ジャンプ硬化則を導入した繰り返し塑性モデルの検証

(独)	農研機構	農村工学研究所	正会員	○林田	洋一
	東京	京農工大学大学院	正会員	向後	雄二
(独)	農研機構	農村工学研究所		増川	晋
(独)	農研機構	農村工学研究所	正会員	浅野	勇
(独)	農研機構	農村工学研究所	正会員	田頭	盉和

1. 目的

一般的に土木材料として利用される土は不飽和状態 であることが多いが、不飽和土における繰り返し載荷 特性についてはその研究例が少ない。本報告では、豊 浦標準砂をサクション制御下で繰り返し載荷した三軸 圧縮試験結果を対象に、筆者らが提案するジャンプ硬 化則¹⁾を導入した繰り返し塑性モデルによりシミュレ ーションを行いその適用性を検討する。

2. 構成モデル

筆者らが提案している不飽和土の弾塑性モデル²⁾は、 サクションの効果を①不飽和土の有効応力に及ぼす効 果、②不飽和土の塑性変形に対する抵抗に及ぼす効果 とし、後者については塑性体積ひずみとサクションに より先行圧密応力が変化する等方硬化型モデルとして いる。併せて、せん断時における非線形な応力--ひず み関係や軟化挙動を表現するために、Boundary surface モデルに類する繰り返し塑性モデルを用い、その硬加 則としてジャンプ硬化則を導入している。ジャンプ硬 化則を導入した繰り返し塑性モデルの概念図を図-1 に 示す。なお、ここでは説明のため便宜的に楕円型の降 伏面を用いた関連流れ則のモデルを用い正規降伏面は 変化しないものとして表記している。(a)は等方載荷時、 (b)は初期せん断時(応力反転回数 m=0)、(c)は応力反 転時、(d)は第一回目の繰り返し載荷時(応力反転回数 m=1) を示している。図中に示す α^m_{ii} は下負荷面の相似 中心、 β_{iin}^{m} は下負荷面における原点 (back stress)、 σ_{iin}^{m} は 現在の応力点、
ô"mは正規降伏面上の共役応力点である。 正規降伏面に対する下負荷面の相似比を α_{ii}^{m} 、 σ_{iin}^{m} 、 $\hat{\sigma}_{ii}^{m}$ の位置関係を用いて式(1)で定義する。

$$\overline{R}_{n}^{m} = \frac{\left|\sigma_{ij} - \alpha_{ij}^{m}\right|}{\left|\hat{\sigma}_{ij} - \alpha_{ij}^{m}\right|} = \frac{\left|\beta_{ijn}^{m} - \alpha_{ij}^{m}\right|}{\left|\beta_{ij}^{0} - \alpha_{ij}^{m}\right|} = \frac{\left|\alpha_{ij}^{m} - \beta_{ijn}^{m}\right|}{\left|\alpha_{ij}^{m}\right|}$$
(1)



ここで、 β_{in}^{0} は正規降伏面の原点であり、式(1)から 下負荷面における原点 β_{in}^{m} が求まる。 $\overline{R}_{n+1}^{m} = 1$ の時、現 在の応力点が正規降伏面上にあることを表し、 $\overline{R}_{n+1}^{m} < 1$ の時、正規降伏面内部の下負荷面上にあることを表す。

キーワード 不飽和土、数値解析、繰り返しせん断、弾塑性モデル、繰り返し塑性 連絡先 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6 (独)農研機構 農村工学研究所 Tel: 029(838)7571 載荷方向の反転は \bar{R}_{n}^{m} の増分 $d\bar{R}_{n}^{m}$ (= $\bar{R}_{n+1}^{m} - \bar{R}_{n}^{m}$)で判定 し、 $d\bar{R}_{n+1}^{m} < 0$ の時に応力方向の反転を判定し、その時 点の応力点を新たな下負荷面の相似中心 α_{ij}^{m+1} とする。 $d\bar{R}_{n+1}^{m} > 0$ の時は、下負荷面は等方的に拡大する。この モデルにおける構成関係は式(2)のとおりで、塑性係 数*H*は式(4)に示す正規降伏面上の共役点における塑 性係数 \hat{H} 、正規降伏面に対する下負荷面の相似比 \bar{R}_{n}^{m} 、 材料パラメータ α_{n} により式(3)で定義する。

