

# 来待砂岩の強度・変形特性における 中間主応力の影響

宮崎 裕一<sup>1\*</sup>・高橋 学<sup>2</sup>・長田 昌彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム工学系専攻 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255)

<sup>2</sup> (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (〒305-8567 東茨城県つくば市東1-1-1中央第7)

<sup>3</sup> 埼玉大学 准教授 地圏科学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255)

\*E-mail: s08me125@mail.saitama-u.ac.jp

本研究は、来待砂岩を用いて真三軸試験を行うことで、来待砂岩の強度・変形特性における中間主応力の影響を検討したものである。茂木式真三軸試験手法を用い、最小主応力を一定とした条件下で、中間主応力を最小主応力と同じ値から最大主応力と同じ値まで変化させた。

その結果、中間主応力の増加と共に破壊強度が増す領域と、中間主応力を上げるに従い破壊強度が減少する領域が計測された。二つの領域の遷移点は、中間主応力の値が最大主応力の値と最小主応力の値の中間付近に達したときであり、その中間主応力の値を境に、八面体せん断応力（破壊条件）・破断面の形状（破壊のモード）・最小主応力方向の軸歪みなどが大きく変化した。

**Key Words :** Kimachi sandstone , true triaxial test, intermediate principal stress, failure strength, compression, extension

## 1. はじめに

近年、放射性廃棄物の地層処分など、様々な用途の地下空間利用が計画されており、地下における岩盤の力学的挙動を把握することは、地下構造物の計画や設計に必要不可欠である。そこで、地下岩盤の強度・変形挙動を推定するために、一般的に岩石の三軸圧縮試験が行われる。この試験は、円柱に整形した岩石供試体の側面方向に拘束圧（最小主応力）を載荷し、上下端面に軸圧（最大主応力）を載荷する試験手法である。拘束圧を水や油などの液体により、静水圧状態で載荷するため、側面の応力状態を一樣にすることができ、比較的容易に信頼性の高い三軸試験を行うことが可能である。しかし、三つの主応力のうち二つの主応力（最小主応力と中間主応力）が常に同じ大きさになるという制約が存在している。地下構造物の空洞壁面に作用する応力状態は、三つの主応力のうち二つの主応力が同じ大きさになるとは考えにくく、また、コアディスティングが発生するような応力状態は、最大主応力＝中間主応力である三軸引張状態にきわめて近いと考えられる。そのため、本研究では三軸圧縮試験だけでは不明瞭な岩石の力学的挙動を把握するために、中間主応力を変化させ、三軸圧縮領域から三軸引張領域にかけて連続的に試験することで、応力状態によ

る岩石の強度・変形特性の違いに焦点を置いた。なお、円柱供試体（ $\phi 50 \times 100$  mm）を用いて共著らが完結した三軸圧縮・三軸伸張試験結果<sup>1),2)</sup>と比較し、応力経路やサンプル形状の差異についても議論する。

## 2. 試験の概要

### (1) 岩石供試体

試験に用いた岩石供試体は、来待砂岩を写真-1に示す35×35×70 mmの角柱に整形したのち、湿度32～48% RHで保存したものである。来待砂岩は、島根県八束郡宍



写真-1 岩石供試体

表-1 来待砂岩の物性値

| 項目      | 単位                   | 物性値   |
|---------|----------------------|-------|
| 見かけ密度   | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.05  |
| P波速度    | (km/sec)             | 2.90  |
| S波速度    | (km/sec)             | 1.82  |
| 動的ポアソン比 | -                    | 0.17  |
| 動的ヤング率  | (GPa)                | 16.00 |



写真-2 真三軸試験装置

道町で採取される凝灰岩質砂岩であり、新第三紀中新世の出雲層群に属する。表-1に、本試験に用いた来待砂岩の物性値を示す。表中の値は、使用した岩石供試体の平均値である。

