

Strength Characteristics of Soft Rock under Undrained Triaxial
and Plane Strain Compression Tests

by Shinji FUKUSHIMA, Fujita Corporation

Abstract

In order to investigate the strength characteristics of soft rock under low confining pressure, an undrained triaxial and plane strain compression tests were performed on the saturated Ohya-ishi (porous tuff).

The test result shows that the strength of saturated soft rock under undrained plane strain compression ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \epsilon_2 = 0$) is larger than that of triaxial compression ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$).

1. はじめに

軟岩中のトンネル掘削や地下空洞などの地下構造物の建設を安全で経済的に行なうには軟岩の力学的特性を十分調べ数値解析法などによる事前の検討が必要である。特にこれらの地下構造物の場合には岩盤に掘削による応力解放、つまり岩盤中の岩の要素は拘束圧が低下する方向に除荷の応力変化を受けることになる(図-1)。岩盤中の場所によっては拘束圧が負になり引張の応力状態になることもある。このような非常に低い応力領域における軟岩の強度特性についてはまだ十分な検討はされていない。

本報告ではこのような応力状態での軟岩の強度特性を調べるために開発した三軸圧縮試験機と、この試験機で使用する三軸セルをそのまま用いた平面ひずみ圧縮試験の概要と、これら三軸圧縮試験と平面ひずみ圧縮試験により調べた低拘束圧領域における軟岩の強度特性について述べる。

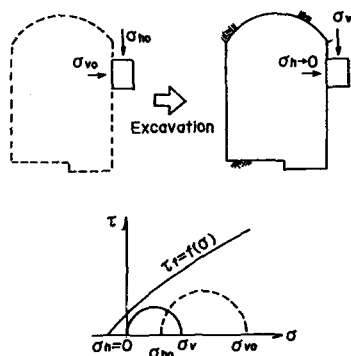


図-1 岩盤中の要素の応力変化

2. 三軸圧縮試験機

新たに製作した三軸圧縮試験機の三軸セル全体図を図-2に示してある。試験機の構造、試験操作は土質材料を対象とした三軸セル^{1) 2)}と同じであるが、セル円筒は拘束圧を最大100kgf/cm²まで加えられるように肉厚12.5mmのステンレス鋼管にしてある。

拘束圧はこの三軸セル内に水を満たし図-3に示すように窒素ポンペ(最大圧 $p_{max}=150\text{kgf/cm}^2$)を圧力源として、この圧力を精密レギュレータにより制御して圧力タンクにより水圧に変換して供試体に加える。供試体への軸荷重載荷用のピストンロッドは直径30mmのステンレス鋼棒であり、これはすりあわせ部のリニア-モーションベアリングによりガイドされている。またセル水のシーリングはO-リングにより行なってい

る。供試体は直径 $d_s=50\text{mm}$ 、高さ $h_s=100\text{mm}$ を標準寸法としており、その上下端面は摩擦軽減のために4分割したテフロンシートとシリコングリースの互層を置いている。またその側面は口紙とメンブレンで覆う。供試体の間隙水の排水は供試体側面の口紙により行なう。供試体の排水条件は図-3に示す回路により制御を行ない、背圧 σ_{BP} も加えられるようになっている。供試体の高さ変化は三軸セル外に設置した非接触変位計により測定する。また供試体の体積変化の測定は差圧計により行なう。

