

京都大学防災研究所 正員 三村 衛
関口秀雄

1. まえがき

粘土の弾・粘塑性モデルは、松井・阿部⁽¹⁾のレビューに述べられているように、超過応力型モデルと非定常流動曲面(non-stationary flow surface)を持つモデルとに大別することができる。

本報告では、一般に加速クリープ過程を表現できないとされている超過応力型モデルに着目し、この原因がモデルの立脚する仮定とそれに伴う理論構造自体に起因することと指摘する。さらに、この難点を克服するための最近のいくつかの試み、すなわち ①静的硬化則としてひずみ軟化の導入 ② damage law の導入、③ 非定常流動曲面モデルの導入 について段階以降で詳しく説明する。

2. 超過応力型弾・粘塑性モデルの適用性

超過応力型モデルの粘塑性流動則は、一般に次式のように表現できる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\sigma(\sigma - K(\varepsilon))}{\eta} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 K は静的硬化パラメータ、 η は粘性係数、 f は静的降伏関数、 σ はいわゆる超過応力 $\sigma - K(\varepsilon)$ の関数である。ここで特に、粘性係数 η は一定であり、関数 σ は超過応力、 $\sigma - K(\varepsilon)$ 、について単調増加関数であることに留意しよう。

非排水フリード過程においては、一定クリープ応力のもとで偏差ひずみが進行するので、関数値 σ は単調に減少し、その結果、クリープひずみ速度は一定値に収束してしまふ。したがって、超過応力型モデルでは一般に、加速クリープ過程を表現し得ないのである。

超過応力型の代表的なモデルである足立・岡モデル⁽²⁾(以後、モデルAと呼ぶ)について、加速クリープ過程を表現できるか否か、調べてみよう。若干の演算の後、 $\dot{\varepsilon}(t)$ は次式のように誘導される。

$$\dot{\varepsilon}(t) = -(M - \eta/p) \cdot \{\dot{\varepsilon}(0)\}^2 \frac{(1 + \eta) \cdot m'}{(\lambda - K)} \leq 0 \quad (\text{for } 0 \leq \eta/p \leq M) \quad (2)$$

ここで、粘塑性パラメータ m' は二乗圧縮係数 m と、 $m' = (\lambda - K)/2(1 + \eta)$ で関係づけられる。式(2)より、同モデルにおいては、クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ はクリープ過程において単調に減少し、破壊時 ($\eta/p = M$) に最小値 $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{\min}$ に収束することからわかる。

超過応力型モデルの持つ上述のような難点を克服するためのオーの方法としては、静的硬化則としてひずみ軟化則を導入することが考えられる。しかし、筆者らはその可能性は認めざるもの、ひずみ軟化現象そのもののメカニズム特性であるか否かの検討の余地がまだ多く残されていると考えている。

オーの試みとしては、damage law の導入がある。Aubry et al.⁽³⁾ は、式(1)で表わされるような超過応力型モデルの粘性係数 η が、クリープ変形に伴う damage により、次式にしたがって変化すると仮定した。

$$\eta = (1 - d)^n \quad (3)$$

ここで、 d は damage を表わし、no damage 状態から full damage 状態について、 $0 \leq d \leq 1$ の値をとる。式(1)を用いた通常の超過応力型モデル(モデルB)と、damage law を導入した超過応力型モデル(モデルB')の非排水クリープひずみ-時間関係と定性的に図-1に示す。モデルBが一次クリープ挙動を示すのに対し、damage law を導入したモデルB'は、変形の進行に伴う damage の発生により、粘性係数 η の値が減少するため、加速クリープの表現が可能となっていることがわかる。

オーのアプローチは、非定常流動曲面モデルの導入である。この代表的なモデルとして関口⁽⁴⁾のモデルとをとりあげる。粘塑性流動則は、次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_f = 1/(\partial F/\partial \sigma_f) \quad \text{--- (4)}$$

ここで、1は比例係数、Fは粘塑性ポテンシャル(非定常流動四面)であり、二次圧縮と遅くタイレタテンシーに関する考察からその具
体形は、次式のように定められている。

$$F = d \ln \left[1 + \frac{\dot{\epsilon}_0}{\alpha} \exp(f/d) \right] \quad \text{--- (5)}$$

上式において、 α は二次圧縮係数、 $\dot{\epsilon}_0$ は基準体積ひずみ速度である。
また、 f は静的降伏曲面で、 $f = \frac{1-K}{H_0} \ln(P/P_0) + D(1/P - 1/P_0)$ と表わされる。

粘塑性ひずみ速度は、粘塑性流動の継続条件; $\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_f} \dot{\sigma}_f + \frac{\partial F}{\partial t} = \dot{\epsilon}_f$
を考慮することにより、最終的に次式のように誘導される。

$$\dot{\epsilon}_f = \left[(1 - \exp(-\sigma_f/d)) \dot{f} + \dot{\epsilon}_0 \exp(f/d) / \alpha \right] \frac{\partial F}{\partial \sigma_f} \quad \text{--- (6)}$$

