

## 多段階三軸試験とその飽和軟岩への適用について

MULTIPLE STAGE TRIAXIAL TEST AND ITS APPLICATION  
TO FULLY SATURATED SOFT ROCK

赤井浩一\*・大西有三\*\*・李徳河\*\*\*  
By Koichi AKAI, Yuzo OHNISHI and Der-Ho LEE

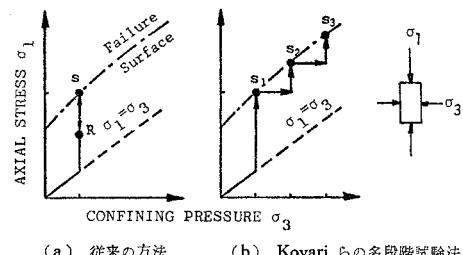
## 1. まえがき

一般に岩質材料の強度を求めるときには岩盤試験を行うが、室内実験では一軸あるいは三軸圧縮試験を実施する。三軸圧縮試験は現場の応力状態に対応して、さまざまな応力下での試験が可能であるため特に用いられるることは周知の事実である。しかし従来の試験方法に従えば、三軸圧縮試験では1本の試料から強度に関するデータが1組（ピーク強度と残留強度）しか得られない。したがって、岩石試料の強度特性を明確にするためにには、数多くの試料を用いて実験を行わざるを得ない。ところが、実際の現場において同一の条件を有する試料を多数採取することは一般に困難であり、トンネルなどの長い地下構造物の場合には位置の変化による岩質の不均質性が強く表われる。このような場合には、実際の結果をある程度ばらつきのある精度の低いものと是認したままで設計定数として利用せざるを得ない。

こうした点を改善するため、Kovari ら<sup>1)</sup>は間隙率の小さい乾燥した硬岩に対して、1本の試料を用いてさまざまな拘束圧のもとで強度を求める方法、いわゆる多段階三軸試験（multiple-stage triaxial test）法を提案した。彼らの提案した方法を従来の三軸試験法（図-1(a) 参照）と対比させて応力径路の形で図-1(b) に示す。すなわち、せん断試験中に試料がある拘束圧のもとで、ピーク強度  $S_1$  に達すると同時にただちに拘束圧を次の段階の値に上昇させ、さらにせん断試験を続行する。そして次のピーク強度  $S_2$  が得られるとさらに拘束圧を変化させる。こうした手順で順次拘束圧を変えながら実験を続けてい

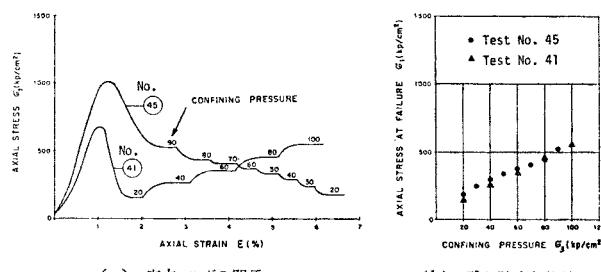
くと1本の試料から数個の強度に関するデータが得られる。Kovari らの結果の一例を図-2 に示す。図-2 は緻密で間隙率の小さい乾いた大理石試料を用いたもので、残留強度が拘束圧のみの関数で表わされることを示している。また別の砂岩試料を対象にした実験では、ピーク強度が応力やひずみ履歴にはほとんど影響されず、拘束圧の関数となることが判明している<sup>1)</sup>。一方、Chang ら<sup>2), 3)</sup>は岩石の中に油を含む油頁岩（oil shale）を用いて多段階三軸試験の妥当性を検討し、その有効性を認めている。そして試験を失敗なく行うには、剛性試験機の使用、注意深い荷重-変位曲線の観察と敏感な判断が要求されると結論づけている。

上記の研究は、すべて一軸圧縮強度が数百 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の硬岩を対象としたもので、数十 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の



(a) 従来の方法 (b) Kovari らの多段階試験法

図-1 三軸試験の応力径路

図-2 大理石を用いた多段階三軸試験（主として残留強度を求める場合、Kovari ら<sup>1)</sup>による）

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科

\*\* 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学科

\*\*\* 学生会員 工修 京都大学大学院博士課程

軟岩、それも水で飽和したものについては、多段階三軸試験の方法ならびにその適用性について検討が行われていない現状である。そこで本論文では、飽和した堆積軟岩の強度や変形に関する力学挙動、試験中の間隙水圧の変化、応力経路、荷重の制御条件などについて詳細な検討を行った後、従来の多段階三軸試験法を修正した飽和軟岩用の試験法を提案し、さらに岩石中に存在する弱面の影響を調べる実験に対してもその適用例を示した。

## 2. 飽和軟岩の多段階三軸試験法

### (1) 剛性試験機

一般に岩石をせん断するとピークに達した後徐々に強度が低下する、いわゆるひずみ軟化現象を示す。剛性試験機はこのピーク後の岩石の挙動を調査するために考案されたものであり、現在では頻繁に使用されている。

剛性試験機とは、一言でいえば試験機の剛性が試験材料の剛性より大きいものであり、剛性試験機であるか否かは相対的に決まる。図-3は剛性の低い試験機( $K_1$ )、岩石、そして剛性の高い試験機( $K_2$ )の挙動を示したものである<sup>4)</sup>。岩石の荷重-変位曲線がピークを過ぎて、その傾きが $K_1$ に等しくなる付近の拡大図は図-3に示されている。微小変位 $\Delta u$ をさらに与えたときの岩石試料の挙動は試験機の剛性によって支配されることはエネルギーのバランスを考えると明らかであるが、その詳細は文献4)に説明がある。

現在用いられている剛性試験機としては機械的に載荷枠の剛性を高めたもの<sup>5)</sup>と油圧サーボを利用したものがある。電気油圧サーボ制御による試験機は試料の状態変化に対応する応答時間がきわめて短いという利点を利用したもので、制御系を軸ひずみ、横ひずみ、荷重等任意に設定できるので非常に応用範囲が広い<sup>6)</sup>。

Changら<sup>2)</sup>が多段階三軸試験で剛性試験機の使用を勧めているのはピーク強度の付近で試料が突然破壊してしまい、以後の試験が不可能になることを危惧したためである。本研究では種々の観点から検討を重ね、電気油圧サーボ式の試験機を採用し実験を行った。

