

Ⅲ-A313 異方性を考慮した軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式

○ 京都大学 正会員 岡 二三生 京都大学 正会員 小高 猛司
建設省 正会員 古川 慎治
(元京都大学)

1. はじめに

自然堆積地盤は、堆積環境、地質的な応力-ひずみ関係、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作用を受けており、一般に土構造は異方性を有している。そこで本研究では、構造異方性を表現できる構成式を導くために、Boehler & Sawczuk¹⁾、Boehler²⁾らによって提案された横等方体に対する異方性理論を用いて、足立・岡³⁾による等方性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。

2. 足立・岡の軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式

全ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}$ は弾性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^e$ と塑性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^p$ の和であると仮定する。

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

さらに、一般化された等方弾性体 Hooke 則を仮定すると、弾性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^e$ は、

$$d\epsilon_{ij}^e = dS_{ij}/2G + d\sigma_m \delta_{ij}/3K \quad (2)$$

で与えられる。ここに dS_{ij} は偏差応力テンソル、 G はせん断弾性係数、 K は体積弾性係数である。

また、塑性ひずみ増分テンソルは、

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

で与えられる。ここに、 σ_{ij}^* は減退記憶の原理を満足する応力履歴テンソル、 $\bar{\eta}$ は応力比、 η^* は応力履歴比、 M_f^* は残留強度状態の η^* の値、 G' は双曲線型ひずみ硬化関数の初期接線勾配であり、 $\bar{\eta}_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sigma_m + b}$ 、 $\eta_{kl}^* = \frac{S_{kl}^*}{\sigma_m^*}$ 、 b および σ_{mb} は塑性ポテンシャルパラメータである。また、 $\bar{M}$ は過圧密領域では、 $\bar{M} = -\frac{\bar{\eta}}{\ln(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)}$ 、正規圧密領域においては、 $\bar{M} = \bar{M}_m$ でそれぞれ与えられることになる。 $\bar{M}_m$ はせん断過程において最大の体積圧縮ひずみが発生するときの $\bar{\eta}$ の値である。

3. Boehler らによる横等方体に対する異方性理論

Boehler²⁾ 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単純異方性理論を提案した。変換応力テンソルは空間の等方性を満たす関数である必要があるが、そのような関数として次式が考えられる。

$$\sigma_{ij} = \phi_1 \sigma_{ij} + \phi_2 M_{ij} + \phi_3 (M_{ik} \sigma_{kj} + \sigma_{ik} M_{kj}) \quad (4)$$

ここに、 $\hat{T}_{ij}$ は変換応力テンソル、 T_{ij} は応力テンソル、 M_{ij} は構造テンソルであり、 $\phi_i (i=1,2,3)$ はスカラー量の係数である。なお、構造テンソル M_{ij} は、図-1に示すような横等方体の特性面の法線ベクトル n_i のテンソル積によって定義されるものである。さらに、図-2のように水平面から θ だけ傾いた地盤を考える時、 M_{ij} は θ の関数となる。

ここで Boehler²⁾ らは、 $\phi_i (i=1,2,3)$ のかわりに、塑性異方係数 α, β, γ を用いて、式(4)を次式のように表現した。

$$\sigma_{ij} = \{(\alpha + \gamma - 2\beta) \text{tr}(M_{ik} \sigma_{kj})\} M_{ij} + \gamma \sigma_{ij} + (\beta - \gamma) (M_{ik} \sigma_{kj} + \sigma_{ik} M_{kj}) \quad (5)$$

ここに α, β, γ は塑性異方係数である。

4. 三軸排水試験のシミュレーション

前節で述べた変換応力テンソルの考えを、足立・岡³⁾の軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式の応力テンソルと応力履歴テンソルに対して用いて、ひずみ測度を変化させて三軸排水試験のシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた各パラメータは表-1の通りであるが、表中の応力履歴パラメータ η は足立・岡³⁾の軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式で定義されているパラメータであり、ひずみ軟化の度合いを表現する。

本研究では、Boehler²⁾ らが提案した塑性異方係数 α, β, γ の性質をみるために、これらの値を変えてシミュレーションを行った。シミュレーション結果は、堆積面の角度と強度、ダイレイタンシーの関係によって13種類に分類できることが明らかになった。