3. 平面ひずみ圧縮試験機

平面ひずみ圧縮試験は前述した三軸圧縮試験用の三軸セルをそのまま使用するもので、三軸圧縮試験用のキャップ、ベDESTALと平面ひずみ圧縮試験用のキャップ、ベDESTAL及び中間主応力 σ_2 方向の変位拘束板（平面ひずみ条件を達成するための変位拘束システム）と交換することにより平面ひずみ圧縮試験が可能なものである。平面ひずみ圧縮試験用部品を三軸セルにセットしたときの全体図を図-4に示してある。供試体の平均寸法は長さ $l=70\text{mm}$ 、幅 $w=40\text{mm}$ 、高さ $h=70\text{mm}$ である。キャップ、ベDESTALは2つの部分から、つまりその供試体側端面は供試体の形状に対応して矩形断面部（ $70\text{mm} \times 40\text{mm}$ ）とメンブレンをシーリングするための円形断面部（直径 70mm ）とから構成されている。円径部の直径（ d ）は供試体側面を直径 $d_m=70\text{mm}$ のメンブレンで覆うため、シーリングしやすいようにメンブレンの直径と同じ寸法になっている（ $d=d_m$ ）。また供試体の全辺周長（ $2(w+l)$ ）はメンブレンの円周長（ πd_m ）と同じ

$\pi d_m=2(w+l)$ となるように決めた。ここでは平面ひずみ条件（ $\varepsilon_2=\Delta l/l=0$ ）は供試体の長さが大きいほうが達成しやすいので中間主応力方向を長く、 $l=70\text{mm}$ 、 $w=40\text{mm}$ とした。供試体を平面ひずみ状態におくための変位拘束板は2枚の剛板を4本のロッドで接続したもので、これには変形を拘束する方向（中間主応力方向）の横荷重を測定するためのロードセルが取り付けられている。中間主応力 σ_2 はこの横方向荷重 P_L （ $=hw(\sigma_2-\sigma_3)$ ）から $\sigma_2=P_L/(hw)+\sigma_3$ として計算する。供試体端面は摩擦を軽減するためにシリコングリースとテフロンシートの互層を置いている。中間主応力方向の供試体側面はメンブレンと拘束板の間に

