

(47) 三軸引張試験による均質な軟岩の低拘束圧下の破壊機構

Failure Mechanism of Uniform Soft Rocks by Triaxial Extension Tests under Low Confining Pressures

谷 和夫*

Kazuo TANI

The strength characteristics of uniform soft rocks are usually evaluated by triaxial compression tests for shear failure and by Brazilian tests for tensile failure. In this study, a triaxial extension test equipment was developed, in which a cylindrical specimen can be directly extended in an axial direction under a confining pressure. Shear failures were observed in the specimens under higher confining pressures than the uniaxial compression strength, while tensile failures were observed under lower pressures. The tensile strength, the minimum principal stress at tensile failures, was found to be independent of the effective confining pressures; thereby the strength value is considered to be unique for the material.

1. はじめに

軟岩は膠結作用（セメンテーション）による有効な粘着力成分を有する材料であるため、引張強度がゼロではない。これまで、この引張強度は圧裂試験（Brazilian test）あるいは一軸引張試験（Unconfined extension test）によって求められてきた（ISRM, 1978; 平松 他, 1964）。理想的に行われる圧裂試験では、弾性理論によれば載荷重を含む面内に作用する最小主応力 σ_3 は一樣な引張応力となるが、最大主応力 σ_1 は非一樣な圧縮応力となり、原理的に要素試験とは言えない。また破断面選択の自由もなく、載荷点の近傍では引張破壊に先んじてせん断破壊が生じる可能性も考えられるため、材料の要素特性を調べる試験としては厳密でない（Malan et al., 1994）。もう1つの円柱供試体の両端に金属板を接着して軸方向に引張る一軸引張試験によれば、理想的には供試体内に一樣な応力／ひずみ場を作ることが可能だが、最大主応力がゼロ（無拘束圧）以外の応力場（ $\sigma_1 \neq 0, \sigma_3 < 0$ ）は実現できない。一方、破壊時の応力状態（3主応力の大きさと方向）が厳密に分かる室内要素試験としては、各種圧縮試験が広く行われている。しかし負の拘束圧を作用させることが不可能なため、最小主応力が引張となる応力場をつくることができず（ $\sigma_1 > \sigma_3 \geq 0$ ）、供試体は常にせん断モードで破壊する。結局従来の試験法では、破壊時の最大主応力が圧縮で最小主応力が引張、つまりモールの応力円が原点を含む応力場（ $\sigma_1 > 0 > \sigma_3$ ）における破壊挙動を調べるのが不可能であった。そこで圧縮の拘束圧下で最小主応力を引張まで持っていくことができる三軸引張試験法（Triaxial extension test）を開発した。

2. 実験方法と実験装置

実験装置は、円柱供試体の両端面にアタッチメント（metal cap）を接着し、これをキャップとペDESTALに剛結して三軸セル内で軸方向に引張る構造とした（図1）。丁寧に整形した両端面をドライヤーで乾燥さ

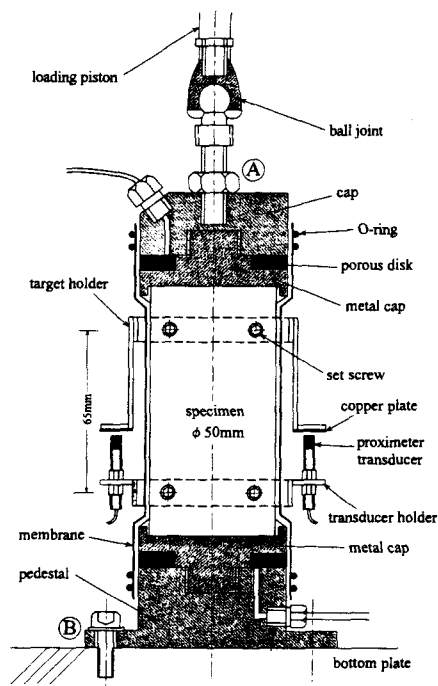
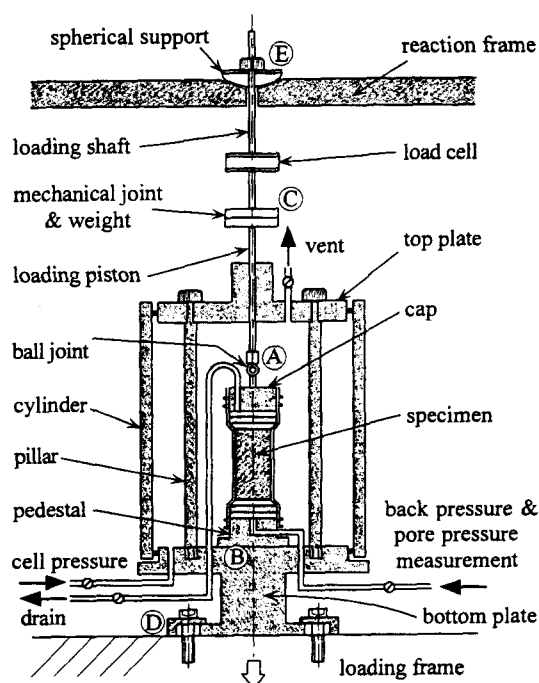