### (2) 試験の手順

表-1ならびに表-2に示されている物理諸量を有する第三紀鮮新世の砂質シルト岩(一軸圧縮強度30 kgf/cm<sup>2</sup>程度)と凝灰岩(別名日光石、一軸圧縮強度100 kgf/cm<sup>2</sup>程度)を試料として一連の実験を実施した。まず、Kovariらの手法に従って行った実験の一例をあげるが、この場合の全応力経路は図-4のものを採用した。実験では、back pressure=3 kgf/cm<sup>2</sup>を用い、拘束

表-1 砂質シルト岩の物理諸量

Dry Density	$\gamma_d = 1.14 \text{ Mg/m}^3$
Wet Density	$\gamma_t = 1.68 \text{ Mg/m}^3$
Void Ratio	$e = 1.19$
Porosity	$n = 54.4\%$
Degree of Saturation	$S_r = 100.0\%$
Water Content	$w = 48.0\%$
Specific Gravity	$G_s = 2.485$
P-Wave Velocity	$V_p = 1.70 \text{ km/s}$
S-Wave Velocity	$V_s = 0.51 \text{ km/s}$
Poisson Ratio	$\nu = 0.35$

表-2 日光石の物理諸量

Dry Density	$\gamma_d = 1.914 \text{ Mg/m}^3$
Wet Density	$\gamma_t = 2.234 \text{ Mg/m}^3$
Void Ratio	$e = 0.548$
Porosity	$n = 35.4\%$
Water Content	$w = 16.70\%$
Specific Gravity	$G_s = 2.805$

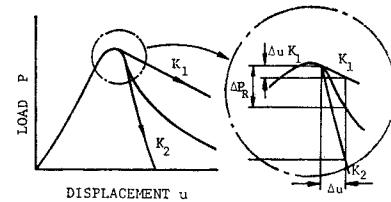


図-3 試験機の剛性と岩石の応力-ひずみ関係<sup>4)</sup>

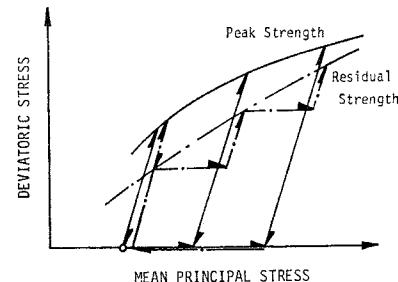


図-4 多段階試験の応力経路

圧10 kgf/cm<sup>2</sup>のもので試料(No. 7)を圧密する。圧密終了後、せん断速度0.12%/minで非排水せん断を行う。ピーク強度の直前に荷重を除荷して拘束圧のみの段階に戻し、拘束圧を20 kgf/cm<sup>2</sup>に増加したのち圧密を行わないでただちにせん断を続行する。同様の操作で順次拘束圧を増加させ所定の値を得た後、拘束圧を10 kgf/cm<sup>2</sup>に戻して試料を破壊する。残留状態に至った後、拘束圧を同様に順次増加させ、それぞれの圧力のもとでの試料の残留強度を測定する。この場合の結果を図-5に示す。

図-5の結果から、上記の試験方法では拘束圧を変化させても意味のある強度変化はほとんど測定されないことがわかる。このことは図-6の試験中の間隙水圧変化の測定結果から、土質試験における非圧密非排水(UU)

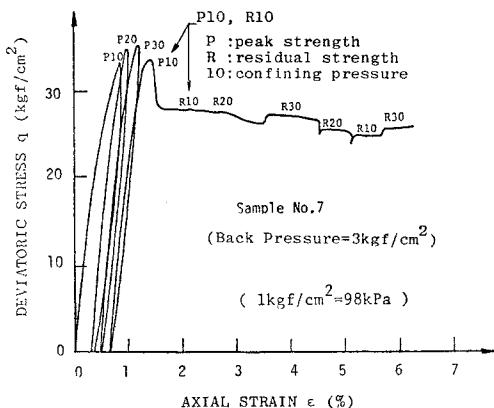


図-5 図-4 の応力経路に従った多段階三軸試験結果

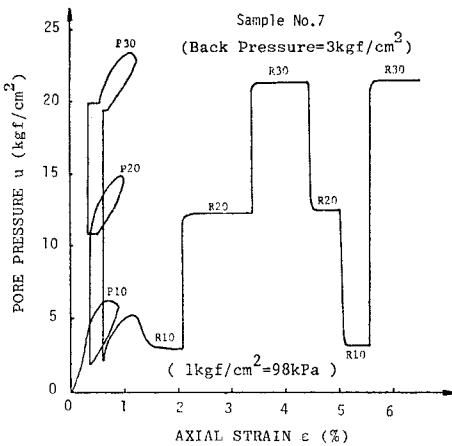


図-6 図-5 の結果に対応する間隙水圧曲線

試験と同じ状態であると推定できることから十分予測されることである。したがって、Kovari らが提案した多段階三軸試験の手順は、そのままでは飽和した軟岩の試験に適用できない。Kovari ら<sup>1)</sup>は多段階三軸試験の研究をさらに進展させ、破壊曲面を連続的に求めるひずみ制御試験(strain controlled triaxial test)を提案しているが、この手法も飽和軟岩へそのまま適用することは不可能である。そこで、実験を重ねた結果、飽和した軟岩を用いる場合の多段階三軸試験法では次の3つの条件を満たした状態で実験すると、十分信頼し得るデータが得られることが明らかになった。

- ① 非排水せん断試験を行いう場合、各段階において拘束圧を変化させた後、必ず試料を圧密しなければならない(土質試験の  $c_u/p$  の値を求める場合の圧密非排水試験の操作と同じである)。
- ② 試料をせん断するとき微小クラックの過大な発生を防止するために、ピーク強度を求める段階ではピークに至る直前に荷重を下げ、次の段階へ移る。残留強度に関しても所定の値を得た後、毎回除荷して

次の段階へ移る。高拘束圧時には試料の応力-ひずみ関係はひずみ硬化型となり、単純にピーク強度を判定するのが困難になる。このような場合にはなんらかの対策(たとえば試験の回数は少なくなるが、ひずみ増分に対する応力増分がほとんど零になるまでせん断してから除荷する)が必要となろう。

