

## 排水三軸圧縮試験結果に基づく軟岩の構成式の高度化

### Modification of constitutive model for soft rock based on drained triaxial compression test

岩田麻衣子<sup>1</sup>，林宏樹<sup>2</sup>，沢田和秀<sup>3</sup>，森口周二<sup>4</sup>，八嶋厚<sup>5</sup>，張鋒<sup>6</sup>，檜尾正也<sup>7</sup>

1 岐阜大学・工学部・iwata\_m@gifu-u.ac.jp

2 東海旅客鉄道

3 岐阜大学・流域圏科学研究センター

4 岐阜大学・工学部

5 岐阜大学

6 名古屋工業大学

7 名古屋大学

## 概 要

軟岩の力学挙動を表現できる構成式の開発や高精度化のために、これまでに軟岩を対象とした室内試験が行われ、試験結果に基づいて構成式が提案されている。本研究では、軟岩斜面の崩壊予測解析手法の高度化のために、軟岩を用いた異なる拘束圧での排水三軸圧縮試験を行い、試験結果に基づいて既存の構成式の修正を行った。既存の構成式は、降伏曲面の形状を決定するパラメータを初期拘束圧ごとに決定する必要があった。軟岩の力学特性の一つである時間依存性を考慮できる構成式の改良を行うために、拘束圧によらず初期段階で統一的に決定できるパラメータを用いて、上記の解析パラメータに関する発展則を提案した。要素シミュレーションを行った結果、修正した構成式により、様々な拘束圧における軟岩の力学挙動を表現できることが確認された。

キーワード：軟岩，構成式，三軸試験

## 1. はじめに

日本各地に軟岩は分布しており、その分布地域では、軟岩斜面の崩壊とその被害が多数報告されている<sup>1)</sup>。軟岩の定義は、分野によって異なるが、地盤工学では、土よりも硬く、一般的な概念の岩石と呼ぶには軟らかい、土と岩の中間的性質の地質材料とされている。また、一軸圧縮強度が 20MPa 以下の土と岩の中間的な力学挙動を呈する材料とも定義されている<sup>2)</sup>。軟岩の力学挙動を理解する上で留意する点には、ひずみ軟化現象や時間依存性挙動がある。ひずみ軟化現象は、荷重を加えると応力の増加とともにひずみが進行するが、応力が最大強度に達した後は、それ以上の荷重を与えなくてもひずみが進行していく現象であり、地盤工学の諸問題で論じられる進行性破壊と密接に関連すると考えられる。もう一つの特徴である時間依存性挙動は、外力が作用した際に、応答に時間的な影響が生じることであり、地盤の長期不安定性の要因になると考えられている。これらの力学的特徴を有する軟岩が分布する地域では、降雨や融雪などによる地下水位の上昇を誘因として、地すべりや斜面崩壊などが発生する。

軟岩斜面の崩壊による被害を最小限に抑えるためには、

崩壊メカニズムの解明、および将来的に発生が危惧される崩壊の位置・規模・形状・時間の予測を行うことが必要とされる。数値解析により、高精度に実現象を再現するためには、地盤材料の力学挙動の把握と、力学挙動を適切に表現できる力学モデルの構築が必要である。

このような背景のもと、軟岩の力学特性の把握を目的として、さまざまな条件での室内試験が行われてきた<sup>3)4)</sup>。それらの結果から、拘束圧、ひずみ速度および排水条件の違いが、軟岩の力学挙動に与える影響に関して検討されている。また、堆積軟岩を対象とした既存の実験結果に基づき、時間依存性を考慮した軟岩の構成式が提案され、研究されてきた<sup>5)</sup>。しかしながら、提案されている構成式では、降伏曲面の形状を決定するパラメータを初期拘束圧ごとに決定しなければならず、実斜面を対象とした数値解析に適用するには、統一的にパラメータを決定するための改良が必要である。本研究では、軟岩斜面の崩壊予測解析手法の高度化を目指し、提案されている軟岩の構成式<sup>5)</sup>の高度化を行った。異なる拘束圧での実験結果に基づき、構成式に用いる材料パラメータを決定し、要素シミュレーションを行うことで、構成式の検証を行った。