$$d\sigma = \left(D - D\frac{\overline{n}n^{T}D}{H + n^{T}D\overline{n}}\right)d\varepsilon = D^{ep}d\varepsilon$$
(2)

$$H = \hat{H} - \alpha_n \ln \overline{R}_n^m (3), \qquad \hat{H} = -\frac{\partial f}{\partial \varepsilon^p} \frac{\partial \psi}{\partial \hat{\sigma}} / \left(\left| \frac{\partial f}{\partial \hat{\sigma}} \right\| \frac{\partial \psi}{\partial \hat{\sigma}} \right| \right) (4)$$

ここで、Dは弾性マトリックス、 D^{ep} は弾塑性マトリッ クスであり、n、 \overline{n} は式(5)、(6)で表され、f、 ψ は降伏関数、塑性ポテンシャル関数である。

$$n = \frac{\partial f}{\partial \hat{\sigma}} / \left| \frac{\partial f}{\partial \hat{\sigma}} \right| \qquad (5), \qquad \overline{n} = \frac{\partial \psi}{\partial \hat{\sigma}} / \left| \frac{\partial \psi}{\partial \hat{\sigma}} \right| \qquad (6)$$

なお、下負荷面の拡大、縮小に伴い塑性変形が生じる ため、正規降伏面も順次変化する。この正規降伏面の 変化に応じて、下負荷面の相似中心を式(7)により、 移動させる。

$$\alpha_{ijn+1}^{m} = \frac{I_{cn+1}^{m}}{I_{cn}^{m}} \alpha_{ijn}^{m}$$
(7)

3. 解析条件

解析モデルは直径 5cm、高さ 10cm の供試体の 1/4 を 対象とした軸対称条件で、中心軸を鉛直ローラ、底面 を水平ローラとし、中心軸と底面との交点の節点を固 定とした。解析に用いた実験ケースを表 1 に示す。詳 細な実験条件については、文献³を参照されたい。

弾塑性モデルにはサクションの効果を導入したキャ ップモデル型降伏面と楕円型塑性ポテンシャル面によ る非関連流れ則モデルを用いた。

	$\rho_{\rm d}({\rm g/cm}^3)$	w (%)	s (kPa)	$\sigma_{\rm net}$ (kPa)		
1	1.475	3.73	4.42	98.39		
2	1.298	4,64	2.73	98.77		
3	1.312	3.53	8.19	100.30		
4	1.314	3.49	22.95	99.03		

表 1 解析に用いた実験ケース

4. 解析結果とその考察

解析結果と実験データの比較を図-2 に示す。図-2 より、初期せん段時については $q-\varepsilon_a$ 関係、 $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 関係は

比較的良く実験結果と一致しており、繰り返し載荷時 の $q-\varepsilon_a$ 関係については実験データが示すヒステリシス 挙動を解析結果でも表現できており比較的良く実験結 果と一致している。しかしながら、繰り返し載荷時の ε_v $-\varepsilon$ 関係は実験結果に比べ解析結果の方が体積ひずみ の発生量が少ない。また、ケース 1 の実験値は繰り返 し載荷時に体積圧縮挙動を示すのに対し、解析値は体 積膨張挙動を示し、実験結果を再現することができな かった。

これらのことから今後の課題として、繰り返し載荷 時の $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 関係の再現性を向上させるため塑性ポテン シャル面の形状等について検討を実施するとともに、 他の実験ケースについてもその適用性を検討する予定 である。



参考文献

1)向後他(2002)二つのサクション効果を考慮した修正弾塑
 性モデル、農業土木学会論文集、No.217、9-18

 2) 向後他(2007).不飽和ロック材の繰り返し載荷試験のシ ミュレーション,第42回地盤工学研究発表会 平成19年度発 表講演集 CD-ROM

3) 林田他(2008) サクションを考慮した豊浦標準砂の繰り返 し三軸試験のシミュレーション,第 43 回地盤工学研究発表会 平成 20 年度発表講演集 CD-ROM