小さいという結果が得られた。また、一軸引張破壊時における各供試体のポアソン比の値を計算した結果、H 方向の平均値は 0.10 程度、R 方向の平均値は 0.08 程度とほぼ同程度の値であるという結果が得られた。これまでに報告されている岩石の一軸引張試験に関する研究では、軸ひずみの計測結果の報告例は見られるものの、チェーン式変位計により周ひずみを計測した報告例は見あたらない。本研究では周ひずみの計測を実施したため、周ひずみに関する応力-ひずみ曲線に関する新しい知見や一軸引張破壊時のポアソン比に関する新しい知見を得ることができた。

Fig.3 に応力と 0.5MPa 間隔ごとの軸ひずみの増分から求めた接線ヤング率の平均値との関係を求めた結果を示す。接線ヤング率の値は H 方向と R 方向で大きな差が見られ H 方向の値が大きい。また、各方向とも引張応力の増加とともに接線ヤング率の値は低下する傾向にある。

一軸引張強度と一軸引張破壊時の軸ひずみとの関係を Fig.4 に

Fig. 4 Fracture strain obtained by uni-axial tension tests.

示す。H方向とR方向では破壊時の応力には大きな差が見られるのに対して、破壊時の軸ひずみは両者の差が小さい。このことから、破壊時の応力は異方性の影響を受けやすいのに対して、軸ひずみは影響を受けにくいことがわかる。この原因の一つとして、以下のことが考えられる。

Table 1 に示したように H 方向は R 方向に比べて P 波伝播速度が速い。このことから、潜在クラックは H 方向に垂直な方向には少なく、R 方向に垂直な方向に多く分布していると考えられる。一軸引張試験時に荷重を支持できる断面積を、供試体の全断面積から潜在クラックの部分を除いた断面積と近似すれば、この断面積は H 方向で大きく R 方向で小さい。このように考えれば、供試体に作用している荷重が同じでも、荷重を支持できる断面に生じている平均応力は H 方向では小さく、R 方向では大きいものと考えられる。Fig.2 では荷重を供試体の全断面で除すことによって応力を求めたため、H 方向と R 方向で引張破壊時の応力に差が見られ、異方性の影響が強く見られた可能性があると考えられる。

また、Fig.2 では引張破壊時の軸ひずみおよび周ひずみともに H 方向および R 方向で大きな差は見られないという知見を得た。このことから、先に述べたように荷重を支持できる断面積の大きさは H 方向と R 方向で異なるが、ほぼ等しい平均応力が生じているため、ひずみは異方性の影響が小さいという結果が得られた可能性が考えられる。

3. 一軸圧縮応力下における応力-ひずみ特性

3・1 試験方法

試験に用いた供試体の寸法は $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ とし、一軸引張試験に使用した同一の岩石ブロックから同様に H 方向および R 方向に作製した。端面の平行度および平坦度についても一軸引張試験と同様とした。試験は一軸引張試験と同様に、応力速度一定 (0.01MPa/s) の条件で実施し、使用した試験機やひずみの計測法は一軸引張試験と同様である。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 (1) 式を用いて計算により求めた。

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

3・2 荷重方向が応力-ひずみ特性に及ぼす影響

H 方向および R 方向に各 6 本の供試体を用いて試験を実施して得られたすべての応力-ひずみ曲線を Fig.5(a), (b) に示す。供試体間での応力-ひずみ曲線のばらつきは、応力が大きい状態で見られるものの、体積ひずみが極大値を示す応力まではばらつきは比較的小さく、応力が小さい領域では試験の再現性が高いことがわかる。また、H 方向に比較して R 方向では一軸圧縮強度が小さく、強度に異方性が見られる。

まず、軸ひずみに着目する。各荷重方向の応力と接線ヤング率

Fig. 5 Stress-strain curves obtained by uni-axial compression tests.

Fig. 6 Tangential Young's modulus obtained by uni-axial compression tests.