## 2. 室内試験

本研究では、著者らが実施した、異なる拘束圧での排水三軸圧縮試験結果<sup>4)</sup>を用いて、軟岩の構成式の修正および検証を行った。ここでは、試験試料や試験概要、試験結果等について説明する。

### 2.1 試験概要

試験試料には、大谷石を用いた。大谷石は、比較的均一で目立った空隙がなく、加工性の良さや多数の均質な試料を準備できるという観点から、再現性の高い実験データを得るのに適しており、これまでも堆積軟岩の力学特性を明らかにするための室内試験に用いられている<sup>6)</sup>。排水三軸圧縮試験には、高さ 100mm、直径 50mm の円柱供試体を水で飽和させて用いた。軟岩試料では、含水状態の変化が試料の特性に影響を与えられと考えられたため、新たに採取されたブロックから直ちに整形し、作成した供試体は試験を行うまで脱気水に浸して保存した。

排水三軸圧縮試験は、所定の圧力で等方圧密した後、軸ひずみ速度を制御して鉛直軸荷重を載荷する。すべての試験で、軸ひずみ速度は 0.001%/min、背圧は 0.5MPa とした。拘束圧は、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0MPa の 8 通りとした。

### 2.2 試験結果

排水三軸圧縮試験の結果を図 1 に示す。図 1(a)に示す軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係より、すべての試験において、ひずみ軟化挙動を確認した。また、拘束圧が大きいくほど、ピーク強度、残留強度が大きくなるのがわかる。図 1(b)に示す体積ひずみ( $\epsilon_v$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係からも、ダイレイタンス挙動が拘束圧に依存していることがわかる。本研究では、これらの実験結果を参考に、既存の構成式の修正と、修正した構成式の検証を行った。

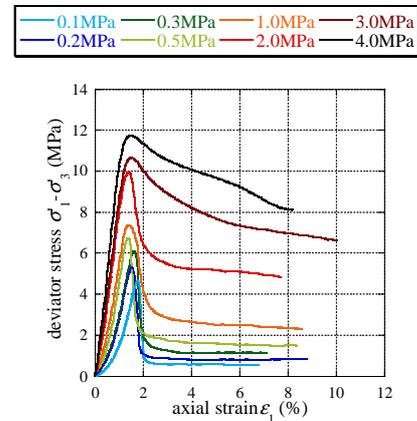
## 3. 構成式の検証および高度化

本研究では、張らが subloading  $t_{ij}$  モデル<sup>7)</sup>に基づき提案した堆積軟岩の弾粘塑性構成式<sup>5)</sup>の高度化を行った。この弾粘塑性構成式は、中間主応力の影響を考慮できる  $t_{ij}$  の概念と、過圧密土の挙動を表現できる subloading の概念に基づいている。また、クリープ挙動を表現するために軟岩の時間依存性が考慮されている。

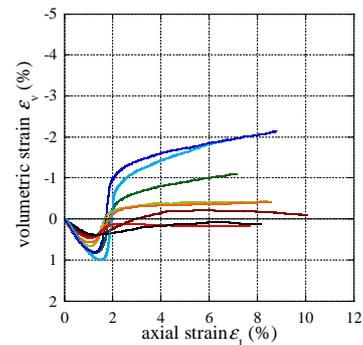
### 3.1 既存の構成式の検証

構成式の高度化および検証は、上述の著者らが実施した様々な拘束圧での圧密排水三軸圧縮試験<sup>4)</sup>の結果を基に行った。表 1 に既存の構成式に用いる材料パラメータを示す。これらの材料パラメータは、圧密排水三軸圧縮試験、三軸クリープ試験、圧密除荷試験等の試験結果に基づき決定した。既存の構成式は、限界状態の主応力比  $R_f$  を初期拘束圧ごとに決定する必要がある。排水三軸圧縮試験にお

