

(68) 液状化に伴う地盤の永久変位の大変形解析

佐藤工業(株) 吉田 望

1 はじめに 浜田等¹⁾によって液状化によって広範囲にわたり大きな地盤の永久変形が生じることが示されて以来、この様な大変形を予測するための試みが行われつつある²⁾。ところで、永久変位を決める大きな要因としては地震動の特性と有効応力の減少に伴う初期応力の解放が考えられる。前者が卓越しているとすれば永久変位の向きは領域全体について同じようになるはずであるが、実際の地震被害を見ると永久変位の向きは周辺の地形と密接に関係しているようである³⁾。すなわち、地震動は地盤に液状化を生じさせるという意味では影響力があるがその後の永久変形の大きさを決めるのはむしろ地形的な要因と考えられる。この様な大変形の問題を解析するのに動的応答解析を用いた場合には得られた結果が地震動によるものか地形的な要因によるものかを判断することは難しい。そこで、動的解析を補完する意味で地形的な要因による永久変位を求める解析を試みた。

2 解析方法 地震動の影響を除去するために、本解析では次のような仮定を設ける。

① 地震の作用時には非排水条件が成立する。

② 有効応力の低減は各要素で比例的に生じる。すなわち、各要素の有効応力の初期有効拘束圧 σ_{m0}' に対する減少量 $d\sigma_m'$ は、載荷条件を表す比例定数 λ ($\lambda=0\sim 1$)を介し $d\sigma_m' = \lambda \cdot k \sigma_{m0}'$ で予測できる。ここで、 k は各要素の最大の有効拘束圧の低減量を表す係数で、 $0\sim 1$ の範囲で各要素毎に異なる値を取る。 λ は $k=1$ の時には物理的には有効拘束圧の低減率である。

液状化の問題であるから、土と水の2相系材料を考える。基礎式は以下の通りである。

$$\text{有効応力の定義} \quad \{\sigma\} = \{\sigma'\} + \{m\} p \quad (1)$$

$\{\sigma\}$: 応力ベクトル、 $\{\sigma'\}$: 有効応力ベクトル、 p : 間隙水圧

$\{m\}^T = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}$: Kroneckerの δ に対応するベクトル

$$\text{土骨格の構成則} \quad \{d\sigma'\} = [D] (\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^d\}) \quad (2)$$

$\{\varepsilon\}$: 全ひずみ、 $[D]$: 接線剛性マトリックス、

$\{\varepsilon^d\}$: ダイレーションによる体積ひずみ ε_{vd} の成分

$$\text{非排水条件下の水の質量保存則} \quad \{m\}^T \{\varepsilon\} - n p / K_w = 0 \quad (3)$$

n : 間隙率、 K_w : 水の体積弾性係数

地震時には非排水条件が成立しているとしているので、式(1)~(3)より間隙水圧と有効応力を消去すると、非排水条件下における応力-ひずみ関係式として次式が得られる。

$$\{d\sigma\} = [D] (\{d\varepsilon\} - \{m^d\} d\varepsilon_{vd}) + \{m\} K_w \{m\}^T \{d\varepsilon\} / n \quad (4)$$

ここで、 $\{m^d\}$ は ε_{vd} の配分比を決めるベクトルである。Zienkiewicz等は $\{m^d\} = \{m\}/3$ としている⁴⁾が、この様に体積ひずみを等方的に配分すると有効応力の減少が等方的に起こることになり実状と合わない。 $\{m^d\}$ は境界条件にも依存することは明かであるので、ここでは地震前の状態で各要素ごとに単位の間隙水圧を発生させその時生じるその要素の垂直ひずみの比を体積ひずみの配分率とした。

式(4)よりFEMの定式化を行うと解くべき方程式が求まる。変位が拘束されている境界を持つ場合には過剰間隙水圧の発生により全応力も変化する。全応力の変化量は過剰間隙水圧の発生量の関数でもあるから、仮定②で載荷条件として与えた λ より ε_{vd} を陽に求めることはできない。そこで、各載荷ステップの計算では有効応力が等方的に減少するとして仮定②を満たすための過剰間隙水圧増分を求め、これを体積弾性係数で割り $d\varepsilon_{vd}$ を求めることにする。したがって各荷重ステップにおける有効応力状態は仮定②で示されるものとは厳密には異なっているが、荷重増分を小さくすることでその差を小さくできる。以上の式は3次元でも成立するが、以下の計算は2次元平面ひずみ条件下で行った。

