## 間隙比の影響を考慮した砂の弾塑性構成式について

京都大学大学院	フェロー会員	岡 二	二三生
京都大学大学院	正会員	小髙	猛司
京都大学大学院	学生会員	山田	裕久
東海旅客鉄道㈱	正会員	寺	下 匠

1.はじめに

砂の構成式についてはいくつかのモデル (例えば岡ら (1999)<sup>1</sup>) が提案され液状化解析等に用いられるようになってき たが、構成式に含まれるパラメータと間隙比の異なる砂の物性との関係が明確になったとは言い難く、flow を起こすような 緩い砂から締固められた密な砂までの挙動を統一的に説明するまでには至っていない.Been と Jeffreies (1985)<sup>2)</sup> は、定 常状態に着目し、現在の間隙比と定常状態の間隙比との差で定義される状態変数に着目し砂の挙動の整理を試みた. 一方、 石原は、定常状態 (または準定常状態) に着目し、砂の挙動の考察を行っている. 山田ら (2000) は、最大圧縮点での応力比 (変相角にも対応) と状態指数との関係を与え、非常に緩い砂から密な砂までのモデルを考察している. 本報告では、山田ら のモデルを改良するとともに、実際の砂の挙動とモデルの特性との対応を検討した. また、杭の打ち込みや締固めなどでは、 平均有効応力の増加に対する応答が重要となる. このため、山田ら (2000)<sup>3)</sup> による非関連流動則・非線形移動硬化則に基 づいた砂の弾塑性構成式の静的液状化モデルを、過圧密領域・関連流動則の概念を取り入れ、静的液状化及び繰返し載荷 時の応力 ひずみ関係を説明できるモデルの開発を試みた. さらに、石原 (1993) による状態指数 (state index) Is を用いて 変相応力比に関連付けた. 擬似過圧密比と関係するパラメータ  $\sigma'_{mb}$ の影響については岡ら (2001)<sup>4)</sup> の発表で検討してい るので参照されたい.

## 2. 関連流動則を考慮した非排水三軸応力状態における砂の弾塑性構成式

非線形移動硬化パラメータを用いて降伏関数,塑性ポテンシャル関数を以下の式で与える.

$$f = \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} + \tilde{N}^* \mid \ln\left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_{ma}'}\right) - y_m \mid = 0$$
(1)

降伏関数において関連流動則の場合は $\tilde{N}^* = \tilde{M}^*$ ,非関連流動則の場合は $\tilde{N}^* = 0$ とし,また関連流動則から非関連流動則に移る場合は以下の式に従うものとする.  $d\tilde{N}^* = \tilde{N}^* \begin{pmatrix} 1 & \tilde{N}^* \end{pmatrix}$ 

$$\frac{dx}{dz} = bN^* \left( 1 - \frac{1}{M_m^*} \right) \tag{2}$$

$$d\sigma'_{m} = K d\varepsilon_{kk} - \Lambda K \frac{1}{\sigma'_{m}} \left\{ \tilde{M}^{*} sign(B) - \frac{\eta^{*}_{st}(\eta^{*}_{st} - \chi^{*}_{st})}{\bar{\eta}^{*}_{\chi}} \right\}$$
(3)

$$dq = 2\tilde{\mu}(d\varepsilon_{11} - d\varepsilon_{33}) - 2\tilde{\mu}\Lambda \frac{1}{\sigma'_m} \left\{ \frac{\eta_{11}^* - \chi_{11}^* - (\eta_{33}^* - \chi_{33}^*)}{\bar{\eta}_{\chi}^*} \right\}$$
(4)

 $\tilde{\mu}$ :ラメの定数  $d\varepsilon_{11}$ :軸ひずみ  $\Lambda$ :塑性ひずみ増分の大きさを規定する非負のパラメータ  $M_f^*$ :破壊応力比  $\eta_{ij}^*$ :応力 比テンソル  $\chi_{ij}^*$ ,  $y_m$ :非線形移動硬化パラメータ  $A_3$ :移動硬化を規定するスカラーパラメータで  $dy_m = A_3 d\varepsilon_{kk}^P$ b:関連流動則から非関連流動則に移る速度 K:体積弾性係数  $M_m^*$ :塑性体積ひずみが最大になるときの応力比の値.

