

# 多段階载荷の三軸圧縮試験のモデル化と その適用性の検討

木村 誠<sup>1</sup> ・ 谷 和夫<sup>2</sup> ・ 岡田哲実<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

<sup>2</sup> Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

<sup>3</sup> 正会員 工修 (財)電力中央研究所 地圏環境部 (〒270-1194 我孫子市我孫子 1646)

岩石の単段階载荷の三軸圧縮試験(Single-step loading triaxial compression test:以下 SL-TCT)では、せん断強度定数を得るために複数の供試体が必要である。これに対して、多段階载荷の三軸圧縮試験(Multiple-step loading triaxial compression test:以下 ML-TCT)は、1本の供試体で複数の拘束圧に対するせん断強さが得られるので時間的にも経済的にも有利である。しかし、軸圧縮(せん断)を繰り返すことによって供試体に損傷が蓄積して発揮されるせん断強さが低下するメカニズムが明らかではないため、SL-TCT の代替方法としての地位が確立されてはいない。そこで、ML-TCT をシミュレーションすることが可能な多段階载荷損傷モデル(Multiple-step loading damage model)を作成し、ML-TCT において軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数と順序について検討した。

**Key Words** : triaxial compression test, rock, shear strength, strain

## 1. はじめに

岩石のせん断強度特性を評価するために行われている室内試験は、通常、1本の供試体に対して1つの拘束圧を作用させて軸圧縮(せん断)を1回だけ行う単段階载荷の三軸圧縮試験(Single-step loading triaxial compression test:以下 SL-TCTと称す)である<sup>1)</sup>。地盤材料のせん断強さは拘束圧に強く依存するため、ある試料のせん断強度特性を把握するためには複数の供試体に対してそれぞれ異なる拘束圧を設定してSL-TCT を何回も行う必要がある。ところが実際には、調査対象の岩石を代表する同じような性質の供試体を、設定する拘束圧の数だけ採取することが困難な場合がある。このような問題に対処するため、1本の供試体に対して複数の拘束圧を設定し、各拘束圧の下で軸圧縮

(せん断)を行ってせん断強さを求める多段階载荷の三軸圧縮試験(Multiple-step loading triaxial compression test:以下 ML-TCTと称す)が Kovari & Tisa(1975)によって提案された<sup>2)</sup>。

表-1 は、この ML-TCT と一般に行われている SL-TCT を比較したものである。ML-TCT は、必要な供試体の本数が少なく、場合によっては、たった1本の供試体からせん断強度特性を評価することも可能である。そのため、試料の不均質性(供試体同士の相違)や供試体の設置の相違によるデータのばらつきを避けることができるという利点がある。しかし、以下に示すように、ML-TCT にはいくつかの問題点が指摘されているために、標準となる試験方法は確立していないし、その普及度も低い。

表-1 単段階载荷と多段階载荷の三軸圧縮試験の比較

	単段階载荷の三軸圧縮試験 (SL-TCT)	多段階载荷の三軸圧縮試験 (ML-TCT)
強度特性を求めるために必要な供試体の本数	拘束圧ごとに供試体が必要 通常、4本以上	最低1本の供試体で良い
試験データのばらつき	大きい	小さい
軸圧縮(せん断)前の応力履歴	通常、等方圧密のみ 軸圧縮(せん断)の履歴はない	拘束圧ごとに軸圧縮するので、後段の軸圧縮(せん断)ほど損傷が蓄積する
試験方法の基準	地盤工学会基準(岩石のUU条件, 軟岩のCU条件, 軟岩のCD条件) <sup>1)</sup>	整備されていない

## 2. 多段階载荷の三軸圧縮試験の問題点

SL-TCTでは1つの拘束圧の下で1回しか軸圧縮(せん断)しないが、ML-TCTでは複数の拘束圧に対するせん断強さを求めるために軸圧縮(せん断)を繰り返している。一番の問題は、この応力履歴によって供試体が損傷(せん断強さの低下の原因となるダメージ)を受けてしまい、後段の軸圧縮(せん断)ほどせん断強さが過小評価される懸念があることである。損傷の程度は、採用する応力経路、すなわち供試体の応力履歴に依存する(図-1)。ML-TCTの応力履歴に影響を与えるフ

クターは、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数と順序、せん断除荷と次段階への圧密の方法、さらにピークの判定方法の合計3つである。

### (1) 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧

最も一般的な応力経路は、軸圧縮(せん断)ごとに等方圧密状態までせん断除荷してから次段階の圧密を行い、設定した4種類程度の拘束圧を順次増加させるものである(図-1a)。

#### a) 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数

図-1bに示すように、設定する拘束圧の数が多いと、

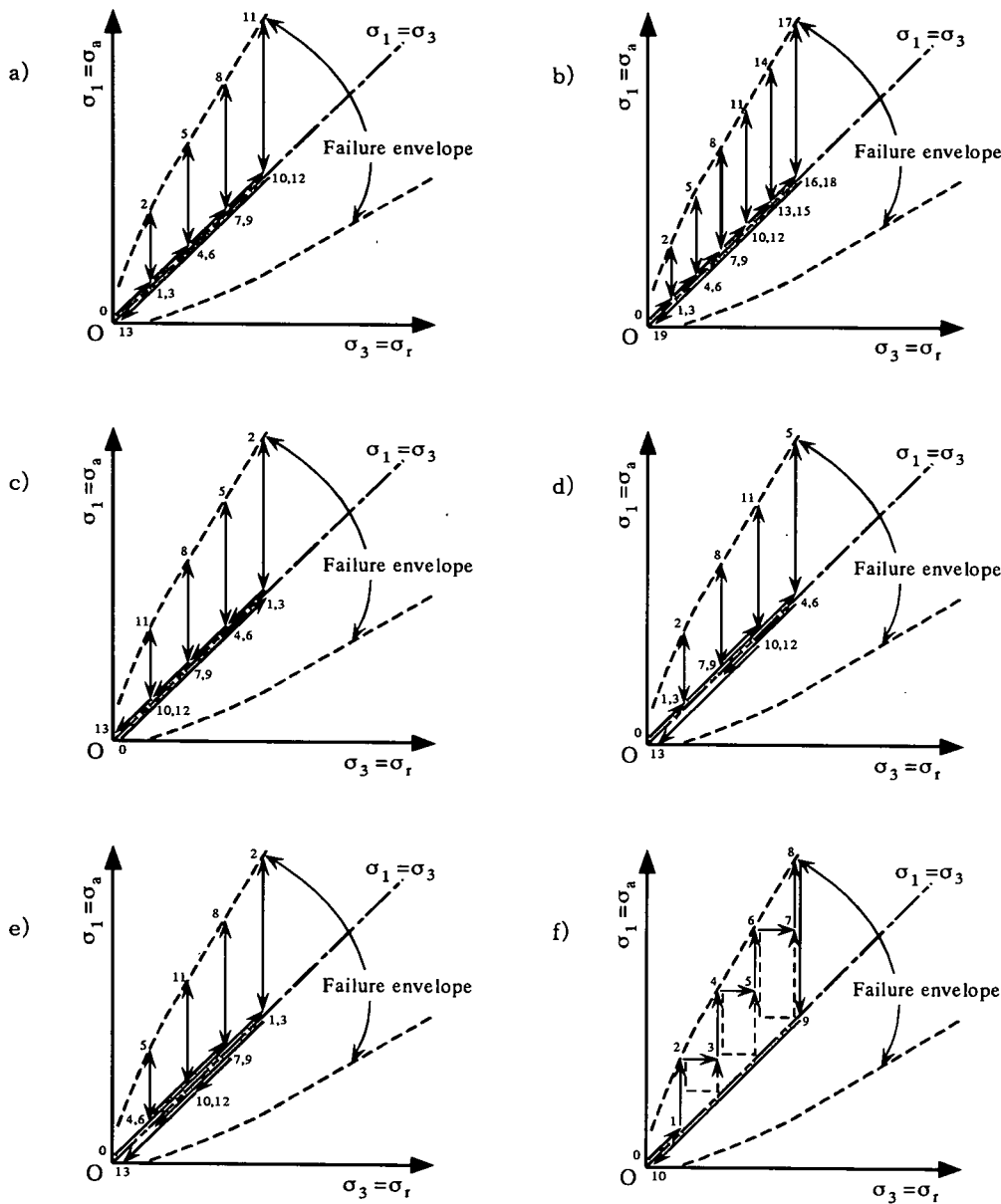


図-1 多段階载荷の三軸圧縮試験における応力履歴の例

供試体に累積する損傷が増大して、せん断強さに与える影響が大きいと懸念される。しかし、拘束圧の設定数、すなわち軸圧縮(せん断)の回数と、累積する損傷によって発揮されるせん断強さがどのように変わるかを調べた研究はほとんどない。

