

PSIII-4 流動曲面理論に基づく正規圧密粘土の弾粘塑性モデル

大阪大学工学部 正会員 松 井 保
 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 中 野 雅 文

1. まえがき

本報告は、筆者らが提案している流動曲面理論に基づく正規圧密年度の弾粘塑性モデルの概要を示すとともに、このモデルのクリープ特性から非排水クリープにおける上限降伏値と二次圧密による擬似先行圧密圧力の関係について考察したものである。

2. 弾粘塑性モデル

このモデルは構成理論として流動曲面理論を用い、有限なひずみ速度場において仮定される規準特性とクリープ特性式から誘導されている。規準特性としてCam-Clayモデルを採用すれば、塑性体積ひずみ v^p は次式で与えられる。

$$v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{\eta}{M} \right] \quad (1)$$

クリープ特性式として粘性体積ひずみ v^v に関する次式が仮定されている。

$$v^v = -\mu \ln \left(-\frac{\dot{v}^v}{\dot{v}^v_r} + \delta \right) \quad (2)$$

そして、瞬間粘塑性応答は存在しないと仮定することにより、(1)、(2)式から粘塑性体積ひずみ v^{vp} を硬化パラメータとする等方モデルの流動関数は次式で与えられる。

$$f = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left\{ \left[1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}^v_r t \right) \right] \exp \left[\frac{\lambda - \kappa}{\mu(1 + e_0)} \left\{ \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{\eta}{M} \right\} \right] + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{v}^v_r t \right) \right\} \right] - v^{vp} = 0 \quad (3)$$

モデルの詳細およびその適用性については文献〔1〕～〔4〕を参照されたい。

3. モデルのクリープ特性

非排水クリープにおける上限降伏値

このモデルは収束型のクリープ特性を示すので、図-1は(7)式の関係を示したものである。

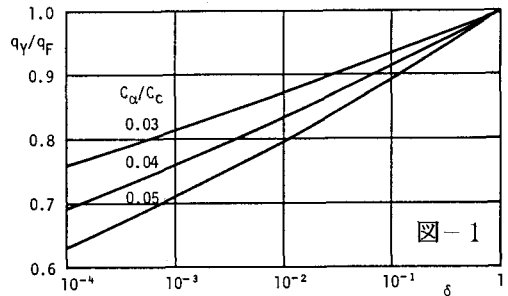


図-1

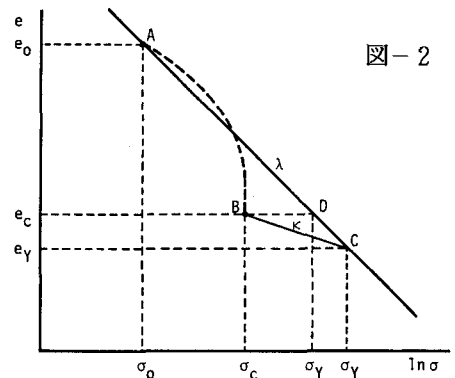


図-2

(3)式と非排水条件から次式のクリープ平衡状態曲面が得られる。

$$e_0 - e = \lambda \ln \left(\frac{p}{p^*_0} \right) + (\lambda - \kappa) \frac{\eta}{M} \quad (4)$$

$$p^*_0 = p_0 \delta^{\frac{\mu(1 + e_0)}{\lambda}} \quad (5)$$

したがって、軸差応力一定の非排水三軸クリープにおける上限降伏値 q_Y は、クリープ平衡応力線と破壊線の交点の軸差応力として次式で与えられる。

$$q_Y = M p_0 \exp \left[\frac{\mu(1 + e_0)}{\lambda} \ln \delta - \left(\frac{\lambda - \kappa}{\lambda} \right) \right] \quad (6)$$

上限降伏値 q_Y と規準特性として仮定されているCam-Clayモデル非排水強度 q_F の比は次式であたえられる。

$$\frac{q_Y}{q_F} = \delta^{\frac{\mu(1 + e_0)}{\lambda}} = \delta^{\frac{C_\alpha}{C_c}} \quad (7)$$

