

砂質土供試体の非均質性と変形局所化に起因する強度変動

東北大学 学生会員 ○ 戸久世昂真
東北大学 正会員 山川優樹
東北大学 フェロー会員 池田清宏

1. はじめに

地盤材料の要素試験では、材料の非均質性により試験結果にばらつきや変動がみられることがある。本研究では、砂質土供試体の強度と破壊形態に対する材料非均質性の影響について調べる。砂質土における密度の非均質性を材料的初期不整と考え、空間分布パターンを有する非均質な材料状態を二重フーリエ級数により平面ひずみ供試体に導入した解析を行い、強度変動や破壊形態を調べる。また、均質供試体について分岐解析を行い分岐モードを求め、これと材料非均質性の空間分布パターンとの比較を行い、強度変動の要因について分岐現象と初期不整感度の観点から考察する。

2. 参照実験の概要

ここでは参照実験として豊浦砂の平面ひずみ試験¹⁾を取り上げる。供試体寸法・形状、境界条件（上下端面の摩擦低減処理の有無）、载荷速度を様々に変化させて計 30 ケースを超える実験が行われているが、ここでは解析との比較対象として No. 3-3 の実験ケースを取り上げる。No. 3-3 では、幅 $W_0 = 50 \text{ mm}$ 、高さ $H_0 = 112.5 \text{ mm}$ 、形状比 $H_0/W_0 = 2.25$ 、奥行き寸法 20 mm の長方形供試体を用いている。相対密度は $D_r = 85 \pm 2\%$ 程度の範囲内に管理された。側方拘束応力 73.5 kPa のもとで、平面ひずみ条件で軸方向圧縮力 F （载荷開始時からの荷重増分）により、軸ひずみ速度 $0.25\%/\text{min}$ で単調な圧縮変位 ΔH を与えた。以下では、軸ひずみは公称ひずみ $\varepsilon^* := \Delta H/H_0$ で、軸方向圧縮応力は公称軸差応力 $\sigma^* := F/W_0$ で示す。

No. 3-3 では同一条件で 2 回の実験（No. 3-3-a, No. 3-3-b）が行われた。相対密度は No. 3-3-a で $D_r = 86.1\%$ 、No. 3-3-b で $D_r = 85.8\%$ であった。実験の結果、両ケースともに最大軸差応力を過ぎた軸ひずみ 0.05 付近からせん断帯の発生が確認され、No. 3-3-a では供試体の上半分に左右ほぼ対称な逆 V 字形、No. 3-3-b では供試体の左上隅から右下隅にかけて一本のせん断帯がみられた。最大軸差応力 $\sigma_{\max}^*$ は No. 3-3-a で 614.8 kPa 、No. 3-3-b で 603.0 kPa であった。

3. 材料非均質性を考慮した弾塑性解析による参照実験のシミュレーション

材料非均質性を導入した弾塑性解析により参照実験の再現を試みるとともに、非均質性の空間分布パターンが変形挙動に及ぼす影響を検討する。密な砂質土のせん断時にみられるひずみ硬化・軟化挙動と塑性体積圧縮・膨張挙動を表現するため、等方便化則に基づく応力三不変量依存型の下負荷面 Cam-clay モデル²⁾を用いた。砂質土における材料非均質性の最も大きな因子として密度（緩詰め／密詰め）が考えられる。ここでは、この構成モデルの履歴変数である圧密降伏応力 p_c の空間分布を材料非均質性とした。解析モデルおよび構成モデルの材料定数等を図-1 に示す。

材料非均質性の導入方法を以下に述べる。実際の供試体での非均質性は複雑でランダムな分布と考えられるが、本研究では最初の検討として以下のような周期的な分布を考えた。 p_c の基準値を $p_{c,\text{ave}}$ とし、次式により供試体における p_c の空間分布を定義した。

$$p_c(x, y) = p_{c,\text{ave}} + p_{c,\text{ave}} \left(A \cos \frac{2\pi x}{L_x} \cos \frac{2\pi y}{L_y} + B \sin \frac{2\pi x}{L_x} \sin \frac{2\pi y}{L_y} \right) \quad (1)$$

