

移動硬化則における背応力を制御した飽和しらすの非排水繰返し挙動評価

八戸工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○田中茉優

八戸工業高等専門学校 正会員 清原雄康

1 はじめに

背応力は、移動硬化に関するパラメータであり、応力空間における降伏曲面の移動を表している。筆者らは、移動硬化則を用いた土の弾塑性構成則を構築し、二戸しらすの繰返し三軸試験を想定した陽解法プログラムにて背応力の制御を変化させ、二戸しらすの弾塑性挙動の実測と解析による挙動を比較した。

2 ひずみ制御繰返し三軸試験の概要

試料土は2011年東北地方太平洋沖地震において、岩手県二戸市で起きたしらす宅地地盤の泥流状崩壊現場から採取した2mmふるい通過試料を用いた(以下、二戸しらす)。直径5cm、高さ10cmで現場乾燥密度に近い相対密度 D_r :60%~65%を目標に作製し、飽和化を行った。表1に供試体諸元を示す。拘束圧100kPaで等方圧密後、非排水条件でひずみ速度0.01mm/minで圧縮と伸張の繰返しが行われた。

3 陽解法による繰返し試験の挙動確認

3.1 弾塑性構成式

弾塑性マトリックスの構築において降伏関数 f には移動硬化型の式(1)を用いる。

$$f = \bar{\eta} - k \quad (1)$$

ここで、 f :降伏関数、 $\bar{\eta}$:相当応力比($=\sqrt{(3/2)(\eta_{ij} - \alpha_{ij})(\eta_{ij} - \alpha_{ij})}$)、 η_{ij} :応力比テンソル($=s_{ij}/p'$)、 α_{ij} :背応力比テンソル、 k :弾性域の大きさを表す定数、 s_{ij} :偏差応力テンソル($=\sigma'_{ij} - p'\delta_{ij}$)、 σ'_{ij} :有効応力、 p' :平均有効応力($=\sigma'_{ii}/3$)、 δ_{ij} :クロネッカーのデルタ($=1(i=j)$, $0(i \neq j)$)である。

$\bar{\eta}$ 中の α_{ij} には、非線形移動硬化則を基にしたArmstrong-Frederick model(AFモデル)の式(2)が用いられている。

$$\dot{\alpha}_{ij} = a((2/3)b\dot{e}_{ij}^p - \alpha_{ij}\dot{e}_s^p) \quad (2)$$

ここで、 a, b :材料パラメータ、 $\dot{e}_{ij}^p$:塑性偏差ひずみ速度テンソル($=\dot{\epsilon}_{ij}^p - (1/3)\dot{e}_s^p\delta_{ij}$)、 $\dot{e}_s^p$:塑性ひずみ速度テンソル、 $\dot{e}_s^p$:相当塑性偏差ひずみ速度($=\sqrt{((2/3)\dot{e}_{ij}^p\dot{e}_{ij}^p)}$)である。

表1 二戸しらすの供試体諸元と試験条件

ρ_s (g/cm ³)	圧密前		圧密後			ひずみ振幅[-]
	ρ_d (g/cm ³)	e	ρ_d (g/cm ³)	e	D_r (%)	
2.527	1.323	0.910	1.389	0.819	58.2	0.05~0.051

式(2)は両辺に α があるため非線形計算が必要になるが、本研究では陽的に、前回ステップの増分を足し合わせながら計算を進めた。

塑性ポテンシャルには、Cam-clay型の式(3)を用いる。

$$g = \bar{\eta} + M_m \ln(p'/p'_a) \quad (3)$$

ここで、 g :塑性ポテンシャル関数、 M_m :限界応力比、 p'_a : $\eta = 0$ での平均有効応力である。これらの式を用いて、後述の塑性乗数 $\Delta\gamma$ や、弾塑性構成行列 D^{ep} を作成した。

