

多段階載荷損傷モデル(MLDモデル)を用いた 多段階載荷方式の三軸試験の適用性の検討

谷 和夫^{1*}・Abbas Taheri²

¹横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²東京理科大学 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

*E-mail: tani@ynu.ac.jp

岩石の強度特性を三軸圧縮試験により効率良く評価する方法として、1つの供試体に対して複数の拘束圧下で軸圧縮を行う多段階載荷方式が採用される。しかし、繰返し載荷による損傷が供試体に蓄積することでせん断強さが過小評価される問題があり、適切な載荷経路(拘束圧の順序)や、得られる強度定数(粘着力とせん断抵抗角)の誤差の程度を検討する必要がある。そこで、新たに多段階載荷損傷モデル(MLDモデル)を開発し、さまざまな載荷経路や岩種について多段階載荷方式の三軸試験をシミュレーションした。その結果、拘束圧を順次上げていく載荷経路が適切であること、岩石の一軸圧縮強さと得られる強度定数の誤差の関係、硬岩では粘着力の過大評価し易いことが分かった。

Key Words : triaxial test, multiple-step loading, damage, shear strength, cohesion, frictional angle

1. はじめに

1つの供試体に対して異なる拘束圧の下で圧密と軸圧縮を行う多段階載荷方式の三軸圧縮試験(ML-TCT)が Kovari & Tisa (1975) によって提案された。適切なタイプの岩石であれば、少ない供試体で強度特性を評価することができるし、その場所的な依存性(一様性)の評価も効率的に行える利点がある。この試験方法は ISRM 標準が提案され(Kovari et al., 1983)、節理を含む岩石に対しても推奨されている(Goodman, 1976)。一方、繰返し載荷により供試体に蓄積する損傷によって2回目以降の載荷段階で計測されるせん断強さは単段階載荷方式の三軸圧縮試験(SL-TCT)の結果を過小評価する傾向があることが指摘されている。これまで、SL-TCTの結果との比較(赤井 他, 1981)や、応力経路や破壊の判定方法の検討(Kim & Ko, 1979; Crawford & Wylie, 1987; Bro, 1997; Pagoulatos, 2004)が行われてきた。

著者らは、軟岩に対して繰返し載荷により供試体に蓄積する損傷を評価する多段階載荷損傷モデル(Multiple-step Loading Damage Model, 以後 MLD モデルと称す)を提案してきた(木村・谷, 2001)。そして、3種類の堆積軟岩についてその適用性を実証し、数値実験により最適の応力経路や繰返し載荷の回数を検討してきた(木村 他, 2002; 中園 他, 2003; Taheri & Tani, 2008)。この論文では、より硬質な岩種である中硬岩や硬岩について

MLD モデルを用いて ML-TCT の適用性を評価した結果を報告する。

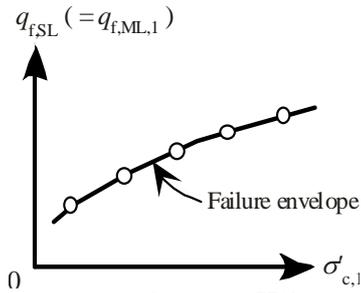
2. 多段階載荷損傷モデル(MLDモデル)

(1) 軟岩のみを対象とした従来の多段階載荷損傷モデル

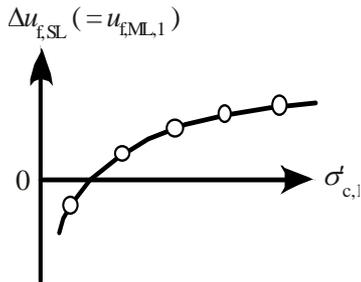
MLD モデルを構成する5つの関係を図-1に示す。これらの関係は、図-2に示す一定の有効拘束圧 σ_c において等方圧密と非排水条件下での軸圧縮の載荷・除荷を繰返し行う ML-TCT を複数の異なる σ_c で行って得ることができる。また、図-1に示す関係から ML-TCT をシミュレーションする手順を図-3に示す。このモデルでは、 i 回目までの繰返し載荷によって供試体に蓄積する損傷を除荷後に残留する軸ひずみ、すなわち累積塑性軸ひずみ $\epsilon_{a_i}^p$ によって代表させた。

