

# 凝灰岩の乾燥状態における応力-ひずみ特性に関する研究

甲村雄一\*

(株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

\*E-mail: koumura.yuuichi@takenaka.co.jp

これまでの研究の多くは、水で飽和した岩石供試体を用いて三軸圧縮試験を実施している。しかしながら、トンネル掘削等では岩盤が不飽和状態になる場合も考えられる。不飽和状態の岩石の応力-ひずみ特性は、飽和状態とは異なると考えられるため、不飽和状態の応力-ひずみ特性の評価も重要になる。本研究では、乾燥状態の凝灰岩を用いて三軸圧縮試験を実施し、ヤング率とポアソン比を考察した。その結果、三軸圧縮試験で得られるヤング率は一軸圧縮試験で得られる値に比べて小さいことがわかった。また、三軸圧縮試験で得られるポアソン比は一軸圧縮試験で得られる値に比べて小さいことがわかった。さらに、Mohrの破壊規準について考察を行った結果についても述べる。

**Key Words :** *tuff, dry condition, stress-strain characterization, tri-axial compression test*

## 1. 緒言

軟岩の一種類として凝灰岩が挙げられる。筆者らは凝灰岩を用いた一軸圧縮試験や一軸引張試験を実施し、圧縮応力下で巨視的破壊に至るまでの応力-ひずみ特性に関して考察を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。本研究では、主に凝灰岩の三軸圧縮試験結果について報告する。これまでに報告されている、凝灰岩を対象とした三軸圧縮試験に関する主な研究事例は以下のとおりである。赤井ら<sup>4)</sup>は圧密非排水試験中に局所的なひずみ変化を測定し、せん断面の形成とともにひずみに著しい局所性が現れること、また、せん断面形成過程において、間隙水は供試体外周部分からせん断面付近に向かって移動していること等を報告している。さらに、圧密排水クリープ試験を実施し、その結果を用いて凝灰岩を粘弾性、粘完全塑性体とした構成式を提案している<sup>5)</sup>。足立ら<sup>6)</sup>は圧密排水試験および圧密非排水試験で得られたデータをもとに、軟岩の破壊規準を提案している。さらに、定ひずみ速度排水試験および排水クリープ試験を実施し、ひずみ軟化型弾粘塑性構成式を用いて、時間依存性挙動の統一的な説明を行っている<sup>7)</sup>。谷<sup>8)</sup>は新しく開発した原位置岩盤三軸圧縮試験法の検証のために、室内で実施した圧密排水試験および圧密非排水試験結果との比較を行い、原位置岩盤圧縮試験は排水条件に近い環境の下でせん断されたという報告を行っている。羽柴ら<sup>9)</sup>は少量の岩石試料で試験

を行う目的で、直径10mm、高さ20mmという小型供試体を用いた三軸圧縮試験を実施して強度定数の評価を行い、大きな岩石試料の入手が困難である海外での調査に有効であることを示した。

これらの研究のうち羽柴らの一例を除いては、すべて含水飽和状態の供試体を用いて三軸圧縮試験を実施している。これは、拘束応力が大きい地下深部においては、地下水位以深であるために地下水により岩盤が飽和状態にあると推察されることが主な理由であろう。しかし、トンネル掘削の際には、切羽周辺では岩盤からトンネル内に水が漏出し、かつ、トンネル内から岩盤中に空気が侵入し、岩盤が不飽和状態になる場合も考えられる。不飽和状態の岩盤の応力-ひずみ特性は、飽和状態のそれとは異なるであろうと推察する。また、不飽和状態の応力-ひずみ特性の評価は、飽和状態と同様に重要であると考ええる。

