

2 種類の軟岩を用いた MLD モデルによる 多段階載荷三軸圧縮試験の検討

Evaluation of Multiple-step Loading Triaxial Compression Test using MLD model for two kinds of softrocks

中園 康平*・谷 和夫**・岡田 哲実***

Kobei NAKAZONO, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA

Multiple-step Loading Triaxial Compression Test, hereafter denoted as ML-TCT, was proposed by Kovari & Tisa (1975) to evaluate strength parameters, i.e. cohesion and angle of internal friction, for rocks. However, there is a possibility for ML-TCT to underestimate shear strength because of damage accumulated in the specimen with axial loading cycles. MLD model is proposed to simulate ML-TCT of various stress paths with the results of SL-TCT. This report describes the evaluation of ML-TCT using this MLD model for two kinds of softrocks.

Key Words: Softrock, Triaxial Compression Test, Multiple-step Loading, Model, Plastic axial strain

1. はじめに

岩石の強度定数(粘着力 c と内部摩擦角 ϕ)を求める方法として、Kovari & Tisa (1975) が多段階載荷三軸圧縮試験(Multiple-step Loading Triaxial Compression Test: 以後 ML-TCT とする)を提案した¹⁾。この試験を1本の供試体に対して複数の拘束圧を段階的に作用させて行えば、1本の供試体で強度定数を求めることができる。よって、十分な数量の供試体を採取できない場合に有効である。しかし、軸圧縮(せん断)を複数回行なうことで供試体に損傷が蓄積され、せん断強度を過小評価する可能性が大きいという問題があり、どのような岩石に対して ML-TCT が有効なのか検討する必要がある。

この問題を解決するために、木村・谷(2002)は ML-TCT のシミュレーションを行うための多段階載荷損傷モデル(Multiple-step Loading Damage Model: 以後 MLD モデルとする)をシルト岩に対して提案した²⁾³⁾⁴⁾。しかし、検討に用いたシルト岩の持つ性質(負のダイレイタンス、延性破壊)が他の一般的な岩石の性質(正のダイレイタンス、脆性破壊)とは異なっており、損傷の蓄積とせん断強度の低下の関係が岩種によって大きく異なることが懸念される。そこで、この問題に対して中園ら(2002)は、正のダイレイタンスと脆性破壊を特徴とする代表的な堆積岩の1つである砂岩を用いて、MLD モデルの適用性を示した⁵⁾。

本論文では、この2種類の堆積軟岩(シルト岩と砂岩)の力学的な特性と ML-TCT の有効性の関連性について、MLD モデルを用いて比較検討を行った結果を記す。

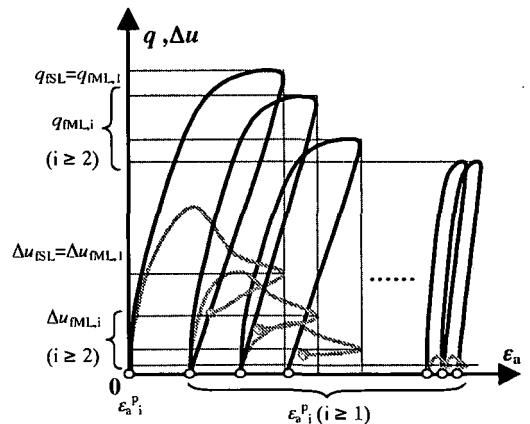


図1 MLD モデルを作成するときの
ML-TCT で得られるパラメータ

* 学生会員 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻

** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

*** 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 地圏環境部

2. MLD モデルの概要

図 1 は、MLD モデルを作成するために行う ML-TCT の結果を模式的に示したものである。圧密時の有効拘束圧 σ_c' を一定の状態では軸圧縮(せん断)と等方圧密を繰返し行ったときに得られる軸差応力・過剰間隙水圧-軸ひずみ関係である。1 サイクルの手順は、 σ_c' で等方圧密→軸圧縮(せん断)→除荷→ σ_c' で等方圧密であり、各サイクルの除荷後の等方圧密が終了した時点での残留軸ひずみを累積塑性軸ひずみ ϵ_a^p としている。この ϵ_a^p が軸圧縮(せん断)の繰返しによる供試体へのダメージを代表している点が MLD モデルの特徴である。

