

(116) 原位置岩盤の簡易三軸圧縮試験法に関する基礎的研究

佐賀大学 正会員 石橋孝治

Fundamental study on fault triaxial compression test
for in-situ Rock mass.

Koji ISHIBASHI, Saga University

Abstract

Rock masses are quite peculiar materials in considering from engineering materials. In-situ testing of rock masses is indispensable for assessing their mechanical properties. Shear tests and deformability tests are commonly carried out in situ. In-situ triaxial compression test is not common, since this test have the disadvantages being time-consuming and expensive for its performance. As a way to diminish these disadvantages, the author dealt with fault triaxial compression test (FTCT) in this study.

The testing method of FTCT is essentially similar to that of conventional triaxial compression test (CTCT) in laboratory. Cilinder specimen is continued to bedrock at bottom end and subjected to axial load at top end. Small-scale FTCT is conducted in this study. Rock mass models were made of cement mortar, and were cylinders 150 mm in diameter and 300 mm in height. Specimens for testing were installed by coring with 35 mm in diameter and 87.5 mm in depth. FTCT and CTCT were conducted under four levels of constant confining pressures. Mohr's stress circles from FTCTs were described at inside of stress circles from CTCTs. Failure envelopes yielded that FTCTs give about 7 % larger shearing strength and about 9 % smaller internal friction angle than those of CTCTs. At present state, further researches are necessary to clarify the inherent characteristics of this test.

1. はじめに

岩盤は不連続面を内在するインタクトな岩体であり、その力学的性質はインタクトな岩自身の特性と不連続面の特性に強く依存する。さらに、これらの特性はそれぞれ様々なバリエーションを持つため、材料力学的に見ると極めて複雑な材料となり、その力学的性質を評価するには原位置において岩体の力学的試験を行ってこの性質を把握することが不可欠となる。

岩盤の原位置試験は、岩盤の変形特性、強度特性の把握および初期応力の測定を目的として実施される。本研究では、この中で岩盤の強度特性を求める原位置強度試験を対象とした。原位置強度試験は原位置で岩体の破壊試験を行い、モールの包絡線を破壊条件としてせん断強度と内部摩擦角を求めるものであるが、多くの場合、簡易な方法である一面せん断試験（岩盤せん断試験およびブロックせん断試験）が実施される。同様の目的で岩盤三軸圧縮試験も提案され実施例¹⁾も報告されている。これは、方形に切り残した岩体に三主応力制御のもとで載荷を行うものであり、上記の一面せん断試験に比べ載荷応力分布が比較的均等になり、局部的影響を受けにくいといった特徴がある。しかしながら、その実施には大がかりな装置構成に加え、多大の労力と費用を必要とすることから、一般には行われることはほとんど無い。

そこで本研究では、原位置での岩盤三軸圧縮試験実施上の不都合を軽減することを目的として、最も一般的な室内三軸圧縮試験法である擬似三軸圧縮試験（Conventional Triaxial Compression Test : CTCT）の考え方を導入した Fault Triaxial Compression Test (FTCT) に着目し、この試験法の特性と適用上の問題点を検討した。

2. FTCTの概要

図-1に本試験法の概念図を示す。原位置岩盤にコアリングを行い円柱状の試験片を切り残し、この試験片に対して従来の擬似三軸圧縮試験の手法を適用するものである。その特徴は、室内擬似三軸圧縮試験装置におけるセルの役割を試験片周辺の岩盤にもたせる点にあり、軸力載荷用ジャッキは1組でよく装置構成が簡素である。

