

層状砂質地盤の液状化解析

京都大学工学部 正員 後藤尚男
 京都大学工学部 正員 岡二三生
 京都大学大学院 学生会員 関口宏二

1. まえがき

地震時の砂の液状化現象は耐震工学上解明されるべき重要な問題であり、Seed以来、99
 多くの実験的研究がなされ、近年では土の応力~ひずみ関係を使用した砂質地盤の液状化解
 析が行われるようになってきた。本研究では、水平砂質地盤において、側方変形が拘束さ
 れているものと仮定し、水平垂直応力の変化と間げき水圧の消散を考慮した解析を行った。

2. 砂質地盤の液状化解析

砂の応力~ひずみ関係式 (i) $(\sigma_{cat}/\sigma_m) > M_m$ から $d(\sigma_{cat}/\sigma_m) < 0$ のとき (σ_m : 平均有効応力, σ_{cat} : 八面体せん断応力
 M_m : 最大圧縮点の有効応力比); 石原らの非排水くりかえし三軸圧縮試験によれば、応力径路が変相角
 を越えた後にせん断応力の除荷がおこると、応力径路は変相角に浴ぐ傾向を示し、間げき
 水圧が増圧する。この応力径路の傾きを M' ($= \sigma_{cat}/\sigma_m$) とおくと、 $d\sigma_m = \frac{1}{1+e} d\sigma_{cat} \dots (1)$
 弾性的体積増分を $dE_{kk}^e = \frac{k}{(1+e)\sigma_m} d\sigma_m \dots (2)$ とすれば、(2)式が成立するためには、塑性
 体積増分は $dE_{kk}^s = \frac{1}{1+e} \frac{-k}{\sigma_m} d\sigma_{cat} \dots (3)$ となる。ここに、 k : 膨潤線の傾き、 e : 間げき比で
 ある。(ii) (i)以外のときは、西原⁵⁾による次式をそのまま用いる。

$$dE_{ij} = \frac{1}{2G} d\sigma_{ij} + \frac{k}{(1+e)\sigma_m} \frac{1}{3} \sigma_{ij} \cdot d\sigma_m + \frac{h_s}{3\sigma_m} \left\{ \left(M_m - \frac{\sigma_{cat}}{\sigma_m} \right) \sigma_{ij} + \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{cat}} \right\} d\left(\frac{\sigma_{cat}}{\sigma_m}\right) + \frac{h_c}{3} \sigma_{ij} d\sigma_m \dots (4)$$

$$h_s = \frac{3\sigma_m}{2G} \left\{ \frac{M_m}{1+e} - \frac{\sigma_{cat}}{\sigma_m} \right\}^2, \quad h_c = \frac{1-k}{1+e} \frac{1}{\sigma_m} \quad h_s, h_c \text{ は硬化パラメータ, } M_m \text{ は破壊時の有効応力比}$$

(iii) $(\sigma_{cat}/\sigma_m) \geq M_f$, $\sigma_m \leq 0.05 \sigma_{m(c)}$ 又は $|E_{12}| \geq 0.05$ のときは破壊としてとりあつかい、バイリニヤ型
 の応力~ひずみ関係とした。 $|\sigma'_{12}| < \sigma'_{12y}$; $\sigma'_{12} = 2G E_{12}$, $|\sigma'_{12}| \geq \sigma'_{12y}$; $\sigma'_{12} = 2\bar{G} E_{12} \dots (5)$
 ここで $\sigma'_{12y} = 0.05 \text{ kg/cm}^2$, $\bar{G} = 5 \text{ kg/cm}^2$ とした。

地盤の応力状態と運動方程式

水平に堆積した砂地盤は、異方(k_0)圧密状態にあると仮定し、中間主応力については、
 $\sigma_2 = \sigma_3$ とする。また深さ方向には拘束がないため全応力 σ_r を一定とする。

飽和土の運動方程式は、近似として一次元の波の伝播をとりあつかうので、著者らがすでに
 報告しているものを使う。 $-\partial\sigma'_{12}/\partial x_1 = \rho \partial v_2/\partial t \dots (6)$, $-E_{12} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x_1^2} \dots (7)$ (v_2 : 速度, ρ : 密度, U : 変位)
 質量保存則と運動方程式から、加速度の項を省略して、 $\partial^2 u/\partial x_1^2 = -\frac{\rho}{k} \frac{dE_{kk}}{dt} \dots (8)$

(k : 透水係数) (4)式と(8)式から $\frac{d\sigma_m}{dt} = -\left\{ \frac{k}{\sigma_m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{dE_{kk}}{dt} \right\} \frac{(1+e)\sigma_m}{k} \dots (9)$ 側方変位拘
 束の条件から、 $dE_{22} = dE_{33} = 0 \dots (10)$ したがって、水平垂直応力の変化が、(4)

$$(9),(10) \text{ 式より求まる。 } d\sigma'_1 = -\frac{(1+e)\sigma'_m}{k} \left(\frac{k}{\sigma'_m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} dt + dE_{kk}^s \right) - 4G \left(\frac{1}{3} \frac{k}{\sigma'_m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} dt - dE_{33}^e \right) \dots (11)$$

$$d\sigma'_3 = -\frac{(1+e)\sigma'_m}{k} \left(\frac{k}{\sigma'_m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} dt + dE_{kk}^s \right) + 2G \left(\frac{1}{3} \frac{k}{\sigma'_m} \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} dt - dE_{33}^e \right) \dots (12)$$

