

破碎によるコントラクタンシー特性変化を考慮した岩石材料の弾塑性構成モデル

神戸大学 学生会員 ○佐伯 拓也

埼玉大学 正会員 橘 伸也

神戸大学 正会員 飯塚 敦

1. はじめに

地質年代を経て固結作用・続性作用を受けたような岩石材料は、構造が発達し、未固結の地盤材料とは異なる力学特性を示す。本研究では、比較的高い間隙をもつ岩石材料を対象に、塑性圧縮あるいは破碎を伴う排水せん断過程での力学挙動に着目し、その構成モデルを提案する。提案するモデルでは、実験結果^{1),2)}から示唆される塑性圧縮履歴に伴う降伏曲面の形状変化を表現するために、大野らが提案する LC モデルをベースとして、コントラクタンシーの発現を制御するパラメータの発展則を与えている。

2. Distructured Effect

図-1, 2, 3 はそれぞれ Berea 砂岩, Adamswiller 砂岩¹⁾, 火山性砕屑岩²⁾の排水せん断試験及び等方圧縮試験より同定された初期降伏応力点を p' - q 応力平面上にプロットし、LC モデルの降伏曲面によりフィッティングしたものである。LC モデルの降伏関数は

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{2}{n_L} \ln \left(\frac{M^{n_L} + \eta^{n_L}}{M^{n_L}} \right) - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

であり、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 M は限界応力比、 n_L はコントラクタンシー（負のダイレイタンシー）発現を制御するフィッティングパラメータである。このモデルは、 $n_L = 2.0$ とすると修正 Cam-clay モデルに帰着する。図のように、これら比較的高間隙な岩石材料の初期降伏点は、LC モデルによってトレースすることが可能であり、パラメータ n_L の値は概ね 2.0 前後である。

図-3 の火山性砕屑岩の先行圧密圧力は、採取時の間隙比の違いにより若干のズレはあるが概ね 20MPa である。Aversa and Evangelista は同様の材料に対し、40MPa まで等方圧縮した後、所定の圧力まで等方除荷し排水せん断試験を行っている。試験から得られた降伏点をプロットしたのが図-4 である。これらの図より、塑性圧縮履歴を受けた岩石の降伏曲面は、形状を変えつつ硬化することが示唆される。彼らは、このような塑性圧縮履歴に伴う降伏曲面の形状変化を「構造消失効果（Distructured Effect）」と呼んでおり、破碎あるいはセメンテーション消失に起因するものと説明している。限界応力比 M が破碎前後で変化しないことを考慮し、LC モデルによってフィッティングすると、パラメータ n_L の低下により降伏曲面の形状変化を表現できる。