上式において、応力速度項を無視することにより、超過
応力型モデルか次式のように誘導される。(モデルCと呼ぶ)

$$\dot{\epsilon}_f = \left[\dot{\epsilon}_0 \exp(f/d) / \alpha \right] \frac{\partial F}{\partial \sigma_f} \quad \text{--- (7)}$$

モデルAとモデルCによる非排水クリープ挙動の計算結
果を併せて図-2に示す。両モデルとも超過応力型モデル
であるが、モデルAは加速クリープ挙動を示しているの
に対し、モデルCは加速クリープ過程を表現し得ている。こ
の差異は、モデルAでは既述述べたように、粘性係数を
一定としているのに対し、モデルCでは粘塑性流動の継続

条件; $\dot{F} = \dot{\epsilon}_f$ 、により、比例係数1を決定していることに起因する。すなわち、式(7)からわかるように、 $\frac{\partial F}{\partial \sigma_f}$ 項
が当然の帰結として含まれるので、同式の分母に $(1 - q/p)$ 項が現われる。従って、非排水クリープ変形の進行と
ともにこの項はゼロに収束し、クリープひずみ速度はクリープ破壊時 $[q/p = M]$ において無限大となる。以上よ
り、モデルCが加速クリープ過程を表現し得るにもかかわらず、モデルAではこのことが可能でないのは、粘塑
性ひずみ速度の大きさで決定する物質係数を求める際の考え方が互いに異なっていることに、その理由を帰すこ
とができる。

3. 今後の課題

超過応力型モデルにおいても加速クリープ過程の表現が可能であることを示してきた。
AubryらのモデルBでは、damageの概念を導入し、具体的には式(9)を採用し、破壊時に粘性抵抗がゼロとなるように
関数形を定めることにより加速クリープ過程の表現を可能にしている。他方、モデルCでは非排水クリープ中
の平均有効応力Pの減少にともなう、ひずみ速度が加速されるというプロセスを忠実に表現している。これら
二つのモデルは異なる仮定の下に導かれたものであるが、最終的なひずみ速度の表現式においては類似性が見られ
る。すなわち、モデルBにおける damage パラメータ、 $(1-d)^n$ 、とモデルCにおける $M(1-q/p)$ 項が数学的に
等価な意味を持つと解釈できる。しかしながら、両モデルとも正規圧密粘土の非排水クリープを表現するモデ
ルであり、今後、過圧密粘土や泥岩などの時間遅延破壊過程の表現に関しては、damage law や shear band の
概念といふ概念が直観的に有用であるように思われる。しかしながら実際のところでは、粘土や泥岩におけ
る damage の物理的メカニズムが不明であり、また shear band の発生に伴う塑性ひずみの局所化傾向、含水比の mig-
ration 等の難しい問題とつき起す可能性が高い。したがって、より適用性が広く、しかも物理的に健全なク
リープ破壊理論を確立するには、上述のような課題を今後、種々の観点から検討していく必要があろう。

参考文献 1) 松井 阿部 (1984), 土と基礎 Vol. 32, No. 1, 2) Adachi, T and F. Oka (1982), S. & F. Vol. 22, No. 4.

3) Aubry, D. et al. (1985), 5th ICOMING, Vol. 1, 4) Sekiguchi, H. (1977), 9th I.C.S.M.F.E. Vol. 1,

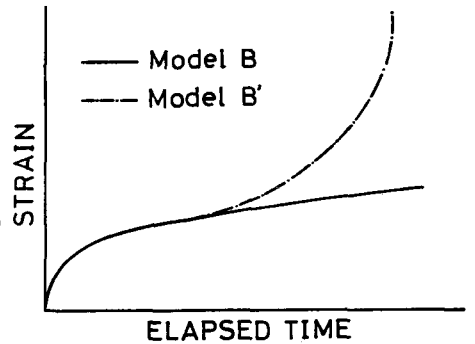


図-1 非排水クリープ挙動に対する damage law の影響

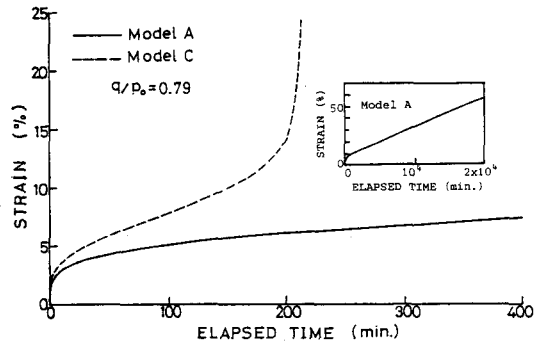


図-2 超過応力型モデルによる非排水クリープ挙動予測