

自然堆積粘土の内部構造の変化を考慮した繰返し弾粘塑性構成式

大成建設株式会社 正会員

京都大学大学院 フェロー会員

京都大学大学院 正会員

京都大学大学院 学生会員

○谷崎史織

岡二三生

小高猛司・木元小百合

渡部泰介

1. はじめに

地盤の地震時挙動を把握する上で、特に問題となるのが液状化である。液状化層に関しては数多くの研究が成されているが、地盤全体の地震時挙動を精度よく評価するためには非液状化層の挙動も考慮しなければならない。ここでは、非液状化層として粘土の挙動を考える。一般に自然堆積粘土は年代効果 (Aging) によって構造が発達し、再構成粘土に比べて脆弱であることが知られている。単調載荷時には明確なピーク強度を示した後、構造の崩壊によるひずみ軟化挙動を示す。Kimoto¹⁾ は内部構造の変化に起因する粘塑性的ひずみ軟化を導入することで、自然堆積粘土のひずみ軟化挙動を表現している。

本報では、自然堆積粘土の単調載荷時と繰返し載荷時の挙動を同時に表現できる構成モデルの構築を目的とし、Kimoto¹⁾ のモデルに非線形移動硬化則を導入して繰返しモデルに拡張する。

2. 繰返し弾粘塑性構成モデルの定式化

以下のように、Kimoto¹⁾ のモデルに非線形移動硬化則を導入する。

過圧密境界面

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (1)$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^{vp}\right) \quad (2)$$

$$\sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z) \quad (3)$$

降伏関数

$$f_y = \left\{ (\eta_{ij}^* - \alpha \chi_{ij}^*) (\eta_{ij}^* - \alpha \chi_{ij}^*) \right\}^{1/2} + (1-\alpha) \tilde{M}^* \ln\left(\sigma'_m / \sigma'^{(s)}_{my}\right) = 0 \quad (4)$$

粘塑性ポテンシャル関数

$$f_p = \bar{\eta}_\chi^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mp}) = 0 \quad (5)$$

非線形移動硬化則

$$d\chi_{ij}^* = B^* (M_f^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp*}) \quad (6)$$

流れ則

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi_1(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (7)$$

式 (4) の α は $0 \leq \alpha \leq 1$ を満たす数値パラメータで、第一項で移動硬化、第二項で構造の変化を制御しており、硬化と軟化の両方に影響するパラメータである。

3. 提案モデルの挙動の検証

拡張した構成モデルの挙動を検証するため、非排水単調載荷および繰返し載荷試験の要素シミュレーションを行う。単調載荷試験では、三軸応力状態で 0.05%/min の軸ひずみ速度、繰返し載荷試験では応力振幅比 0.3、周波数 0.1Hz として計算した。解析に用いたパラメータを表 1 に示す。

移動硬化パラメータ $B^*=30$ としたときの、非排水単調載荷試験の解析結果を図 1 に示す。応力～ひずみ関係では α が大きいほどピーク強度は小さいが、ひずみ軟化後のひずみ硬化は α が大きいほど顕著で、残留強度は α が大きいほど大きな値を示している。有効応力径路では α が大きいほど有効応力の減少が速く、変相後の正のダイレイタンシーが顕著である。次に、移動硬化と構造の変化の影響のバランスを変えた場合を考えて、移動硬化パラメータ $B^*=5$ としたときの材料パラメータ α の影響を図 2 に示す。図 1 と同様に α が大きいほどピーク強度は小さいが、残留強度が逆転するほどのひずみ硬化は見られない。有効応力径路においても、有効応力の減少や変相後の正のダイレイタンシー量が図 1 とは大きく異なっている。これは、移動硬化パラメータ B^* を小さくしたことによって硬化の影響が弱まり、構造の変化によるひずみ軟化が顕著になったと考えられる。

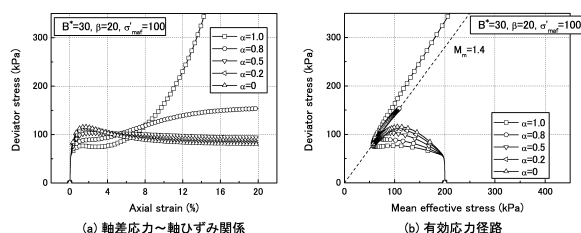
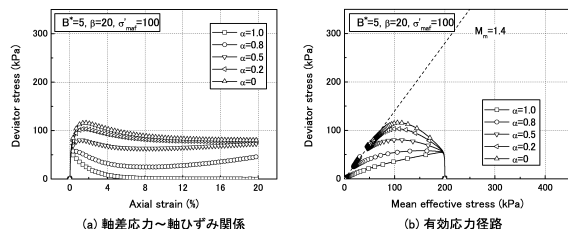
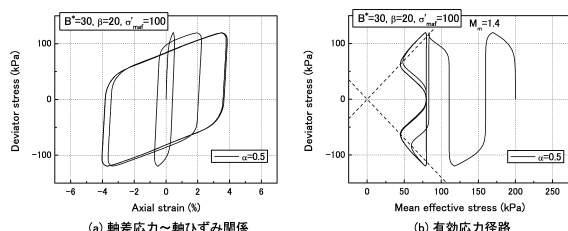
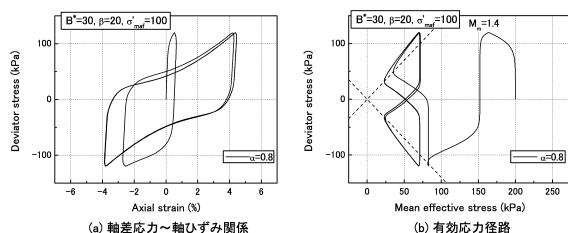
表 1: 解析に用いたパラメータ (正規圧密粘土)

