

大阪大学工学部 正 会 員 阿 部 信 晴

大阪大学工学部 学生会員 ○ 富 江 洋

1. まえがき

粘土の定ひずみ速度非排水せん断時にひずみ速度を急変させるとせん断応力が増減する。せん断応力の増減量はひずみ速度を変化させる時のひずみの値とひずみ速度の変化量に依存することが知られているおり、ひずみ速度履歴依存性と呼ばれている。本報告では、ひずみ速度履歴依存性挙動は流動曲面モデルでは正確に表現されないが、流動曲面履歴変数モデルによって適切に表現しうることを明らかにしている。

2. 流動曲面モデルの後続負荷時挙動

流動曲面モデルによって粘土の時間依存性挙動が統一的に表現できることが明らかにされているが、一方で流動曲面モデルの問題点も指摘されている。それは後続負荷時の応答を正確に表現できないことである。粘土に最初の負荷を与えた後、さらに新たな負荷(後続負荷と呼ばれる)を加えると応力-ひずみ曲線は一般に急な勾配で立ち上がる。しかし、流動曲面モデルはこのような応力の急な立ち上がりを表現することができない。図-1は定ひずみ速度非排水三軸試験において軸ひずみ0.8%で軸ひずみ速度を $3.5 \times 10^{-3}\%/min$ から $4.4 \times 10^{-2}\%/min$ に急増させた場合の実験結果を示したものである(Vaid and Campanella, 1977)。軸差応力-軸ひずみ曲線は軸ひずみ速度の増加と同時に急勾配で立ち上がり、最初から速い軸ひずみ速度での軸差応力-軸ひずみ曲線をいったん越えた後、この曲線に漸近していくことが分かる。図-2はこの実験を流動曲面モデルによって解析した結果である。解析結果では軸ひずみ速度の増加ポイントから軸差応力はゆるやかに増加しており、実験結果のような急な立ち上がりを表現することができない。すなわち、流動曲面モデルは粘土のひずみ速度履歴依存性挙動を正確に表現できない。流動曲面モデルは基本的に定応力場でのクリープ則を時間積分して変動応力場に拡張した時間硬化モデルであることから、初期負荷後の新たな载荷に対して応力の急な立ち上がりを表現することができない。後続負荷時に急な応力の立ち上がりを流動曲面モデルで表現するためには、時間変数の更新すなわち負荷時に時間変数をゼロとすることが必要である。しかし、時間変数を更新すると流動曲面の大きさも同時にゼロとなり、それまでの時間-負荷履歴は失われてしまう。したがって、時間変数の更新時にそれまでの時間-負荷履歴を記憶することのできる流動曲面モデルが必要である。このために流動曲面モデルに履歴変数を導入した流動曲面履歴変数モデルが提案されている。

3. 流動曲面履歴変数モデルと構成仮定

流動曲面履歴変数モデルの構成仮定は次のとおりである。

1) 負荷の直前までに生じた粘性体積ひずみを履歴変数 h とする。そして、履歴変数 h を導入した次式の移行方程式を仮定する。

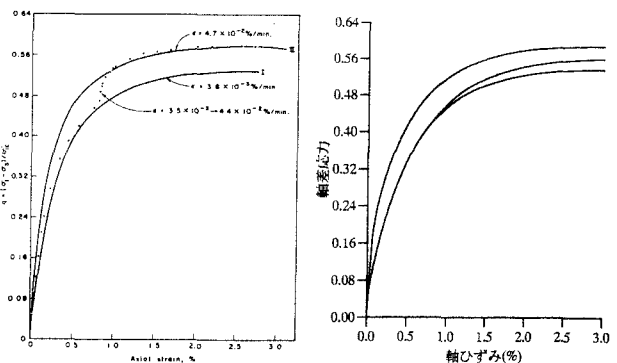
$$\frac{v^v + h}{\mu} = -\ln \left(\frac{\dot{v}^v}{\dot{v}_r^v} + \delta \right) \quad (1)$$

