

破壊状態と限界状態を考慮した一般化降伏関数

法政大学 学 石橋 泰
法政大学 学 大橋 正未知
法政大学 熊谷 岳志
法政大学 正 草深 守人

1. まえがき

すでに、限界状態論に基づく修正 Cam-Clay モデルの適用範囲を広げる目的で拡張された降伏関数が提案されている(法政モデルと呼ぶ)。しかしながら、このモデルは図1に示すような密な粘土の非排水三軸試験結果に見られるような破壊状態の後に限界状態に至るという過程を考慮できない。本研究では、法政モデルを拡張し、圧密非排水試験における破壊状態を考慮した降伏関数(修正法政モデルと呼ぶ)を示し、室内試験結果との比較を行った。

2. 法政モデルと修正法政モデル

法政モデルでは降伏キャップを楕円形の一部と仮定し、楕円の頂点を限界状態とすることにより、降伏関数を(1)式で与えた。また、修正法政モデルは、法政モデルと同様、降伏キャップを楕円形の一部と仮定し、かつ限界状態線をこの楕円の接線で仮定した(図2)。また、この降伏キャップにおける楕円の頂点を破壊状態として、新たに破壊状態線を導入し、降伏関数を式(2)で与えた。

$$\begin{aligned} \text{法政モデル} : \quad f &= \Lambda^2 M^2 p^2 - 2\Lambda^3 M^2 p_0 p \\ &+ \Lambda^2 (2\Lambda - 1) M^2 p_0^2 + (1 - \Lambda) q^2 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{修正法政モデル} : \quad f &= \Lambda M^2 p^2 - 2\Lambda \Gamma M^2 p_0 p \\ &- (1 - 2\Gamma) \Lambda M^2 p_0^2 + (\Gamma - \Lambda) q^2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 M は限界状態線の勾配、 p_0 は降伏キャップの移動を表す等方圧密圧力を表す。式(3)で定義される Λ は土固有のパラメータであることがすでに確認されている。また、式(2)に含まれる Γ は新たに導入した材料パラメータであり、 p_0 と p_f の比を表したものである。また、 Γ と Λ の間には式(4)の関係が要求されることから、これらは独立なパラメータではない。

$$\Lambda = \frac{p_c}{p_0} \quad (3) \quad \Gamma = \frac{p_f}{p_0} = \frac{1}{2 - \Lambda} \quad (4)$$

3. 実験値と解析値の比較と考察

提案した修正法政モデルの実用性を評価・検討するために、非排水三軸試験の結果と、法政モデルおよび修正法政モデルの有限要素解析結果の比較を試みた。試料の材料定数は非排水三軸試験および等方圧密試験より、 $M=1.39$, $\lambda=0.1616$, $\kappa=0.0077$, $\Lambda=0.6$ と決定した。また、修正法政モデルに含まれる Γ は式(4)より0.714とした。例として初期圧密応力 221kN/m^2 の試料における実験結果と、両モデルを用いた計算結果の比較を図3, 図4に示す。また、直接基礎の支持力問題に対する両モデルを用いた有限要素解析を実施した。両モデルによる偏差応力の第2不変量 J_{2D} の分布図、及び偏差ひずみの第2不変量 I_{2D} の分布図の解析結果を図5～図8に示す。

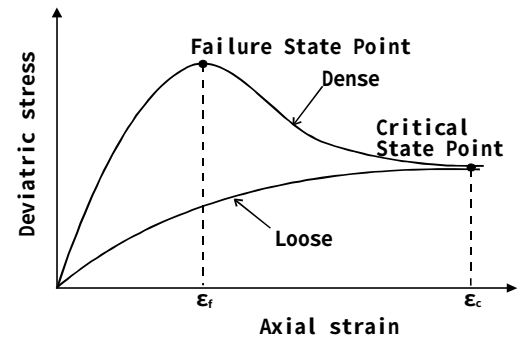


図1 飽和粘土の応力-ひずみ関係

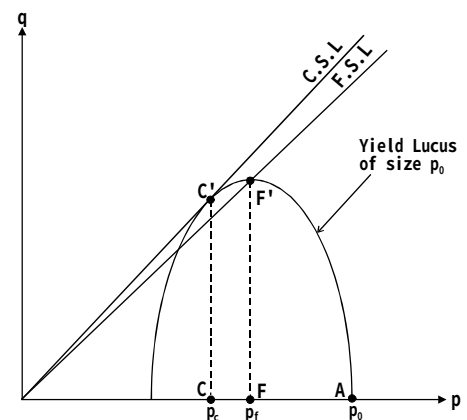


図2 修正法政モデル

応力経路から明らかなように、修正法政モデルは法政モデルと比較して、破壊状態線までは、実験値に近い挙動を示した。しかしながら、破壊状態以降の応力経路について、修正法政モデルは実験値と異なる挙動を示す結果となった。応力－ひずみ関係については、せん断開始時での挙動は両モデル共に実験値と差が見られたが、破壊状態前後については、修正法政モデルは法政モデルと比較して、比較的实验値に近い結果となった。また、修正法政モデルは破壊前のひずみ硬化から破壊以後に生じるひずみ軟化までを表現できることが確認できた。以上のことから、修正法政モデルはひずみ軟化を示す試料に対し有効であると考えられ、今回比較したひずみ硬化を示す試料においてもある程度土の挙動を表現できることが分かった。