- ③ 同じ種類の試験段階、たとえばピーク強度を求める段階では、拘束圧を順次低い方から高い方へ上げるのが望ましい。

以上の3つの基本条件の中で、最も不明確なものは②である。残留強度を測定する段階では問題ないが、ピーク強度を求めるとき、荷重のピーク点の直前で除荷することに対する定まった規則というものは存在しない。実際問題としてどこがピーク点かを事前に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だうえで判断する以外に方法はない。ここにChang ら<sup>2)</sup>のいう剛性試験機の使用と注意深い観察ならびに敏感な判断が要求される理由がある。すなわち、岩石試料のせん断に伴って微小クラックが発生するが、ピーク点を過ぎると急激にクラックの発生率が高まり、ひずみ軟化現象を起こして破壊に至る。剛性試験機は載荷フレームに蓄積されるエネルギーを極小化し、この微小クラックの発生割合を最小限に抑えるものであり、ピーク点付近で荷重-変位曲線をみながら敏感な除荷の判断が求められるのは当然であろう。この方法に加えて、軸変位-間隙水圧曲線を注視すれば、間隙水圧の極値が荷重のピーク点より一般に早い段階で現われることから、荷重のピークが近いことの予想が立てられる。これに対して、試料の軸方向の荷重変化に対して横方向の変形が最も敏感に反応する<sup>3)</sup>という実験事実を利用して、横方向のひずみあるいは変形を測定し、荷重のピーク点を判定しようとする試み

も行われている<sup>4)</sup>が、装置が複雑になる欠点を有する。

- 上記の3つの基本条件をふまえて、さまざまな検討を行った結果、図-7(a), (b)に示すような全応力経路に沿って多段階三軸試験(MST)を実施するのが最も適当であるとの結論に達した。図-7(a)はピーク強度を求める段階終

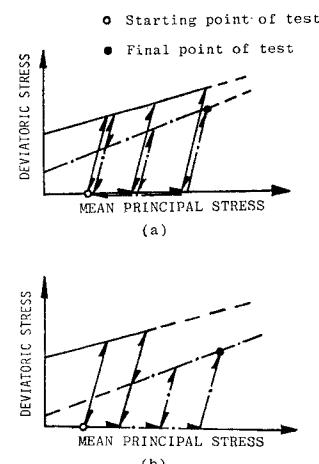


図-7 軟岩に適用可能なMST法の全応力経路

了後、もう一度拘束圧を最小値まで下げ、残留強度シリーズの試験を行うものであるが、図-7 (b) では所定のピーク強度値が得られた時点で破壊し、残留状態に試料を到達させた後、さらに拘束圧を増加させながら残留強度を求める。

### (3) 従来の三軸試験法による結果との比較

2.(2) で記述した 3 つの基本条件に従って、図-7 (a), (b) に示す全応力経路に沿って砂質シルト岩の多段階三軸試験を行った結果を 図-8 と 図-9 に示す。図-8 は応力とひずみの関係で、図の (a), (b) が図-7 の (a), (b) にそれぞれ対応する。図-9 はそれらの試験中の間隙水圧でいずれも妥当な値を示しており、多段階試験の有効性が認められる。一方、凝灰岩(日光石)については、back pressure=5 kgf/cm<sup>2</sup> の状態に飽和したものと図-7 (b) の全応力経路に従って多段階試

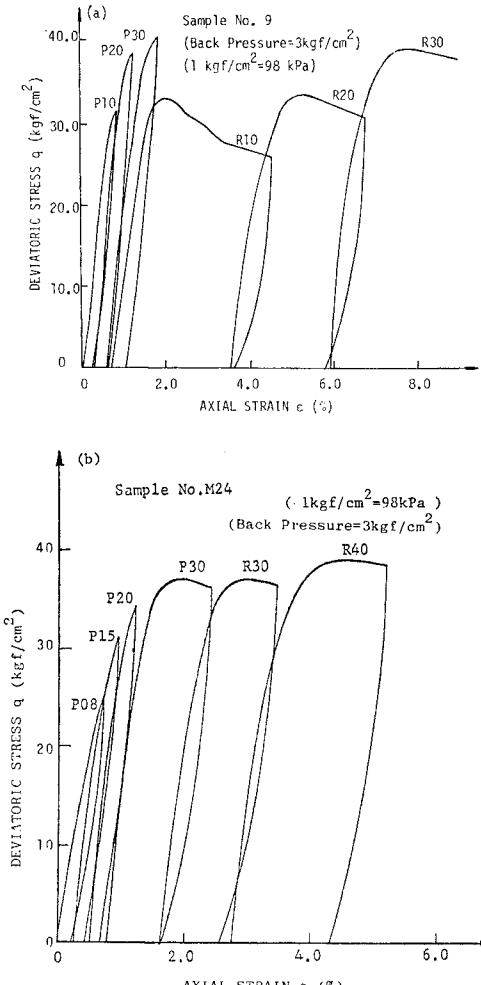


図-8 砂質シルト岩の多段階三軸試験結果  
(応力-ひずみ関係)

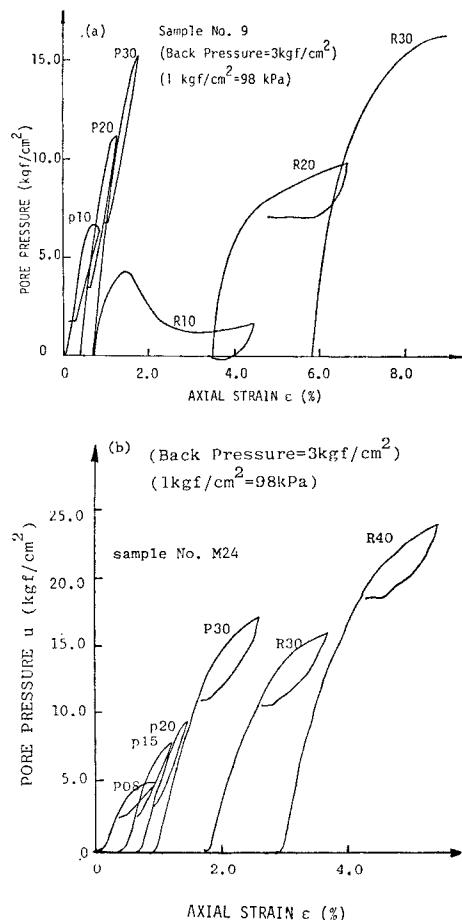


図-9 砂質シルト岩の多段階三軸試験中の間隙水圧変化

験した結果を 図-10 (a), (b) に示す。ピーク強度、残留強度とも妥当な値が得られており、上記の手法に基づく多段階三軸試験は飽和した軟岩に対して十分適用可能であることが明らかにされた。

