

Ⅲ-23 有限変形 Cam-clay model による 平面ひずみ供試体の弾塑性変形解析

東北大学 学生員 ○伊丹洋人
東北大学 正会員 堤成一郎
東北大学 正会員 池田清宏

1. はじめに

地盤の平面ひずみせん断試験において、「袈裟切り型」や「バルジ型」、「ダイヤモンドパターン」など、さまざまなせん断帯が形成されることがよく知られている¹⁾。本研究では、砂の平面ひずみ試験における変形・破壊形態を、有限変形 Cam-clay モデルによる弾塑性解析によりシミュレーションする。

2. 解析手法について

平面ひずみ試験における砂供試体の破壊現象のように変形局所化が顕著な問題では、有限ひずみ状態に対しても適用可能な定式化が必要である。そこで本研究では、変形勾配の乗算型分解と超弾性構成式に基づく有限変形弾塑性境界値問題の定式化を用いる。また、構成則としては Cam-clay モデルを用いた。モデリングの詳細については、文献²⁾を参考された。

3. 有限変形 Cam-clay モデルについて

Cam-clay モデルを用いた各種の試験に対する挙動をここに述べる。ここでは構成式の応答性を把握する。なお、解析領域としては $1 \times 1 \times 1$ の立方体領域を解析に用いた。

(1) 材料定数

材料定数およびひずみの初期値として以下のものを採用した。せん断弾性係数 $\mu_0 = 3.7692 \times 10^3$ (KPa), $\rho = 0.13$, $\gamma = 0.006$, 初期等方応力 $p = -49$ (KPa), 降伏応力 $p_{y0} = -735$ (KPa), $e_0 = 0.68$, 限界状態定数 $M = 0.9$ 。ただし、引張および膨張を正としている。

(2) 等方圧密試験

等方圧密・除荷・再載荷試験における等方応力-体積ひずみ関係を図-1 に示す。この図が示すように、Cam-clay モデルでは、実験で観測される等方圧密挙動を再現している。降伏面の内部を純粋弾性域と仮定する古典弾塑性論に属し、再降伏後は始めの載荷時と同じ圧密曲線をたどって変形が進む。

(3) 平面ひずみ試験

平面ひずみ排水・圧縮試験結果を図-2 に示す。なお、材料定数および初期値は 3-(1) と同様のものを用い、初期降伏応力 p_{y0} を変化させることで過圧密比 $OCR (= p_{y0}/p_0)$ だけを 1 から 20 まで変えて解析を行った。このように OCR を変えることで、硬化と軟化の両方の挙動を表現している。また、軸ひずみの進展に伴って、いずれも同じ限界状態に達することが分かる。なお、図-3 より $p-q$ 面における挙動は、Cauchy 応力と Kirchhoff 応力による記述では異なっている。Cauchy 応力による記述ではどの挙動も一直線上を動いているが、Kirchhoff 応力による記述では降伏後、同一直

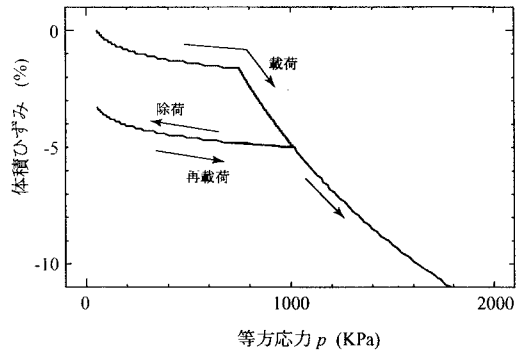


図-1 等方圧密試験における体積ひずみ-等方応力関係

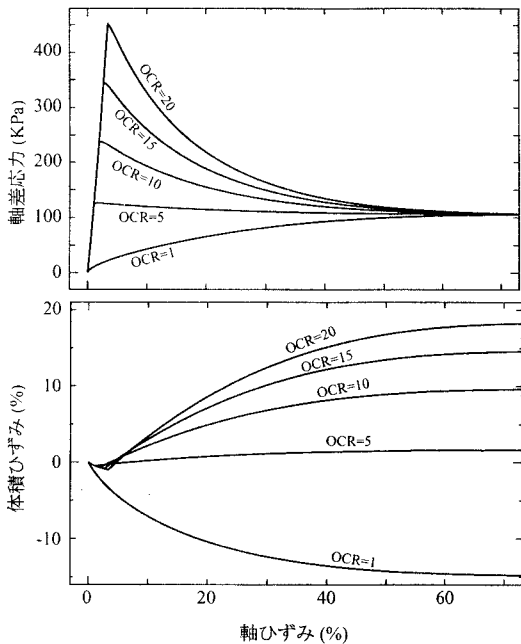


図-2 軸ひずみ-軸差応力および体積ひずみ

線上を経由しないことが分かる。

4. 平面ひずみせん断試験のシミュレーション

本章では、Cam-clay モデルによる弾塑性有限要素解析を行い、砂の平面ひずみせん断試験において観察される、せん断帯の形成を伴う変形過程を追跡する。また解析結果の評価に際しては、荷重-軸ひずみ関係の実験結果との比較の

