

弾塑性構成式による土要素の液状化過程の模擬

中部復建（株） 森 信夫

1. はじめに

塑性論に基づく砂の繰返しモデルにおいて、ストレス–ダイレイタンス特性は一般に排水条件下の試験結果から求めることが多いが、液状化解析において液状化に至る過程での有効応力の変化を必ずしも的確に表現しているとは言い難い。

本報告は西、金谷¹⁾により提案されたものを基本とし、繰返し中空ねじり試験および繰返し三軸圧縮試験の砂の非排水繰返しせん断試験結果を整理し、非排水繰返し中空ねじり試験結果をシミュレートしたので報告する。

2. 砂の繰返しモデル

まず、要素試験結果を整理した。試験に用いた砂は、木更津砂である。木更津砂の物性は、

$U_c = 2.71$, $e_{\max} = 0.979$, $e_{\min} = 0.643$, $G_s = 2.698$ である。この木更津砂を用い、初期相対密度 $D_r = 60\%$ で等方圧密試験で体積圧縮係数 λ, κ を求めた。また、 $D_r = 60\%$ で等方圧密試験で拘束圧を変えることで、せん断ひずみ γ が 10^{-6} での初期剛性を G_o を求めた。以下の単位は $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ 系である。これらの値は、 $\lambda = 0.014$, $\kappa = 0.014$, $G_o = 830 \cdot (\sigma'_m)^{0.64}$

である。この木更津砂を用い $D_r = 60\%$ で繰返し中空ねじり試験および繰返し三軸圧縮試験で、液状化試験をおこなった。以下に整理に用いた式を示す。

$$g = \eta_r / M_m + \ln(\sigma'_m) \quad (1), \quad f = \eta_r \quad (2), \quad d\varepsilon_{r\theta}^{ep} = h \frac{\partial g}{\partial \sigma_{r\theta}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \quad (3)$$

$$h = \frac{\left(\sigma'_m \right)^2 \cdot \left\{ \eta_r^* - \alpha \cdot \left(M_m - \eta_r^* \right) \right\}}{G_o^* \cdot \left(1 - \frac{\eta_r^*}{2 \cdot M_f} \right)^n} : (\alpha = 1) \quad (4), \quad G_o^* \left(1 - \frac{\eta_r^*}{2 \cdot M_f} \right)^n = \frac{\left(\sigma'_m \right)^2 \cdot \left\{ \eta_r^* - \alpha \cdot \left(M_m - \eta_r^* \right) \right\}}{d\varepsilon_{r\theta}^{ep}} \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{r\theta}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \right) \quad (5)$$

この式(5)から、まず $G_o^* \cdot \left(1 - \frac{\eta_r^*}{2 \cdot M_f} \right)^n$ の n を求めた。そして、

$$G_o^* = \frac{\left(\sigma'_m \right)^2 \cdot \left\{ \eta_r^* - \alpha \cdot \left(M_m - \eta_r^* \right) \right\}}{d\varepsilon_{r\theta} \cdot \left(1 - \frac{\eta_r^*}{2 \cdot M_f} \right)^n} \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{r\theta}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \right) \quad (6) \quad \text{から、} \quad G_o^* = G_{oo}^* \exp \left(\beta \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \right) \quad (7) \text{とした。}$$

さらに、 $M_f = F(\theta)$ (8), $M_m = F \left(\int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \right)$ (9) とした。 n, G_{oo}^*, β の具体的な表現は、中空ねじりおよび三軸応力状態²⁾を考慮して以下のようにした。

$$n = 5 - 0.02 \cdot \theta - 0.00044 \cdot (\theta)^2 \quad (10) \quad \theta : \pi \text{ 平面上の角度。}$$

$$G_{oo}^* \text{ は初期平均主応力に依存し、} \quad G_{oo}^* : \sigma'_m \leq 0.1 \quad G_{oo}^* = 50, \quad \sigma'_m \geq 1.5 \quad G_{oo}^* = 1100 \quad (11)$$

キーワード：弾塑性構成式、液状化、応力径路

連絡先：〒466-0059 名古屋市昭和区福江一丁目 1805 番地 TEL 052-882-5851 FAX 052-882-6170

$$\beta = F(\int \sqrt{2 \cdot I_2^p}, \theta) : \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.01 \quad \beta = 0, \quad 0.01 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.1 \quad \beta = -20, \quad 0.1 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.2 \quad \beta = -1, \\ 0.2 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} : \begin{cases} \theta \leq 30^\circ & \sigma'_{mO} > 1 & \beta = -4.4 + (4.4 - 0.5) / 30 \cdot \theta, & \sigma'_{mO} \leq 1, & \beta = -6.4 + (6.4 - 0.5) / 30 \cdot \theta \\ \theta < 30^\circ & 1 \geq \sigma'_{mO}, & \beta = -4.4 + (4.4 - 0.5) / 30 \cdot (60 - \theta), & \sigma'_{mO} \leq 1, & \beta = -6.4 + (6.4 - 0.5) / 30 \cdot (60 - \theta) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{とした。そして、} M_f = \frac{6 \cdot M'_f}{6 + M'_f (1 - \sin(3\theta'))} \quad M'_f = 1.57 \quad \theta' = 30 - \theta \quad (13)$$