MLD モデルによって示される 5 つの関係を模式的に図 2 に示す。単段階載荷三軸圧縮試験 (SL-TCT) に対応する破壊強度 q_{fSL} と破壊時の過剰間隙水圧 Δu_{fSL} は、第 1 回目の載荷段階の結果により評価できる。よって、異なる σ_c' の下で ML-TCT を行うことによって $q_{fSL} \sim \sigma_c'$ 関係と $\Delta u_{fSL} \sim \sigma_c'$ 関係を得ることができる。一方 2 段階目以降の載荷結果より、 i 段階目載荷時の破壊強度 $q_{fML,i}$ を SL-TCT の破壊強度 q_{fSL} で除したピーク強度比 ($q_{fML,i} / q_{fSL}$) と、 i 段階目載荷時の破壊時の過剰間隙水圧 Δu_{fSL} で除した過剰間隙水圧比 ($\Delta u_{fML,i} / \Delta u_{fSL}$) を得ることができる。これら 2 つの比は、($i-1$) 段階目までに累積した塑性軸ひずみ $\epsilon_a^{p,i-1}$ と圧密時の有効拘束圧 σ_c' の関数で与えられると仮定した。ここで $\epsilon_a^{p,i}$ は、 i 段階目の軸載荷後に再び等方圧密状態に戻した時の塑性軸ひずみであり、軸載荷によって供試体が受けた損傷を代表するパラメータとする。さらに、 i 段階目載荷終了後の ϵ_a^p の増分 $\Delta \epsilon_a^{p,i} (= \epsilon_a^{p,i} - \epsilon_a^{p,i-1})$ に関しても、圧密時の有効拘束圧 σ_c' と ($i-1$) 段階目までに累積した塑性軸ひずみ $\epsilon_a^{p,i-1}$ で表すことができる。

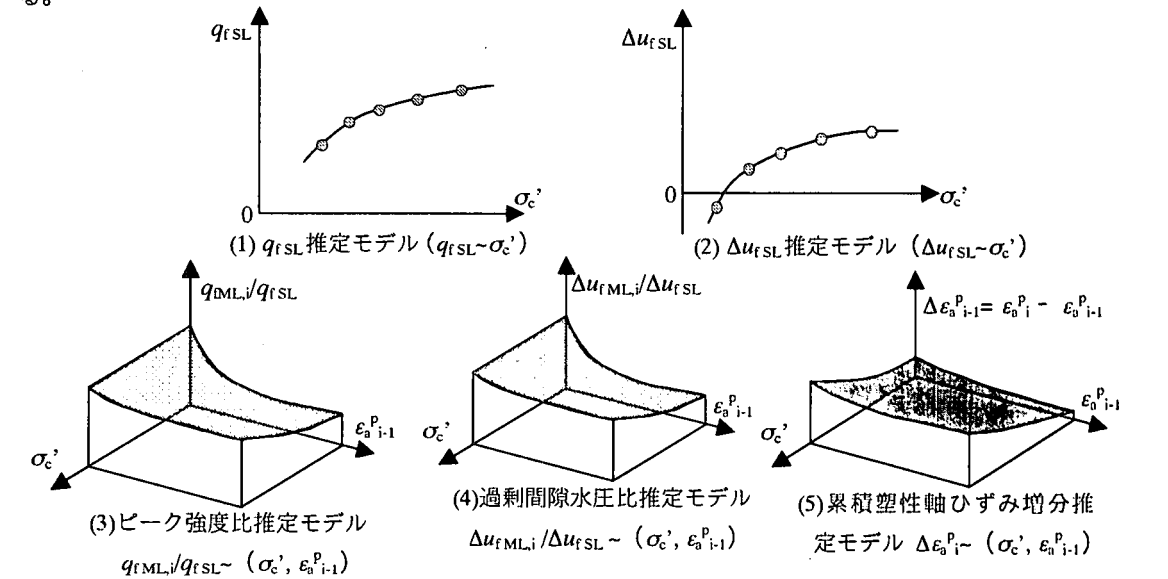


図 2 MLD モデルの概念図

3. 実験方法および実験結果

3-1. 試料

シルト岩と細粒砂岩の 2 種類の堆積軟岩を用いた。表 1 に両岩石の物理特性及び弾性波速度を示す。平均粒径 D_{50} と湿潤密度 ρ_t を比較すると、砂岩のほうが密な状態で平均粒径が大きい。シルト岩は新第三紀鮮新世後期の海成堆積岩で、ブロックサンプリングしたものである。砂岩は更新世前期～中新世の海成堆積岩で、ボーリングによって採取した。供試体を成形 (直径 50mm, 高さ 100mm の円柱) した後、湿潤密度と弾性波速度がそれぞれほぼ同一な供試体を選択し (各 9 本ずつ計 18 本) 試験に使用した。

表 1 シルト岩と砂岩の物理特性及び弾性波速度

	砂岩	シルト岩
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.92~1.95	1.70~1.79
含水比 w (%)	23.5~29.6	39.2~46.5
平均粒径 D_{50} (mm)	0.100	0.035
P 波速度 V_p (m/s)	430~610	606~1422
S 波速度 V_s (m/s)	220~330	314~495

3-2. 実験の方法

ML-TCT は、多段階で軸圧縮（せん断）を行うことを除いて地盤工学会基準：軟岩の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法（JGS2533）に準拠して行った。破壊の判断は、ピークを確実に確認でき、かつ供試体の損傷を最小限に抑えるため、軸荷重計の値が減少し始めた点とした。