## (2) 試験装置と試験手法

### a) 真三軸試験装置

使用した真三軸試験装置を写真-2に示す。この試験装置は、封圧下で二軸試験を行う茂木式真三軸試験手法が可能であり、本試験でも、三つの主応力のうち最大主応力方向と中間主応力方向の荷重はピストンによる固体圧で载荷し、最小主応力方向の荷重は油圧により昇圧することで、三つの主応力を各々制御している。

### b) 岩石供試体のアッセンブル

岩石供試体のアッセンブルを写真-3に示す。岩石供試体の上下面に 35×35 mm のエンドピースを、左右の面には 35×66 mm のエンドピースを取り付け、二種類のシリコンゴムにより、岩石供試体表面の被覆及び岩石供試体とエンドピースの接合を行っている。

また、ピストンによる固体圧の载荷に伴って岩石供試体表面に摩擦が生じことを防ぐために、銅箔（厚さ 50 ミクロン）・テフロンシート（厚さ 50 ミクロン）・シリコングリスを供試体とエンドピースの間に装着している。この減摩材の摩擦係数は共著らの計測結果<sup>3)</sup>、垂直

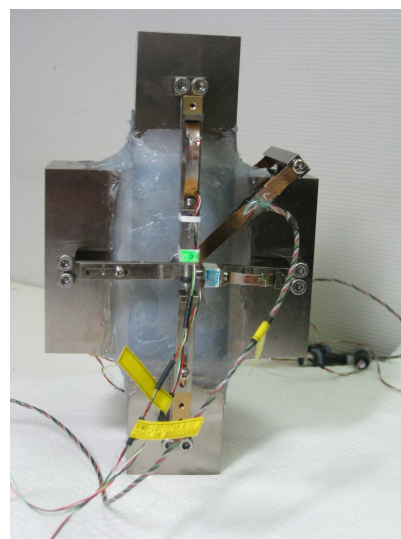


写真-3 岩石供試体のアッセンブル

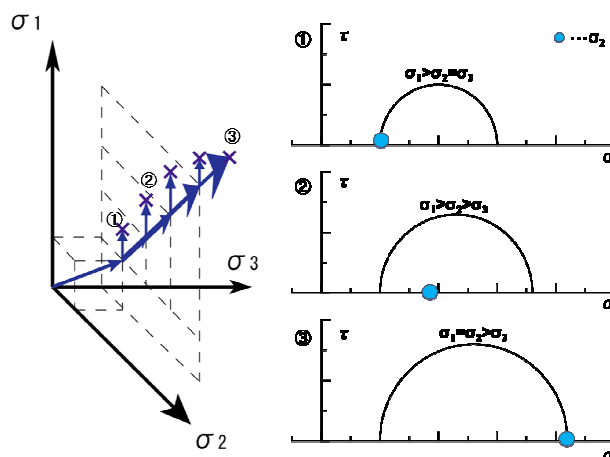


図-1 応力経路と破壊時の応力状態

応力 25MPa の時に 0.063, 45MPa の時に 0.04 であった。

変位の測定には、三つの主応力方向に各 2 本の LDT を使用した。なお LDT の校正係数は、試験前後にキャリブレーションを行い、試験での出力範囲における有意性を検討した。

### c) 試験手法

はじめに、最大主応力方向と中間主応力方向のピストンをそれぞれ 3.5 ~ 4.0 kN, 0.4 ~ 0.6 kN で岩石供試体アッセンブルと接触させる。これは封圧流体を注入する際、岩石供試体アッセンブルが、圧力セル内の設置位置からずれるのを防ぐためである。

その後の応力経路を図-1に示す。まず最小主応力（拘束圧）を 0.125 MPa/sec の昇圧速度で所定の値まで昇圧し、次に最大主応力と中間主応力を最小主応力と同じレート 0.125 MPa/sec で载荷する。最後に、最大主応力を変位速度一定（0.02 mm/min）で载荷した。

