

(58) 砂および粘性土よりなる複合地盤の液状化解析

岐阜大学工学部 正員 岡 二三生
 岐阜県 正員 日比 金治
 京都府 正員 藤森 和也

1. まえがき

一般に実際の地盤は、砂や粘土といった単一の土質材料から構成される場合より、粘土と砂等の性質の異なる土から構成される複合地盤である場合が普通である。したがって、地震時における地盤の液状化の予測にあたっては、複合地盤を解析の対象にする必要がある。本研究においては、砂および粘性土の構成式と二相混合体力論を用い、有効応力による液状化解析を行った。方法はすでに筆者の1人がすでに報告しているものであり側方の変形を無視している。解析の結果、粘性土層の存在は間げき水圧の増加を抑制する効果があることが明らかとなった。

2. 砂および粘性土の構成式

砂および過圧密粘土の構成式

砂および過圧密粘土の構成式としては、すでにひずみ速度効果を無視し、弾塑性体として定式化を行っている²⁾。過圧密領域については新たに境界面 $f_b = 0$ を設定し、 $f_b < 0$ である内側を過圧密、外側を正規圧密領域と定義した。(図-1参照)

$$f_b = \bar{n}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{me}) = 0 \quad (1)$$

σ'_m : 平均有効応力 σ'_{me} : 先行圧密圧力 M_m^* : 最大圧縮点での $\sqrt{s_2}/\sigma'_m$ の値

\bar{n}^* は次式より求められる。

$$\bar{n}^* = [(n_{ij}^* - n_{ij}^*(0)) (n_{ij}^* - n_{ij}^*(0))]^{1/2} \quad (2)$$

$$n_{ij}^* = s_{ij} / \sigma'_m \quad (3)$$

s_{ij} は偏差応力テンソルであり、 \bar{n}^* は関口ら³⁾によって導入された相対応力である。 $n_{ij}^*(0)$ は異方圧密後の n_{ij}^* の値である。

ひずみ増分テンソル ds_{ij} は次式で求められる。

$$ds_{ij} = \frac{1}{2G} ds_{ij} + \frac{\kappa}{(1+e)\sigma'_m} d\sigma'_m + A \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} df \quad (4)$$

A: 硬さパラメータ f_p : 塑性ポテンシャル
 f: 降伏関数 κ : 膨潤指数 e: 間げき比 G: せん断

弾性係数 σ'_{ij} : 有効応力テンソル

塑性ポテンシャル f_p は次式で与えられる。

$$f_p = \bar{n}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{m(n)}) = 0 \quad (5)$$

$$\bar{M}^* = - \frac{\bar{n}^*}{\ln(\sigma'_m / \sigma'_{mc})} \quad (6)$$

$$\bar{n}^* = [(n_{ij}^* - n_{ij}^*(n)) (n_{ij}^* - n_{ij}^*(n))]^{1/2} \quad (7)$$

σ'_{mc} は圧密終了後の $\sigma'_m \exp(\eta^* / M_m^*)$ の値である。

ただし、 $\eta^* = \sqrt{s_2} / \sigma'_m$ である。

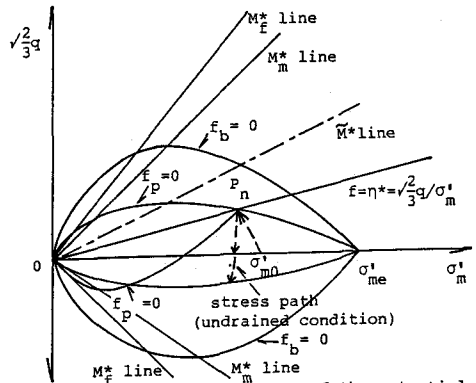


Fig.1 Schematic diagram of the potential surfaces and yield line.

