

(16) 多段階三軸試験での軟岩の力学挙動に関する考察

京都大学工学部 赤井 浩一
 " 大西 有三
 京都大学大学院 ○李 徳河

1. まえがき

岩石の強度定数を得るために三軸圧縮試験が一般に行われる。しかし、試料採取の困難な地質では試料の数が限られるため、強度定数を求めるのに苦労する場合も多い。この多段階試験法を利用すれば従来一本の試料から強度に関しては大抵一組のデータ（ピーク強度と残留強度）しか得られなかった（図-1(a)参照）ものが、一本の試料から強度包絡線が求められる利点がある。

乾燥した割け率の小さい硬岩に対して最初に多段階三軸試験 (multiple-stage triaxial test; 略して MST 法) を適用したのは Kovari & Tisa (1975) である。彼らの考えた試験方法を応力経路で示すと図-1(b) のようになる。この場合の実験結果の一例 (荷重-ひずみ曲線) を図-2 に示す。その後、Kim & Ko (1977), Chang & Jumper (1978), Chang & Bondurant (1979) らは Oil shale (油頁岩) について様々な多段階試験を実施し、実用に供している。

一方、筆者らは、軟岩、特に割け率の大きい飽和した泥岩に対する多段階三軸試験法の適用について検討を加えてきた (1979 a, b)。その結果、飽和軟岩の場合には、Kovari らの提案した応力経路をそのまま適用することは不可能であり、図-3 に示す応力経路をたどるような試験を行ない、かつ次の三つの条件を満足させるようにすると、合理的かつ正確なデータが得られることが明らかになった。

1. 各段階における拘束圧を変化させた後、試料を必ず圧密する。
2. ピーク強度を求める段階では可能なかぎりピーク強度の直前に荷重を除荷させる。残留強度の測定段階では、実験条件を一致させるため、残留強度に達した後、荷重を零まで除荷させる。
3. 同じ種類の試験段階、たとえばピーク強度を求めようとする段階には、順次に拘束圧を低いから高い方に上げる。

この三つの条件の中で2.の条件は常に議論を呼ぶ項目である。実際問題としてどこがピークの頂点を正確に予測することは困難であるので、実用上問題とならない程度の誤差を見込んで上で判断する以外に方法はないと考えられる。最も簡便な方法として、荷重-軸変位曲線と過剰割け率-軸変位曲線の両者を X-Y レコーダーに

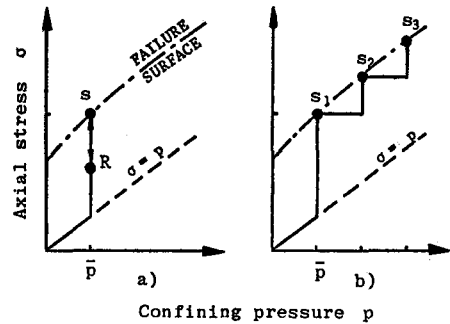


Fig. 1

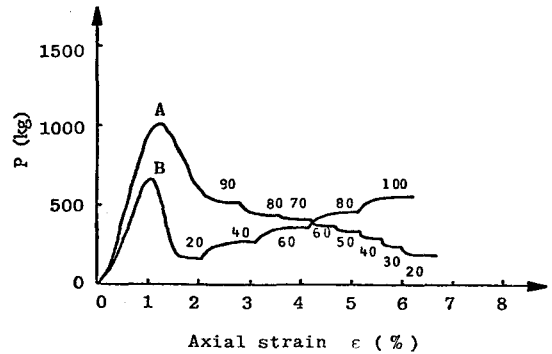


Fig. 2

- Starting point of test
- Final point of test

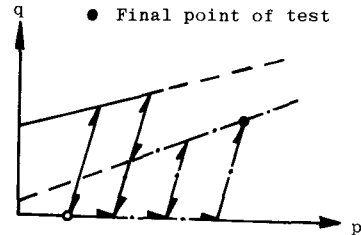


Fig. 3

記録しながら、それらの挙動からある程度の予想は立てられる。しかし、多段階試験の信頼性を高めるためには、ピーク強度の突をより明確に示すことのできる新しい手法を見出す必要があると思われる。

