

名古屋工業大学

正員 松岡元

大学院

学生員 小川山若史

大学院

学生員 山崎若え

1. 複合滑動面に基づいた応力・ひずみモデル

提案モデルは次の仮定に基づいて定式化されている。^{1), 2)}
 イ) 3主応力下の各主ひずみは、2主応力間の仮想上の2次元スベリによって生じた主ひずみ2つずつの重ね合せとして表現される。
 ロ) ひずみの降伏条件は各主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3, \sigma_1/\sigma_2, \sigma_2/\sigma_3)$ によって各2主応力間で独立に規定される。
 ハ) 上述の2主応力間の3個の2次元スベリとして、図-1, 2に示す3個の2次元滑動面(Mobilized Planes)³⁾を想定し、微視的な考察から導びかれた滑動面上の応力・ひずみ関係式が成立するものとする。

上述の仮定より、3次元応力下の主ひずみ増分は次式で表わされる。

$$d\epsilon_1 = f' \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right) \cdot dX_{13} + f' \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) \cdot dX_{12}, \quad d\epsilon_2 = g' \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right) \cdot dX_{23} + g' \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) \cdot dX_{12}, \quad d\epsilon_3 = g' \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right) \cdot dX_{13} + g' \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right) \cdot dX_{23} \quad (1)$$

ここに

$$f' \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right) = \frac{\gamma_{0ij}}{\mu'_{ij} - \mu} \left(\frac{\mu - X_{ij}}{\lambda} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_i}{\sigma_j}} \right) \cdot \exp \left(\frac{X_{ij} - \mu}{\mu'_{ij} - \mu} \right), \quad g' \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right) = \frac{\gamma_{0ij}}{\mu'_{ij} - \mu} \left(\frac{\mu - X_{ij}}{\lambda} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_i}{\sigma_j}} \right) \cdot \exp \left(\frac{X_{ij} - \mu}{\mu'_{ij} - \mu} \right) \quad (2)$$

$$X_{ij} \equiv \tan \phi_{\text{moij}} = (\sqrt{\sigma_i/\sigma_j} - \sqrt{\sigma_j/\sigma_i})/2 \quad (i, j=1, 2, 3; i < j) \quad (3)$$

上式中の土質パラメータのうち、 $\lambda, \mu (= \tan \phi_\mu)$ は材料定数と考えられ、試料が受まればほぼ一定値をとるが、 μ'_{ij}, γ_{0ij} は後述するように粒子構造を反映して変化する。なお、下添字 ij は3個の滑動面のどれかを示す指標である。

2. 繰返しせん断履歴の評価

図-3に示すように、逆方向せん断開始時においてはせん断方向が逆転するので、前載荷終了時の $\bar{\theta}$ (粒子接点角 θ の平均値) の値の符号を変えたものを $\bar{\theta}_0$ ($\bar{\theta}$ の初期値) とする。なお、逆方向にせん断された場合、粒子間摩擦により $\tau/\sigma_N = 2\mu (= 2 \tan \phi_\mu)$ の間は粒子接点角分布は変化せず、ひずみは生じないとした。また、 $\bar{\theta}$ と滑動面上のせん断・垂直応力比 τ/σ_N の間には次式が成立する。³⁾

$$\tau/\sigma_N = \lambda \cdot \bar{\theta} + \mu \quad (4)$$

そこで、式(4)により推定される逆方向せん断開始時の $\bar{\theta} (= \bar{\theta}_0)$ を介し、 μ'_{ij}, γ_{0ij} を次式で順次予測する。³⁾

$$\mu'_{ij} - \mu = \kappa \cdot (\bar{\theta}_f - \bar{\theta}_0) \quad (5) \quad \gamma_{0ij} = \gamma_{01st} \cdot \exp \left[\lambda \cdot (\bar{\theta}_0) / \{ \kappa (\bar{\theta}_f - \bar{\theta}_0) \} \right] \quad (6)$$

ここに、 $\bar{\theta}_f$ は破壊時の $\bar{\theta}$ 、 κ は次式で与えられる係数である。

$$\kappa = (\mu'_{1st} - \mu) / \bar{\theta}_f \quad (7)$$

なお、 $\gamma_{01st}, \mu'_{1st}$ はそれぞれ第1載荷時の γ_{0ij}, μ'_{ij} を意味する。

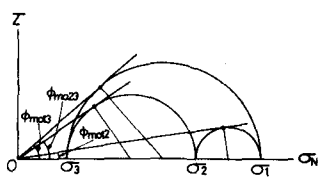


図-1 各2主応力間で (τ/σ_N) が最大となる3つの滑動面上の応力状態

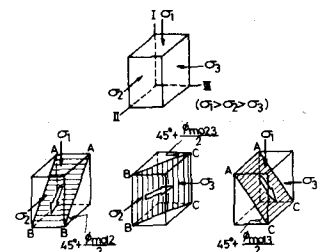


図-2 3次元下の3つの2次元滑動面(3つ合せて複合滑動面と呼ぶ)