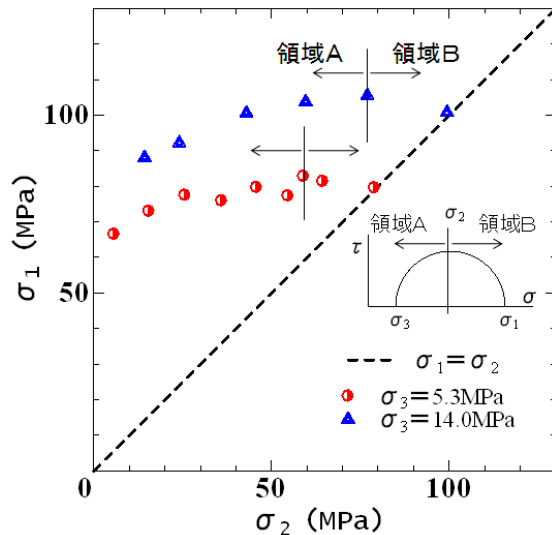


図-2 破壊強度と中間主応力の関係

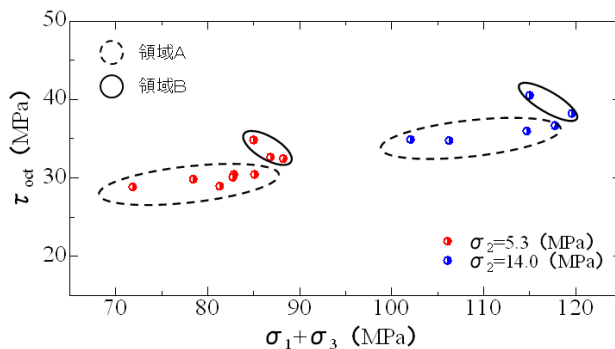


図-3 破壊時の八面体せん断応力と $(\sigma_1 + \sigma_3)$ の関係

#### d) 試験条件

最小主応力を5.3 MPa, 14.0 MPaの2つの条件で中間主応力を変化させた時の強度・変形の変化を求めていった。なお中間主応力は、最小主応力と同じ値（角柱供試体における三軸圧縮試験）から最大主応力と同じ値（角柱供試体における三軸伸張試験）まで変化した。

### 3. 試験結果

#### (1) 破壊強度と中間主応力の関係

図-2に米待砂岩の破壊強度と中間主応力の関係を最小主応力の条件別に示す。二つの条件で同様に、中間主応力の増加と共に破壊強度が増す領域（以後、領域A）と、中間主応力を上げるに従い破壊強度が減少する領域（以後、領域B）が計測された。これらの領域の遷移点は、中間主応力が破壊時の最大主応力（破壊強度）と最小主応力の中間付近であった。

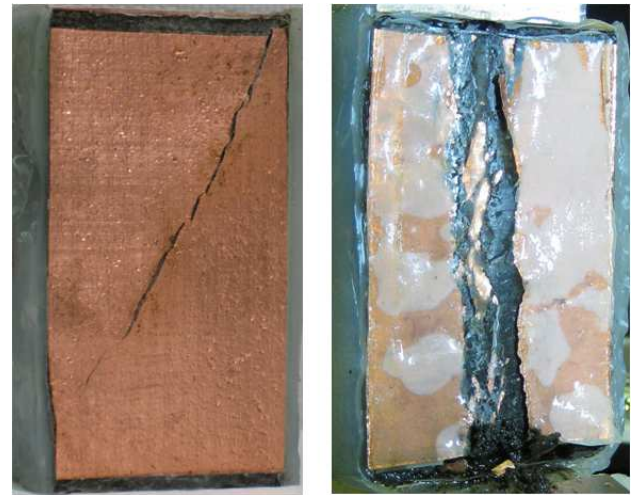


写真-4 中間主応力方向から見た破壊後の供試体  
(左：せん断破壊 右：引張破壊)