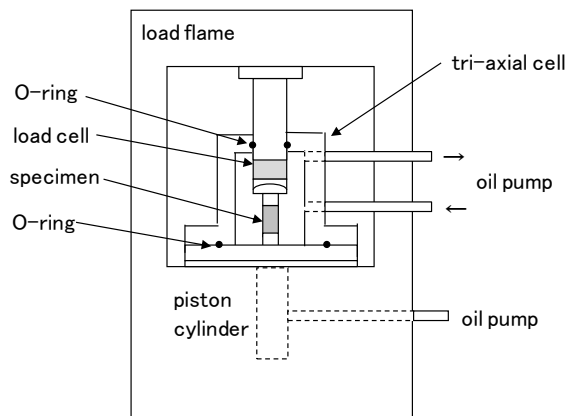
本研究では、不飽和状態の極端な例である乾燥状態について、凝灰岩を用いて三軸圧縮試験を実施した結果を報告する。その際、ヤング率とポアソン比等に特に注目して結果を考察した。さらに、Mohrの破壊規準に関して若干の考察を行った結果を報告する。

## 2. 試験方法

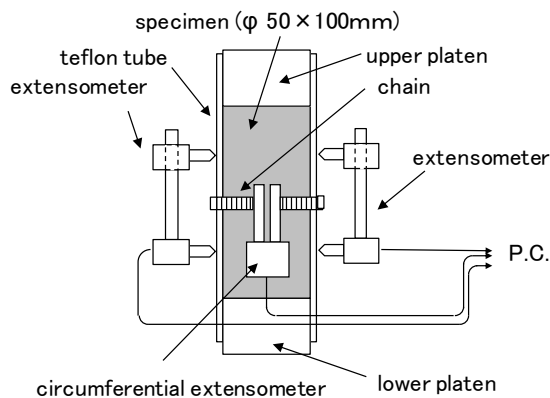
試験に用いた岩石は栃木県産の通称大谷石である。試

表-1 試験結果

|              | Specimen number | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Water content ratio (%) | Uni-axial compressive strength (MPa) |
|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| φ 35 × h70   | 1               | 1.65                         | 4.6                     | 14.0                                 |
|              | 2               | 1.65                         | 4.3                     | 14.2                                 |
|              | 3               | 1.66                         | 4.5                     | 14.8                                 |
|              | 4               | 1.65                         | 4.3                     | 12.7                                 |
|              | Mean            | 1.65                         | 4.4                     | 13.9                                 |
| φ 50 × h100  | 1               | 1.66                         | 4.6                     | 13.9                                 |
|              | 2               | 1.66                         | 4.8                     | 13.9                                 |
|              | 3               | 1.66                         | 4.6                     | 13.9                                 |
|              | 4               | 1.65                         | 4.6                     | 12.8                                 |
|              | Mean            | 1.66                         | 4.7                     | 13.6                                 |
| φ 100 × h200 | 1               | 1.66                         | 4.4                     | 14.0                                 |
|              | 2               | 1.67                         | 4.3                     | 13.6                                 |
|              | 3               | 1.67                         | 3.8                     | 14.0                                 |
|              | 4               | 1.66                         | 4.0                     | 14.0                                 |
|              | Mean            | 1.67                         | 4.1                     | 13.9                                 |



(a) 装置の全体図



(b) 供試体およびひずみ計

図-1 三軸圧縮試験装置の概念図

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250mm角の寸法で複数のブロック状に採取した。供試体は堆積方向にコアビットで円柱状に採取した。今回使用する凝灰岩は密度が1.65~1.67g/cm<sup>3</sup>で空隙率は約37%であり、空隙率が比較的大きい。このため、供試体の寸法効果が応力-ひずみ特性に及ぼす影響を確認するための予備実験を行った。すなわち、3種類の寸法で供試体を作製し、一軸圧縮強度を確認することにした。同一ブロックからφ35mm×h70mm、φ50mm×h100mmおよびφ100mm×h

200mmの供試体を各4個作製し、一軸圧縮試験に供した。供試体の作製にあたっては端面の平行度および平坦度に特に留意し、±1/100mm以内に抑えた。また、供試体作製後3ヵ月以上室内で自然乾燥した後、試験を行った。試験結果を表-1に示す。試験は応力速度一定制御(0.01MPa/s)で実施した。一軸圧縮強度は供試体の寸法に関係なくほぼ同じ値を示した。このことから、今回試験を行った範囲では供試体の寸法効果は小さく無視できると判断し、三軸圧縮試験はφ50mm×h100mmで実施することとした。