キーワード：構成式、異方性、軟岩、ひずみ軟化

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5084

5. 考察及び結論

ここで、実験結果と計算結果の関係を検討するために、図-3,4に足立・林^{4) 5)}による異なる角度の不連続面を持った軟岩に対する三軸排水試験の結果と本研究の計算結果($\alpha = 1.0, \beta = 0.8, \gamma = 1.2$)の応力-ひずみ関係を示す。 $\theta = 45^\circ$ のときの最大強度、残留強度は $\theta = 0^\circ$ の場合よりも大きくなっており、図-3と図-4はこの点に関して類似性をもっているといえる。また、図-5,6はBoehler²⁾らによる堆積層を形成している珪藻岩の一軸試験の結果と本研究の計算結果($\alpha = 1.0, \beta = 1.2, \gamma = 1.1$)の堆積面の角度と最大強度の関係を示したものである。 $\theta = 60^\circ$ で最大強度が最も小さくなり、また、 $\theta = 0^\circ$ の最大強度のほうが $\theta = 90^\circ$ の最大強度より大きくなるという点で図-5と図-6は類似している。以上の考察から、塑性異方係数 α, β, γ の取り方によって実験結果を定性的に表現しうることが明らかとなった。

参考文献

- 1)Boehler,J.P. and Sawczuk,A. : Acta Mechanica, Vol.27, pp.185-206, 1977. 2)Boehler,J.P. : Applications of Tensor Functions in Solid Mechanics, Springer Verlag Wien-New York,1987. 3) 足立紀尚・岡二三生 : 土木学会論文集、第445号、Ⅲ-18、pp.9-16、1992.3. 4) 足立紀尚・林正之 : 土木学会論文報告集、第305号、pp.97-110、1981.1. 5) 林正之 : 京都大学卒業論文、1979.

表-1 シミュレーションに用いたパラメーター

項目	パラメーター	値
平均有効応力	σ'_{m0}	5.0 (kgf/cm ²)
応力履歴パラメーター	τ	0.10
最大圧縮点での応力比	$\bar{M}_m$	1.557
破壊応力比	M'_f	1.557
双曲線近似したひずみ硬化関数の初期接線勾配	G'	125.0
せん断弾性係数	G	3333.3 (kgf/cm ²)
体積弾性係数	K	5400.0 (kgf/cm ²)
間隙比	e	1.1
圧密降伏応力	σ'_{mb}	150.0 (kgf/cm ²)
塑性ポテンシャルパラメーター	b	10.0 (kgf/cm ²)
ひずみ増分	$\Delta \epsilon$	0.00025($\epsilon < 0.09$) 0.00005($\epsilon > 0.09$)

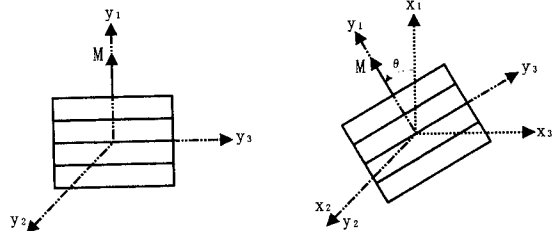


図-1 横等方体の構造テンソル 図-2 θ だけ傾いた横等方体の構造テンソル

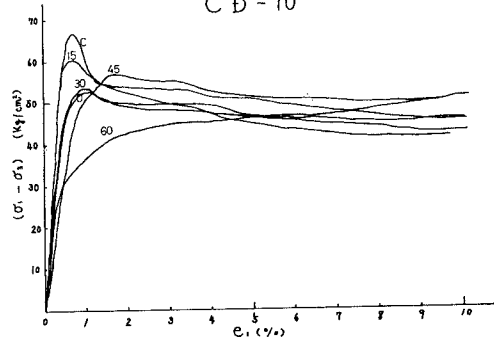


図-3 足立・林^{4) 5)}による三軸排水試験の結果

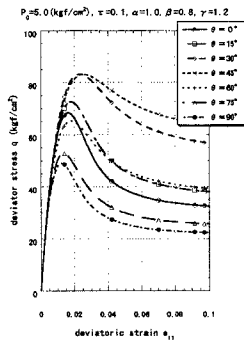


図-4 本研究の計算結果

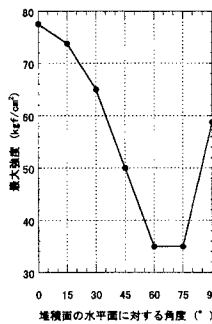


図-5 Boehler²⁾らによる一軸試験の結果

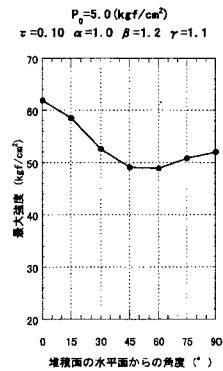


図-6 本研究の計算結果