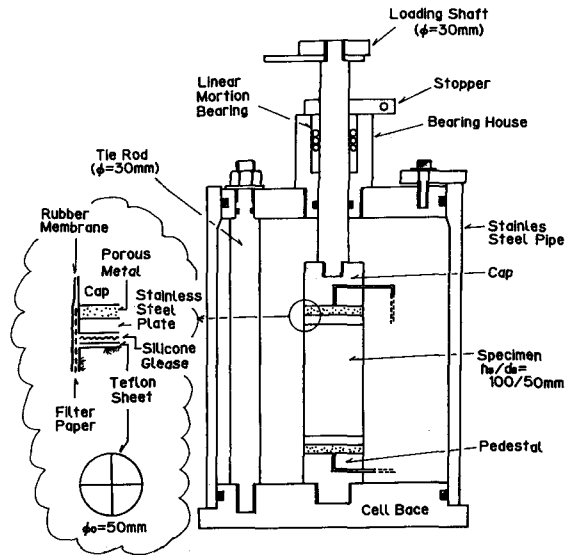


図-2 三軸セル全体図

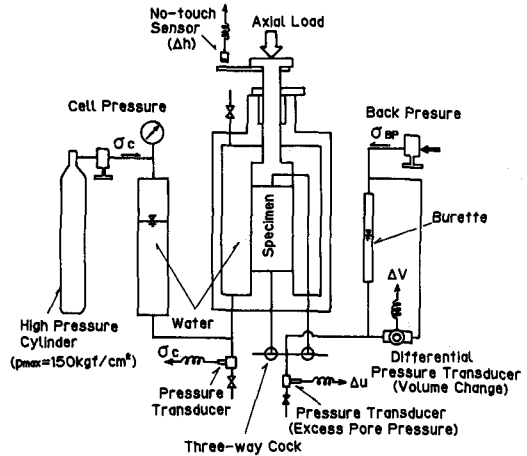


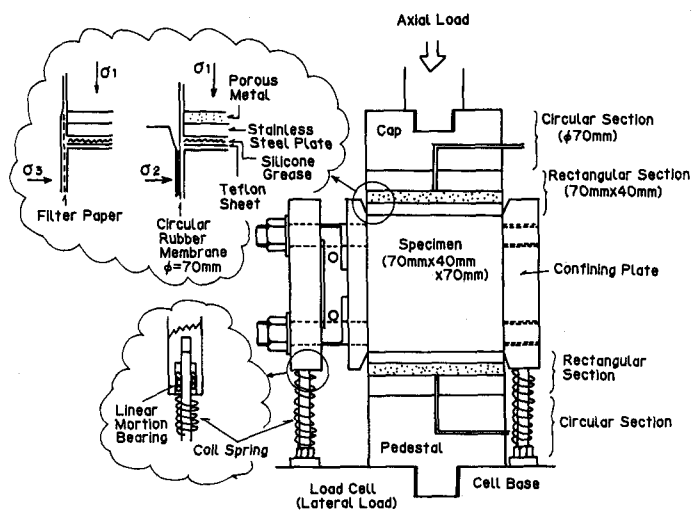
図-3 試験システム全体図

摩擦軽減のためにシリコングリースの薄い層を置いている。また供試体の間隙水の排水は最小主応力面に置いた口紙により行なう。その他の試験操作は三軸圧縮試験と全く同じである。

4. 試料と試験条件

使用した試料は大谷石（多孔隙凝灰岩；比重 $G_s=2.392$ ，含水比 $W=30.2\sim34.4\%$ ）である。供試体は円柱形あるいは長方体に整形後、完全に飽和させるために真空水槽内に約1か月放置させた。

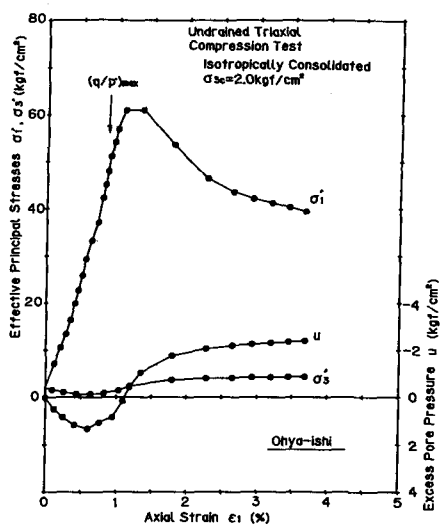
試験は等方圧密後、側圧（最小主応力）を一定に保ち、非排水条件でひずみ制御（載荷速度 $\epsilon_s=0.05\%/min$ ）によりせん断を行なった。供試体の飽和度を高めるために背圧 $\sigma_{BP}=2.0\text{kgf/cm}^2$ を加え、その飽和度の確認はB-値（ $=\Delta u/\Delta \sigma_3$ ）を測定して行なった。



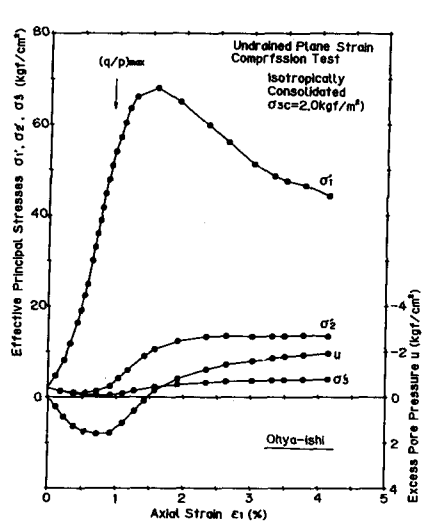
図－4 平面ひずみ圧縮試験システム

5. 試験結果

図－5(a), (b)にそれぞれ三軸圧縮試験、平面ひずみ圧縮試験で得られた応力－ひずみ関係の典型例を示してある。これらの図から両試験ともせん断初期はほぼ同じであるが、せん断とともに差が現われ平面ひずみ



図－5 (a) 応力－ひずみ関係
(三軸圧縮)



図－5 (b) 応力－ひずみ関係
(平面ひずみ圧縮)