3.2 解析手順

a) リターンマッピング法の導入

文献¹⁾の付録プログラムをベースに、実測で得られた軸ひずみ増分に対応するように入力部を変更した。ひずみ増分を入力値とし、陽解法により逐次応力増分を求めた。さらに降伏関数 $f \geq 0$ となる場合の応力状態が降伏面での適合条件を満たすよう、リターンマッピング(RM)手法を導入した。式(4)が弾性試行応力、式(5)が塑性修正の式となる。この式での $\Delta\gamma \cdot D^e \cdot \partial g / \partial \{\sigma'\}$ が引き戻し量となる。

$$\sigma'_{n+1} = \sigma'_n + D^e \cdot \Delta\epsilon \quad (4) \quad \sigma'_{n+1} = \sigma'_{n+1} - \Delta\gamma \cdot D^e \cdot \partial g / \partial \{\sigma'\} \quad (5)$$

ここで、 σ'_{n+1} :求めるステップの弾性試行応力、 σ'_n :前ステップの有効応力、 D^e :弾性マトリックス、 $\Delta\epsilon$:与えられたひずみ増分、 $\Delta\gamma$:塑性乗数(>0)である。

b) 非排水条件下でのプログラム制御

非排水条件では体積ひずみ ϵ_v をゼロとする、式(6)の条件を満たすように進めた。

$$d\epsilon_x = -(1/2)d\epsilon_y \quad (6)$$

ここで、 $d\epsilon_x, d\epsilon_y$:軸ひずみである。

有効応力増分は、式(7)により求め、式(8)のように逐次足し合わせた。

$$d\sigma' = D_{ijkl}^{ep} \cdot d\epsilon \quad (7) \quad \sigma' = \sigma' + d\sigma' \quad (8)$$

ここで、 D_{ijkl}^{ep} :RM後決定した弾塑性構成行列である。なお、間隙水圧については、式(6)で求められた軸ひずみをもとに定められる有効応力 σ' から間隙水圧 u を式(9)で計

キーワード 繰返し三軸試験、弾塑性構成式、移動硬化則、背応力、二戸しらす

連絡先 〒039-1192 青森県八戸市大字田面木字上野平 16-1 八戸工業高等専門学校 TEL0178-27-7367

算する.

$$u = \sigma_{011} - \sigma'_{11} \tag{9}$$

ここで、 σ_{011} :側方全応力(初期拘束圧 100kPa)である.

3.3 材料パラメータと背応力 α の制御方法

表 2 に二戸しらすについての材料パラメータセットを示す. ここで、 η : 応力比テンソル, α_t : 1 つ前の背応力である. パラメータは Case1~3 の 3 通りで、載荷と除荷が切り換わるタイミングで、応力反転初期における背応力 α の制御の仕方を変更した. Case1 は、全過程で応力比テンソル η に置き換えをしており、Case2 は、載荷と再載荷の際に、 α を η に置き換える制御をしている. Case3 は、除荷時までは Case2 と同様だが、再載荷時で α の置き換えをしない制御を行っている.

4 陽解法プログラム結果

図 1 に軸ひずみ-軸差応力関係の解析値と実測値を示す. 実験値は載荷時に ϵ_a : 0.0289 に対し、 σ_y : 37.5kPa まで増加し、その後の除荷過程では ϵ_a : -0.0511, σ_y : -28.1kPa へと低下した. その後再載荷では ϵ_a :0.0507 に対し、 σ_y :0.3kPa まで緩やかに増加している. 解析では、Case2 のパラメータセットにおいて、実験値との良好な整合性が得られている. Case1 は実験値と比較して、除荷途中で硬化が進み、軸差応力が十分に下がらない結果となった. Case3 では塑性整合条件 $f = 0$ を満足せず計算が E 点で止まっている.

図 2 に有効応力経路の解析値を示す. Case1,2 において、地盤中の応力が徐々に $\sigma_y = 0$ に近づく液状化の様子を確認した.

