# 砂質土のひずみの局所化に関する2次元弾塑性 FEM 解析

大成建設(株)	土木技術研究所	正会員	○宇野	浩樹
	京都大学大学院	フェロー	岡 _	二三生

## 1. はじめに

支持力や斜面安定,土圧に関する問題では,極限つり合い法や極限解析法等の慣用法を適用する際,すべり線の 設定が重要である.また,古くより室内試験においてすべり線あるいはひずみの局所化やせん断帯が認められ,多 くの研究が報告されている<sup>1)</sup>.本研究では,砂の弾塑性構成式を用いて平面ひずみ条件下でのひずみの局所化解析 を行い,特にせん断帯の角度について検討を行った.

#### 2. 解析条件および解析手法

図1に解析モデルを示す.解析領域は高さ2m×長さ4mとし,要素は0.1m×0.1mの四角形アイソパラメトリック要素である.変位境界条件は底面を鉛直固定,水平自由とし,右側面を鉛直自由,水平固定とした.左側面は載荷面であり,鉛直変位を固定して水平に0.01m/min

(ひずみ速度 0.25%/min) で強制変位を与えた. 排水境 界条件は左側面のみを排水とし,他は非排水とした. 用 いた要素の構成式は Oka et al.(1999)による砂の弾塑性構 成式<sup>2)</sup>とした.本構成式は,以下のように記述される.

①過圧密境界曲面  $f_{b} = \overline{\eta}_{(0)}^{*} + M_{m}^{*} \ln(\sigma_{m}^{'} / \sigma_{mc}^{'}) = 0$ ②降伏関数  $f_{y} = \{(\eta_{ij}^{*} - \chi_{ij}^{*})(\eta_{ij}^{*} - \chi_{ij}^{*})\}^{1/2} - k = 0$ ③非線形移動硬化則  $d\chi_{ij}^{*} = B^{*}(M_{j}^{*} de_{ij}^{P} - \chi_{ij}^{*} d\gamma^{P*})$ ④ストレス~ダイレイタンシー関係  $-\frac{dv^{P}}{d\gamma^{P*}} = D^{*}(\eta_{z}^{*} - \tilde{M}^{*})$ 

<正規圧密領域>  $\tilde{M}^{*} = M_{m}^{*}, D^{*} = D_{0}^{*}$ <過圧密領域>  $\tilde{M}^{*} = -\eta^{*} / \ln(\sigma_{m}^{*} / \sigma_{mc}^{*}), D^{*} = D_{0}^{*} (\tilde{M}^{*} / M_{m}^{*})^{n}$ ⑤塑性剛性の低減  $B^{*} = B_{0}^{*} / (1 + \gamma_{ap}^{P*} / \gamma_{r}^{P*})$ ※  $\gamma_{m}^{P*}$  は変相線到達以降の  $\gamma^{P*} (= \int (de_{ij}^{P} de_{ij}^{P})^{1/2})$ 



表1 解析ケースとパラメータ

a) 各解析ケースで共通のパラメータ

e <sub>0</sub>	λ	к	$G_0/\sigma'_{m0}$	$B_0^*$	$\mathbf{B}_{1}^{*}$
0.756	0.012	0.0025	827.3	5000	130
C <sub>d</sub>	n	$\gamma^{P*}_{r}$	$\gamma^{E_r}$		
2000	11.5	0.005	0.5		

b) 各解析ケースで変化させたパラメータ

ケース	M <sup>*</sup> <sub>m</sub>	M <sup>*</sup> <sub>f</sub>	$D_0^*$	C <sub>f</sub>				
Case1	0.792	0.987	1.0	3000				
Case2	0.792	0.891	1.0	3000				
Case3	0.792	1.083	1.0	2200				
Case4	0.792	1.183	1.0	3000				
Case5	0.597	0.987	1.0	3000				
Case6	0.792	0.987	2.0	3000				

初期応力は全要素 $\sigma'_{xi}=\sigma'_{yi}=\sigma'_{mi}=33.3$ kN/m<sup>2</sup>の等方応力状態とし,初期の擬似過圧密比  $OCR^*_i$ は  $OCR^*_i=\sigma'_{mci}/\sigma'_{mi}=1.2$ とした.また,透水係数 k は  $k=2.0\times10^{-2}$ cm/s とした.解析プログラムは,微小変形理論が適用された LIQCA2D<sup>3)</sup>を用いた.今回は,場の方程式(つり合い式と連続式)から加速度項と減衰項を除き定式化された静的な解析手法で計算を行った.