応力経路には2種類ある。1つはMLDモデルを作成するために行うもので、同じ圧密有効拘束圧の下でせん断載荷・除荷（非排水状態）と等方圧密を繰り返す（図3、以下シリーズ1とする）。もう1つはMLDモデルを検証するために行うもので、段階的に圧密有効拘束圧を変化させて軸載荷・除荷（非排水状態）と等方圧密を繰り返した（図4、以下シリーズ2とする）。

3-3. 実験の結果

シリーズ1の実験では7種類の拘束圧（ $\sigma'_c=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.6, 3.2$ MPa）を設定した。図5にシリーズ1の試験で得られた主応力差・過剰間隙水圧・軸ひずみ曲線の一例を示す。

強度特性に着目すると、載荷回数の増加に伴い、シルト岩も砂岩も共に低い拘束圧では強度が明らかに低下している。一方、高い拘束圧では載荷回数が増加しても強度低下はあまり見られなかった。

過剰間隙水圧（ダイレイタンスー）については、2つの岩で大きく異なる。シルト岩では拘束圧によらず正の過剰間隙水圧が発生したのに対し、砂岩ではせん断初期に正の過剰間隙水圧が発生するが、最大となって以降は大きく減少し、低い拘束圧では破壊時に負の過剰間隙水圧となっている。

よって、シルト岩では負のダイレイタンスー（収縮性）を示し、砂岩では正のダイレイタンスー（膨張性）を示している。

累積塑性軸ひずみ ϵ_p^p に着目すると、シルト岩では載荷回数にほぼ比例して増加し、低い拘束圧の場合に発生する ϵ_p^p は小さい。一方、砂岩では1回目の載荷段階の ϵ_p^p が2回目以降に比べ大きく、また拘束圧に対する依存性はあまり顕著ではない。

図6～図10に、シリーズ1の試験結果をもとに作成したMLDモデルを示す。

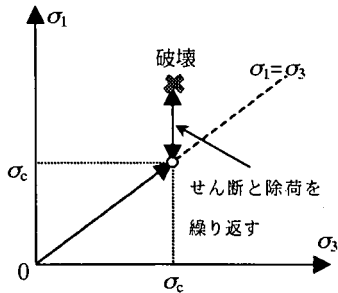


図3 シリーズ1の試験方法

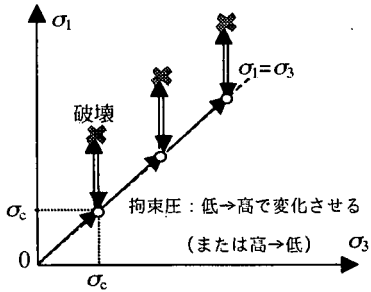


図4 シリーズ2の試験方法

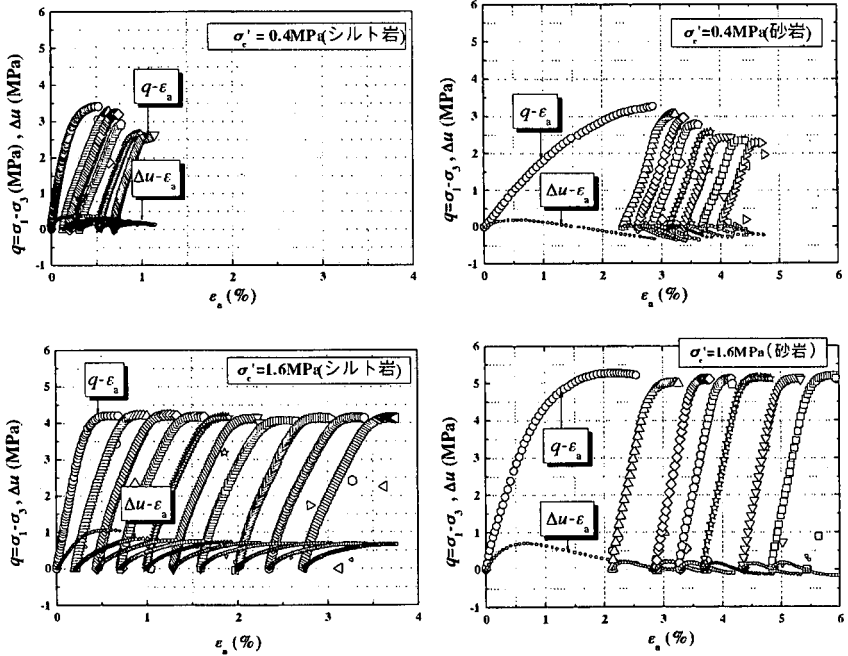


図5 シリーズ1の実験結果

(1) q_{fSL} を推定するモデル【 $q_{fSL} \sim \sigma'_c$ 】, (2) Δu_{fSL} を推定するモデル【 $\Delta u_{fSL} \sim \sigma'_c$ 】

