

III-208 非線形移動硬化則による粘土の繰返し超過応力モデル

大阪大学工学部 正 会 員 阿 部 信 晴
大阪大学大学院 学生会員 平 尾 謙 一

1. まえがき

繰返し載荷における粘土の載荷速度依存性挙動を表現するために、本報告ではArmstrong & Frederick¹⁾によって提案され、Chaboche²⁾により一般化された非線形移動硬化則を適用した超過応力理論に基づく粘土の繰返し弾粘塑性モデルを提案し、その適用性を検討する。

2. 繰返し超過応力モデルの定式化

提案モデルでは、有効応力比 η ($=q/p$) と粘塑性せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}^{vp}$ の関係をKriegら³⁾による次式によって与えられるものとする。

$$\dot{\gamma}^{vp} = c \left| \frac{\eta - X}{\mu} \right|^n \text{sign}(\eta - X) \quad (1)$$

X および μ はそれぞれ back stress, drag stress であり、超過応力は $(\eta - X)$ で定義される。また、 c 、 n は粘性パラメータである。内部変数のうち、 μ を一定と仮定し、 X の移行式は次式により与える。

$$\dot{X} = B(A\dot{\gamma}^{vp} - X|\dot{\gamma}^{vp}|) \quad (2)$$

A および B は非線形移動硬化パラメータであり、 A は破壊応力比に相当し、 B は移動硬化の速度に関係するパラメータである。

このモデルでは、弾性応答領域は存在せず、常に弾性ひずみと粘塑性ひずみが存在するものと仮定する。粘塑性ひずみ速度は次式によって与えられる。

$$\dot{\epsilon}^{vp}_{ij} = \Lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3), \quad \Lambda = \frac{\dot{\gamma}^{vp}}{\frac{\partial g}{\partial q}} = \frac{c \left| \frac{\eta - X}{\mu} \right|^n \text{sign}(\eta - X)}{\frac{\partial g}{\partial q}} \quad (4)$$

ここに、 g は粘塑性ポテンシャルであり、粘塑性ひずみ速度の評価に必要な偏導関数の比は次式を用いている。

$$\frac{(\partial g_a / \partial p)}{(\partial g_a / \partial q)} = \frac{M'_{ma} - \eta + s_a / p}{\alpha_a} \quad (5a), \quad \frac{(\partial g_p / \partial p)}{(\partial g_p / \partial q)} = \frac{M'_{mp} - \eta + s_p / p}{-\alpha_p} \quad (5b)$$

$(\eta - X \geq 0) \qquad \qquad \qquad (\eta - X < 0)$

(5)式において、 M'_{m} および s はそれぞれ変相線の傾きおよび q 軸との切片であり、 α はダイレイタンシーパラメータである。

また、繰返し載荷に伴う粘土の劣化を考慮するために、 B および α の移行式をそれぞれ次式で与える。

$$\dot{\alpha} = -b \left[\frac{(\alpha - \alpha_u)^2}{\alpha_o - \alpha_u} \right] |\dot{\gamma}^{vp}| \quad (6), \quad \dot{B} = -r \left[\frac{(B - B_u)^2}{B_o - B_u} \right] |\dot{\gamma}^{vp}| \quad (7)$$

3. 解析結果

提案モデルを用いて、岡ら⁴⁾によって行われた正規圧密粘土の非排水三軸繰返し試験をシミュレートした。解析パラメータを表-1に示す。図-1に(a)応力経路、(b)応力-ひずみ関係、(c)間隙水圧の変化を

表-1 解析パラメータ

初期平均有効応力	p_o	2.0(kgf/cm ²)
最大軸差応力	q_{max}	1.49(kgf/cm ²)
最小軸差応力	q_{min}	-0.89(kgf/cm ²)
破壊応力比／圧縮側	M'_{sa}	1.9
／伸張側	M'_{sp}	1.24
膨潤指数	κ	0.0087
初期間隙比	e_o	1.091
初期せん断弾性係数	G_o	
／正規圧密領域		240(kgf/cm ²)
／過圧密領域		300(kgf/cm ²)
変相線パラメータ		
／圧縮側	M'_{ma}	0.465
	s_a	0.175
／伸張側	M'_{mp}	0.348
	s_p	0.019
ダイレイタンシーパラメータ		
／正規圧密領域	α_o	40.0
	α_u	0.0
	b	6375.0
／過圧密領域	α_o	7.0
	α_u	0.0
	b	1.4
非線形移動硬化パラメータ		
／正規圧密領域	A	1.9
	B	211.0
／過圧密領域		
／圧縮側	A_a	1.9
	B_{aa}	110.5
	B_{au}	0.0
	r_a	5.2
／伸張側	A_p	1.24
	B_{pp}	153.2
	B_{pu}	0.0
	r_p	6.8
粘性パラメータ	c	5.0×10^{-4} (1/min)
	μ	0.03
	n	2.7

