

地盤の液状化に及ぼす基盤傾斜の影響

東北大学工学部 学生員 倉田 学
 同上 学生員 滝浦 猛朗
 同上 正員 岸野 佑次

1. はじめに

近年、地震に伴う液状化による実際の被害に関して、不整形地盤の基盤急変部付近に液状化の発生がより多く見られることが報告されている。著者らは、特に、基盤の傾斜が液状化に及ぼす影響について調べるために、有限要素法を用いて2次元液状化解析を行なった。本文は、この解析について結果とその考察と記したものである。

2. 解析方法

地震応答解析においては、比較的速い現象を扱うことから、水と土粒子間格との相対的な運動を無視できるものと仮定し、次の2式を基本方程式¹⁾として、解析を行なった。

$$\sigma'_{ij} = (\rho - \rho_f)(\ddot{u}_i - g_i) \quad [1] \quad \varepsilon_{ij} + nP/K_f = 0 \quad [2]$$

ここに、 σ'_{ij} :有効応力 ρ :固液混合相の密度 ρ_f :液体の密度 \ddot{u}_i :土粒子間格の加速度

g_i :重力加速度 ε_{ij} :ひずみ n :間隙率 P :間隙水圧 K_f :水の圧縮係数

また、土の構成則として、次のような降伏関数と塑性ポテンシャルから成る弾塑性モデルを仮定した²⁾。

(1)破壊線に至るまでの載荷時

$$f_1 = J_2 + \beta I_1^2 + \alpha I_1 = 0 \quad [3] \quad g_1 = \sqrt{J_2}/I_1 - M \ln|I_1/I_0| = 0 \quad [4] \quad \dot{\varepsilon}_{ij} = \psi_1 \sigma'_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}/3 + \psi_2 S_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} \quad [5]$$

(2)変相線を超えた後の除荷時、再載荷時

$$f_2 = J_2 + \beta I_1^2 + \alpha_2 I_1 = 0 \quad [6] \quad g_2 = I_1 + \delta_3 = 0 \quad [7] \quad \dot{\varepsilon}_{ij} = \psi_3 \sigma'_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}/3 \quad [8]$$

ここに、 $J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$, $I_1 = \sigma'_{ii}$, $\beta, M, \psi_1, \psi_2, \psi_3$:材料定数

$\alpha, \alpha_2, \delta_3, I_0$:硬化パラメータ, S_{ij} :偏差応力

σ'_{ij} :全応力, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}$:塑性ひずみ速度

なお、破壊線を超えた後も、除荷時にはせん断弾性係数を $1/10$ にして、弾性的な解析を行なった。実際の解析手法としては、三角形ひずみ要素による有限要素法を用い、さらに、ニューマ-7の β 法により逐次計算を行なった。解析に用いた主な定数の値は表1に示す通りである。また、工質諸定数は、Seedらによるもの³⁾を参考にしており、それによるせん断弾性係数は次式で与えられ、相対密度により補間して求めた。

$$G(\alpha_r=0\%) = 4.79 \times 10^3 \times (\sigma'_{v2}/\sigma'_{v0}) \times 20.9^{1/2} kPa, \quad G(\alpha_r=100\%) = 2 \times G(\alpha_r=0\%)$$

基盤(底部及び傾斜部)における入力加速度として、エルセントロ波を用い、最大片振幅30Galに整形した水平動を入力した。ここでは、図1に示すような基盤傾斜角度 30° (モデルI)と 60° (モデルII)の2つの地盤モデルについて解析を行ない、比較を試みた。どちらのモデルにおいても、表層地盤は50mとし、地下水位は6mの位置に設定した。また、モデルI, IIの表層地盤はそれぞれ、282要素、270要素に分割して解析を行なった。なお、境界条件は表層が基盤に接する部分で変位ベクトルが0とした。

3. 結果及び考察

解析開始後一定時間後において、液状化が発生した要素の分布

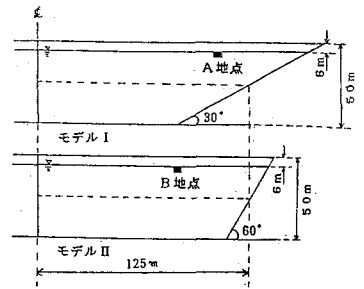


図1 解析モデル

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
ホアソン比	0.45
初期状態のKの値	0.5
β (降伏関数の材料定数)	0.0133
M (塑性ポテンシャルの材料定数)	0.228
K (水の圧縮係数)	2.08×10^4 $\times 9.8 \text{ kPa}$
ψ_1 (硬化パラメータの材料定数)	86.9
ψ_2 (硬化パラメータの材料定数)	21.7
ψ_3 (硬化パラメータの材料定数)	-555.6