### b) 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の順序

既往の研究では、低い拘束圧から高い拘束圧へと段階的に上げていく方法が多い。他にも高い拘束圧から低い拘束圧へ段階的に下げていく方法(図-1c)や、ランダムに拘束圧を設定する方法(図-1dや図-1e)が採用されることもある<sup>2),3)</sup>。軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の順序の影響や、最適な順序を検討した研究事例は非常に少ない。

## (2) せん断除荷と次段階への圧密の方法

軸圧縮(せん断)ごとに等方圧密状態までせん断除荷(完全除荷)し、それから次段階の圧密を行う方法(図-1abcde)だけではない。他にも、ピークに達したら直ちにセル圧を次段階の拘束圧に上昇させる方法(図-1fの実線)や、軸応力を次段階の拘束圧まで除荷(不完全除荷)してからセル圧を次段階の拘束圧に上昇させる方法(図-1fの破線)などがある。ただし、後の2つの方法は、低い拘束圧から高い拘束圧へと段階的に上げていく場合にしか適用することができない。また、せん断除荷を完全に行う方が、軸圧縮(せん断)前の圧密が適切に行えることが指摘されている<sup>3),4)</sup>。

## (3) ピークの判定方法

各拘束圧の下でピーク(主応力差が最大となる時点)を判定する確立された基準は存在しない。ピークを確実に確認しようとする、軟化現象が始まって、すなわちピークを過ぎてから軸圧縮(せん断)を停止するので供試体が破る損傷は大きくなりやすい。逆に、何らかの手段でピークが近いことを判定して、実際にピークのせん断強さが発揮される手前で軸圧縮(せん断)を停止すると、本来のせん断強さを過小評価してしまう。このピークが近いことを推定する手段には、主応力差と軸ひずみの関係<sup>5,6)</sup>、AEの発生<sup>7)</sup>、過剰間隙水圧の挙動<sup>4),8)</sup>を利用した例がある。しかし、計測の負担が増え、判定の信頼性や岩種の影響など解決すべき問題が多い。

## 3. 研究の目的と検討の方法

### (1) 研究の目的

岩盤は一般に不均質で不連続なので、ばらつきのない岩石供試体を何個も用意してSL-TCTを行い、信頼度の高い強度特性を得ることが非常に難しい。したがっ

て、少ない供試体でSL-TCTと同等のせん断強度特性を評価できる可能性があるML-TCTに対する期待は大きい。さらにSL-TCTに比較してML-TCTは時間的にも経済的にも有利な手法である点も見逃せない。このML-TCTがSL-TCTの代替方法として確立されるためには、前章に示すように、何回も軸圧縮(せん断)を行うことによる応力履歴の影響を明らかにする必要がある。すなわち、軸圧縮(せん断)の繰り返しに伴って損傷が蓄積すると共に、発揮されるせん断強さが低下するメカニズムを調べる必要がある。

そこで、これまで研究事例がほとんどなかった、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数と順序について検討した。なお本研究では、せん断強さを確実に把握するために軟化の開始を確認してから軸圧縮(せん断)を停止し、圧密を確実にを行うために等方応力状態まで完全除荷してから次段階の圧密を行う方法を採用した。

## (2) 検討の方針

上記の検討を行う方法には2種類が考えられる。1つは、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の数や順序を幅広く変えたML-TCTを数多く行い、その結果を比較・検討する方法である。試験データに基づいているので、得られた結果の信頼性が高いという利点があるのに対し、データがばらつく可能性があることや、検討の効率が悪いという欠点を有する。また、累積する損傷の程度と発揮されるせん断強さのメカニズムを理解しないと、検討した岩種に限定された結論しか得られない(結論の一般性に欠ける)ので、合理的ではない。

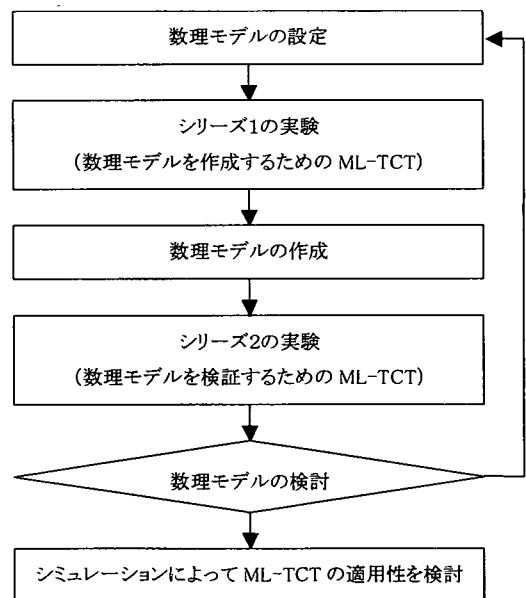


図-2 検討のフロー

もう1つは、検討の項目が考慮できる数理モデルを作成する方法である。この数理モデルを利用して、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の数や順序を幅広く変えたML-TCTのシミュレーションを行って、その結果を比較・検討する。数理モデルの妥当性を検証する必要があるが、累積した損傷の程度と発揮されるせん断強さのメカニズムをきちんとモデル化できれば、合理的であり、検討の効率も良い。

本研究では、その合理性を重視して、後者の数理モデルによる検討方法を選択した。図-2に示すように、検討のフローは2つの実験シリーズより成っている<sup>9)</sup>。シリーズ1の実験は、ある岩種に対する数理モデルを作成するためのML-TCTである。この数理モデルをシリーズ2の実験として実施するML-TCTに対して適用して、その妥当性を検証する。そして最後に、数理モデルを用いたシミュレーションによってML-TCTの適用性を検討する。

### (3) 検討に用いた試料

試料には、供試体のばらつきによる影響を最小にするため、均質・塊状で、粒度が細かい堆積軟岩を用いた。新第三紀鮮新世後期の海成の堆積軟岩で、仙台層群上部の大年寺層の上部層から40cm角にブロックサンプリングした。粉砕した試料の粒度分析(日本工業規格JIS A 1204)の結果を図-3に示す。工学的分類(地盤工学会基準 JGS 0051)は高液性限界のシルト(MH, 塑性指数  $I_p = 20.9$ )に属するので、以後、シルト岩と称する。

このシルト岩は非常に均質で連続であるので、直径が10~500mmの円柱供試体を用いた三軸圧縮試験の結果で寸法効果は認められなかった<sup>10)</sup>。そこで、直径50mm、高さ100mmに整形した供試体を用いて全ての実験を行った。

シリーズ1とシリーズ2の実験で、それぞれ7本と2本の供試体を用いた。その物理特性は湿潤密度  $\rho_t = 1.72 \sim 1.79$  (g/cm<sup>3</sup>)、含水比  $w = 46.3 \sim 49.3$  (%)で、超音波速度は  $V_s = 474 \sim 532$  (m/sec)、 $V_p = 1266 \sim 1493$  (m/sec)であった。比較的含水比が高く、軟質で固結度も低い岩石である。