Fig. 7 Tangential Poisson's ratio obtained by uni-axial compression tests.

の平均値との関係を求めた結果を Fig.6 に示す。ここでいう接線ヤング率とは、応力が 1MPa ごとのひずみの増分を用いて計算したヤング率である。一軸圧縮強度が大きい H 方向では、R 方向に比べて接線ヤング率の値は大きく異方性を示す。H 方向では応力の増加とともに接線ヤング率の値は単調に減少する。一方、R 方向では一度値が減少した後に接線ヤング率がほぼ一定値を示す区間を経て再度値が減少している。

次に、周ひずみおよび体積ひずみに着目する。本研究ではひずみは圧縮側を正としている。Fig.5 よりいづれの供試体においても周ひずみは応力の増加に伴い減少していくことがわかる。一方、体積ひずみは一旦増加するが、応力の増加とともにダイラタンシーを生じるため、ある点で極大値を示しその後減少に転じる。応力と接線ポアソン比の平均値との関係を荷重方向別に求めたものを Fig.7 に示す。ここでいう接線ポアソン比とは、接線ヤング率と同様に、応力が 1MPa 間隔ごとのひずみの増分を用いて計算したポアソン比である。図より各方向とも接線ポアソン比の値は応力が比較的小さい領域ではほぼ直線的に増加し、その後急激に増加する。接線ポアソン比の値が直線的に増加する領域での傾きは、H 方向に比べて R 方向で大きく、接線ポアソン比にも異方性が見られる。

3・3 含水状態が応力-ひずみ特性に及ぼす影響

R方向の供試体を用い、湿潤状態の供試体を用いた一軸圧縮試験を実施し、乾燥状態のものとの比較を行った。供試体は蒸留水を満たしたデシケータ内で、真空ポンプにより24時間抜気した後に試験に供した。6本の供試体で得られた応力-ひずみ曲線をFig.8に示す。Fig.5(b)に示した乾燥状態でのR方向の結果に比べて、湿潤状態では一軸圧縮強度は明らかに小さい。

Fig.9には乾燥状態と湿潤状態での接線ヤング率の平均値を比較した結果を示したが、乾燥状態に比べて湿潤状態では接線ヤング率の値は小さい。また、Fig.10には接線ポアソン比の平均値を求めた結果を示した。湿潤状態では、接線ポアソン比が直線的に値が増加する領域はわずかであり、接線ポアソン比の値は応力が比較的小さい段階から、応力の増加とともに急激に増加していく。これらのことから、乾燥状態と湿潤状態では、一軸圧縮強度、ヤング率およびポアソン比とも大きく異なることがわかる。

3・4 巨視的破壊時のひずみ

一軸圧縮試験を行ったFig.5(a),(b)およびFig.8に示した全ての供試体で、ピーク応力時の軸ひずみおよび周ひずみを比較したも

Fig.8 Stress-strain curves obtained by uni-axial compression tests.

Fig.9 Tangential Young's modulus obtained by uni-axial compression tests.

Fig.10 Tangential Poisson's ratio obtained by uni-axial compression tests. (R-direction:Wet)

のをFig.11に示す。先に述べたように、一軸圧縮強度、接線ヤング率および接線ポアソン比の値は、載荷方向や含水状態によって大きく異なるのに対して、ピーク応力時、すなわち巨視的破壊時の軸ひずみおよび周ひずみには大きな差が見られないことがわかる。桜井⁵⁾は限界ひずみを用いた岩盤の安定性の評価手法を提案するとともに、限界ひずみに拘束圧、含水状態および温度といった要因が及ぼす影響を検討し、限界ひずみはこれらの要因の変化に対してほとんど影響を受けないことを報告している⁶⁾。限界ひずみの定義は、一軸圧縮強度を初期弾性係数で除したものであり⁵⁾、破壊時のひずみとは厳密には異なるが、破壊時のひずみが載荷方向や含水状態が変化しても大きな差が見られないということは、ひずみによる岩盤の安定性の評価手法が得策であることを示しているものと考えられる。