#### (2) 破壊時のせん断応力

破壊した供試体に作用する応力を三つの主応力軸で表すと、せん断力は八面体でとらえることができる。その八面体面上に作用しているせん断応力を八面体せん断応力とよび、式(1)によって求められる。

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Mogi<sup>4)</sup>は圧縮強度の高い岩石で真三軸試験を行った結果、von Misesの条件の一般形で式(2)のように破壊条件を表わせると結論付けた。

$$\tau_{oct} = f(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2)$$

試験結果（図-3），領域Aにおいて八面体せん断応力と $(\sigma_1 + \sigma_3)$ にある一定の関係性がみられることから、破壊条件には式(2)のような関係が成り立っていると考えられる。しかし領域Bでは、そのような関係性がみられない。プロットの移行を考えた時、中間主応力が最大主応力側にあり、且つ最大主応力の減少量より中間主応力の増加量が大きいため、式(2)の左辺は中間主応力の増加と共に増加していくものの、右辺は中間主応力の増加に従って減少する。つまり領域Aと領域Bにおいて関数 $f$ の正負が逆であり、同一の破壊条件は成立しない。

破壊後の供試体に形成された破断面（写真-4）においても領域Aと領域Bで破壊のモードに違いが表れた。岩石の破壊がただ一つのモードに支配されるということは考えづらいが、領域Aに形成された破断面は比較的なめらかであり、岩の圧砕や破砕による粉末が観察されたため、せん断力が限界値に達し、せん断面が形成されたと考えられる。それに対し領域Bの破断面はかなり粗く、粉末も少ない。さらに減摩材として供試体に接していた銅箔に残る破壊痕に、引き伸ばされた跡が観察されるこ

表-2 破壊時の応力状態と三つの主応力方向の歪み

| $\sigma_3=5.3\text{MPa}$ |             |                        |                        |                     |                     |                     | $\sigma_3=14.0\text{MPa}$ |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|--------------------------|-------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|-------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                          | 供試体の動的ポアソン比 | $\sigma_1(\text{MPa})$ | $\sigma_2(\text{MPa})$ | $\varepsilon_1(\%)$ | $\varepsilon_2(\%)$ | $\varepsilon_3(\%)$ |                           | 供試体の動的ポアソン比 | $\sigma_1(\text{MPa})$ | $\sigma_2(\text{MPa})$ | $\varepsilon_1(\%)$ | $\varepsilon_2(\%)$ | $\varepsilon_3(\%)$ |
| (a)                      | 0.176       | 66.55                  | 5.64                   | 1.02                | -0.30               | -0.72               | (d)                       | 0.167       | 88.08                  | 14.30                  | 1.46                | -0.35               | -0.70               |
|                          | 0.174       | 73.02                  | 15.47                  | 0.86                | 0.75                | -1.00               |                           | 0.177       | 92.18                  | 24.05                  | 1.99                | 0.17                | -1.78               |
|                          | 0.183       | 77.50                  | 25.57                  | 1.08                | 0.18                | -0.76               |                           | 0.172       | 100.56                 | 42.95                  | 1.75                | 0.29                | -1.35               |
| (b)                      | 0.174       | 75.95                  | 35.92                  | 1.14                | 0.70                | -1.02               | (e)                       | 0.169       | 103.75                 | 59.62                  | 1.74                | 0.65                | -2.00               |
|                          | 0.181       | 79.74                  | 45.76                  | 1.15                | 0.60                | -1.33               |                           | 0.172       | 105.52                 | 76.97                  | 1.81                | 1.00                | -2.95               |
|                          | 0.179       | 77.37                  | 54.59                  | 0.97                | 0.68                | -1.40               |                           | 0.169       | 100.77                 | 99.42                  | 1.86                | 1.88                | -5.49               |
| (c)                      | 0.168       | 82.86                  | 58.98                  | 1.15                | 0.79                | -1.71               |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          | 0.171       | 81.45                  | 64.41                  | 1.10                | 0.85                | -1.42               |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          | 0.175       | 79.58                  | 78.92                  | 1.01                | 1.12                | -2.23               |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |
|                          |             |                        |                        |                     |                     |                     |                           |             |                        |                        |                     |                     |                     |