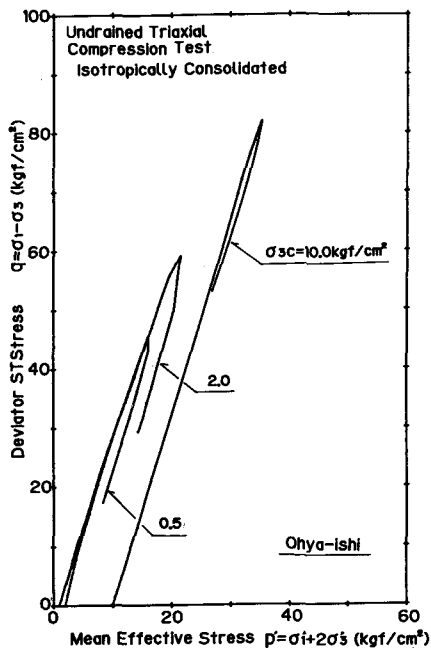


図-6 (a) 有効応力経路
(三軸圧縮)

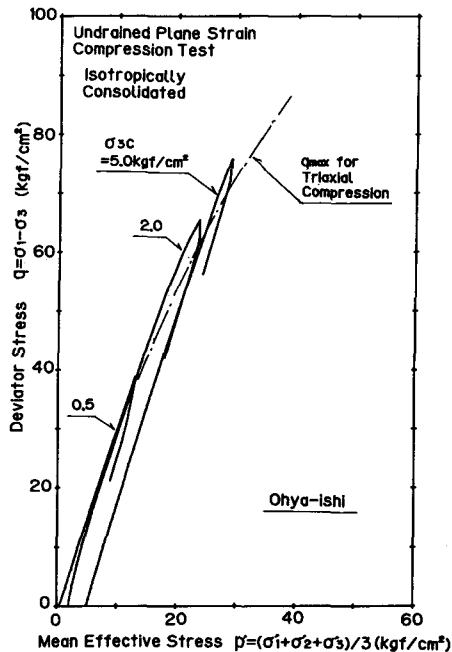


図-6 (b) 有効応力経路
(平面ひずみ圧縮)

圧縮の方がより大きな応力となっていることがわかる。これは中間主応力の影響と考えられる。図-5(b)の平面ひずみ圧縮における中間主応力は最大応力比 $(q/p')_{\max}$ までは最小主応力とほとんど同じであるがこれ以後増加し、最大主応力が最大値に至るとほぼ一定になる。

図-6(a), (b)には両試験におけるせん断中の有効応力経路 (p, q) を示してある。有効応力経路はせん断ともに偏差応力は増加し最大値に達すると、それ以降は急に減少し残留状態に至っているのは両試験とも同様であるが、平面ひずみ圧縮試験の方がより大きな偏差応力となっている $((q_{\max})_{\text{PSC}} > (q_{\max})_{\text{TC}})$ 。

次にこのような両試験の強度の相違について調べてみる。図-5(b)に見られるように最大偏差応力 $(q_{\max})$ と最大応力比 $(q/p)_{\max}$ の発生は同時ではないので、こ

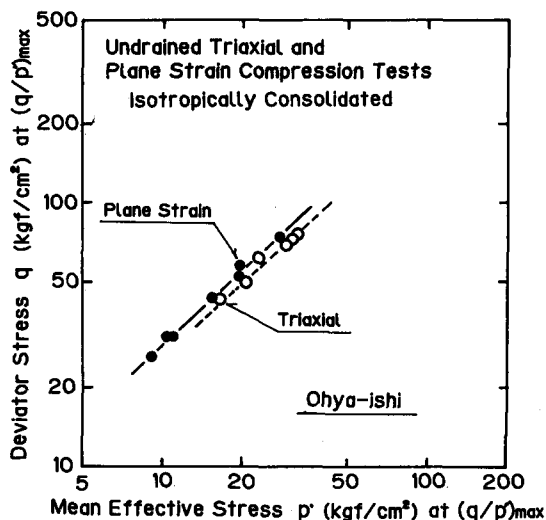


図-7 (a) $p \sim q$ 関係 $((q/p)_{\max})$ 時

ここでは最大応力比により考えてみる。図-7 (a) には最大応力比時の有効平均主応力と偏差応力を両対数グラフ上に、図-7 (b) にはせん断開始時の拘束圧 σ_{3c} に対して最大応力比をそれぞれプロットしてある。これらの図から、明らかに平面ひずみ圧縮時の方がより大きな強度を示していることがわかる。