4. 一軸圧縮応力下における微視的な破壊の進行に関する考察

4・1 体積ひずみが極大値を示す応力における周ひずみ

3章では、一軸圧縮試験により載荷方向や含水状態が各種物性値に及ぼす影響を述べた。接線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。また、体積ひずみは一旦増加し極大値を示した後に減少に転じるが、これは応力の増加とともに軸ひずみに比べて周ひずみの発生量が大きくなるためである。これらのことから圧縮応力下における微視的な破壊の挙動を検討する上で、周ひずみに着目することが重要であると考えられる。

大久保⁷⁾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行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。なお、一軸圧縮試験時の周ひずみを引張方向のひずみと対応するものとして考察を行ったが、周ひずみにはせん断すべりによるひずみも含まれている。このため、両者を区別することは困難であり今後検討を要すると記述している。

Fig.11 Fracture strain obtained by uni-axial compression tests.

岩石のような多くの潜在クラックを含む脆性材料は、圧縮応力下では一般的に1章に示したようなI～IVの過程を経て巨視的な破壊に至り、体積ひずみが極大値を示す応力の状態は過程IIIに含まれると考えられる。本研究では、強度破壊点ではなく体積ひずみが極大値を示す応力での周ひずみに着目し以下に考察を行う。

Fig.12には、一軸圧縮試験を行ったFig.5(a),(b)およびFig.8に示した全ての供試体で、体積ひずみが極大値を示す応力と周ひずみとの関係を示した。体積ひずみが極大値を示す応力での周ひずみの値は、各条件で値に差が見られる。本研究では周ひずみの値を、軸ひずみのポアソン比だけ発生する弾性ひずみと微視的な破壊に起因するひずみの合計値と考える。ここでは、周ひずみから軸ひずみのポアソン比だけ発生する弾性ひずみを差し引いた微視的な破壊に起因するひずみを(2)式に示すように非弾性周ひずみ ε_c' と定義し、Fig.13にその計算値を示した。

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

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。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。これは軸ひずみに関しては、応力の増加とともに弾性変形によって生じる弾性ひずみに加えて、微視的な破壊に起因するひずみが生じるためと考えられる。一方、周ひずみに関しては軸ひずみのポアソン比だけ発生する弾性ひずみに加えて微視的な破壊に起因するひずみである非弾性周ひずみが生じるためと考えられる。Fig.7およびFig.10に示したように、応力が増加するに従ってポアソン比の値は増加する。これは軸ひずみに比べて周ひずみの方が、微視的な破壊に起因するひずみの発生量が大きいためであると考えられる。(2)式で非弾性周ひずみを求める場合に用いるポアソン比は、微視的な破壊に起因するひずみの影響を含まない応力が極めて小さい領域での値を使用する必要がある。よって、ここではFig.7およびFig.10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便宜上用了。なお、ポアソン比の値は応力に依存する。一般的に岩石のポアソン比は破壊応力の30%や50%等の応力で値を求めることが多いが、今回計算に使用した値はこれらに比べて小さい値となっている。

Fig.13より、体積ひずみが極大値を示す応力は各条件で値が異なっているものの、非弾性周ひずみの値は各条件で値の差が小さい。また、非弾性周ひずみの値は、Fig.4に示した一軸引張試験時の破壊ひずみとほぼ同程度の値であることがわかる。一軸圧縮応力下における局所的な微視的破壊は、まず、载荷軸に平行な引張クラックの進展が生じるものと考えられる。体積ひずみが極大値を示す応力付近では、このような微視的な引張破壊が载荷軸に平行な方向に生じているため、载荷軸に垂直な方向である非弾性

周ひずみの値は、引張破壊時のひずみとほぼ同程度の値を示すものと推察される。また、体積ひずみが極大値を示す応力の値には異方性が見られるが、体積ひずみが極大値を示す応力における非弾性周ひずみの値は引張破壊時のひずみとほぼ同程度の値を示しており、载荷方向が異なっても体積ひずみが極大値を示す応力において微視的な引張破壊は同様に生じているものと推察される。