また支持力試験においては、図5～図8より法政モデル、修正法政モデル共に載荷板端部にせん断応力の集中が見られ、破壊が生じていることから、局所破壊を表現できることが分かる。特に修正法政モデルは、図6に示すように載荷板直下に剛体的な土楔が形成されるような現象を説明している。このことから、修正法政モデルは支持力問題における土の破壊挙動をほぼ表現できるように思われる。

4. あとがき

法政モデルを拡張し、破壊状態と限界状態を考慮した降伏関数を示し、いくつかの具体的な例題について数値解析を行った。解析結果と実験値との比較から提案した降伏関数が降伏から破壊状態を経て限界状態に至る過程をほぼ表現できるモデルであることを示した。また、修正法政モデルは法政モデルと比較して、破壊状態までの応力状態をよりよく表現できることを示し、修正法政モデルは法政モデルを改善したモデルであることが確認された。しかしながら、非排水三軸試験での破壊状態以降の応力経路について、修正法政モデルは実験値との差が大きいことから、実際問題の適応性について、実験精度の確認、モデルの改良、材料パラメータの評価精度の向上等、今後改善すべき多くの課題が残された。

参考文献

- 1) C.S.Desai and H.J.Siriwardane: Constitutive Laws for Engineering Materials, Prentice-Hall, 1984
- 2) 板垣敏章: Roscoe 面と限界状態線を降伏および破壊関数とする構成方程式の研究, 法政大学大学院建設工学研究科修士論文, 1997
- 3) 中村慎一郎: 限界状態論に基づく地盤材料の一般化と構成方程式の研究, 法政大学大学院工学研究科修士論文, 1994

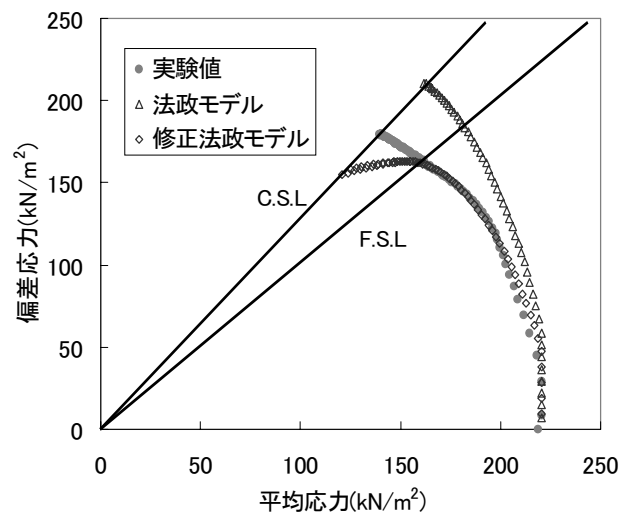


図3 応力経路

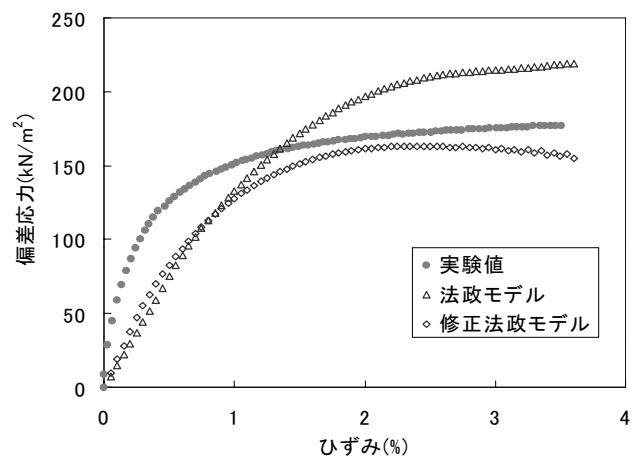


図4 偏差応力－ひずみ

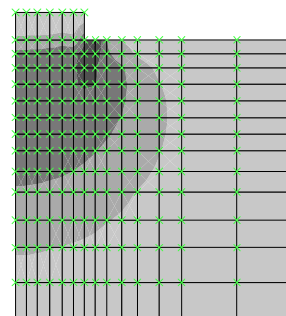


図5 J_{2D} 分布図
(法政モデル)

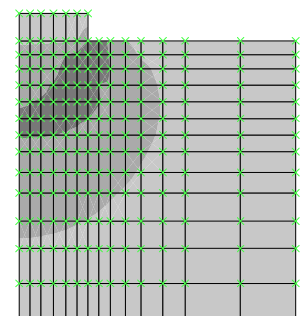


図6 J_{2D} 分布図
(修正法政モデル)

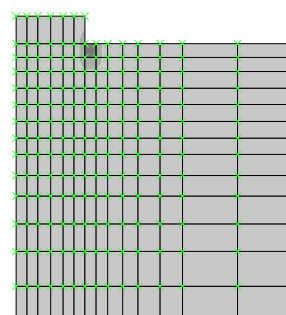


図7 I_{2D} 分布図
(法政モデル)

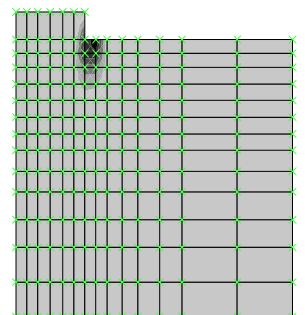


図8 I_{2D} 分布図
(修正法政モデル)