次に多段階試験(MST)法による結果を従来からの一段階三軸試験(SST)法によるものと比較し、その代用性、再現性について検討を行う。図-11 は従来の三軸試験法により種々の拘束圧でせん断をしたときの砂質シルト岩の応力-ひずみ関係で、図-12 はそれに対応する間隙水圧の変化を示したものである。これらの図を図-9 と比べてみれば外観が異なるように見えるが、同じ拘束圧の状態で SST 法と MST 法の両者により得られた間隙水圧と強度がほとんど同じ値を示していることがわかる。両者の似ている点は有効応力経路からも観察される。図-13 は 6 個の試料による SST 法で求めた砂質シルト岩の有効応力経路を示したものであり、一方図-14 は MST 法で求めた 1 本の試料 (No. M 24) の結果である。いずれも 20 kgf/cm<sup>2</sup> 以下の拘束圧では有効応力経路は右に曲がる、すなわち試料の体積がせん断

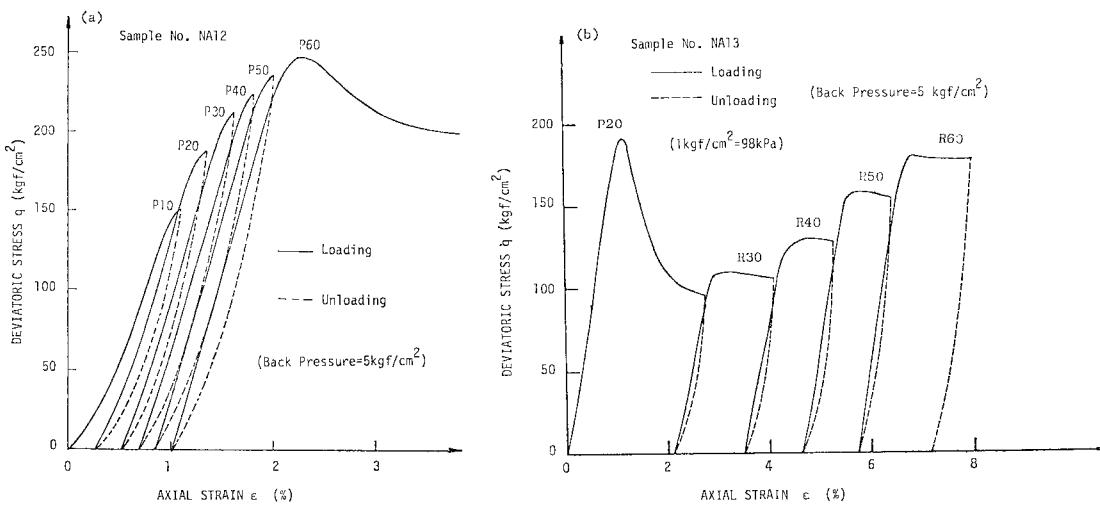


図-10 日光石の多段階試験結果

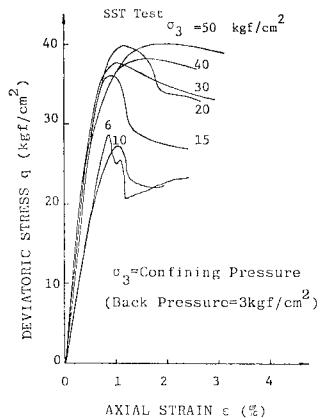


図-11 SST 法による砂質シルト岩の三軸試験結果

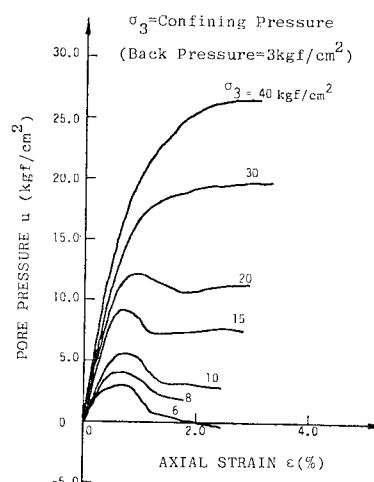


図-12 SST 法による砂質シルト岩の間隙水圧挙動

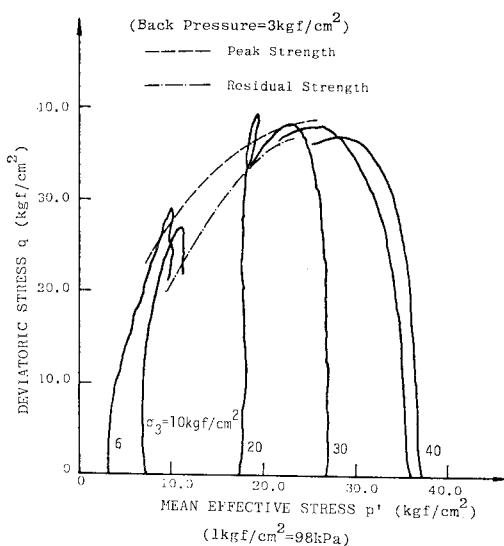


図-13 砂質シルト岩の有効応力経路 (SST 法)

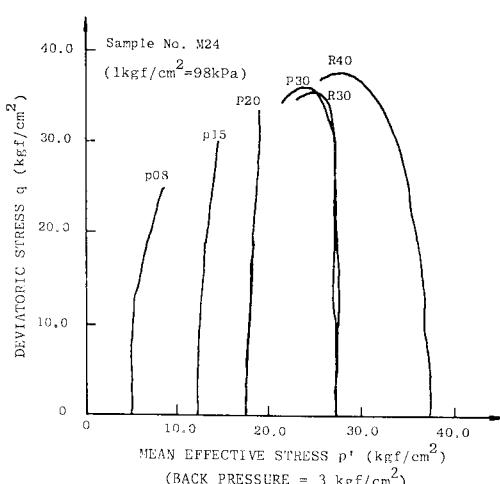


図-14 砂質シルト岩の有効応力経路 (MST 法)

中に増加している。これに対し  $30 \text{ kgf/cm}^2$  以上の拘束圧では有効応力経路は左に曲がり、体積がせん断中に減少している。また、強度については、その比較の結果を図-15～18 に示す。図-15 と 図-16 は砂質シルト岩のピーク強度包絡線と残留強度包絡線を  $p'-q$  平面 ( $p'$ : 平均有効主応力,  $q$ : 軸差応力) で表わしたものである。この場合、SST 法と MST 法の両者に残留強度ではほとんど差がないが、ピーク強度では多少 SST 法による結果が大きい。これは MST 法ではピークの直前に除荷することによる影響と考えられるが、実用的には問題はないと思われる。一方、飽和した日光石試料を用いた