$$\bar{\eta}_{\chi}^{*} = \{(\eta_{st}^{*} - \chi_{st}^{*})(\eta_{st}^{*} - \chi_{st}^{*})\}^{\frac{1}{2}}$$
(5)  

$$sign(B) = \frac{\ln \frac{\sigma_{m}'}{\sigma_{ma}} - y_{m}}{|\ln \frac{\sigma_{m}'}{\sigma_{ma}} - y_{m}|}$$
(6),  $\tilde{M}^{*} = \begin{cases} -\frac{\eta^{*}}{\ln(\sigma_{m}' / \sigma_{mc}')}$ (過圧密領域とび $\tilde{M}^{*}$ が $M_{m}^{*}$ に至った後) (7)

3.関連流動則と非関連流動則の非排水三軸試験シミュレーション結果の比較

非線形移動硬化則に基づく砂の弾塑性構成式を用い数値シミュレーションを行い,関連流動則モデルと非関連流動則モ デルについて比較した(図1,図2).解析に用いた砂の定数はOka(1992)が用いた富士川砂に対するものであり,パラメー タを表1に示す.また関連流動則モデルの方が非関連流動則モデルに比べ密な砂に似た挙動を示す傾向があることが分 かった.両モデルの差は変相応力比の値が大きいほど顕著になっている.

4. Castro による実験データとシミュレーション結果の比較

Castro によって行われた砂の非排水三軸試験結果 (1969)<sup>5)</sup>(図3)と比較した. 実験に用いられたパラメータを表2に 示す. 図4より関連流動則を用いたモデルは密な砂が示す挙動を示す傾向が見られる一方, 非関連流動則を用いると静的 液状化する砂の挙動を示すが軸差応力の値が小さくなる. このため関連流動則ではじまり, 途中で非関連流動則に遷移す るモデルを考えたが, このモデルが最もよく実験結果を再現している.

5.状態指数 Is(Ishihara,1993) を介した間隙比と変相応力比の関係

状態指数 Is は Ishihara(1993)<sup>6</sup> によって  $I_s = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_s}$ と定義される. 状態指数 Is と変相応力比の変化量  $\Delta M$  の関係は  $\Delta M = \alpha(I_s)^m$  となり, $\alpha$  を材料定数,m を定数として, $I_s = 0$  ならば  $M_m = M_f$ , $I_s > 0$  ならば  $M_m = M_f - \Delta M$  となる.

## keywords:砂,弹塑性構成式,間隙比,関連流動則,非関連流動則

連絡先(〒 606-8501 京都市左京区吉田本町・Tel:075-753-5085・Fax:075-753-5086)

-72-



図3の Castro による実験から各砂の間隙比と準定常状態における平均有効応力との関係を調べ $e_s = 0.648$ を求めた(図5).なお今回,Castro による実験結果からは定常状態を求めることが困難なため(a),(b) については準定常状態を,(c),(d) については変相状態をとった. $e_s$  から各砂における Is が得られ, $\ln(\Delta M) \sim \ln(I_s)$  平面における直線の傾きから m を, さらに  $\alpha$  を求める.Castro による実験においての $m,\alpha$  はそれぞれ $m = 2.2977, \alpha = 0.2847$ となった(図6). $m,\alpha$ が求まれば前述の  $\Delta M = \alpha(I_s)^m$ という式より各間隙比の砂の変相応力比を求めることが出来る.またこの結果より  $I_s$ が小さいほど 緩い砂の挙動に類似した結果が得られた.

## 6 . 結論

非関連流動則に基づいた砂の弾塑性構成式の静的液状化モデルを関連流動則過圧密領域を考慮できるモデルに拡張することでより対応性に富んだモデルに拡張することが出来た.Castro による実験においては砂の変形挙動の間隙比依存性を確認した. つまり, 変形に伴い動き始める前の変相線の位置と間隙比の関係を確認することが出来た. 本報告では, パラメータについては  $M_m^*$  について考察したが, その他, $\sigma'_{mb}$  や  $G^P$  についても考察が必要である.<sup>4)</sup>

参考文献1)Oka.F., Yashima, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S. 1999: *Géotechnique*, Vol. 49, No.5, 2) Been.K., Jefferies, M.G. 1985: *Géotechnique* Vol. 35, No.2, 3) 山田ら. 2000: 第55回土木学会年次学術講演会 -A015, 4) 岡ら. 2001: 第56回土木学会年 次学術講演会 (投稿中), 5) Castro, G. 1975: Ph.D. Thesis, Harvard University, 6) Ihihara, K. 1993: *Géotechnique* Vol. 43, No3.