

(48) 岩石供試体の力学的挙動に端面拘束が与える影響について
THE INFLUENCE OF CONTACT CONDITIONS BY LOADING PLATENS
ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF ROCK SPECIMENS

清木隆文*・鄭 教澈**・渡嘉敷直彦***・アイダン・オメル****・市川康明*****
Takafumi SEIKI, Gyo-Cheol JEONG, Naohiko TOKASHIKI, Ömer AYDAN and Yasuaki ICHIKAWA

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 has generally neglected in elastic state. To investigate the mechanical interaction among the edges of specimens and the loading platens, we carried out axis-symmetrically elastic FEM analysis for cylindrical specimens under the following conditions; 1) contact condition of platens, 2) stiffness ratio between specimen and platens, 3) ratio of height to diameter and 4) scale effect. It is made clear that strain responses of soft rock specimens may be more sensitive than those of hard rock specimens as a results of interaction between loading platens and specimen.

1. はじめに

岩石材料の定数(ヤング率, ポアソン比 e.t.c.)を決定するためには, 代表的な母岩から実験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する. そして一軸圧縮試験, 三軸圧縮試験または割裂試験などで代表される室内試験を行うことが一般的である. このとき, 供試体は一つの要素と見なされ, 弾性定数は供試体全体の平均的な応力-ひずみ関係をもとに決定される. しかしながら実験供試体のひずみ分布は, その端面と載荷盤が接触する境界が与える影響のために一様ではない. 実験を行う際に得られる実験データのばらつきは, その供試体の内部構造の異方性に起因するとされるが, その破壊状態を見る限りにおいて, 境界条件も大きく影響すると考えられる.

岩石試験の計測データは,

- (a) 試験機の加圧盤と岩石供試体との間の摩擦,
- (b) 供試体の形状 [(i)形, (ii)直径(幅)に対する高さの比, (iii)寸法],
- (c) 荷重載荷の速度,
- (d) 試験環境[周辺の温度, 湿度 e.t.c.]

のような外的な因子に影響を受けると言われている¹⁾. また, 今までに多くの研究者^{2),3),4)}によって実験供試体の寸法効果について議論されているが, その多くが破壊後の挙動についてであり, 弾性挙動については言及されていない. そこで本報告では, (a)と(b)の(ii), (iii)に注目し, 実験装置の載荷盤と供試体の端面が, 1)十分滑らかな場合, 2)完全に密着する場合の二通りについて, 一軸圧縮試験における弾性範囲内の挙動を再現するために, 軸対称FEM弾性解析を行う. その結果から, 実験供試体の側面で測定される

* 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部地圏環境工学教室
** 工博 韓国資源研究所 環境地質研究グループ
*** 正会員 琉球大学講師 工学部環境建設工学科
**** 正会員 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科
***** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部地圏環境工学教室

ひずみがどのように分布しているかを把握すると共に、載荷盤が実験供試体にどの程度影響を与えるかを明らかにする。

2. 軸対称有限要素解析

実験から得られる材料定数は、

- (a) 供試体に内在する微視的構造の分布、
- (b) 供試体の幾何学的な初期不整、
- (c) 実験機の載荷盤と供試体端面との接触状態

に影響されて大きくばらつく。(a)、(b)は一般によく議論されており、それらが計測データに与える影響は(c)に起因する影響に比べて大きい。しかしここでは敢えて(c)について注目し、等方・均質の実験供試体の端面が、同じ断面形状の載荷盤を介して一軸圧縮されることを想定した。以下に示す4つの解析条件を考慮して円柱供試体をモデル化し、上部載荷盤に強制変位を与える境界条件のもとで、FEM 軸対称弾性解析を行った(図-1参照)。そして解析結果から、供試体表面で測定される載荷軸方向と直径方向のひずみ分布を求めた。なお、載荷盤周辺部の応力集中に伴う実験供試体の降伏・破壊は考えないものとする。載荷盤はどの解析パターンにおいても同じ厚さとし、供試体の端面と等しい断面を持つ。