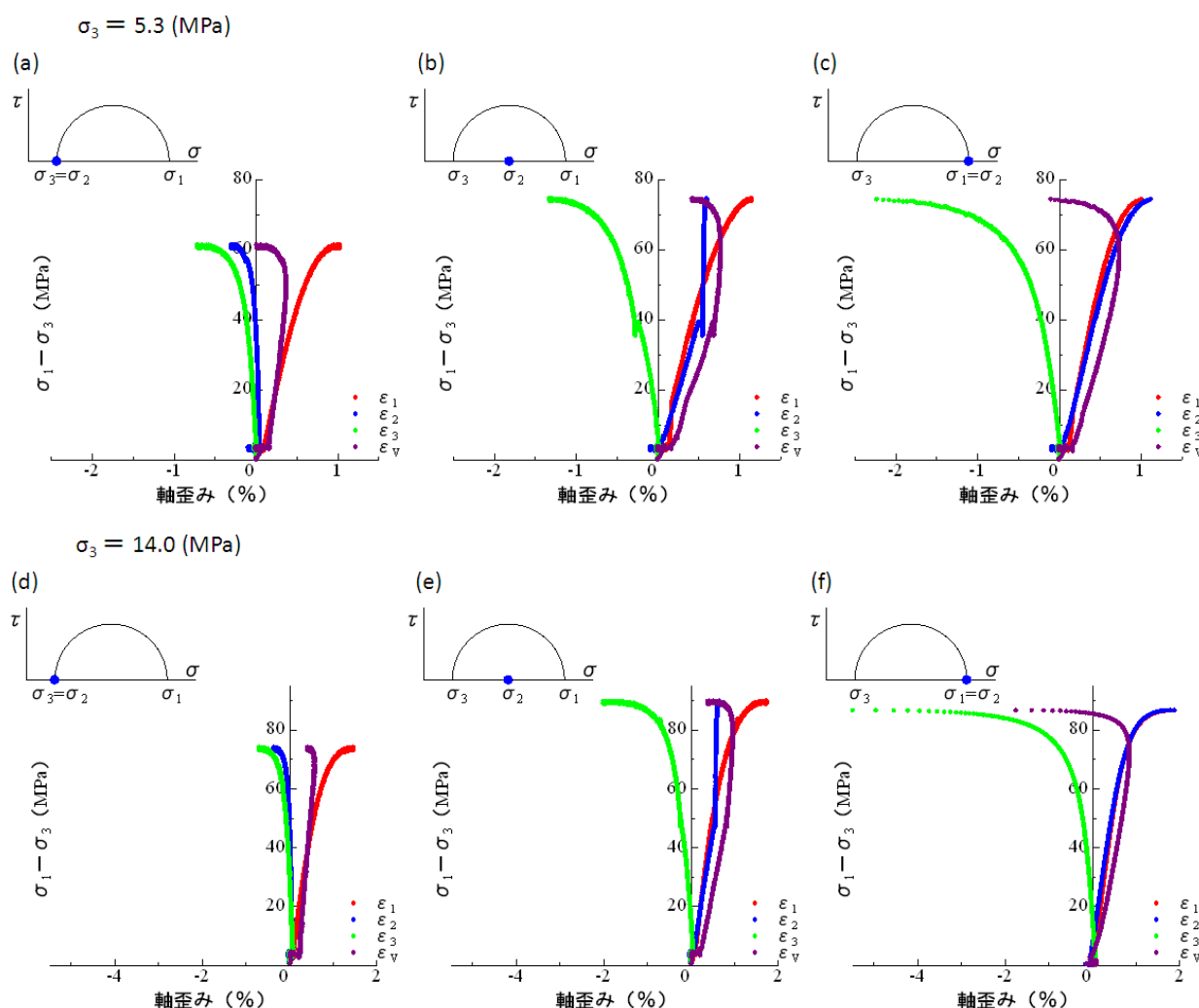


図-4 応力と歪み関係

とから、引張りにより破断面が形成されたと考えられる。

これらのことから領域Aでの破壊は、主にせん断力が主な要因であり、その破壊条件には八面体せん断応力を使った関係式(式(2))が成り立っていると考えられる。

### (3) 応力と歪みの関係

破壊時の応力状態と三つの主応力方向の軸歪みを表-2に、 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 、 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  ( $\sigma_2$ は $\sigma_1$ と $\sigma_3$ の中間付近)、 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ の時の応力と歪み関係を図-4に、それぞれ最小

主応力の条件別に示す。最小主応力方向の軸歪みが、中間主応力を三軸圧縮領域から三軸引張領域に変化するに従って大きくなっている。特に $\sigma_3 = 5.3 \text{ MPa}$ 条件では $\sigma_2 = 58.98 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_3 = 14.0 \text{ MPa}$ 条件では $\sigma_2 = 76.97 \text{ MPa}$ の時に大きな変化が見られる。その応力状態は、領域Aから領域Bに遷移する境目の応力状態であり、主にせん断力が要因でせん断破壊が起こる領域Aに対し、領域Bでは歪み量が要因となり、引張破壊が起こっていると考えられる。