いて、軸差応力が変化しなくなった時点で試験を終了したため、本研究では、試験終了時の主応力比を限界状態の主応力比  $R_f$  として求めた。試験結果から得られた、各初期有効平均応力における限界状態での主応力比  $R_f$  を表 2 に示す。



(a) 軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係



(b) 体積ひずみ( $\epsilon_v$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係

図 1 排水三軸圧縮試験結果<sup>4)</sup>

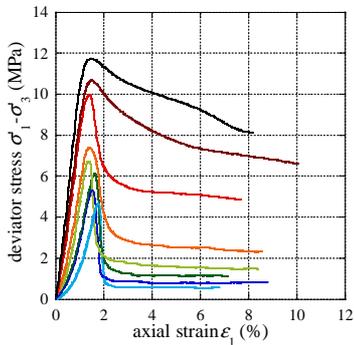
表 1 材料パラメータ(既存の構成式)

圧縮指数	$\lambda$	0.018
膨潤指数	$\kappa$	0.005
ポアソン比	$\nu$	0.02
降伏関数の形状パラメータ	$\beta$	1.1
密度依存性パラメータ	$a$	850
時間依存性パラメータ	$\alpha$	0.6
時間依存性パラメータ	$Cn$	0.02
圧密降伏応力	$p_c(\text{MPa})$	21
基準状態での間隙比	$e_{nc}$	0.570
限界状態の応力比	$R_f$	表 2 参照

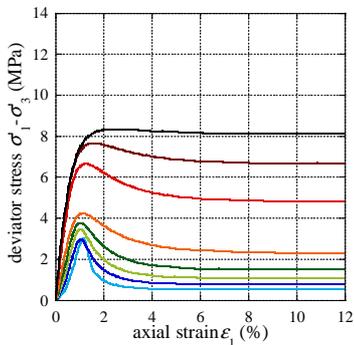
表 2 限界状態の応力比(既存の構成式)

初期平均有効応力 $\sigma_{m0}(\text{MPa})$	限界状態の応力比 $R_f$
0.1	6.51
0.2	4.91
0.3	4.60
0.5	4.00
1.0	3.32
2.0	3.42
3.0	3.22
4.0	3.03

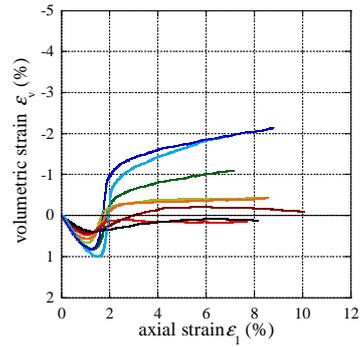
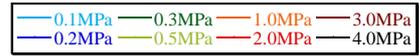
図 2 には、実験結果と既存の構成式による数値シミュレーション結果より得られた軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係を、図 3 には、体積ひずみ( $\epsilon_v$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係を示す。図 2 に示す軸差応力 - 軸ひずみ関係から、実験結果と数値シミュレーション結果を比較すると、既存の構成式は低い拘束圧では軟岩のひずみ軟化挙動や残留強度を表現できていないことがわかる。図 3 に示す体積ひずみ - 軸ひずみ関係からは、低い拘束圧ではせん断とともに体積圧縮を示した後、体積膨張に転じる体積変化の挙動を表現できている。また、低い拘束圧では体積変化が大きくなり、高い拘束圧では体積変化が小さくなる拘束圧の違いによる体積変化の違いを表現できていることがわかる。しかしながら、最大強度を比較すると、実験結果に比べて数値シミュレーション結果は小さく、既存の構成式は実験結果を正確に表現できていないことがわかった。また、表 2 に示したように、既存の構成式は、解析パラメータの一つである限界状態の主応力比  $R_f$  を初期有効拘束圧  $\sigma_{m0}$  ごとに与えなくてはならないため、任意の応力状態での挙動を表現するためには改良の必要がある。本研究では、さまざまな拘束圧での力学挙動を表現すること、および限界状態の主応力比  $R_f$  を応力状態によらず統一的に決定することの 2 点について構成式の改良を行った。