図-2に示す ML-TCT の1回目の載荷段階には繰返し載荷の影響がないので、その σ_c の下で行われた SL-TCT に対応する。よって、損傷がない状態に対する破壊時の軸差応力(せん断強さ) q_{iSL} と σ_c の関係(図-1a)および破壊時の過剰間隙水圧 Δu_{iSL} と σ_c の関係(図-1b)は、異なる σ_c の下で行われた ML-TCT の1回目の載荷段階から求められる。そして同じ ML-TCT の2回目以降の載荷段階からは、 i 回目の載荷段階と1回目の載荷段階による破壊時の軸差応力(せん断強さ)の比 q_{iML}/q_{iSL} および

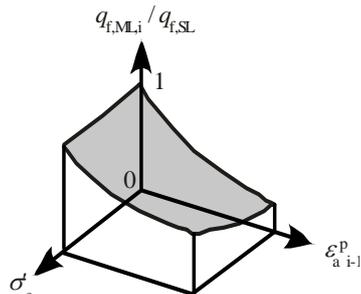
び破壊時の過剰間隙水圧の比 $\Delta u_{f,ML,i}/\Delta u_{f,SL}$ を求めることができる。図-1c および図-1d に示すように、これら 2 つ



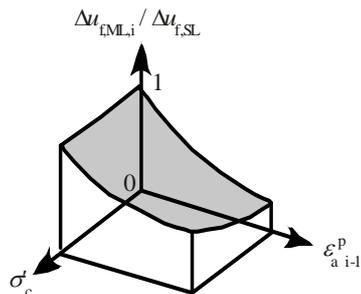
(a) $q_{f,SL}$ を推定する関係



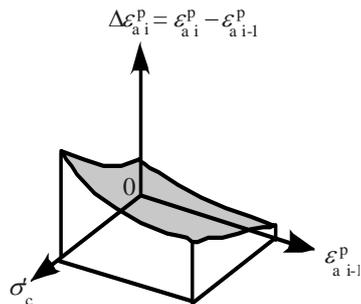
(b) $\Delta u_{f,SL}$ を推定する関係



(c) $q_{f,ML,i}/q_{f,SL}$ を推定する関係



(d) $\Delta u_{f,ML,i}/\Delta u_{f,SL}$ を推定する関係



(e) $\Delta \epsilon_{a,i}^p$ を推定する関係

図-1: MLDモデルを構成する5つの関係の概念

の比は $(i-1)$ 回目までの荷段階に蓄積された損傷の大きさを表す $\epsilon_{a,i-1}^p$ と σ_c の関数として記述される。さらに i 回目の荷段階によって新たに蓄積された損傷の大きさを表す塑性軸ひずみの増分 $\Delta \epsilon_{a,i}^p = \epsilon_{a,i}^p - \epsilon_{a,i-1}^p$ も、同じ ML-TCT の結果から求められ、図-1e に示すように $\epsilon_{a,i-1}^p$ と σ_c の関数で記述される。

