

名古屋大学大学院 学生会員 ○杉村昌広

名古屋大学工学部 正会員 松澤 宏

1. まえがき： 土の力学・変形特性は、土が過去に受けた変形履歴に大きく依存し、その影響は土が動的载荷あるいは繰返し载荷を受けるときに特に顕著になることは良く知られている。本研究は、Endochronic 理論¹⁾に基づき、土の動的構成関係を定式化することを目的としているが、単調载荷過程におけるゆるい砂の応力～ひずみ関係の定式化およびその適用例については既に報告している²⁾。今回は、前報の式を繰返し载荷状態でのものに拡張し、軸対称条件下での定式化を行ったのでここに報告する。

2. Endochronic 理論による繰返し载荷時におけるゆるい砂の応力～ひずみ関係の定式化： Endochronic 理論の主概念であるintrinsic timeは次式で定義される変数であり、これは塑性ひずみ履歴長と関連し、材料自身が記憶する内部時間測度としての意味を持っている。

$$\text{intrinsic time} \quad dZ = d\zeta / f(Z) \quad , \quad f(Z) : \text{硬化・軟化関数} \quad (1)$$

$$d\zeta = \sqrt{de_{ij}^p \cdot de_{ij}^p} \quad , \quad e_{ij}^p : \text{塑性偏差ひずみテンソル}$$

Endochronic 理論より、土の応力～ひずみ関係の一般式は次式のようにになる。

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \int_0^Z K(Z-Z') \frac{\partial \epsilon_{kk}^p}{\partial Z'} dZ' + \delta_{ij} \int_0^Z D(Z-Z') \frac{\partial \theta}{\partial Z'} dZ' \quad (2)$$

$$+ 2 \int_0^Z \mu(Z-Z') \frac{\partial e_{ij}^p}{\partial Z'} dZ' \quad \epsilon_{kk}^p : \text{塑性体積ひずみ}, \quad \theta : \text{温度}$$

また、上式右辺第3項のせん断成分については八面体応力および八面体ひずみを用いて次式のように表した。

$$\tau_{oct} = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^Z \mu(Z-Z') \frac{\partial \tau_{oct}^p}{\partial Z'} dZ' = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^Z \mu(Z-Z') (-1)^n f(Z') dZ' \quad (3)$$

n: 偶数; 載荷; 奇数; 除荷

前報で示したように (3)式における $\mu(z)$, $f(z)$ については次のように定義し、最終的に単調载荷過程における応力～ひずみ関係式として (6)式を得た。

$$2\mu(Z) = G_0 p^m (p_0 + p_1 e^{-B_1 Z}) \quad , \quad G_0 = 900 \cdot (2.17 - e)^3 / (1 + e) \quad , \quad m = 0.4 \quad (4)$$

$$f(Z) = \beta + (1 - \beta) e^{-KZ} \quad , \quad p_1, B_1, \beta, K \quad (5)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{\sqrt{3}} G_0 p_0 p^m \{ \beta + (1 - \beta) e^{-KZ} \} \quad p : \text{平均応力} \quad (6)$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} G_0 p_1 p^m \left\{ \frac{\beta}{B_1} + \frac{1 - \beta}{B_1 - K} e^{-KZ} - \left(\frac{\beta}{B_1} + \frac{1 - \beta}{B_1 - K} \right) e^{-B_1 Z} \right\}$$

繰返し载荷状態では (3)式で示した n の値が変化するため、それを考慮した定式化を行わなければならない。

いま、载荷状態を図-1のように载荷、除荷のステップに分け、第 i ステップ終了時の intrinsic time を Z_i と定義すると、(6)式に対応する式として (7)式が得られる。

$$\tau_{oct} = \frac{1}{\sqrt{3}} G_0 p_0 p^m \{ \beta + (1 - \beta) e^{-KZ} \} + \frac{1}{\sqrt{3}} G_0 p_1 p^m \left\{ \frac{\beta}{B_1} + \frac{1 - \beta}{B_1 - K} e^{-KZ} - \left(\frac{\beta}{B_1} + \frac{1 - \beta}{B_1 - K} \right) e^{-B_1 Z} \right\}$$

$$+ \frac{2}{\sqrt{3}} G_0 p_1 p^m e^{-B_1 Z} \sum_{i=1}^m (-1)^{i-1} \left\{ \frac{\beta}{B_1} e^{B_1 Z_i} + \frac{1 - \beta}{B_1 - K} e^{(B_1 - K) Z_i} - \left(\frac{\beta}{B_1} + \frac{1 - \beta}{B_1 - K} \right) \right\} \quad (7)$$