圧縮応力下における破壊挙動に関して、本研究と同様に周方向のひずみに着目した研究として、藤井らの引張ひずみ規準⁸⁾がある。これはピーク応力時における破壊を規定するものであり破壊基準は(3)式で表される。

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{TO} \quad (3)$$

ここで、 ε_T は周方向の引張ひずみ、 ε_{TO} は限界引張ひずみである。藤井らは ε_{TO} の値をピーク応力時の周ひずみとして求め、岩石に固有な強度定数と説明している。

一方、Stacey⁹⁾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(3)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周ひずみと比較して破壊の評価を行う点は同様である。

これに対して、本研究では体積ひずみが極大値を示す応力に着目して考察を行ってきた。これまでに検討してきたように、本研究では体積ひずみが極大値を示す応力で载荷軸に垂直な方向に引張破壊を生じていると推察されるという新しい知見を得た。また、Fig.5に示したように、一軸圧縮応力下における応力-ひずみ曲線は、体積ひずみが極大値を示す応力まではばらつきが小さいが、さらに応力が増加すると応力-ひずみ曲線のばらつきが大きくなる現象が見られた。これらのことから、藤井らの引張ひずみ規準⁸⁾のようにピーク応力時における巨視的な破壊に着目することはもちろん重要であるが、体積ひずみが極大値を示す応力における引張破壊に着目することも重要であると考えられる。すなわち、岩盤構造物の設計にあたっては、岩盤に生じる応力を体積ひずみが極大値を示す応力以下とし、微視的な引張破壊を生じないように考慮すべきであると考えられる。また、本研究では体積ひずみが極大値を示す応力は载荷方向による異方性の影響を受けるが、体積ひずみが極大値を示す応力での非弾性周ひずみの値は異方性の影響を受けにくいという新しい知見も得た。このことから、岩盤構造物の計測管理は、応力ではなくひずみにより行うことが得策であると考えられる。

4・2 AE発生特性から見た微視的破壊の進展

乾燥状態のH方向およびR方向の供試体を用いて一軸圧縮試験を行う際に、AE(アコースティックエミッション)の計測を行った。計測に用いたAEセンサーは共振周波数が30kHzであり、

Fig.12 Circumferential strain at stress of peak volumetric strain.

Fig.13 Inelastic circumferential strain at stress of peak volumetric strain.

Fig.14 Accumulation of AE obtained by uni-axial compression tests.

下部加圧盤にエポキシ樹脂系の接着剤で接着した。センサーで受信した AE 波形をアンプで増幅し、振幅が $300\mu\text{V}$ を超える AE の累積値を計測した。計測結果の代表例を Fig.14(a),(b) に示す。図の横軸は、応力をピーク応力で正規化した値とし、図には体積ひずみの値もあわせて示した。本研究では、体積ひずみが極大値を示す点に着目したが、いずれの荷重方向においても応力が体積ひずみが極大値を示す応力に達する以前から AE の発生が見られ、体積ひずみが極大値を示す応力付近から AE の発生数が急激に増加している。このことから、体積ひずみが極大値を示す応力以前においても、わずかではあるが局所的な微視的破壊が生じているものと推察される。一方、体積ひずみが極大値を示す応力を超えると AE の発生量が急激に増加することから、微視的な破壊の進展が顕著になるものと考えられる。

