

1-21 局所化された変形に及ぼす初期形状の影響

東北大学工学部 ○学生員 千葉 尚
 東北大学大学院工学研究科 正員 岩熊 哲夫
 東北大学大学院工学研究科 正員 後藤 文彦

1. はじめに

粘性土供試体を圧縮せん断していくと、せん断の進行に伴いすべり線のような局所の変形を生じ、最終的な破壊に至る現象が観察される。その時、変形が局所化している帯のパターンが種々観察され、必ずしも同じパターンが最後に残るとは限らない。また変形途中で現れるしわのような帯も変形が進むにしたがって変化するなど、いわゆる第何次の分岐モードで変形しているのか特定できない。おそらくは異なるモードの分岐点が近接しているものと予想されるため、本研究では我々の提案した構成モデル¹⁾を用い、さまざまな初期形状を与えた平面ひずみ圧縮モデルを有限要素解析し、どのようなモードの変形局所化がどのような順で生じるのかを確かめてみる。同時に他のモデルを用いて行われた既存の研究（例えば Cam-clay モデルを用いた飯塚ら²⁾の解析結果）と比較する。

2. 基礎方程式

大変形問題の枠組み内でモデル化を行うため、構成則は nominal 応力速度 \dot{n}_{ij} と速度勾配 $v_{k,j}$ を用いて

$$\dot{n}_{ij} = F_{ijkl} v_{k,l} \dots\dots\dots (1)$$

と記述する。ここに F はある種の接線材料係数である。塑性は J_2 流れ理論を基本とし、これに拘束圧依存性や塑性体積変化・非共軸性を考慮する。降伏条件は Mises の降伏条件で与えることにすると、塑性ひずみ増分は

$$d_{ij}^p = \frac{1}{H} \left(\frac{\sigma'_{ij}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\beta}{3} \delta_{ij} \right) \left(\frac{\sigma'_{ij}}{2\bar{\sigma}} + \frac{\alpha}{3} \delta_{kl} \right) \bar{\sigma}_{kl} + A \left\{ \bar{\sigma}'_{ij} - \frac{1}{2\bar{\sigma}^2} \sigma'_{kl} \bar{\sigma}_{kl} \sigma'_{ij} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに H は硬化係数であり、 α は内部摩擦係数、 β はダイレイタンシー係数と呼んでもよい。第1項目が塑性ポテンシャル項であり第2項目が非共軸項であり、 A がその材料係数である。ここでは局所化したすべり変形をせん断帯と呼ぶことにし、せん断帯の発生条件として Hill のモデルを採用する。すなわち

$$\det|v_i F_{ijkl} v_l| = 0 \dots\dots\dots (3)$$

がせん断帯の発生条件を与える。一旦すべり線の発生条件が満たされた有限要素内には、第2のメカニズムとしての二重すべりモデルが発生するものとし、その変形速度成分を d^m とすると、総変形速度 d は弾性成分 d^e と塑性成分 d^p に加えて

$$d = d^e + d^p + d^m \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

3. 解析対象及び解析例

解析対象は縦横比 $L/W = 2$ の平面ひずみ圧縮供試体である。両側面それぞれに初期不整を次式で与える。

$$\frac{v_i}{L} = \frac{W}{L} \left[k_i + c_i \cos \left\{ 2\pi \left(\frac{n}{L} y - \frac{1-k_i}{2} \right) \right\} \right] \quad i = 1, 2 \dots\dots\dots (5)$$

振幅 c の下添え字 1, 2 はそれぞれ供試体の左右側面での値を示し、 $k_1 = 0$ 、 $k_2 = 1$ とする。境界条件は図-1 が底辺固定・上辺水平方向固定の場合で、図-2 が底辺左端固定・底辺鉛直方向固定の場合である。それ以外の辺は自由表面である。増分ステップを $-\Delta u/L = 1.0 \times 10^{-4}$ 、 $\alpha = \beta = 0$ とし、 $n = 3$ の場合に得られた荷重変位曲線が図-1-a、2-a である。なお、荷重変位曲線中の破線は初期不整を与えない完全系の場合である。変形形状図は巨視的な圧縮ひずみが 12% に達した状態を示している。ここで、発生したすべり線の形状によって、便宜的に図-1-b のような変形モードを 8 次モード、図-2-b を 6 次モード、図-1-c、1-d を 2 次モード、図-2-c、2-d を 1 次モードと呼ぶことにする。なお、図中の黒丸は変形中初めて式 (3) が満足される要素が現れた点である。

図-1、2 の場合とも初期不整を与えたモデルは、初め完全系の分岐パスを追跡するような経路をたどっているが、変形の進行に伴い異なる分岐モードへ遷移してしまう。これは、完全系の経路近傍に異なる分岐モードへの分岐点が多数存在するためであると考えられ、このことはさらに、初期不整の値が微妙な違いでしかなくにもかかわらず終局強度に大きな差があることから推測できる。また、図-1-c には左側面にくぼみが見られるが、これは圧