図 1：三軸引張り試験装置（左：概要図、右：供試体周辺部）

せ、2液混合タイプのエポキシ系接着剤によりアタッチメントを接着する（永山 他、1990）。

供試体にはモルタルを圧密して作製する人工軟岩を用いた（谷 他、1992 & 1995）。均質で自然の堆積軟岩に近い力学特性を持つことが特徴である。配合は表 1 に示す砂質軟岩で、圧密圧力 p^* は 12.2MPa とした。供試体の直径は 50mm で、側面の 65mm 離れた高さにアクリルのリング（target/transducer holders）を留めネジで取り付け、渦電流型非接触変位計（proximeter transducer）でその間の伸びを対角位置で計測して軸ひずみ ϵ_a を求めた。圧密終了後、非排水状態の下でせん断破壊あるいは引張破壊するまで軸方向に変位制御（載荷フレームの変位速度 0.05mm/min）で引張った。

引張試験の要点は、供試体を真直ぐ引張ることに集約される。供試体の中心軸と一致する方向に引張り、曲げモーメントを作用させてはならない。このため部品の加工・装置の組み立てに当たっては、中心軸が一致するようにし、特にセル上盤に支持される載荷ピストンの鉛直度に留意した。供試体は、この載荷ピストンの軸に合わせてセットする（接続位置は図 1 参照）。

- (1) キャップとペダスタルを剛結した供試体を、ボール・ジョイントを介して載荷ピストン下に取り付ける（接続 A）。
- (2) 供試体をピストン下で懸垂させ、下ろした位置でペダスタルとセル底盤を剛結する（接続 B）。
- (3) 通水により供試体側面のエア抜きをする。圧力円筒をセットして 0.01MPa の拘束圧を作用させる。
- (4) 反力枠から球座を介して懸垂させたシャフトの真下にセルを移動し、載荷ピストンと剛結する（接続 C）。この時、供試体に引張荷重が作用しないように球座のネジを弛める（解放 E）。
- (5) さらに通水して飽和化し（B 値 ≥ 0.9 ）、所定の圧力まで等方圧密する。

表 1：人工軟岩の配合

配合名	重 量 比 (%)			
	利根川砂	木節粘土	早強セメント	水道水
S3A	71.4	7.4	3.4	17.8
S4A	65.0	6.7	12.1	16.2

- (6) セル底盤を載荷枠に固定する（接続D）。
 (7) 荷重計の出力を見ながら反力枠上の球座のネジを締め、わずかに緊張させる（接続E）。

3. 供試体とアタッチメントの接着用治具の開発

一軸あるいは三軸試験では、曲げモーメントを作用させずに（偏心＝0で）供試体に軸力を作用させることが理想である。圧縮試験と比較して引張試験が困難な理由は、この曲げモーメントが実験結果に及ぼす影響が極めて大きいことによる。圧縮試験の場合には、応力～ひずみ関係が非線形であるために破壊に近づくほど曲げに起因する応力場の非一様性は緩和され、供試体を横切るせん断面内の応力や変形は比較的一様な状態で破壊に至ると考えられる（もちろん、せん断面の形成自体は供試体内の変形の局所化を意味している）。したがって、わずかな曲げによって強度を極端に過小評価することは少ない。しかし引張試験の場合には、局所的に生じた一部の破壊は断面積の減少を意味する。このため、直ちに供試体全体の破断につながり、剛性が低下する状態に至る前に試験が終了してしまう。このわずかな偏心の影響は実験結果のバラツキに表れると考えられるため、高強度で整形が容易な配合 S4A の供試体を用いて試験結果の安定性を検討した。試験は全て有効拘束圧 $\sigma'_c = 0.392\text{MPa}$ 、背圧 $u_{bp} = 0.098\text{MPa}$ で行っている。

