

液状化の数値実験について

京都大学工学部 正員 岡三三生  
 鹿島建設K.K. 正員 河本克正  
 京都大学工学部 正員 後藤尚男

1. まえがき

地震時の土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<sup>1)</sup>以来、Finn<sup>2)</sup>、Liou, C.P.<sup>3)</sup>らによって種々の研究がなされてきた。しかし、液状化自体の明確な力学的構造の把握はなされていないのが現状であろう。本報告においては、液状化を土が破壊に到る過程と粒子間力の変化による土の構成関係の変化の2つに分けてとらえ、透水による間げき水圧の消散を考慮した数値解析について述べる。砂の構成関係としては、Non-Associate Flow Rule<sup>4)</sup>を用いた提案しているものを使い、解析は一次元問題を取扱った。

2. 飽和した地盤中の応力状態と運動方程式

地盤のモデルとしては、水平K堆積している成層地盤を考える。この時、初期応力状態はK-圧密状態にあるとする。 $\sigma'_{11(0)} = \sigma'_{11(0)}$ ,  $\sigma'_{22(0)} = K_0 \cdot \sigma'_{11(0)}$ ,  $\sigma'_{33(0)} = K_0 \cdot \sigma'_{11(0)}$  (1)

ここで、 $\sigma'_i$ : 有効応力テンソル, (0): 初期状態を表す 初期状態からの変化としては、発生する間げき水圧分だけ有効応力が変化すると考え、本来考慮すべき全応力の変化についてはここではとりあげない。次に、運動方程式は圧縮を正として $x_2$ 方向の運動を考えると、ひずみと変位の関係式および運動方程式は(2)と(3)で表わされる。

$$\rho \frac{\partial v_2}{\partial t} = -(\frac{\partial \sigma'_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma'_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma'_3}{\partial x_3}) \quad (2), \quad -\epsilon_{12} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}) \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ は土の湿潤密度、 $u_i$ は変位ベクトルの成分であり、 $v_2^f = v_2^s$ と見て $x_2$ 方向の水と固相の間のDarcy型の相互作用は考えていない。(2),(3)は $x_1$ 方向の一次元問題として近似すると、

$$\rho \frac{\partial v_2}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma'_2}{\partial x_2} \quad (2'), \quad -\epsilon_{12} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \quad (3')$$

3. 砂の応力-ひずみ関係

地盤の最上部には弾性層があるとして、ここでは、 $\sigma'_2 = 2G\epsilon_{12}$  ( $\epsilon_{12} = 0$ ) (4)

これより下の砂層においては、西の式を用いている。ただし、破壊条件として $\tau_{act}/\sigma'_m = M_m$ を用いた。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} d\sigma_{ij} + \frac{K}{(1+e)\sigma'_m} d\sigma'_m + \frac{h_s}{2\sigma'_m} \left\{ (M_m - \frac{\tau_{act}}{\sigma'_m}) \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{\tau_{act}} \right\} d(\frac{\tau_{act}}{\sigma'_m}) + h_c \frac{S_{ij}}{\sigma'_m} d\sigma'_m \quad (5)$$

$h_s, h_c$ はそれぞれせん断および圧密降伏に関する硬化関数にそれぞれ決まる。

4. 砂地盤の液状化解析

Darcy則を満足する水の運動を支配する方程式は、一次元K近似して、 $\frac{\partial u_2}{\partial x_1} = -\frac{\rho g}{R} \frac{d\epsilon_{12}}{dt}$  (6)

$u$ : 間げき水圧,  $R$ : 透水係数  $\rho g$ : 水の単位体積重量。(5)と(6)より、

$$\frac{1}{\rho g} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x_1} = -\frac{1}{R} \left\{ \frac{K}{(1+e)} \frac{1}{\sigma'_m} \frac{d\sigma'_m}{dt} + \frac{\lambda-K}{(1+e)\sigma'_m} \frac{d\sigma'_m}{dt} + \frac{d\epsilon_{12}}{dt} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $d\epsilon_{12}$ はダルトンシーにおけるひずみ増分である。また、 $h_c = (\lambda-K)/\sigma'_m(1+e)$ と置く。解析中、全応力の変化がないと仮定すると、 $\sigma'_m = \text{一定}$ と例、 $d\sigma'_m = -du$ が得られる。したがって(7)式より、

$$\frac{1}{\rho g} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} = \frac{1}{R} \cdot \frac{K}{(1+e)} \frac{1}{\sigma'_m} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{R} \left\{ \frac{\lambda-K}{(1+e)} \frac{1}{\sigma'_m} \frac{d\sigma'_m}{dt} + \frac{d\epsilon_{12}}{dt} \right\} \quad (8)$$

(2'), (3'), (4), (5)および(8)式を連立して解くことにより、応力波の伝播と間げき水圧の消散を同時に解析した。解析法は特性曲線法を使った差分法であり、本質的にC.P. Liou<sup>3)</sup>のものと同様である。

