

極めて高い一般応力下での 岩の応力制御およびひずみ制御

九州大学工学部 学生会員○松本洋志

正会員 江崎哲郎

正会員 木村 強

1. まえがき

岩石の変形、破壊に関する特性の研究には、一般応力状態を再現できる試験装置が望ましい。これらは三方向独立したジャッキで載荷する方式が一般的であり、載荷面が圧盤である方式と、可撓性媒体である方式に大別される。このうち圧盤載荷方式は、一様なひずみ分布が得られる、ひずみの計測が正確、ひずみ制御が可能、高圧縮を実現できるという特徴を持つ。本研究では、花崗岩について、圧盤載荷方式の一般応力三軸試験を行ない、極めて高い応力下での変形、破壊特性を検討した。

2. 実験装置および供試体

実験に用いた装置は、最大載荷能力2MNの垂直方向のジャッキと水平2方向4本の1MNのジャッキがそれぞれ直交する構造を持つ油圧サーボ装置である。油圧サーボはパーソナルコンピュータで制御する。載荷面は圧盤であり、その載荷面積は36mm×36mmである。最大圧縮応力は、垂直方向1.5GPa、水平方向750MPaの高い応力が得られる。荷重の計測は、各方向のジャッキに取り付けられたロードセルによって行なう。変位の計測は、固定用アームで載荷ロッドに取り付けた各方向2個のひずみゲージ型変位計によって、固定用アーム間の相対変位を計測し、載荷ロッドの弾性変形量を補正する。なお、応力、変位は圧縮側を正として表示する。

供試岩石は、韓国南源産花崗岩である。形状は40mm×40mm×40mmの立方体で、各面の平行度が±0.05mm以内になるよう平面研削盤で端面仕上げを行なった。花崗岩は一般に異方性を示し、使用した花崗岩の場合、弾性波速度、ヤング率および一軸強度における異方性率はそれぞれ15%、21%、15%である。しかしながら、高い静水圧下では異方性は現れないことが指摘されている。今回の場合、100MPa以上の十分高い応力領域を対象としているので、異方性はないものと考えてよい。

載荷方法は、まず静水圧軸に沿って、ある所定の平均主応力 σ_m まで載荷した。次に平均主応力 σ_m を一定に保ち八面体せん断応力 τ_{oct} を増加(以下、平均主応力一定試験とよぶ)、もしくは、平均主ひずみ ε_m を一定に保ち八面体せん断ひずみ γ_{oct} を増加させ(以下、平均主ひずみ一定試験とよぶ)破壊させた。最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 に対する中間主応力 σ_2 と、最大主ひずみ ε_1 および最小主ひずみ ε_3 に対する中間主ひずみ ε_2 の相対の大きさは次のパラメータ μ, μ' で表す。

$$\mu = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3), \quad \mu' = (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$$

一般応力下での三軸試験において圧盤で載荷する場合、端面摩擦を軽減するために、テフロンシートやシリコングリースなどが用いられる。本実験ではひずみの測定精度を高めるため、原則として用いなかった。しかし、端面摩擦の破壊強度への影響を調べるために、0.2mmのテフロンシート2枚の間にシリコングリースを塗布したものを、圧盤と供試体の間に挿入した実験も行なった。

3. 実験結果および考察

Fig.1に、 $\sigma_m=200\sim500\text{MPa}$, $\mu=-1$ の平均主応力一定試験における応力-ひずみ曲線を示す。静水圧載荷時と、八面体せん断応力が小さい間は、応力-ひずみの関係は直線的であり弾性的挙動である。やがて八面体せん断応力が大きくなると、この関係は非線形になり破壊に至る。ここで、弾性領域でのヤング率を E 、ポアソン比を ν とすると、静水圧状態の応力-ひずみ曲線は、 $d\sigma_1/d\varepsilon_1 = d\sigma_2/d\varepsilon_2 = d\sigma_3/d\varepsilon_3 = E/(1-2\nu)$ 、また、八面体せん断応力が増加しているときは、 $d\sigma_1/d\varepsilon_1 = d\sigma_2/d\varepsilon_2 = d\sigma_3/d\varepsilon_3 = E/(1+\nu)$ の勾配となる。その値はそれぞれ92.3GPa、47.4GPaであるので、ヤング率は56.6GPa、ポアソン比は0.194となる。この値は一軸状態のヤング率38.2GPaに比べると大きく、拘束圧による影響がうかがえる。

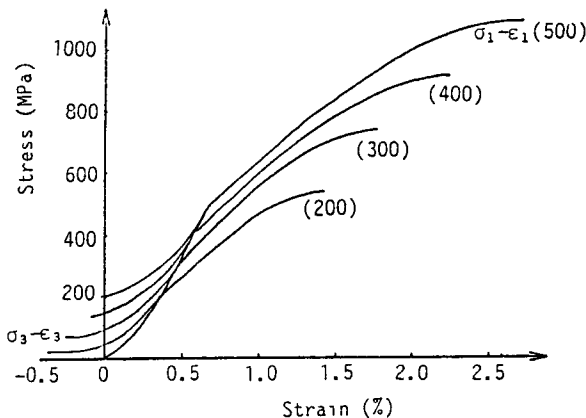


Fig.1 The stress-strain curves for $\mu=-1$ under the condition of $\sigma_m=200, 300, 400$ and 500MPa .