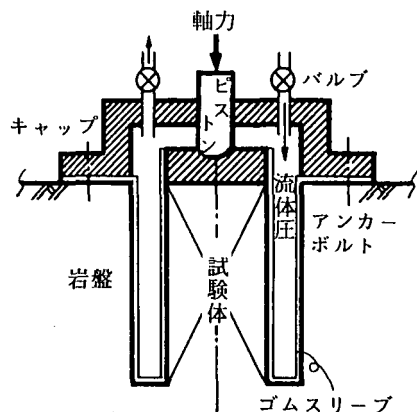


図-1 FTCTの概念図

3. 室内モデル実験

FTCTの基本的な特性を明らかにしておくために、直径15cm、高さ30cmのセメントモルタル製の円柱モデル岩石塊を用いた室内モデル実験を順次行うこととした。円柱モデル岩石塊はモルタルの打設後4週間の水中養生と、引き続き9週間以上の空中養生を行い強度増加の収束を待った。以降、ここでは便宜的に試験片底部が連続している試験片をFTCT試験片、それが連続していない試験片を標準試験片と呼ぶこととする。

3-1 一軸圧縮試験²⁾

FTCTとCTCTにおいては、試験片の底部が連続しているか否かが試験片の置かれる状態の大きな違いである。そこで試験片底部の連続性がどの様に強度に影響するかを調べるために一軸圧縮試験を行った。FTCT試験片は円柱モデル岩石塊の上面中央からコアリングを行い、直径 $D=50\text{mm}$ 、コア深さ H の円柱試験片を切り残して作製した。 H/D の具体的値としては2.0、2.5、3.0、3.5の4種類を与え、各々4本ずつ試験に供した。圧縮力は毎分2.9kNの載荷速度で試験片に作用させた。比較のため、同一材料で製作した標準試験片(直径50mm、高さ100mm)についても試験を行った。

3-2 FTCT

1) 試験片の被覆方法

三軸圧縮試験を行うには、試験片の周面を何らかの方法で被覆し周圧付加媒体との直接的接触を防止する必要がある。FTCTの場合、コアリングにより形成される削溝は非常に狭く、CTCTのようにゴムスリーブで試験片を覆う方法の他に、この削溝の両表面を容易に被覆する方法としてゴム状の被覆材の利用可能性を検討した。検討した被覆材は、パンク修理用ゴムのりと水溶性コーキング材の2種類である。被覆状況を検証するために別途直径35mmのコアビットで削溝した試験体を製作し、被覆実験を行った。この結果、水コーキング材比が13%の水溶性コーキング材が最も取り扱い易く均一の皮膜を形成できることが明らかとなった。今回の試験ではゴムスリーブで試験片を覆う方法を採用した。

2) 最大付加周圧

FTCTでは試験片の周辺部分が三軸セルの役割を担っている。直径15cm、高さ30cmの円柱モデル岩石塊を使用する本実験では、試験片周辺部の耐力でもって付加周圧の上限が決まることとなる。そこで、FTCT試験片の直径として $D=35\text{mm}$ を採用して試験片周辺部の肉厚若干厚くすると共に鋼管による代替拘束を考えた。試験片周辺部を内径43mm、外径150mmの圧肉円筒と考え、内圧を受ける圧肉円筒理論に基づいて最大耐周圧を算定すると、 $p_{max}=0.848\sigma$ なる関係を得、モデル岩石の引張強度(σ_t)の約85%となる。

3) 実験方法

周圧源の限度等を考慮して一軸圧縮強度が40MPa程度のセメントモルタルを使用して円柱モデル岩石塊を作製した。材料試験により得られたセメントモルタルの一軸圧縮強度と割裂引張強度はそれぞれ40.7MPa、2.5MPaであった。写真-1にFTCT試験片設置状況を、写真-2に鋼管で補強した状況をそれぞれ示す。

モデル岩石の引張強度から最大付加周圧は約2.1MPaとなる。モデル岩石の一軸圧縮強度の10%程度を目標

最大周圧とする、何らかの対策が必要となる。そこで鋼管を削溝に挿入して試験片周辺部の代替拘束機能を持たせた。与えた周圧の大きさは0, 0.98, 1.96, 2.94 MPaの4種類であり、それぞれ3本づつ試験を行った。周圧は窒素ガスボンベから供給されるガス圧を利用して試験片に与え、軸力は毎分1.96kNの荷重速度で試験片に与えた。写真-3にFTCTの試験の実施状況を示す。