ただし、砂の正規圧密領域においては、 $M^* = M_m^*$ とする。この場合、西らの式⁴⁾に一致する。
 (n) は n 回目の載荷方向の変化時の値であることを示している。

降伏関数は $f = \bar{\gamma}^*$ (9)

一方、硬化則は新たに導入された相対偏差ひずみ $\bar{\gamma}^*$ を用いて次式で与えられる。

相対偏差ひずみ $\bar{\gamma}^* = [(e_{ij} - e_{ij(n)}) (e_{ij} - e_{ij(n)})]^{1/2}$ (10)

硬化則 $\bar{\gamma}^* = \frac{\bar{\eta}^* (M_f^* + \bar{\eta}^* (n))}{G' (M_f^* + \bar{\eta}^* (n)) - \bar{\eta}^*}$ (11)

G' : $\bar{\gamma}^* \sim \bar{\gamma}^*$ 曲線の初期勾配 M_f^* : 破壊時の $\bar{\gamma}^*$ の値

正規圧密粘土の構成式

正規圧密粘土の構成式としては、すでに等方圧密粘土に対して導かれた式⁵⁾に、閉口率³⁾の相対応力比 $\bar{\gamma}^*$ を適用し、異方圧密された粘土に対して適用可能に修正した次式を用いている。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{s}_{ij} + \frac{\kappa}{(1+e)} \frac{\sigma'_m}{\sigma'_m} \frac{1}{3} \dot{\sigma}'_{ij} + \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f_d}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (12)$$

$$\langle \Phi(F) \rangle = M^* \sigma'_m C_2 \exp[m' \ln(\sigma'_m / \sigma'_{me}) + m' \bar{\eta}^* / M^* - m' (1+e) v^P / (\lambda - \kappa)] \quad (F > 0)$$

$$= 0 \quad (F \leq 0) \quad (13)$$

$$F = (f_d - \kappa_s) / \kappa_s \quad (14) \quad (f_d: \text{動的降伏関数}, \kappa_s: \text{硬化パラメータ})$$

静的降伏関数 $f_s = \bar{\eta}^* / M^* + \ln \sigma'_m = \ln \sigma'_{my} \quad (15)$ とおくと, Perzyna の

理論より $f_d = \bar{\eta}^* / M^* + \ln \sigma'_m \quad (16)$ となる。

$\lambda; e \sim \ln \sigma'_m$ 線の圧密時の傾き M^* : Critical state⁷⁾の σ'_2 / σ'_m の値

C_2, m' ; 粘塑性パラメータ $m' = \frac{\lambda - \kappa}{(1+e)\alpha}$, $C_2 = v_{(0)}^{VP} / M^*$

(α : 2次圧密速度, $v_{(0)}^{VP}$: 初期粘塑性ひずみ速度)

3. 液状化解析例

解析に用いた複合地盤モデルを図-2に示す。
 入力としては、基盤において Taft (1952) での記録 S69E 成分の波形 (速度) を 0.1 倍したもの ($Amp = 0.1$) と 0.5 倍したものを用いている。

解析に用いたパラメータは以下のとおりである。

砂

$M_m^* = 1.11$, $M_f^* = 1.28$, k : (地表近くの透水係数) $= 10^{-3}$ (m/sec), $\kappa = 0.003$, $\lambda = 0.0098$

$G' = 1000$, $e_{min} = 0.991$, $e_{max} = 0.634$

透水係数は $k = C \times \frac{e^3}{1+e}$ と計算している。

初期せん断弾性係数 $G_{(0)} = 1.0 \times 10^5 \times 0.11^{1/2}$

($D_r = 0\%$) $G_{(0)} = 2 \times 10^5 \times 0.11^{1/2}$ ($D_r = 100\%$) とし

G は $\sqrt{\sigma'_m}$ に比例するとしている。他のパラメータは表-1に示されている。

粘性土

$M_m^* = 1.28$, $M_f^* = 1.28$, $M^* = 1.28$, M_m^* , M_f^* は過圧密粘土についてのパラメータである。

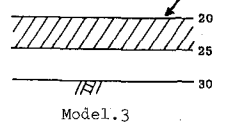
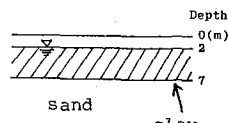
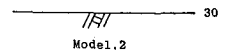
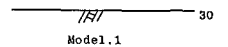
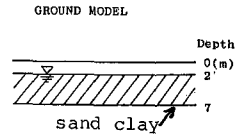
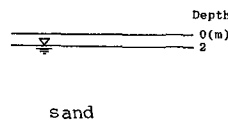