この移行方程式は基準式を粘塑性ひずみ軸に沿って履歴変数 h (それまでに生じた粘性体積ひずみ)だけ上下に移動させたものである。

履歴変数が負の場合は、移行曲線を上方に、正の場合は下方に移動させることによってひずみ速度に対する粘土の粘塑性応答性を変化させ、時間-負荷履歴効果を表現する。この移行方程式を負荷の瞬間において粘塑性ひずみは生じないという条件のもとで時間積分することにより流動関数は次のように求められる。

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[\left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v t \right) \right\} \exp \left(\frac{v^p - h}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^v t \right) \right] \right] - v^p = 0 \quad (2)$$

また、履歴変数は、



$$h = h_o + v^p = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left[1 - \left\{ 1 - \delta \exp \left(\frac{-v^p + h_o}{\mu} \right) \right\} \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}^p t \right) \right] \right] \quad (3)$$

(2)式, (3)式中の塑性体積ひずみをオリジナルカムクレイモデルによって評価するとき, 次式を用いる。

$$v^p = f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left[\ln \left(\frac{p}{p_o} \right) + \frac{\eta - \eta_o}{M} \right] \quad (4)$$

2) 流動曲面履歴変数モデルでは, 弾性ひずみと粘塑性ひずみが常に存在するものと仮定する。したがって, 負荷-除荷基準を必要としない。また, 粘土の降伏挙動は粘塑性応答の中で弾粘塑性遷移過程として表現される。

3) 粘土の粘塑性硬化が進んで履歴変数が大きくなり, 次式を満足するとき粘土は弾性核(elastic nucleus)に入ったものとする。弾性核内部では粘土は弾性挙動する。

$$h > -\mu \ln \delta \quad (5)$$

4. 流動曲面履歴変数モデルの更新手法

流動曲面履歴変数モデルを用いて時間-負荷履歴効果を含む粘土の挙動解析を行うために, 次の更新手法(updating procedure)が適用される。

- 1) 後続負荷の瞬間に時間変数をゼロに更新する。
- 2) この時, 負荷直前の応力を後続負荷時の初期値とする応力の初期化を行う。
- 3) また, 後続負荷直前までに生じた粘性体積ひずみ((3)式)を後続負荷時の履歴変数 h として更新する。

5. 流動曲面履歴変数モデルによるひずみ速度履歴依存性挙動の解析

Vaidら(Vaid and Campanella, 1977)によって行われた Haney clay のひずみ速度変化試験(図-1)について解析結果と実験結果を比較したものが図-3である。Haney clay の材料パラメータは表-1に示されている。また, 解析例において解析結果①は既に述べた更新手法による解析結果であり, 解析結果②は更新手法のうち履歴変数 h を考慮していないケース, すなわち常に履歴変数 $h=0$ とした解析結果である。図から明らかなように計算結果①が実験の傾向とよく一致しており, 流動曲面履歴変数モデルによってひずみ速度履歴依存性挙動が正確に表現できることがわかる。また, 計算結果②では軸差応力の立ち上がり量が大きく, 時間-負荷履歴の評価が過大になっている。

図-4, 図-5はひずみ速度を増加, 減少させた場合についての計算結果である。計算には Haney clay のパラメータを用いている。この計算例からも時間-負荷履歴を適切に評価しなければ, ひずみ速度履歴依存性挙動を表現できないことがわかる。特にひずみ速度を減少させる場合, 履歴を考慮しなければ軸差応力が逆に増加する結果になることが示されている。

6. まとめ

粘土のひずみ速度履歴依存性挙動とその解析方法について検討し, 後続負荷時の挙動を正確に予測するためには時間-負荷履歴の評価が不可欠であることを明らかにした。

参考文献

- 1) Vaid, Y. P. and Campanella, R. G.(1977): Time-dependent Behavior of undisturbed clay, Jour. of GED, ASCE, Vol.103, No.GT7, pp693-709.

表1 材料定数 (Haney Clay)

λ	κ	M	e_o	G_o	P_o	μ	$\dot{v}^p$	δ
				(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)		(1/min)	
0.2	0.031	1.29	0.896	600.0	5.25	0.004	8.0×10^{-6}	0.168