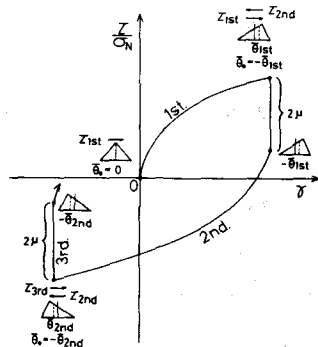


図-3 繰返しせん断時の応力・ひずみ履歴と粒子接点角分布の変化特性

3. 正八面体面上の円経路に沿う排水せん断挙動の解析

図-4 (a),(b)は主応力制御試験機を用いて、Misesの規準($\tau_{oct}=94.2 \text{ kN/m}^2$, 平均有効主応力 $P=196 \text{ kN/m}^2$)に沿って正八面体面上を一周まわした場合の、正八面体せん断ひずみ増分 $d\gamma_{oct}$ の方向と大きさをベクトルで示したものである。実測値(a図), 解析値(b図)とも、主応力比 σ_1/σ_3 が減る所(Ext.→Comp.)ではひずみ増分は小さく、 σ_1/σ_3 が増える所(Comp.→Ext.)ではひずみ増分が大きいのがみられる。このことは、土の変形がMisesよりも、Mohr-Coulomb的な規準に支配されることを示している。また図-5は同じ実験の主ひずみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$), 体積ひずみ ϵ_v と、正八面体面上の角度 α の関係の実測値と解析値の比較を示しているが、両者はよく一致している。

4. 液状化解析への適用

式(1)~(3)に圧密によるひずみを考慮し、非排水条件を課すことにより、軸対称条件下の非排水繰返しせん断試験の解析を行った。図-6に有効応力経路の解析例を示す。また、図-7に液状化強度の実測値と解析値の比較を示す。 $\gamma_{0.1st}=0.04\%$ はほぼ $D_r=80\%$ のパラメータに対応しているが、解析値は定量的にも実測値の傾向をよく説明している。解析に用いたパラメータはせや密詰めめの豊浦砂($D_r=80\%$)に対するものであり、次に示す値である。 $\lambda=1.2, \mu=0.2, \mu'_{1st}=0.36, \gamma_{0.1st}=0.04\%$ ($P=98 \text{ kN/m}^2$), $\gamma_{0.1st}=0.06\%$ ($P=196 \text{ kN/m}^2$), $C_c/(1+e_0)=0.928\%$, $C_s/(1+e_0)=0.578\%$, $K_0=0.5$, 破壊時の主応力比 $R_f=4.6$ ($\phi_d=40^\circ$)

なお、全てのパラメータは P -一定の単調载荷の三軸圧縮試験と圧密試験だけから決定することができる。

謝辞 御助言を頂いた本学山内利彦教授、中井照夫助教、東大龍岡文夫助教、実験を手伝って頂いた本学学部生松原義仁君、村井準治君に謝意を表する。

参考文献 1) Matsuoka, H. (1974): S&F, Vol. 14, No. 2, pp. 47-61. 2) Matsuoka H. (1982): 4th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, pp. 223-233. 3) 松岡, 外資 (1983): S&F, Vol. 23, No. 2, pp. 83-97. 4) 中井, 三原, 村谷 (1983): 第18回土工学会研究発表会, 198, pp. 339-342. 5) 松岡, 香川, 中井 (1977): 土木学会論文報告集第206号, pp. 95-105. 6) 村松正重 (1981): 東大修士論文。

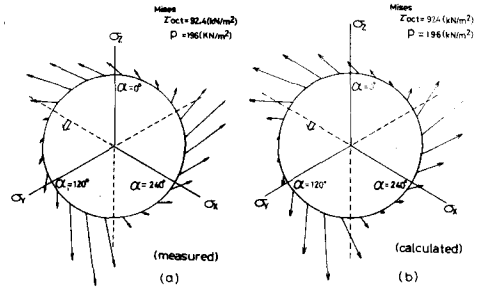


図-4 Misesの規準に沿って一周回した時の正八面体せん断ひずみ増分ベクトルの(a)実測値と(b)解析値 ($\alpha=60^\circ$ から回し始める)

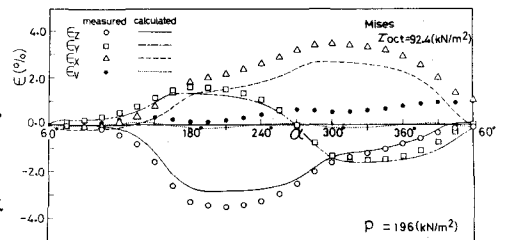


図-5 Misesの規準に沿って一周回した時の角度 α へ主ひずみ, 体積ひずみ関係の実測値と解析値

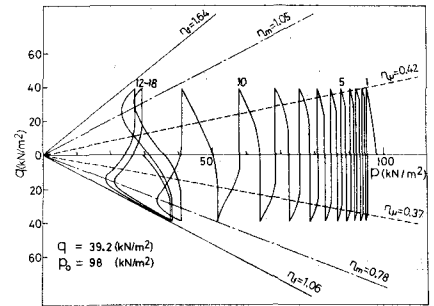


図-6 非排水三軸圧縮・伸張繰返し試験時の有効応力経路の解析値

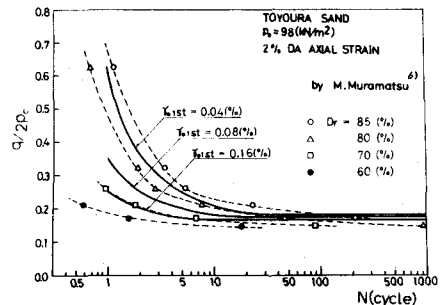


図-7 液状化強度 $q_{0.1st}$ へ繰返し回数 N 関係