## 4. 多段階载荷の三軸圧縮試験の数理モデル(多段階载荷損傷モデル)の概念

基本となるSL-TCTのせん断強度特性に、繰り返し軸圧縮(せん断)を行うことにより供試体に蓄積する損傷の影響を考慮してML-TCTのせん断強度特性を表現する数理モデルを考案した。この多段階载荷損傷モデル(Multiple-step loading damage model)を、以後、MLD

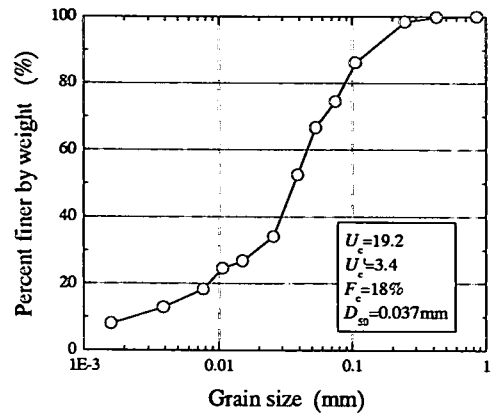


図-3 粉砕したシルト岩の粒度分析の結果

モデルと称する。なお、三軸圧縮試験は圧密非排水せん断(CU条件)を対象とした。

### (1) MLDモデルの概念

まず基本となるSL-TCTのせん断強度特性は、一般に破壊時の最大主応力  $\sigma'_{1f}$  と最小主応力  $\sigma'_{3f}$  の組み合わせで表現される。三軸圧縮試験では、有効拘束圧  $\sigma'_c$  に対するせん断強さ(最大主応力差)  $q = \sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}$  とピーク時の過剰間隙水圧  $u = \sigma'_c - \sigma'_{3f}$  の関係に置き換えることができる。よって、SL-TCTのせん断強さ(最大主応力差)  $q_{SL}$  とピーク時の過剰間隙水圧  $u_{SL}$  を有効拘束圧  $\sigma'_c$  の関数として与えた。

次に、ML-TCTで繰り返し軸圧縮(せん断)を行うことによって、後段の载荷段階で発揮されるせん断強さが影響を受ける現象を考慮しなければならない。そこで、ある载荷段階までに供試体が受けた損傷の程度を代表するパラメータとして、完全にせん断除荷した後(せん断応力がゼロに戻った時)に残留していた塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  を採用した。一般に、地盤材料の構成関係では、硬化パラメータを塑性体積ひずみにする場合が多いが、岩石の三軸圧縮試験で体積ひずみを精度良く計測することは難しく、塑性軸ひずみで代用することとした。

その結果、SL-TCTのせん断強度特性の表現に倣い、ML-TCTのせん断強度特性を、せん断強さ(最大主応力差)  $q_{ML}$  とピーク時の過剰間隙水圧  $u_{ML}$  を有効拘束圧  $\sigma'_c$  と塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  の関数として与えることができる。また、軸圧縮(せん断)履歴によって、どの程度の損傷が蓄積するのかを推定する関係も必要である。そこで、ある载荷段階(i回目)による塑性軸ひずみの増分  $\Delta \epsilon_a^p$  を、有効拘束圧  $\sigma'_c$  とその载荷段階の前(i-1回目)までに累積した塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^{p,i-1}$  の関係で与えた。

(2) MLD モデルの構成と ML-TCT のシミュレーションの方法

MLD モデルを構成する5つの関係の概念を図-4 に示す。

- ① SL-TCT のせん断強さ(最大主応力差) $q_{SL}$ を有効拘束圧 $\sigma'_c$ より推定する関係で、②の関係と合わせれば破壊基準と等価である。
- ② SL-TCT のピーク時の過剰間隙水圧  $u_{SL}$  を有効拘束圧 $\sigma'_c$ より推定する関係で、ダイレイタンシー特性を反映している。
- ③ ML-TCT の  $i$  回目の荷重段階で発揮されるせん断強さ(最大主応力差) $q_{ML,i}$ と SL-TCT のせん断強さ(最大主応力差) $q_{SL}$ との比  $q_{ML,i}/q_{SL}$  を、有効拘束圧 $\sigma'_c$ と  $(i-1)$  回目の荷重段階までに累積した塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  より推定する関係である。多段階荷重の履歴がせん断強度特性に及ぼす影響を表している。
- ④ ML-TCT の  $i$  回目の荷重段階のピーク時の過剰間隙水圧  $u_{ML,i}$  と SL-TCT のピーク時の過剰間隙水圧  $u_{SL}$  との比  $u_{ML,i}/u_{SL}$  を、有効拘束圧 $\sigma'_c$ と  $(i-1)$  回目の荷重段階までに累積した塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  より

推定する関係である。多段階荷重の履歴がダイレイタンシー特性に及ぼす影響を表している。

- ⑤ ML-TCT の  $i$  回目の荷重段階による塑性軸ひずみの増分  $\Delta \epsilon_a^p$  を、有効拘束圧 $\sigma'_c$ と  $(i-1)$  回目の荷重段階までに累積した塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  より推定する関係である。軸圧縮(せん断)履歴による損傷の受けやすさを表している。

この MLD モデルの特徴は、多段階に荷重する応力履歴によって蓄積される損傷を、累積する塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  で代表させた点である。この  $\epsilon_a^p$  は、各荷重段階でせん断が終了した後、等方圧密状態にまで完全除荷をして、さらに排水状態として供試体内の過剰間隙水圧を消散させて軸圧縮(せん断)前の応力状態に戻った時点で計測した。

図-4 に示す MLD モデルを用いることによって、ML-TCT をシミュレーションすることができる。そのシミュレーションのフローを図-5 に示す。ML-TCT の  $i$  段階目の軸荷重(せん断)がある有効拘束圧 $\sigma'_c$ で行われた場合に、発揮されるせん断強さ  $q_{ML,i}$  は①と③の関係、ピーク時の過剰間隙水圧  $u_{ML,i}$  は②と④の関係によって推定することができる。そして、この  $i$  段階目の軸圧縮(せ