2.1 供試体端面と実験装置の載荷盤との端面拘束

実験供試体の端面と実験装置の載荷盤との接触条件を取り入れて数値解析を行うにあたり、以下に示すような二つのケースを考えた。

- (a) 供試体の端面と載荷盤が完全に密着している場合、
- (b) 供試体の端面が十分滑らかで、載荷盤に拘束されない場合

これらのケースは非常に極端ではあるが、二種類の境界条件から得られる結果の間に全ての接触条件が含まれるので、その影響を把握するには適している。解析上の接触面は、載荷盤と供試体の境界面を表現するためにジョイント要素⁵⁾を採用し、垂直剛性とせん断剛性を変化させた。なお、解析を行うための材料定数として載荷盤、岩石供試体のポアソン比をそれぞれ0.30、0.15と固定した。

2.2 供試体と載荷盤の剛性比

供試体端面と載荷盤との接触状況が同じであっても、実験供試体と載荷盤の剛性比が異なると、端面拘束が供試体のひずみ分布に与える影響の程度も異なる。そこで、載荷盤の弾性係数を一定のもとで、供試体の弾性係数を載荷盤の弾性係数 E_S と供試体の弾性係数 E_R との比が10:1(硬岩)、100:1(軟岩)、1000:1(砂、粘土)となるように変化させた。

2.3 供試体の高さ(直径)の比

円柱供試体の高さ(H)と直径(D)の比が変化するに従って、供試体側面で測定されるひずみ分布の現れ方がどのように異なるか把握するために、H:Dを1:1、2:1、3:1、4:1の4段階に変化させた。

2.4 H/D比一定のもとでH、Dの長さを変化させる場合

円柱供試体の形状が同一で寸法が変化した場合に、供試体側面で測定されるひずみ分布から寸法効果の有無を検証するため、前節に示した各H/D比について、HとDの長さがそれぞれもとの長さの2倍、3倍となるように(例えばH:D=1:1、2:2、3:3)、有限要素メッシュを作成した。

3. 解析結果

前節で示した手順に従い、供試体側面で測定される載荷軸方向と直径方向のひずみ ϵ_z 、 ϵ_r を供試体長さ方向の平均ひずみ ϵ_t で正規化したものと、供試体長さ方向軸(載荷軸)の値 z ($0 \leq z \leq H$)を供試体長さHで正規化したものを用いて解析結果を整理した。なお、供試体側面で測定される直径方向のひずみは、 ϵ_t に供試体のポアソン比を掛けて算出した直径方向の平均ひずみで正規化した。ここで扱われるひずみは、載荷

軸方向の中心 ($z/H = 0.5$) を中心に上下対称に分布するので、上半分だけを表示する。

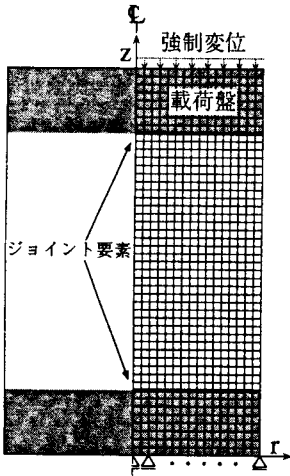


図-1 軸対称有限要素メッシュ
($H:D = 1:1$, 要素数800, 節点数867)

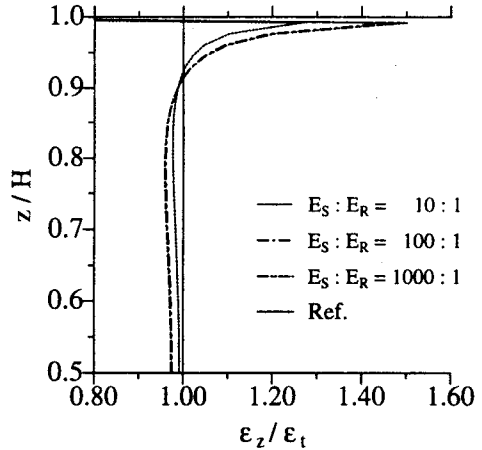


図-2 $\varepsilon_z / \varepsilon_t$ と z/H との関係図
(端面完全拘束, $H:D = 2:2$)