(2) 軟岩～硬岩を対象に提案する多段階荷損傷モデル
(a) 破壊挙動の特徴と繰返し荷により供試体に蓄積する損傷の関係

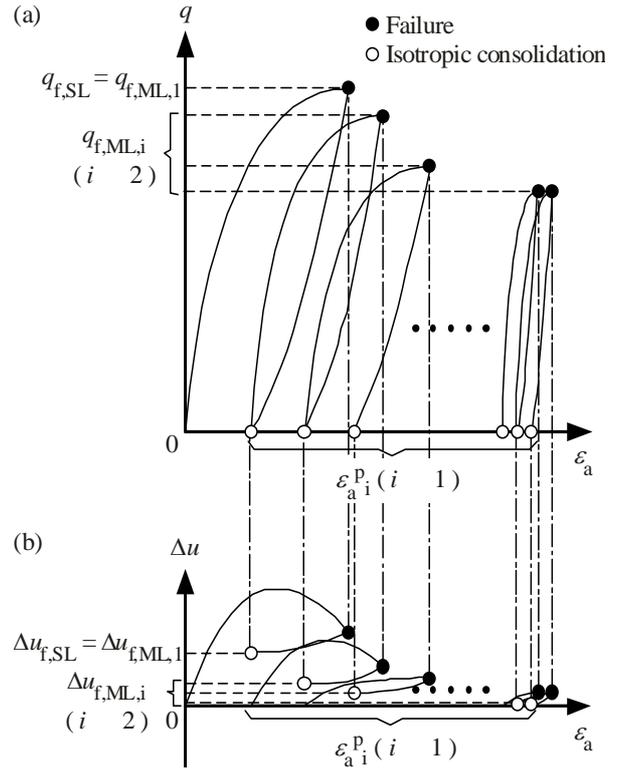


図-2: 一定の有効拘束圧 σ_c において非排水条件の下で軸圧縮の繰返し荷・除荷を行う ML-TCT

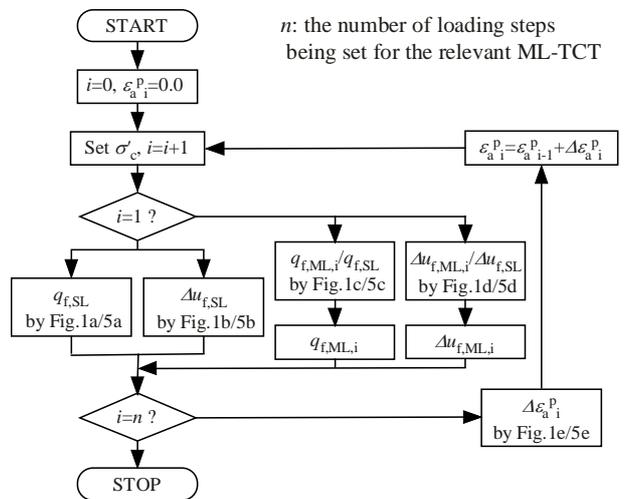


図-3: MLDモデルにより ML-TCT をシミュレーションする手順

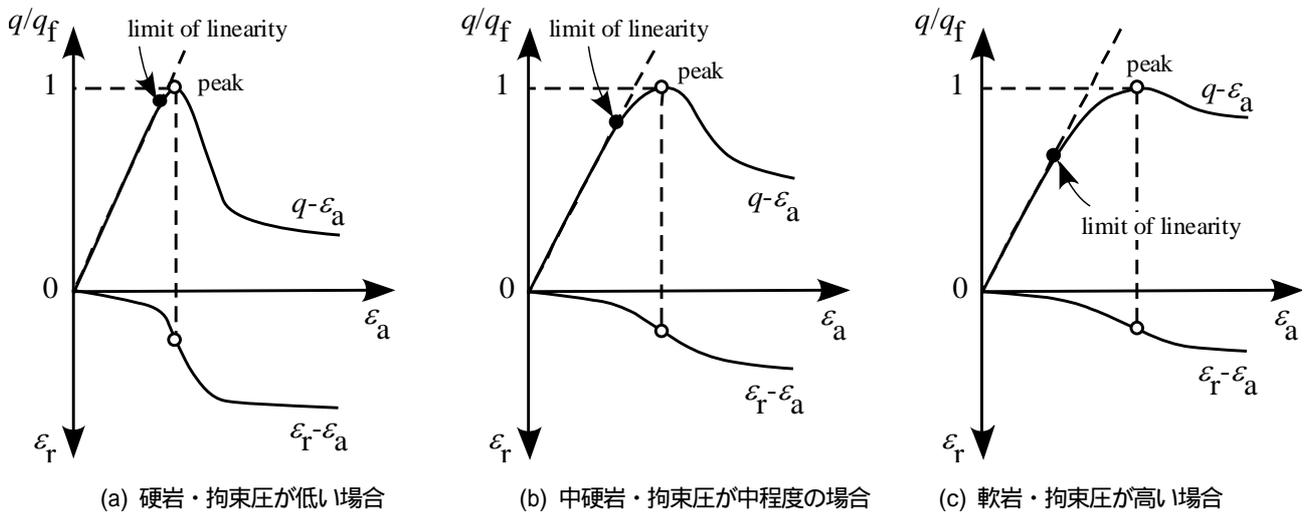


図-4：排水条件下におけるSL-TCTによる軸差応力比 q/q_f および側方ひずみ ε_a と軸ひずみ $\varepsilon_r - \varepsilon_a$ の関係の概念

Kim & Ko (1979) は ML-TCT の有効性が応力とひずみの関係に依存することを議論し、特に破壊近傍から破壊後の挙動が重要であると指摘した。そこで、図-4 に示すように、排水条件下における SL-TCT による軸差応力比 q/q_f および側方ひずみ ε_a と軸ひずみ $\varepsilon_r - \varepsilon_a$ の関係を岩種と拘束圧の大きさによって3タイプに分け、破壊近傍から破壊後の挙動と ML-TCT の繰返し载荷により供試体に蓄積する損傷および破壊の判定の難易度について考察した。