なお、実験終了後の円柱モデル岩石塊から標準試験片（D=35mm, H=70mm, 3本）を抽出し、CTCT試験をも同時に行った。



写真-1 円柱モデル岩石塊
(コアリング直後)

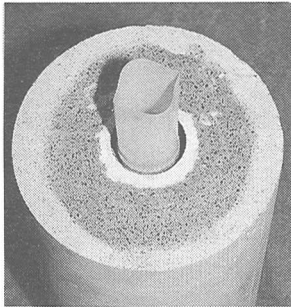


写真-2 円柱モデル岩石塊
(鋼管での補強状況)

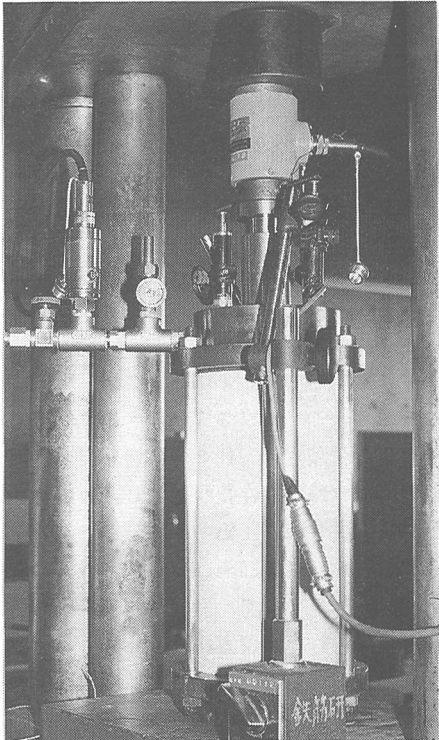


写真-3 FTCT試験の実施状況

4. 実験結果と考察

4-1 一軸圧縮試験

表-1に実験の結果をまとめて示す。FTCT試験片は標準試験片に比べ大きめの強度を与える傾向があることが示されている。試験終了後、円柱モデル岩石塊を割裂しFTCT試験片の破壊状況を調べたところ、 $H/D \leq 2.5$ の試験片においては写真-4に示したような明確なせん断破壊面が観察されたのに対して、 $H/D \leq 3.0$ の試験片においては写真-5に示したような座屈を示唆する破壊面が観察された。この実験から得られた強度と試験片の破壊状況をもとに、 $H/D = 2.5$ をFTCTに用いる試験片の寸法とした。

表-1 一軸圧縮試験の結果

H/D	2.0	2.5	3.0	3.5
標準試験片 σ_{cs}	47.2 (1.00)	—	—	—
FTCT試験片 σ_{cf}	50.6 (1.07)	49.3 (1.04)	53.0 (1.12)	53.4 (1.13)

() 内の数字は $\sigma_{cf} / \sigma_{cs}$ の値 (単位: MPa)

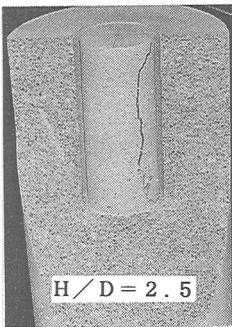


写真-4 試験片の
破壊状況

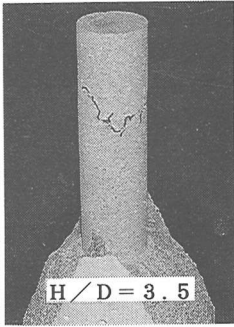


写真-5 試験片の
破壊状況

4-2 FTCT

表-2に実験の結果をまとめて示す。表中に示した値は各周圧とも3本の試験体の平均値である。周圧が0（一軸圧縮）の場合の最大主応力値は、標準試験片のそれより10%程度小さい値を示しており、表-1に示した事前の一軸圧縮試験の結果とは逆の結果を与えている。事前の一軸圧縮試験では標準試験片を型枠を用いて作製したのに対して、本試験では円柱モデル岩石塊からコア抜き・整形して作製したことから、標準試験片の作製手順の違いが影響しているものと考えら、再検討しておく必要がある。周圧 $\sigma_3 = 2.94$ MPaにおけるCTCTの結果が $\sigma_3 = 1.96$ MPaのそれに比べ小さい結果を与えている。試験体数を増加して検討を行っている。

