

京都大学大学院工学研究科

正会員

岡二三生

京都大学大学院工学研究科

学生会員

○ 木元小百合

## 1. はじめに

自然堆積地盤は、堆積環境・地質的な応力履歴・温度履歴・年代効果・化学的生成物による結合作用やイオン交換などの複雑な影響を受けており、一般に土構造は異方性を有している。そこで本研究ではこのような自然堆積状態での地盤の初期構造異方性を表現できる構成を導くために、Boehler<sup>1)</sup>らによって提案された異方性理論にならって、足立・岡<sup>2)</sup>による等方体の軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式を異方性材料としての塑性特性を記述できるように拡張した。さらに塑性ひずみが生じることによる初期構造異方性の変化の表現を取り入れた。

## 2. Boehler らによる面内等方体に対する異方性理論

Boehler らは等方体に関する関数の応力テンソルを、異方性の情報をもった変換応力テンソルなるものに置き換えることによって、異方体に対する関数を得るという異方性理論を提案した。一般に、2つの対称テンソル(ここでは  $\sigma_{ij}, M_{ij}$ )からなるテンソル値関数は、客観性を満たすとき以下の式で表現される。

$$\hat{\sigma}_{ij} = \phi_0 \delta_{ij} + \phi_1 M_{ij} + \phi_2 \sigma_{ij} + \phi_3 (M_{ik} \sigma_{kj} + \sigma_{ik} M_{kj}) + \phi_4 \sigma_{ik} \sigma_{kj} + \phi_5 (M_{ik} \sigma_{kl} \sigma_{lj} + \sigma_{ik} \sigma_{kl} M_{lj}) \quad (1)$$

$$\phi_i = \phi_i(\sigma_{kk}, (\sigma^2)_{kk}, (\sigma^3)_{kk}, M_{mn} \sigma_{nm}, M_{mn} (\sigma^2)_{nm})$$

ここに  $\sigma_{ij}$  は応力テンソル、 $M_{ij}$  は構造テンソルである。 $\phi_i$  は  $\sigma_{ij}$  および  $M_{ij}$  の不変量によって表される。構造テンソル  $M_{ij}$  については、 $M_{ik} M_{kj} = M_{ij}$  が成立するので、2次以上の項は除かれている。ここで Boehler らは、 $\phi_i$  のかわりに、塑性異方係数  $\alpha, \beta, \gamma$  を用いて次式のように表現した。

$$\hat{\sigma}_{ij} = (\alpha + \gamma - 2\beta)(M_{mn} \sigma_{nm}) M_{ij} + \gamma \sigma_{ij} + (\beta - \gamma)(M_{ik} \sigma_{kj} + \sigma_{ik} M_{kj}) \quad (2)$$

なお構造テンソル  $M_{ij}$  は面内等方体の法線ベクトル  $n_i$  のテンソル積によって定義されるものである。図-1のように  $x_1$  軸から  $\theta$  だけ傾いた地盤を考える時、

$$\hat{M} = QMQ^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & 0 & -\sin\theta\cos\theta \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta\cos\theta & 0 & \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで  $Q$  は  $y_2 (=x_2)$  軸に関する角度  $\theta$  回転変換テンソルであり、 $QQ^T = I$  である。

さらに異方性の特性方向を表す  $\theta$  の値を変化させることによって、塑性ひずみによる初期構造の変化を考慮する。ここでは、以下のように表されるロジスティック関数を用いて、 $\theta$  の値をスムーズに  $\theta_*$  に変化させる。

$$\frac{d\theta}{dx} = \rho\theta \left(1 - \frac{\theta}{\theta_*}\right), \quad dx = (de_{ij}^p de_{ij}^p)^{1/2} \quad (4)$$

$x$  は塑性偏差ひずみの第2不変量、 $\theta_*$  の値はモール・クーロンの破壊規準を仮定し、 $M_f$  の値より  $\theta = 64.1^\circ$  とした。

## 3. 足立・岡の軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式への適用

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (5)$$

全ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}$  は弾性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^e$  と塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  の和であると仮定する。塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{ij}^p$  について、前述した Boehler による変換応力テンソルを用いて異方性を導入する。降伏関数および塑性ポテンシャル関数内の応力履歴テンソルおよび応力テンソルを、それぞれ単純化異方性理論によって(2)式で変換したものに置き換え、異方性を考慮したものに拡張する。足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式において、

Fusao OKA, Sayuri KIMOTO

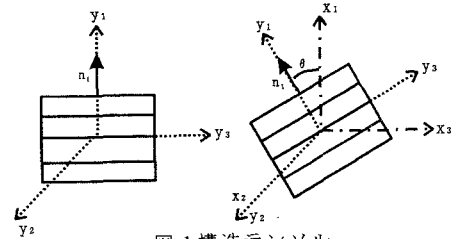


図-1 構造テンソル

塑性ひずみ増分は以下の式で与えられる。

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \left[ \frac{\bar{\eta}_{ij}}{\bar{\eta}} + \frac{(\bar{M} - \bar{\eta})}{3} \frac{\delta_{ij}}{3} \right] \left[ \frac{\eta^*_{kl}}{\eta^*} - \eta^* \frac{\delta_{kl}}{3} \right] \frac{d\sigma^*_{kl}}{\sigma^*_{sm}}, \quad \Lambda = \frac{M_f^{*2}}{G'(M_f^* - \eta^*)^2} \tag{6}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}, \quad \bar{\eta}_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sigma_m + b}, \quad \eta^*_{ij} = \frac{S^*_{ij}}{\sigma^*_m}$$

