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

東電設計(株) 正会員 東 均・田坂嘉章・宇野晴彦 東京電力(株) 正会員 西野隆之・兵藤英明 岐阜大学 正会員 張 鋒・八嶋 厚

## 1.はじめに

軟岩地盤における変形および破壊挙動を数値解析に より行う場合、任意条件下における応力 - ひずみ関係 を表現できることと同時に拘束圧に依存した強度 - 変 形特性が表現できる構成式を考慮する必要がある。本 検討で対象とした足立 - 岡モデル<sup>1)</sup>を用いて、拘束圧 の異なる三軸圧縮試験をシミュレーションした結果、 低拘束圧下の実験結果は共通のパラメータで比較的良 く挙動を表現できるが、高拘束圧下の実験結果のよう なひずみ硬化は表現できない。そこで、本検討では、 オリジナルの足立 - 岡モデル<sup>2)</sup>を基に、材料パラメー タを拘束圧の関数とした新たな改良を試み、その適用 性の検討を実施した。

2.材料パラメータの拘束圧依存性

足立・岡らは、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、体積弾性係数 K、ひず み硬化 - 軟化パラメータ  $M_f^*$ 、G および応力履歴パラ メータ の5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 - 岡モデルを拡張した<sup>1)</sup>。このうち、 G は、式(1)のような実験式で表されている。

 $G' = 1064 p_0 + 46.68 \sigma_{30}$ ....(1)

ここで、 *p*<sub>0</sub>は基準拘束圧、 <sub>30</sub>は拘束圧である。この 式では、G<sup>i</sup>は応力の次元となっている。

しかし、オリジナルの足立 - 岡モデルでは、G'は次のような双曲線型ひずみ硬化関数の初期接線勾配と定義されている<sup>2)</sup>。

式(2)のうち、 $M_f^*$ 、 \*(応力履歴テンソル不変 量)および <sup>P</sup>(粘塑性ひずみテンソル不変量)は、す べて無次元量であるから、G'も無次元量となる。した がって、式(1)のG'は、本来、無次元量で定義すべ きと考える。また、拡張した足立 - 岡モデル <sup>1)</sup>におけ る拘束圧<sub>30</sub>は、正の値のみを扱っており、空洞掘削 などを対象する場合、空洞壁面近傍域で引張応力が発 生するため、その適用性を考慮する必要がある。

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、b(塑性ポテンシャルパラ メータ)およびGの三つの材料パラメータを次のよう に定式化した。

$$G' = \frac{2G_0}{p_0 + \sigma_{30}} \cdot \left(\frac{p_0 + \sigma_{30}}{2p_0}\right)^3 \dots (3)$$

 $if\sigma_{30} \leq p_b$ 

 $if\sigma_{30} > p_b$ 

ここで、 $p_b$ は先行圧密応力相当の変曲点<sup>3)</sup>( $p_b$ 以上で は弾性係数が一定である)、 $p_0$ は基準拘束圧、 $G_0$ は基 本拘束圧  $p_0$ における初期せん断剛性、<sub>30</sub> は最小主応 力、 $b_0$ は基準拘束圧  $p_0$ における塑性ポテンシャルパ ラメータであり、S、、2 および は拘束圧依存 性に関するパラメータである。

Fig.1 ~ Fig.3 に、それぞれ改良した式(3) ~ 式(5)の概 念図を示す。これらの図によれば、パラメータG、b およびGは、全て拘束圧(最小主応力)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が個々に定式化されて いる。また、基準拘束圧  $p_0$ の設定により、引張応力状 態に対応できるようにした。なお、式(3)のG<sup>i</sup> は基準 拘束圧  $p_0$ における初期せん断剛性 $G_0$ を正規(無次元) 化したものである。

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 〒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







3. 改良した構成式による挙動表現

改良した式(3)~式(5)を導入することによる解析結 果への影響についてパラメータを変化させて検討を行 った。一例として、Table.1 に示す泥岩材料物性値を用 いた三軸 CD 試験の解析結果を Fig.4 と Fig.5 に示す。 Fig.4 は軸ひずみ - 軸差応力関係、Fig.5 は軸ひずみ -体積ひずみ関係である。

Fig.4 によれば、先行圧密応力相当の変曲点 (p<sub>b</sub>=1.5MPa:Fig.2 参照)より小さな拘束圧下で、ひ ずみ軟化挙動を示し、それより大きな拘束圧条件下で は、ひずみ硬化挙動を示す。Fig.5 によれば、低い拘束 圧から高い拘束圧までの軸ひずみ - 体積ひずみ関係は、 一般的な過圧密な軟岩試験結果と同様の傾向を示すも のと考えられる。

## 4.まとめ

オリジナルの足立 - 岡モデルに改良した式(3)~式 (5)を導入することによって、唯一の物性パラメータに より、幅広い異なる拘束圧下の力学特性を表現できる ことがわかった。

これにより、当構成式を用いた数値解析手法により地下空洞建設時の検討が可能になるものと考えられる。

なお、残留強度を支配するパラメータ $M_f^*$ に及ぼす 拘束圧の影響の研究は、今後引続き行う予定である。

## 参考文献

- 1) 足立 紀尚、岡 二三生、小高 猛司、古林 秀之、尾崎 仁美: 軟岩の変形・破壊挙動に及ぼす拘束圧の効果とひずみ軟化型弾 塑性構成式.土木学会論文集、No.665/ -53,pp.117-126,2000.12.
- 2) 足立 紀尚、岡 二三生:軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式.土
   木学会論文集、No.445/ -18,pp.9-16,1992.
- 3) 足立 紀尚、小川 豊和: 堆積軟岩の力学特性と破壊基準、土木 学会論文集、No.295,pp.51-63,1980.

Table.1 計算に用いた材料物性パラメータ

G <sub>0</sub> (MPa)	300.0	а	0.959
ν	0.125	p <sub>b</sub> (MPa)	1.50
τ (min.)	2.30×10 <sup>4</sup>	p <sub>0</sub> (MPa)	0.1
$\sigma_{\rm mb}$ (MPa)	7.00	S	-0.9
b <sub>0</sub> (Mpa)	0.71	Ę	0.58
${ m M_{f}}^{*}$	1.66	<b>ξ</b> 2	-1.0.
Mm	1.26		0.58



Fig.4 Axial strain - stress difference relationship



Fig.5 Axial strain - volumetric stain relationship