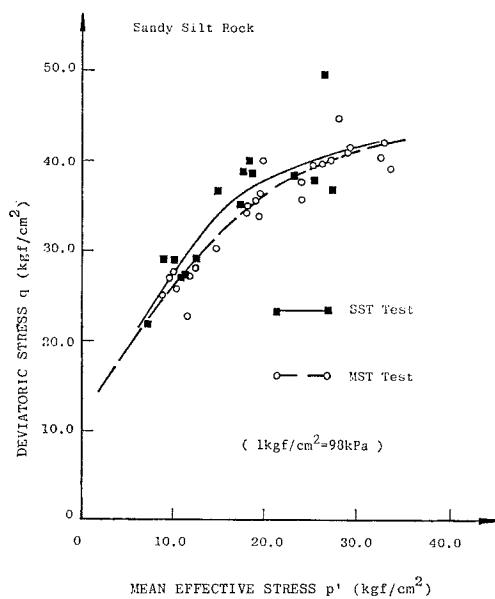


図-15 砂質シルト岩のピーク強度包絡線

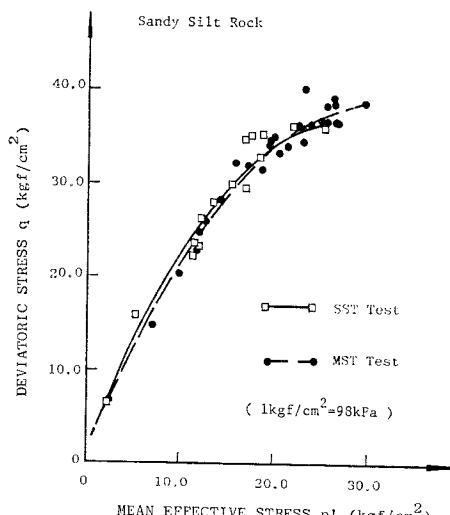


図-16 砂質シルト岩の残留強度包絡線

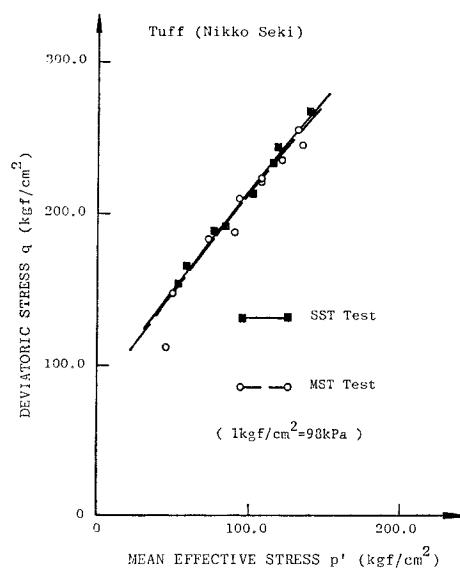


図-17 日光石のピーク強度包絡線

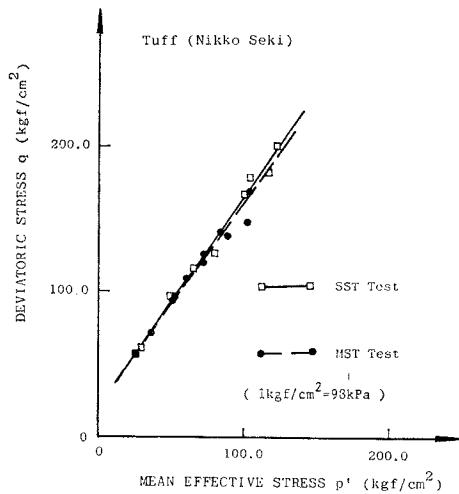


図-18 日光石の残留強度包絡線

実験では 図-17, 18 に示すようにピーク強度、残留強度とも MST 法と SST 法の間に意味のある差異は認められなかった。

以上の結果、2.(2) で述べた 3 つの基本条件を満たす多段階三軸試験法は、従来の三軸試験法の代わりとして、数少ない試料で軟岩の力学挙動、特に強度特性を求めるのに適した方法であると結論づけられる。

### 3. 多段階三軸試験の適用

#### (1) 弱面を有する砂質シルト岩の強度特性

不連続性岩盤の安定や変形問題を解析するには、岩盤

を不連続面を含んだ1つの媒体として強度や変形係数を岩石のものから修正して計算するか、不連続面を個々に取り出してその特性を計算に導入するかのどちらかの方法がとられる。いずれの場合も解析には物性値が必要であるが、人工的に作った弱面を有する岩石試料の三軸実験が岩石の摩擦抵抗を求めるため、または不連続面を含む岩盤としての挙動を検討するためによく実施される。

弱面を有する試料の三軸試験を最初に行ったのは、Jaeger<sup>9)</sup>であり、その後数多くの研究者によりこれが採用されて実験結果が発表されている<sup>10)</sup>。この試験のおもな利点は、任意の拘束圧のもとでの力学特性が求められること、軸に対する弱面の角度を変えることにより摩擦抵抗のみならず岩石に対する弱面の影響の度合を調べることができることなどであるが、試験片の端面摩擦による拘束をなくさなければならないことと、メンブレンの効果や試験片の回転による影響を少なくするには、軸変位があまり大きくならないように試験を行う必要があるなどの欠点もある。

本研究では、人工の弱面が軸に対していろいろな角度で存在するとき、弱面が岩石試料の強度にどのような影響を及ぼすかを検討するために、表-1の砂質シルト岩に対して前述の多段階三軸試験法を採用した。この場合のおもな試験パラメーターは試料の弱面の傾斜角度 $\alpha$ と拘束圧である。三軸室内にセットされた試料の状態を図-19に示す。弱面はダイヤモンド鋸で試料を切断して作製した。実験で用いた角度は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ であり、多段階三軸試験における全応力経路は図-20(a), (b)に示す2通りとした。図-20(a)の応力経路の試験(仮にA試験とする)は、いろいろな角度の人工弱面が設けられている試料の拘束圧を変化させた場合、そのピーク強度がどのような影響を受けるかを調べるのが主目的であり、一方、図-20(b)の応力経路の試験(B試験)

は、低拘束圧で試料がせん断された後の残留強度に及ぼす拘束圧の影響を調査するためのものである。

弱面の角度 $\alpha$ が $0^\circ$ と $90^\circ$ の場合、それらの応力-ひずみ関係を示す曲線の形状にほとんど差はなく、また図-8の完全岩石(intact rock)試料とも顕著な差異は認められず、ピーク強度もほぼ同じ値