式(2)の接線剛性マトリックスは、体積弾性係数を有効応力の関数とし、せん断応力-せん断ひずみ関係を双曲線モデルで表すことにより求める。本解析では有効応力はほとんど0まで減少する。そのため微小変形理論に基づく場合、変位は無限に大きくなる。すなわち、妥当な解を得るためには変形後の釣合条件を満たす必要がある。そこで、本解析では移動座標を用いた有限変形理論を用いて定式化を行う。

3 計算例および考察 図-1に解析を行った地盤およびFEMモデルを示す。地盤は2層地盤で、表層地盤(図の斜線部)はN値3程度で平均層厚10mの砂層とし、この層を液状化層(仮定②の $k=1$)とする。下方地盤はN値10程度で平均層厚3.5mの砂層としこの層では間隙水圧の発生はない($k=0$)とした。解析範囲は水平方向には100mで、側方では水平方向の変位は拘束されているとした。パラメトリックスタディを行う場合には、平均層厚を変えないようにして図で l_1 、 l_2 、 m_1 、 m_2 で示した4つの量を変えることにより地表面の傾き(θ)、液状化層下面の傾き(ϕ)を制御する。基準モデルは地表面の傾きが1%、液状化層下面の傾きが3%とし、これを基準として表-1に示す地表面勾配や液状化層下面勾配を変え、計7つのケースについて計算を行った。

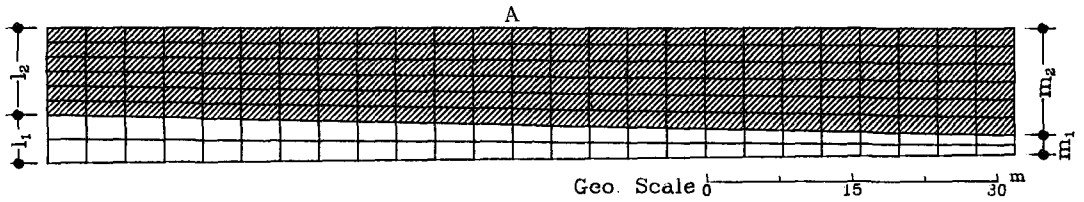


図-1 解析した地盤とFEMモデル

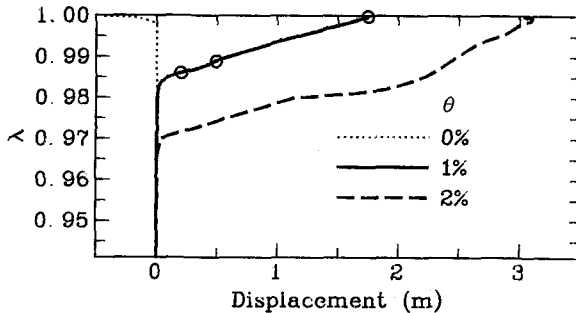


図-2 地表面の傾きによる水平変位への影響

表-1 解析ケース

l_1	l_2	m_1	m_2	θ	ϕ
5.0	9.0	2.0	11.0	0.01	0.03
5.0	8.5	2.0	11.5	0.0	0.03
5.0	9.5	2.0	10.5	0.02	0.03
4.5	9.5	2.5	10.5	0.01	0.02
4.0	10.0	3.0	10.0	0.01	0.01
3.5	10.5	3.5	9.5	0.01	0.0
3.0	11.0	4.0	9.0	0.01	-0.01

まず基準のケースである $\theta=0.01$ 、 $\phi=0.03$ の挙動を見てみる。図-2に実線で地表中央(図-1のA点)の水平変位を、図-3に図-2で○で示した状態の変位図を示す。解析は $\lambda=0.9998$ (有効拘束圧が初期値の0.02%)まで行っている。図-2では水平変位は λ が0.98(有効拘束圧が初期値の0.2%)を越える頃より大きくなりはじめ、有効応力の減少と共に直線的に増加して行き、解析終了時には約1.75mとなる。次に図-3で変位の現れ方を見ると、水平変位は最初中央部で大きくなり、次第に側方境界近くまで大きくなるようになる。水平変位が大きくなったところでは鉛直変位も大きくなり、左側の部分は沈下し、右側の部分は浮き上がるので、結果として地表面は次第に水平になって行く。中央部で先に変位が大きくなることについては主として二つの原因が考えられる。一つは中央部の方が側方近くに比べて体積変化に対する変位の拘束が小さいので有効応力はより等方的に減少し、したがって側方に比べ早く降伏することである。また、本解析の方法では外力を加えているわけではないので、降伏したからといって変位が大きくなるのではなく、降伏後の有効応力の減少に伴い解放された応力の再配分ができなくなった時点で変形が大きくなるのであるが、中央部の方がこのような状態なりやすいと言うのが二つ目の理由である。なお、変位図は側方付近で形状が乱れていること部分があるが、これは、本解析では非圧縮に近い挙動を解