本論文の内容は、その新しい試みとして試料の横ひずみを測定することにより、多段階試験の精度向上を目的としたものである。

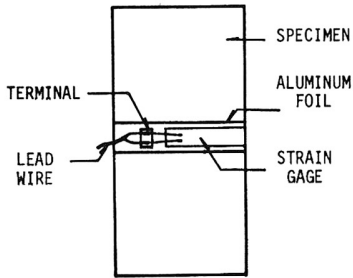


Fig. 4

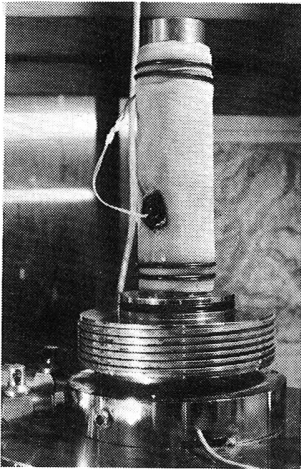


Photo. 1

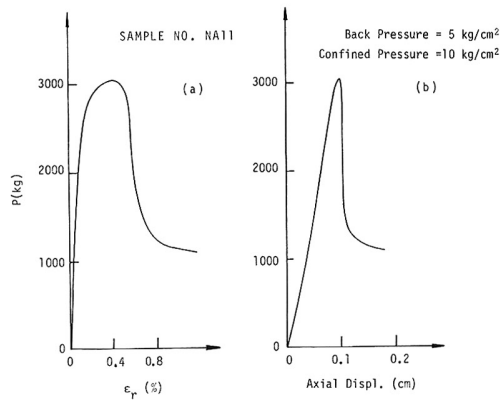


Fig. 5

2. 実験の概要

本研究で取り扱う岩石試料は灰色の凝灰岩（船生石）で、その物理諸量は $G_s = 2.805$, $e = 0.548$, $\gamma_d = 1.914 \text{ g/cm}^3$, 一軸圧縮強度 110 kg/cm^2 などである。試料の横ひずみを測定するには一般にひずみゲージを試料に直接貼りつけることが行われているが、この場合、試料が飽和されていること、平均的な横変位量を測定したいことなどの理由により、図-4のように試料にアルミフォイルを巻きつけその上にひずみゲージを付着させた。ひずみゲージは大変形にも耐えることができるように塑性ひずみゲージ（容量10%、長さ6cm）を使用した。この時、漏水、漏電には十分注意を払い、ミスのないようにした。試料をセットしたときの三軸セル内の様子を写真-1に示す。このようにゲージを貼った凝灰岩試料を拘束圧 10 kg/cm^2 , Back pressure 5 kg/cm^2 , セン断速度 $0.12 \text{ \% / min}$ で非排水せん断試験を行った結果が図-5である。この試料は図-5(b)からわかるようにほとんど線形関係を保ちながらピークまで達し、ただちに残留状態に至るという多段階試験法を適用するにはまことに困難な状況を示した。しかし、一方横ひずみの方を見る（図-5(a)）と、ピーク近傍で曲線がゆるやかになっており、ピークへの接近度を判

定するには、こちらの方が容易であることが判明した。

横ひずみをコントロールの判定に利用する方法はすでに Hudson, Brown & Fairhurst (1971) によって詳細な検討が行われている。彼らは、サーボコントロールによる岩石材料の試験において外荷重の変化に対して最も敏感に反応するところの変位でもマフィードバックを行う必要がある (Optimum displacement control) という考えを打出している。三軸圧縮試験での横ひずみコントロールが上記の提案に相当し、図-5のような結果が得られることは妥当であると考えられる。

3. 多段階三軸試験とその結果

このように横ひずみの変化量に注目しながら凝灰岩の多段階三軸試験を行った。実験条件は圧密非排水せん断

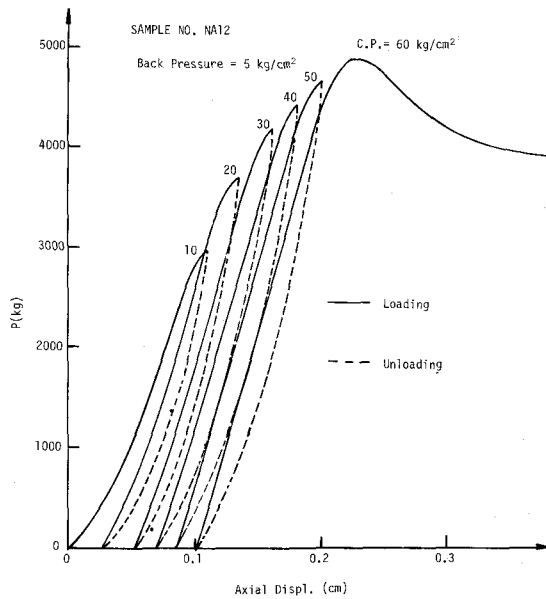


Fig. 6

で、せん断速度 $0.12\%/min$ 、Back Pressure 5 kg/cm^2 である。拘束圧は 10 kg/cm^2 から 60 kg/cm^2 まで 10 kg/cm^2 の増分で増加させ、 60 kg/cm^2 の段階ではピーク強度を越えて残留状態に至らしめた。