表-1

著者	粘土	塑性指数 (%)	先行圧密圧力 (kgf/cm ²)	等方圧密圧力 (kgf/cm ²)	上限降伏値 圧密圧力	上限降伏値 基準強度	備考
村山・柴田 (1964)	大阪粘土	—	—	—	0.5	0.72 (1.39)	上限降伏値：村山・柴田の方法 基準強度：応力制御三軸圧縮試験
Arulanandan, Shen & Young (1971)	San Francisco Bay mud	28	0.5	2.0	0.58	0.73 (1.37)	上限降伏値：村山・柴田の方法 基準強度：応力制御三軸圧縮試験
Finn & Snead (1973)	Haney clay	23	2.7	5.25	0.57	0.82 (1.22)	上限降伏値：クリープ破壊試験 (Sneadの方法) 基準強度：応力制御三軸圧縮試験
関口 (1984)	梅田粘土	37	1.7	3.0	0.6	0.82 (1.22)	上限降伏値：クリープ破壊試験 基準強度：カムクレイモデル

二次圧密による擬似先行圧密圧力

一次元圧密において一次圧密での時間履歴を無視し、 $n = \frac{\sigma_Y}{\sigma_c}$ 圧密中 K_0 値が変化しないと仮定すれば、最終的な粘塑性体積ひずみは（3）式から次式であたえられる。

$$v^{vp} = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \exp \left\{ \frac{\lambda - \kappa}{\mu(1+e_0)} \ln \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right) \right\} \right] \quad (8)$$

図-2に示す仮定により、（8）式から擬似先行圧密圧力 σ_Y 、擬似過圧密比 n はそれぞれ次式で与えられる。

①C点で先行圧密圧力を定義する場合

$$\sigma_Y = \sigma_c \delta^{\frac{\mu(1+e_0)}{\lambda - \kappa}} \quad (9), \quad n = \delta^{\frac{C_\alpha}{C_c - C_s}} \quad (10)$$

②D点で先行圧密圧力を定義する場合

$$\sigma_Y = \sigma_c \delta^{\frac{\mu(1+e_0)}{\lambda}} \quad (11), \quad n = \delta^{\frac{C_\alpha}{C_c}} \quad (12)$$

上限降伏値特性と擬似過圧密比

（7）式と（12）式から明らかなように、提案モデルでは次式が近似的に成立する。

$$\frac{q_Y}{q_F} = n^{-1} \quad (13)$$

表-1は、不攪乱粘土について実施された非排水三軸クリープ試験（等方正規圧密状態）結果を示したものである。上限降伏値、規準強度の決定方法は様々であるが、 q_Y/q_F は0.72~0.82程度の値となっていることがわかる。一方、二次圧密の進行に伴い擬似過圧密比がどの程度まで大きくなるかという問題については、Bjerrum〔5〕による塑性指数と過圧密比の関係が著名である（図-3）。しかし、半沢〔6〕は、いくつ

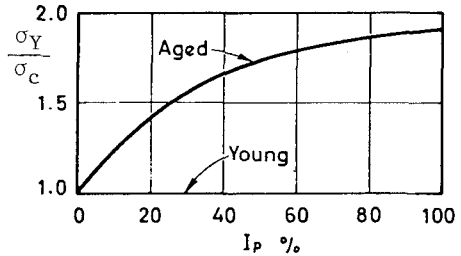


図-3（after Bjerrum）

かの実測データ（ $n=1.2 \sim 1.5$ ）を示して、二次圧密による間隙比の減少に伴う過圧密比の増加は1.5程度を最大値と考えるべきであるとしている。この指摘は（13）式に関して表-1のクリープ試験結果と良い対応を示すものである。

参考文献

- 1) Matsui, T and N. Abe : Elasto/viscoplastic constitutive equation of normally consolidated clays based on flow surface theory, 5th Int. Conf. on Num. Methods in Geomech., 1985.
- 2) Matsui, T. and N. Abe : Flow surface model of viscoplasticity for normally consolidated clay, 2nd Int. Symp. on Num. Models in Geomech., 1986.
- 3) 松井・阿部・林・中野：非排水クリープ挙動に対する流動曲面モデルの適用性，第21回土質工学研究発表会発表講演集，1986.
- 4) 松井・阿部・林・中野：弾粘塑性モデルの非排水クリープ特性と非排水強度のひずみ速度依存性，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，1986.
- 5) Bjerrum, L. : General Report, 8th ICSMFE, 1973.
- 6) 半沢・岸田：年代効果を受けた粘土の非排水強度特性，土と基礎，30-12，1982.