

1. まえがき

飽和粘土の動的挙動を表現しうる応力-ひずみ関係の研究は、未だ十分とはいえないが、多くの成果をあげてきている。理論的取扱いにかざれば、足立・岡野¹⁾によるPergynaの粘塑性理論による定式化およびそれを拡張した、非弾性理論による、赤井・岡^{2),3)}による応力-ひずみ関係の定式化がある。さらに、レオジー挙動に注目した、関口・太田⁴⁾の流動則が提案されている。赤井・足立らの弾-粘塑性理論では初期の状態は平衡状態にあると仮定しているが、現実の挙動としては、たとえば二次圧密現象にみられるように、平衡状態にはないと考え方が自然である。さらに、赤井らの振動三軸試験⁵⁾をはじめ多くの実験により、いわゆる状態曲面内において、粘性土は弾性的に挙動しないことが指摘されている。本報告においては、これらの事実を考慮し、時間効果を表現できる正規圧密粘土の応力-ひずみ関係を考察し、くりがえし載荷をうける粘土の挙動をも把握できる応力-ひずみ関係確立を目指す。

2. 基本仮定 応力-ひずみ関係の誘導に際して、以下の仮定を設けた。

- (1) 通常の一圧密の終了時において粘土は平衡状態にはなっていない。
- (2) 二次圧密の終了する真の平衡状態において Roscoeらの平衡状態での理論が成立する。
- (3) 異方性を考慮するために 関口・太田の用いた $\eta_{ij} = S_{ij}/\sigma_m'$ によって静的降伏曲面を式で表わす。
 $\eta^* + M \ln \sigma_m'/\sigma_m'(0) = 0$ S_{ij} : 偏差応力テンソル, σ_m' : 平均有効主応力 $\eta^* = (\frac{2}{3}(\eta_{ij} - \eta_{ij(0)})^2)^{1/2}$
- (4) 飽和粘土の状態を表示するために、 $\eta^* \sim \eta^* \sim \sigma_m'$ 空間を用いる。 η^* : 塑性体積ひずみ
- (5) くりがえし載荷によって、二次圧密によるより早く平衡に達する。つまり、二次圧密の過程は、くりがえし載荷過程と等価である。

3. 応力-ひずみ関係

図-1に静的降伏曲面 $f_s = 0$ および それに対応する、動的塑性ポテンシャル $f_d = 0$ が示されている。

$$f_s = \eta^* + M \ln \sigma_m'/\sigma_m'(0) \quad (1) \quad f_d = \eta^* + M \ln \sigma_m'/\sigma_m'(0) \quad (2) \quad M: \text{Critical State Lineの傾き}$$

(2)は足立の方法により、相似変形で求めている。 f_d を塑性ポテンシャルとして応力-ひずみ関係は、

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \beta_{ijkl} \frac{\partial f_d}{\partial \sigma_{kl}} + \frac{1}{2q} \dot{S}_{ij} + \frac{\kappa}{1+e_0} \cdot \frac{1}{\sigma_m'} \dot{\sigma}_m' - \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (3)$$

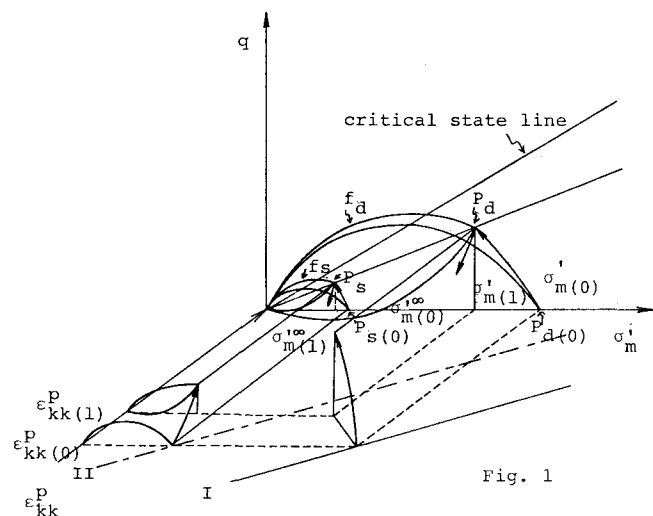


Fig. 1

(3)式で、 $\dot{\epsilon}_{ij}$: ひずみ速度テンソル
 σ_{ij} : 応力テンソル G : せん断弾性係数
 e : 間隙比 λ : 圧縮指数 κ : 膨潤指数 β_{ijkl} : 4階等方テンソル
 $\eta^* \sim \sigma_m'$ 空間で (η^* : 軸差応力) $P_{d(0)} \sim P_{d(1)}$ へ応力経路が進む間に 静的経路は $P_{s(0)} \rightarrow P_{s(1)}$ となる。この時、塑性体積ひずみは動的、静的ともに $\epsilon_{kk(0)}^p \rightarrow \epsilon_{kk(1)}^p$ となる。ただし、非排水三軸状態である。

(3)より、 $A = [\eta_{ij} - \eta_{ij(0)}] / |\eta - \eta_0|$, $\eta = \eta^*/p$, η : 軸差応力とし、 $p = \sigma_m'$ とすると、

$$\dot{\epsilon}_{11}^{vp} = \beta_1(F) \times \frac{1}{\sigma_m'} \times A \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx}^{vp} = \beta_2(F) \left\{ M - \frac{\sigma}{p} A \right\} \times \frac{1}{\sigma_m'} \quad (5)$$

β_1, β_2 の関数形は三軸圧縮せん断試験結果より決まる。 $F = (f_d - f_s) \sqrt{f_s}$ $F \leq 0$ の時 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = 0$