Fig.2

$K = 0.0087, \lambda = 0.091, R = 10^9 \text{ m/sec}$

$G' = 1000,$

$G(\omega) = 0.5 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2 \quad 0 \sim 9 \text{ m の深さ}$

$G(\omega) = 0.6 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2 \quad 10 \sim 19 \text{ m}$

$G(\omega) = 0.7 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2 \quad 20 \sim 30 \text{ m}$

とシ、砂にくらべて小さな値とした。

$m' = 28.0, C_2 = 2.0 \times 10^7 (\text{1/sec})$

基礎

基礎は弾性体と考へ、柴田⁽¹⁾と同様の手法

を用いた。 $C_B = (\sqrt{G_B/\rho_B}) = 600 \text{ m/sec}$

(せん断波速度), $\rho_B = 234 \text{ kg sec}^2/\text{m}^4$ (質量)

とした。

他に異方圧縮比 $K_0 = 0.5$ で、液状化の判定はすでに報告した例と同様である。

Table 1

Depth (m)	D _r (%)	e	σ (kg/cm ²)	k (m/sec)	σ ₁ (kg/cm ²)	σ ₃ (kg/cm ²)	σ _v (kg/cm ²)
0	45	0.830	0.518	1.000	0.0	0.0	0.0
1	45	0.830	0.518	1.000	0.181	0.086	0.127
2	44	0.834	0.516	1.010	0.362	0.181	0.255
3	44	0.834	0.516	1.010	0.473	0.237	0.316
4	42	0.841	0.725	1.030	0.564	0.282	0.378
5	43	0.835	0.755	1.040	0.655	0.372	0.437
6	39	0.852	0.778	1.070	0.745	0.372	0.497
7	43	0.837	0.832	1.020	0.836	0.418	0.557
8	46	0.827	0.879	0.968	0.927	0.464	0.618
9	50	0.812	0.932	0.848	1.020	0.509	0.678
10	57	0.788	1.000	0.874	1.110	0.556	0.741
11	64	0.769	1.080	0.804	1.210	0.603	0.804
12	69	0.745	1.140	0.757	1.300	0.650	0.867
13	71	0.738	1.180	0.738	1.400	0.698	0.931
14	73	0.730	1.220	0.720	1.490	0.747	0.995
15	75	0.722	1.260	0.702	1.580	0.795	1.060
16	77	0.716	1.300	0.684	1.680	0.843	1.120
17	78	0.713	1.330	0.675	1.780	0.892	1.180
18	80	0.705	1.370	0.658	1.880	0.941	1.250
19	81	0.702	1.400	0.649	1.980	0.990	1.320
20	82	0.698	1.430	0.641	2.080	1.040	1.390
21	83	0.695	1.460	0.632	2.180	1.090	1.450
22	84	0.691	1.490	0.624	2.280	1.140	1.520
23	85	0.688	1.520	0.616	2.370	1.190	1.580
24	86	0.684	1.550	0.607	2.470	1.240	1.650
25	87	0.680	1.580	0.599	2.570	1.290	1.720
26	88	0.677	1.610	0.591	2.670	1.340	1.780
27	89	0.673	1.640	0.583	2.770	1.390	1.850
28	90	0.670	1.670	0.575	2.870	1.440	1.910
29	91	0.666	1.700	0.567	2.970	1.490	1.980
30	92	0.663	1.720	0.558	3.070	1.540	2.050