SL-TCTのピーク時の軸差応力と過剰間隙水圧は、ML-TCTの1段階目の载荷によって求まる。

$q_{fSL} \sim \sigma'_c$ 関係と $\Delta u_{fSL} \sim \sigma'_c$ 関係がほぼ線形的であったので、最小二乗法によって直線近似した。

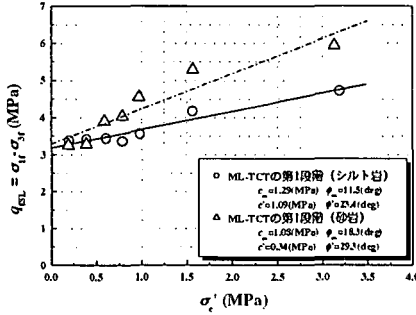


図6 q_{fSL} を推定するモデル(1)【 $q_{fSL} \sim \sigma'_c$ 】

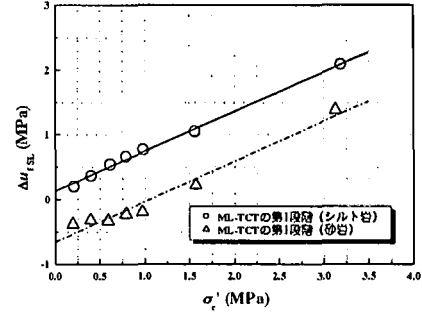


図7 Δu_{fSL} を推定するモデル(2)【 $\Delta u_{fSL} \sim \sigma'_c$ 】

(3)ピーク強度比を推定するモデル【 $q_{fML,i}/q_{fSL} \sim (\sigma'_c, e_{a,i-1}^p)$ 】について

シルト岩,砂岩共に低い拘束圧では、累積塑性軸ひずみ e_a^p の増加に伴い強度が大きく低下している。一方、高い拘束圧では、強度低下はあまり見られず、砂岩では $\sigma'_c = 3.2\text{MPa}$ 時に強度の増加が見られた。

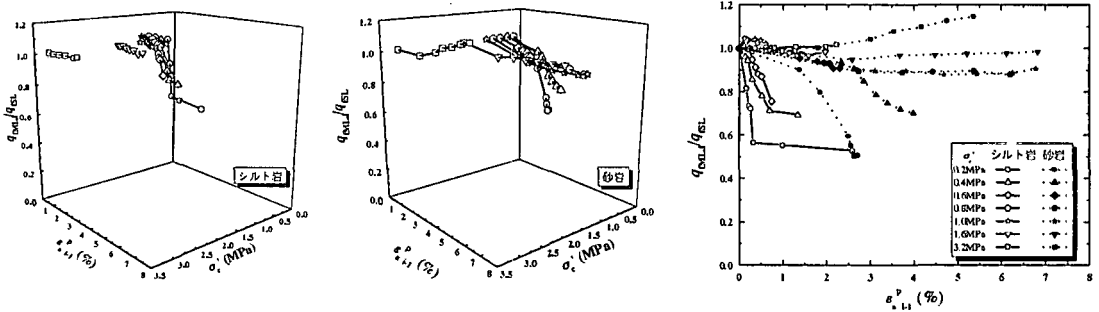


図8 ピーク強度比を推定するモデル(3)【 $q_{fML,i} \sim (\sigma'_c, e_{a,i-1}^p)$ 】(左・中:2次元表記,右:3次元表記)

(4)破壊時の過剰間隙水圧比を推定するモデル【 $\Delta u_{fML,i}/\Delta u_{fSL} \sim (\sigma'_c, e_{a,i-1}^p)$ 】

シルト岩では Δu_{fSL} が常に正であるが、砂岩では Δu_{fSL} が $\sigma'_c = 1.0\text{MPa}$ を境に正負が変化している。シルト岩では、破壊時の過剰間隙水圧比は e_a^p と共に徐々に減少する傾向を示し、拘束圧が上昇するにつれ、減少の仕方が緩やかに推移している。一方、砂岩における低い拘束圧での過剰間隙水圧 $\Delta u_{fML,i}$ の挙動を見ると、 $\sigma'_c \leq 1.0\text{MPa}$ では e_a^p と共に $\Delta u_{fML,i}/\Delta u_{fSL}$ が増加しているが、 $\sigma'_c > 1.0\text{MPa}$ では減少している。