三軸圧縮試験装置の概念図を図-1(a), (b)に示す。試験は油圧サーボ試験機(MTS社製815 Rock mechanics test system)で行った。供試体はテフロン熱収縮チューブで被覆して三軸セル内に設置し、周圧は油圧にて载荷した。軸差応力は三軸セル内に設置したロードセルで計測した荷重を、供試体の初期断面積で除すことによって求めた。軸方向のひずみは、測定間隔が50mmで2点を点接触させるひずみ計を供試体の中央高さに対面上に2個取り付け、その平均値で求めた。周方向のひずみは供試体にチェーンを巻きつけ、チェーン両端部の変位を計測した結果から、供試体が同芯円状に均一に変形しているものと仮定して計算によって求めた。また、体積ひずみは式(1)により求めた。

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

ここで、 $\varepsilon_v$  : 体積ひずみ、 $\varepsilon_a$  : 軸ひずみ、 $\varepsilon_c$  : 周ひずみ

試験は、周圧を2MPa、5MPaおよび10MPaの3種類として実施した。試験にあたっては、所要の周圧に達するまで、周圧および軸方向圧力を0.01MPa/sの応力速度で等方圧状態に载荷し、所要の周圧に達した後、ただちに試験を開始した。なお、試験は非排気状態であり、軸差応力は応力速度一定条件(0.01MPa/s)で実施した。

### 3. 試験結果

周圧が2MPaにおいて5本の供試体で試験を実施して得られた応力-ひずみ曲線を図-2に示す。試験は応力速度一定条件で制御しているため、試験が制御できているピーク応力までの応力ひずみ曲線を示した。同様に周圧が5MPaで5本の供試体で得られた試験結果を図-3に、周圧が10MPaで3本の供試体で得られた試験結果を図-4に示す。いずれの拘束応力においても、軸ひずみおよび周ひずみはそれぞれ単調に増加していく。これに対して、体積ひずみは、まず、圧縮側に値が増加していくが、応力が大きくなると逆に引張側に値が増加していく。なお、周圧が10MPaの試験では、軸ひずみが約61000~約74000×10<sup>-6</sup>ひずみの範囲まで試験を行ったが、応力-ひず

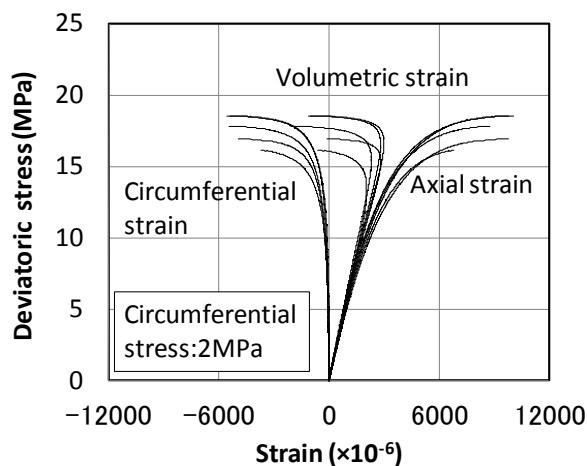


図-2 三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線  
(周圧：2MPa)