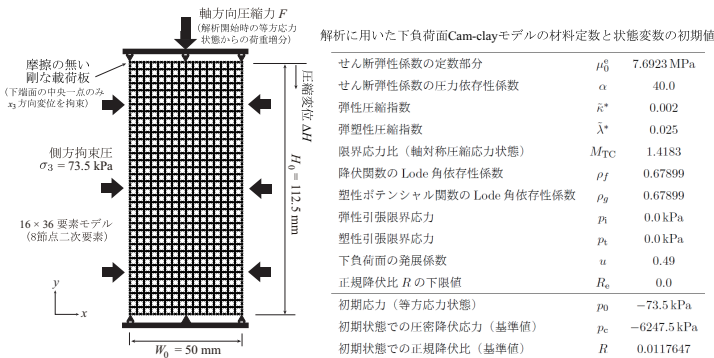


図-1 平面ひずみ圧縮試験の有限要素解析モデル

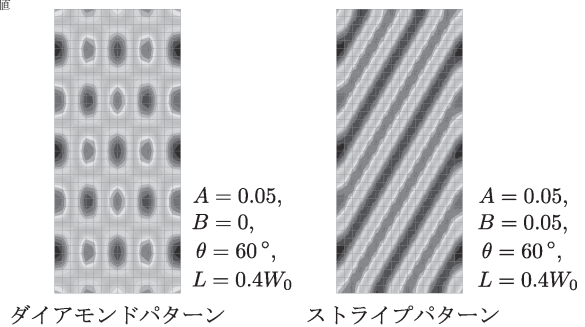


図-2 材料非均質性の空間分布パターン例

Keywords: 砂質土供試体, 非均質性, 強度変動, 変形局所化

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-06, Phone: 022-795-7420, E-mail: t-takamasa@msd.civil.tohoku.ac.jp (Tokuse Takamasa)

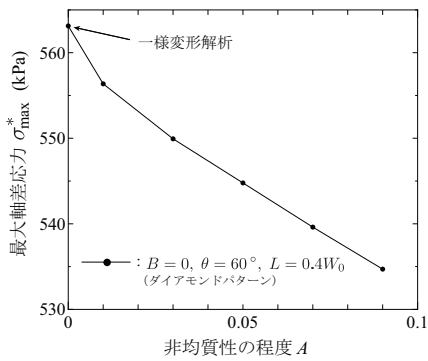


図-3 非均質性の程度 A の影響

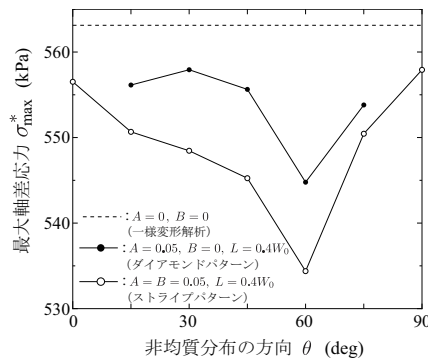


図-4 非均質性の方向 θ による影響

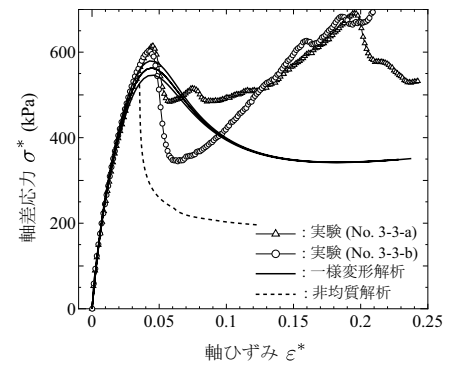


図-5 軸ひずみ-軸差応力関係（参照実験と数値解析）

ここで, x は軸圧縮方向, y は側圧方向に対応する. A および B は材料非均質性の程度を表す. 図-2 に例を示すように, $A \neq 0, B = 0$ のときダイヤモンドパターンの分布に, $A = B \neq 0$ のときストライプパターンの分布になる. $L := L_x L_y / \sqrt{L_x^2 + L_y^2}$ は斑状または縞状の空間分布の周期 (間隔寸法) を表す. 但し, $L_x := L / \sin \theta$, $L_y := L / \cos \theta$ であり, $\theta := \tan^{-1}(L_y / L_x)$ は x 軸からの空間分布の傾きを表す.

