

III-184 空間滑動面 (SMP) に基づいた Cam-clay モデルの改良

名古屋工業大学 正 員 ○松岡 元
名古屋市 正 員 本間 英幸

Cam-clayモデル¹⁾は、その簡明な理論、パラメーターの少なさなどの長所のために、粘土の構成式の中で最も広く用いられてきた。しかし、金属材料に対して成功した「正八面体面」に基づいた理論展開となっているため、土のような摩擦則に従う粒状材料については適合しない点も多く指摘されている。そこで、Cam-clayモデルの長所を生かしつつ、粒状材料に対して成功している「空間滑動面 (SMP)」に基づいた簡単な粘土の弾塑性構成モデルを提案する。

1. 空間滑動面 (SMP) に基づいた粘土の弾塑性モデルの骨子

Cam-clayモデルの要点は次の2式で表現できるであろう。

$$\eta \equiv \frac{q}{p} = M - \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_p^p} \quad (1)$$

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left(\frac{dp}{p} + \frac{d\eta}{M} \right) \quad (2)$$

ここに、 $\eta \equiv q/p$ (正八面体面上のせん断・垂直応力比)、 M は破壊時の q/p であり、他の記号の意味は通常用いられている通りである。さて、式(1)、(2)に対応させて空間滑動面 (SMP) に基づいた式を表示すれば次式を得る。

$$X \equiv \frac{\tau_{SMP}}{\sigma_{SMP}} = M^* - \alpha \frac{d\epsilon_{SMP}^{*p}}{d\gamma_{SMP}^{*p}} \quad (3)$$

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left(\frac{dp}{p} + \frac{dX}{X_f} \right) \quad (4)$$

ここに、 $X \equiv \tau_{SMP} / \sigma_{SMP}$ (空間滑動面上のせん断・垂直応力比)、 X_f は破壊時の $\tau_{SMP} / \sigma_{SMP}$ 、 $d\epsilon_{SMP}^{*p}$ 、 $d\gamma_{SMP}^{*p}$ は塑性主ひずみ増分ベクトルのSMPに垂直な成分および平行な成分、 α 、 M^* は土質パラメーターである²⁾。式(3)、(4)は式(1)、(2)中の $\eta \equiv q/p$ を $X \equiv \tau_{SMP} / \sigma_{SMP}$ に変換した式と理解されるが、これによって三軸圧縮条件から三軸伸張条件まで相異なる3主応力下での実測値を統一的に説明可能となる。なお、式(3)は本来せん断による粒子間のすべりに基づく関係と考えられるので、等方圧密によるひずみ成分 (IC) は差し引くものとする。

ここで、ひずみの算定方法を主ひずみ増分 $d\epsilon_i$ ($i=1, 2, 3$) で説明する。

$$d\epsilon_i = d\epsilon_i^p + d\epsilon_i^e \quad (5)$$

$$d\epsilon_i^p = a_i \cdot d\epsilon_{SMP}^{*p} + b_i \cdot d\gamma_{SMP}^{*p} \quad (6)$$

ここに、 $a_i = \sqrt{\frac{J_3}{\sigma_i J_2}}$ (SMPの法線 (σ_{SMP}) の方向余弦)、

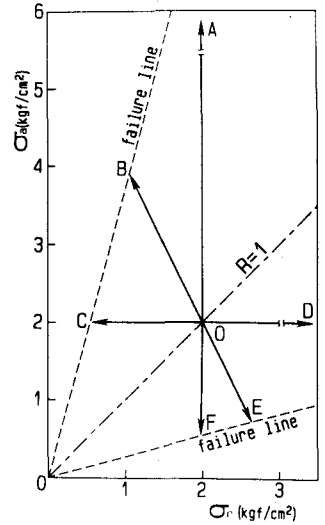
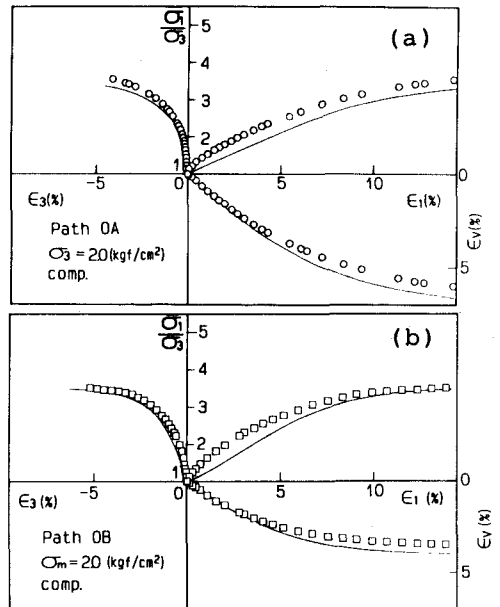