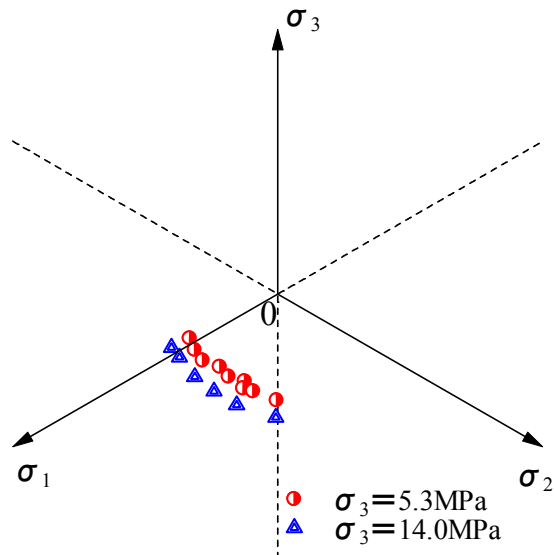


図-5  $\pi$  平面上での破壊時の応力状態

#### (4) 破壊曲面

破壊時の応力状態を、三つの主応力を座標軸とする直角座標において、 $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$  の面 ( $\pi$  平面) 上にプロットする (図-5)。最小主応力条件ごとに Tresca 基準 (最大せん断応力説) と von Mises 基準 (歪みエネルギー説) の間に破壊曲面が得られたものの、この破壊曲面は、最小主応力 (拘束圧) による依存性が確認される。つまり Tresca 基準や von Mises 基準のように、同じ座標において  $\pi$  平面に垂直な柱面の破壊曲面ではなく、von Mises 基準の条件式に最小主応力を考慮し、1 次・2 次の不偏量を用いて表現されている Drucker-Prager 基準にのような、原点を通り  $\pi$  平面に垂直な方向ベクトルを軸として拡張のする破壊曲面となっている。

#### (5) 三軸圧縮・三軸伸張試験との比較

同一岩石を円柱 ( $\phi 50 \times 100$  mm) に整形した供試体を用いて共著らが完結した三軸圧縮・三軸伸張試験結果<sup>1)2)</sup>と、本試験三軸圧縮・三軸伸張試験結果を比較する。なお三軸伸張試験は、応力経路が大きく異なる。