している領域を図2に示した。同図に示されるように、モデルI、モデルIIのどちらにおいても、初期の液状化は、地表近傍でかつ、基礎形状が急変する付近に発生し、以後、液状化の領域は中央に向かって広がっている。しかし、一定時刻において両者を比較した場合、モデルIIの地盤の方が、モデルIの地盤よりも地表境界に近い位置まで液状化が進んでいる。これは、モデルIの地盤のように表層地盤の層厚の小さな部分をより多く含む場合には、地盤の応答の増幅が抑えられる傾向にあるためと考えられる。また、モデルIIの地盤では、モデルIの地盤よりも深い位置まで早く液状化が進んでいることが認められる。

図1に示すように、モデルI、モデルIIについて、それぞれ側方基礎からの地下水面上における水平距離が等しくなる地点A、Bをとり、これらの地点における過剰間隙水圧、せん断歪及び有効応力経路の比較を行った。図3に、過剰間隙水圧-時間関係を示す。モデルIIの方は、液状化が始まる2秒あたりから、間隙水圧の上昇が認められ、それ以後も振動しながらではあるが、間隙水圧が蓄積され、上昇している。一方、モデルIの方は、モデルIIより、立ちあがり遅く、その後の上昇も顕著には現れない。これは、図4の有効応力経路を見てもわかるように、モデルIIにおいてはB地点が地盤の破壊に至っているのに対し、モデルIのA地点は破壊以前であることを対応している。図5に、せん断歪-時間関係を示す。地盤の破壊に至っているモデルIIの方はモデルIに比して、かなり大きな歪が生じていることがわかる。また、両者とも、せん断歪が負の方向に偏っているが、特にモデルIIの場合、顕著である。これは、側方基礎による拘束の度合に関係があるものと考えられる。

4. おわりに

以上、傾斜基礎を有する地盤モデルについて行った液状化解析について述べた。2種類の基礎傾斜角の場合について比較した結果、傾斜角の大きい地盤の方が、液状化が発生しやすく、その範囲も広いことがわかった。また、液状化は、傾斜角に拘らず、基礎形状の急変する地点の地表近傍で起りやすいということは、一般的に言えるのではないと思われる。

参考文献

- 1) O.C. Zienkiewicz and P. Bettex: Soil Mechanics-Transient and Cyclic Load, (ed. G.N. Pande et al), John Wiley & Sons (1982), 1-9
- 2) H. Hirai and M. Satake: Liquefaction Analysis of Sand Deposits by an Elastic-Plastic Constitutive Model, Proc. JSCE, 352, II-2 (1984) 187-196
- 3) Seed, H. B and Idriss, I. M.: Analysis of Soil Liquefaction: Niigata earthquake, Proc. ASCE, 93, SM3 (1967) 83-108

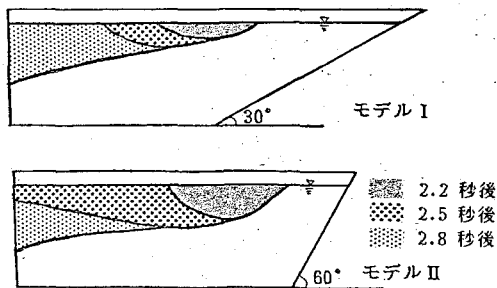


図2 液状化した位置

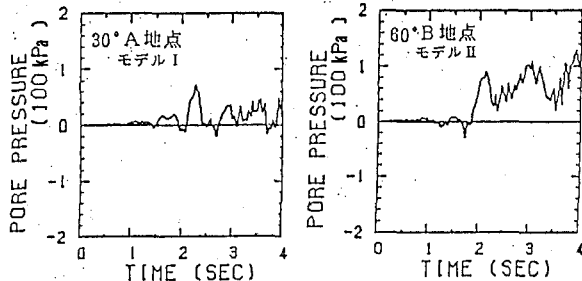


図3 過剰間隙水圧-時間 関係

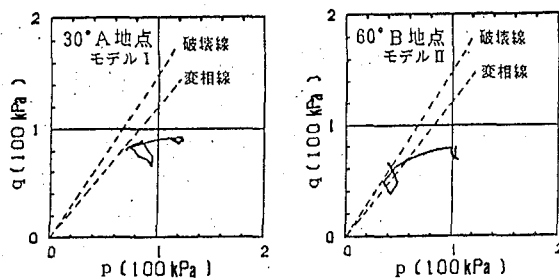


図4 有効応力経路

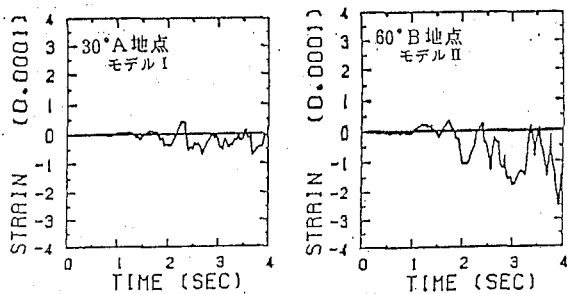


図5 歪-時間 関係