実験結果を図2に示す。 q_f 、 ϵ_f は最大の主応力差（軸差強度）とその時の軸ひずみ、 E_{max} は軸ひずみ $\epsilon_a = 1 \times 10^{-3}$ の時の変形係数（割線剛性）を表している。

図中の黒丸印のデータはアタッチメントの接着を手で行ったもの、白丸印のデータは図3に示す治具を用いて接着したものを示している。治具の目的は、供試体の端面の整形精度に依らずに供試体の軸に合わせてアタッチメントを接着するためである。

治具を利用することによって、軸差強度は $q_f = 1.1 \sim 1.8\text{MPa}$ から $q_f = 1.9 \sim 2.3\text{MPa}$ に改善することが分かる。手で接着する場合、供試体の端面に合わせてアタッチメントが取り付けられる。このため、端面が供試体の軸と直交せずに整形されていると、アタッチメントの軸と供試体の軸が一致しなくなる。実際の偏心の程度は分からないが（目視では確認しづらい）、わずかな曲げによって強度が極端に過小評価されることに注意しなければならない。ただし治具を利用するか否か、つまりわずかな曲げが作用する可能性があるか否かによって初期剛性 E_{max} には大きな差は見られない。したがって、微小な曲げによって軸差強度が低くなるケースでは、破壊軸ひずみ ϵ_f も小さくなる傾向が見られる。

なお、接着に図3の治具を利用した場合、引張強度は有効応力表示でも全応力表示でも $\sigma'_{3f} \approx \sigma_{3f} = -1.9 \sim -1.5\text{MPa}$ で、破壊時の過剰間隙水圧 $u_f = -0.03 \sim -0.02\text{MPa}$ は小さかった。

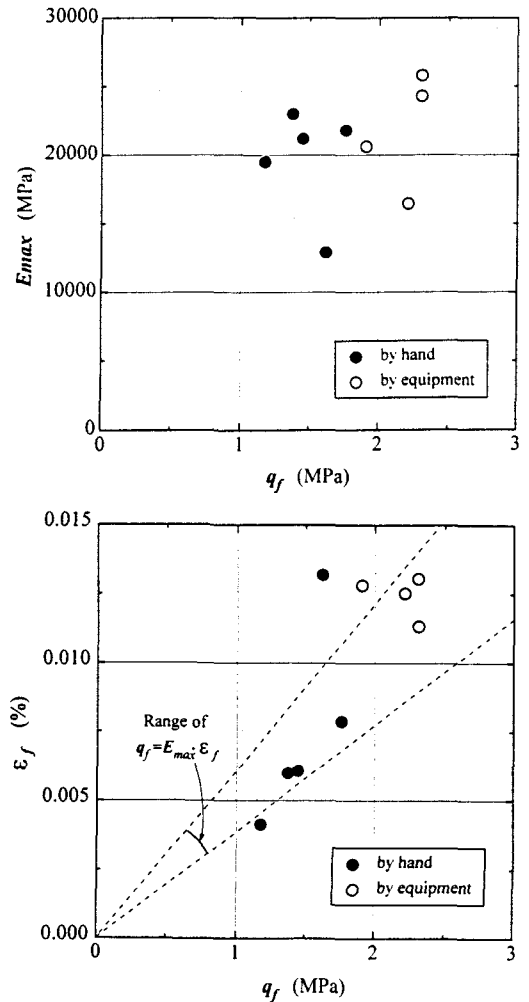


図2：配合 S4A の試験結果 ($\sigma'_c = 3.924\text{MPa}$)
 (上図) $E_{max} \sim q_f$ 関係、(下図) $\epsilon_f \sim q_f$ 関係

