

(24) 一軸応力下における岩盤供試体の力学的挙動に端面拘束が与える影響について

名古屋大学工学部	正会員	○	清木隆文
東海大学海洋学部	正会員		アイダン・オメル
韓国資源研究所			鄭 教澈
琉球大学工学部	正会員		渡嘉敷直彦
名古屋大学工学部	正会員		市川康明

The influence of loading platens on the mechanical behaviour of rock specimens under uniaxial stress state

Takafumi SEIKI	○	Nagoya University
Ömer AYDAN		Tokai University
Gyo-Cheol JEONG		Korea Institute of Geology Mining & Materials
Naohiko TOKASHIKI		Ryukyu University
Yasuaki ICHIKAWA		Nagoya University

Abstract

In general, uniaxial compression test, triaxial compression test and Brazilian test are used to determine the mechanical parameters of rocks. However, the influence of loading platens on strains have not been considered. We performed uniaxial compression tests by using cylindrical rock specimens. Total strain was measured by LVDTs and local strains on the surface of specimens were measured by strain gauges. The results of comparison of the total strain with the local strains indicated that the elastic modulus from the total strain might be smaller than those from the local strains. And then, we carried out axi-symmetrically elastic FEM analysis for cylindrical specimens. It is made clear that strain responses of hard rock specimens may more sensitive than these of soft rock specimens as a results of interaction between loading platens and specimen.

1. はじめに

一般に、岩盤の材料定数を決定するためには、代表的な母岩から供試体をサンプリングして、所定の寸法を有する供試体を複数作成し、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験または割裂試験などを行う。このとき、この供試体は、一つの要素と見なされ、その材料定数は、供試体全体の平均的な応力-ひずみ関係から決定される。しかしながら、実験供試体のひずみ分布は、その端面境界が与える影響のために一様ではない。そこで本報告は、実験供試体を一つの要素と捉えて良いか考察することを目的とする。

岩石試験の計測データは、つぎに挙げられる因子に影響される¹⁾。

- 試験機の加圧盤と岩石供試体との間の摩擦
- 供試体の形状、すなわち (i) 形、(ii) 直径に対する高さの比、(iii) 寸法
- 荷重の載荷速度
- 試験環境

特に、ここでは a) と b) の (ii)、(iii) に注目する。

はじめに、我々は岩石の円柱供試体を作成して一軸圧縮試験を行った。このとき、LVDT (Linear Variable Differential Transducer) を用いて、供試体全体の軸ひずみを測定するとともに、岩石供試体の端面付近と中央部にひずみゲージを貼り付け、供試体側面各部の軸ひずみを供試体各部の測定した。つづいて、円柱供試体とそれに接する載荷盤をモデル化し、FEM による軸対称弾性解析を行った。この結果から、載荷盤と供試体の剛性比とひずみ分布の関係を考察した。

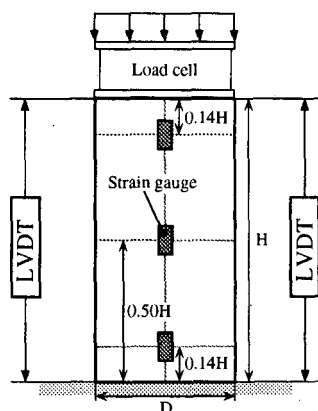


Fig. 1. Specimen for experiment and measuring instruments

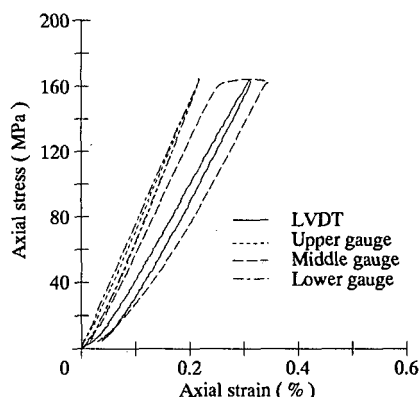


Fig. 2. Typical relation between stress and strain; green schist.

Table 1. Elastic modulus E_{50} calculated from experimental data of each gauge in an uniaxial compression test; green schist.

Instruments	LVDT (E_t)	UG (E_u)	MG (E_m)	LG (E_l)
Elastic modulus $\times 10^4$ (MPa)	5.84	7.81	6.90	7.53
E_{50}/E_t	1.00	1.34	1.18	1.29