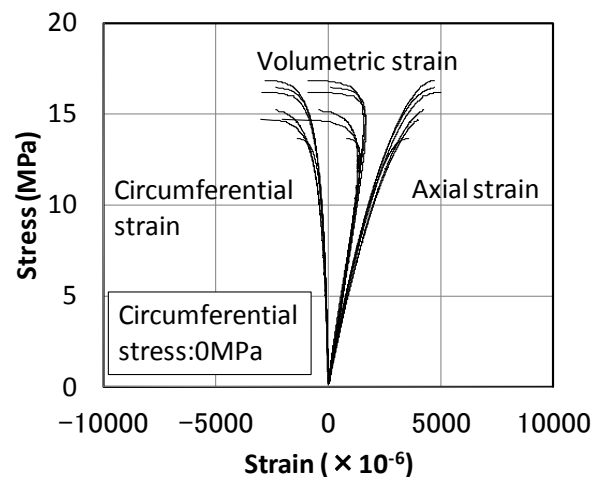


図-5 一軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線

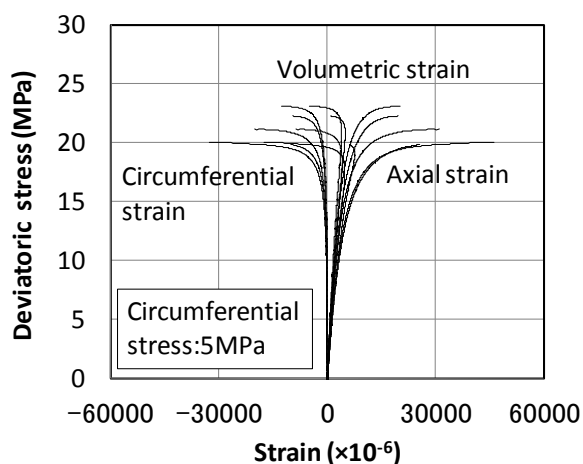


図-3 三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線  
(周圧：5MPa)

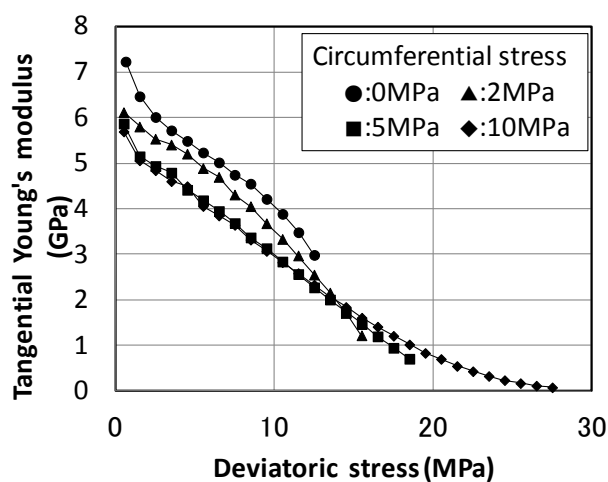


図-6 圧縮試験で得られた接線ヤング率

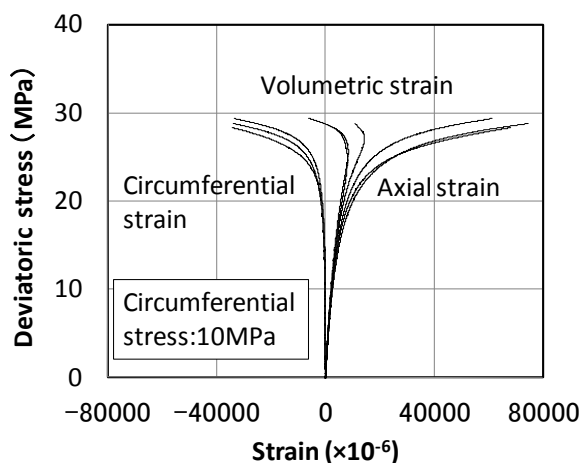


図-4 三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線  
(周圧：10MPa)

み曲線はピークを示さず圧縮強さは求められなかった。

足立ら<sup>6)</sup>は、飽和状態の大谷石を用いた圧密排水試験および圧密非排水試験を、ひずみ速度制御により周圧が19.6MPaまでの範囲で行っている。その結果、軸ひず

みはピーク応力を示した後にひずみ軟化するか、あるいは一定値になることを報告している。本研究では周圧が10MPaでは足立ら<sup>6)</sup>の報告と異なる結果となった。本研究で実施した乾燥状態での周圧10MPaの試験では、試験後に観察した供試体は、試験前に比べて明らかに高さが小さく、かつ直径が大きくなっている傾向が観察された。すなわち、鉱物粒子の再配列を生じるような塑性変形が生じていたことが考えられる。乾燥状態では飽和状態に比べてこのような塑性変形が大きいと推察される。

一方で、6本の供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、得られた応力-ひずみ曲線を図-5に示す。一軸圧縮試験においてはテフロンチューブによる供試体の被覆は行わなかった。図-2～図-4に示した三軸圧縮試験では、応力レベルが比較的小さい範囲では周ひずみの値が極めて小さいのに対して、一軸圧縮試験では応力レベルが小さい範囲から周ひずみの増加が始まっている。