3. パラメータの決定および軸対称三軸状態への適用： 4つの材料パラメータ p_1, B_1, β, K については、破壊応力比、初期接線勾配、最終降伏面の半径の条件を与えて決定した。具体的には4パラメータのうち1つを変化させて、残りを3つの条件式によって算定しつつ、実験値へ適合させる。以下、(7)式を軸対称条件での繰返し载荷状態に適用した例を示すが、計算に用いたパラメータは単調载荷時の実験値との適合によって決定した¹⁾。

図-2(a),(b) はそれぞれ、八面体せん断ひずみに対する八面体応力および体積ひずみの変化を表すものである。図-2(a)において、実験値には繰返し載荷時に若干のヒステリシス特性が見られるが、(7)式による計算値ではそれを十分表現することができなかった。しかしながら、実験におけるヒステリシスループのひずみ振幅は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ のレベルに相当し、弾性的性質が卓越しているためであるとも考えられる。

図-2(b)には体積ひずみの実験値および計算値が示してあるが、図中の計算値は諸戸³⁾の提案したパラメータ S_s で実験値を整理し(図-3)、その勾配 λ を用いて次式より計算したものである。なお、(8)式の応力値および γ_{oct}^p の値には(7)式の計算値を用いている。

$$d\varepsilon_v = \left(\lambda - 3 \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma_{oct}} \right) \cdot d\gamma_{oct}^p \quad (8)$$

4. あとがき：(7)式を繰返し載荷時の軸対称状態に適用した結果、ヒステリシス特性の表現に問題が残り、この点について、さらに検討する必要がある。

<参考文献> 1) Valanis, K.C.: A Theory of Visco-plasticity without a Yield Surface, Achieves of Mechanics, Vol.23, 1971, pp.517-551 2)松澤, 杉村：ひずみ履歴を考慮したゆるい砂の応力～ひずみ関係, 第21回土質工学研究発表会, 1986 3)Moroto, N.: A New Parameter to Measure Degree of Shear Deformation of Granular Material in Triaxial Compression Tests, Soils & Foundations, Vol.16, 1976, pp.1-9

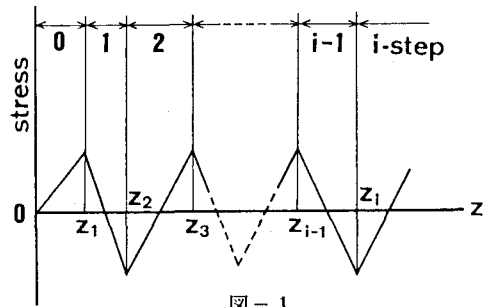


図-1

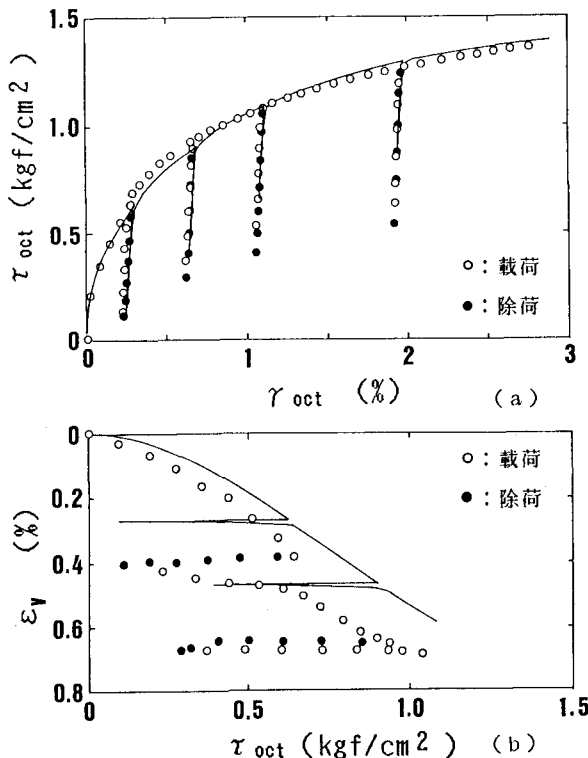


図-2

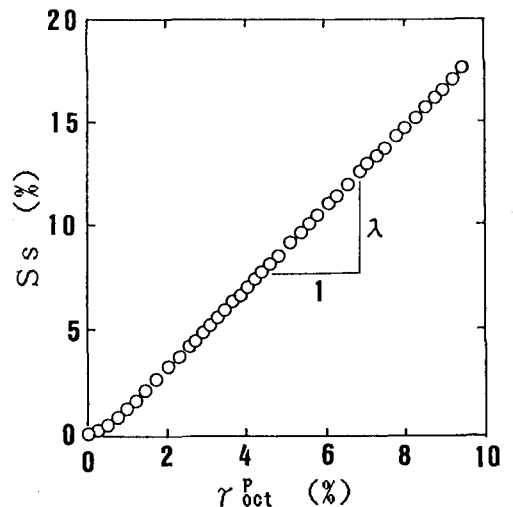


図-3