1) 差応力～軸ひずみ曲線

図-2, 3にCTCTとFTCTの試験から得られた差応力～軸ひずみの関係の一例をそれぞれ示す。アムスラー型の材料試験機を用いた軸力の载荷であるため、強度破壊点以降の関係を完全に追跡することはできないが、周圧の増加に伴って強度破壊点を与えるひずみの大きさがおおきくなっている。線の形状に関しては、FTCTの結果にはひずみが突然シフトする箇所が見られる。これは試験片

の底部が円柱モデル岩石塊と連続していることから、円柱モデル岩石塊自身の挙動が雑音となって混入したためではないかと考えられる。差応力～軸ひずみ曲線の载荷中期段階までの傾きに注目すると、FTCTの関係方がCTCTのそれに比べ大きめの傾向を示している。これも試験片底部が連続することで見掛け上の载荷応力の低減がすることによるものと考えられる。

表-2 三軸圧縮試験の結果 (σ_1)

周圧 (σ_3)	0	0.98	1.96	2.94
CTCT σ_{1c}	40.8 (1.00)	48.1 (1.00)	49.9 (1.00)	48.2 (1.00)
FTCT σ_{1f}	36.7 (0.90)	38.7 (0.80)	39.8 (0.80)	42.9 (0.89)

() 内の数字は σ_{1f}/σ_{1c} の値 (単位: MPa)