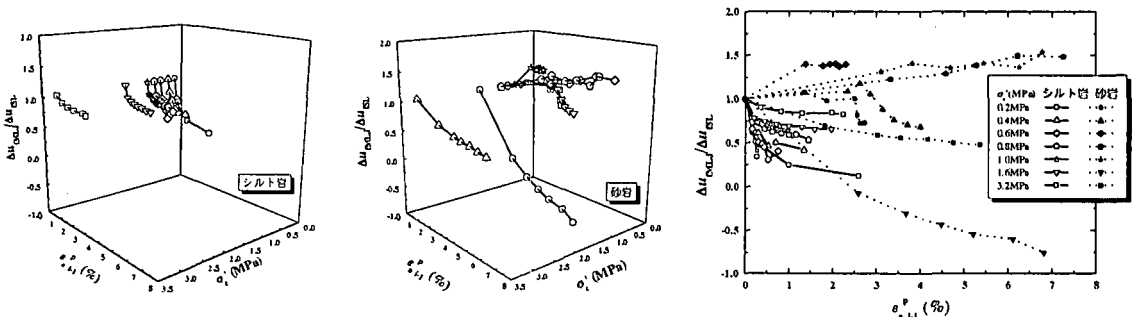


図9 過剰間隙水圧比推定モデル(4)【 $\Delta u_{fML,i} \sim (\sigma'_c, e_{a,i-1}^p)$ 】(左・中:2次元表記,右:3次元表記)

(5) 累積塑性軸ひずみ増分を推定するモデル【 $\Delta \varepsilon_a^p \sim (\sigma_c', \varepsilon_a^p, \varepsilon_a^p)_{i-1}$ 】について

1 回目の载荷段階で発生する ε_a^p に注目すると、シルト岩では全般に小さい値 (0.5%以下) で拘束圧と共にやや増加しているのに対し、砂岩では大きな値 (1~3%) で拘束圧に依存しない。また ε_a^p の増分の傾向は、シルト岩では载荷回数にあまり依存しないが、砂岩では载荷回数の増加に伴い減少する。

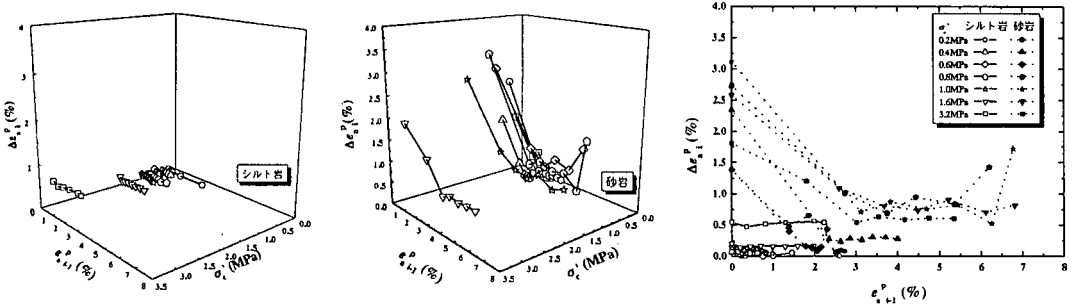


図 10 累積塑性軸ひずみ増分を推定するモデル(5)【 $\Delta \varepsilon_a^p \sim (\sigma_c', \varepsilon_a^p, \varepsilon_a^p)_{i-1}$ 】(左・中: 2次元表記, 右: 3次元表記)

4. MLD モデルの検証

MLD モデルの適用性の検証では、図 4 に示すシリーズ 2 の ML-TCT を実験した結果と、MLD モデルを用いてシミュレーションした結果を比較した。シミュレーションのフローを図 11 に示す。計算の方法は、図 6 及び図 7 に示す関係は有効拘束圧 σ_c' に対して線形に変化すると仮定し、図 8 から図 10 に示す関係は有効拘束圧 σ_c' に対して非線形に変化しているの、実験データ間を線形補間することにした。