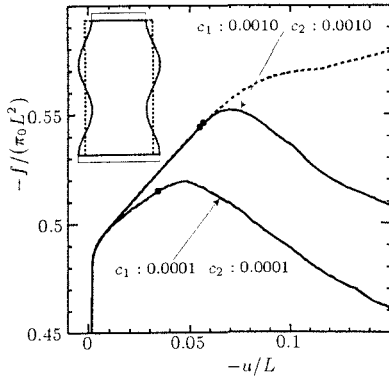


図-1-a 荷重変位曲線

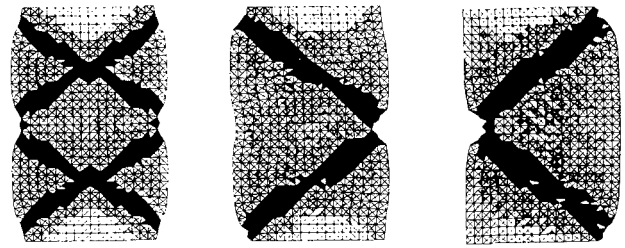


図-1-b $c_1 = 0.0000$
 $c_2 = 0.0000$

図-1-c $c_1 = 0.0010$
 $c_2 = 0.0010$

図-1-d $c_1 = 0.0001$
 $c_2 = 0.0001$

図-1 荷重変位曲線及び変形形状図

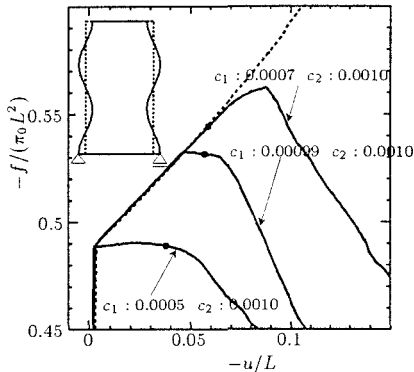


図-2-a 荷重変位曲線

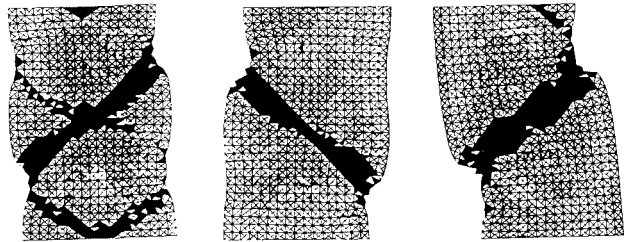


図-2-b $c_1 = 0.0007$
 $c_2 = 0.0010$

図-2-c $c_1 = 0.00099$
 $c_2 = 0.0010$

図-2-d $c_1 = 0.0005$
 $c_2 = 0.0010$

図-2 荷重変位曲線及び変形形状図

縮みずみが5~6%の状態まで8次モードの変形が進行し、そこから2次モードへ変化したため、圧縮ひずみが1%付近で2次モードへと変化した図-1-dよりも8次モードの影響が強く残り、最終的な変形形状が両方のモードを足し合わせたような形状になっていることがわかる。このような変形モードの大きな遷移は、図-2-bにおいても確認される。すなわち、圧縮ひずみが9%程度まで6次モードの変形が進行し、そこから1次モードへと変化したために、この2種類の形状を足しあせたような変形形状になっている。局所化した領域は、1次・2次モードの場合は側面中央部付近から端部の方向へ、8次モードの場合は中心から端部の方向へ進展し、次第にその領域の幅を広げていくことも確認された。しかしながら、我々の初期不整のパターンや大きさに対して同様の解析をした結果、最終的な変形形状としては図-1と同じ境界条件の場合は2次モード、図-2と同じ境界条件の場合、上下対称な初期不整の場合は2次モード、非対称な場合は1次モードに遷移するものが多いという結論を得た。

4. まとめ

初期不整の形状の微妙な違いによる、局所的な変形形状の変化を系統的に求めた。完全系のパス付近に多種の分岐モードが近接していると考えられるため、初期形状の微妙な違いとで他のさまざまな分岐モードへ漸近する結果が得られた。この際、すべり線の形状がより単純である変形モードへ分岐を繰り返す傾向が得られた。また、塑性への体積変化等のパラメータを無視した構成則を用いたにもかかわらずより地盤材料に近い構成則を用いた既存の研究結果に近い結果を得ることが出来た。

参考文献

- 1) 白戸真大, 岩熊哲夫: 微視すべりを組み込んだ構成モデルその大変形問題への適用, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.257-268, 1998.
- 2) 小林一三, 飯塚敦, 太田秀樹: 正規粘土供試体せん断時における局所変形の遷移, 土木学会論文集, No.617/III-46, pp.1-18, 1999.