

変形・強度特性の拘束圧・ひずみ速度依存性を考慮したひずみ軟化型弾粘塑性構成式の改良

東電設計（株） 正会員 東 均 田坂嘉章・宇野晴彦
 岐阜大学 正会員 張 鋒・八嶋 厚

1. はじめに

軟岩の変形・強度特性は、拘束圧とひずみ速度の依存性を有することが室内試験結果から得られる。筆者らは、これまで任意拘束圧条件下における軟岩の応力-ひずみ関係を表現するため、オリジナルの足立・岡モデル¹⁾を基に、材料パラメータを拘束圧の関数とした改良を試み、唯一の材料パラメータにより広範囲の異なる拘束圧下の軟岩力学特性を表現できることを確認している²⁾。

軟岩地盤の長期挙動評価に当たっては、ひずみ速度依存性、クリープおよび応力緩和などの時間依存性を統一的に表現できるモデルが必要である。これらの特性は、相互に関係しているため、ひずみ速度依存性は、クリープ変形挙動やクリープ破壊時間にも影響を及ぼすものと考えられる。

本検討では、すでに改良・提案した足立・岡モデルに対し、残留強度を支配するパラメータ M_f^* の拘束圧依存性の考慮も合わせて、材料パラメータを拘束圧とひずみ速度の関数とした新たな拡張を試み、その適用性の検討を実施した。

2. 構成式の拡張

筆者らは、実験結果とそのシミュレーションに基づいて、せん断弾性係数 G 、塑性ポテンシャルパラメータ G' および b の3つのパラメータに拘束圧依存性を与え、オリジナルの足立・岡モデル¹⁾を改良した。この改良構成式²⁾を用いて、広範囲の異なる拘束圧下の軟岩の変形および破壊挙動特性を表現できるが、クリープ試験開始時のひずみ速度の違いによる軟岩供試体の変形および破壊挙動への影響、特にクリープ挙動への影響については未検討であった。また、残留強度が拘束圧に著しく依存する場合には、実験結果との対応が良くなかった。上記の2点を踏まえ、本検討では、オリジナルの足立・岡モデルのうちの G' 、残留強度を支

配するパラメータ M_f^* および G の三つの材料パラメータを次のように、拘束圧・ひずみ速度依存性に拡張した。

$$G' = G'_0 \cdot \left(\frac{p_0 + s_{m0}}{2p_0} \right)^{-s} \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_{11}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{q_1} \quad (1)$$

$$M_f^* = M_{f0}^* \cdot \left(\frac{p_0 + s_{m0}}{2p_0} \right)^{-x} \quad (2)$$

$$\text{if } s_{m0} \leq p_b$$

$$G = G_0 \cdot \left(\frac{p_0 + s_{m0}}{2p_0} \right)^b \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_{11}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{q_2} \quad (3a)$$

$$\text{if } s_{m0} > p_b$$

$$G = G_0 \cdot \left(\frac{p_0 + p_b}{2p_0} \right)^b \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_{11}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{q_2} \quad (3b)$$

ここで、 p_b は先行圧密応力相当の変曲点 (p_b 以上では弾性係数が一定である)、 p_0 は基準拘束圧、 $\dot{\epsilon}_0$ は基準ひずみ速度、 G'_0 、 G_0 は基本拘束圧 p_0 および基準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ における G' および G の値である。 M_{f0}^* は基本拘束圧 p_0 における M_f^* の値である。 s_{m0} は初期平均応力、 $\dot{\epsilon}_{11}$ は載荷時の鉛直ひずみ速度である。 s 、 q_1 および q_2 は拘束圧依存性に関するパラメータであり、 x 、 b はひずみ速度に関するパラメータである。

Fig.1~ Fig.3 に、拡張した式(1)~式(3)の概念図を示す。パラメータ G' 、 M_f^* および G は、全て拘束圧に依存し、変曲点 p_b を境として、低拘束圧下でのひずみ軟化特性と高拘束圧下でのひずみ硬化特性を個々に定式化している。また、 G' と G は、初期鉛直ひずみ速度に依存し、初期ひずみ速度の変化に伴う剛性の変動特性が定式化をしている。さらに、基準拘束圧 p_0 の設定により、地下空洞掘削などを対象とする場合に空洞壁面近傍で引張応力が発生する状態に対応できるようにし