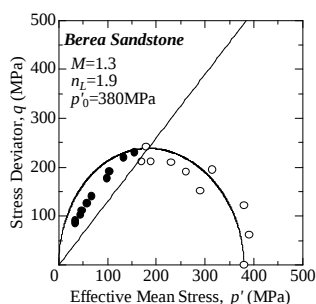


図-1 Berea 砂岩の降伏応力

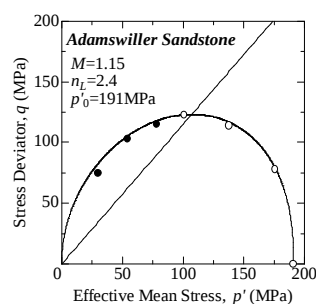


図-2 Adamswiller 砂岩の降伏応力

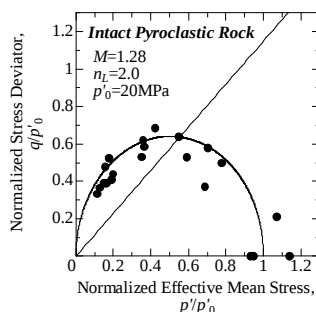
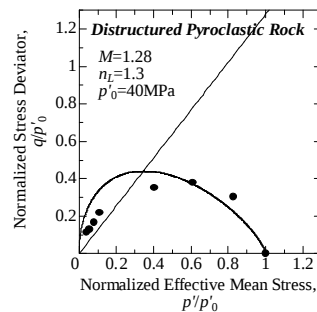
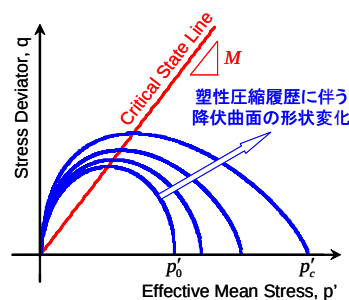
図-3 火山性砕屑岩の
降伏応力 (Intact)図-4 火山性砕屑岩の
降伏応力 (Distructured)

図-5 降伏曲面の形状変化

キーワード 構成モデル, 岩石材料, 破碎履歴, 弾塑性, ダイレイタンシー

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学都市安全研究センター TEL 03-3355-3442

3. 構造消失に伴うコントラクシー特性の変化

上記の「構造消失効果 (Distructured Effect)」を限界状態理論の立場から表現するために、塑性圧縮に伴うコントラクタンシー特性の変化、すなわちパラメータ n_L の発展則を導入する。図-5 に示すように、岩石の構造消失過程においては降伏曲面の形状が変化するものとし、次のような発展則を仮定する。

$$\dot{n}_L = \frac{c(1-n_{LR})}{(\lambda-\kappa)/(1+e_0)} \left(\frac{p'_c}{p'_0} \right)^{-c} \dot{\varepsilon}_v^p \equiv h_N \dot{\varepsilon}_v^p \quad (2)$$

ここで、 n_{LR} は Intact (初期) 状態の降伏曲面の形状を決定するパラメータ、 c は材料パラメータである。

式(1)の降伏関数が $f = f(p', q, n_L, \varepsilon_v^p)$ のようにパラメータ n_L の関数となっていることに注意しコンシステンシ

ー条件を考え、関連流れ則および非線形弾性構成関係を仮定すると、次の弾塑性構成関係が導かれる。

$$\dot{\sigma}' = \left[c^e - \frac{1}{\chi} c^e : \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \otimes \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : c^e \right] : \dot{\varepsilon} ; \chi = \frac{\partial f}{\partial \sigma'} : c^e : \frac{\partial f}{\partial \sigma'} - h_N \frac{\partial f}{\partial n_L} \frac{\partial f}{\partial p'} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'} \quad (3)$$

ただし、式中の導関数などは表-1 にまとめる通りである。

4. 排水せん断試験シミュレーション

式(3)の構成関係を有限要素プログラムに組み込み、排水せん断試験のシミュレーションを実施した。各材料パラメータは、Aversa and Evangelista による火山性砕屑岩の排水せん断・等方圧密試験より決定している。

用いたパラメータ・初期条件を表-2 にまとめる。図-6, 7 にそれぞれ応力-ひずみ関係、体積変化を示す。図中、左から実験結果、コントラクタンシー特性変化ありの計算結果、コントラクタンシー特性変化なしの計算結果である。コントラクタンシー特性変化を考慮しない場合、試験Ⅱのシミュレーションにおいて排水せん断中の降伏応力の過大評価と体積圧縮の過小評価が見られる。

5. まとめ

本研究では、比較的高間隙の岩石材料を対象として、特に塑性圧縮に伴う破砕領域での力学挙動のモデル化を行った。低拘束圧下での軟化挙動のモデル化は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) T. Wong, C. David and W. Zhu, The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstone: Mechanical deformation, J. Geophys. Research, Vol. 102, No. B2, pp. 3009-3025, 1997.
- 2) S. Aversa and A. Evangelista, The mechanical behaviour of a Pyroclastic rock: Yield strength and “Distructuration” effect, Rock Mech. And Rock Engrg., Vol. 31, No. 1, pp. 25-42, 1998.
- 3) 大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹, 非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 40, pp. 407-414, 2006.