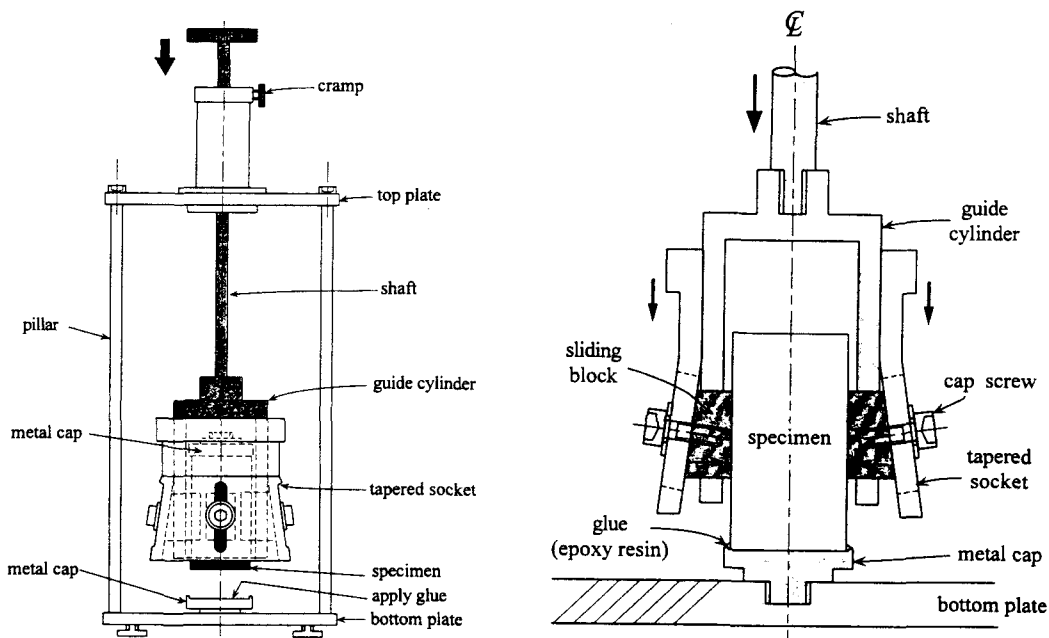


図3：供試体端面にアタッチメントを正確に接着する治具（左：全体図、右：供試体周辺部）

4. 拘束圧が引張強度に及ぼす影響

配合 S3A の供試体を用いて、有効拘束圧を $\sigma_c' = 0.005 \sim 4.905 \text{ MPa}$ に変化させて圧密非排水（CU）引張試験を行った。供試体とアタッチメントの接着は全て図3に示す治具を用いて行った。図4に有効拘束圧 σ_c' と破壊時の最小主応力 σ_{y1} , σ_{y2} および軸ひずみ ϵ_{y1} の関係を示す。拘束圧が低い試験（ $\sigma_c' \leq 2.943 \text{ MPa}$ ）は破断面が供試体軸に直交する引張モード（黒丸印）、拘束圧が高い試験（ $\sigma_c' \geq 3.924 \text{ MPa}$ ）では供試体を低角度に横切るせん断層が形成される伸張せん断モード（白丸印）によって破壊した。両モードの破壊軸ひずみ ϵ_{y1} には大差が認められる。また一軸圧縮試験あるいは極めて低い有効拘束圧（ $\sigma_c' = 0.005 \text{ MPa}$ ）で行った三軸圧縮CU試験による軸差強度は $q = 2.7 \sim 3.2 \text{ MPa}$ で、ちょうどその境目の応力に対応していることは興味深い。

引張破壊時の最小主応力（引張強度）は、全応力 σ_y で整理すると有効拘束圧 σ_c' と共に増大する傾向が見られるが、有効応力 σ_{y1}' で整理すると -0.1 MPa 程度でほぼ一定のようである。引張強度が拘束圧に依存しないことは、破断面沿いの最大主応力が非一様であることに問わず圧裂試験によって引張強度が求まる可能性を示唆するものである。ただし実験結果のばらつきが大きいために明確な傾向が把握しにくく、さらに間隙水圧の計測系はアタッチメントの外側をろ紙を介して供試体側面につながっているためにせん断中に発生する過剰間隙水圧の計測の信頼性は低い可能性がある。さらに検討が必要である。

圧縮試験では実現することが不可能な応力場、つまり最小有効主応力が引張（ $\sigma_{y1}' < 0$ ）でせん断破壊するケース（ $\sigma_c' = 3.924 \text{ MPa}$ ）もあった。その破壊規準は最小主応力が圧縮（ $\sigma_{y1}, \sigma_{y2} > 0$ ）の三軸伸張せん断の破壊規準の延長と一致し、さらに三軸圧縮によるせん断破壊のものとも実験した範囲内では大差ないようであることは既に報告した（谷 他, 1995）。

5. おわりに

三軸圧縮試験によるせん断破壊と、圧裂試験による引張破壊との間に存在する低拘束圧領域下の破壊機構

を解明するため、軟岩を対象として三軸引張試験を実施した。異方性や不均質性の影響を除外するため、完全に均質な人工軟岩について検討を行った。供試体を正確に軸方向に引張り、曲げを作用させないように細心の注意を払わなければならない等、実験はそれほど簡単ではない。今後一般的な試験として認知されるためには、技術的に以下の欠点を克服する必要がある。