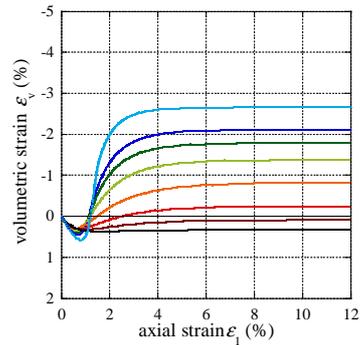
(a) 実験



(b) 数値シミュレーション(既存の構成式)  
図 2 軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係



(a) 実験



(b) 数値シミュレーション(既存の構成式)

図 3 体積ひずみ( $\epsilon_v$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係

### 3.2 構成式の高度化

既存の構成式では、上述した解析パラメータの一つである限界状態の主応力比  $R_f$  は、以下の式より、降伏曲面の形状に関連するパラメータ  $M^*$  を決定する。

$$M^* = (X_{CS}^\beta + X_{CS}^{\beta-1} Y_{CS})^{1/\beta} \quad (1)$$

$$X_{CS} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left( \sqrt{R_f} - \frac{1}{\sqrt{R_f}} \right), \quad Y_{CS} = \frac{1 - \sqrt{R_f}}{\sqrt{2}(\sqrt{R_f} + 0.5)} \quad (2)$$

ここで、 $\beta$  は降伏関数の形状パラメータである。パラメータ  $M^*$  は、図 4 に示すように、降伏曲面の形状を決定するパラメータである。既存の構成式では、 $R_f$  は初期拘束圧ごとに異なる定数であるため、 $M^*$  はせん断の過程で常に一定の値である。したがって、既存の構成式では、降伏曲面は、初期の応力状態により形状が異なり、せん断の過程では形状は変化せず、拡大もしくは縮小する。

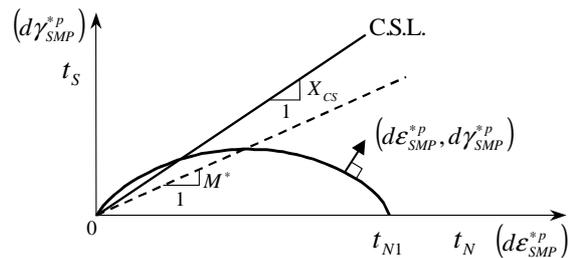


図 4 降伏曲面のイメージ

パラメータ  $M^*$  は、図 5 に示すようにストレス - ダイレイタンシー曲線の切片 ( $-d\varepsilon/d\gamma=0$ ) に相当することから、本研究では、実験結果に基づく考察を行った。図 6 に排水三軸圧縮試験結果<sup>4)</sup> から得られたストレス - ダイレイタンシー関係を、傾向が判読しやすいように拘束圧 0.1, 1.0, 2.0, 4.0MPa の試験結果に限定して示す。これらの結果から、ストレス - ダイレイタンシー曲線の切片 ( $-d\varepsilon/d\gamma=0$ ) は初期拘束圧によって異なることがわかる。また、せん断初期の切片と、残留状態 (ここでは実験終了時の軸ひずみが 7~10% の点) の切片が異なることがわかる。したがって、パラメータ  $M^*$  は、既存の構成式では初期拘束圧ごとに異なる定数であったが、初期拘束圧により異なることに加え、せん断の過程で変化し、残留状態では応力状態にかかわらず一定の値に収束すると考えられる。

