

# 粘塑性有限要素法による液状化時の 地盤の側方流動シミュレーション

小宮一仁<sup>1</sup>・渡邊勉<sup>2</sup>・清水英治<sup>2</sup>・○中村智則<sup>3</sup>

<sup>1</sup>工博 千葉工業大学助教授 工学部土木工学科(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

<sup>2</sup>工博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

<sup>3</sup>千葉工業大学工学部土木工学科 4年生(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

In this study, a fluid of ground due to the liquifaction are modelled using the finite element method. The flow of a liquid ground is simulated using the visco-plastic flow analyzing technique which is integrated into the elasto-plastic dynamic finite element analysis. The proposed modelling technique is applied to simulate a fluid of ground liquifacted and is applied to estimate the residual displacement of ground due to the liquifaction.

*Key Words : fluid of ground, liquifaction, finite element method, residual displacement, Earthquake*

## 1. まえがき

新潟地震によって多大な被害が報告されて以来、地震時の液状化に伴う地盤の側方流動が注目されている。側方流動による変位は、地盤の土質特性はもちろん、地震の規模や地層構成あるいは地盤の幾何学的境界条件の影響を受けるため、その最終変位量を予測するのは困難である。しかしながら、コンピューターおよび数値解析法の進歩により、近年ではかなり複雑な境界条件を有する力学的問題の多くが、数値解析的に評価できるようになっている。

液状化に伴う地盤の側方流動の数値解析的な評価が困難な要因のひとつに、液状化発生後の地盤の挙動を合理的に表すモデルが完成されていないことがあげられる。そこで本報告では、液状化後の地盤の挙動を粘塑性流動と仮定し、一般化 Bingham 流動則を構成則に用いた粘塑性流動解析を、従来用いられている弾塑性動的過渡応答解析に組み込むことによって、液状化に伴う地盤の側方流動の数値解析を試みた。

## 2. 解析の概要

本研究の有限要素法解析は、通常の弾塑性動的過渡応答有限要素法解析と粘塑性流動有限要素法解析を組み合わせたものである。解析フローは次のとおりである。まず、一般的に用いられている陽的弾塑性動的過渡応答有限要素法解析によって各要素の応力を計算する。本解析では、液状化時の側方流動を計算するために、構成則には Mohr-Coulomb の破壊規準を用いる。要素の応力状態が、Mohr-Coulomb の破壊規準に達しない場合は、要素には弾性変形が生じるとして、自重を考慮した動的過渡応答有限要素法解析によって各節点の変位を計算する。一般的な弾塑性解析では、要素の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した場合は、破壊規準を降伏曲面として弾塑性節点変位を計算する。しかしながら、本解析では要素の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した時点で地盤は破壊したとし、破壊後の地盤の変位挙動を決定する手段として粘塑性流動有限要素法解析を用いた。粘塑性流動有限要素法解析では、まず

破壊規準に達した時点の要素の弾性応力を一時的な超過応力と見なし、超過応力から得られた要素のストレッチングを Hohenemser と Prager<sup>1)</sup> によって提案された次式の一般化 Bingham 流動則で計算した。

$$2\eta v_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F \cdot S_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $\eta$  は塑性粘度、 $v_{ij}$  はストレッチング、 $S_{ij}$  は偏差応力テンソル、 $\tau_y$  は降伏規準（ここでは Mohr-Coulomb の破壊基準値を用いる）、 $J_2$  は偏差応力テンソルの第2不変量、 $F$  は次式で表される降伏関数である。

$$F = 1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J_2}} \quad (2)$$

次に(1)式で求まる要素のストレッチングに弾性剛性マトリクスを乗じて計算される応力を生じさせるのに必要な節点力を積分により逆算し、この節点力を用いて弾性計算を行って要素の変形を決定した。

### 3. 液状化地盤の粘性係数 $\eta$ の決定

液状化地盤の粘性係数 $\eta$ の決定のためには様々な方法が提案されているが、ここでは以下に示すような方法<sup>2)</sup>で粘性係数 $\eta$ を決定した。