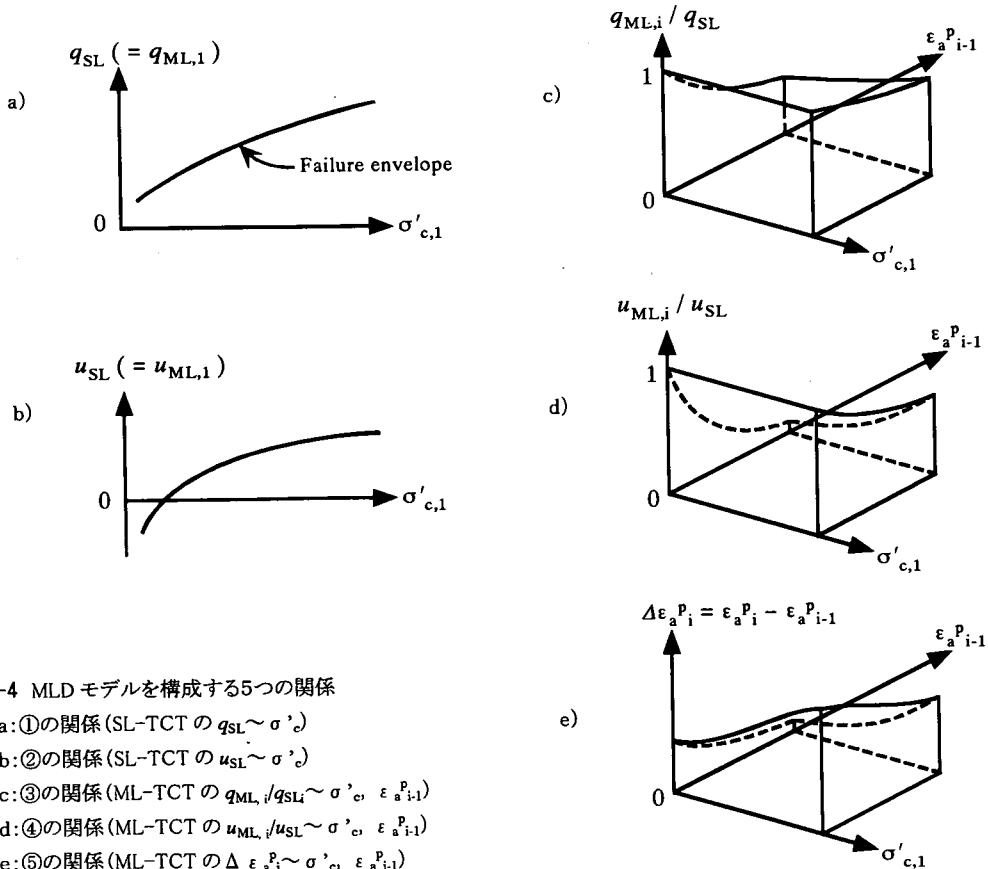


図-4 MLD モデルを構成する5つの関係

- a: ①の関係(SL-TCT の  $q_{SL} \sim \sigma'_c$ )
- b: ②の関係(SL-TCT の  $u_{SL} \sim \sigma'_c$ )
- c: ③の関係(ML-TCT の  $q_{ML,i}/q_{SL} \sim \sigma'_c, \epsilon_a^p$ )
- d: ④の関係(ML-TCT の  $u_{ML,i}/u_{SL} \sim \sigma'_c, \epsilon_a^p$ )
- e: ⑤の関係(ML-TCT の  $\Delta \epsilon_a^p \sim \sigma'_c, \epsilon_a^p$ )

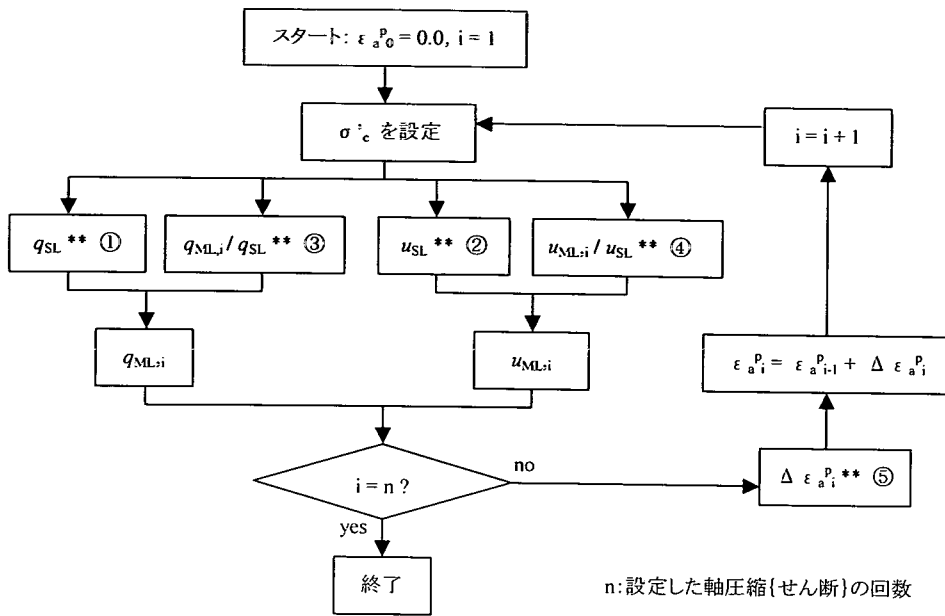


図-5 MLD モデルによる ML-TCT のシミュレーション

ん断)によって新たに供試体に蓄積した塑性軸ひずみ増分  $\Delta \varepsilon_{a^p_i}$  は、⑤の関係によって評価することができる。

### (3) MLD モデルの適用性の検討

ここで注意すべきことは、 $q_{ML,i}/q_{SL}$ 、 $u_{ML,i}/u_{SL}$ 、 $\Delta \varepsilon_{a^p_i}$  を  $\sigma'_c$  と  $\varepsilon_{a^p_{i-1}}$  から推定する③～⑤の関係が、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数や順序に依存しないことを仮定している点である。この仮定が正しければ、ML-TCT における軸圧縮(せん断)の回数や順序に関して、いかなる条件も図-5に示すフローによってシミュレーションが可能である。

そこで、③～⑤の関係が軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数や順序に依存しないことを確かめるため、図-2に示すように、2つのシリーズの実験を行った。まず、シルト岩に対する MLD モデルを作成するために、ある特定の拘束圧の設定で ML-TCT(シリーズ1の実験)を実施した。そして同じシルト岩に対して、シリーズ1と異なる拘束圧の設定で ML-TCT(シリーズ2の実験)を行った。このシリーズ2の実験結果と、シリーズ1の実験結果に基づく MLD モデルを用いてシリーズ2の ML-TCT をシミュレーションした結果とを比較した。そして、シミュレーションの結果が実験の結果を良好に再現できているのであれば、MLD モデルの適用性が高いと判断することとした。

## 5. シルト岩に対する MLD モデルの作成 (シリーズ1の実験)

### (1) 検討の方法

シルト岩に対して、MLD モデルを構成する①～⑤の関係(図-4)を求めるために行う実験(シリーズ1)である。拘束圧の設定に関しては、図-6に示すように同じ拘束圧で軸載荷(せん断)/完全除荷と再圧密を繰り返す応力経路を選択した。供試体の相連による実験データのばらつきの影響を受けずに、各拘束圧の下で軸圧縮(せん断)の回数が増えて損傷が蓄積するのに伴ってせん断強さやピーク時の過剰間隙水圧が変化する傾向が直接に把握でき、③～⑤の関係が効率的に得られるからである。また、SL-TCT に関する①と②の関係は、最初の载荷段階( $i = 1$ )に対する結果を利用することができるので、別途 SL-TCT を実施する必要はない。すなわち、 $q_{SL} = q_{ML,1}$ 、 $u_{SL} = u_{ML,1}$  とする。

### (2) 実験の方法と条件

多段階に軸載荷をすることを除いて、基本的に、軟岩の圧密非排水(CU)条件の SL-TCT に関する地盤工学会基準(JGS 2533)に準拠した。有効拘束圧は  $\sigma'_c = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.6, 3.2$  MPa の7種類とし、合計7回の ML-TCT を実施した。

このシリーズ1の実験で得られる主応力差～軸ひずみ関係および過剰間隙水圧～軸ひずみ関係を模式的に図-7に示す。軸圧縮(せん断)/除荷/再圧密のサ

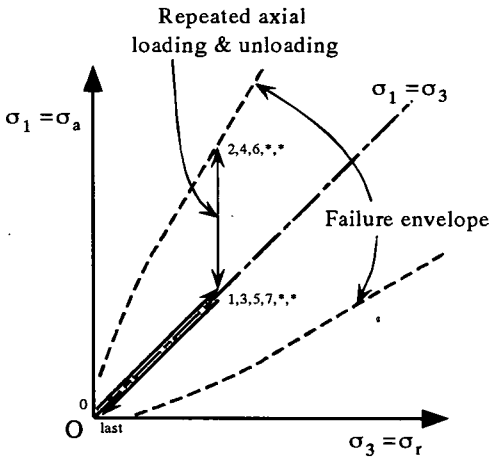


図-6 シリーズ1の実験の方法

イクルは、軸ひずみを計測する変位計の容量を越えるまで(6~10回)繰り返して行った。各載荷段階におけるピークの判定は、確実にせん断強さを把握し、かつ供試体の損傷を最小限に抑えるため、荷重計の値が初めて減少(軟化を開始)した時点とした。ピークの判定後、直ちに軸圧縮(せん断)を停止して等方応力状態まで完全にせん断除荷した。そして、排水状態にして残留した過剰間隙水圧を消散(同じ拘束圧で再圧密)させた。

図-7に示す実験結果より、各載荷段階に対するせん断強さ  $q_{ML,i}$  とピーク時の過剰間隙水圧  $u_{ML,i}$ 、さらに累積した塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  を読み取り、MLDモデルの③~⑤の関係が得られる。また、最初の載荷段階( $i=1$ )に対する結果より、SL-TCTに関する①と②の関係が得られる。なお、塑性軸ひずみ  $\epsilon_a^p$  を評価するために重要な軸ひずみは、ベッディング・エラーの影響を受けないように、供試体の側面の異なる高さの圧縮量を計測して求めた。