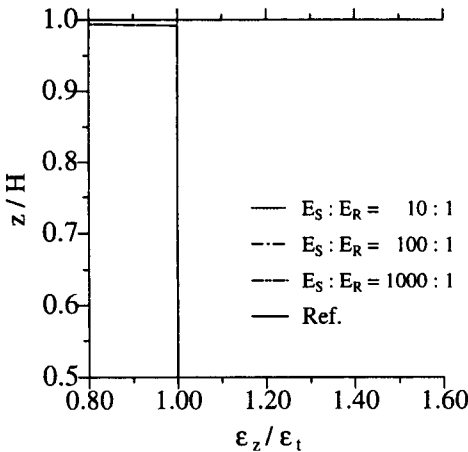


図-3 $\varepsilon_z / \varepsilon_t$ と z/H との関係図
(端面拘束なし, $H:D = 2:2$)

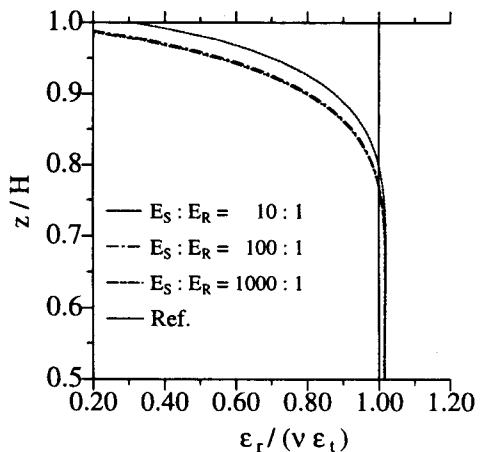


図-4 $\varepsilon_r / (\nu \varepsilon_t)$ と z/H との関係図
(端面完全拘束, $H:D = 2:1$)

3.1 供試体端面と実験装置载荷盤との端面拘束の影響

载荷盤と実験供試体との接触面が十分滑らかな場合と完全に密着している場合について考察した。この条件で载荷盤と供試体との剛性比を変化させた場合、供試体の H/D 比を変化させた場合、供試体の寸法を変化させた場合について検証した。供試体表面に現れるひずみ分布を図-2、図-3に示す。図-2は供試体端面と载荷盤の間を完全拘束した場合であり、図-3は接触面が十分滑らかな場合の結果を示す。これらの図は、端面に拘束される場合とされない場合のひずみ分布が大きく異なることを示す。特に、供試体の端面が拘束されない場合は、供試体表面のひずみが様に平均ひずみに等しいことが明らかとなった(図-3参照)。全てのケースにおいて同様の傾向が見られた。ここでそれぞれの破壊形態を推測すると、供試体端面が完全拘束されている場合の破壊は供試体端面付近から始まり、拘束されない場合は縦割り破壊となると考えられる。

3.2 供試体と载荷盤の剛性比の影響

供試体の端面と载荷盤との接触面が十分滑らかな場合、本研究で扱っている条件のもとでは、供試体側面

で観測されるひずみは一樣分布を示すので、以下供試体端面が載荷盤によって完全拘束される場合のみについて検証する。供試体と載荷盤の剛性比が、ひずみ分布に与える影響を図-4、図-5に示す。図-4は供試体側面で観測される直径方向のひずみ分布を示したものであるが、載荷盤と供試体の剛性比が $E_S : E_R = 10 : 1$ の場合に、最も載荷盤による端面拘束の影響を受けにくい。一方、 $E_S : E_R = 100 : 1$ と $1000 : 1$ のひずみ分布に有意な差は見られず、双方とも端面拘束の影響を比較的受け易いことを表している。図-5は載荷軸方向のひずみ分布を表すが、図-4と同様の傾向を示している。