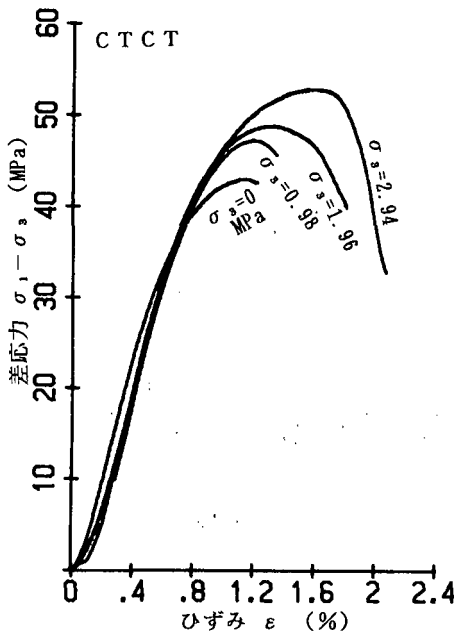


図-2 差応力～ひずみ曲線の一例

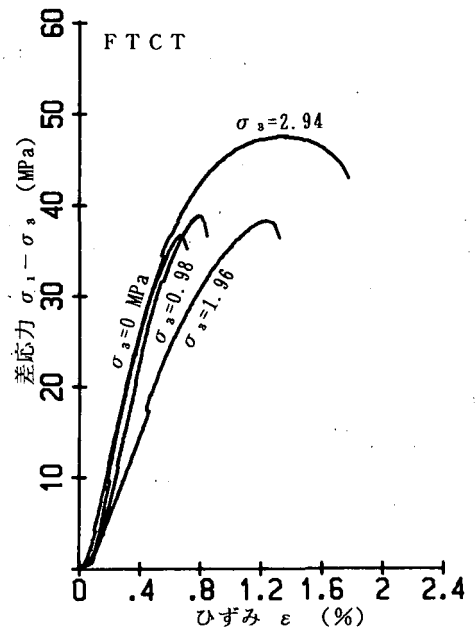


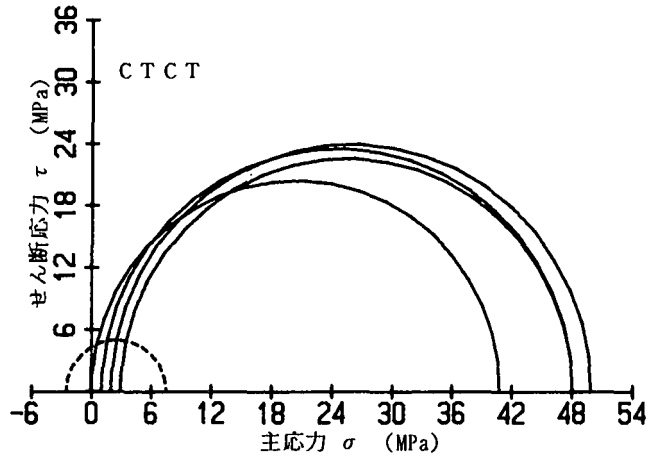
図-3 差応力～ひずみ曲線の一例

2) モールの破壊応力円

図-4, 5は表-2に示した結果をもとにモールの破壊応力円を描いたものである。図中の破線で示した破壊応力円は割裂引張試験結果に基づく応力円である。FTCTの破壊応力円はCTCTのその内側に描かれるが、周圧の増加に伴って破壊応力円が拡大しており試験条件の変化を明確に反映している。周圧付加の限度の関係から、破壊の包絡線を明確に描くには三軸圧縮試験の結果だけの利用では充分とは言えないため、割裂引張試験に基づく破壊応力円を追加・考慮して包絡線を描き強度定数を算定を試みた。これらの試算値を表-3に示す。これらの値はせん断軸における包絡線の切片で評価している。本試験ではFTCTはせん断強度は7%程度大きめの、内部摩擦角は9%程度小さめの値を与えている。また、包絡線の開口のの程度にも違いが見受けれる。これらの傾向がFTCTが持つ普遍的な性質なのかどうかを室内試験を繰り返し行い確認する必要がある。なお、FTCT試験片の破壊状況は一軸圧縮試験で観察される様なせん断破壊の様相を呈していた。

表-3 強度定数の試算値

強度定数	せん断強度 τ_0 (MPa)	内部摩擦角 ϕ (度)
CTCT	6.9	55
FTCT	7.4	50



5. むすび

図-4 モールの破壊応力円

FTCTとCTCTの結果をもとに試算したせん断強度(τ_0)と内部摩擦角(ϕ)は、FTCT試験片の結果を利用すると前者は危険側の、後者は安全側の強度定数を与えると言う結果を示した。別途行ったFEMによる弾塑性解析のシミュレーション結果によれば、両者とも数%大きめの値を与える結果を与えている²⁾。引き続き室内での試験数を重ねFTCTの特性をより明らかにすると共に、本試験法を実用化する上で派生する問題点の把握とその解消法について検討を続けて行く予定である。

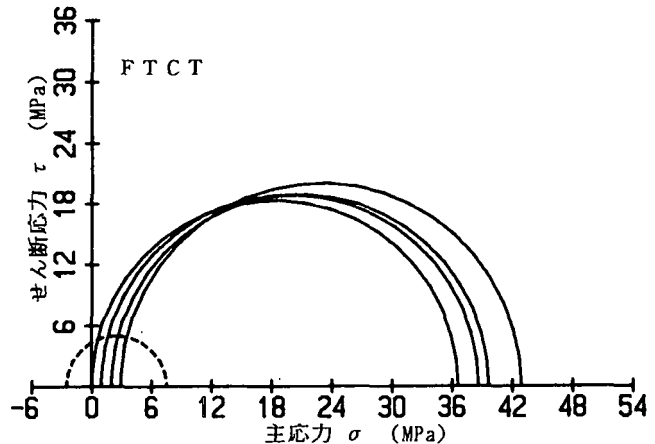


図-5 モールの破壊応力円

参 考 文 献

- 1) 村上省一: 土木工学における実用岩盤力学, 頁68-71, オーム社, 1985
- 2) 石橋孝治: 原位置岩盤の三軸圧縮試験法に関する基礎的研究, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第3部, 頁1420-1421, 1993