### 3. 解析ケース

解析ケースは、豊浦砂  $D_r=60\%$ の中空ねじり液状化試験<sup>4)</sup>を再現したパラメータセットを参考にして、モデルパラ メータを変化させた 6 ケースとした.表1 に解析ケースとパラメータを示す.破壊応力比 $M_f$ とダイレイタンシー に関するパラメータ(変相応力比 $M_m$ 、ダイレイタンシー係数 $D_0^*$ )を変化させ、これらがひずみの局所化に及ぼす 影響を調べた.

## 4. 解析結果

マクロな応力比 $\sigma_x / \sigma_y$ と体積ひずみ $\epsilon_v$ をそれぞれせん断ひずみ $\epsilon_x - \epsilon_y$ に対して整理し,図2に示す.ここで、 $\sigma_x$ は

キーワード 砂, ひずみの局所化, せん断帯, 弾塑性, 構成式, 2 次元 FEM

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室 TEL 045-814-7236

3-302



くした Case5,およびダイレイタンシー係数  $D_0^*$ を大きくした Case6 においても、Case1 と比較すると、ダイレイタンシーが増加して $\sigma_x/\sigma_y$ の最大値が大きくなっている.

Case1 および Case3, Case5 で得られた変形図と塑性せん断ひずみの累積値 $\gamma^{P*}$  (=  $\int (de_{ij}^{P} de_{ij}^{P})^{1/2}$ )の分布を図3に示 す.ここでは、明確なせん断帯が確認できたせん断ひずみ $\epsilon_x - \epsilon_y = 6\%$ における変形図と $\gamma^{P*}$ の分布を示しており、せん 断帯を黄色の線で図示している、 $\gamma^{P*}$ が局所化してせん断帯が形成されており、Case3 と Case5 で得られたせん断帯 の鉛直からの角度(以下,せん断帯の角度) $\theta$ は、いずれも Case1 よりも大きくなった。





他のケースにおいても同様にしてせん断帯の角度 $\theta$ を求め、破壊応力比と変相応力比の差 $M_{f}^{I}-M_{m}^{I}$ で整理 したグラフを図4に示す. $M_{f}^{I}-M_{m}^{I}$ は応力空間におい てダイレイタンシーを発揮する範囲を表すが、  $M_{f}^{I}-M_{m}^{I}$ の増加、すなわち、ダイレイタンシーを発 揮する領域が広くなるのに伴って $\theta$ は大きくなってい る. Case6 は  $D_{0}^{*}$ を大きくしたケースであり、構成式 のストレス〜ダイレイタンシー関係に示したように、 このケースにおいてもダイレイタンシーの発生の増 加に伴って $\theta$ が大きくなっている.



## 5. まとめ

砂の弾塑性構成式でひずみの局所化解析を行い, せ

ん断帯の角度はダイレイタンシーに依存して変化する結果が得られた.今回は微小変形理論による解析手法を用いたが,今後は,幾何学的非線形性が考慮できる有限変形理論を適用した手法で解析し,知見の精度を上げていく.

## 参考文献

例えば, Lade, P. V.: Analysis and prediction of shear banding under 3D conditions in granular materials, Soils and Foundations, Vol.43, No.4, pp.161-172, 2003.
Oka, F. et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D07 (2007 公開版) 資料, 2007.
谷崎史織: 土の繰返し非弾性構成式に関する研究, 京都大学大学院修士論文, 2005.

図4 せん断帯の角度 $\theta \geq M_f - M_m$ の関係