

平面ひずみ圧縮下での多軸性と局所変形パターン

Localized deformation pattern and multiplicity of stress of compression tests in plane strain

湯本 健寛*

Takahito Yumoto

* 構造強度学研究室 (指導教官: 岩熊哲夫 教授)

地盤材料を圧縮するとせん断帯のような局所変形が現れ、最終的に破壊に至る。要素試験と呼ばれるものも実は境界値問題として同様の進行性破壊が生じる。そのため要素試験の数値解析も盛んに行われるが、その多くの数値解では実際の試験とは異なる形状のせん断帯が形成される。ここでは材料特性や側圧を加えた平面ひずみ圧縮の有限要素解析を行うことで、そのせん断帯の向きについて検討した。

Key Words : *confining pressure, localized deformation, double-slip model*

1. 序論

地盤材料の特性を調べる試験に平面ひずみ圧縮試験や三軸圧縮試験がある。この要素試験でも載荷が進むにつれて供試体内部に変形の局所化が進行するため、純粋に材料特性の測定にはならない。当然、供試体の境界条件や初期状態の影響を受け、結局は単純な材料試験も境界値問題に他ならないということは明らかである。一方、平面ひずみ圧縮試験の数値解析の報告では、側圧があるものでも変形の局所化の際に現れるすべり線の角度が実際の実験と異なるものが多く見られる。本研究ではこの原因を境界条件の影響という観点から検討する。また同時に内部摩擦角やダイレタンシー係数等の材料定数の影響の検討も行う。

2. 構成モデル

構成モデルは白戸・岩熊¹⁾によって提案されたものを用いる。弾性部分は一般化された Hooke の法則に従うとし、塑性部分は流れ理論の枠組みの中で最も基本的な弾性モデルである J_2 流れ理論を拡張して、拘束圧依存性や体積変化の塑性成分を考慮した非関連流れ則を基本とする。さらに変形の局所化に大きな影響を持つ非共軸項を加えることにより、塑性ひずみ増分が

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

で表せるとする。右辺第 3 項は、Hill の不安定条件が満足された後にその特性方向に向いた二重すべりメカニズムが生じるとし、それによるひずみ増分成分である。こ

の報告ではヤング係数 $E = 100 \text{ MN/m}^2$, せん断弾性係数 $\mu = 38 \text{ MN/m}^2$, 硬化パラメータ $H/\mu = 0.001$, 非共軸パラメータを $\bar{\mu}/\mu = 0.003$ とし、内部摩擦係数を $\alpha = 0.05$, ダイレタンシー係数を $\beta = \pm 0.1$ とした。なお、 $\bar{\mu}$ と A は $\frac{1}{\bar{\mu}} \equiv \frac{1}{\mu} + 2A$ という関係にある。

3. 平面ひずみ圧縮試験

解析対象は地盤材料の圧縮試験やそれに関する数値解析でよく用いられる 1:2 程度の寸法比を持つ矩形供試体領域の圧縮である。圧縮するに当たり、図-図-1 のように側圧 P/L を載荷した上で圧縮する。境界条件は図-図-1 に示す 2 種類を比較する。図-図-1 の左図は面 A-B を x, y 方向に固定、面 C-D は x 方向に固定し y 方向に強制変位を下方に与える。これを「固定条件」と呼ぶ。図-1 の右図は、 $A'-B'$ 面は中央のみ x, y 方向に固定しそれ以外は y 方向にのみ固定、面 $C'-D'$ は y 方向に強制変位を与える。これを「自由条件」と呼ぶ。本研究では文献²⁾の実験を参考に、側圧無しの固定条件における圧縮解析での初期降伏時の上載応力の 50% を、側圧 P/L として与えることとする。また、初期不整³⁾も両側面に cosine 曲線で与えた。

4. 側圧の影響

図-2 は非対称 5 次モードの初期不整を与えた自由条件での側圧の無い場合で図-3 が側圧を加えた場合であり、共に圧縮ひずみが 8% の状態である。図-4 がその荷重-変位曲線である。応答は側圧の分だけ抵抗が大きくなり、初期降伏直後から極端に軟化が起きている。側圧の影響で変形の集中帯が変化し、右上端から左下端にかけて大変形が生じる。図-2 の集中帯は水平線から 30 度くらいの傾きであるのに対し、側圧をかけた図-3 では 60 度以上の角度にも見え、実験値に近い現象が