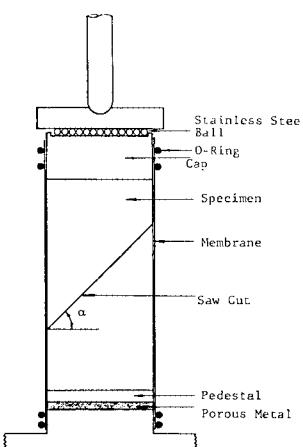


図-19 弱面のある試料の  
セット状況

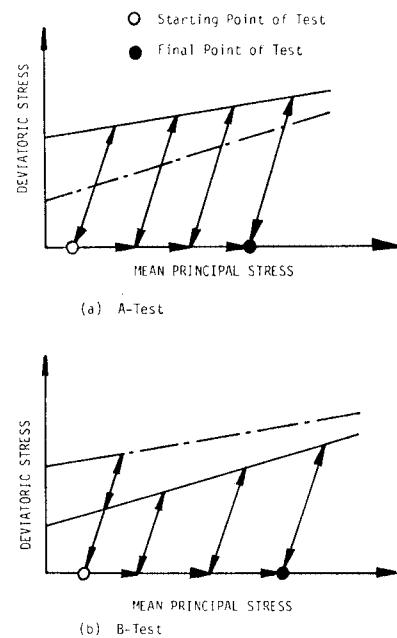


図-20 弱面のある試料に対する多段階三軸試験の応力経路

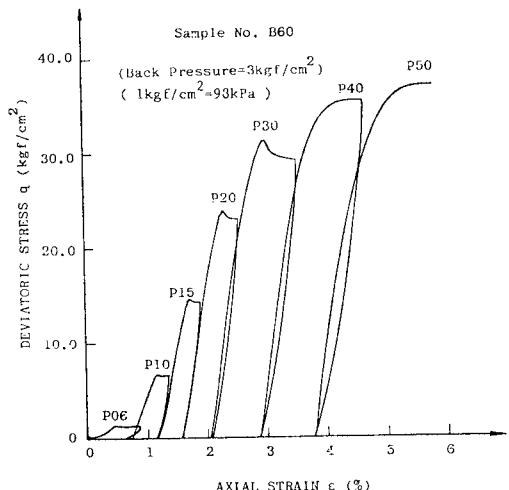
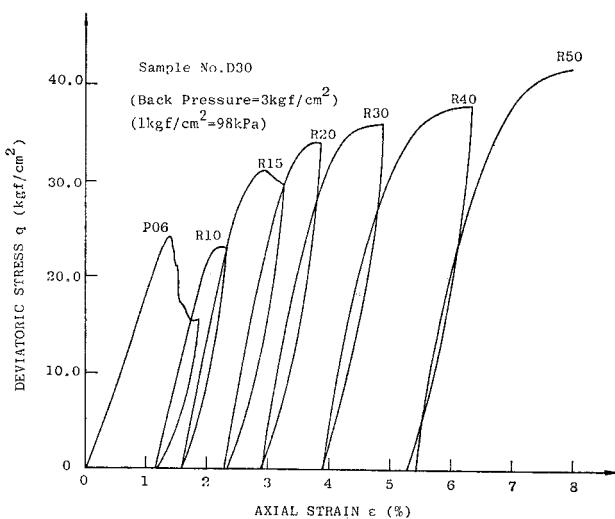


図-21 弱面のある試料の多段階三軸試験結果 ( $\alpha=60^\circ$ )

を示した。一方、 $\alpha=60^\circ$ の場合にはまったく異なる様相を呈し、図-21に示すようになる。拘束圧 $30\text{ kgf}/\text{cm}^2$ までの各段階においては、ピーク強度に到達した後試料は弱面に沿って滑動を始め、残留状態におちつく。そして拘束圧が $40\text{ kgf}/\text{cm}^2$ を超えると、滑動現象は起こらず、弱面のない岩石と同じ挙動を示す。すなわち、これは高拘束圧が作用する状態では弱面の影響が消えてしまうことを端的に表わしている。

図-22はB試験の一例である。弱面の角度 $\alpha=30^\circ$ の試料をせん断破壊に至らしめ、せん断破壊面が完全に

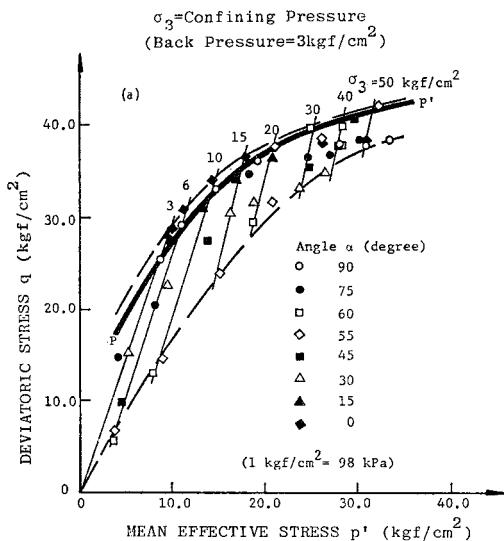
図-22 弱面のある試料の多段階三軸試験結果 ( $\alpha=30^\circ$ )

生じた段階で拘束圧を徐々に上昇させて残留強度の変化を求めたものである。ところが  $\alpha=45^\circ, 55^\circ, 60^\circ$  の場合には、低拘束圧の状態では試料がただちに人工弱面に沿って滑動し、せん断によって破壊面を作ることはできなかった。したがって、残留強度はある程度の相対すべりが起こった後の値として取り扱った(図-21のP06からP30の段階参照)。

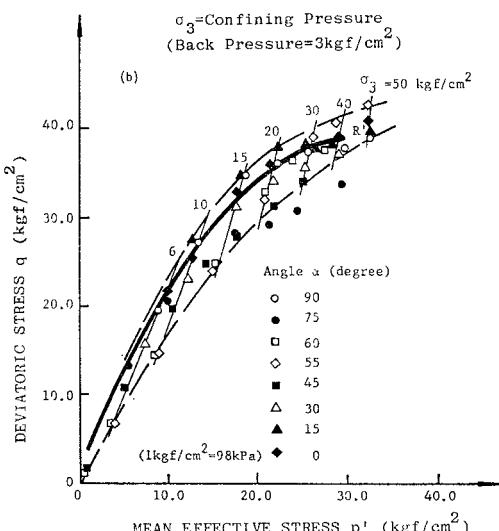
A, B両試験シリーズの実験結果を  $q-p'$  平面上に示すと、ピーク強度は図-23(a)、残留強度は図-23(b)のようになる。図中の太い実線は弱面のない試料の強度をMST法で求めたもので、 $\alpha=0^\circ$  あるいは  $90^\circ$  の破壊包絡線とほぼ一致している。換言すれば、 $\alpha=0^\circ$  ある