UG: Upper gauge, MG: Middle gauge, LG: Lower gauge

2. 岩石供試体の実験

本研究では、まず岩石円柱供試体の端面が実験装置の載荷盤に接触することによって、供試体側面のひずみ分布に、どの程度影響を与えるか知るために、一軸圧縮試験を行った。実験供試体として、船入石 (Funyu tuff)、琉球石灰岩 (Ryukyu limestone)、花崗岩 (Granite)、緑色片岩 (Green schist) を用いた。緑色片岩については、片状構造の縞模様と載荷軸方向が一致するように、供試体を作成した。供試体寸法は、緑色片岩で直径 (D) 3.5 cm、高さ (H) 7.5 cm とし、その他の岩では D = 5.0 cm、H = 10 cm となるようにした。供試体の端面は、その平行度の誤差が 1/100 以下になるように作成した。実験装置は、 3.12×10^3 kN/mm の剛性のフレームを持ち、最大 980kN 載荷可能な高剛性圧縮試験機を使用した。載荷速度は 0.1 mm/min. で実験を行った。測定要素は、荷重、軸ひずみそして、供試体側面の軸ひずみ分布である。荷重は、ロードセル (測定可能な最大荷重 490kN、非線形性誤差 0.07 %)、供試体全体の軸ひずみは、LVDT (ストローク長 10 mm、非線形性誤差 0.1 %) を 2 本用いての測定し、平均値をそのひずみとした。また、供試体側面の軸ひずみ分布は、ゲージ長 6 mm のひずみゲージを供試体に 3 組、計 6 枚 (供試体側面上端付近に 1 組 2 枚、中央部 1 組 2 枚、下端付近に 1 組 2 枚) 貼り付けて測定し、各組で平均値をとり、各位置のひずみとした (Fig. 1 参照)。LVDT とひずみゲージの測線は、供試体の中心軸 (載荷軸) と同一平面内にあるように設置した。なお、計測は、すべての測定機器をデジタルひずみ測定器 TDS-302 (東京測器製) のターミナルに接続し、パーソナルコンピュータによって制御した。このシステムで自動計測された実験データは、コンピューター内のハードディスクに保存した。

3. 実験結果と考察

岩石供試体の応力-ひずみ関係の代表的な例として、緑色片岩の実験結果を示す (Fig. 2 参照)。この実験結果は、一軸破壊直前まで応力-ひずみ関係が弾性挙動を示す硬岩特有の現象を表している。また、LVDT とひずみゲージの測定結果から、ひずみの大きさに有意な差が見られ、LVDT によって測定されたひずみは、比較的大きくなることがわかる。さらに、供試体側面に貼ったひずみゲージの測定結果を見ると、供試体中央部の圧縮ひずみの大きさは、供試体の上端部、下端部の圧縮ひずみに比べると約 1.2 倍となっている。これは、供試体上端部と下端部が、載荷盤と供試体の剛性の差のために、水平方向に拘束され、その部分が見かけ上硬く

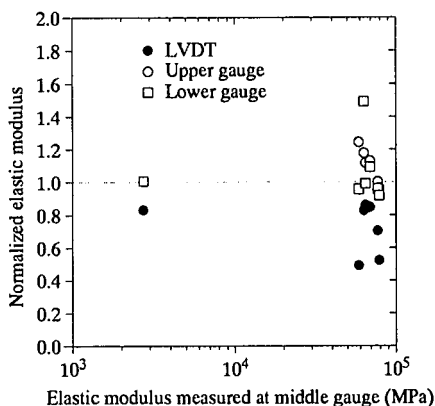


Fig. 3. Relation between elastic modulus measured at middle gauge and normalized elastic modulus at other gauges by elastic modulus measured at middle gauge.

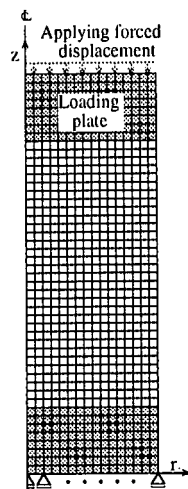


Fig. 4. Mesh for axis-symmetric elastic FEM analysis and boundary conditions; ($H/D = 1.0$, Element number 768, Node number 833).

なり、変形しにくくなるために起こるものである。これに対して供試体中央部は、端面拘束の影響を受けにくいので、LVDT で測定した全体のひずみに近い値を示すことがわかる。上端部、中央部および下端部の弾性係数と LVDT による弾性係数を比較した結果を Table 1 に示す。この表は、LVDT による弾性係数 E_t に供試体中央部の弾性係数 E_m が、最も近いことを表している。実際問題として、供試体中央部のひずみは、端面拘束の影響を受けにくいと、純粋な一軸応力状態に近く、全体のひずみ量から換算した見かけの弾性係数に最も近い傾向を示すことが一般的であると思われる。各実験結果について、供試体中央部のひずみ値から求めた弾性係数の対数を横軸に、正規化した残り 3 つの弾性係数を縦軸にとり、整理した図を Fig. 3 に示す。この図から、正規化された LVDT による弾性係数は、0.7 から 0.9 に分布していること、供試体中央部のひずみの大きさは、LVDT によるひずみに必ずしも近くないことがわかる。これは LVDT で供試体全体のひずみを測定すると、供試体端面近傍におけるひずみの乱れを取り込み、見かけ上の剛性が低下するために起こると考えられる。また、岩石供試体が必ずしも等質・等方でないこと、あるいはただ単に、LVDT とひずみゲージの構造上の精度差のためであるとも考えられる。谷ら²⁾は LDT (Local Deformation Transducer) を供試体に設置する際に、ヒンジ間が一様なひずみ分布となるように注意している。LVDT を用いる場合も同様に、何らかの注意が必要かもしれない。いずれにしても、その原因を究明するためには、さらに実験を重ねる必要がある。