DISTRIBUTIONS OF PORE PRESSURE AND EFFECTIVE MEAN STRESS NORMALIZED BY INITIAL MEAN STRESS

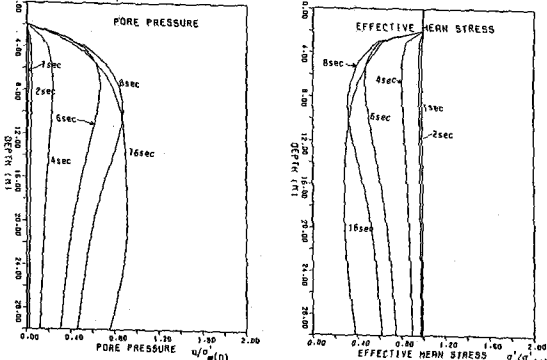


Fig.3 (Model-1) Amp=0.1

DISTRIBUTIONS OF PORE PRESSURE AND EFFECTIVE MEAN STRESS NORMALIZED BY INITIAL MEAN STRESS

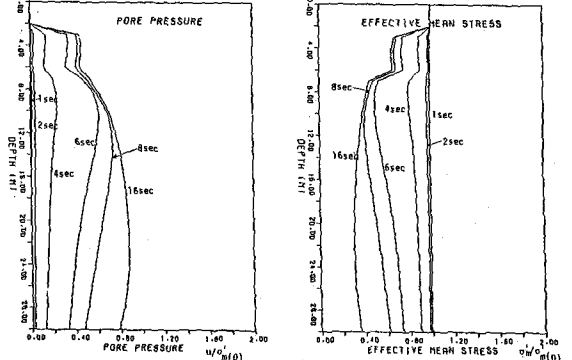


Fig.4 (Model-2) Amp=0.1

DISTRIBUTIONS OF PORE PRESSURE AND EFFECTIVE MEAN STRESS NORMALIZED BY INITIAL MEAN STRESS

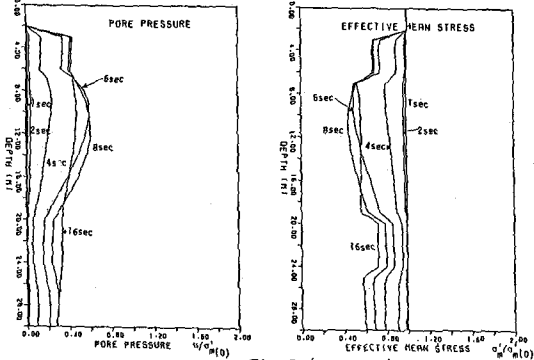


Fig.5 (Model-3) Amp=0.1

DISTRIBUTIONS OF PORE PRESSURE AND EFFECTIVE MEAN STRESS NORMALIZED BY INITIAL MEAN STRESS

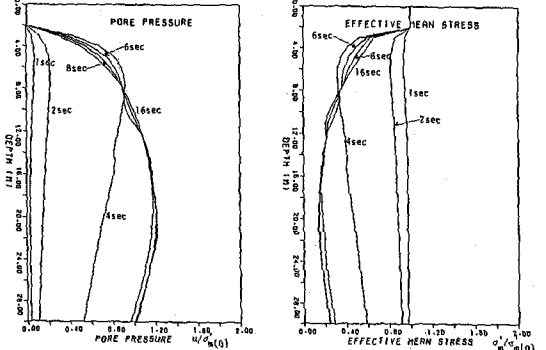


Fig.6 (Model-1) Amp=0.5

DISTRIBUTIONS OF PORE PRESSURE
AND EFFECTIVE MEAN STRESS
NORMALIZED BY INITIAL MEAN STRESS

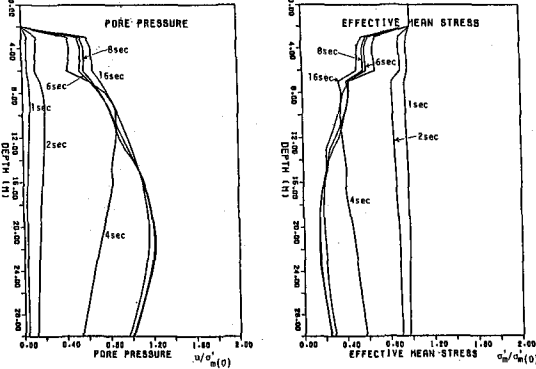


Fig.7 (Model-2) Amp=0.5

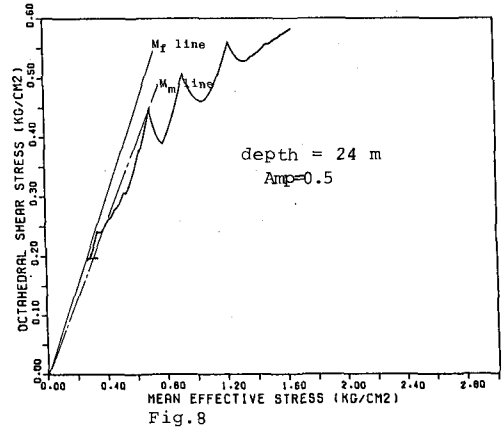


Fig.8

用いたパラメータで注意したいのは、砂では透水係数が大きく、 K が小さいことである。このような点に注意して解析結果を見れば、以下のような傾向が明らかとなった。上部に粘土層の存在する図-4 (Model-2) と図-3 (Model-1) を比較すると図-4では上部での間げき水圧の増加が抑制されている。これは、上部浸透流が粘土層により断されたため、および K が粘性土で大きいため発生する間げき水圧が減少したためと考えられる。図-5 (Model-3) は上部及び下部に粘土層が存在する場合である。この場合は間げき水圧の分布、平均有効応力の分布ともに均一でフラットな分布となっている。また、図-4にくらべ間げき水圧の増加は少ない。