図-4a に示す第1のタイプは、 ε_r と ε_a の関係で示される体積膨張が破壊近傍で大きく、顕著なひずみ軟化を伴う脆性破壊が特徴である。硬岩や有効拘束圧 σ_c が低い場合がこのタイプに対応するが、 q/q_f と ε_a の関係において線形限界と破壊点が近く前兆を伴わずに突然に破壊を生じるので破壊の判定（载荷・除荷の反転）が遅れて供試体に過大な損傷を与え易く、ML-TCT を適用することは容易ではない。

図-4b に示す第2のタイプは、ひずみ軟化を伴う脆性破壊が特徴であるが、その程度や破壊近傍の体積膨張は第1のタイプより小さい。中硬岩や σ_c が中程度の場合がこのタイプに対応し、 q/q_f と ε_a の関係において破壊のやや前に非線形性が確認できるので破壊の判定が容易で供試体に与える損傷も小さく抑えられ、一般に ML-TCT を適切に適用することが可能である。

図-4c に示す第3のタイプは、ひずみ軟化の程度が小さいか若干のひずみ硬化を伴う延性破壊が特徴で、破壊近傍の体積変化は小さい（わずかな膨張ないし収縮を示す）。軟岩や σ_c が高い場合がこのタイプに対応し、 q/q_f と ε_a の関係において破壊のかなり前から塑性変形による非線形性が顕著になるので破壊を判定することは容易だが、延性破壊の傾向が著しいと供試体に過大な損傷を与えてしまう虞がある。

以上に議論したように、繰返し载荷により供試体に蓄

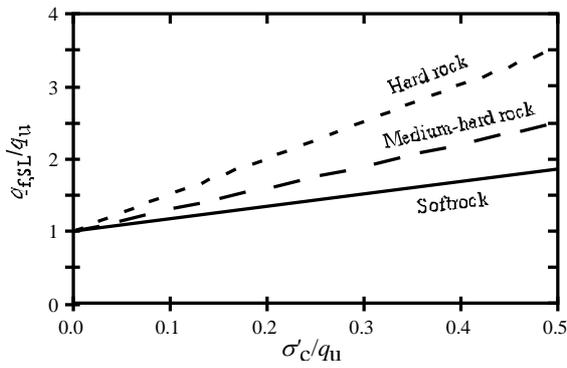
積する損傷の大きさや破壊の判定の難易度は、図-4 に示す岩種や σ_c 、すなわち破壊近傍から破壊後の挙動（破壊前の応力～ひずみ関係の線形性、破壊時の塑性変形の程度、破壊の脆性度）に依存する。そこで、全ての岩種に MLD モデルの適用を拡大するにあたっては、岩種の相違および σ_c の大きさの影響を考慮するため、 σ_c を岩石の一軸圧縮強さ q_u で無次元化したパラメータで図-1 に示す5つの関係を記述することとした。ちなみに、軟岩・中硬岩・硬岩の区別は、それぞれ $q_u < 25\text{MPa}$ ・ $25 < q_u < 50\text{MPa}$ ・ $50\text{MPa} < q_u$ とした。

(b) 全ての岩種を対象とするMLDモデル

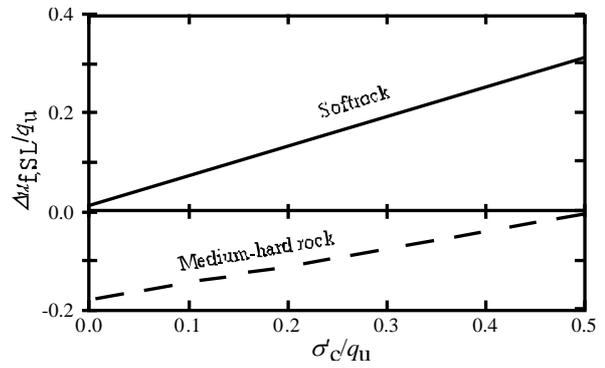
前項(a)で議論した内容を考慮して構築した全ての岩種を対象とするMLDモデルの5つの関係を図-5に示す。