$F > 0$ の時 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \neq 0$ である。 $\dot{\epsilon}_{11}$: 偏差ひずみ速度テンソル

$$\beta_1 / \sigma_m' = C_0 \exp \left\{ m \frac{(\sigma - \sigma_s)}{\sigma_m'} \right\} \quad (6) \quad (\beta_2 / \sigma_m') (M - \frac{\sigma}{p} A) = \bar{C}_1 \exp \left\{ m \frac{(\sigma - \sigma_s)}{\sigma_m'} \right\} \quad (7)$$

σ_s : 等塑性体積ひずみを持つ静的応力ひずみ曲線上の σ の値。 $A = 1$ (圧縮) $A = -1$ (伸張)

4. パラメータの評価と決定

以下では $\dot{\epsilon}_{11} (e_{11})$ を $\dot{\epsilon}$ で表わす。2通りのひずみ速度でせん断試験を行った場合、弾性ひずみを無視すると、

$$\ln \dot{\epsilon}_{11}^p = \ln C_0 (\dot{\epsilon}_{11}^p) + m (\dot{\epsilon}_{11}^p) (\sigma_1 - \sigma_s(\dot{\epsilon}_{11}^p)) / \sigma_m' \quad (8)$$

$$\ln \dot{\epsilon}_{xx}^p = \ln C_0 (\dot{\epsilon}_{xx}^p) + m (\dot{\epsilon}_{xx}^p) (\sigma_2 - \sigma_s(\dot{\epsilon}_{xx}^p)) / \sigma_m' \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_{11}^p = \dot{\epsilon}_{xx}^p \text{ の場合, (8), (9) より } \ln \dot{\epsilon}_{11}^p / \dot{\epsilon}_{xx}^p = m (\dot{\epsilon}_{11}^p) (\sigma_1 - \sigma_s) / \sigma_m' \quad (10)$$

これは, Roscoe らの理論では $\dot{\epsilon}^p$ が決まると $\dot{\epsilon}_{11}^p$ が一意に決まるからである。したがって、平衡状態で実験しなくても任意のひずみ速度で実験することにより、パラメータが決まる。

次に、 $\sigma = 0$ の場合には、二次圧縮のみが考えられるから、開口による実験式を考慮して、(7) より、

$$\dot{\epsilon}_{xx}^p = \left\{ M - \frac{\sigma}{p} \right\} \beta_2 / \sigma_m' = C_1 \exp \left(- \frac{V^p}{\alpha^*} \right) \exp \left(m \frac{(\sigma - \sigma_s)}{\sigma_m'} \right)$$

図-1中のIIの線は平衡状態における $\dot{\epsilon}^p \sim \sigma_m'$ 線であるが、これは二次圧縮試験をするこにより決定することができる。(6)式、(7)式中の C_0 と C_1 はともにひずみ依存性があると考えられるが、定数と考えて数値計算した結果が図-2と3に示してある。用いた数値は以下のとおりである。 E (Young 率) = 1400 kg/cm², $C_0 = 10^8$ (1/sec), $C_1 = 0.5 \times 10^8$ (1/sec), $m = 46.0$, $\sigma_m' = 2.0$ kg/cm², $e = 0.863$, $\lambda = 0.127$, $K = 0.02$, $M = 1.4$, $\alpha^* = 0.0029$ 。図-2,3の応力-ひずみ関係および応力-経路のひずみ速度依存性が表現されている。

ここで考察した理論に於て、開口らの流動則と比較すると、ここでは $F \leq 0$ によって弾性状態を決定しているのに対し、開口らのものでは弾性状態を規定していないので時間依存性と非時間依存性を別々に表現しなくてはならない。本論の取扱いでは、 $F > 0$ における領域における $\sigma_m' \sim \dot{\epsilon}^p$ 線つまりI線は時間積分の結果得られることになる。

5. 謝辞 本稿をまとめるにあたり討論いただいた京大土系研究室のみなさまに感謝いたします。

6. 参考文献 1) Adachi, T. and M. Okano, Soils and Foundations, Vol.14, No. 4, 1974, pp.55-72. 2) Akai, K. and Oka, F.: Thermodynamic Theory of Inelastic Materials and its Application to StressWave Propagation in Cohesive Soil, Proc. JSCE, No.253, Sept. 1976, pp.109-122. 3) Oka, F., Proc. JSCE, No. 272, Apr. 1978, pp.117-130. 4) Sekiguchi, H. and H. Ohta, Preprint of specialty session 9, 9th ICSMFE, pp.229-238. 5) 赤井・大西・中川, 第13回土質工学研究発表会講演集, 1978, pp.293-296.

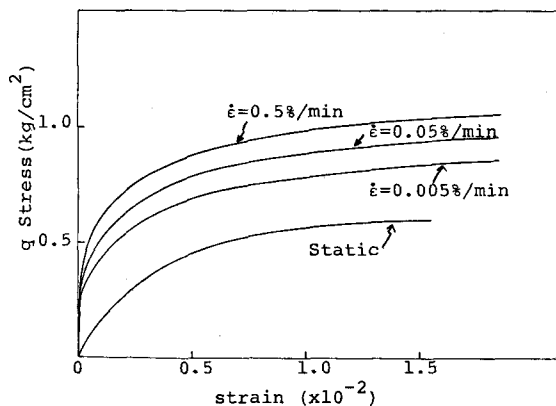


Fig.2 Stress-strain Relation

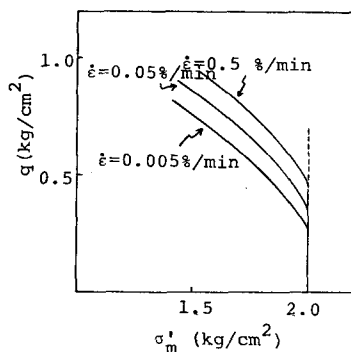


Fig.3 Stress Path