表-1 導関数のまとめ

Elastic Properties	
$c^e = K1 \otimes 1 + 2GA$; $K = \frac{1+e_0}{\kappa} p'$, $G = \frac{3(1-2\nu')}{2(1+\nu')} K$	
Differential Functions	
$\frac{\partial f}{\partial \sigma'} = \frac{1}{3} \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{M^{\eta_L} - \eta^{\eta_L}}{M^{\eta_L} + \eta^{\eta_L}} \frac{1}{p'} + 3 \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{\eta^{\eta_L}}{M^{\eta_L} + \eta^{\eta_L}} \frac{s}{q^2}$	
$\frac{\partial f}{\partial p'} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{M^{\eta_L} - \eta^{\eta_L}}{M^{\eta_L} + \eta^{\eta_L}} \frac{1}{p'}$, $\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} = -1$	
$\frac{\partial f}{\partial n_L} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{2}{n_L} \frac{\eta^{\eta_L}}{M^{\eta_L} + \eta^{\eta_L}} \ln \frac{\eta}{M} - \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{2}{n_L} \ln \frac{M^{\eta_L} + \eta^{\eta_L}}{M^{\eta_L}}$	

表-2 パラメータと諸条件

$\lambda = 0.24$ $\kappa = 0.01$ $M = 1.3$ $\nu' = 0.45$
$n_{LR} = 2.0$ $c = 1.734$ $e_0 = 0.9$ $p'_0 = 20 \text{MPa}$
試験Ⅰ (実線): 有効拘束圧 $\sigma'_3 = 11.7 \text{MPa}$ のもと排水せん断
試験Ⅱ (破線): 40MPaまで等方圧縮した後、11.7MPaまで等方除荷。
その後、有効拘束圧 $\sigma'_3 = 11.7 \text{MPa}$ のもと排水せん断。

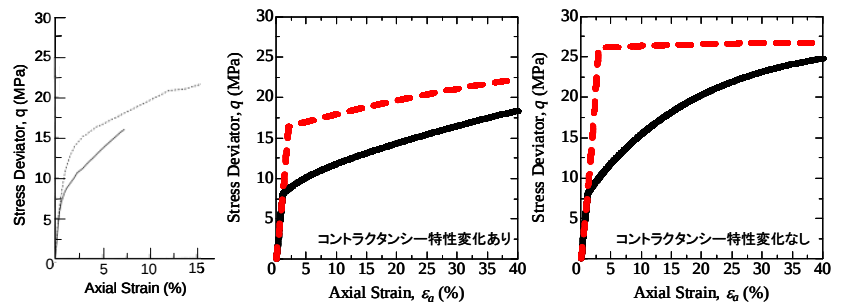


図-6 排水せん断試験・応力-軸ひずみ関係

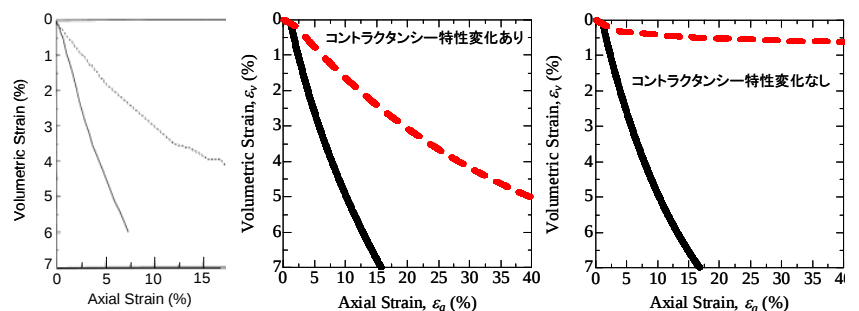


図-7 排水せん断試験・軸ひずみ-体積ひずみ関係