SL-TCT による破壊時の軸差応力（せん断強さ） q_{fSL} は、岩石の一軸圧縮強さ q_u で無次元化した q_{fSL}/q_u と σ_c/q_u の関係（図-5a）とし、切片が1.0で高強度・高剛性の岩種ほど σ_c に対する増加傾向が大きい直線で表した。なお、この直線の傾きは $2\sin\phi/(1-\sin\phi)$ で表されるので、せん断抵抗角 ϕ のみを反映しており、粘着力 c はこの ϕ と q_u ($=2c \cos\phi/(1-\sin\phi)$) に関連付けられる。

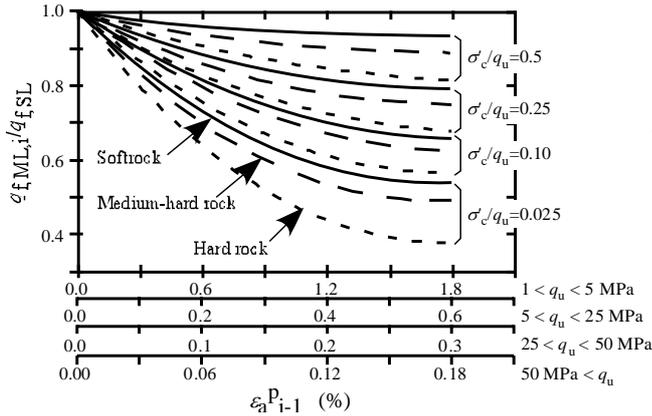
また、同じく SL-TCT による破壊時の過剰間隙水圧 Δu_{fSL} も q_u で無次元化した $\Delta u_{fSL}/q_u$ と σ_c/q_u の関係（図-5b）とし、ダイレイタンシー特性を考慮して $\sigma_c/q_u < 0.5$ の範囲で直線（ Δu_{fSL} は軟岩では正に中硬岩では負）で表した。岩種、すなわち q_u のみに依存する極めて単純化した関係としたが、間隙比（間隙率）ないし乾燥密度に依存する関係が好ましく、また、より高い拘束圧の下（ $\sigma_c/q_u > 0.5$ ）では一定値に収束する非線形な関係が適切と思われる。なお、硬岩に対しては有効応力原理の適用が可能かどうか分からないので、この過剰間隙水圧の影響は無視した。