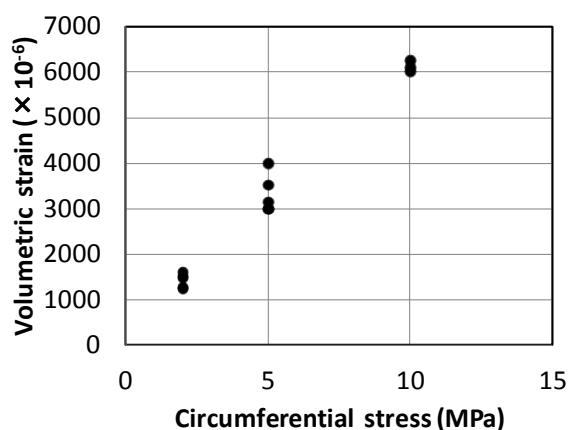


図-7 試験開始時における体積ひずみ

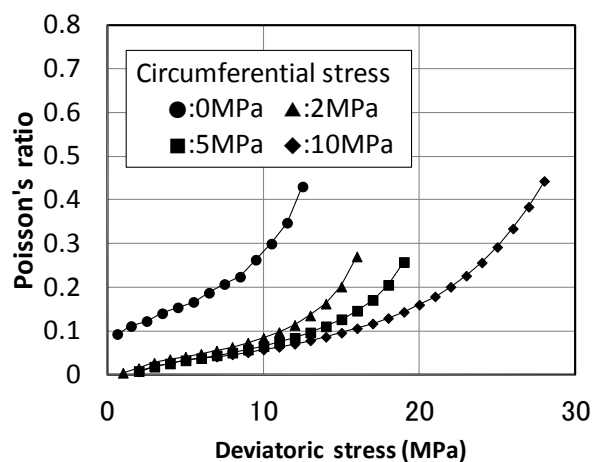


図-8 圧縮試験で得られたポアソン比

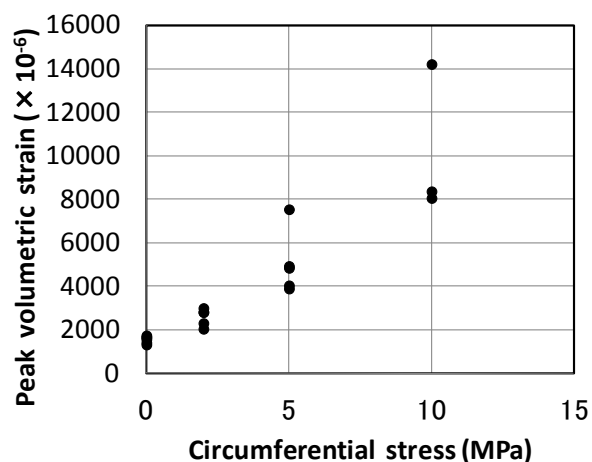


図-9 圧縮試験で得られた体積ひずみの極大値

#### 4. 試験結果の考察

##### (1) ヤング率に関する考察

軸ひずみの値から応力レベルごとの接線ヤング率を求めた結果を図-6に示す。いずれの周圧の条件においても、応力レベルが大きくなるに従って、接線ヤング率は小さくなる。応力レベルが比較的小さい領域において各周圧

の値を比較すると、周圧が0 MPaの一軸圧縮試験で接線ヤング率が最も大きく、周圧が大きくなるにつれて小さくなっている。

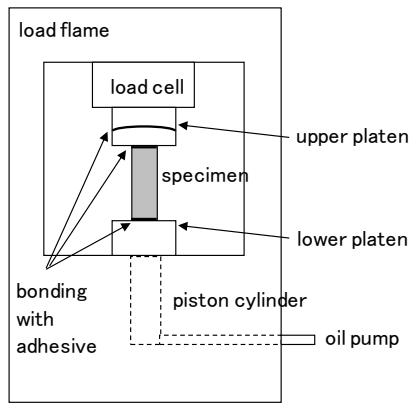
足立ら<sup>6)</sup>は、飽和状態の大谷石を用いた圧密排水試験および圧密非排水試験を行い、周圧が0.49 MPaを超えると側圧に比例してヤング率が大きくなることを報告している。今回実施した乾燥状態での試験ではこれとは異なる結果を示したが、これは以下の理由によるものと考えられる。