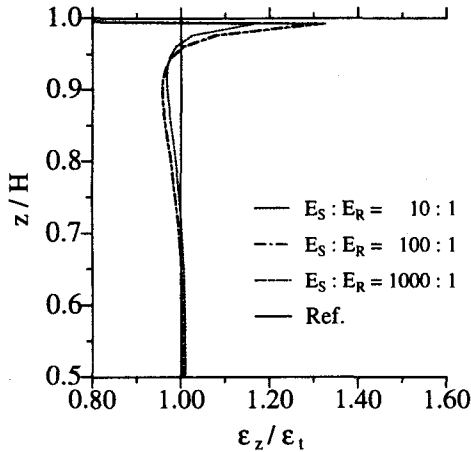


図-5 $\varepsilon_z / \varepsilon_t$ と z / H との関係図
(端面完全拘束, $H : D = 2 : 1$)

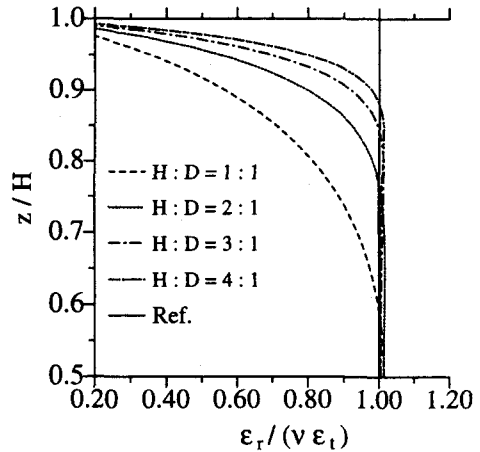


図-6 $\varepsilon_r / (\nu \varepsilon_t)$ と z / H との関係図
(端面完全拘束, $E_S : E_R = 1000 : 1$)

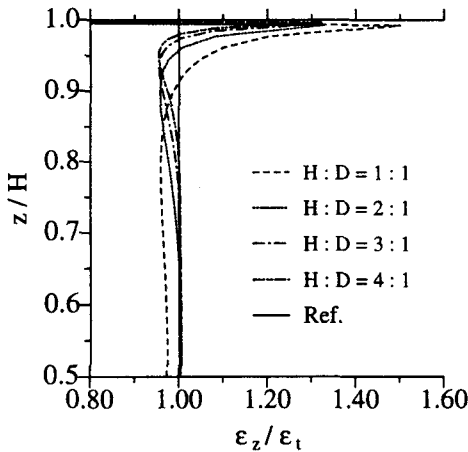


図-7 $\varepsilon_z / \varepsilon_t$ と z / H との関係図
(端面完全拘束, $E_S : E_R = 1000 : 1$)

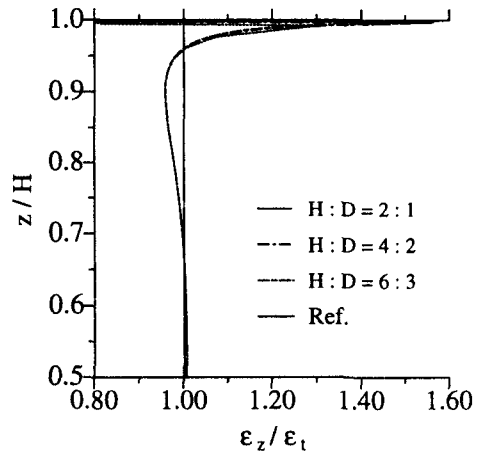


図-8 $\varepsilon_z / \varepsilon_t$ と z / H との関係図
(端面完全拘束, $E_S : E_R = 100 : 1$)

3.3 供試体の高さ(直径)の比の影響

供試体の高さ(H)と直径(D)との比を変化させた場合のひずみ分布を図-6、図-7に示す。図-6は供試体側面で測定される直径方向のひずみ分布を示す。この図から特に $H : D = 1 : 1$ の場合が載荷盤による端面拘束の影響を受けていることがわかる。また、 $H : D = 2 : 1$ から $H : D = 4 : 1$ も端面拘束の影響を受けているが、直径に対する供試体高さが高くなるほどその影響範囲は減少している。これは一般に実験供試体を作成する際に、その高さ(直径)の比を2 : 1から2.5 : 1にすることが望ましいと言われていることを裏付けている。図-7も同様の傾向を表す。