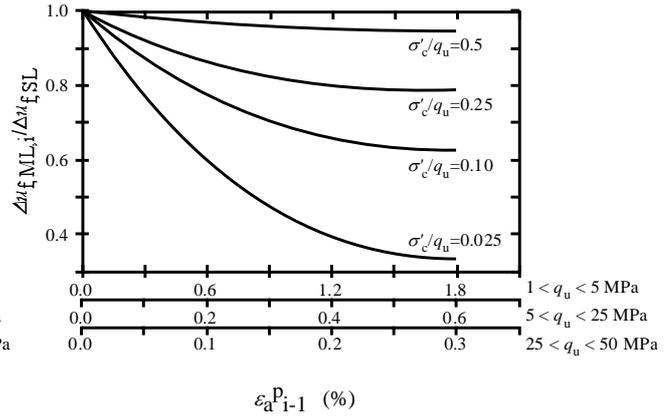
(a) q_{fSL} を推定する関係



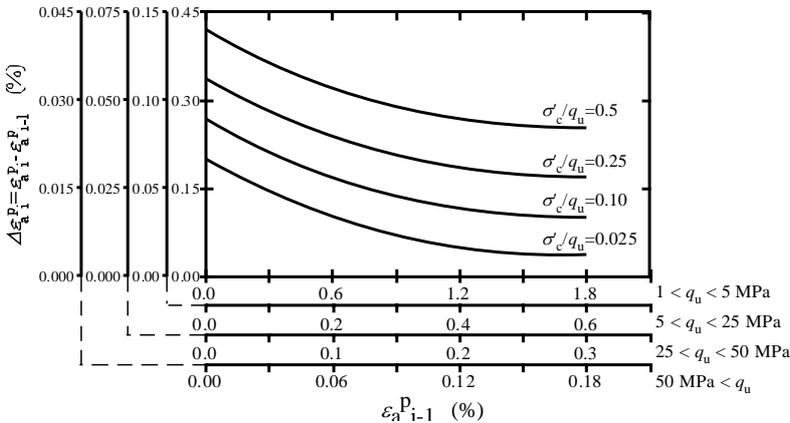
(b) Δu_{fSL} を推定する関係



(c) $q_{fML,i}/q_{fSL}$ を推定する関係



(d) $\Delta u_{fML,i}/\Delta u_{fSL}$ を推定する関係



(e) $\Delta \varepsilon_a^P$ を推定する関係

図-5: 全ての岩種に対する MLD モデルを構成する 5 つの関係

また、ML-TCT の繰返し载荷による破壊時の軸差応力（せん断強さ）の低下の程度 $q_{fML,i}/q_{fSL}$ は、岩種（ q_u ）および σ_c 毎に累積塑性軸ひずみ $\varepsilon_a^{P_{i-1}}$ の関数（図-5c）として表した。 $\varepsilon_a^{P_{i-1}}$ が大きくなると 1.0 から低下して一定値に漸近するが、高強度・高剛性の岩種ほど、そして σ_c が低いほど $q_{fML,i}/q_{fSL}$ が低下する傾向が著しくなるとした。また、繰返し载荷による破壊時の過剰間隙水圧の低下の程度 $\Delta u_{fML,i}/\Delta u_{fSL}$ と $\varepsilon_a^{P_{i-1}}$ の関係（図-5d）についても、岩種（ q_u ）と σ_c に対して同様な関係になるとした。

さらに、ML-TCT の繰返し载荷による塑性軸ひずみの増分 $\Delta \varepsilon_a^P$ も、岩種（ q_u ）および σ_c 毎に $\varepsilon_a^{P_{i-1}}$ の関数（図-5e）として表した。

図-5 に示す 5 つの関係の設定においては、既往の実験結果を参考にした。また、軟岩については、この MLD モデルの適用性が高いことを相模原市の地下実験場（東急建設（株）、STUD）から得られた鮮新世後期の泥岩（土丹、 $q_u=4\sim6$ MPa）を対象に確認した。これらの詳細については Taheri（2008）を参照されたい。

3. MLDモデルを利用したML-TCTの数値実験

幅広い岩種について ML-TCT の適用性を検討するため、2 章に記した MLD モデルを利用した数値実験を行った。

軟岩・中硬岩・硬岩の3タイプの岩種を代表する一軸圧縮強さ q_u の値をそれぞれ 20, 40, 80MPa とした。また、繰返し载荷を行う有効拘束圧 σ'_c は $\sigma'_c/q_u=0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50$ の8段階とし、漸増する場合と漸減する場合の2ケースの応力経路を設定した。

計算の手順を図-3 に示す。1 回目の载荷段階 (SL-TCT) については、破壊時の軸差応力 (せん断強さ) $q_{EML1}=q_{ESL}$ と破壊時の過剰間隙水圧 $\Delta u_{EML1}=\Delta u_{ESL}$ を図-5a と図-5b から求める。そして、2 回目以降の载荷段階については、図-5e より求められる塑性軸ひずみの増分 $\Delta \epsilon_{pi}^p$ を加算した累積塑性軸ひずみ ϵ_{pi}^p を考慮して図-5c と図-5d から q_{EMLi} と Δu_{EMLi} を求める。なお、硬岩では過剰間隙水圧の影響 (図-5b と図-5d) を無視して検討を行った。

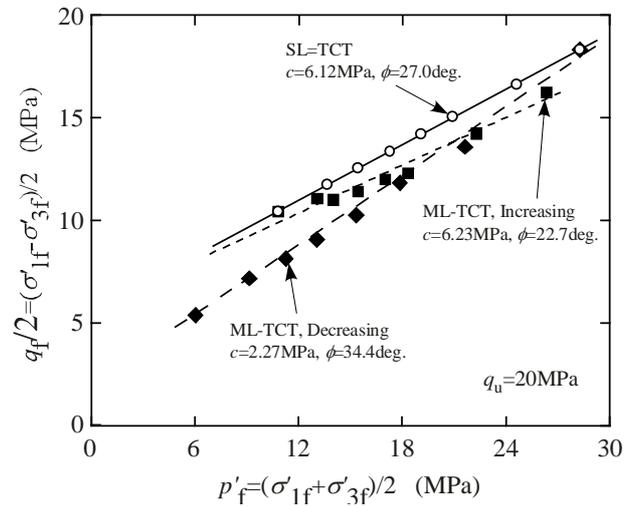
SL-TCT の破壊時の応力と σ'_c を漸増する場合および漸減する場合をシミュレーションした ML-TCT の破壊時の応力を図-6 に比較して示す。縦軸は破壊時の軸差応力 (せん断強さ) q_f の 1/2、横軸は破壊時の平均有効主応力 p'_f を表し、直線回帰した Mohr-Coulomb の破壊規準線と強度定数 (粘着力 c , せん断抵抗角 ϕ) も示す。さらに、ML-TCT によって評価される強度定数の SL-TCT による強度定数 (図-5a で設定した強度定数) に対する誤差と q_u の関係を図-7 に示す。