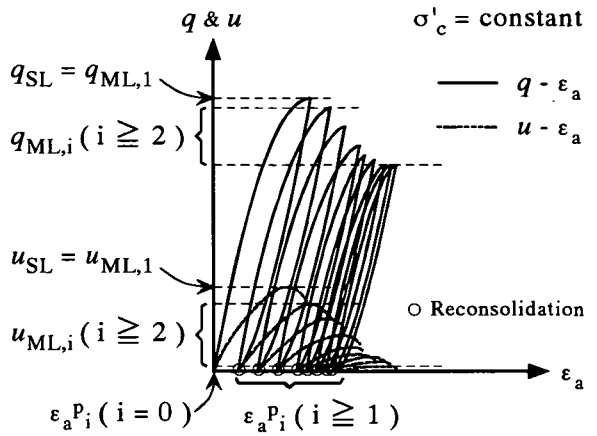


図-7 シリーズ1の実験結果の整理方法

### (3) 実験の結果

シリーズ1の実験結果のうち、低い拘束圧( $\sigma'_c = 0.4$  MPa)と高い拘束圧( $\sigma'_c = 1.6$  MPa)のケースについて主応力差~軸ひずみ関係および過剰間隙水圧~軸ひずみ関係を図-8に例示する。拘束圧が低い場合には、最初の数回の軸圧縮(せん断)によってせん断強さもピーク時の過剰間隙水圧も大幅に低下し、応力履歴による損傷の影響が大きい。しかし、この傾向は徐々に収束する。また、除荷後に残留した塑性軸ひずみの増分は、最初の数回は小さいが、載荷回数が増えてせん断強さが変わらなくなるとピークが明確でなくなり、大きく評価される場合がある。

一方、拘束圧が高い場合には、軸圧縮(せん断)の回数が増えても塑性軸ひずみが増えるだけで、せん断強さもピーク時の過剰間隙水圧も1回目の載荷段階と余り変わらず、応力履歴による損傷の影響は小さい。また、除荷後に残留した塑性軸ひずみの増分は大きく、

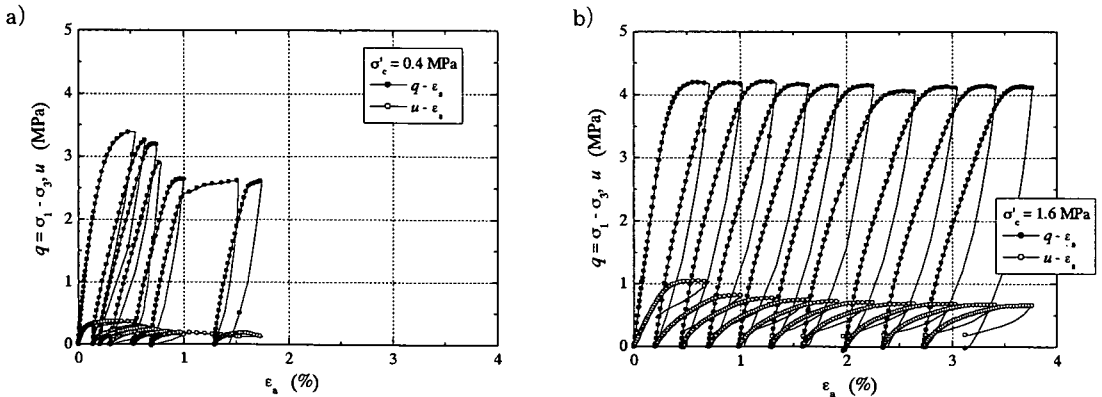


図-8 シリーズ1の実験結果(a:低い拘束圧のケース、b:高い拘束圧のケース)

軸圧縮(せん断)の回数が増えても余り変化しない。

(4) シルト岩に対する MLD モデルの作成

シリーズ1の実験結果より得られたシルト岩に対する MLD モデルの①～⑤の関係を図-9 に示す。

a) ①  $q_{SL} \sim \sigma'_c$  関係と, ②  $u_{SL} \sim \sigma'_c$  関係

ML-TCT の第1回目の載荷段階の結果より得られた SL-TCT のせん断強さ  $q_{SL}$  とピーク時の過剰間隙水圧  $u_{SL}$  を推定する関係である。両者とも有効拘束圧  $\sigma'_c$  に対してほぼ線形に増加する傾向を示した。

モール・クーロンの破壊基準で算出したせん断強度定数は, 全応力表示の粘着力は  $c_{cu} = 1.30$  MPa, せん断抵抗角は  $\phi_{cu} = 11.4^\circ$ , 有効応力表示では  $c' =$

1.15 MPa,  $\phi' = 20.7^\circ$  であった。従来の結果(全応力表示では  $c_{cu} = 0.85$  MPa,  $\phi_{cu} = 23.4^\circ$ , 有効応力表示では  $c' = 0.64$  MPa,  $\phi' = 38.1^\circ$ )に比較して, せん断抵抗角は小さく, 粘着力は大きい<sup>10)</sup>。この理由は, 非線形な破壊包絡線に対して, 従来のデータが有効拘束圧 1.6 MPa 以下で得られたのに対して, 今回のデータは, さらに高い有効拘束圧(3.2 MPa まで)のデータが加わったためである。また, 元々間隙が多い試料であるために負のダイレイタンスを示している。

b) ③  $q_{ML,i}/q_{SL} \sim \sigma'_c \sim \varepsilon_{a,i-1}^p$  関係と, ④  $u_{ML,i}/u_{SL} \sim \sigma'_c \sim \varepsilon_{a,i-1}^p$  関係