3.4 H/D比一定のもとでH、Dの長さを変化させた場合の影響

円柱供試体の載荷盤による端面拘束と寸法効果の関係について検証するために解析を行ったが、H/D比、剛性比(E_S/E_R)を変化させても、供試体端面付近のひずみ分布が微妙に影響を受ける以外は、供試体側面のひずみ分布に大きく影響を与えないことが明らかとなった(図-8参照)。また、平均ひずみを強制変位量を供試体の全長Hで除して計算するとひずみ分布に寸法効果が見られる⁶⁾が、これは載荷盤の変位も含んでいるため、供試体の変位を正確に測定したとは言えない。

4. まとめ

本研究では円柱供試体をモデル化し、軸対称FEMを用いて弾性解析を行った。その結果から供試体側面で測定されるひずみ分布を算出し、実験装置の載荷盤が供試体に与える影響の程度を把握することを試みた。以下にここで得られた知見を示す。

供試体端面と実験装置の載荷盤との端面拘束の影響 載荷盤と供試体の接触面が十分滑らかな場合、供試体側面で測定されるひずみは、供試体の剛性、形状、寸法の影響を受けることなく一様に分布し、その値は平均ひずみに等しい。載荷盤の接触状態が変わればそのひずみ分布も大きく変化することより、実験データに載荷盤の接触状態が影響を与えることを示唆するものである。

供試体と載荷盤の剛性比の影響 供試体の端面と載荷盤が完全に密着している場合、供試体の剛性が高い方がその影響を受けにくい。特にこの傾向は供試体端面付近において顕著である。供試体の剛性が低くなるほど端面拘束の影響を受け易いので、供試体端面の仕上げを注意する必要がある。

供試体の高さ(直径)の比を変化させた場合の影響 端面拘束の影響を考慮すると $H:D=1:1$ の場合が特に端面の拘束受けていることがわかる。また、 $H:D=2:1$ から $4:1$ の場合も供試体端面において、ひずみ分布が供試体の端面拘束に影響されているが、供試体直径に対する供試体高さが高くなるに従って、その影響を受けにくくなる。これより、一般に適当であると言われる供試体の高さ:幅(直径)の比が、実験データを正確に測定するために必要であることが裏付けられる。

H/D比一定のもとでH、Dの長さを変化させた場合の影響 端面拘束の影響による寸法効果は、供試体端面付近を除いて供試体側面で観測されるひずみ分布にほとんど現れない。強制変位量を供試体長さで除して供試体の平均ひずみを決定した場合は、ひずみ分布に寸法効果が見られるが、載荷盤の変位も含んでいるので、供試体変位のみを正確に測定したとは言えない。

5. 参考文献

- 1) Lama, R. D., Vutukuri, V. S., Saluja, S. S. : 岩の力学的性質 I (増田秀夫, 田中莊一訳), 古今書院, 1992.
- 2) Bieniawski, Z. T. : The Effect of Specimen Size on Compressive Strength of Coal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.5, pp.325 ~ 335, 1968.
- 3) Hudson, J. A., Brown, E. T., Fairhurst, C. : Shape of the Complete Stress-Strain Curve for Rock, Proc. 13th Symp. on Rock Mechanics, pp.773 ~ 795, 1971.
- 4) Lundborg, N. : The Strength-size Relation of Granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.4, pp.269 ~ 272, 1967.
- 5) Yuan, Z., Chua, K. M. : Exact Formulation of Axisymmetric Interface-element Stiffness Matrix, J. Geotech. Eng. ASCE, Vol.118, No.8, pp.1264 ~ 1271, 1992.8.
- 6) 清木隆文, アイダン・オメル, 鄭 教澈, 渡嘉敷直彦, 市川康明 : 一軸応力下における岩盤供試体の力学挙動に端面拘束が与える影響について, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.116 ~ 120, 1995.1.