σ'_c を漸増する一般的な方法では、 c を過大評価するが、 ϕ を過小評価する。 c の過大評価の程度は、軟岩や中硬岩では 5%以下と小さいが、硬岩では 16%とやや大きい。また、 ϕ の過小評価の程度は岩種に依らず 14~16%である。

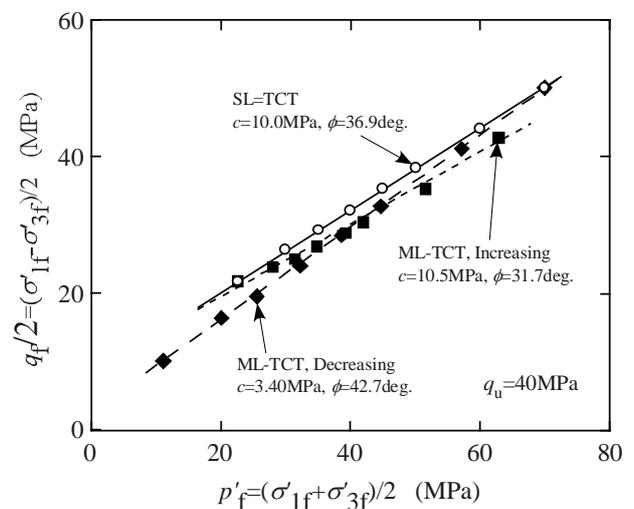
一方、 σ'_c を漸減する方法では、上記と逆の傾向 (c を過小評価、 ϕ を過大評価) となる。 ϕ の過大評価の程度は q_u が小さいほど大きく、10~27% である。しかし、 c については過小評価の程度が 60%を超えている。高い σ'_c における繰返し载荷を前半に行ってしまうために供試体に大きい損傷を与えてしまい、後半の低い σ'_c における繰返し载荷で破壊時の軸差応力 (せん断強さ) が非常に低く得られてしまうからである。したがって、後続の载荷段階における破壊時の軸差応力 (せん断強さ) をなるべく過小評価しないように、前半の繰返し载荷によって供試体に蓄積してしまう損傷を抑えることが可能な σ'_c を漸増する応力経路がより適切である。

4. まとめ

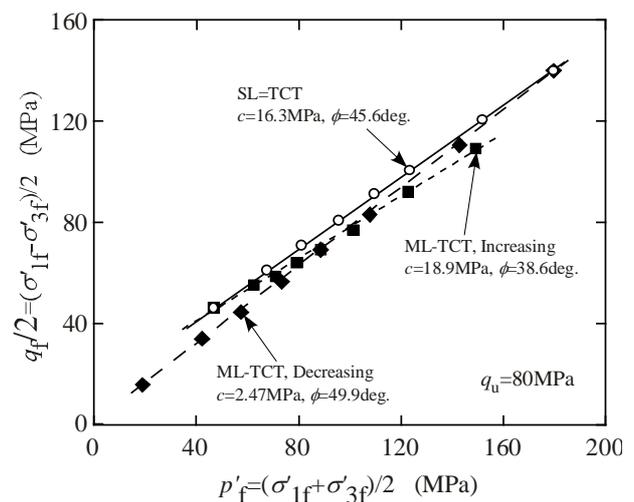
岩石の強度特性を三軸圧縮試験により効率良く評価する方法として、1 つの供試体に対して複数の拘束圧下で軸圧縮を行う多段階载荷方式が採用される。しかし、繰返し载荷による損傷が供試体に蓄積することでせん断強さが過小評価される問題がある。そこで、適切な载荷経



(a) $q_u=20$ MPa の軟岩



(b) $q_u=40$ MPa の中硬岩



(c) $q_u=80$ MPa の硬岩

図-6: シミュレーションした ML-TCT の破壊時の応力

路 (拘束圧の順序) や、得られた強度定数 (せん断抵抗角と粘着力) の誤差の程度を検討する目的で、新たに多段階载荷損傷モデル (MLD モデル) を開発し、さまざま