ML-TCT のせん断強さ  $q_{ML,i}$  とピーク時の過剰間隙水圧  $u_{ML,i}$  を推定する関係である。せん断強さは, 拘束圧

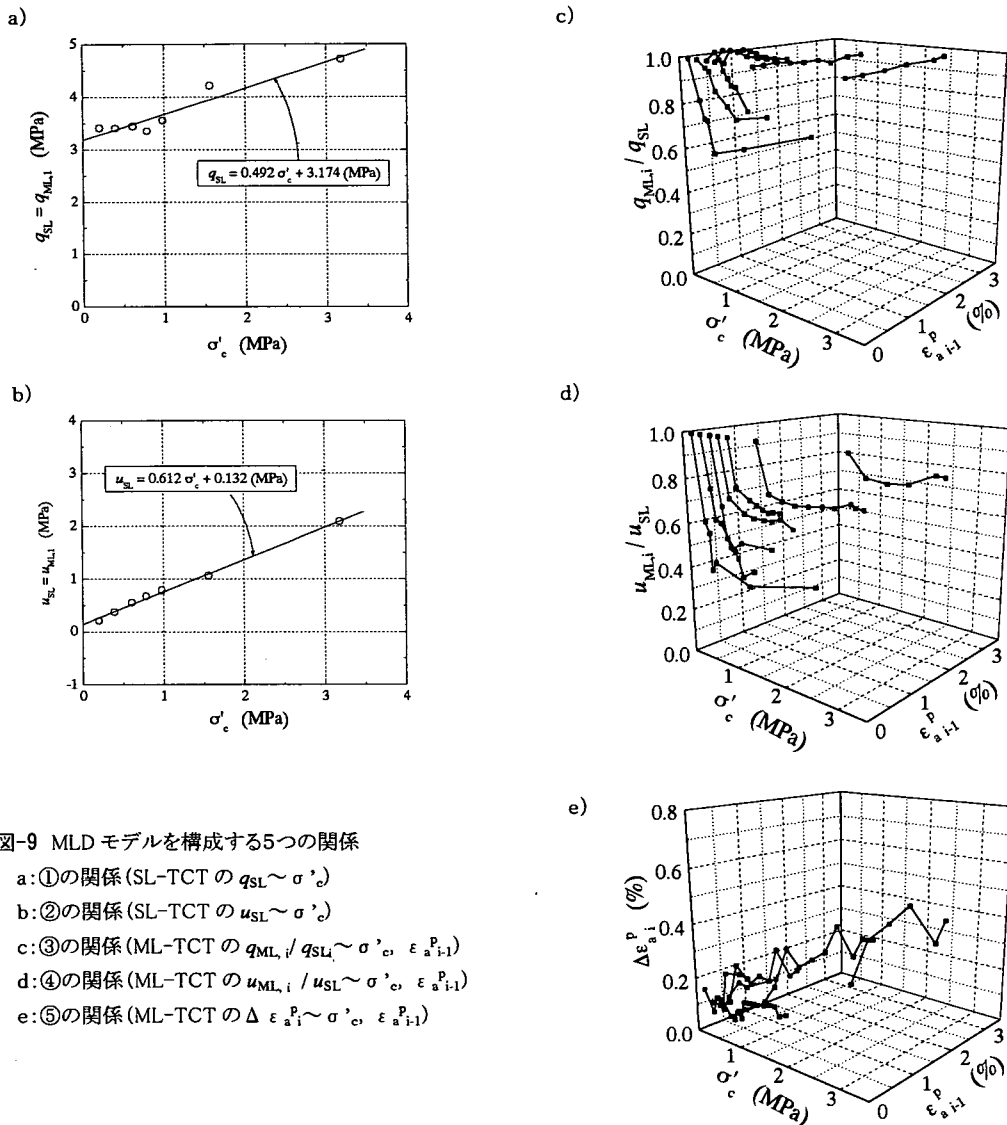


図-9 MLDモデルを構成する5つの関係

- a: ①の関係 (SL-TCT の  $q_{SL} \sim \sigma'_c$ )
- b: ②の関係 (SL-TCT の  $u_{SL} \sim \sigma'_c$ )
- c: ③の関係 (ML-TCT の  $q_{ML,i}/q_{SL,i} \sim \sigma'_c, \varepsilon_{a,i-1}^p$ )
- d: ④の関係 (ML-TCT の  $u_{ML,i}/u_{SL,i} \sim \sigma'_c, \varepsilon_{a,i-1}^p$ )
- e: ⑤の関係 (ML-TCT の  $\Delta \varepsilon_{a,i}^p \sim \sigma'_c, \varepsilon_{a,i-1}^p$ )



が低い範囲 ( $\sigma'_c = 0.2, 0.4$  MPa) では塑性軸ひずみと共に急激に低下して一定値に収束する傾向を示す。しかし、中程度の拘束圧の範囲 ( $\sigma'_c = 0.6, 0.8, 1.0$  MPa) では、最初の1, 2回の軸圧縮(せん断)でごくわずかだがせん断強さが増加し、その後、やや減少する傾向を示す。さらに高い拘束圧 ( $\sigma'_c = 1.6, 3.2$  MPa) では、ほとんど変化が見られなかった。岩石一般の性質である拘束圧が高くなるに従って破壊が脆性的なものから延性的なものに変化する傾向と、せん断する毎に残留した正の過剰間隙水圧を再圧密時に消散させて次第に密実な構造になって強度が増加する傾向が合わさった結果であると推測される。

一方、ピーク時の過剰間隙水圧は、塑性軸ひずみと共に急激に低下して一定値に収束する傾向を示す。この傾向は低拘束圧ほど顕著である。

c) ⑤  $\Delta \varepsilon_{a,i}^p \sim \sigma'_c \sim \varepsilon_{a,i-1}^p$  関係

ML-TCT の塑性軸ひずみ増分  $\Delta \varepsilon_{a,i}^p$  を推定する関係で、1回の軸圧縮(せん断)/除荷/再圧密のサイクルで蓄積する新たな損傷の大きさを示す。高い拘束圧ほどピーク時の軸ひずみ増分が大きく、非可逆的な(残留する)変形分である  $\Delta \varepsilon_{a,i}^p$  も増加する。拘束圧が低い場合には、既に被った塑性軸ひずみ  $\varepsilon_{a,i-1}^p$  が大きくなるとその増分はやや小さくなるが、拘束圧が高い場合には減少する傾向が見られなかった。

6. シルト岩に対する MLD モデルの検証 (シリーズ2の実験)

(1) 検討の方法

図-9 に示したシルト岩に対する MLD モデルが、拘束圧の設定に関してさまざまな ML-TCT をシミュレーションすることができるかどうかを検証する。より具体的には、③~⑤の関係が拘束圧の設定方法に依存しないことを確認することを目的としている。そこで、拘束圧の設定に関してシリーズ1とは異なる2種類の ML-TCT を採用し、実験(シリーズ2)と MLD モデルを用いたシミュレーションを行った。1つは最も一般的な段階的に拘束圧を高くしていく方法(拘束圧増加, 図-1a と図-1b)で、もう1つは逆に段階的に拘束圧を低くしていく方法(拘束圧減少, 図-1c)である。

(2) 実験の方法と条件

実施した2種類の ML-TCT の方法は、拘束圧の設定以外はシリーズ1の実験と同じである。拘束圧増加のケースでは有効拘束圧を  $\sigma'_c = 0.2/0.4/0.8/1.0/1.6$  MPa とし、拘束圧減少のケースでは有効拘束圧を  $\sigma'_c = 1.6/1.0/0.8/0.4/0.2$  MPa とし、それぞれ5回ずつ軸圧縮(せん断)を行った。

図-9 に示す MLD モデルを用いた ML-TCT のシミュレーションは、シリーズ2の実験における拘束圧の設定

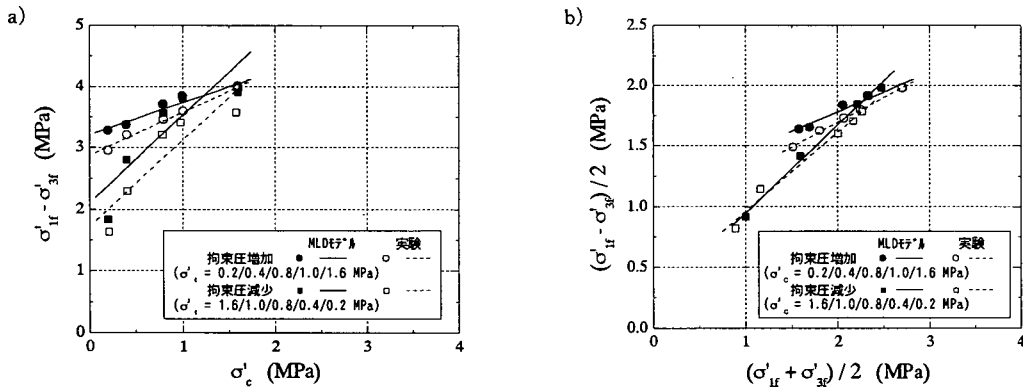


図-10 MLD モデルの検証(a:  $q \sim \sigma'_c$  関係, b:  $q/2 \sim p$  関係)

表-2 せん断強度定数の比較(MLD モデルの検証;シリーズ2の実験)

ケース	有効拘束圧	実験の結果				シミュレーションの結果			
	$\sigma'_c$ (MPa)	$c_{ML}$ (MPa)	$\phi_{ML}$ (deg.)	$c'_{ML}$ (MPa)	$\phi'_{ML}$ (deg.)	$c_{ML}$ (MPa)	$\phi_{ML}$ (deg.)	$c'_{ML}$ (MPa)	$\phi'_{ML}$ (deg.)
拘束圧増加	0.2/0.4/0.8/1.0/1.6	1.10	15.0	0.94	24.9	0.98	12.1	1.19	19.1
拘束圧減少	1.6/1.0/0.8/0.4/0.2	0.51	25.7	0.40	41.0	0.60	26.6	0.31	46.8