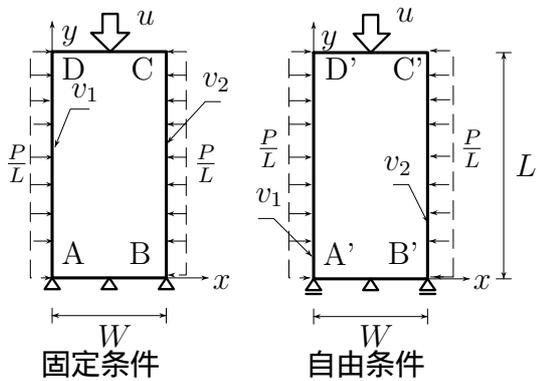


図-1 境界条件

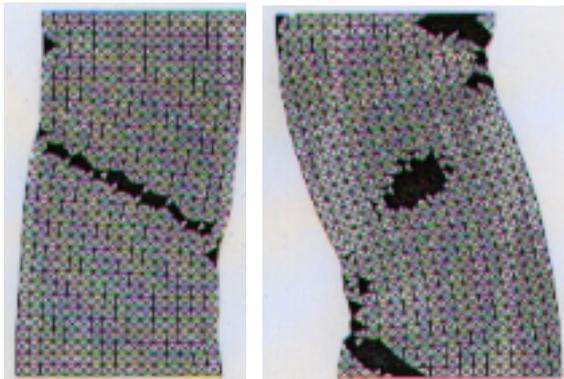


図-2 側圧無しの変形状 (ひずみ 8.0%) 図-3 側圧がある場合の変形状 (ひずみ 8.0%)

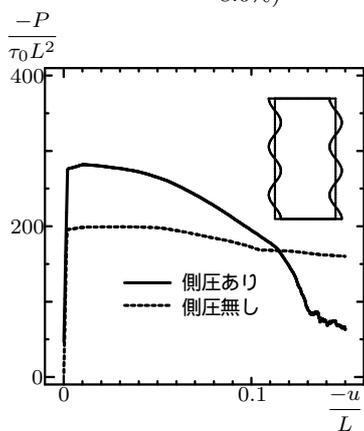


図-4 非対称 5 次の初期不整の場合

求まった。

5. 材料特性の影響

地盤材料特有の粒子性に関する特性をモデル化した関するパラメータである内部摩擦係数 α と、ダイレイタンシー係数 β を与えた解析を行った。図-5, 6 はそれぞれ対称 1 次と 4 次の初期不整を与えた自由条件において、側圧を加えた場合の荷重 - 変位曲線である。比較のために $\alpha = \beta = 0$ のグラフも付した。 α は軟化、硬化のそれぞれでその傾向をさらに強める働きをすることが分かる。

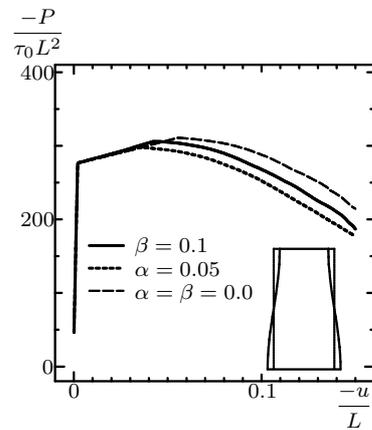


図-5 対称 1 次の初期不整の場合

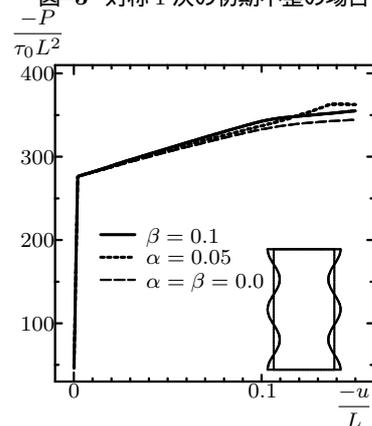


図-6 対称 4 次の初期不整の場合

一方 β は、この圧縮状態で正としているので塑性的体積膨張を意味するが、特に危険側の図-5 の軟化ではそれを促進しているこの 2 つの図から、このダイレイタンシー効果によって降伏直後の剛性はやや大きくするが、その後の終局状態付近の軟化が促進されることが分かり、地盤材料のようなものでこの効果の重要性を再確認できた。

6. まとめ

圧縮を受ける矩形供試体にわずかな側圧を加えることにより、すべり線の入る角度の変化を確認することができたと共に、局所変形パターンの変化を確認できた。また、材料定数である内部摩擦係数とダイレイタンシー係数が材料の安定性に与える影響を定量的に示すことができた。

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) 吉田輝, 後藤正司, 亀谷泰久, 龍岡文雄, 木幡行宏, 董軍: 砂礫の平面ひずみ圧縮試験に置けるせん断層の応力・変形関係, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム発表論文集, pp.189-196, 1994
- 3) 千葉尚, 白戸真大, 岩熊哲夫, 後藤文彦: 圧縮試験における局所変形の発達, 応用力学論文集 Vol3, pp323-334,2000.

(2002 年 2 月 13 日 提出)