(11),(12)式の右辺第二項より、塑性変形が進むにつれて、 σ'_3/σ'_m が1に近づき応力の等方化が
 おこること、さらに透水の効果によって σ'_m , σ'_3 が変化し、結果として全応力が変化す
 ることになる。

3. 数値計算結果と考察

地盤モデルとしては、深さ30mの成層砂地盤を考慮。地下水位は地表から2mの深さとした。

深さ方向に相対密度 D_r の分布を与え、初期のせん断弾性定数は、 $D_r = 0 \sim 100\%$ に對して、 $G = (1 \sim 2) \times 10^5 \times \frac{1}{(1 + e_0)^2}$ (Psf) とするよう補間して求めた。また透水係数の分布は地表での値 k_0 を与え、 $k = C \cdot e^{\lambda(e)}$ と求めた。その他のパラメータは次のようである。 $G_0 = 6.27, K = 0.003, \lambda = 0.0058, G^* = 400, K_0 = 0.5 (= \frac{v_{s(10)}}{v_{s(0)}}), M = 1.279, M_n = 0.5398, M_f = 0.7385, e_{max} = 0.991, e_{min} = 0.634$ とした。外力としては、Taft (1952, SSYE成分)の加速度記録を速度に変換し、それを基盤に入力した。計算法は著者³⁾がすでに報告した差分法であり、差分間隔は、 $\Delta x = 1 \text{ m}, \Delta t = 0.0025 \text{ sec}$ である。

$R_0 = 0.001 \text{ m/sec}$ とした計算例を示す。Fig. 1による3~5秒にかけて、相当な層にわたって液状化している。その影響で地表での速度応答は、Fig. 2にみられるように長周期成分が卓越し、固有周期の大きな建物に對しては危険となるであろうと推測される。Fig. 3, 4で矢印1は有効応力比が $\frac{\sigma'_{v(10)}}{\sigma'_m} = M_n$ になったとき、矢印2は、水平垂直応力が等方向化し、平均有効応力が初期の値の5%になって完全に液状化したときを示す。応力経路が M_n を越えてから、間げき水圧が急激に上昇し、ひずみが増大しせん断応力が低くなり、弱傾向を表わしている。

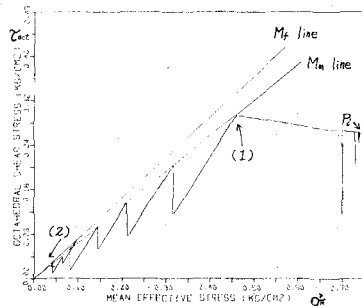


Fig. 4 有効応力経路 (深さ10m)

4. 参考文献

- 1) Finn, W.D., Lee, K.W. & Martin, G.R., J. GED, ASCE, Vol. 103, No. GT6, 1977, pp. 517~533.
- 2) Ghaboussi, J. & S.U. Dikmen, J. GED, ASCE, Vol. 104, No. GT3, 1978, pp. 341~356.
- 3) Goto, H., F. Oka & K. Kawamoto, Proc. 5th Japan Earthquake Eng. Symp. 1978, pp. 630~
- 4) Ishihara, K., F. Tatsuoka & S. Yasuda, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 7, 1975, pp. 29~44.
- 5) 西, 江刺, 電中研報告, No. 37614, 昭和52.
- 6) Seed, H.B. & I.M. Idriss, Proc. ASCE, Vol. SM3, 1967, pp. 83~108.

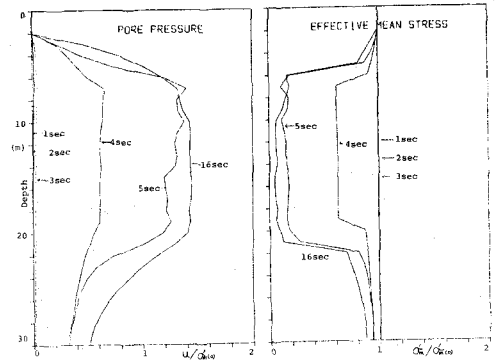


Fig. 1 間げき水圧・平均有効応力の分布 (初期の平均有効応力で正規化)

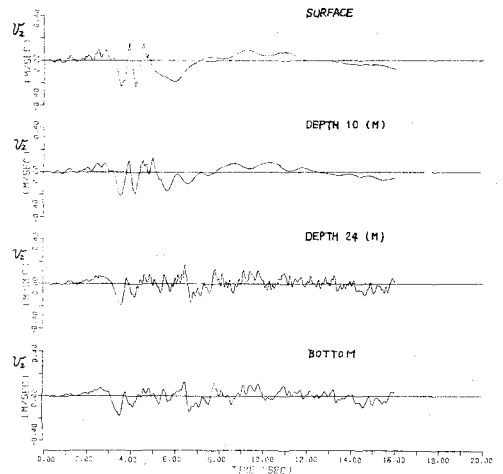


Fig. 2 各深さでのせん断速度応答

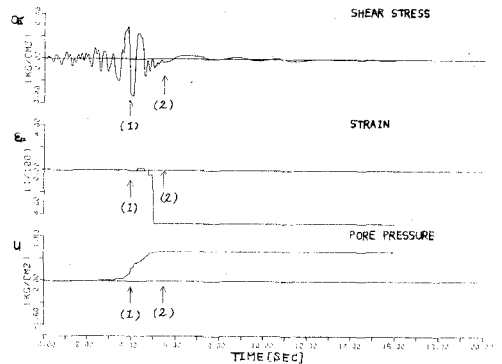


Fig. 3 応力ひずみ・間げき水圧の経時変化 (深さ10m)