

III-207

粘土の繰返し弾粘塑性構成式

岐阜大学

岡 二三生

岐阜大学

八嶋 厚

東京電力(株)

○ 岩木 宏

鉄建建設

御宿 淳一

(元岐阜大学大学院)

(元岐阜大学学生)

1. はじめに

粘性土の繰返し載荷挙動における Bauschinger 効果、異方圧密後の繰返し挙動、応力方向反転直後におけるひずみ増分方向などを表現するために、本研究では非線形移動硬化理論を用いて繰返し構成式の定式化を行い、提案式の自然粘土への適用性を検討した。

2. 非線形移動硬化理論

Armstrong & Fredrick [1] により提案され、Chaboche ら [2] によって一般化された非線形移動硬化理論とは、等方硬化則および移動硬化則の複合硬化則であり、また、降伏曲面が非線形に移動するものであり、式で次のように表せることができる。

$$f = J(\sigma_{ij} - \sum_{k=1}^n x_{ij(k)}) - R - k = 0 \quad (1)$$

ここで、 R は降伏曲面を同一中心上のまま等方的に拡大する等方硬化パラメータ、 $x_{ij(k)}$ は降伏曲面の中心を表す移動硬化パラメータ、 k は初期降伏曲面の大きさ、 σ_{ij} は現在の応力テンソル、 J は応力空間内における降伏曲面中心からの距離に対応している。

3. 非線形移動硬化理論を用いた繰返し弾粘塑性構成式

前述した非線形移動硬化理論を岡 [3]、岡・足立・三村 [4] の繰返し弾粘塑性構成式に導入を行った降伏関数 f_y 、塑性ポテンシャル関数 f_p は次のように表せる。

$$f_{y(1)} = \{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*) \cdot (\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)\}^{1/2} - R_{D1} = 0 \quad (2) \quad dx_{ij}^* = B_1^*(A_1^* de_{ij}^{vp} - x_{ij}^* d\gamma^{vp}) \quad (3)$$

$$f_{y(2)} = M_m^* \left| \ln \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_{m0}'} \right) - \gamma_m^* \right| - R_{D2} = 0 \quad (4) \quad dy_m^* = B_2^*(A_2^* dv^{vp} - \gamma_m^* |dv^{vp}|) \quad (5)$$

η	: 現応力比	dx_{ij}^*, dy_m^*	: 移動硬化パラメータの増分
de_{ij}^{vp}	: 粘塑性偏差ひずみ増分テンソル	dv^{vp}	: 粘塑性体積ひずみ増分
$A_1^*, A_2^*, B_1^*, B_2^*$	: 移動硬化パラメータの材料定数	M_m^*	: 最大圧縮応力比
σ_m'	: 平均有効応力	σ_{m0}'	: 単位平均有効応力
$d\gamma^{vp}$	: 粘塑性偏差ひずみ増分テンソルの第2不変量		

$$f_{p(1)} = \{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*) \cdot (\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)\}^{1/2} + \tilde{M}^* \ln(\sigma_m' / \sigma_{ma}') = 0 \quad (6)$$

$$\tilde{M}^* = -\frac{\eta^*}{\ln(\sigma_m' / \sigma_{mc}')} \quad (7) \quad \sigma_{mc}' = \sigma_{mb}' \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} v^{vp}\right) \exp\left(\frac{\eta^*}{M_m^*}\right) \quad (8)$$

$$f_{p(2)} = \bar{\eta}_x^* + M_m^* \ln \frac{\sigma_m'}{\sigma_{ma(2)}'} = 0 \quad (9)$$

静的降伏関数 $f_{y(1)}$, $f_{y(2)}$ および塑性ポテンシャル関数 $f_{p(1)}$, $f_{p(2)}$ はそれぞれ応力比 η 、平均有効応力 σ_m' に関する関数であり、これらを用いることにより過圧密領域と正規圧密領域の両領域に同じタイプの構成式を用いることができる。これによって、遷移過程の連続性を保つことが可能となる。