供試体に周圧および軸圧を作用させる前の時点を基準とし、周圧および軸圧を等方圧状態に作用させて、試験を開始する時点での体積ひずみを求めたものを図-7に示す。図-5に示した一軸圧縮試験における体積ひずみの極大値は、 $1330 \sim 1750 \times 10^{-6}$ ひずみであったが、周圧が作用した条件での試験開始前の体積ひずみはこれと同等か、あるいは大きい。一軸圧縮試験において体積ひずみが極大値を示す応力以上の領域では、供試体内部に微視的なクラックが多く発生し、微視的な破壊が進行しているものと推察される。岩石の空隙中には水に比べて体積が圧縮しやすい空気が存在することから、周圧が作用した条件では、試験開始時に供試体に圧壊による微視的破壊が生じ、供試体は変形しやすい状態になっていることが推察される。このため、周圧が大きくなると圧壊の影響が大きくなり接線ヤング率の値が小さくなったものと推察される。周圧が5 MPaおよび10 MPaでは接線ヤング率に大きな差は見られないが、これは圧壊には限度があるものと考えられる。

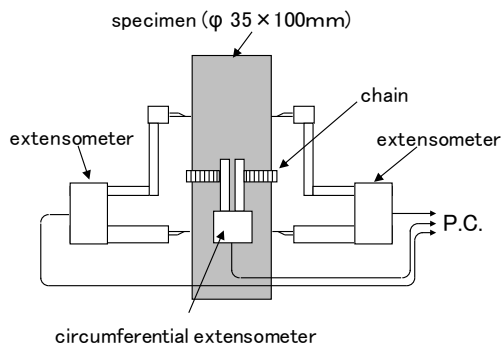
##### (2) ポアソン比に関する考察

応力レベルごとに求めたポアソン比を図-8に示す。いずれの周圧の条件下においても、ポアソン比は応力が大きくなるほど大きな値を示す。これは、応力レベルの増加に伴い岩石内部で微視的な破壊が生じ、荷重軸に垂直な方向に変形しやすくなることが原因の一つと考えられる。また、周圧が大きくなるほど同じ応力レベルではポアソン比が小さい。これは、周圧が大きくなることで、载荷軸に垂直な方向の変形が抑制されるためと考えられる。応力レベルが小さい領域においては、周圧が2 MPa～10 MPaでポアソン比の値に大きな差は見られなかった。

赤井ら<sup>10)</sup>は、飽和した大谷石を用いた圧密排水試験を周圧が0.196 MPa～2.45 MPaの範囲で実施し、ポアソン比は0.19～0.32の範囲にあることを報告している。今回の試験で得られた応力レベルが小さい領域でのポアソン比は、これよりも値が小さい結果となった。先に述べたように、岩石の空隙中には水に比べて体積が圧縮しやすい空気が存在する。このため、空隙に水が存在する場合に比べて、空隙率が小さくなるような塑性変形をしやすいことが原因であると推察される。