同様の結果を示したものを列挙する。

- ・表-2、図-4に示すように、三軸伸張試験の方が三軸圧縮試験よりも必ず最大強度が大きくなる。
- ・三軸伸張試験は三軸圧縮試験よりも脆性的な挙動を示す。
- ・三軸伸張試験での岩石供試体の破壊状況は、引張破壊が卓越し、破断面が軸方向と垂直なものとなった。

次に異なる結果となったものを列挙する。

- ・三軸伸張試験における変化量は各主歪み・体積歪みとも三軸圧縮試験よりも小さくならなかった。これは、三軸伸張試験において、変形量の最も大きい最小主応力が、

本試験では流体圧なのに対して、共著らの行った試験では固体圧であることが大きな要因であると考えられる。

- ・三軸伸張試験での破壊強度が、二つの最小主応力条件ともに、本試験の方が 10 MPa 程度大きくなった。これは、最大主応力と中間主応力 (最大主応力と同値) が本試験では固体圧であるのに対して、共著らの行った試験では流体圧であることが大きな要因であると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究は、来待砂岩を用いて真三軸試験を行うことで、来待砂岩の強度・変形特性における中間主応力の影響を検討した。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ・破壊強度は中間主応力の増加と共に増すものの、ある大きさの中間主応力以上では、中間主応力を上げるに従い破壊強度は減少する。また、破壊強度が減少する中間主応力以降、最小主応力方向の軸歪みが増長される。
- ・破壊強度が中間主応力の増加と共に増す領域において、破壊時の八面体せん断応力と  $(\sigma_1 + \sigma_3)$  の間には、ある一定の関係性がみられる。
- ・破壊曲面は、最小主応力 (拘束圧) に依存する。
- ・三軸伸張試験の方が三軸圧縮試験よりも必ず最大強度が大きくなる。
- ・三軸伸張試験は三軸圧縮試験よりも脆性的な挙動を示す。
- ・三軸伸張試験での岩石供試体の破壊状況は、引張破壊が卓越し、破断面が軸方向と垂直なものとなった。

**謝辞：**本研究は産業技術総合研究所の真三軸圧縮試験装置を使用して実施したものである。試験の実施にあたり産業技術総合研究所の方々には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 高橋学, 高橋直樹, 木山保, 漆松雪彦, 竹村貴人: 来待砂岩の三軸圧縮・三軸伸張応力による変形特性と内部構造の差異について, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム, 2008
- 2) 高橋直樹, 高橋学, 木山保, 竹村貴人: 封圧下における来待砂岩の伸張試験, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム, 2008
- 3) 高橋学, 李小春, 林為人, 成田孝, 富島康夫: 中間主応力方向の透水係数測定技術について, 応用地質, 第 43 巻, 第 1 号, pp.43-48, 2002
- 4) Kiyoo Mogi: Fracture and Flow of Rocks under High Triaxial Compression, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 76, NO.5, pp.1255-1269, 1971
- 5) Colmenares L.B., Zoback M.D.: A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 39, pp.695-729, 2002

# EFFECT OF THE INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS ON THE STRENGTH AND THE DEFORMATION OF KIMACHI SANDSTONE

Yuichi MIYAZAKI, Manabu TAKAHASI, Masahiko OSADA

The true triaxial tests (Mogi type) have been performed to clarify the effect of intermediate principal stress on the strength and the deformation of Kimachi sandstone. The size of square pillar specimens is  $35 \times 35 \times 70$  mm. The true triaxial apparatus was used to create the true triaxial condition in which the magnitudes of applied stresses are different ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ). The difference of strength and deformation behavior was carefully investigated during the test which was performed, continuously, from the triaxial compression condition ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) to triaxial extension condition ( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ). Moreover, the test results were compared with the other test which was carried out with cylindrical specimen ( $50 \times 100$ mm).