4. 載荷盤により端面拘束を受ける岩石供試体の数値解析

4.1 岩石供試体の数値解析モデルと注目点

岩石供試体を用いて一軸圧縮試験を行うと、試験機の載荷盤よりも供試体の端面の剛性が弱いために、供試体の端面が拘束され、その周辺部に三軸的な応力分布が発生する。一般に端面拘束の影響を無視できる $H : D$ は、2.5 : 1 から 3.0 : 1 が良いとされている¹⁾。これを検証するために、実験供試体をモデル化し、つぎに記す 3 つのことに注目して、FEM による軸対称弾性解析を行った (Fig. 4 参照)。本報告では、弾性範囲内のひずみ分布に注目するものとし、載荷盤周辺部の応力集中に伴う降伏・破壊について考えないものとする。

(1) 岩石供試体端面と実験装置載荷盤間の端面拘束の影響 これは、試験機の載荷盤の剛性と実験供試体の剛性との比と、載荷盤と供試体端面の摩擦に依存する。載荷盤と供試体端面間の接触状況が未知であるので、今回の報告では、載荷盤と供試体端面が完全に密着していると仮定して、解析を行った。そこで、載荷盤のポアソン比 ν_S を 0.30、岩石供試体のポアソン比 ν_R を 0.15 とし、載荷盤の弾性係数 E_S と岩石供試体の弾性係数 E_R の比を 10 : 1 (硬岩)、100 : 1 (軟岩)、1000 : 1 (砂・粘土) の 3 段階に変化させた。

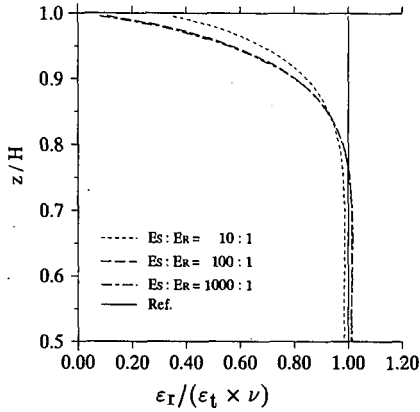


Fig. 5. Relation between $\epsilon_r/(\epsilon_t \times \nu)$ and z/H ; $H/D = 2.0$.

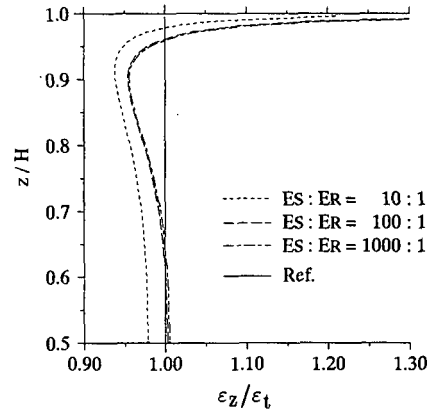


Fig. 6. Relation between ϵ_z/ϵ_t and z/H ; $H/D = 2.0$.

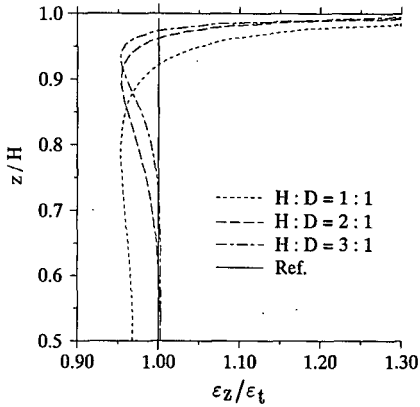


Fig. 7. Relation between ϵ_z/ϵ_t and z/H ; $E_S : E_R = 100 : 1$.

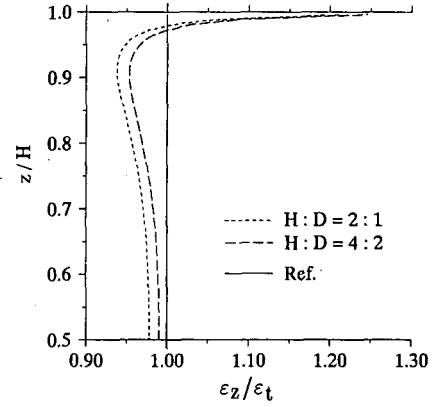


Fig. 8. Relation between ϵ_z/ϵ_t and z/H ; $E_S : E_R = 10 : 1$.