非均質性の程度 A による最大軸差応力 $\sigma_{\max}^*$ の変化挙動を図-3 に示す. A の増加に伴って最大軸差応力が単調に低下している. 非均質性の方向 θ による最大軸差応力 $\sigma_{\max}^*$ の図-4 に示す. 最大軸差応力の変化挙動は各パターンで異なるが, いずれも $\theta = 60^\circ$ で最大軸差応力が最も低下しており, 材料非均質性が強度に及ぼす影響は空間分布パターンによって異なることを示唆している.

基準値 $p_{c,ave}$ および基準値から $\pm 5\%$ 変化させた均質供試体の一様変形解析を行った. 豊浦砂の最大・最小密度を参照すると, 今回の解析条件では, p_c の $\pm 5\%$ の変化は相対密度で $\pm 0.5\%$ 程度の变化に相当する. 式 (1) の材料非均質性を導入した解析 (非均質解析) の結果と参照実験をあわせて図-5 に示す. 同図にはストライプパターン ($A = B = 0.05, \theta = 60^\circ, L = 0.4W_0$) による非均質解析の結果を示した. 一様変形解析の結果は構成モデルの硬化・軟化挙動を直接的に表示したものである. 非均質解析では, 一様変形解析での最大軸差応力の少し手前で急激な応力低下に転じ, 参照実験と同様の挙動を示している. 初期の不均質性に方向を与えた時に強度低下を引き起こす現象は他の論文³⁾でも報告されている.

4. 分岐解析

材料非均質性による強度変動や変形形態の変化挙動に対して分岐現象が介在している可能性に着目し, その検証のため分岐解析を行った. 分岐モード (分岐点における接線剛性行列の右固有ベクトル) と分岐後のせん断ひずみの進展状況, ならびに軸ひずみ-軸差応力曲線のうち分岐点と荷重極大点 (軸差応力が最大値を示した点) の周辺の拡大図を図-6 に示す. 参照実験における供試体の破壊状況と類似した変形形態が解析で再現されている.

材料非均質性による強度変動と, 実験と解析の変形形態が類似していることが確認された. 本研究では, 材料不均質性の空間分布パターンを二重フーリエ級数を用いたが, 今後は実際の実際の空隙比分布などを再現したランダムな空間分布パターンを用いて, 材料非均質性と供試体の強度変動, そして分岐モードの相互の関連性について検討を行う予定である.

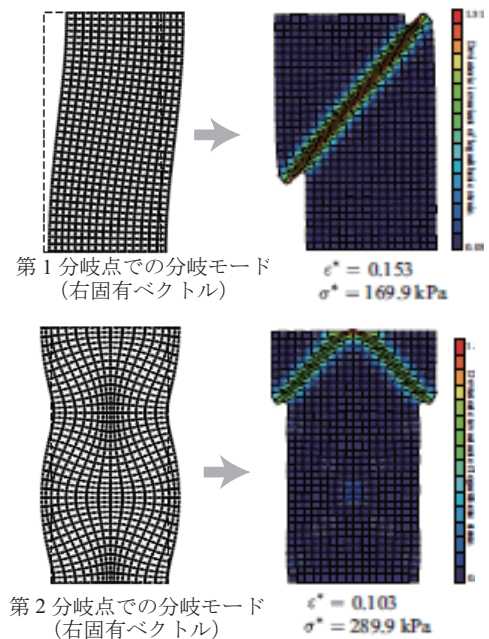


図-6 分岐モードと分岐後の変形状態

参考文献

- 1) 池田清宏, 山川優樹, 櫻庭嗣大, 須藤良清: 砂の平面ひずみせん断形態の幾何学的考察, 土木学会論文集, No. 729/III-62, pp. 87-98, 2003.
- 2) Yuki Yamakawa, Koichi Hashiguchi, Kiyohiro Ikeda: Implicit stress-update algorithm for isotropic Cam-clay model based on the subloading surface concept at finite strains, *Int. J. Plasticity*, Vol. 26, pp. 634-658, 2010.
- 3) José E. Andrade, Jack W. Baker and Kirk C. Ellison: Random porosity fields and their influence on the stability of granular media, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 32, No. 10, pp. 1147-1172, 2008.