5. 結 言

本研究では凝灰岩を用いた一軸引張試験および一軸圧縮試験を実施し、応力-ひずみ特性の評価を行うとともに圧縮応力下における微視的な破壊に関する考察を行った。1 章で述べたとおり、岩石のような多くの潜在クラックを含む脆性材料が圧縮応力下で破壊に至る場合には、一般的に I ~ IV の過程を経て巨視的な強度破壊に至るものと考えられる。今回の試験では、乾燥状態で H 方向に荷重した場合、接線ヤング率の値は応力の増加とともに減少し、軸ひずみに関する応力-ひずみ曲線は初期の状態からピーク応力に至るまで上に凸の形状を示した。一方、乾燥状態で R 方向に荷重した場合、接線ヤング率の値がほぼ一定値を示す区間が見られ、軸方向の応力-ひずみ曲線がほぼ直線を示す区間が見られ、H 方向に荷重した場合と異なる応力-ひずみ挙動を示した。今回の試験結果からは、凝灰岩が破壊に至るまでを I ~ IV の過程に明確に分類することは困難であるが、微視的な破壊挙動については、体積ひずみが極大値を示す応力付近において非弾性周ひずみが一軸引張破壊時のひずみとほぼ同程度の値を示していることから、荷重軸に平行な方向に引張クラックが進展し引張破壊を生じていることが推測された。また、巨視的な強度破壊に近づくにつれて、引張クラック同士が互いに連結していき、支配的な破壊形態は引張破壊からせん断破壊へと変化していくものと考えられる。今回試験に用いた凝灰岩は岩石の中では比較的多孔質な岩石であるが、巨視的な強度破壊に至るまでの微視的な破

壊は、荷重軸に平行な方向への引張クラックの進展が生じた後にせん断破壊が支配的となる一般的な岩石の脆性破壊と同様な挙動を示しているものと推察される。

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) 一軸引張試験を行った結果、一軸引張強度は荷重方向で大きな差が見られ異方性を示す。一方、一軸引張破壊時のひずみは荷重方向による差が小さく、応力に比べてひずみは異方性の影響を受けにくいことがわかった。また、本研究では周ひずみの計測を実施したため、これまでの研究には見られない周ひずみに関する応力-ひずみ曲線に関する新しい知見や一軸引張破壊時のポアソン比に関する新しい知見を得た。
- (2) 一軸圧縮試験を行った結果、荷重方向や含水状態により一軸圧縮強度、接線ヤング率および接線ポアソン比の値は大きく異なるのに対して、一軸圧縮破壊時の軸ひずみおよび周ひずみの値は差が小さく、異方性が小さいことがわかった。
- (3) 一軸圧縮試験時の体積ひずみが極大値を示す応力で生じる非弾性周ひずみの値は、一軸引張破壊時のひずみとほぼ同程度の値を示す。これは、荷重軸に垂直な方向に微視的な引張破壊を生じているためと考えられる。また、体積ひずみが極大値を示す応力は荷重方向による異方性の影響を受けるが、体積ひずみが極大値を示す応力での非弾性周ひずみの値は異方性の影響を受けにくいという新しい知見を得た。

本研究では、凝灰岩を用いて検討を行った。今回得られた結論は凝灰岩に関するものであり、他の種類の岩石においても今回得られたものと同様な結論が得られるかについては今後の課題として残されている。これについては別の機会に報告したいと考えている。

References

- 1) Nihon-zairyou-gakkai-hen : *Iwano Rikigaku Kiso kara Ouyou Made*, (maruzen, Tokyo, 1993), pp.100-101.
- 2) Nihon-zairyou-gakkai-hen : *Iwano Rikigaku Kiso kara Ouyou Made*, (maruzen, Tokyo, 1993), pp.90-93.
- 3) R.Nova, A.Zaninetti : *Int.J.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech.Abstr.*, **27** (1990), 231-242.
- 4) K. Fukui, F. Jin and S. Okubo : *Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ)*, **111**(1995), 25-29.
- 5) S. Sakurai : *Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineering*, **317**(1982), 93-100.
- 6) S. Sakurai, I. Kawashima and T. Otani : *Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineering*, No.463, III-22, (1993), pp.177-180.
- 7) S. Okubo, K. Fukui and T. Ogino : *Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ)*, **116**(2000), 97-104.
- 8) Y.Fujii and Y. Ishijima: *Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ)*, **110**(1994), 211-214.
- 9) T.R.Stacey : *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**, (1981), 469-474.