に従って図-5のフローで計算した。なお、①と②の関係は図-9aと図-9bに示すように実験データを直線回帰したものを利用し、⑤の関係(図-9e)は実験データのばらつきが大きいので各拘束圧に対して直線回帰した関係を用いた。一方、③と④の関係(図-9cと図-9d)は各拘束圧に対する関係が比較的滑らかな曲線を描いているので、実験データの間を線形補間して対応する値を読み取った。

### (3) 検討の結果

実験の結果と、MLDモデルを用いたシミュレーションの結果を図-10に比較する。図-10aは有効拘束圧 $\sigma'_c$ に対してピーク時の軸差応力 $q = \sigma'_{1r} - \sigma'_{3r}$ をプロットしたもので、図-10bはピーク時の平均主応力 $p' = (\sigma'_{1r} + \sigma'_{3r})/2$ に対して最大せん断応力 $q/2 = (\sigma'_{1r} - \sigma'_{3r})/2$ 、すなわちモールの応力円の頂点をプロットしたものである。

図-10aを見ると、せん断強さに関しては、拘束圧増加のケースと拘束圧減少のケースともシミュレーション結果が実験の結果をやや過大評価しているが、拘束圧の変化に対する傾向は両ケースの相違を再現できていることが分かる。また、ピーク時の応力値を比較する図-10

bを見ると、両ケースとも実験とシミュレーションの結果がほぼ一致している。また、せん断強度定数を比較した表-2を見ても、MLDモデルが実験結果を再現する能力が高いことが分かる。若干の相違は試料のばらつきが原因と推測され、MLDモデルが拘束圧の設定に関してさまざまなML-TCTをシミュレーションすることが可能であると判断した。

## 7. 多段階载荷の三軸圧縮試験のシミュレーション

拘束圧の設定に関してさまざまなML-TCTをシミュレーションできることが示されたので、このMLDモデルを利用して、ML-TCTにおいて軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数と順序について検討する。

### (1) 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の順序

低い拘束圧から高い拘束圧へと段階的に上げていく方法(図-1aと図-1b)、高い拘束圧から低い拘束圧へ段階的に下げていく方法(図-1c)、さらにランダムに拘束圧を設定する方法(図-1d(ランダム1)と図-1e(ランダム2))の合計4種類のケースを比較した。軸圧縮(せ

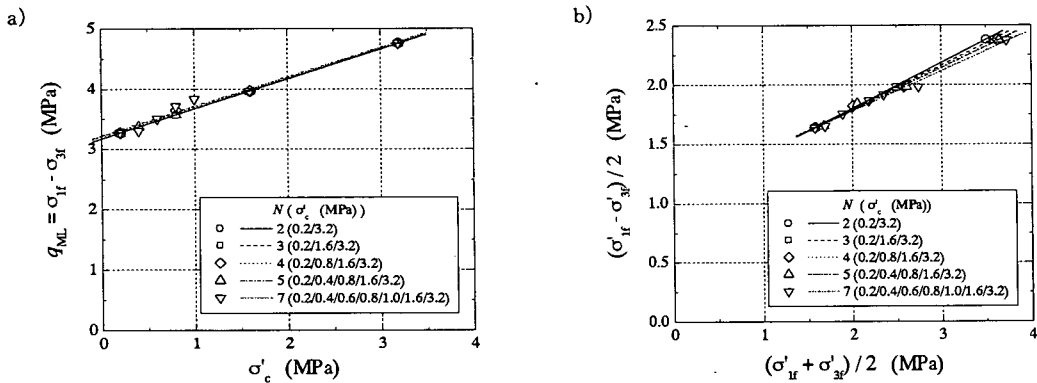


図-11 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の順序の検討(a:  $q \sim \sigma'_c$ 関係, b:  $q/2 \sim p'$ 関係)

表-3 せん断強度定数の比較(軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の順序)

ケース	有効拘束圧	全応力表示		有効応力表示		
	$\sigma'_c$ (MPa)	$c_{SL}, c_{ML}$ (MPa)	$\phi_{SL}, \phi_{ML}$ (deg.)	$c'_{SL}, c'_{ML}$ (MPa)	$\phi'_{SL}, \phi'_{ML}$ (deg.)	
SL-TCT	0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2	1.30	11.4	1.15	20.7	
ML-TCT	拘束圧増加	0.2/0.4/0.8/1.6/3.2	1.30	11.5	1.09	23.1
	拘束圧減少	3.2/1.6/0.8/0.4/0.2	0.77	18.5	0.44	36.3
	ランダム1	0.2/3.2/0.4/1.6/0.8	1.12	13.8	0.85	27.2
	ランダム2	3.2/0.2/1.6/0.4/0.8	0.77	18.5	0.47	35.7

ん断)の回数は5回とし、有効拘束圧は 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 MPa の5つとした。

図-11 a)には有効拘束圧  $\sigma'_c$  に対してピーク時の軸差応力  $q = \sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}$  をプロットしたもので、図-11 b)にはピーク時の平均主応力  $p' = (\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f})/2$  に対して

最大せん断応力  $q/2 = (\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f})/2$ 、すなわちモールの応力円の頂点をプロットしたものである。さらに、せん断強度定数を表-3に比較した。

シミュレーションの結果より、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の順序によってせん断強さに与える影響が異なる

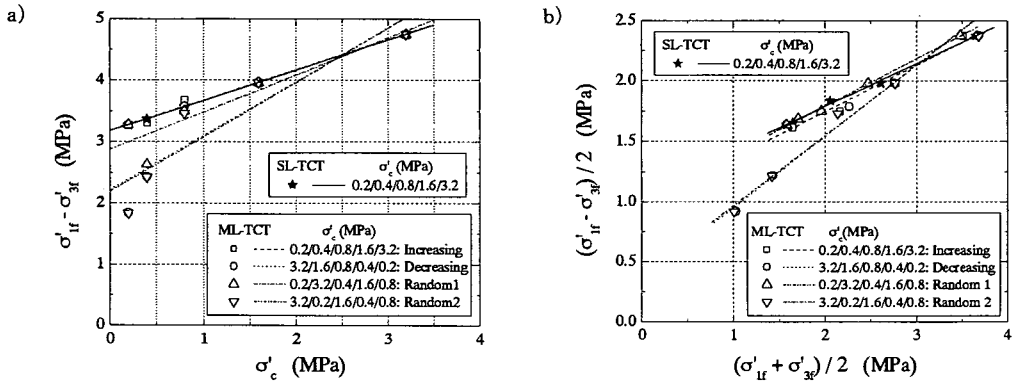


図-12 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数の検討(a:  $q \sim \sigma'_c$ 関係, b:  $q/2 \sim p'$ 関係)

表-4 せん断強度定数の比較(軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数)

ケース	有効拘束圧		全応力表示		有効応力表示	
	$\sigma'_c$ (MPa)		$c_{SL}, c_{ML}$ (MPa)	$\phi_{SL}, \phi_{ML}$ (deg.)	$c'_{SL}, c'_{ML}$ (MPa)	$\phi'_{SL}, \phi'_{ML}$ (deg.)
SL-TCT	0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2		1.30	11.4	1.15	20.7
ML-TCT	2回	0.2/3.2	1.30	11.4	1.11	22.6
	3回	0.2/1.6/3.2	1.30	11.4	1.14	21.6
	4回	0.2/0.8/1.6/3.2	1.32	11.2	1.16	20.8
	5回	0.2/0.4/0.8/1.6/3.2	1.30	11.4	1.15	20.9
	7回	0.2/0.4/0.6/0.8/1.0/1.6/3.2	1.31	11.5	1.17	19.8