(a) 装置の全体図



(b) 供試体およびひずみ計

図-10 一軸引張試験装置の概念図

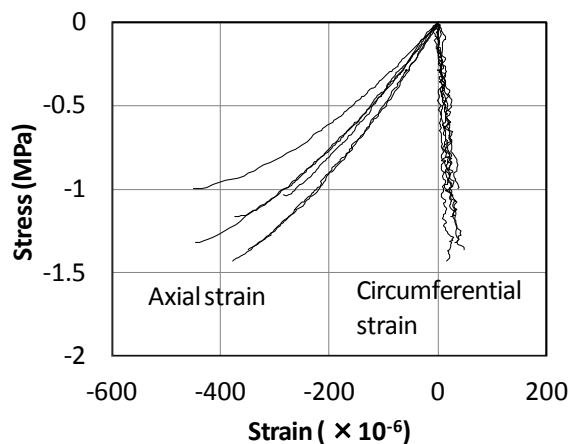


図-11 一軸引張試験で得られた応力-ひずみ曲線

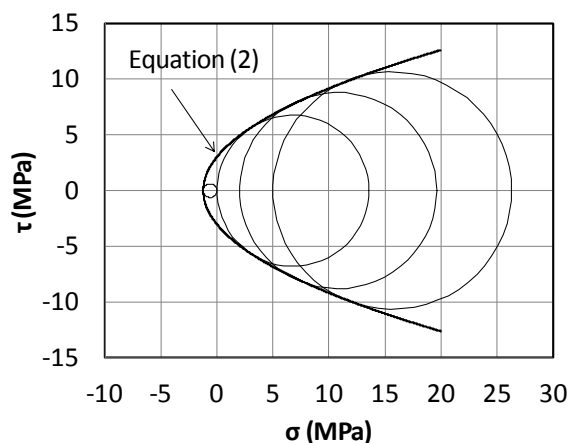


図-12 試験で得られたモール円

### (3) 体積ひずみに関する考察

三軸圧縮試験中の体積ひずみの極大値を図-9に示す。周圧が大きくなるほど体積ひずみの極大値は大きくなる。ことがわかった。足立ら<sup>6)</sup>は、飽和状態の大谷石を用いた圧密排水試験において、周圧が小さい条件では体積ひずみが極大値を示した後、膨張側に転じるのに対して、周圧が1.96MPa以上では体積ひずみは極大値をとらず収縮側に増加し続けていくこと、また、その値は周圧が大きいほど大きいことを報告している。今回の乾燥状態の試験結果はこの報告とは異なる結果となった。今回の乾燥状態の試験のように、応力の増加により体積ひずみが極大値を示した後、膨張側へ値が変化することは、応力レベルが高い条件では軸ひずみに比べて周ひずみの発生量が顕著になることが原因と考えられる。ポアソン比の考察で述べたように、乾燥状態では応力レベルが小さい領域では、空隙率が小さくなるような塑性変形を生じていると推察される。応力が増加するに従って空隙率は次第に小さくなっていくが、それには限度があるものと考えられる。このような状態で、さらに応力が増加すれば、応力の増加により微視的な破壊が進展し、岩石内部でのクラックの発生や鉱物粒子の再配列等が進行する。これらにより生じる塑性ひずみは、空隙率が小さくなる限度に達しているため体積が膨張する側に、すなわち周ひずみが大きくなる方向に発生すると考えられる。よって今回実施した乾燥状態における試験では、応力レベルが大きい領域で顕著な体積膨張を生じたものと推察される。

### (4) Mohrの破壊規準に関する考察

一般的な岩石の破壊規準の一つにMohrの破壊規準<sup>11)</sup>がある。これは、一軸引張試験や三軸圧縮試験を実施してMohrの応力円を描き、これに接する破壊包絡線を求めるものである。一方で、一軸引張強さおよび一軸圧縮強さを表すMohrの応力円に接する破壊包絡線は次式で与えられる<sup>11)</sup>。

$$\tau^2 = ((S_c / (-S_t)) + 1)^{0.5} - 1)^2 \cdot S_t \cdot (S_t - \sigma) \quad (2)$$

ただし、 $\tau$ ：せん断応力、 $\sigma$ ：垂直応力、

$S_c$ ：一軸圧縮強さ、 $S_t$ ：一軸引張強さ

三軸圧縮試験は多大な時間と労力を要することから、一軸引張試験および一軸圧縮試験で破壊包絡線を求められる式(2)が、垂直応力 $\sigma$ が大きな領域でも使えると都合が良い。ここでは式(2)が $\sigma$ の大きな領域で三軸圧縮試験の結果とどのような関係にあるかを求める。まず、一軸引張試験を6本の供試体で実施した試験方法の概念図を図-10(a), (b)に、試験結果を図-11に示す。応力-ひずみ曲線は、応力は圧縮が正、ひずみは収縮が正で示した。試験方法等の詳細は既発表文献<sup>1) ~ 3)</sup>を参照