Skempton ら<sup>3)</sup>は実験的研究により液性限界の含水比を有する土の非排水せん断強さが土の種類によらず 1.0kPa 程度であるとした。そこで、液体のような挙動を示す液状化地盤の非排水せん断強さが、土の液性限界における非排水せん断強さ 1.0kPa よりも小さいと仮定して、実験室で作製した土について以下に示すような実験を実施し、非排水せん断強さと粘性係数 $\eta$ との関係を調べた。

実験は図-1 に示す装置を用いて、鉄球を粘土試料内に釣り下げた後土試料を一定速度で下方に変位させ、鉄球に作用する抵抗力を測定する方法で行った。土試料にはカオリン粘土とベントナイト粘土を乾燥質量比 7:3 で配合して、含水比を変えて非排水せん断強さを調整したものである。なお土試料のせん断強さは、鉄球引き上げ実験を行った後、モールド内で室内ペーンせん断試験で求めた。鉄球の抵抗力は、荷重計の読みが一定の値となった時の値より求めた。

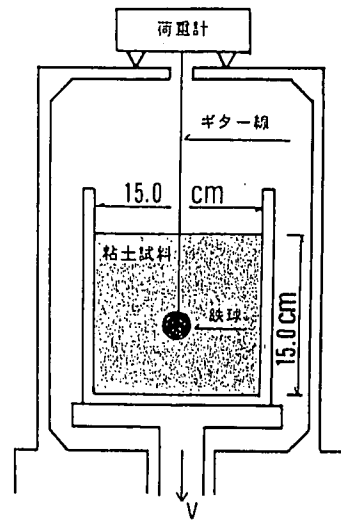


図-1 球引き上げ実験装置

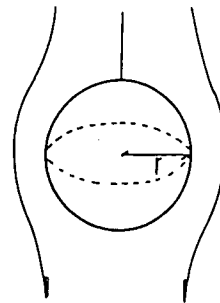


図-2 球のまわりの流れ

粘性係数 $\eta$ に関しては Bingham 流体と Newton 流体とは同様に考えてよいので、ここでは構成則として Newton の粘性の法則を考える。すなわち、せん断力 $\tau$ とせん断ひずみ速度の比例則として、

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

と関係づけられる。ここで $\eta$ 粘性係数である。流体中を小さい速度 $v$ で運動する半径 $r$ 球を考えると(図-2 参照)、球の表面のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は、

$$\dot{\gamma} = \frac{3v}{2r} \quad (4)$$

であるので、流体が Newton の粘性の法則に従えば球の表面に作用するせん断応力 $\tau$ は、

$$\tau = \eta \cdot \frac{3v}{2r} \quad (5)$$

となる。

球に作用する抵抗力 $F$ は、(5)式に球の全表面積 $S(S=4\pi r^2)$ を乗じて、

$$F = \tau \cdot S = \eta \cdot \frac{3v}{2r} \cdot 4\pi r^2 \quad (6)$$

(6)式を整理して、Stokesの法則として知らず式が導かれる。

$$F = 6\pi\eta r v \quad (7)$$

(7)式から、

$$\eta = \frac{F}{6\pi r v} \quad (8)$$

となり、球の受ける抵抗力  $F$  を測定することによって粘性係数を求めることができる。

ここでは含水比を調整して非排水せん断強度を離れた数種類の粘土について鉄球引き上げ実験<sup>4)</sup>を実施した。実験は球の半径  $r$  が 1.508cm と 1.270cm の 2 通りの場合について、また球の半径が 1.270cm については、球の運動速度  $v$  が  $1.67E-5m/s$  と  $8.33E-6m/s$  の 2 通りの場合について実施した。図-3 は実験によって得られた結果を式(4)と(8)を用いて整理した非排水せん断強度  $c$  と粘性係数  $\eta$  の関係を示したものである。図から粘土の非排水せん断強度が 1.0kPa 程度より小さい粘土の流動特性は Bingham 流体として近似してよいことがわかり、非排水せん断強度  $c$  と粘性係数  $\eta$  の換算式を求めると次式のようにになった。