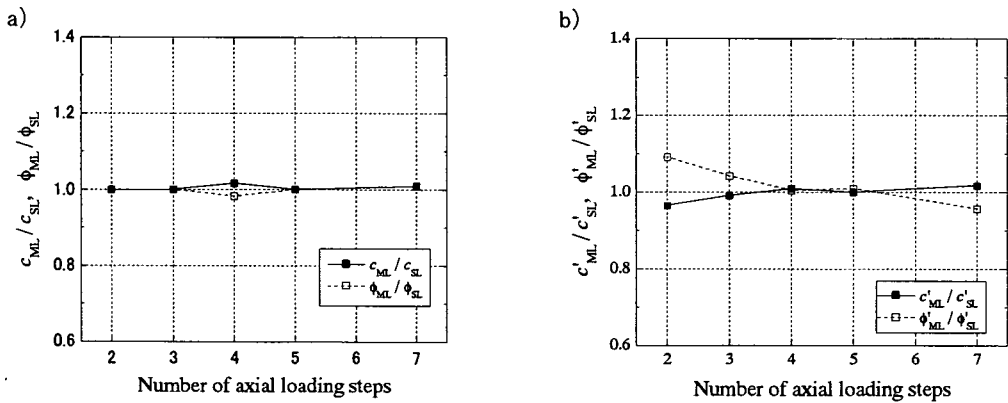


図-13 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数に関するせん断強度定数(a: 全応力表示, b: 有効応力表示)

ことが読み取れる。そして、低い拘束圧から高い拘束圧へと段階的に上げていく ML-TCT が最も SL-TCT に近い結果を与えることが分かる。他のケースは損傷の影響が大きく、いずれも粘着力を過小評価し、逆にせん断抵抗角を過大評価する傾向にある。特に、最も低い拘束圧は損傷の影響でせん断強さが大幅に低下するので(図-9cの③の関係を参照)、損傷が蓄積しないうちに(早い载荷段階で)低拘束圧の軸圧縮(せん断)を実施する必要がある。

## (2) 軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数

拘束圧の順序について最も適切と判断された低い拘束圧から高い拘束圧へと段階的に上げていく方法(図-1aの図-1b)に関して、軸圧縮(せん断)の回数が2, 3, 4, 5, 7段階のケースを比較した。有効拘束圧は 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.6, 3.2 MPa の7つで、最小と最大の拘束圧(0.2 MPa と 3.2 MPa)を含んでなるべく等間隔になるように設定した。

図-12aには有効拘束圧  $\sigma'_c$  に対してピーク時の軸差応力  $q = \sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}$  をプロットしたもので、図-12bにはピーク時の平均主応力  $p' = (\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f})/2$  に対して最大せん断応力  $q/2 = (\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f})/2$ 、すなわちモールの応力円の頂点をプロットしたものである。さらに、求められたせん断強度定数の値を表-4に、ML-TCTによるせん断強度定数を SL-TCTによる値で無次元化した結果を図-13に示す。

図-12aと図-13aを見ると、せん断強さや全応力表示のせん断強度定数に関しては、軸圧縮(せん断)の回数の影響は小さい。しかし、図-12bと図-13bに示すピーク時の応力値や有効応力表示のせん断強度定数を見ると、軸圧縮(せん断)の回数が増えて損傷が蓄積すると、粘着力が小さく、逆にせん断抵抗角が大きくなる傾向がある。高い拘束圧においてせん断強さは損傷の影響を受けないが、ピーク時の過剰間隙水圧は損傷の増大と共に低下するので(図-9dの④の関係を参照)、有効応力で整理する場合に影響が表れることになる。このシルト岩の場合、軸圧縮(せん断)の回数は4ないし5回が適切である。

## 8. 結論

少ない供試体で単段階载荷の三軸圧縮試験(SL-TCT)と同等のせん断強度特性を評価することができる期待される多段階载荷の三軸圧縮試験(ML-TCT)は、時間的にも経済的にも有利な手法である。しかし、軸圧縮(せん断)の繰り返しによって供試体に損傷が蓄積して、発揮されるせん断強さが低下するメ

カニズムが明らかではないため、SL-TCTの代替方法として確立されてはいない。そこで、ML-TCTをシミュレーションすることができる数理モデルを提案し、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数と順序について検討し、以下の結論を得た。

- (1) ML-TCTをシミュレーションする数理モデルとして、供試体に蓄積する損傷を塑性軸ひずみで代表させる多段階载荷損傷モデル(MLDモデル)を提案した。
- (2) シルト岩を用いて一連のML-TCT(シリーズ1の実験)を実施し、その具体的なモデルを作成した。そして、拘束圧の設定に関してシリーズ1とは異なるML-TCT(シリーズ2の実験)を実施し、MLDモデルの妥当性を検証した。
- (3) シルト岩について作成したMLDモデルを利用して、軸圧縮(せん断)を行う拘束圧の設定数と順序を変えたML-TCTをシミュレーションし、軸圧縮(せん断)の回数を4ないし5回とし、低い拘束圧から高い拘束圧へと段階的に上げていくML-TCTが適切であることを示した。

上記の結論は、固結度が低く負のダイレイタンスー特性を示すシルト岩について導かれたものである。塑性軸ひずみや過剰間隙水圧の出力や破壊の特性(脆性または延性)によって、最適な拘束圧の設定条件は異なる傾向を示すかもしれない。今後、幅広い岩種に対してMLDモデルの適用性を検討し、ML-TCTの最適な試験方法を確立する必要がある。さらに、MLDモデルを用いることで、ML-TCTによって得られたせん断強さから、本来のSL-TCTのせん断強さを推定する手法の検討も可能となる。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会基準:岩石のUU条件(JGS 2531)、軟岩のCU条件(JGS 2532 & 2533)、軟岩のCD条件(JGS 2534)の三軸圧縮試験方法。
- 2) Kovari, K. and Tisa, A.: Multiple failure state and strain controlled tests, *Rock Mechanics*, Vol.7, No.1, pp.17-33, 1975.
- 3) Chang, N.Y. and Jumper, A.L.: Multiple-stage triaxial test on oil shale, *Proc. 19<sup>th</sup> US Rock Mechanics Sym.*, pp.520-527, 1978.
- 4) 赤井浩一, 大西有三, 李 徳河:多段階三軸圧縮試験とその飽和軟岩への適用について, 土木学会論文報告集, 第311号, pp.93-102, 1981.
- 5) 木山 保, 中田雅夫, 原 正之, 佐々木勝司:自動化された多段階三軸圧縮試験による数種の岩石の強度特性, 第48回土木学会年次学術講演会, pp.1304-1305, 1993.
- 6) 阿部大志, 田野久貴, 渡辺英彦:岩石の多段階三軸圧縮試験に関する基礎実験, 第52回土木学会年次学術講演

会, pp.552-553, 1997.

- 7) 田野久貴, 田辺英彦, 阿部大志: AEを用いた岩石の多段階三軸圧縮試験の試み, 第10回岩の力学国内シンポジウム, pp.683-688, 1998.
- 8) 伊藤達也: 大谷石を用いた多段階三軸圧縮試験について, 第35回地盤工学研究発表会, pp.1003-1004, 2000.
- 9) 木村 誠, 谷 和夫: シルト岩を用いた多段階載荷損傷モ

デルの適用性の検討, 第11回岩の力学国内シンポジウム, A02, 6p, 2002.

- 10) 谷 和夫, 池見元宜: 三軸圧縮試験で見られた均質な軟岩のせん断挙動に関する寸法効果, 第11回岩の力学国内シンポジウム, A14, 6p, 2002.

(2002. 5. 13 受付)

## DEVELOPMENT OF A MODEL FOR MULTIPLE-STEP LOADING TRIAXIAL COMPRESSION TEST AND INVESTIGATION OF ITS APPLICABILITY

Makoto KIMURA, Kazuo TANI and Tetsuji OKADA

Several specimens should be prepared when strength characteristics of rock is evaluated by conventional single-step loading triaxial compression tests. On the contrary, multiple-step loading triaxial compression test, hereafter denoted as ML-TCT, is advantageous as shear strengths for different confining pressures can be obtained on a single specimen. ML-TCT, however, is not established as a standard test method, because of possible under-estimation of shear strengths due to accumulated damage by repeated axial compression steps. In this study, Multiple-step loading damage model is proposed to simulate ML-TCT properly, and appropriate number and procedure of axial compression steps for ML-TCT are investigated.