析するため、4節点アイソパラメトリック要素を次数低減積分しており、そのためいわゆる砂時計モードが現れたためであろう。ただし、地盤中央付近ではこの様な現象は現れておらず、全体としての挙動には余り影響を与えていないと考えられる。なお、これについては今後改良するつもりである。

ここで示した解析では間隙水圧発生に伴う地盤の変形を求めているのみであり、永久変形を求めるには発生した間隙水圧を消散させる必要がある。これについては仮定②と同様の発想に基づき、間隙水圧の消散も比例的に起きるとした簡易圧密解析を行ったが、この過程で生じる地盤の水平変位は間隙水圧発生次の変位と比べるとわずかであり、本解析結果を永久変形と考えてもよい。

地表面の傾きが永久変位に与える影響について調べてみる。基準モデルでは地表の傾きは1%としたが、さらに、地表が水平の場合と傾きが2%の場合の計算を行った。図-2に解析結果をそれぞれ実線および破線で示す。地表面が水平の場合には変位はほとんど現れないが、解析の最後近くになって負の変位が生じるようになる。最終状態では水平変位は約45cmで、おもに最上層のせん断変形によるものである。一方地表面勾配が2%の場合には基準モデルと比べて、変位が大きくなり始める λ の値は小さく、変位の増加は大きい。しかし、変位が大きくなり始めると変位が全体として直線的に増加するという傾向は同じである。以上の結果より地表面の傾きが大きくなるほど変位は早く大きくなり、また、変位の大きさも大きくなるということが言える。この様な定性的な傾向は、変位の主な原因が初期応力の解放にあることから当然と言えるが、定量的な考察ができるのが本解析の特徴である。

次に液状化層下面の傾きが永久変位に与える影響について調べる。図-4は地表面の傾きを基準モデルと同じ1%にしたままで液状化層下面の傾きを基準モデルの3%から-1%まで変化させたときの地表中央(図-1のA点)の水平変位である。図よりまず地盤の変位が大きくなり始める λ の値は液状化層下面の傾きによらずにほぼ同じであることがわかる。その後の変位は、液状化層の傾きが小さくなるほど大きくなって行き、液状化層下面の傾きが地表の傾きと反対の場合が一番大きくなっている。なお、 $\phi = 2\%$ の場合には途中で変位の増加率が小さくなり、最終変位は基準モデルより小さくなっている。ところで、この様な傾向は、常識的な考察とは反対の傾向のように考えられる。そこで $\phi = 1\%$ 、 -1% の時の最終変形を図-5に示す。図-3と比べると、液状化層下面の傾きが小さいほど液状化層全体にわたってせん

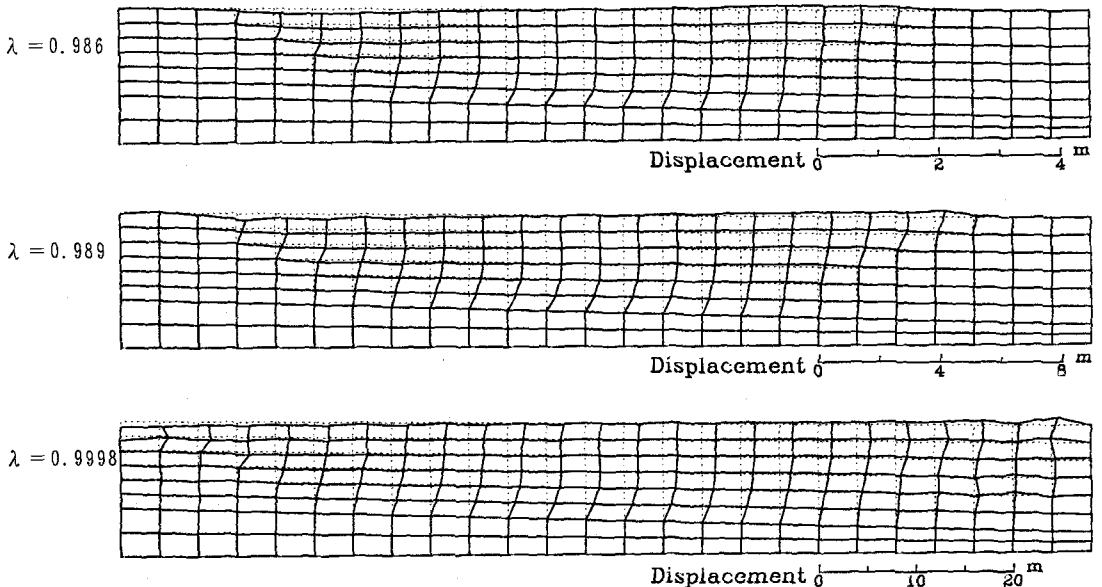


図-3 地盤変位の例(基準モデル)