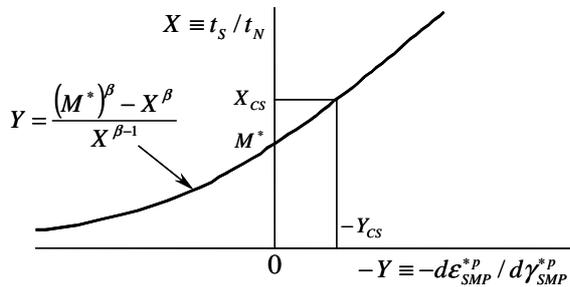


図 5 ストレス - ダイレイタンシー関係

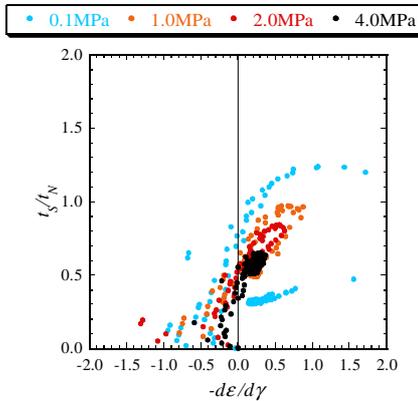


図 6 ストレス - ダイレイタンシー関係 (排水三軸圧縮試験)

本研究では、排水三軸圧縮試験結果から得られたストレス - ダイレイタンシー関係を考慮し、パラメータ  $M^*$  は定数ではなく、せん断の過程で変化すると仮定して、構成式の修正を行った。降伏曲面の形状を決定するパラメータ  $M^*$  は、初期拘束圧ごとに異なり、せん断の過程で変化し、残留状態では応力状態にかかわらず一定の値に収束すると仮定する。試験結果を考慮し、パラメータ  $M^*$  の初期値  $M^*_0$  およびせん断中の  $M^*$  の変化量  $dM^*$  を、次式のように与えた。

$$M^*_0 = M^*_{CS} \times OCR^b \quad (3)$$

$$dM^* = A \times \ln \frac{M^*_{CS}}{M^*} d\varepsilon^p_d \quad (4)$$

ここで、 $M^*_0$  はせん断開始時の  $M^*$ 、 $M^*_{CS}$  は限界状態での  $M^*$ 、OCR は過圧密比、 $dM^*$  は  $M^*$  の増分、 $d\varepsilon^p_d$  は塑性偏差ひずみ増分である。 $b$  および  $A$  は、本研究で新規に提案したパラメータである。 $b$  は、図 7 に示す  $M^*_0$  - OCR 関係の曲線の形状を制御するパラメータである。また、 $A$  はせん断過程での  $M^*$  の変化の程度に影響する。 $M^*$  の初期値は OCR により決定され、 $M^*$  はせん断中に塑性偏差ひずみ増分に関連して変化する。図 7 に式(3)から得られる  $M^*_0$  - OCR 関係を、図 8 にせん断過程での  $M^*$  の変化のイメージを  $M^*$  - 軸ひずみ関係として示す。本研究で提案した発展式では、既存の構成式ではせん断の過程で一定だった  $M^*$  が、図 8(b) に示すように、せん断中に変化し、残留状態では応力状態によらず一定の値に収束する。

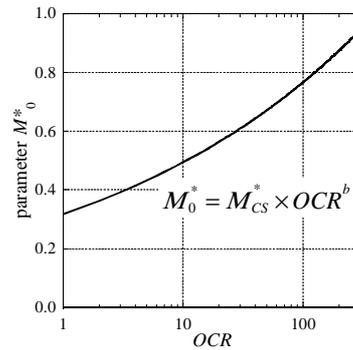
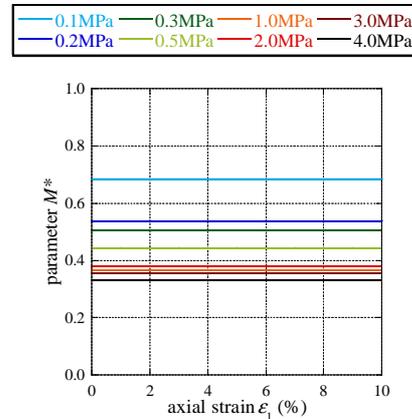
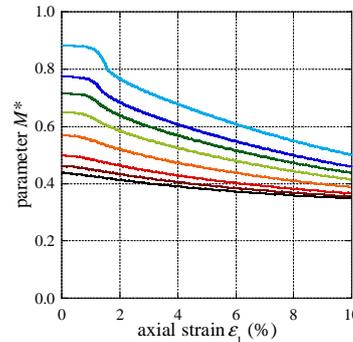