実験中の荷重と軸変位の関係を図-6に示す。図-7にはこのときの軸ひずみに対する横ひずみの変化量をプロットしてある（ひずみは圧縮が正、伸びが負と規定している）。両図とも実線部は載荷時、実線部は除荷時のものである。よく知られている通り、圧縮の進行とともに、横方向に伸びが大きくなり、ダイレイタンスの影響が見られる。

体積の変化の様子をさらに詳しく調査するため、微小変位のもとでは体積ひずみ増分 $\Delta V = \Delta \epsilon_a + 2\Delta \epsilon_r$ という式を用い、図-8に示すような軸ひずみに対する体積ひずみの変化量の関係をプロットした。各段階ともせん断の初期段階には試料が圧縮されるが、ピークに至る前に体積は極小値に達し、その後ダイレイタンスに大きく影響され体積は膨張（ピークに至る）という現象を呈す。

この実験は圧密排水試験で間隙水圧変化を測定しているもので、体積変化との対比が可能である。図-9にせん断中の過剰間隙水圧の変化を示す。図-8と対応させて図-9を見ると、体積ひずみ量と過剰間隙水圧は必ずしも1対1の対応を示しているとはいえない。体積ひずみの極大値を示す軸ひずみの値は過剰間隙水圧の極大値の値とほぼ一致しており、また、2段階目以降の極大値がいずれも大して変わ

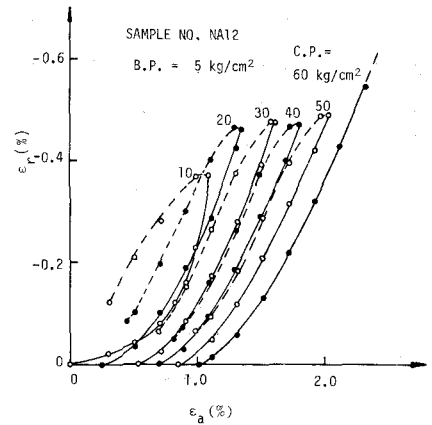


Fig. 7

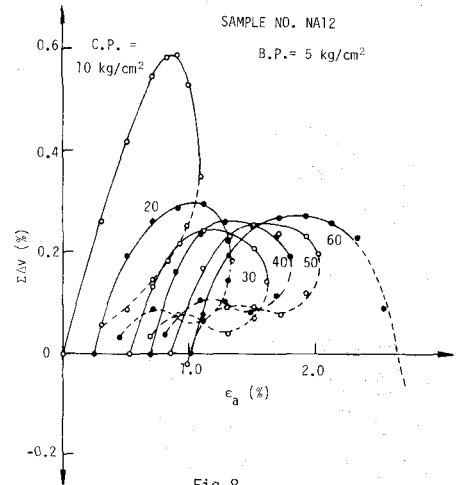


Fig. 8

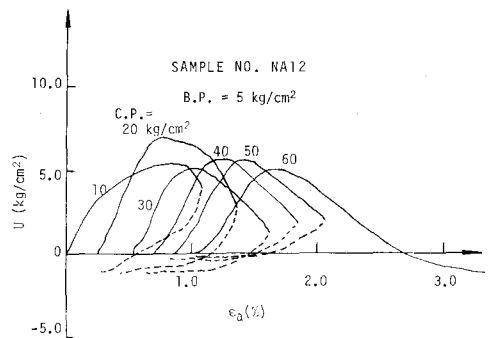


Fig. 9

らないという実も似ているが、拘束圧が10 kg/cm²の時の挙動は非常に異なる。拘束圧10 kg/cm²の時の過剰間げき水圧が大きくなり、理由の一つとして、岩石内に存在する水とは独立した空隙に、せん断時にひび割れが生じて間隙水が流れ込み試料内の圧力が低下するか、不飽和の影響によるものと考えられる。また図-9に見られるように除荷時に間げき水圧がBack pressureより小さい値(過剰間げき水圧が負)になる。これはピークを越えてからのせん断時(60 kg/cm²の拘束圧の時)には過剰間げき水圧が負になることと考え合わせると、せん断中に体積が大きく膨張したことを示しているものと思われる。