圧縮指数	λ	0.2173
膨潤指数	κ	0.0344
初期間隙比	e_0	1.3734
初期せん断弾性係数	G_0	26670 (kPa)
圧密降伏応力	$\sigma'_{mbi} (= \sigma'_{mai})$	200 (kPa)
変相応力比	M_m^*	1.143
破壊応力比	M_f^*	1.143
粘塑性パラメータ	m'	22.7
粘塑性パラメータ	C_{01}	5.8×10^{-8} (1/s)
粘塑性パラメータ	C_{02}	5.8×10^{-8} (1/s)
移動硬化パラメータ	B^*	30, 5
構造パラメータ	σ'_{maf}	100 (kPa)
構造パラメータ	β	20
材料パラメータ	α	0~1 で変化

移動硬化パラメータ $B^*=30$ としたときの、非排水繰返し載荷試験の解析結果を図 3、図 4 に示す。 $\alpha=0.5$ のときは応力～ひずみ関係が四角いループを描くが、 $\alpha=0.8$ とすると紡錘形のヒステリシスループを表現することができた。

キーワード：自然堆積粘土、内部構造の変化、繰返し弾粘塑性構成式

連絡先：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学研究室 075-753-5086

図 1: 単調荷重試験における α の影響 ($B^*=30$)図 2: 単調荷重試験における α の影響 ($B^*=5$)図 3: 繰返し荷重試験における α の影響 ($\alpha=0.5$)図 4: 繰返し荷重試験における α の影響 ($\alpha=0.8$)

4. 大阪沖積粘土への適用

提案モデルを用いて、大阪沖積粘土である中之島粘土の非排水試験結果のシミュレーションを行う。解析に用いたパラメータ(表2)は、主に中之島粘土を用いた室内試験²⁾より得られた値である。図5に示す非排水単調荷重試験の解析結果では、明確なピークの後、変相線に漸近しながら軟化する挙動がよく表現できている。

次に、非排水繰返し荷重試験結果を図6に、そのシミュレーション結果を図7に示す。有効応力の最終値や繰返し荷重中のある時点でひずみが急増する挙動が再現できている。さらに、移動硬化パラメータ B^* を低減させて剛性の低下を表現し、圧縮時と伸張時の変相応力比の値を異なるものに設定することによって、より忠実に実験結果を再現することができる。

6. 結論と今後の課題

自然堆積粘土の内部構造変化を考慮した構成モデルに

表 2: 解析に用いたパラメータ (中之島粘土)

パラメータ	単調荷重	繰返し荷重
圧縮指数	λ	0.2173
膨潤指数	κ	0.0344
初期間隙比	e_0	1.5730
初期せん断弾性係数	G_0	26670 (kPa)
圧密降伏応力	$\sigma'_{mbi} (= \sigma'_{mai})$	200 (kPa)
変相応力比	M_m^*	1.143
破壊応力比	M_f^*	1.143
粘塑性パラメータ	m'	22.7
粘塑性パラメータ	C_{01}	2.0×10^{-6} (1/s)
粘塑性パラメータ	C_{02}	4.0×10^{-7} (1/s)
移動硬化パラメータ	B^*	80
構造パラメータ	σ'_{maf}	80 (kPa)
構造パラメータ	β	5
材料パラメータ	α	0.9

非線形移動硬化則を導入し、硬化と軟化の影響を適切に設定することで、自然堆積粘土の非排水単調・繰返し荷重時の挙動を表現することが可能となった。今後は、繰返し挙動をより忠実に再現できるよう検討する必要がある。

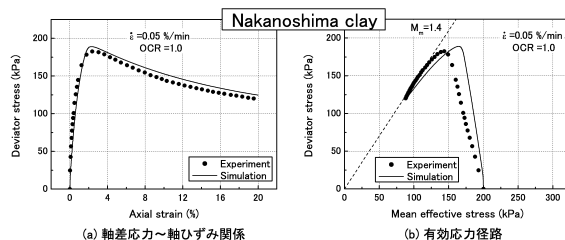


図 5: 非排水単調荷重試験のシミュレーション結果

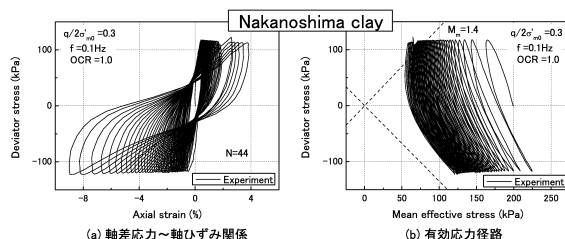


図 6: 中之島粘土の非排水繰返し荷重試験結果

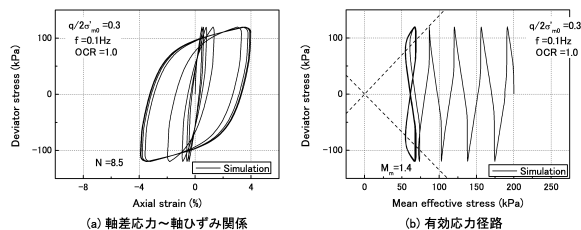


図 7: 非排水繰返し荷重試験のシミュレーション結果

参考文献

- Kimoto, S. (2002): Constitutive models for geomaterials considering structural changes and anisotropy, Doctoral Thesis, Kyoto University.
- 渡部泰介 (2005): 繰返し荷重時における自然軟弱土の強度・変形特性, 京都大学卒業論文.