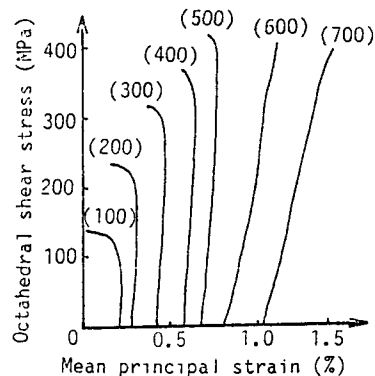


Fig.2 The octahedral shear stress-mean principal strain curves under the condition of $\sigma_m=100, 200, 300, 400, 500, 600$ and 700MPa .

Fig.2に、 $\sigma_m=100\text{MPa} \sim 700\text{MPa}$, $\mu=-1$ の平均主応力一定試験における八面体せん断応力-平均主ひずみ曲線を示す。八面体せん断応力の増加に伴う平均主ひずみの減少はダイレイタンスー、増加はコントラクタンスーを意味する。 $\sigma_m=500 \sim 600\text{MPa}$ でダイレイタンスー領域とコントラクタンスー領域の境界が現れる。

Fig.3に、Rendulic応力面上に平均主応力一定試験の破壊点と平均主ひずみ一定試験の応力軌跡を示し、あわせて、 $\sigma_m=400\text{MPa}$ のときの正八面体面上に破壊点を示す。一般に平均主ひずみ一定の条件下では、応力軌跡は八面体せん断応力の増加に伴い静水圧軸から $\sigma_m=\text{const.}$ の線に平行に離れていき、破壊曲線に近づくにつれて破壊曲線に沿ってダイレイタンスー領域では原点の反対側に、コントラクタンスー領域では原点側に曲がる。 $\sigma_m=500\text{MPa}$ 以下の応力軌跡は、初めは $\sigma_m=\text{const.}$ の線にほぼ平行であり、その後原点の反対側に曲がっている。これは、弾性的領域からダイレイタンスー領域へと応力状態が移っていったことを示している。

ここで、テフロンシートの有無による破壊強度の違いについて考察する。 σ_m が高い領域では、せん断面は形成されず、テフロンシートを用いた方が高い応力で破壊する。しかし、 σ_m が低い領域では、卓越したせん断面が形成され、テフロンシートを用いた方が低い応力で破壊する。その境界はおおよそ $\sigma_m=600\text{MPa}$ である。これらは、コントラクタンスー領域とダイレイタンスー領域との破壊様相の違いと、圧盤と供試体の間の端面摩擦の影響である。 σ_m が高い領域では、端面摩擦による応力集中が高まると、供試体の稜部が局部的に塑性流動をおこす。この流動域が徐々に内部に拡大していき、全体的な破壊に達する。したがって、テフロンシートを用いると高い強度が得られる。一方 σ_m が低い領域では、塑性流動がおこる以前に、卓越したせん断面が形成され破壊する。このとき端面摩擦があると、その分大きな値がロードセルで検出される。したがって、テフロンシートを用いた方が小さな値が得られ、真の値に近いといえる。

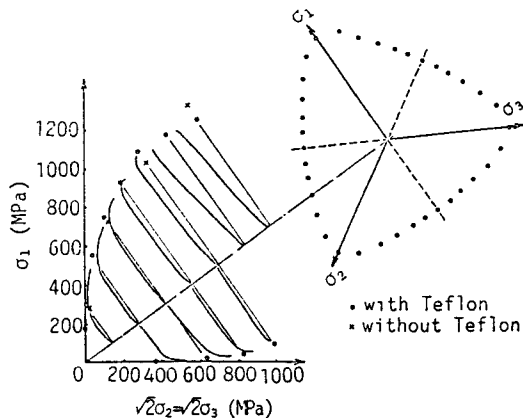


Fig.3 The failure points and stress lines on the Rendulic plane, and the failure points on the octahedral plane of $\sigma_m=400\text{MPa}$.

4. まとめ

- ・南源花崗岩の高応力下での弾性領域におけるヤング率は 56.6GPa 、ポアソン比は 0.194 である。
- ・南源花崗岩は、八面体せん断応力を増加させると、静水圧 500MPa 以下ではダイレイタンスー挙動を示し、静水圧 600MPa 以上ではコントラクタンスー挙動を示す。
- ・圧盤載荷試験では、テフロンシートを用いた方が用いないよりも、高い静水圧下では高い応力で、低い静水圧下では低い応力で破壊する。