

地盤変化部における液状化特性の解析

東北大学工学部 学生員○瀧浦 猛朗  
 同上 正員 佐武 正雄  
 同上 正員 岸野 佑次

1. はじめに 水平方向に地盤構造が変化する不均一な地盤においては、均一な成層地盤とは異なる地震時挙動を示すものと考えられる。例えば、日本海中部地震などにおいて見られたように、地盤の液状化による被害の多くが地盤急変部の近傍で発生した。そこで著者らは、特に傾斜基盤を有する砂地盤の液状化特性を明かにする目的で、FEMによる排水を考慮した二次元液状化解析を行なった。以下にその概要と考察について述べる。

2. 解析方法 解析においては、土粒子と水の二相系の方程式を2つの仮定、(1) 水と土粒子骨格との相対的な速度及び加速度の項は無視、(2) 水及び土粒子は非圧縮性の下に簡略化した次の2式を基本方程式とし、地盤変位及び間隙水圧を未知量として解いた。

$$\sigma'_{ij,j} - p_{,i} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$-p_{,i} + \rho_f b_{i,f} = -\rho_f g/k \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma'_{ij}$ :有効応力  $\rho_f$ :液体の密度  $\rho$ :固液混合層の密度  
 $\ddot{u}_i$ :土粒子骨格の加速度  $b_i$ :物体力  $\varepsilon_{ij}$ :ひずみ  
 $p$ :間隙水圧  $k$ :地盤の透水係数

また、土の構成式は次のように表わされる弾塑性モデルを仮定した。降伏関数  $f$  及び塑性ポテンシャル  $g$  は次のとおりである。

(1) 破壊線に至るまでの載荷時

$$f_1 = J_2 + \beta I_1^2 + \gamma_1 I_1 = 0 \quad (3)$$

$$g_1 = \sqrt{J_2} / I_1 - M \ln |I_1 / I_0| = 0 \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_1 = \psi_1 \sigma_{11} \varepsilon_{11}^{(p)} / 3 + \psi_2 S_{11} \varepsilon_{11}^{(p)} \quad (5)$$

(2) 変相線を越えた後の除荷時、再載荷時

$$f_2 = J_2 + \beta I_1^2 + \gamma_2 I_1 = 0 \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \psi_3 \sigma_{11} \varepsilon_{11}^{(p)} / 3 \quad (8)$$

$$g_2 = I_1 + \gamma_3 = 0 \quad (7)$$

ここに、 $J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}$   $I_1 = \sigma_{11}$   $\beta, M, \psi_1, \psi_2, \psi_3$ :材料定数  
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, I_0$ :硬化パラメーター  $S_{ij}$ :偏差応力

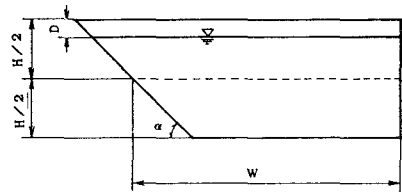
$\sigma_{ij}$ :全応力  $\varepsilon_{ij}^{(p)}$ :塑性ひずみ速度

また、破壊線を越えた後は、載荷時は(3)式において $\psi_1, \psi_2$ の値を変えたもの、除荷時には(6)式を用いた。解析には三角形定ひずみ要素による有限要素法を用い、さらにニューマークの $\beta$ 法により逐次計算を行なった。地盤モデルは新潟地盤を用い、土質諸定数はSeedらによるものを参考にした。また地盤の透水係数 $k$ は間隙比によって変化し、地表での値を $k = 10^{-4}$ とした。対象としたモデルは図-1に示す4種類である。境界条件は、基盤と接する部分で相対変位をゼロ、間隙水圧は地下水面以浅でゼロとし、右側方には粘性境界を導入した。表-1に解析に用いた定数を示す。

3. 結果及び考察 図-1に地震波入力後2.6秒における各モデルの破壊状況を示す。各モデルとも破壊領域は傾斜基盤の近傍で浅い部分に集中していることがわかる。砂層の深い部分では上載土圧が大きく、変形が拘束されるため破壊には至らないものと考えられる。個々のモデルを比較すると、モデルIVでは他のモデルより破壊領域が小さくなっている。さらにモデルIの破壊領域は他のモデルに比べやや基盤から離れていることがわかる。また破壊領域は、傾斜角

表-1 解析に用いた定数

土粒子の密度	2.65
最大間隙比	0.99
最小間隙比	0.61
ポアソン比	0.45
初期状態のKの値	0.5
$\beta$ (降伏関数の材料定数)	0.133
M (塑性ポテンシャルの材料定数)	0.288
$\psi$ (硬化パラメータの材料定数)	98.9
$\psi$ ( 同 破壊後)	0.0
$\psi$ (硬化パラメータの材料定数)	21.7
$\psi$ ( 同 破壊後)	8.7
$\psi$ (硬化パラメータの材料定数)	-558.6