$$\eta = 1680 \cdot c \quad (kPa \cdot sec) \quad (9)$$

本研究では液状化地盤の非排水せん断強度が液性限界の  $c=1.0kPa$  に等しい場合について次章の解析を行う。

#### 4. 地震時の液状化に伴う地盤の側方流動の粘塑性有限要素法解析

ここでは、2. に示した粘塑性有限要素法を用いて、地震時の地盤の液状化に伴う平面ひずみ側方流動のシミュレーションを行う。図-4 に解析モデル(初期状態)、また表-1 に入力パラメータを示す。ここでは、長さ 100m、厚さ 10m の 1/100 傾斜の斜面を考える。液状化層は地表面から 5.0m~9.0m の 4.0m の範囲(図-4 の点線部分)にあり、その他の地盤は非液状化層とした。振動加速度は図-4 に示すモデルの下端の節点に水平方向に 50 秒間作用させた。入力加速度波は、最大加速度  $4.9 m/s^2$ 、周波数 4.0Hz

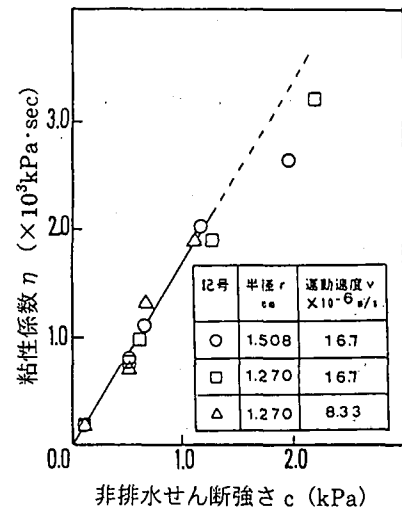


図-3 非排水せん断強度と粘性係数の関係

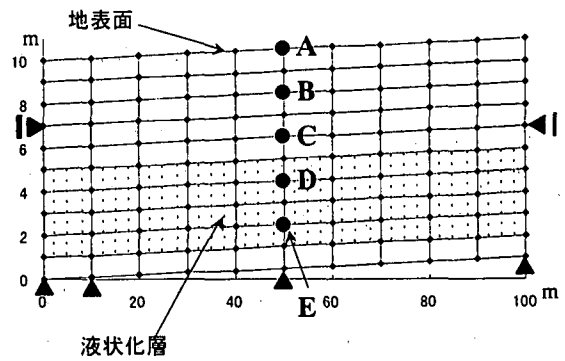


図-4 斜面解析モデル

表-1 入力パラメータ

##### (弾塑性計算)

弾性係数 $E$	1000.0 kPa
ポアソン比 $\nu$	0.380
地盤の密度 $\rho$	1.50 g/cm <sup>3</sup>
摩擦角 $\phi$	30
粘着力 $c$	1.00 kPa
時間ステップの長さ	0.001 s

##### (粘塑性計算)

弾性係数 $E$	1000.0 kPa
ポアソン比 $\nu$	0.490
粘性係数 $\mu$	1680.0 kPa·s
降伏値 $\tau$	Mori-Coulomb

の水平方向正弦波である。

図-5 は、図-4 に示す A,B,C,D,E 点の側方(水平)方向変位(斜面下方向正)の経時変化を示したものである。A,B,C 点は液状化層上部地盤内にあり、D,E 点は液状化層内にある。図-5 から、加振開始約 30 秒後から地盤が傾斜面下方に側方流動し始めているのがわかる。加振終了後も地盤の側方流動は止まらずさらに大きく