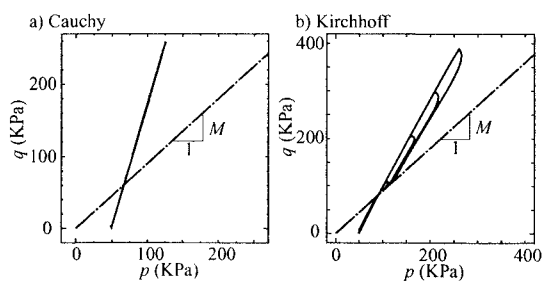


図-3 各種応力による p - q 面

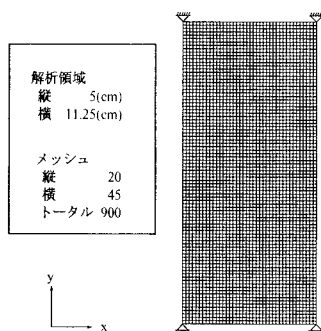


図-4 解析モデル

みならず、解析領域全体の变形性状にも着目する。

(1) 解析対象と境界条件

比較対象とする平面ひずみせん断試験では、豊浦砂を用い、供試体の寸法は高さ $H=11.25$ (cm)、幅 $D=5$ (cm)、厚さ $T=2$ (cm) と設定した。なお、実験は端面摩擦のある状態でせん断した。本解析では図-4 のような解析対象を用いた。但し、2 次元平面ひずみ状態を仮定している。また、境界条件は実験と同様に、載荷・反力側とも摩擦有りの変位拘束とした。材料定数は、3-(1) と同様のものを用いる。

(2) 荷重-軸ひずみ関係

図-5 に、実験、1 要素解析および有限要素解析の結果を示す。供試体をメッシュ分割し幾何学的な性質を考慮することで、供試体はさらに強い軟化挙動を示すことが分かる。また、ひずみ 5% および 10% におけるせん断ひずみ分布を図-6 に示す。供試体内に複数の変形の局所化領域 (せん断帯) が形成されていることがわかる。以上のことから、実験から得られる荷重-軸ひずみ関係は材料自体の軟化の性質だけでなく、変形の局所化など供試体の幾何学的効果を含めて全体の軟化挙動が発現していると考察される。

5. おわりに

有限変形 Cam-clay モデルによる 1 要素および有限要素解析によって、その応答特性を把握すると共に実験結果との比較により有用性と適用性を示した。さらに、平面ひずみせん断試験においては、荷重-軸ひずみ関係における材料

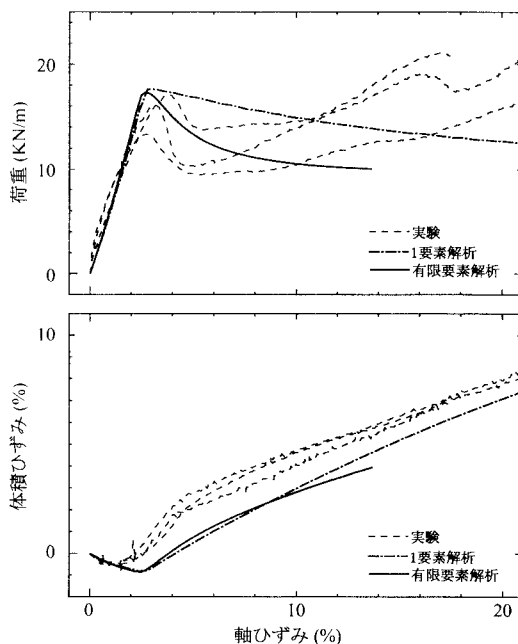


図-5 軸ひずみ-荷重および体積ひずみ関係

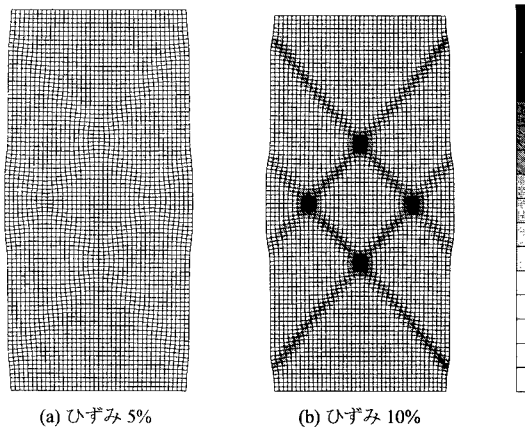


図-6 解析結果 (体積ひずみ分布)

の軟化は材料自体の軟化の性質だけではなく、幾何学的なせん断帯の発生による強度の低下も寄与していることを示した。

参考文献

- 1) 山川優樹, 寺田賢二郎, 池田清宏, 鳥居邦夫: 圧縮場における弾塑性体の分岐解析とパスジャンプ挙動, 土木学会論文集, No.701/III-58, 73-86, 2002.3
- 2) Borja, R.I. and Tamagnin, C.: Cam-Clay plasticity Part III: Extension of the infinitesimal model to include finite strains, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.33, pp.283-315, 1996.