ここに  $\sigma^*_{ij}$  は減退記憶の原理を満足する応力履歴テンソルである。  $\bar{M}$  は過圧密領域では  $\bar{M} = -\bar{\eta}/\ln(\sigma_m + b)/(\sigma_{mh} + b)$ 、正規圧密領域では  $\bar{M} = \bar{M}_m$  でそれぞれ与えられる。  $\bar{M}_m$  は最大圧縮時の応力比  $\bar{\eta}$  の値である。  $M_f^*$  は残留強度状態の  $\eta^*$  の値、  $G'$  は双曲線型ひずみ硬化関数の初期接線勾配である。(6)式中の応力、および応力履歴に関する項をそれぞれ(2)式によって変換したものに置き換えることで異方性を考慮した塑性ひずみ増分を得る。

弾性ひずみ増分については等方体についてのフックの法則を一般化し、面内等方体に対するものに拡張した。

4. 排水三軸圧縮試験のシミュレーション

以上の方法で塑性変形、弾性変形について異方性を考慮し、足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式に適用して排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行なった。用いたパラメータを表-1に、解析結果を図-2に示す。また図-4に切り出し角を変えた軟岩(戸室石)の排水三軸試験結果<sup>3)</sup>(拘束圧 0.19MPa)を示す。本モデルにより、切り出し角による応力ひずみ関係(ピーク強度、立ち上がり部分の勾配の違い)およびダイレイタンスー特性の違いを表現することができる。塑性異方係数は  $\alpha=1.0, \beta=1.15, \gamma=1.1$  としている。 $\theta=0^\circ$  のとき強度が最大となり、 $\theta=45^\circ$  のとき最小となる。また図-3に(4)式によって初期構造異方性の変化を考慮した場合の解析結果を示す。 $\theta$  の変化に関するパラメータ  $\rho=20$  としている。ピーク強度は堆積面の角度によって異なるが、残留強度は堆積面の角度によらないという傾向を表現することができる。

(参考文献) 1)Boehler,J.P.: Applications of tensor functions in solid mechanics, springer verlag wien・New York,1987.

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, 第 445 号,pp.9-16,1992.

3) 古林 秀之：京都大学修士論文,2000.

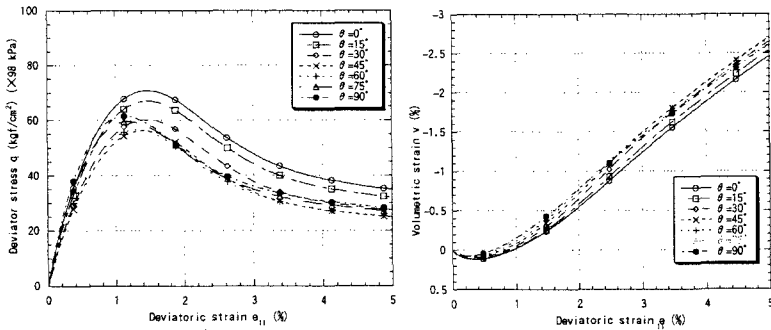


図-2 解析結果 (初期構造の変化を考慮しない場合)

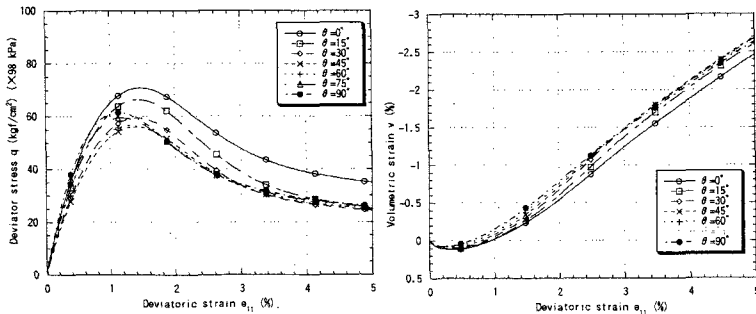


図-3 解析結果 (初期構造の変化を考慮した場合)

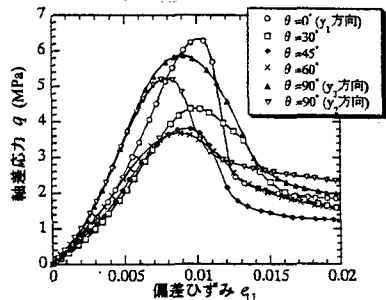


図-4 軟岩による排水三軸試験結果

表-1 材料定数

|                    |                |                                                  |
|--------------------|----------------|--------------------------------------------------|
| 拘束圧                | $\sigma'_{mo}$ | 0.49 (MPa)                                       |
| 最大正軸点での<br>応力比     | $\bar{M}_m$    | 1.557                                            |
| 破壊能力比              | $M_f^*$        | 1.557                                            |
| ひずみ硬化関数の<br>初期接線勾配 | $G'$           | 125.0                                            |
| 圧密利の応力             | $\sigma'_{mb}$ | 14.7 (MPa)                                       |
| 塑性ポテンシャル<br>パラメータ  | $b$            | 0.98 (MPa)                                       |
| ひずみ増分              | $\Delta e$     | 0.00025 ( $e < 0.09$ )<br>0.00005 ( $e > 0.09$ ) |

|                      |            |       |
|----------------------|------------|-------|
| 塑性異方性<br>パラメータ       | $\alpha$   | 1.0   |
|                      | $\beta$    | 1.15  |
|                      | $\gamma$   | 1.1   |
| 初期構造の変化<br>に関するパラメータ | $\theta^*$ | 64.1° |
|                      | $\rho$     | 20    |

|                |            |            |
|----------------|------------|------------|
| 弾性異方性<br>パラメータ | $E_v$      | 980 (MPa)  |
|                | $E_h$      | 1176 (MPa) |
|                | $G_{11}$   | 294 (MPa)  |
|                | $\nu_{11}$ | 0.1        |
|                | $\nu_{1H}$ | 0.2        |