いは  $90^\circ$  の場合、弱面の存在は試料の強度に影響を与えないということになる。

図中の細い実線は拘束圧の等しい点を連ねたもので角度  $\alpha$  の相違が強度に及ぼす影響を表わしている。これをさらに的確に示すのが、図-24(a), (b)である。図から低拘束圧の段階では弱面の存在、それも弱面の角度が強度に及ぼす影響がよくわかる。 $\alpha=60^\circ$  付近の角度で強度が最低になることはすでに実験事実としてよく知られており<sup>11)</sup>、この点でも多段階試験法による結果が妥当なことが確かめられた。残留強度が弱面の存在により影響を受けるのは、表面の粗さ (surface roughness) によるものと考えられる。 $\alpha=60^\circ$  近辺の角度で弱面を作った場合、せん断時にはこの弱面に沿って上下の固体片が滑動することはすでに述べた。この滑動面はもともと鋸で切断されたものであり、自然にせん断破壊してきたものとは明らかに異なる。せん断破壊させた試料の表面はかなりの凹凸があり、その凹凸がすべてせん断で摩滅すると滑らかな表面になる。それには非常に長いせん断距離が必要であり<sup>12)</sup>、これを調べるのは三軸装置では不可能ではないかと考えられる。この表面の凹凸の存在が強度に及ぼす影響は拘束圧の効果と強く関連する。拘束圧が変化すると表面のかみ合せの程度が変化し、せん断に対する抵抗力が影響を受けることになる。これが図-24(b)に強度の変動として表わされているものと推定される。弱面の角度が残留強度に与える影響については述べていないが人工の鋸切断面上のすべりとせん断破壊面上のすべりの相違について、同様な結果を Einstein ら<sup>13), 14)</sup>が報告している。



(a) 弱面のある試料のピーク強度包絡線



(b) 弱面のある試料の残留強度包絡線

図-23 強度包絡線

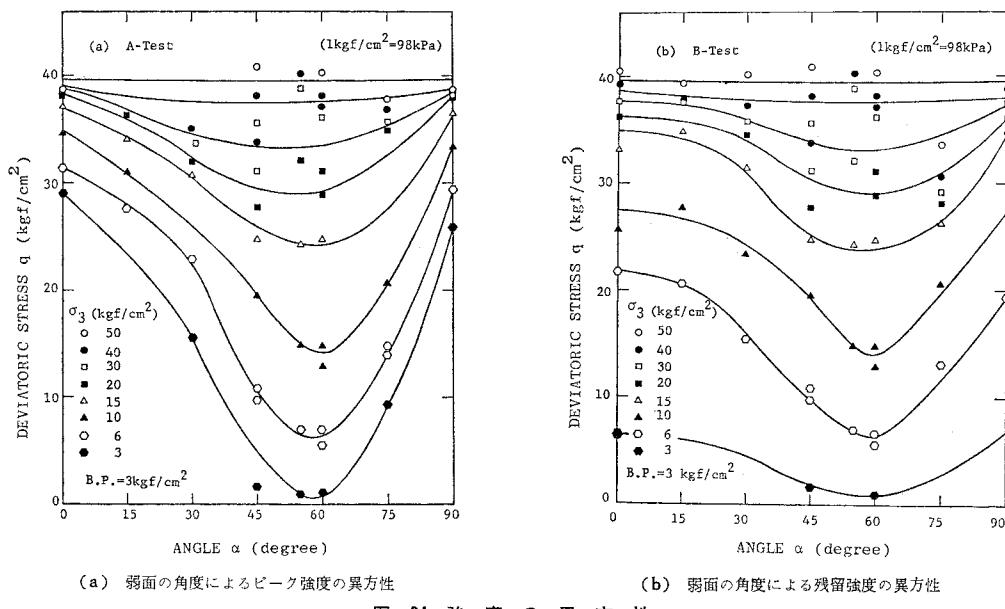


図-24 強度の異方性

以上で明らかになった弱面を有する試料の強度を、三次元的に  $\alpha$ - $p'$ - $q$  空間に模式図で表現すると図-25 のようになる。さきの図-23 と図-24 は、これをそれぞれ  $\alpha$ =一定、 $p'$ =一定の面へ投影した図である。図-25 から、異なる拘束圧の平面が互いに平行に並んでおり、弱面角度の影響が谷となって表現され、拘束圧の増加とともに弱面の効果が薄れることがわかる。

## (2) 軟岩の力学挙動

軟岩の強度特性を調べるために、多段階三軸試験法は有効な手段であり、実用的にも注目に値することはすでに述べた。そこで、ここでは多段階三軸試験中の試料がどのような応力経路をたどり、破壊に至っているか、その力学挙動を含水比 ( $w$ )-軸差応力 ( $q$ )-平均有効主応力 ( $p'$ ) からなる 3 次元空間を利用して検討する。図-26 は砂質シルト岩の多段階試験の応力経路を示したもので、図中の曲線 PP' は各段階のピーク強度を連ねたもの、RR' は残留強度包絡線である。これらの曲線を  $w$ - $p'$  面に投影したものがそれぞれ  $P_1P'_1$ ,  $R_1R'_1$  である。この平面ではせん断応力がないので、多段階試験の各段階のせん断開始点は図中の SS' 曲線となる。試料は各段階で継続してせん断されているが、ピーク強度の直前で除荷されているため微小クラックの大量発生は抑止されており、試料自体の構造がそれほど乱されているとは考えられない。したがって SS' 曲線は“過圧密”状態にある岩の 1 つの膨潤曲線であると考えてよい。また、拘束圧が 20 kgf/cm<sup>2</sup> 以下ではピークに至るまでに試料は膨張し、30 kgf/cm<sup>2</sup> 以上では圧縮に転じている。した