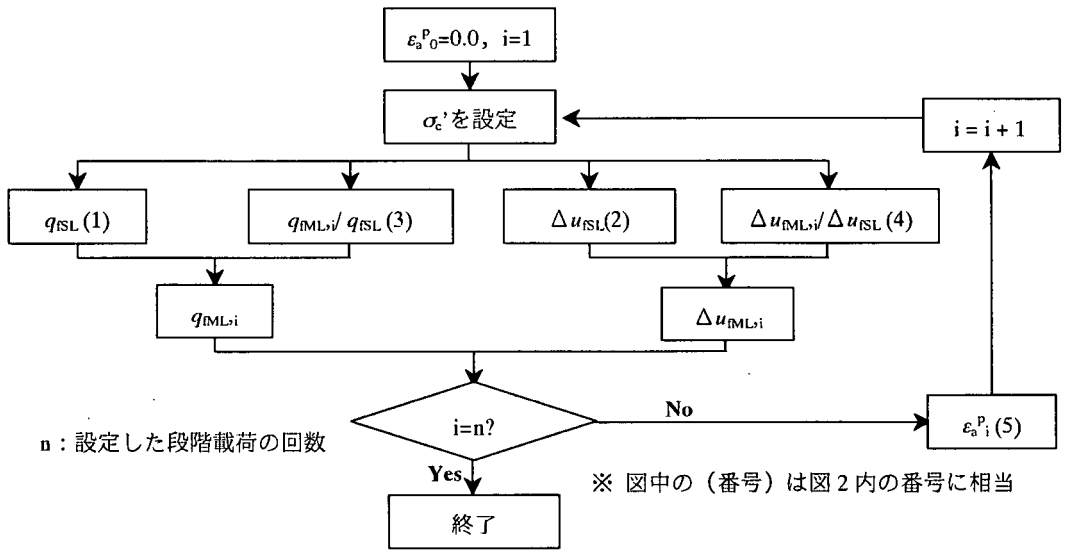


図 11 MLD モデルによるシリーズ 2 の ML-TCT のシミュレーションフロー

シリーズ 2 の試験の応力経路は、図 4 に示す拘束圧を増加させるケースと、低下させるケースで行なった。得られた軸差応力・過剰間隙水圧・軸ひずみ曲線を図 12 に示す。また、図 13 にシリーズ 2 の結果と MLD モデルを用いたシミュレーションの結果を各载荷段階の破壊時の全応力と有効応力で比較した。シルト岩も砂岩も、共に MLD モデルを用いた計算結果が実験の結果と整合性があるのが分かる。よって MLD モデル上で ML-TCT を再現できると判断した。

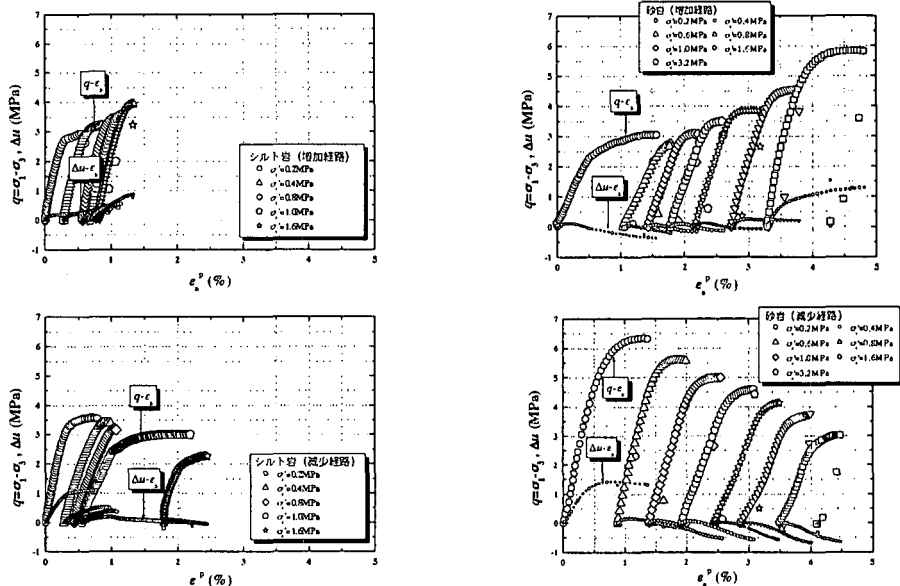


図 12 シリーズ 2 の実験結果

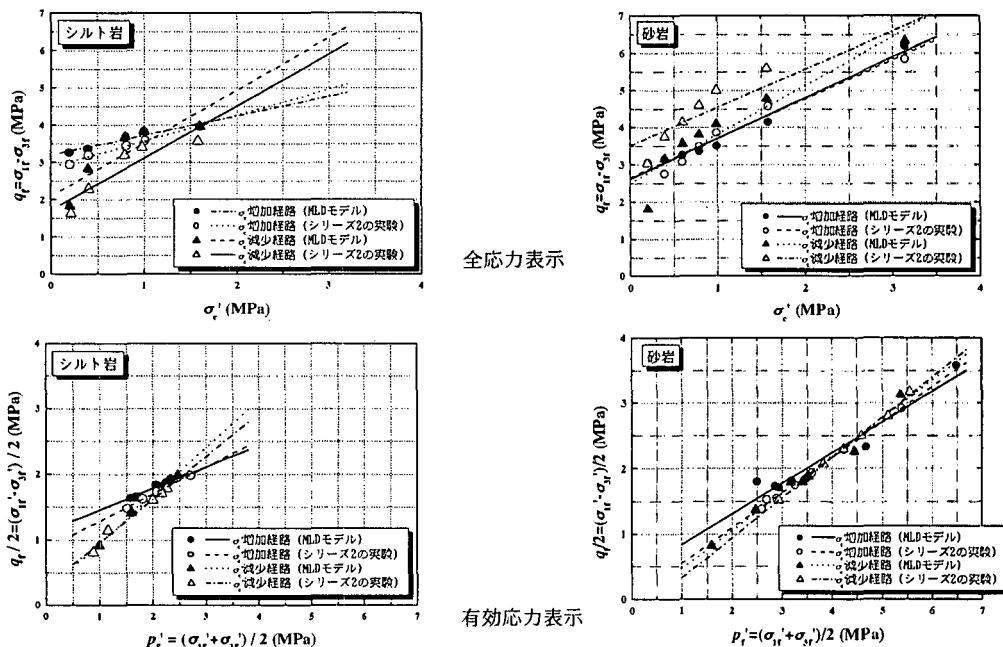


図 13 MLD モデルを用いたシミュレーションと実験による ML-TCT の比較

5. ML-TCT の検討

SL-TCT の代替法となり得る ML-TCT の試験方法を提案するため、ML-TCT の問題点である有効拘束圧の設定順序と載荷回数の影響について、MLD モデルを用いたシミュレーションによって検討を行う。