図 3 にそれぞれのケースでの応力の降伏面の変化を示す. 各過程の降伏面には曲面上の現 η 点を追加している. 図 3 中の A(原点)→B→C→D→E→F→G の順に変化するにつれて、降伏面が矢印方向に移動する移動硬化の様子が確認できる. α を η に置き換える制御をした Case1 の C,E 点, Case2 の E 点では式(1)を満たす降伏面が存在しないため、現 η 点のみが分布している. α は移動硬化の発展を制御するパラメータであり、応力の増減にも影響している. Case1 と Case2,3 では応力反転時の制御を変更した C 点より降伏面の変化が異なっているが、Case1 では除荷時に η に置き換えをし、 α の発展が進まず移動量が少なくなったことが整合しなかった原因だと考えられる. しかし再載荷時には η に置き換えを

表 2 陽解法プログラムのパラメータ

		載荷 ($k=1\sim1017$)	除荷 ($k=1018\sim3553$)	再載荷 ($k=3554\sim7150$)	再除荷 ($k=7151\sim7190$)
せん断弾性係数 G_0 (kPa)		1.2×10^3	2.7×10^3	0.4×10^3	2.7×10^3
ボアソン比 ν		0.3	0.3	0.3	0.3
AFモデルのパラメータ a_0	Case1~3 共通	10	15	10	15
AFモデルのパラメータ b		1.2	1.2	1	1.2
弾性域の大きさを表す定数 k		0.25	0.3	0.25	0.3
変相応力比 M_m		0.6	0.5	0.6	0.5
塑性基準ひずみ γ_f		0.03	0.01	0.03	0.01
応力反転時の背応力 α	Case1	$\alpha = \eta$	$\alpha = \eta$	$\alpha = \eta$	$\alpha = \eta$
	Case2	$\alpha = \eta$	$\alpha = \alpha_t$	$\alpha = \eta$	$\alpha = \alpha_t$
	Case3	$\alpha = \eta$	$\alpha = \alpha_t$	$\alpha = \alpha_t$	$\alpha = \alpha_t$

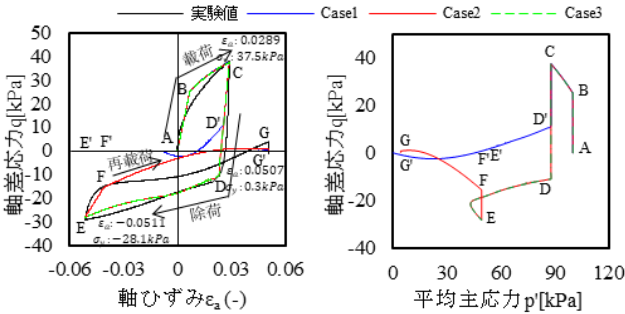


図 1 軸ひずみ-軸差応力関係

図 2 有効応力経路(解析値)

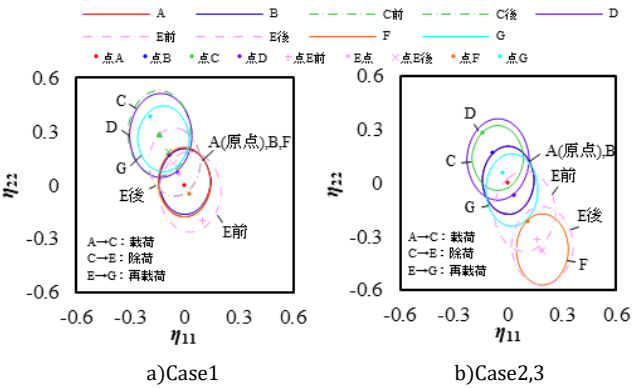


図 3 降伏面の変化

することで整合していることから、応力反転初期において、載荷は η に依存し、除荷は α_t に依存することが推察される.

5 まとめ

しらすの繰返し挙動把握のための数値解析を行ったところ、以下の知見が得られた.

- (1) 移動硬化型弾塑性構成則を用いたプログラムにおいて、繰返し三軸試験の再現計算を行った. 応力反転初期の背応力が、載荷時に η に依存し、除荷時で α_t に依存するケースでは良好な整合性が得られることを確認した.
- (2) 非排水条件での液状化に至るまでの有効応力履歴を再現することができた.

参考文献

1) 社団法人地盤工学会：土の弾塑性構成モデル，丸善，2009.
2) 寺田賢二郎 訳：非線形有限要素法-弾塑性解析の理論と実践-，森北出版，2014.