ここで実施した平面ひずみ圧縮試験は完全な平面ひずみ状態になっていない。これは、拘束板と供試体の間には供試体をつつむメンブレン (厚さ $t_m=0.2\text{mm}$ 、ヤング率 $E_m=15\text{kgf/cm}^2$) と摩擦軽減用のシリコングリースがあるため、完全な平面ひずみ条件とならず中間主応力方向の変形を $\varepsilon_2=0.1\%$ 程度許してしまうからである。したがって完全な平面ひずみ状態であれば図-7 に示される両試験間の強度の差はさらに大きいものとなろう。

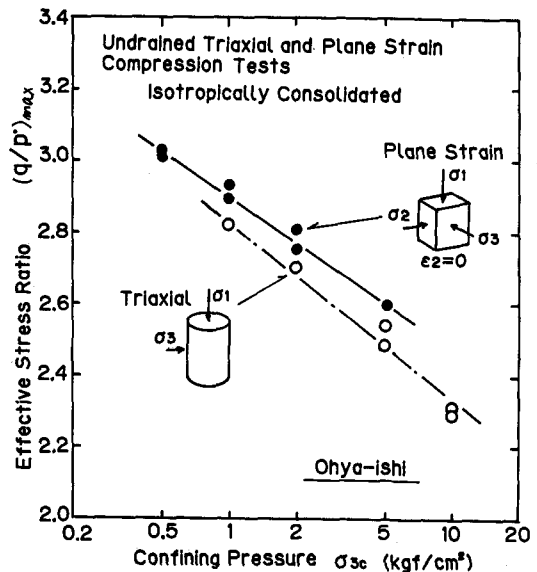


図-7 (b) $(q/p)_{\max} \sim \log \sigma_{3c}$ 関係

6. 結論

軟岩の低拘束圧領域における強度特性を調べるために三軸圧縮試験機と、これに使用する三軸セルをそのまま利用した平面ひずみ圧縮試験機を新たに製作した。これらの試験装置は土質材料を対象とした試験機とその構造、試験操作は全く同様であるが、土質材料と軟岩との材料特性の相違 (剛性が高く強度が大きい) を考慮に入れた設計をしている。特に、通常の土質試験よりもさらに高い拘束圧領域 (100kgf/cm^2) までの試験ができるようにセル円筒はステンレス鋼管により製作し、また平面ひずみ試験における平面ひずみ条件を達成するための変位拘束システムも土質試験用のものより剛性を高くしてある。

これらの装置により飽和軟岩の低拘束圧領域 ($\sigma_3=0.5 \sim 10.0\text{kgf/cm}^2$) における非排水三軸圧縮・平面ひずみ圧縮試験を実施し、両試験を比較した結果以下のことがわかった。

- (1) 三軸圧縮試験 (軸対称応力状態: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) で得られる強度よりも平面ひずみ圧縮試験 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \varepsilon_2=0$) で得られる強度の方が大きい。これは中間主応力の影響と考えられる。
- (2) ここで製作した型式の変位拘束システムは簡単に平面ひずみ圧縮試験ができるが、岩石のように剛性の高い材料では供試体を包むメンブレンの厚さの変形などにより平面ひずみ条件を満足させるのが難しいことも考慮すべきである。

参考文献

- 1) 龍岡文夫・福島伸二・山田真一: 土質せん断試験機的设计と製作、一応力・荷重さの制御と測定5 (平面ひずみ試験機) 一、地質と調査、第3号、pp70-75、1984。
- 2) 石井武美・福島伸二: 現場試験室に導入可能な三軸試験システムについて、フジタ工業技術研究所報、第21号、pp129-134、1985。