図-1 実験に用いた応力経路図



$$b_i = \frac{\sigma_i - \sigma_{SMP}}{\tau_{SMP}} \cdot a_i \quad (\tau_{SMP} \text{の方向余弦)である。}$$

$$d\epsilon_{SMP}^{*p} = d\epsilon_{SMP}^{*p(S)} + d\epsilon_{SMP}^{*p(IC)} \quad (7)$$

$$d\gamma_{SMP}^{*p} = d\gamma_{SMP}^{*p(S)} + d\gamma_{SMP}^{*p(IC)} \quad (8)$$

$$d\gamma_{SMP}^{*p(S)} = \frac{d\epsilon_v^p - d\epsilon_v^p(IC)}{(a_1 + a_2 + a_3) \frac{M^* - X}{\alpha} + (b_1 + b_2 + b_3)} \quad (9)$$

$$d\epsilon_{SMP}^{*p(S)} = \frac{M^* - X}{\alpha} d\gamma_{SMP}^{*p(S)} \quad (3)$$

$$d\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \left(\frac{dp}{p} + \frac{dX}{X_f} \right) \quad (4)$$

$$d\epsilon_v^p(IC) = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \frac{\langle dp \rangle}{p} \frac{p}{p_1} \quad (10) \quad 2)$$

ここに、

$$\langle dp \rangle = \begin{cases} dp (dp > 0) \\ 0 (dp \leq 0) \end{cases}, \quad \frac{p}{p_1} = \exp\left(-\frac{X}{X_f}\right)$$

$$d\epsilon_{SMP}^{*p(IC)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \frac{\langle dp \rangle}{p} \frac{p}{p_1} \quad (11)$$

$$d\gamma_{SMP}^{*p(IC)} = 0 \quad (12)$$

なお、弾性ひずみ $d\epsilon_e^*$ は、 $E = 3(1 - 2\nu)(1 + e_o)p/\kappa$ 、 $\nu = 1/3$ とした等方弾性式から算定するものとする。以上より、式(3)、(4)に基づいたひずみを計算できることになる。

2. 提案モデルによる解析値と実測値の比較

さて、式(4)は p と X を降伏条件とするダブル・ハードニングとみてもよいが、ここでは、Cam-clayモデルと同様に塑性体積ひずみ e_v^p を硬化パラメータとして計算してみた。図-1は応力経路図、図-2(a)~(f)は計算結果と実測値の比較を示している。試料は通称藤の森粘土($w_L = 41\%$ 、 $w_p = 23\%$ 、 $G_s = 2.67$)であり、解析に用いたパラメータは、 $\lambda/(1 + e_o) = 5.08\%$ 、 $\kappa/(1 + e_o) = 1.12\%$ 、 $\alpha = 0.7$ 、破壊時の主応力比 $R_f = 3.5$ である。

参考文献

- 1) Schofield & Wroth(1968): Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill.
- 2) Nakai & Matsuoka(1986): S & F, Vol. 26, No. 3, pp. 81-98.

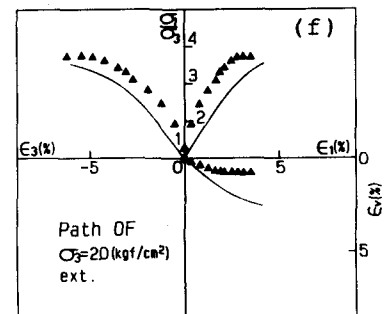
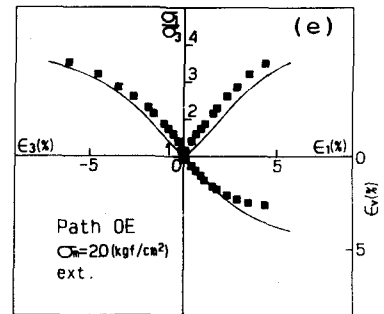
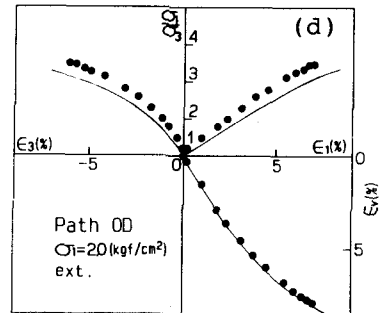
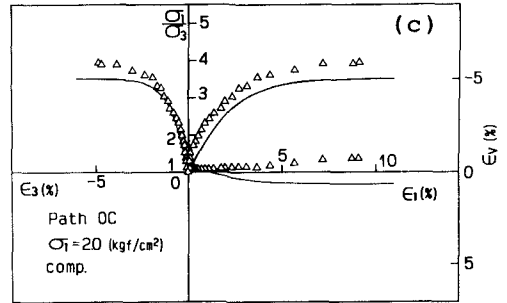


図-2 各種応力経路下の実測値と解析値の比較