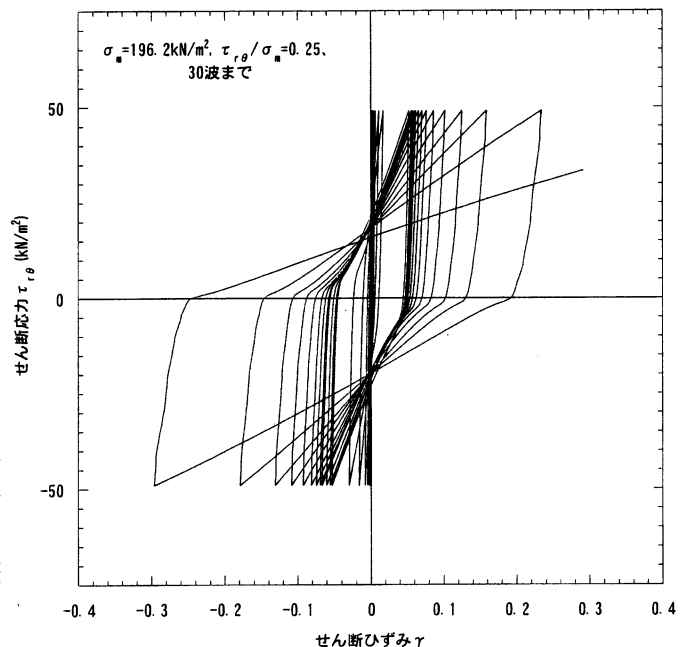
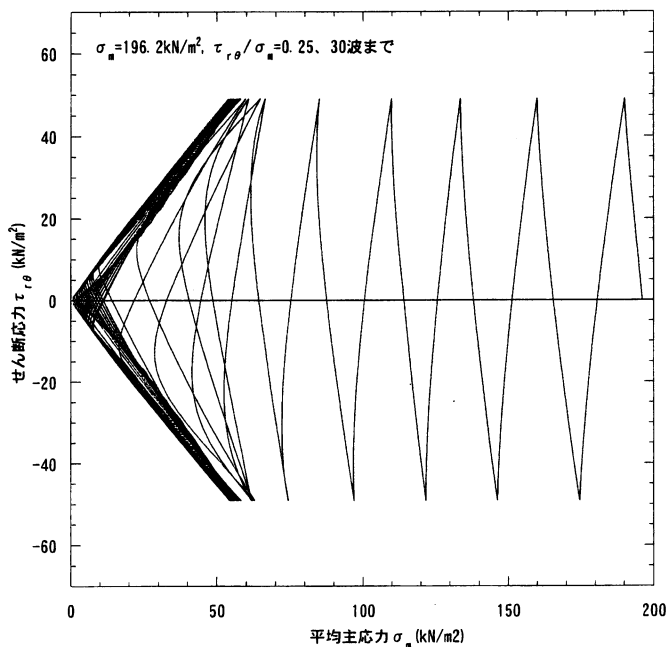
$$M_m = \alpha_1 \cdot \frac{6 \cdot M''_m}{6 + M''_m (1 - \sin(3\theta'))} \quad (\theta' = 30 - \theta \quad \theta \leq 30 : \alpha_1 = 2 - \theta / 30, \quad \theta \geq 30 : \alpha_1 = 1) \quad (14)$$

$$M''_m = F(\int \sqrt{2 \cdot I_2^p}) : \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.09; \quad M''_m = 0.30, \quad 0.09 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.178; \quad M''_m = 0.19 \cdot \exp(5.2 \int \sqrt{2 \cdot I_2^p}) \\ 0.178 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p}, \quad M''_m = 0.48$$

3. 実験結果のシミュレート

以上、繰返し中空ねじり試験結果および繰返し三軸圧縮試験結果の整理結果を示した。実際のシミュレートでは、上記のようなパラメータを用いると結果がよくない。下図に繰返し中空ねじり試験結果の計算結果を示したが、具体的には、以下のようなパラメータを用いた結果である。

$$n = 2, \quad M_f = 1.57, \quad M_m = 0.3, \quad \beta = F(\int \sqrt{2 \cdot I_2^p}, \theta) : \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.01 \quad \beta = 0, \quad 0.01 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.1 \quad \beta = -20, \\ 0.1 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.2 \quad \beta = -1, \quad 0.2 \leq \int \sqrt{2 \cdot I_2^p} \leq 0.01 \quad \beta = -0.5, \quad G_{oo}^* = 2000$$



4. おわりに

繰返し中空ねじり試験結果をシミュレートする方法が、検討できた。今後、繰返し三軸圧縮試験結果の検討を再度行い当該手法を適用性をさらに検討する予定である。

参考文献：(1)西好一、金谷守：「地震時における基礎地盤の安定性評価（その5） 繰返し載荷時における非弾性構成式の提案と地震時応答解析への適用」、電力中央研究所報告、U87033、昭和62年11月。(2) O.C.Zienkiewicz, M.Pastor, Y.M.Xie: 「Constitutive Modelling of Soils and Computation of Earthquake Damage and Liquefaction」, March, 1991, St. Louis, Missouri, pp.1743-1752