キーワード：軟岩、三軸圧縮、拘束圧依存性、ひずみ軟化、ひずみ硬化、ひずみ速度依存性、クリープ挙動

〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計株式会社 土木技術部

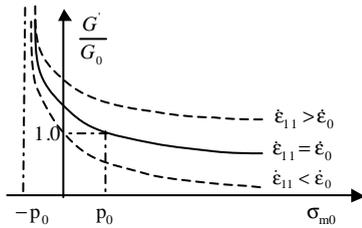


Fig.1 Relation of $G \sim \sigma_{m0}$

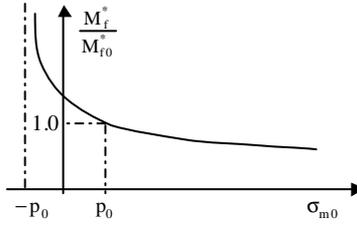


Fig.2 Relation of $M_f^* \sim \sigma_{m0}$

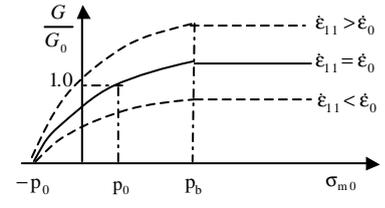


Fig.3 Relation of $G \sim \sigma_{m0}$

ている。なお、式(3)の G' は無次元量である。

3. 拡張した構成式による挙動表現

拡張した式(1)～式(3)の導入による挙動表現への影響について検討を行った。Table.1 に示す凝灰岩の物性値を用いた定ひずみ速度三軸 CD 試験とクリープ試験の解析結果をそれぞれ Fig.4、Fig.5 に示す。Fig.4 は異なる軸ひずみ速度の軸ひずみ - 軸差応力関係であるが、同じ拘束圧においてもひずみ速度の増加に伴い、変形挙動と軸差応力が大きくなることわかる。このような拡張した構成式により、試験結果を表現できることについては、別途確認している。

Fig.5 は、Table.1 のうちのパラメータ α_1 (式(1)を参照) を変化させた軸ひずみ速度の経時変化であるが、 α_1 が大きくなると、クリープ破壊が遅くなる挙動を示す。従って、 α_1 を変動させることによって、室内試験結果のクリープ挙動（破壊時間）を表現できることがわかる。

4. まとめ

オリジナルの足立 - 岡モデルに材料パラメータの拘束圧・ひずみ速度依存性を導入することで唯一の材料パラメータにより、広範囲の異なる拘束圧と異なる初期ひずみ速度条件下の軟岩力学特性を表現できることがわかった。これにより、当構成式を導入した数値解析手法により軟岩地盤における地下空洞の建設時および操業時の検討が可能になるものと考えられる。

今後、異なる岩種の室内試験や現場データを用いて、再拡張した構成式の適用性の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 足立 紀尚, 岡 二三生: 凍結砂のひずみ軟化型弾粘塑性構成式. 土木学会論文集, No.454/ -20, pp.75-81, 1992.
- 2) 東ら: 変形・強度特性の拘束圧依存性を考慮したひずみ軟化型弾粘塑性構成式の改良. 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, 共通セッション, CS10-013, 2002.9.

Table.1 Parameters used in simulations

G_0 (MPa)	118.6	p_0 (MPa)	0.1
	0.078	$\dot{\epsilon}_0$ (%)	0.01
(min.)	680.0	S	1.02
m_b (MPa)	1.44		0.09
b (MPa)	0.22	G'_0	260.0
M_f^*	1.81		0.744
M_m	1.28	1	0.04
a	0.935	2	0.137
p_b (MPa)	1.66	C	0.03

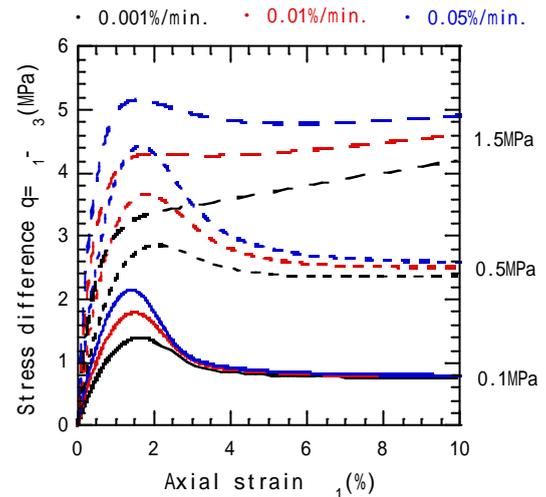


Fig.4 Axial strain - stress difference relationship

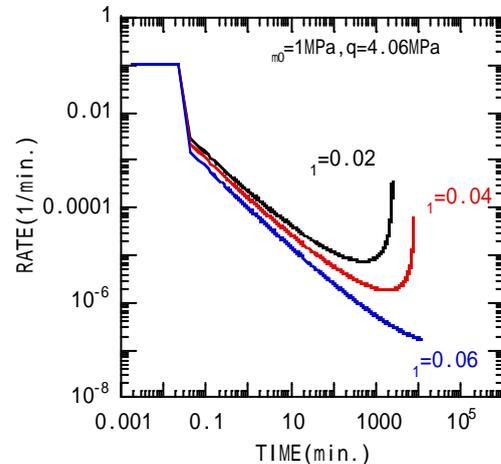


Fig.5 Axial strain rate - time relationship (creep)