

京都大学大学院工学研究科 正会員 足立紀尚
同 学生員 ○古林秀之

1. はじめに

従来の研究により軟岩の力学的挙動には拘束圧依存性があることが認められている。本報では、足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式¹⁾に含まれる材料パラメータを、実験結果に基づき、拘束圧の関数として表現することにより、応力状態の変化に対応できるように構成式の拡張を試みる。

2. 足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式

足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式は、応力履歴テンソルを導入し、ひずみ軟化－硬化挙動を表現できる構成モデルである。詳細は文献1)を参照されたい。

表-1にこの構成式に含まれる材料パラメータを示す。 M_r^* は残留状態における応力履歴比であり、 G' は残留状態における除荷・再載荷の初期せん断剛性である。また τ は応力履歴テンソルに含まれる材料パラメータであり、カーブフィッティングにより決定する。さらに、 σ_{mb} 、 $\bar{M}_m$ および b は過圧密境界面に含まれる材料パラメータで、材料構造を表現するものであり、拘束圧には依存せず一定値をとる。

3. 排水三軸圧縮試験

堆積軟岩（戸室石）を用いて排水定ひずみ速さ三軸圧縮試験を行った。試料は直径5cm、高さ10cmである。表-2に戸室石の物性値を示す。拘束圧は2,4,6,10,20,30,50,100kgf/cm²の8パターンとし、各拘束圧に対して5本ずつ、計40本の試験を行った。

試験は所定の拘束圧で等方圧密した後、拘束圧を一定に保ち、排水条件で軸荷重をひずみ制御によって載荷してせん断を行った。軸ひずみ速さは全試験を通して $2.8 \times 10^{-2}\%$ /minとし、軸ひずみ15%まで軸圧縮するが、途中、軸ひずみが12%の時点で除荷および再載荷を行っている。なお全試験を通して、3kgf/cm²のバックプレッシャーを適用した。

4. 実験結果および考察

図-1に実験より得られた偏差ひずみ－軸差応力関係を各拘束圧について一本ずつ示す。これより拘束圧が20kgf/cm²より低い拘束圧のもとでは過圧密状態にある土質材料と同様の典型的なひずみ硬化－軟化型の挙動を示す。一方、拘束圧が30kgf/cm²より高い圧力のもとでは軽い過圧密状態、あるいは正規圧密状態にある土質材料と同様のひずみ硬化型の挙動を示す。また、このグラフの初期接線勾配は拘束圧 σ_3' の増大につれて増大するが、拘束圧 σ_3' が100kgf/cm²になると G は急激に減少し、かつ大きな散らばりがみられる。

図-2に偏差ひずみ－体積ひずみ関係を各拘束圧に対して1本ずつ示す。拘束圧が10kgf/cm²以下の圧力のときは初期段階では圧縮を示し、最大強度に至る前に膨張に転じる。一方、拘束圧が20kgf/cm²以上の圧力のときは体積は圧縮する一方である。

さらに、ダイラテンシーの度合いは拘束圧の大小に影響され、拘束圧が低いほど膨張している。また、このグラフの初期接線勾配は拘束圧 σ_3' が30kgf/cm²付近で最大値をとり、その後は徐々に減少している。

Toshihisa ADACHI, Hideyuki KOBAYASHI

表-1 足立・岡モデルに含まれる材料パラメータ

G	せん断弾性係数
K	体積弾性係数
M_r^*, G'	ひずみ硬化－軟化パラメータ
τ	応力履歴パラメータ
$\sigma_{mb}, \bar{M}_m$	過圧密境界面パラメータ
b	塑性ポテンシャルパラメータ

表-2 戸室石の物性値

比重 G_s	2.50
含水比 w	26.1%
初期間隙比 e_0	0.64
軸圧縮強度 q_u	25.82 kgf/cm ²
引張強度 σ_1	3.96 kgf/cm ²
圧密降伏応力 σ_{mb}	80 kgf/cm ²

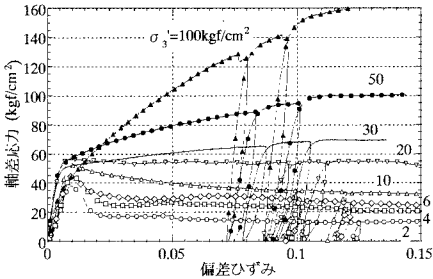


図-1 偏差ひずみ－軸差応力関係（実験結果）

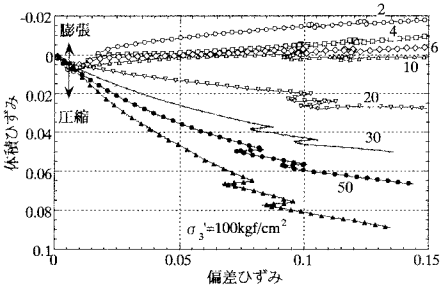


図-2 偏差ひずみ－体積ひずみ関係（実験結果）

5. 材料パラメータの定式化

図-3、図-4および図-5に、せん断弾性係数 G 、体積弾性係数 K およびひずみ硬化-軟化パラメータ M_f^* と拘束圧 σ_3' との関係をそれぞれ示すとともに定式化した式も示した。 G 、 K はともに実験結果を反映して、 σ_3' に対して非線形な関係を示している。なお、 $\sigma_{30}' (=1.0 \text{ kgf/cm}^2)$ により無次元化している。また、 G および τ についても定式化を行った。表-3に示す。ここではその結果のみを、拘束圧によらない σ_{mb} 、 M_m および b とともに示す。

