

PSⅢ-17 液状化に伴う地盤の永久変形に関する解析 -その2-

佐藤工業(株) 正会員 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⁾。永久変位を決める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地形的な要因と考えられる。ここでは、この様な変形を求めるための解析方法について報告する。

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応力 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 ($\lambda=0\sim1$)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、 $0\sim1$ の範囲で各要素毎に異なる値を取る。

③ 過剰間隙水圧の消散も、各要素で比例的に生じる。

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、

$\{\varepsilon^d\}$: ダイレタンシーによる体積ひずみ 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。次に地震後の過剰間隙水圧消散過程では、仮定③を用いれば、時間の要因が入らず、水に関する条件も不用となる。また、体積ひずみの変化はない。したがって、応力-ひずみ関係は次式となる。

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\} + \{m\}dp \quad (5)$$

式(4)、(5)よりFEMの定式化を行うと解くべき方程式が求まる。地震時には $d\varepsilon_{vd}$ を与えれば応答が求まるので、仮定②を満たす $d\varepsilon_{vd}$ をイタレーションにより求める。地震後は、地震終了時の過剰間隙水圧 p_{max} に対する過剰間隙水圧の変化量 dp を載荷条件を表す比例定数 λ ($\lambda=0\sim1$)を用い、 $dp = -\lambda p_{max}$ と与え、間隙水圧を消散させる。

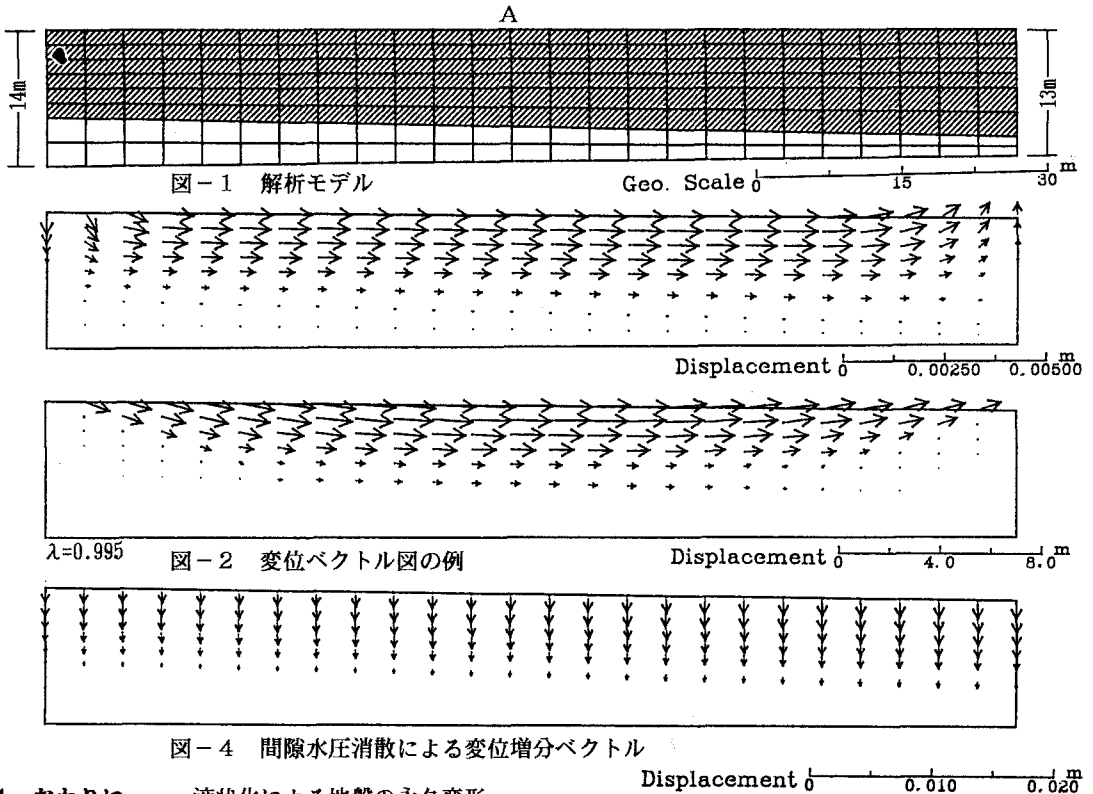
式(2)の接線剛性マトリックスは、体積弾性係数を有効応力の関数とし、せん断応力-せん断ひずみ関係を双曲線モデルで表すことにより求める。なお、本解析では大変形を簡易的に考慮できる定式化として、移動座標系を用いた定式化を行っている。

3 計算例 図-1に解析を行った地盤およびFEMモデルを示す。解析範囲は水平方向に100m、鉛直方向に約14mの範囲で、地表面の傾きは1/100、両端の水平変位は拘束されている。地表部(図の斜線部)は

N値3程度砂層を想定し、これを液状化層とした。この層では仮定②の k の値は1である。この層の下にN値10程度の層を考え、この層では過剰間隙水圧は発生しないととした。液状化層下面の傾きは3/100である。

図-2に変位ベクトルの計算例、図-3に地表中央部（図-1のA点）の水平変位の変化を示す。地盤の変位の増加ははじめはゆっくりであるが、有効拘束圧が初期有効拘束圧の2%より小さくなると急激に大きくなり出す。また、変位が大きくなると有限変形の効果が現れ変位は有限値に収束して行く。

図-4は地表中央の水平変位が約1.5mとなった時点（残留有効拘束圧0.8%）で地震が終わったとし過剰間隙水圧を消散させたときの地震終了時からの変位の変化量である。過剰間隙水圧の発生によって生じた水平変位は過剰間隙水圧の消散過程ではほとんど減少せず、残留変形として残る。鉛直変位は過剰間隙水圧の消散過程で0.156cmでやはり小さい。すなわち、間隙水圧が最大の時の変位がほぼ永久変位である



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。得られた結果は定性的には実際の地震被害と対応しているように見える。今後実際の地震被害に適用していきたいと考えている。最後に、解析に用いたFEMモデルを提供していただいた九州工業大学・安田進氏に感謝します。

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、1996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

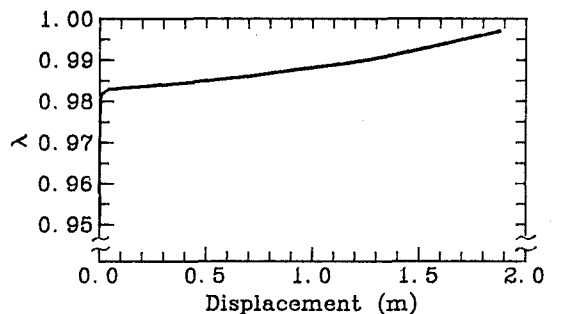


図-3 地表変位の増加量