内部構造の変化を考慮した砂の弾塑性構成式

大阪ガス㈱	正会員	山田裕久
京都大学大学院	フェロー会員	岡 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	木元 小百合

1 . 緒言

現在の液状化解析法は,対象とする地盤が液状化するか否かを判定するだけにとどまらず,液状化現象の発生後の地盤 や構造物の沈下や側方流動の予測,また改良地盤での地震時の挙動予測など非常に多岐に及んでいる.しかし課題も皆無 というわけではない.例えば,砂の構成式は有効応力解析法の重要な部分を占め,この有効応力解析法が厳密に検討可能で あるのは構成式に負うところが大きいが,その構成式自体もいくつかのモデルが提案され(例えば岡ら⁽¹⁾),また現在も研 究段階にあり,流動を起こすような非常に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.山田ら(2000)⁽²⁾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.また,寺下ら(2001)⁽³⁾は,山田らのモデルを改良するとともに,実際の砂の学動とモデ ルの特性との対応を検討し,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を開発した. 従来の砂の弾塑性構成式では,せん断に伴う内部構造の変化や破壊に対する表現は適切ではなかった.本報告では構成式 を拡張し,過圧密境界曲面の大きさを規定する σ'mb の大きさを偏差ひずみ増分 deij の関数とし,変形が大きくなるに従っ て過圧密境界曲面が縮小し,内部構造の破壊を表現した.また変相応力比に着目してやや緩い砂のモデル化を試みた.

2. 非排水三軸応力状態における砂の弾塑性構成式

正規圧密状態を仮定すると、非排水三軸応力状態において、軸差応力 $q = \sigma'_{11} - \sigma'_{33}$ 、平均有効応力 σ'_m の増分は以下の式で求められる. $dq = 3\tilde{\mu}d\varepsilon_{11} - 2\tilde{\mu}\Lambda \frac{1}{4} \left\{ \frac{\eta_{11}^* - \chi_{11}^* - (\eta_{33}^* - \chi_{33}^*)}{2\pi} \right\}$ (1)

$$d\sigma'_{m} = \frac{1}{3} (d\sigma'_{11} + 2d\sigma'_{33}) - \Lambda K \frac{1}{\sigma'_{m}} \left\{ M^{*}_{m} - \frac{\eta^{*}_{\chi}}{\eta^{*}_{st} (\eta^{*}_{st} - \chi^{*}_{st})} \right\}$$
(2)

 $\tilde{\mu}$: ラメの定数 $d\varepsilon_{11}$: 軸ひずみ Λ : 塑性ひずみ増分の大きさを規定する非負のパラメータで, M_f^* (破壊応力状態に至ったときの応力比 η^* の値)の関数 η_{ij}^* : 応力比テンソル χ_{ij}^* : 非線形移動硬化パラメータ $\bar{\eta_{\chi}^*}$: $\bar{\eta}_{\chi}^* = \{(\eta_{st}^* - \chi_{st}^*) (\eta_{st}^* - \chi_{st}^*)\}^{\frac{1}{2}}$ 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 η^* の値

3.弾塑性構成式の拡張

せん断変形が、剛性の低下やひずみ軟化などの内部構造の変化や破壊を伴うものとして弾塑性構成式の拡張を行う、過 圧密境界曲面 $f_b(图 1)$ の式は、 g'

$$f_b = \bar{\eta}_0^* + M_m^* \ln \frac{\sigma_m'}{\sigma_{mb}'} = 0 \qquad (3) \qquad \sigma_{mb}' = \sigma_{mbi}' \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda} v^P\right) \qquad (4)$$

この式を用いると、三軸圧縮試験をシミュレーションした場合に塑性体積ひずみ $(=v^P)$ の増加とともに σ'_{mb} も増加する. つまり、 圧縮によるひずみ硬化が考慮されている. σ'_{mb} の増加は硬化のみを表現することとなり、 内部構造の破壊による軟化は表現できない. そこで内部構造の変化を σ'_{mb} の減少として表現し、 σ'_{mb} を変化させる関数に双曲線正接関数 (タンジェントハイパボリック-tangent hyperbolic)を用いた.