H=30m W=100m D=3m  
 $\alpha=30$  (モデルI)  $\alpha=45$  (モデルII)  
 $\alpha=60$  (モデルIII)  $\alpha=90$  (モデルIV)

図-1 解析モデル

が大きい場合は基盤の前方に広がり、傾斜角が小さい場合は基盤上部に広がるということが出来る。図-2にモデルI~モデルIVの深さ7m(地下水面から4m)における傾斜基盤の過剰間隙水圧の蓄積状況を1秒後、2秒後、3秒後、4秒後について示す。図は各時間までの最大値である。各モデル共1秒後、2秒後までは基盤から遠ざかるにしたがって間隙水圧は減少している。しかしながら2秒後から3秒後の変化を見ると、基盤からやや離れた位置での蓄積量が大きく、間隙水圧の高い部分が基盤の右方に広がっていることがわかる。水平方向加速度の応答を見ると、どのモデルにおいてもおおよそ2秒過ぎから3秒までのあいだに振幅が急激に大きくなっており、間隙水圧の蓄積状況と対応していると考えられる。

一方、地表面における水平方向変位の最大値は基盤から離れるにしたがって大きな値を示している。それに対して鉛直方向変位は傾斜基盤近傍でいったんピークを向かえた後に減少していく。図-3は、この様子をモデルIVについて示したものである。鉛直方向変位のピークは基盤傾斜角が急な程明瞭で、基盤に近い位置にあり、基盤傾斜角が小さい程基盤から離れ、かつ緩やかになっている。図-1に示した地盤の破壊状況を見ると、地盤の破壊している位置は、ほぼこの鉛直方向変位がピークを示す位置を中心広がっていることがわかる。さらに基盤から離れると、水平方向変位は増加し、鉛直方向変位は減少するが、ここでは地盤は破壊に至っていない。このことより水平方向のせん断に加えて鉛直方向のせん断を受けた場合に破壊が進行しやすいことが予想される。

**4. おわりに** 以上で傾斜基盤を有する砂地盤の液化化特性を調べる目的で行なった解析の結果とその考察について述べた。今後、実地盤との対応などにより液化化の詳細な検討を進めたいと考えている。

**参考文献** 1)O.C.Zienkiewicz and P/Bettes:Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads(ed.G.N.Pande et al),John Wily&Sons,1982 2)H.Hirai and M.Satake:LIQUEFACTION ANALYSIS OF SAND DIPOSITIS BY AN ELASTIC-PLASTIC CONSTITUTIVE MODEL,Proc. of JSCE No.352/3-2 Dec.1984 3)Seed,H.B. and Idriss,I.M.:Analysis of soil liquefaction:Niigata erthquake,Proc.ASCE,vol.1.93,NoSM3 4)Lysmer,J. and Kuhlemeyer,R.L.:Finite Dinamic Model for l finite Media,J.Eng.Mech.Div.ASCE,pp.859-877,August 1969.

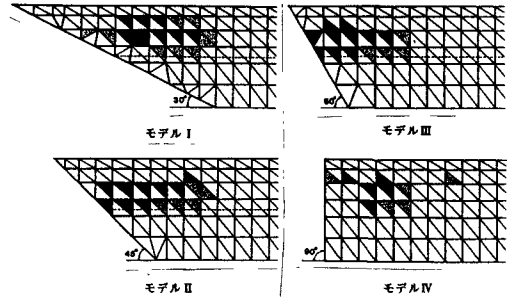


図-2 2.6秒後における破壊状況

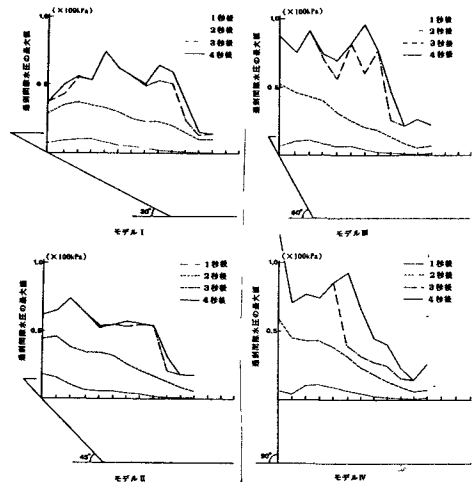


図-3 過剰間隙水圧の蓄積状況

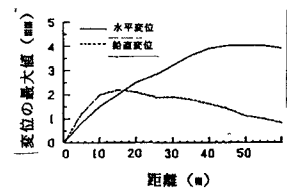


図-4 地表面の変位の最大値