(2) H/D の変化による供試体のひずみ分布の相違 $H:D$ の比を $1:1$ 、 $2:1$ 、 $3:1$ と変化させて、形状変化がひずみ分布に与える影響を考察した。このとき、載荷盤はどの解析パターンも同じ厚さとし、各供試体の端面と大きさの等しいものを用いた。

(3) H/D 一定のもとで、 H の長さを变化させた場合のひずみ分布の相違 $H:D$ の比を $1:1$ 、 $2:1$ の2パターンとし、 H の長さが今までどりの解析モデルと、2倍にしたモデルとの解析結果を比較した。載荷盤の条件は、上記(2)の場合と同様にした。

4.2 解析結果および考察

載荷盤近傍における供試体側面の半径方向のひずみ ϵ_r は、載荷盤周辺 ($z/H \geq 0.9$) で激減する (Fig. 5 参照, [ϵ_t ; 供試体全体の軸ひずみ, z ; 載荷軸])。これは、載荷盤の剛性が供試体の剛性よりも高いことによって、半径方向への膨張が、拘束されていることを示す。供試体側面の軸ひずみ ϵ_z は、載荷盤と供試体の剛性比 $E_S:E_R$ が $10:1$ のときに、最も影響を受ける範囲が広い。 $E_S:E_R$ が大きくなると影響を受ける範囲は小さくなり、その比が $100:1$ から $1000:1$ へと変化しても、有意な差が現れない。これは、硬岩が載荷盤による拘束の影響を受けやすいことを示している (Fig. 6 参照)。また、どの剛性比についても供試体端面付近で軸ひずみが急激に大きくなる。これは、載荷盤との接触部分とその近傍における供試体のひずみ分布が、大きく乱れている

ことを表している。また、 $E_S : E_R$ が、100 : 1、1000 : 1 のときの軸ひずみ ε_z は、供試体中央部で、全体の軸ひずみ ε_t とほぼ一致する。このことから、供試体中央部の軸ひずみは、供試体の全軸ひずみと一致する可能性が示された。ただし、このことが成り立つためには、供試体の端面が、精度良く仕上げられている必要がある。

$E_S : E_R$ を一定のもとで、 $H : D$ の比を1 : 1、2 : 1、3 : 1 と変化させるに従って、供試体側面の軸ひずみの分布が、全体ひずみと等しいと見なせる部分の、全体長さに占める割合が大きくなっている (Fig. 7 参照)。この結果は、一般に $H : D = 2 : 1 \sim 3 : 1$ が、岩石供試体を製作するための目安として、適当であることを表している。

$H : D$ の比を一定にして、 H を2倍にした場合とそうでない場合の軸ひずみの分布を比較すると、 $E_S : E_R$ が100 : 1 と1000 : 1 の場合では、ほとんど差がみられなかった。しかし、 $E_S : E_R$ が10 : 1 の場合で、供試体側面の軸ひずみは、 H を2倍にした方が大きくなった (Fig. 8 参照)。このことから、供試体の剛性が高いほど、ひずみ分布に与える寸法効果は、大きいことがわかる。

5. まとめ

載荷盤が供試体の端面に与える影響を調べるために、本報告では一軸圧縮試験を行った。ここではひずみ分布に注目し、供試体の全体のひずみを2本のLVDTで、供試体側面の上端部、中央部、下端部のひずみを3組6枚のひずみゲージで測定した。それぞれの測定値からの弾性係数 E_{50} を比較すると、LVDTによる弾性係数が他に比べて小さいことがわかった。また、供試体側面の弾性係数は、供試体中央部の弾性係数が最も小さく、端面拘束の影響を受けにくいことがわかった。供試体の正確なひずみ分布の傾向を把握するためには、さらに実験を重ねる必要がある。

岩石供試体と試験機の載荷盤をモデル化して、FEMによる軸対称弾性解析を行い、端面拘束がひずみ分布に及ぼす影響を見た結果、 $E_S : E_R$ が10 : 1の場合、すなわち硬岩を供試体としたときに、顕著であった。さらに H/D 比を変化させた結果から、適当な H/D 比で実験供試体を作成すると、そのひずみ分布は、端面拘束の影響を受けにくいことが確認された。また、ひずみ分布に与える寸法効果は、剛性の高い供試体ほど大きいことがわかった。

参考文献

- 1) 増田秀夫, 田中荘一訳 (R. D. Lama, V. S. Vutukuri 著), 岩の力学的性質 I, II, 古今書院, 1992
- 2) 谷 和夫, 松本和真, 西 好一, 岩盤を模擬する樹脂材料のひずみ計測の検討, 第27回土質工学研究発表会, pp.1265-1268, 1992