最終的に過圧密飽和粘土の等方圧密条件下での非線形移動硬化理論を用いた繰返し弾粘塑性構成式は次式のように表される。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}_m'}{\sigma_m'} \delta_{ij} + C_{o1} \frac{\langle \Phi_1'(F) \rangle \Phi_2(\xi)}{\sigma_m' \bar{\eta}_x^*} (\eta_{ij}^* - x_{ij}^*) + C_{o2} \frac{\langle \Phi_1'(F) \rangle \Phi_2(\xi)}{\sigma_m'} \left\{ \tilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - x_{mn}^*)}{\bar{\eta}_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (10)$$

$$\Phi_2(\xi) = 1 + \xi \quad (11) \quad \xi = \frac{\bar{\eta}_x^* M_f^*}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - x_{mn}^*)}{\bar{\eta}_x^*} \right\}} \quad (12)$$

ここで、 G は弾性係数、 $\dot{S}_{ij}$ は偏差応力テンソル速度、 κ は膨潤指数、 e は間隙比、 C_{o1} , C_{o2} は粘塑性パラメータ、 $\Phi_1'(F)$, $\Phi_2(\xi)$ はそれぞれ第1, 第2材料関数である。本報告では、過圧密領域のみを考えたため近似として前述した静的降伏関数 $f_{y(2)}$ 、塑性ポテンシャル関数 $f_{p(2)}$ については考慮していない。

4. 自然粘土への適用性

非線形移動硬化理論を導入した繰返し弾粘塑性構成式を用いて軽過圧密下の自然粘土に対して応力制御の非排水繰返し載荷試験へのシュミレーションし、その適用性の検討を行った。解析に用いたパラメータは表.1 に示す。実験結果の応力-ひずみ関係・有効応力径路を図.1・図.2 に、解析結果の応力-ひずみ関係・有効応力径路を図.3・図.4 に示す。繰返し回数が増すことにより各回数の変形係数が減少することや、正（負）のひずみ方向の増大（減少）幅が大きくなり蓄積されること、繰返し回数が増す毎に平均有効応力の減少（間隙水圧の発生量）、応力径路収束付近での破壊応力比に漸近していくなどの現象を定性的に表現できている。注）(1) $B^* = 2/3B$ 、(2) $M_f^* = \sqrt{2/3}M_f$ 、(3) $M_m^* = \sqrt{2/3}M_m$

表. 1 解析パラメータ

ヤング係数	kgf/cm^2	E	240
圧密係数		λ	0.355
膨潤指数		κ	0.0477
間隙比		e	1.922
圧密圧力	kgf/cm^2	σ'_{m0}	0.8
軸差応力速度	$kgf/cm^2/sec.$	$\dot{q}$	4.8×10^{-4}
材料定数		$B^{(1)}$	70
最大軸差応力	kgf/cm^2	q_{max}	0.50
最小軸差応力	kgf/cm^2	q_{min}	-0.45
破壊時 の応力比	圧密側	$M_{fc}^{(2)}$	1.60
	伸張側	$M_{fe}^{(2)}$	1.45
最大圧縮時 の応力比	圧密側	$M_{mc}^{(3)}$	1.324
	伸張側	$M_{me}^{(3)}$	1.20
粘塑性 パラメータ		$G_2^{(4)}$	500
		m_o	15.0
	1/sec.	C_{o1}	3.0×10^{-7}
	1/sec.	C_{o2}	7.5×10^{-8}

(4) $G_2^* = \sqrt{2/3}G_2$

5. おわりに

非線形移動硬化理論を用いた繰返し構成式の定式化を行うことにより、過圧密領域と正規圧密領域の両領域を表現でき、遷移過程の連続性を保つことが可能となり、過圧密粘土の試験結果へのシュミレーションにおいて変形特性を定性的に表現できた。今後、両領域に対するシュミレーションは今後の課題である。

6. 参考文献

[1] Armstrong, P.J., Frederick, C.O. (1966): C.E.G.B. Report RD/B/N 731.
[2] Chaboche, J.L., Rousselier, G. (1983): Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.105, pp.153-158.
[3] Oka, F. (1982): International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp.13-17.
[4] Oka, F., Adachi, T., Mimura M. (1988): Proceedings of the International Conference on Rheology and Soil Mechanics, Edited by M.J. Keedwell, Coventry; UK, 12-16 September, 1988 pp.12-28.