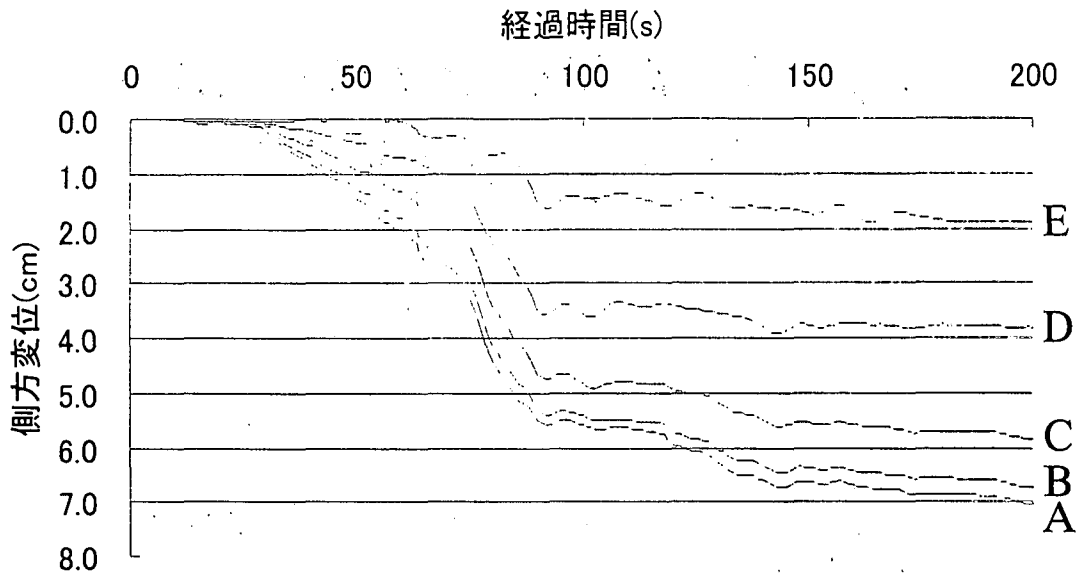


図-5 液状化に伴う地盤の側方変位と経過時間の関係

なり、加振開始約 90 秒後にほぼ収束した。最終的な側方流動変位量は、A 点が約 6.8cm、B 点が約 6.6cm、C 点が約 6cm、D 点が約 4cm、E 点が約 2cm であった。

液状化層内部の D、E の変位量は地表面からの深さの小さい D 点が大きく、これに対し非液状化層内の A、B、C 点には変位量の大きな違いが見られない。これは、液状化によって粘塑性変形に移行した液状化層は大きくせん断変形し、粘塑性変形を伴わない非液状化層は液状化層の変形に身を任せて移動していることを示している。また、地盤の側方流動の経時変化と最終残留変位量の評価ができた。

## 5. まとめ

本研究は、一般的な弾塑性動的過渡応答有限要素法解析法に一般化 Bingham 流動則を用いた粘塑性有限要素法解析法を組み合わせることによって、地震時の液状化に伴う地盤の側方流動の解析を行ったものである。提案した解析法によって、液状化層を有する斜面の解析を行った結果地盤は斜面下方向に移動した。液状化層内部の変位量は地表面に近づくほど大きくなり、これに対し液状化層上部にある非液状化層の変

位量には大きな違いが見られなかった。これは、液状化によって粘塑性変形に移行した液状化層は大きくせん断変形し、粘塑性変形を伴わない非液状化層は液状化層の変形に身を任せて移動していることを示している。また、地盤の側方流動の経時変化と最終残留変位量の評価ができた。

## 参考文献

- 1) Fung, Y.C. 著, 大橋義夫ら訳: 連続体の力学入門, 培風館, p.225-227, 1974
- 2) Akagi, H., Komiya, K.: Earth pressure applied to tunnel due to the settlement of soft clay, 沿岸域の開発における地盤工学的諸問題に関する国際会議論文集, Vol.1, p.153-158, 1991
- 3) Skempton, A.W., Northey, R.D.: The Sensitivity of Clays, *Geotechnique*, vol.3, p.30-53, 1953
- 4) 水口裕之, 安永正三: フレッシュモルタルのレオロジー定数の測定法, セメント技術年報, セメント技術協会, vol. 27, p. 186-191, 1973