- (1) 側面が滑らかに整形できない供試体は、図3の治具を用いてもアタッチメントを正確に接着できない。
- (2) ピストンによってペデスタルと供試体を懸垂した状態で、供試体上面には数 Pa の引張応力が作用するため、極端に弱い試料の試験はできない。
- (3) 供試体よりアタッチメントの直径が大きいため、供試体側面のエアの除去がしにくい。
- (4) 供試体の両端は接着時に表面を乾燥させるため、飽和化しにくい。
- (5) 間隙水圧の計測の信頼性は低いかもしれない。
- (6) 遊びが大きく、ひずみ速度が一定にならない。

装置の製作・改良は立川日出男氏 ((株)立川機械製作所)、実験は横倉俊幸、瀬尾和義、原稿・図面の整備は海老原愛子の3氏 ((株)CRS) にお世話になった。末筆ながら感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) 平松良雄、西原正夫、岡 行俊(1964) “岩石の引張試験に関する検討”、日本鉱業会誌、第70巻、第793号、pp.285~289。
- 2) ISRM (1978) “Suggested method for determining tensile strength of rock materials”, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, No.3, pp.99~103。
- 3) Malam, D.F., Napier, J.A.L. and Watson, B.P. (1994) “Propagation of fractures from an interface in a Brazilian test specimen”, *J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.31, No.6, pp.581~596。
- 4) 永山 功、渡辺和夫、尾畑伸之(1990) “ダムコンクリートの直接引張強度についての実験的検討”、土木研究所資料第2914号。
- 5) 谷 和夫、吉田保夫(1992) “人工軟岩の作製法”、第24回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.251~255。
- 6) 谷 和夫、西 好一、吉田保夫(1995) “模型地盤用に開発した人工軟岩の力学特性”、第26回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.529~533。

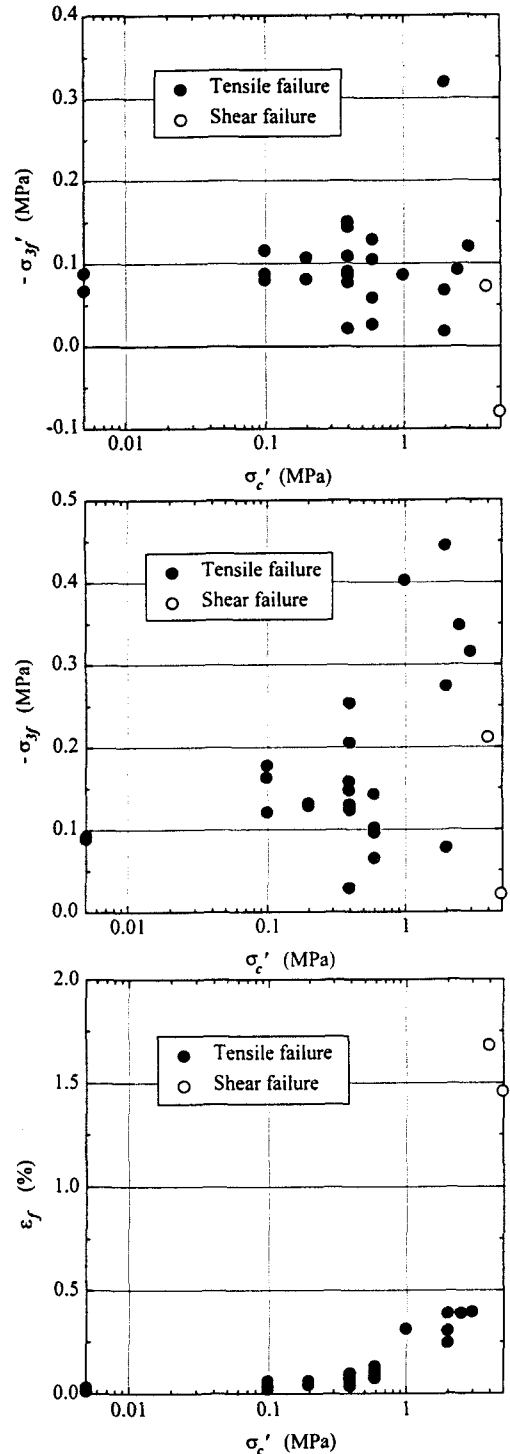


図4：配合 S3A の試験結果

(上図) $-\sigma_{y'} \sim \sigma_c'$ 関係、(中図) $-\sigma_y \sim \sigma_c'$ 関係、
(下図) $\varepsilon_f \sim \sigma_c'$