5-1. 有効拘束圧の設定順序

有効拘束圧の設定順序は、低い拘束圧から順に増加させる経路 ($\sigma'_c = 0.2 \sim 0.4 \sim 0.8 \sim 1.6 \sim 3.2 \text{ MPa}$)、高い拘束圧から順に減少させる経路 ($\sigma'_c = 3.2 \sim 1.6 \sim 0.8 \sim 0.4 \sim 0.2 \text{ MPa}$)、低い拘束圧と高い拘束圧を交互に行う 2 種類の不規則な経路 ($\sigma'_c = 0.2 \sim 3.2 \sim 0.4 \sim 1.6 \sim 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma'_c = 3.2 \sim 0.2 \sim 1.6 \sim 0.4 \sim 0.8 \text{ MPa}$) を選択した。図 14 に各載荷段階の破壊時

の全応力と有効応力を比較し、表 2 にせん断強度定数を比較した結果を示す。

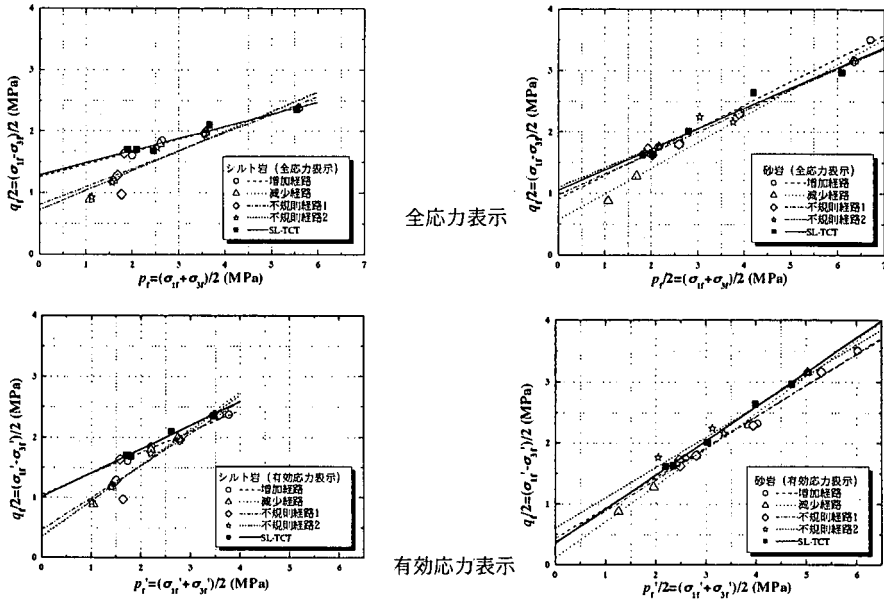


図 14 応力経路の違いによるシミュレーション結果

表 2 応力経路の違いによるせん断強度定数の比較

応力経路の種類	シルト岩				砂岩			
	全応力表示 (c_{cu} , ϕ_{cu})		有効応力表示 (c' , ϕ')		全応力表示 (c_{cu} , ϕ_{cu})		有効応力表示 (c' , ϕ')	
	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}
増加経路	1.000	1.000	1.000	0.987	0.973	1.059	1.093	0.986
減少経路	1.000	1.000	1.027	0.943	0.921	1.074	1.513	0.888
不規則経路 1	1.015	0.982	1.045	0.908	0.859	1.123	1.327	0.903
不規則経路 2	1.000	1.009	1.027	0.913	0.856	1.135	1.779	0.885

シルト岩では、拘束圧を増加させていく経路が最も SL-TCT に近い結果を示した。一方砂岩では、低い拘束圧から順に増加させる経路、もしくは低い拘束圧と高い拘束圧を交互に行う不規則な経路 1 が最も SL-TCT に近い結果を示した。