表-3を用いて実験のシミュレーションを行った結果を図-6、図-7に示す。低拘束圧下では図-1、図-2の実験結果をほぼ再現している。高拘束圧下ではわずかにひずみ軟化を生じる点、残留状態に早く達する点など、若干の相違がみられる。これは、もともと本構成式が、高拘束圧領域（正規領域）を不得手としているからであり、今後の課題である。

表-3 定式化結果

G	$\frac{G}{\sigma_{30}'} = 432.5 \times \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)^{0.5462} + 1167 \quad (\sigma_3' < 80 \text{ kgf/cm}^2)$
	$\frac{G}{\sigma_{30}'} = 3537 \quad (\sigma_3' \geq 80 \text{ kgf/cm}^2)$
K	$\frac{K}{\sigma_{30}'} = 281.9 \times \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)^{0.7863} + 862.4 \quad (\sigma_3' < 33.5 \text{ kgf/cm}^2)$
	$\frac{K}{\sigma_{30}'} = 24090 \times \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)^{-0.4298} \quad (\sigma_3' \geq 33.5 \text{ kgf/cm}^2)$
M_f^*	$M_f^* = 1.869 - 0.5376 \log \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)$
G'	$\frac{G'}{\sigma_{30}'} = 1064 + 46.86 \times \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)$
τ	$\frac{1}{\tau} = 11.62 \times \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)^{0.9411} + 1.427 \quad (\sigma_3' < 30 \text{ kgf/cm}^2)$
	$\frac{1}{\tau} = 119.5 \times \left(\frac{\sigma_3'}{\sigma_{30}'} \right)^{0.2452} \quad (\sigma_3' \geq 30 \text{ kgf/cm}^2)$
σ_{mb}	80 kgf/cm ²
M_m	1.22
b	8.43

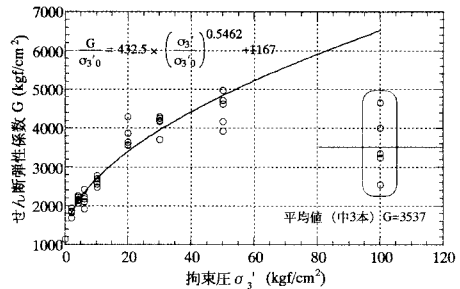


図-3 せん断弾性係数 G の拘束圧依存性

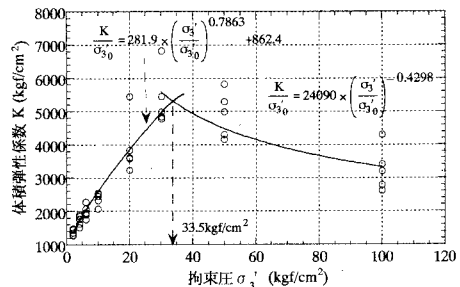


図-4 体積弾性係数 K の拘束圧依存性

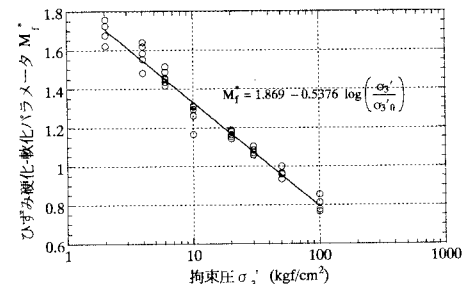


図-5 ひずみ硬化-軟化パラメータ M_f^* の拘束圧依存性

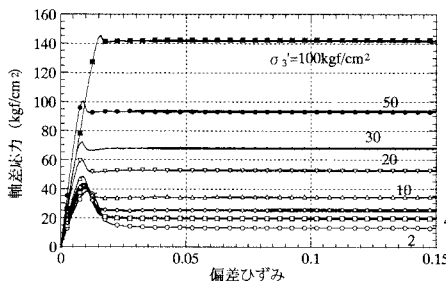


図-6 偏差ひずみ-軸差応力関係（解析結果）

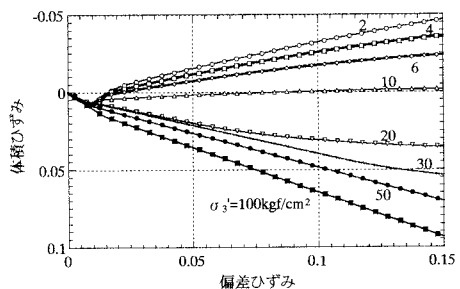


図-7 偏差ひずみ-体積ひずみ関係（解析結果）

6. おわりに

材料パラメータを拘束圧の関数として定式化し、これを用いて解析した結果、20 kgf/cm²以下の拘束圧のもとでは力学挙動をよく再現することができた。すなわち深さによる拘束圧の違い、盛り土等による载荷、そしてトンネル掘削等による除荷などの応力状態の変化に対応できる。また、文献2)に弾性特性の拘束圧に対する非線形性について、摩擦力和内部構造の2つの成分に分けることによって、より詳細に述べたので、それを参照されたい。

（参考文献）1) 足立紀尚・岡二三生：軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式 土木学会論文報告集第445号, pp.9-16, 1992. 2) 足立紀尚ら：各種拘束圧下において堆積軟岩の内部構造が弾性特性に及ぼす影響, 第3回地盤工学研究発表会論文概要集, 1998.