断変形が生じていることがわかり、これが変位が大きくなった理由であると考えられる。この事はモデル形状によって変位の生じる時期に差があることを示唆しており、先に述べた液状化層下面の傾きが小さいほど水平変位が大きいという結果はより有効応力が減少した場合にも成立するという保証はない。

最後に、メッシュ分割の影響について調べる。基準モデルは鉛直方向については等間隔となるようにメッシュを作成したものであるが、この分割をほんのわずかだけ変え、地表面近くの層厚を薄くした解析を行った。図-6に基準モデルとの比較を示す。図のように、ほんの少しの違いが解析結果に与える影響は大きい。

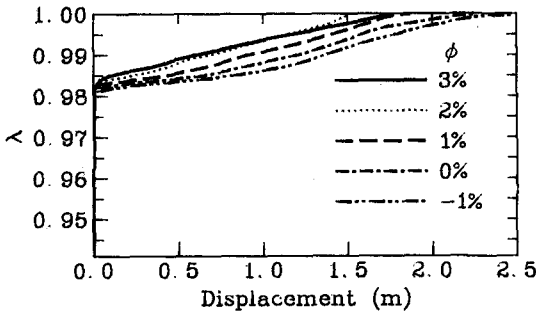


図-4 液状化層下面の影響

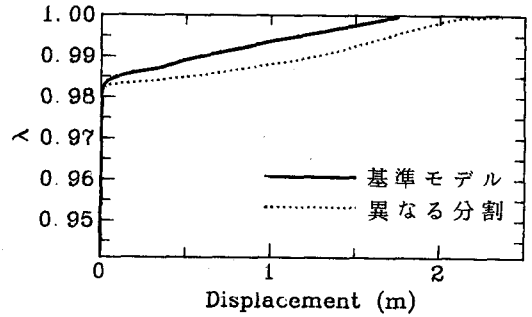


図-6 メッシュ分割の影響

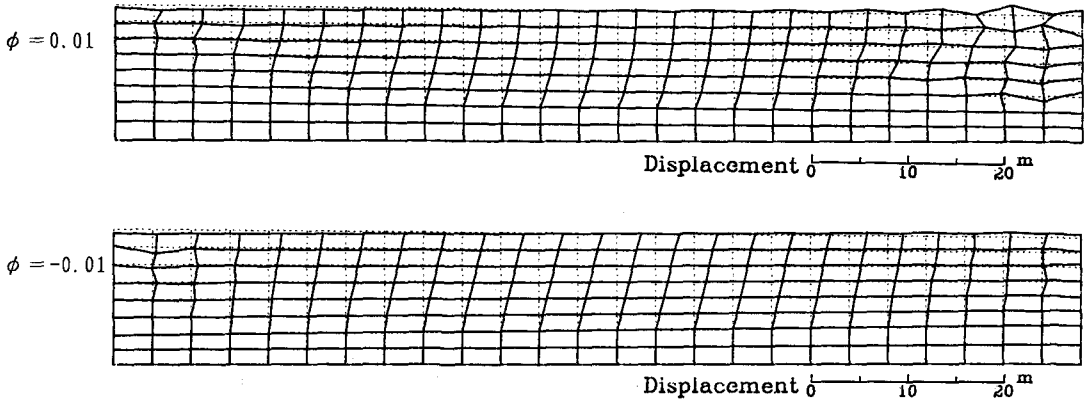


図-5 液状化層下面の傾きが異なる場合の最終状態の変位図

4 おわりに 液状化による地盤の永久変形を求めるための解析を行った。解析の結果、地盤の変位が大きくなるのは有効拘束圧が初期値の数%以下になってからであることがわかった。このような状態では応答はかなり不安定であり、少しの変化が結果に影響を及ぼす。このような点についてはさらに研究を進めたい。

参考文献 1) 浜田政則、安田進、磯山龍二、恵本克利、液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、第376号/Ⅲ-6、pp. 211-220、1986年12月 2) 例えば、Yoshida, N., Numerical Analysis on Liquefaction-Induced Ground Displacement, Abstract, First Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, Nov. 1988 3) 例えば、地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究委員会、第1分科会資料 4) Zienkiewicz, O.C. et al, Liquefaction and Permanent Deformation under Dynamic Conditions-Numerical Solution and Constitutive Relations, Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, Zienkiewicz, O.C. and Pande, G.N. ed., John Wiley and Sons, 1982