示す。解析結果は実験結果⁴⁾に見られる繰返し载荷にともなう間隙水圧の増加およびヒステリシスループの拡大を適切に表現している。図-2および図-3は、それぞれ繰返し载荷速度を100倍および1,000倍とした場合の解析結果を示したものである。図-1~3を比較すると繰返し载荷速度が速いものほど間隙水圧およびひずみの発生量が小さくなっており、提案モデルが繰返し载荷における载荷速度効果を定性的に表現できることがわかる。また、提案モデルでは応力の反転時におけるひずみ反転の遅れを表現することができるが、载荷速度が速いものほどこの傾向が顕著となる。

4. まとめ

繰返し载荷における载荷速度依存性挙動を表現するために粘土の繰返し超過応力モデルを提案し、そのモデル特性を明らかにした。

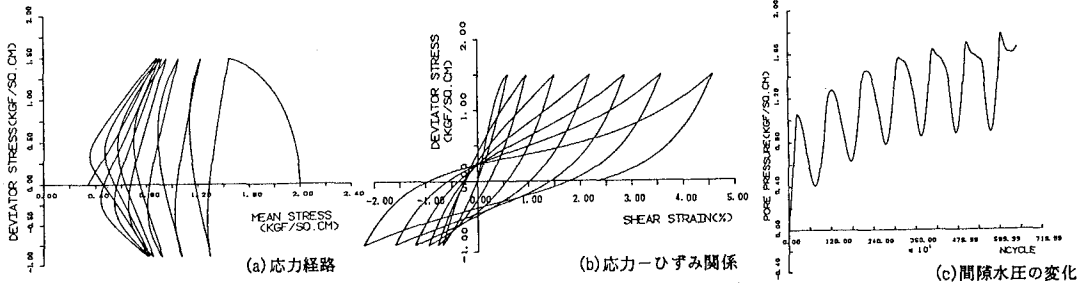


図-1（载荷速度 $6.96 \times 10^{-5} \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ ）

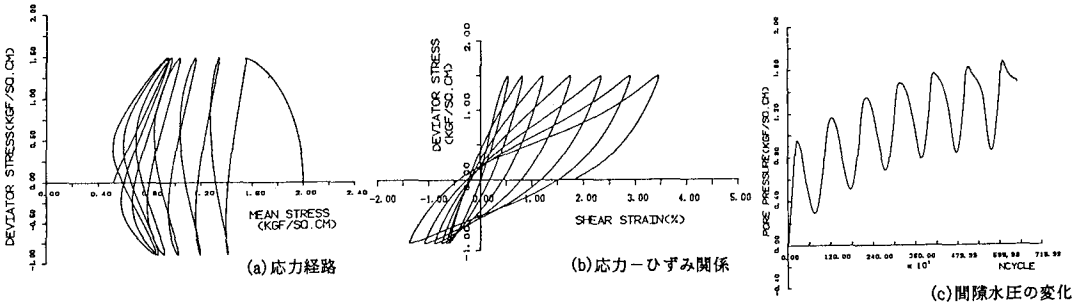


図-2（载荷速度 $6.96 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ ）

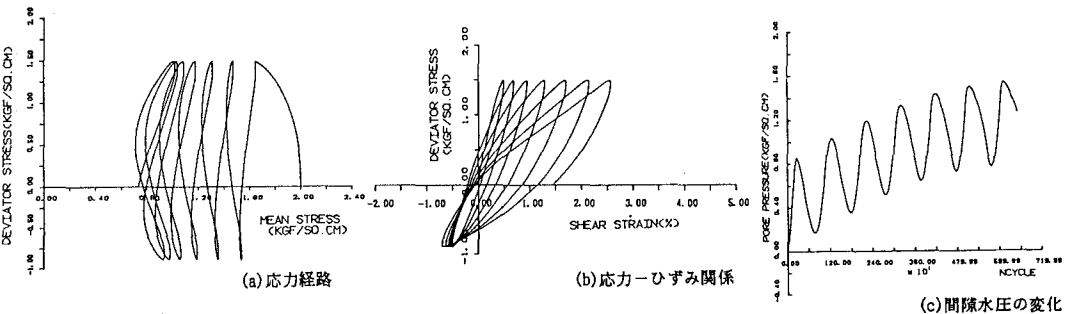


図-3（载荷速度 $6.96 \times 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ ）

参考文献

- 1) Armstrong & Frederick (1966): A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect, G.E.G.B. Report RD/B/N 731.
- 2) Chaboche (1975): Viscoplastic Constitutive Equations for the Description of Cyclic and Anisotropic Behaviour of Metals, 17th Conf. on Mechanics of Solid, Bul. de l'Acad. Polonaise des Science, Serie Sc. et Techn., 25, pp33-42.
- 3) Krieg, et al. (1978): Inelastic Behaviour of Pressure Vessel and Piping Components, ASME, 15.
- 4) 岡他 (1986): 非排水繰返し载荷時におけるシルト質粘土の変形特性, 第21回土質工学研究発表会発表講演集, pp651-652.