されたい。一軸引張試験、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験で得られるMohrの応力円と、式(2)で得られる破壊包絡線( $S_c=13.6\text{MPa}$ ,  $S_t=-1.2\text{MPa}$ )を描いたものを図-12に示す。応力円は各周圧ごとに、それぞれ複数本の供試体で得られた圧縮強さの平均値で示した。なお、三軸圧縮試験の周圧が10MPaの試験ではピーク応力が確認できなかったため図には描いていない。図より、式(2)で得られる破壊包絡線は、周圧が2MPaおよび5MPaの条件での応力円と良く接している。このことから、本研究で用いた乾燥状態の凝灰岩では、一軸引張試験および一軸圧縮試験で得られた強度から式(2)によって得られる破壊包絡線が、少なくとも周圧が5MPaまでの条件で使用できることが考えられる。

## 5. 結言

本研究では、不飽和状態の極端な例である乾燥状態について、凝灰岩を用いて主に三軸圧縮試験を実施した結果を報告した。本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 三軸圧縮試験で得られたヤング率は、一軸圧縮試験の値に比べて小さい。これは、供試体の圧壊の影響によるものと考えられる。

(2) 三軸圧縮試験で得られたポアソン比は一軸圧縮試験の値に比べて小さい。また、周圧が大きくなるほどポアソン比の値は小さくなる。

(3) 本研究で実施した条件では、三軸圧縮試験においても一軸圧縮試験と同様に、体積ひずみは収縮側に増加していき、極大値を示した後に低下する。極大値は、周圧が増加すると大きくなる。

(4) 本研究で用いた乾燥状態の凝灰岩では、一軸引張試験および一軸圧縮試験で得られた圧縮強さから求め

られる破壊包絡線は、少なくとも周圧が5MPaまでの条件で使用できることが考えられる。

## 参考文献

- 1) 甲村雄一, 稲田善紀:「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」, 資源と素材, Vol.122, No.2, pp.65-70, 2006.
- 2) 甲村雄一, 稲田善紀:「載荷速度が凝灰岩の応力-ひずみ特性に及ぼす影響」, 材料, Vol.55, No.3, pp.323-328, 2006
- 3) 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.
- 4) 赤井浩一, 大西有三, 八嶋厚, 「三軸圧縮状態の堆積軟岩の破壊とエネルギー消散に関する考察」, 土木学会論文報告集, No.321, pp.123-130, 1982.
- 5) 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一:「堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の時間依存特性と構成式」, 土木学会論文報告集, No.282, pp.75-87, 1979.
- 6) 足立紀尚, 小川豊和:「堆積軟岩の力学特性と破壊規準」, 土木学会論文報告集, No.295, pp.51-63, 1980.
- 7) 足立紀尚, 岡二三生, 曽良岡宏, 小池真史:「軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明」, 土木学会論文集, No.596, III-43, pp.1-10, 1998.
- 8) 谷和夫:「原位置岩盤三軸試験によって評価された大谷石のせん断強さの位置付け」, 材料, Vol.55, No.5, pp.483-488, 2006.
- 9) 羽柴公博, 高秀君, 大久保誠介, 福井勝則:「小型岩石試験片用の三軸圧縮試験法の開発」, 材料, Vol.56, No.9, pp.790-795, 2007.
- 10) 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一:「堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の弾・塑性挙動」, 土木学会論文報告集, No.271, pp.83-95, 1978.
- 11) 稲田善紀:「岩盤工学」, 森北出版, pp.85-86, 1997.

# A STUDY OF STRESS-STRAIN CHARACTERIZATION ON DRY TUFF

Yuichi KOHMURA

Much current research involves execution of tri-axis compression tests using water saturated rock specimens. The stress-strain characterization on the state of unsaturated rock is different from that of rock in a saturated condition. Thus, evaluation of the stress-strain characteristic of rock in both unsaturated and saturated conditions is important. In this study, tri-axial compression tests using dry tuff were carried out. Young's modulus and Poisson's ratio were considered. The results showed the Young's modulus obtained by tri-axis compression tests is small compared with the uni-axial compression test. Moreover, the Poisson's ratio obtained by the tri-axial compression test is small compared with the uni-axial compression test. In addition, the acquired results are described for the Mohr's fracture criterion.