図 7  $M^*_0$  - OCR 関係



(a) 既存の構成式



(b) 改良した構成式

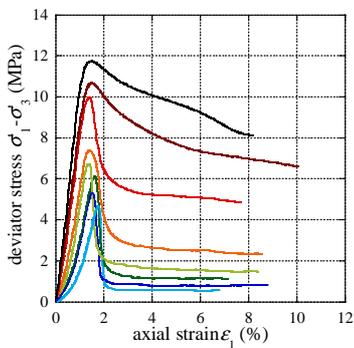
図 8  $M^*$  の変化

#### 4. 圧密排水三軸圧縮試験の数値シミュレーション

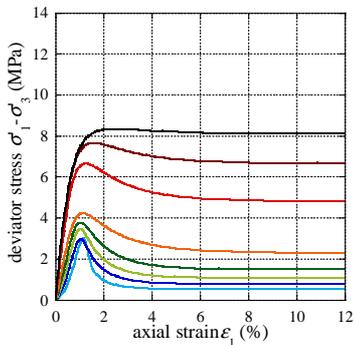
修正した構成式を検証するために、堆積軟岩を用いた圧密排水三軸圧縮試験<sup>4)</sup>の数値シミュレーションを行った。材料パラメータは、限界状態の応力比  $R_f$  を除いて表 1 に示した既存の構成式と同様の値を用いた。 $R_f$  に代わり、式(3)および式(4)に示した新規のパラメータ  $M^*_{CS}$ ,  $b$ ,  $A$  の値を表 3 に示す。 $M^*_{CS}$  は、拘束圧 4.0MPa での試験終了時の主応力比を用いて、式(1)および式(2)より算出した。また、 $b$  および  $A$  は、試験結果に合致するようにフィッティングし、求めた。

表 3 材料パラメータ(追加)

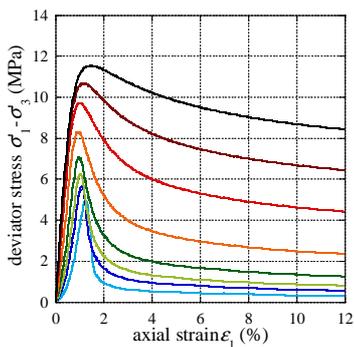
限界状態でのパラメータ $M^*$	$M^*_{CS}$	0.32
$M^*$ の初期値に関するパラメータ	$b$	0.19
$M^*$ の変化に関するパラメータ	$A$	4.0



(a) 実験



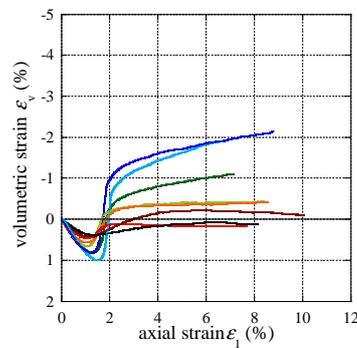
(b) 数値シミュレーション(既存の構成式)