図-6 は Model-1 で Amp=0.5、図-7 は Model-2 で Amp=0.5 の場合である。入力の増大により、発生する間げき水圧は大きいが分布傾向は Amp=0.1 の場合と同様である。図-2~図-7 から判断すると、 K が大きく且つ小さい粘土層の存在は全体の間げき水圧の上昇をおさえる効果がある。図-8 は図-6 に対応する場合の深さ 24m での応力経路である。 G' 、 M_m^* 、 M_f^* については砂と粘土で同じ値としたが、実際には異なると考えられるため、今後はより実際的なパラメータの決定を行うことが必要となる。

粘性土においては過圧密領域においても時間効果（すみり速度効果）は無視しえない、今後はこの点を考慮した構成式の定式化がパラメータの決定法とともに重要な課題と考えられる。

4. 謝辞 本研究を行うにあたり御指導いただいた京大後藤尚男教授、亀田引行助教授、杉戸真太郎先生に感謝いたします。なお本研究は昭和55年度科学研究費、試験研究(4) (No. 485022) 代表京大教授後藤尚男、および奨励研究(A) No. 575306 の補助を受けて行ったものであることを付記する。

5. 参考文献

- 1) Oka, F. & T. Murase (1981), Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engng. and Soil Dynamics, Vol.1, pp.151-154., St. Louis
- 2) Oka, F. & H. Washizu (1981), Proc. of Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engng. and Soil Dynamics, St. Louis, Vol.1, pp.71-74.
- 3) Sekiguchi, H. & H. Ohta (1977), Proc. of Speciality Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp.229-238.
- 4) Nishi, K. & Y. Esashi (1978), Proc. JSCE, No.280, pp.111-122.
- 5) Oka, F. (1981), Proc. of 10th ICSMFE, Stockholm
- 6) 柴田 佐藤 小坂, 第14回土質工学研究発表会 発表講演集, 1979, pp.1313~1316