数値計算結果と考察

液状化の判定基準としては、一般に有効拘束圧がない状態とされている。ここでは土が破壊状態に近づく、構成関係が変化するものと考え、最大圧縮点においてせん断弾性係数  $G$  が初期の5% になると仮定して計算を行った。この仮定によって、液状化の起っている点では、せん断応力が伝播しにくくなる現象を表現できる。地盤定数およびパラメータは表-1に示してある。入力としては深さ60mにおいて速度波形を与えた。

H	G	$\rho$
0	441	195
4	480	198
8	522	201
12	581	204
16	610	204
20	639	204
60	639	204

Table 1

H : depth(m)  
 G : shear modulus  
 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\rho$  : density(kg sec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)  
 $\kappa = 0.0028, \lambda = 0.0058$   
 $M_f = 0.958, M_m = 0.619$   
 $G' = 333, k = 10^{-4}(\text{m/sec})$   
 $K_0 = 0.5$

$$v_{x60} = 0.1 \times \sin(2\pi f t) \times \sin\left(\frac{1}{20} \cdot 2\pi x\right) (\text{m/sec})$$

$f = 2 \text{ cps}$  で  $\Delta x = 4 \text{ m}$   $\Delta t = 0.015 \text{ sec}$  で計算を行った結果が図-1~4である。この場合には、 $t = 2.8 \text{ sec}$  12mの深さで破壊が生じた。図-1より破壊が生じた後、速度波形は大幅に変化している。この傾向は図-2の応力波形の傾向に一致しており、破壊後応力は伝播されにくくなっている。この解析では、破壊後に急速に間げき水圧が増加する傾向については考慮していないので、図-3にみられるように、間げき水圧の増加とともに土が破壊し、以後透水によって間げき水圧が減少している。図-4は応力-ひずみ曲線である。矢印は破壊点を示している。破壊にいたるまでに塑性変形によってエネルギーが消散している。弾性地盤の場合と比較すると、12mにおけるせん断応力の最大値は、液状化を考慮した場合(図-2)の1.74倍の応力が「弾性解析」で求められている。

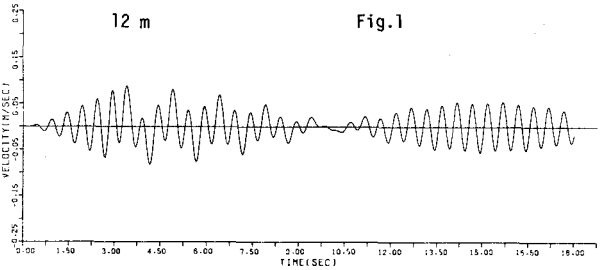


Fig. 1

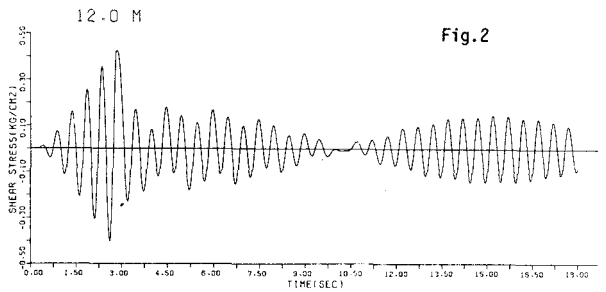


Fig. 2

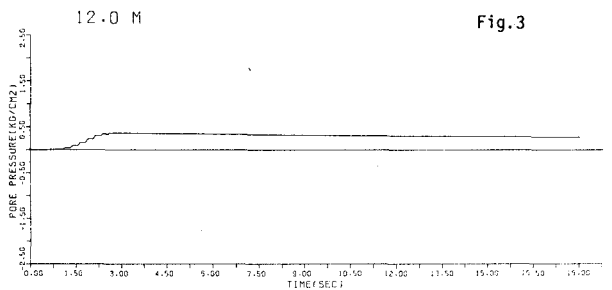


Fig. 3

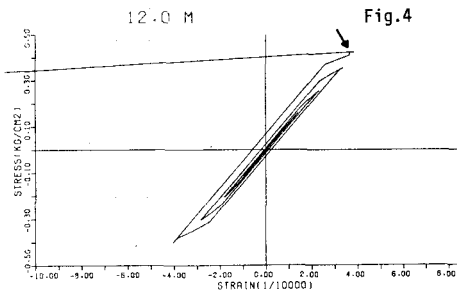


Fig. 4

6. あとがき 砂の構成関係について助言いただいた電研所の西好一氏に感謝いたします。

7. 参考文献 1) Seed, H.B. & Lee, K.L. : J. Soil Mech. Found. Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6, Proc. Paper 4972, 1966, pp. 105-134  
 2) Finn, W.D.L., K.W. Lee & G.R. Martin : J. Geoth. Engrg. Division, ASCE, Vol. 103, No. GT6, 1977, pp. 517-533. 3) Liou, C.P., V.L. Stroeter & F.E. Richard Jr. : J. Geoth. Engrg. Division, ASCE, Vol. 103, No. GT6, 1977, pp. 589-606. 4) 西好一, 江利靖行 : 軟弱地盤における基礎の支持力と変形(その1), 電力中央研究所研究報告 No. 2760/4, 1977.