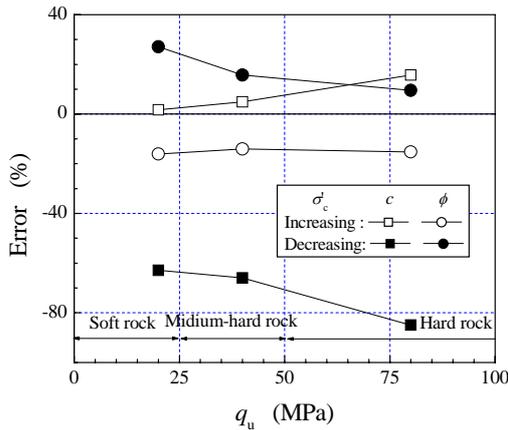


図-7：ML-TCTによる強度定数（粘着力 c ，せん断抵抗角 ϕ ）の誤差と一軸圧縮強さ q_u の関係

まな岩種や載荷経路について多段階載荷方式の三軸試験をシミュレーションした。その結果、拘束圧を順次上げていく載荷経路が適切であることを示した。また、この拘束圧を漸増する応力経路で行った場合、せん断抵抗角は岩種に依らず 15%程度低い値に、粘着力は軟岩と中硬岩では 5%程度大きい値になることが分かった。

報告した事例は、かなり大胆に単純化した構成関係、限られた応力範囲 ($\sigma_3/q_u < 0.5$) の試験に対するものである。将来的には、構成関係の吟味や幅広い応力範囲を対象にした試験についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 赤井浩一，大西有三，李徳河：多段階三軸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 巻，pp.93-102，1981。
- 2) Bro, A.: Analysis of multistage triaxial test results for a strain-hardening

- rock, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol.34, pp.143-145, 1997.
- 3) Crawford, A. and Wylie, D. A.: Modified multiple failure state triaxial testing method, Proc. 28th US Sym. on Rock Mech., pp.133-140, 1987.
- 4) Goodman, R. E.: Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Company, pp.158-180, 1976.
- 5) Kim, M. M. and Ko, H. Y.: Multistage triaxial testing of rocks, Geotech. Testing J., Vol.2, pp.98-105, 1979.
- 6) 木村 誠，谷 和夫：多段階載荷損傷モデルの提案，第 56 回年次学術講演会，土木学会， -A275， pp.550-551，2001。
- 7) 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，土木学会論文報告集，No.722/ -61， pp.275-287，2002。
- 8) Kovari, K. and Tisa, A.: Multiple failure state and strain controlled triaxial tests, Rock Mechanics, Vol.7, pp.17- 33, 1975.
- 9) Kovari, K., Tisa, A., Einstein, H.H. and Franklin, J.A.: Suggested methods for determining the strength of rock material in triaxial compression: revised version, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol.20, No.6, pp.283-290, 1983.
- 10) 中園康平，谷 和夫，岡田哲実：2 種類の軟岩を用いた MLD モデルによる多段階三軸圧縮試験の検討，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会， pp.65-72，2003。
- 11) Pagoulatos, A.: Evaluation of multistage triaxial testing on Berea sandstone, M.Sc Thesis, The University of Oklahoma, 2004.
- 12) Taheri, A. and Tani, K.: Proposal of a new multiple-step loading triaxial compression testing method, Proc. 5th Asian Rock Mech. Sym., Vol.1, pp.517-524, 2008.
- 13) Taheri, A.: Study on shear strength and deformability properties of rock masses by in-situ and laboratory testing methods, Ph.D Thesis, Yokohama National University, 2008.

APPLICABILITY OF MULTIPLE-STEP LOADING TRIAXIAL COMPRESSION TEST EVALUATED BY NUMERICAL SIMULATION USING A NEW DAMAGE MODEL

Kazuo TANI and Abbas TAHERI

Multiple-step Loading Triaxial Compression Test (ML-TCT) is a useful method to evaluate strength parameters from a single specimen. However, due to accumulated damage in the specimens with repeated cycles of axial loading/unloading, the shear strengths are underestimated. This study proposed a Multiple-step Loading Damage (MLD) model to simulate ML-TCTs for wide variety of rock types with various stress paths. The results demonstrated that the stress path with confining pressures of an increasing manner is preferable to that of a decreasing manner. Furthermore, the errors by ML-TCTs are correlated with unconfined compressive strengths of the rocks to evaluate the applicability of this test method.