減少経路及び不規則経路 2 が適用できない理由として、図 6 の直線近似は Mohr-Coulomb の破壊規準によって行ったが、図 6 の砂岩のデータを見ても分かるように、一般的に岩石の内部摩擦角は拘束圧に依存する。よって、直線近似によって、高い拘束圧になるにつれて破壊強度が過大評価される傾向がある。また、表 2 のせん断強度定数の比を見ると、シルト岩に比べ砂岩のほうが誤差が大きい。理由として、図 10 より、蓄積される塑性軸ひずみ ϵ_p^s がシルト岩に比べ砂岩のほうが大きいことが考えられ、塑性ひずみが生じやすい岩石に対する ML-TCT の適用性が低くと思われる。さらに、低い拘束圧の ML-TCT を後期の载荷段階で行うと、既に塑性軸ひずみ ϵ_p^s が大きく蓄積しているために、発揮される強度が過小評価されてしまうことも分かる。よって、砂岩に対して有効と考えられる経路は、低拘束圧時の ML-TCT を初期の载荷段階で完了できるような経路である。

5-2. 载荷回数の影響

有効拘束圧の設定順序は、2 種類の軟岩に対して適切と判断された増加経路とし、 $\alpha'_c = 0.2 \sim 3.2 \text{ MPa}$ の範囲で

2,3,4,5,7 回の載荷回数に対してシミュレーションを行った。表 3 に、載荷回数の違いによる影響をせん断強度定数で比較したものを示す。

粘着力と内部摩擦角に関して、シルト岩では載荷回数に関わらず SL-TCT との大きな差は見られない。一般的に SL-TCT によって強度定数を評価する場合は、3~5 個の供試体を用いてそれぞれ異なる拘束圧で実験を行う事から判断して、ML-TCT も段階載荷回数は 3~5 回が適当であると思われる。

一方砂岩では、載荷回数によってせん断強度定数に大きな差が生じる。特に、全応力で表示した時の強度定数

表 3 載荷回数の違いによるせん断強度定数の比較

段階載荷 回数 N	シルト岩				砂岩			
	全応力表示 (c_{cu} , ϕ_{cu})		有効応力表示 (c' , ϕ')		全応力表示 (c_{cu} , ϕ_{cu})		有効応力表示 (c' , ϕ')	
	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}	c_{ML}/c_{SL}	ϕ_{ML}/ϕ_{SL}
2	1.000	1.000	1.000	0.987	0.973	1.059	1.093	0.986
3	1.000	1.000	1.027	0.943	0.921	1.074	1.513	0.888
4	1.015	0.982	1.045	0.908	0.859	1.123	1.327	0.903
5	1.000	1.009	1.027	0.913	0.856	1.135	1.779	0.885
7	1.015	1.000	1.045	0.865	0.758	1.199	1.101	0.928

は、載荷回数が多くなるに従って、SL-TCT との差が大きくなっているのが分かる。また有効応力で表示した場合、内部摩擦角に関しては載荷回数に関わらずほぼ一定の値となっているが、粘着力に関しては大きくばらついている。よって砂岩では、適切な載荷回数の選択についても配慮が難しいことが分かる。

6.まとめ

多段階載荷損傷モデル（MLD モデル）を用いて、シルト岩と砂岩の 2 つの堆積軟岩に ML-TCT を適用した時にどのような影響が生じるか、比較検討を行った。その結果、以下に示す知見が得られた。

- ① シルト岩にも砂岩にも MLD モデルを適用することができる。
- ② 拘束圧の設定順序は、シルト岩には低い拘束圧から増加させる経路が最も有効である。一方、砂岩には、低い拘束圧の時に生じる塑性軸ひずみ ϵ_p が、高い拘束圧の時に生じる ϵ_p に比べ大きいため、初期の段階で低い拘束圧の軸載荷を行うのが望ましい。よって、低い拘束圧から増加させる経路と共に、低い拘束圧から始めて高い拘束圧と交互に行う不規則な経路の適用性が高い。
- ③ 載荷回数について、上記の②で示した増加経路を用いた場合、シルト岩では 3~5 回の載荷回数が最も適当であった。一方砂岩では、適切な載荷回数の選択が困難であった。

今後、MLD モデルを構成する 5 つの関係を定式化し、多段階載荷の三軸圧縮試験の適用性を検討する予定である。

参考文献

- 1) Kovari,K. and Tisa,A. : Multiple failure state and strain controlled triaxial test, *Rock Mechanics*. Vol.7, pp.17~33,1975.
- 2) 木村 誠, 谷 和夫 : 多段階載荷損傷モデルの提案,第 56 回土木学会年次学術講演会, 3-A, pp.550~551, 2001.
- 3) 木村 誠, 谷 和夫, 岡田 哲実 : 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 回岩の力学シンポジウム, A02, 2002.
- 4) 木村 誠, 谷 和夫, 岡田 哲実 : 多段階載荷の三軸圧縮試験のモデル化とその適用性の検討, 土木学会論文集, No.722/III-61, 2002.
- 5) 中園 康平, 岡田 哲実, 谷 和夫 : 砂岩を用いた多段階載荷三軸圧縮試験に対する MLD モデルの適用性に関する実験的検討, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.619~620, 2002.