図1:過圧素境界曲面

keywords:砂,弾塑性構成式,過圧密境界曲面,変相応力比 連絡先(〒 606-8501 京都市左京区吉田本町・Tel:075-753-5085・Fax:075-753-5086)



 $\alpha: 材料定数 d: 材料定数 \sigma'_{mb0}: \sigma'_{mb}$ の初期値 $\sigma'_{mbf}: \sigma'_{mb}$ が減少したときの最終下限値 $z:z = \int dz$ $dz = (de_{ij}de_{ij})^{\frac{1}{2}} de_{ij}:$ 偏差ひずみ増分

4.シミュレーション結果と考察

導いた構成式を用いて非排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行った.なお,解析に用いた Banding 砂のデータについてはGhaboussi.J and Momen.H(1982)⁽⁴⁾ によって解析が行われているためそこで用いられた材料パラメータを参考にした.材料パラメータを表1に示す. σ'_{mbf} ,dについて表2,表3のように変化させてパラメトリックスタディを行った.有効応力径路と応力ーひずみ関係の結果を図2,図3に示す.なお, $\alpha = 100$ とした.図2,図3の有効応力径路図からわかるように σ'_{mbf} ,dが小さいほど,それぞれ緩い砂の挙動に似た結果が得られた.この結果から, σ'_{mb} が減少すると、過圧密境界曲面が小さくなるとともに、塑性ひずみが生じやすくなり、かつ平均有効応力が減少すると考えられる.この考え方を用いると, σ'_{mbf} が小さいほど過圧密境界曲面は小さくなり、平均有効応力が減少しやすくなるということがわかった.5、変相応力比を変化させた場合のシミュレーション

上記のシミュレーションでは、 σ'_{mb} を減少させることで緩い砂の挙動を表現できることが明らかになった.しかし、緩い砂の中でも、せん断中に軸差応力が増加から減少に転じた後、また増加に転じるという実験結果 (例えば、Castro(1969)⁽⁵⁾、 Ishihara(1993)⁽⁶⁾)が数多く報告されているので、そのようなやや緩い砂のモデル化を試みるためにここでは変相応力比 M_m に着目し、変相応力比の変化がどのような影響を及ぼすかを検討した.解析で変化させる M_m を表4に示す.また、 $\alpha = 100, d = 0.008, \sigma'_{mbf} = 300.0, \sigma'_{mb0} = 920.0$ kPa とした.解析結果を図4に示す.変相応力比 M_m が大きいほど緩い砂に似た挙動を示すことがわかるが、特に Case 10,Case 11 では軸差応力が減少した後また増加に転じていることがわかる.つまり、変相応力比を大きくすることでやや緩い砂の挙動を説明できることがわかった.応力径路図に示されるように、非排水変形時に σ'_m の減少にともない軸差応力が減少するが、変形が進むと σ'_m の増加とともに軸差応力も増加している.このような傾向は、多くの研究者、例えば Ishihara(1993) などによってやや緩い砂に対して実験的に示されている.

従来の弾塑性構成式の考え方に、過圧密境界曲面の大きさを規定する σ'_{mb} が変化することによって内部構造の変化が表現できた.また、従来の構成式では非排水変形時に平均有効応力 σ'_m の減少にともない軸差応力が減少し、変形が進むと平均有効応力 σ'_m の増加にともない軸差応力が増加する、やや緩い砂を表現できなかったが、過圧密境界曲面の大きさを変化させ、変相応力比 M_m を間隙比の関数とする考え方を加えることにより適切に表現できることが明らかになった.

<u>参考文献1</u>)Oka.F.,Yashima,A.,Taguchi,Y.and Yamashita,S.:Géotechnique,Vol.49,No.5,1999. 2) 山田ら:第 55 回土木学 会年次学術講演会 -A015,2000. 3) 寺下ら:第 56 回土木学会年次学術講演会 -A036,2001 4) Ghaboussi, J. and Momen, H.: Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, Pande, G.N. and Zieukiewicz, O.C. eds, Balkema, 1982.5) Castro, G. : Ph.D thesis, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, 1969.6) Ishihara, K.: Géotechnique, Vol.43, No.3, 1993.