図-7を参考にしてせん断中の試料の横方向のひずみ増分と軸方向ひずみ増分の比($-\Delta\epsilon_r/\Delta\epsilon_a$)を図-10のように求めることができる。弾性領域においては $-\Delta\epsilon_r/\Delta\epsilon_a$ はポアソン比として定義されるが、0.5以上にはなり得ない。しかし、図-10で見るとおり、体積ひずみが最大値を示すあたりから $-\Delta\epsilon_r/\Delta\epsilon_a$ は急激に増加し、0.5の値をはるかに超えている。ただし、段階の数が増加するとともに0.5に近い値に接近するが、クラックの影響がどうか理由は不明である。さらに非排水せん断試験でありながら $-\Delta\epsilon_r/\Delta\epsilon_a$ が0.5にならない実も考察を加えなければならぬと考える。

最後に多段階試験(MST)の結果(有効応力経路とピーク値)と通常の三軸試験(SS)の結果の比較を図-11に示す。多段階による破壊包絡線は十分実用的であることは明らかである。図中の矢印は多段階試験によるピーク実での塑性ひずみベクトルである。

謝辞 本研究にさいして、多大の助力をいただいた京都大学工学部 柳谷 俊先生、ならびに実験を精力的に続けた坂本 隆洋君に感謝の意を表します。

参考文献

1. Kovari, K. & Tisa, A. "Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests". *Rock Mechanics* 7, pp. 17~33 (1975)
2. Chang, N. Y. & Jumper, A. L. "Multiple-Stage Triaxial Test On Oil Shale". *19th U.S. Rock Mechanics Symposium*, pp. 520~527 (1978)
3. Chang, N. Y. & Bondurant, E. J. "Oil Shale Strength Characterization Through Multiple Stage Triaxial Tests". *20th U.S. Rock Mechanics Symposium*, pp. 393~401 (1979)
4. 赤井, 大西, 李 "軟岩の多段階三軸試験法とそのデータ処理について". 第24回工機工学シンポジウム論文集 pp. 143~150 (1979)
5. Hudson, J. A., Brown, E. T. & Fairhurst, C. "Optimizing the Control of Rock Failure in Servo-Controlled Laboratory Tests". *Rock Mechanics* 3, pp. 217~224 (1971)

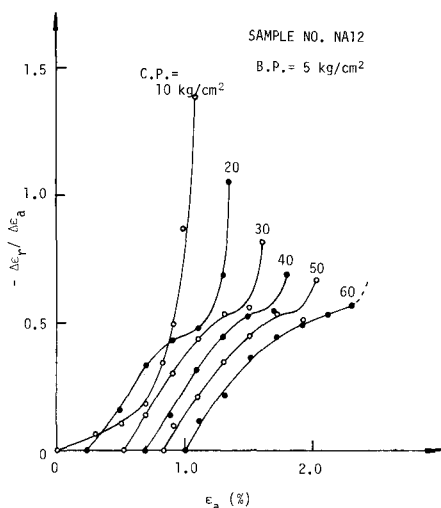


Fig. 10

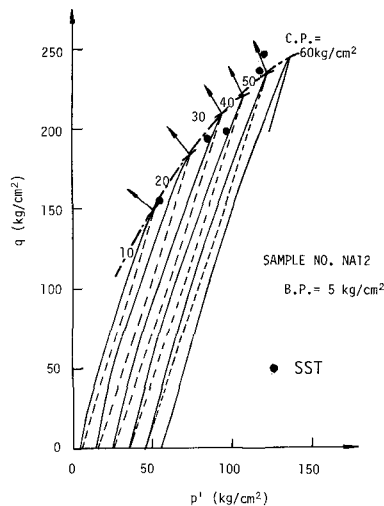


Fig. 11

MECHANICAL BEHAVIOR OF SOFT ROCK IN
MULTIPLE STAGE TRIAXIAL TEST

Koichi AKAI
Yuzo OHNISHI
Der-Ho LEE
(Kyoto University)

Test results on the validity of the multiple stage triaxial test for the determination of strength parameters (peak and residual) of water saturated soft rock are presented. The strength parameters obtained from MST tests were compared with those evaluated by single stage triaxial tests, and it was shown that the MST tests is valid and applicable to saturated soft rocks if the stress path in the triaxial test is adequately chosen.

The saturated rock behaves differently from dry rock in the multiple stage triaxial test. Especially in undrained condition, at each stage consolidation process has to be carried out. Otherwise strength parameters are not obtained because of pore water pressure.

The mechanical behavior of the saturated soft rock in MST test has been investigated in detail. The lateral and axial strains, excess pore water pressure, volumetric strain and poisson's ratio were measured and the influences of these factors on the strength and deformability of rock were analysed.