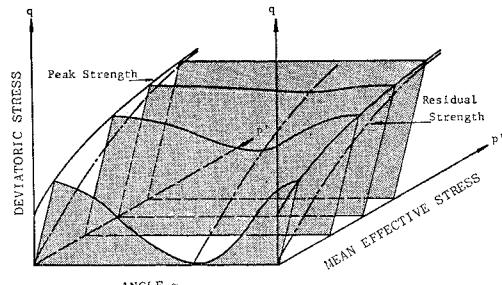
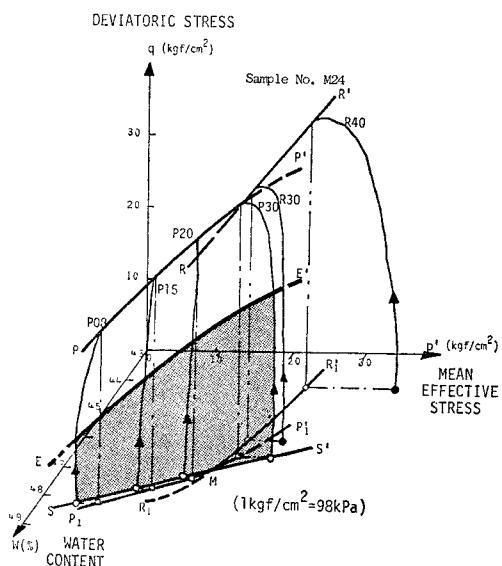


図-25 弱面の強度異方性への影響

図-26  $p'$ - $q$ - $w$  3次元空間における砂質シルト岩の応力経路

がって、 $SS'$ ,  $P_iP'_i$ ,  $R_iR'_i$  の 3 つの曲線が互いに交差する点 (M 点) は、せん断中に体積変化のない限界間隙比の状態とよぶことができる。

せん断時に試料が弾性状態から塑性状態に変化する点を求めるには、図-26 の  $SS'$  曲線に始まる各応力径路のうち、垂直に立ち上がっている部分が曲がり始める点を定めればよい。図中では  $EE'$  曲線としてそれが表わされているが、 $EE'$  と  $SS'$  の両線で囲まれる部分はいわゆる弾性壁面 (elastic wall) とよばれるものであり、 $EE'$  はこれが状態曲面と交差する線である。そして、せん断がさらに続行され弾性限界を超えると、応力径路は状態曲面上を通り、破壊後は限界状態に至る。日光石を用いた実験でもほぼ同じ傾向を示す結果が得られているが、図が重複するので省略する。こうした実験結果を検討すると、1 本の試料を用いた多段階三軸試験により、多数の試料を用いた従来の三軸試験の結果とほぼ同等の結果を得ることができるものと考えられる。

#### 4. 結 論

拘束圧を変化させながら 1 本の供試体から一連の強度定数を得ようとする多段階三軸試験は、試料の数が少なくてすむので岩盤の特性を求めるようとするときには非常に有効である。しかし、水で飽和した軟岩に対しては、特別な応力径路により多段階試験を行う必要があると考えられていた。本研究は、飽和軟岩に対する多段階三軸試験の手法を確立し、実際に得られた結果から軟岩の力学挙動を調べる方法を検討したものである。得られた知見のおもなものをあげると次のようになる。

(1) Kovari らが提案した乾燥した硬岩に対する多段階三軸試験法をそのまま用いて、飽和した軟岩の試験を行うことはできない。飽和軟岩の多段階三軸試験では、本文中に示した 3 つの基本条件を満足する方法を探用しなければならない。

(2) その基本条件とは、簡単には、① 各段階においてせん断前に圧密し、過剰間隙水圧を零にすること、② ピーク強度の直前に速やかに除荷すること、③ 拘束圧を低い方から高い方へ移行させることである。この条件に沿って多段階三軸圧縮試験を実施した結果、ピーク強度ならびに残留強度に関して、従来の三軸試験によるものとほとんど変わらない結果を得た。したがって、飽和した軟岩をここに提案する多段階三軸試験法により試験し、その強度を求ることは、実用的にも十分価値があるものと認められた。

(3) 多段階三軸試験の適用例として、弱面を有する

砂質シルト岩の強度特性を求めた。弱面を有する岩の試料はピーク強度、残留強度とも強度異方性を呈し、この特性は拘束圧の増加とともに顕著でなくなることが判明した。

(4) 砂質シルト岩および凝灰岩 (日光石) を用いた実験では、この多段階三軸試験により破壊に至るまでの力学挙動をも検討できる可能性があるという結論が得られた。

#### 参 考 文 献

- 1) Kovari, K. and A. Tisa : Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests, Rock Mechanics, Vol. 7, No. 1, pp. 17~33, 1975.
- 2) Chang, N.Y. and A.L. Jumper : Multiple Stage Triaxial Test on Oil Shale, 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 520~527, 1978.
- 3) Chang, N.Y. and E.J. Bondurant : Oil Shale Strength Characterization Through Multiple Stage Triaxial Tests, 20th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 393~401, 1979.
- 4) Jaeger, J.C. and N.G.W. Cook : Fundamentals of Rock Mechanics, Third Edition, Chapman and Hall, pp. 177~183, 1979.
- 5) Kim, M.M. and H.-Y. Ko : Multistage Triaxial Testing of Rocks, Geotechnical Testing Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 98~105, 1979.
- 6) Hudson, J.A., S.L. Crouch and C. Fairhurst : Soft, Stiff and Servo Controlled Testing Machines, A Review with Reference to Rock Failure, Dept. of Civil and Mineral Engineering, Univ. of Minnesota, 1971.
- 7) Hudson, J.A., E.T. Brown and C. Fairhurst : Optimizing the Control of Rock Failure in Servo-Controlled Laboratory Tests, Rock Mechanics, Vol. 3, pp. 217~224, 1971.
- 8) 赤井浩一・大西有三・李 德河 : 多段階三軸試験での軟岩の力学挙動に関する考察, 第 13 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 76~80, 1980.
- 9) Jaeger, J.C. : The Frictional Properties of Joints in Rock, Geofisica Pura e Applicata, Vol. 43, pp. 148~158, 1959.
- 10) Goodman, R.E. : Methods of Geological Engineering, West Pub. Co., pp. 130~133 (赤井浩一ほか訳「不連続性岩盤の地質工学」森北出版), 1976.
- 11) 前出 4), pp. 106~108.
- 12) Barton, N. and H. Hansteen : Very Large Span Openings at Shallow Depth : Deformation Magnitudes from Jointed Models and F.E. Analysis, RETC, Atlanta, 1979.
- 13) Einstein, H.H., R.A. Nelson, R.W. Bruhn and R.C. Hirschfeld : Model Studies of Jointed-Rock Behavior, 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics, AIME, pp. 83~103, 1970.
- 14) Einstein, H.H. and R.C. Hirschfeld : Model Studies on Mechanics of Jointed Rock, Journal of SMFE, ASCE, SM 3, pp. 229~248, March, 1973.

(1980.5.22・受付)