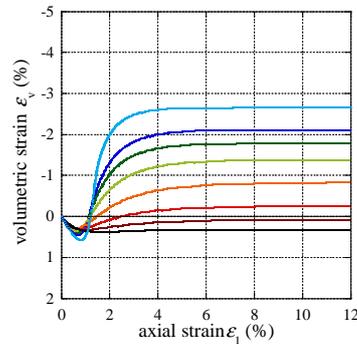
(c) 数値シミュレーション(修正した構成式)

図 9 軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係

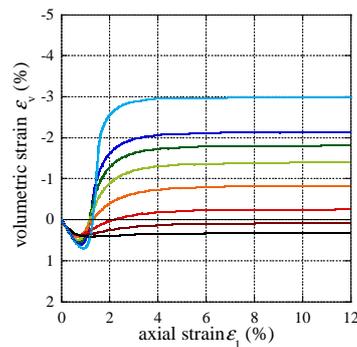
図 9 に軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係を、図 10 には、体積ひずみ( $\epsilon_v$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係を示す。それぞれ実験結果、既存の構成式での数値シミュレーション結果、および提案した降伏曲面の形状を決定するパラメータ  $M^*$  の発展則を考慮した数値シミュレーション結果を示す。図 9 に示す軸差応力 - 軸ひずみ関係から、既存の構成式および修正した構成式は、初期のせん断剛性や残留強度が拘束圧の大きさに依存する傾向を表現できている。最大強度を比較すると、既存の構成式は実験結果に比べて小さいが、修正した構成式は実験結果をよく表現できていることが確認できる。また、修正した構成式は、実験を実施した範囲の拘束圧の条件下で、さまざまな拘束圧の力学挙動を表現できることがわかった。図 10 に示す体積ひずみ - 軸ひずみ関係からは、既存の構成式と同様に、修正した構成式は、体積変化の挙動を表現できていることが確認できる。



(a) 実験



(b) 数値シミュレーション(既存の構成式)



(c) 数値シミュレーション(修正した構成式)

図 10 体積ひずみ( $\epsilon_v$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_1$ )関係

## 5. まとめ

本研究では、排水三軸圧縮試験結果に基づいて、既存の軟岩の構成式の高度化を行った。実験から得られたストレス-ダイレイタンス-関係を考慮し、降伏曲面の形状を決定するパラメータ  $M^*$  の発展則を提案した。修正した構成式を用いて排水三軸圧縮試験の数値シミュレーションを行った結果、軟岩の力学挙動を適切に表現できていることを確認できた。また、初期の拘束圧にかかわらず統一的に与えた材料パラメータにより、異なる拘束圧における軟岩の力学挙動を表現できた。

今後、本研究で提案した軟岩の構成式の有効性を確認することで、統一的に与える材料パラメータを用いて、様々な応力状態での軟岩の力学挙動の表現が可能となる。それにより、実斜面に対して発生メカニズムを解明するための再現解析や今後発生が危惧される斜面の崩壊予測解析を行う上で、有効な解析手法の確立を望むことができる。

## 参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, 184p, 2006.
- 2) 赤井浩一: 軟岩とは?, 土と基礎, Vol.41, No.10, Ser. No.429, pp.1-6, 1993.
- 3) 瀧川雅博, 張鋒, 八嶋厚, Moctar Amadou, 軟岩の時間依存性挙動モデル高度化のための実験的研究, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.525-526, 2003.
- 4) 岩田麻衣子, 大津亮太, 八嶋厚, 沢田和秀, 檜尾正也: 異なる拘束圧における三軸圧縮特性に基づく軟岩の構成式の検証, 第44回地盤工学研究発表会発表講演集, No.255, pp.509-510, 2009..
- 5) Zhang, F., Yashima, A., Nakai, T., Ye, G.L. and Aung, H., An elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock based on  $t_{ij}$  concept and subloading yield surface, Soils and Foundations, Vol.45, No.1, pp.65-73, 2005.
- 6) 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一, 堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の弾・塑性挙動, 土木学会論文報告集, 第271号, pp.83-95, 1978.
- 7) Nakai, T. and Hinokio, M., A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.