

側方流動により地中構造物に作用する流動圧の 数値シミュレーション

渦岡 良介¹・八嶋 厚²・川上哲太郎³

¹正会員 工修 ハザマ 土木本部技術設計部 (〒107 東京都港区北青山2-5-8)

²正会員 工博 岐阜大学 工学部 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³正会員 工博 東海大学 海洋学部 (〒424 静岡県清水市折戸3-20-1)

地盤の液状化に起因する側方流動により地中構造物に作用する流動圧を解析的に検討するため、液状化地盤をBingham流体でモデル化した流体力学に基づく側方流動解析手法の検証を行った。解析には、汎用流体解析コードSTREAMを用いた。検証の対象としたのは、傾斜地盤中の地中壁をモデル化した側方流動実験である。解析の結果、本解析手法は流動圧が最大となる時点、地中壁の幅が流動圧に与える影響、地中壁に作用する流動圧の深度分布などの実験結果を概ね再現することができた。

Key Words : Liquefaction, Lateral Spreading, Viscous Fluid, Numerical Simulation

1. まえがき

過去の被害地震において、液状化による地盤の側方流動は、構造物に様々な被害を与えてきた。兵庫県南部地震では、特に海岸線や河川沿いの水際の橋梁基礎などの構造物が、側方流動による被害を受け¹⁾、側方流動の予測手法、対策工法の開発が急がれている。

筆者らは液状化地盤をBingham流体として扱った側方流動解析手法²⁾を既に提案している。この解析手法を用いて傾斜地盤の側方流動実験の数値シミュレーションを行った結果、液状化地盤の流動速度を再現できることを確認している²⁾。本報では、側方流動地盤中の地中壁を扱った振動台実験結果³⁾をもとに、地中壁に作用する流動圧の数値シミュレーションを実施し、解析手法の適用性や流動圧の特性などを検討する。

2. 解析手法の概要

解析には、汎用流体解析コードであるSTREAM⁴⁾を用いた。本コードの特徴は、以下のとおりである。

・各計算時間ステップにおいて、前ステップの粘性係数を当該ステップのNewton粘性とし(各ステップではNavier-Stokes方程式を扱う)、繰返し計算により非Newton粘性の扱いを可能としている。

・自由表面を表現する手法としてVOF法を用いている。この手法は、計算セル内で液体ならば1、気体ならば0という状態関数を用いて、セル内で液体の占める割合を求めるものである。

STREAMでは、各計算ステップにおいては、Newton粘性を用いており、応力～ひずみ関係は次式で表せる。

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2\eta' e_{ij} \quad (1)$$

ここに、 σ_{ij} : 応力テンソル、 p : 静水圧、 η' : 等価粘性係数、 e_{ij} : 偏差ひずみ速度テンソルである。本解析手法では、降伏強度(残留強度)を有するBinghamモデルを表現するため等価粘性係数を、次式のように表す。

$$\eta' = \eta + \frac{R_p p}{\gamma} \quad (2)$$

ここに、 η : 降伏後の粘性係数、 R_p : 残留強度比である。ここで残留強度は静水圧(液状化地盤の全応力)に比例する形で与えている。また、 γ は偏差ひずみ速度の不変量であり、次式で表せる。

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2} e_{ij} e_{ij}} \quad (3)$$

本解析では、(2)式で示す等価粘性係数を各計算ステップで逐次更新して使用する。

3. 振動台実験の概要³⁾

解析対象とする実験は、振動土槽内の傾斜模型地盤中に土圧計を分布配置した地中壁模型を設置し、加振により地盤を液状化させ側方流動を発生させるものである。

幅500mm（地中壁Ⅰ）および幅250mm（地中壁Ⅱ）の地中壁模型を用いた実験装置の平面図および側面図を図-1に示す。図中の平面図は地中壁ⅠおよびⅡを用いた場合を上下に分割して示している。地中壁は塩化ビニール製である。模型地盤には遠州灘浜砂を使用し、土槽を傾斜させた状態で地盤をボイリングさせ、緩詰め均質な傾斜模型地盤を作成している。地盤の相対密度は50%前後である。また、液状化を発生させるための加振加速度は土槽底部で200gal前後であり、加振は土槽の短辺方向に地盤の表面が水平になるまで継続している。

計測項目は、地中壁に作用する流動圧、地表面変位量、地盤中の過剰間隙水圧などである。地中壁ⅠおよびⅡ上流側の土圧計の配置を図-2に示す。土圧計の深度は地表面傾斜が4%の場合、上段、中段、下段でそれぞれGL-50mm、GL-200mm、GL-350mmとなる。実験の結果の代表例として、地中壁Ⅰの上流側中央列の上段、中段および下段の土圧（流動圧）の時刻歴を図-3に示す。図中の理論液状化線（全応力）は深度と飽和単位体積重量（ 1840kg/m^3 ）の積で算出したものである。いずれの深度でも地盤は加振後約5秒（図-3中の約15秒）で完全液状化に至り、流動し始める。完全液状化の後、数秒間のうちに最大流動圧が発生し、その後は過剰間隙水圧の消散とともに流動圧は徐々に減少している。

実験は地中壁の幅（500mm、250mm）、地表面の傾斜角（4%、2%）、地下水位位置（地中壁上流側GL-6cm、GL-15cm）、非液状化層の有無をパラメータとして数多くのケースが実施されている。本報では図-1に示す地表面傾斜4.0%、地下水位GL-6.0cm（地中壁上流側）、非液状化層なしの条件のもと、地中壁の幅を変えた2つの実験ケースを対象として解析を行う。

なお、その他の実験結果については後述の解析結果との比較の中で述べる。

4. 解析条件

本解析手法では、地盤のパラメータとして降伏後の粘性係数 η および残留強度比 R_f が必要となる。ここでは、解析対象の振動台実験と同様な地盤条件（材料、密度）で行われた側方流動実験の解析²⁾で設定したパラメータを用いた。このパラメータは既往の粘

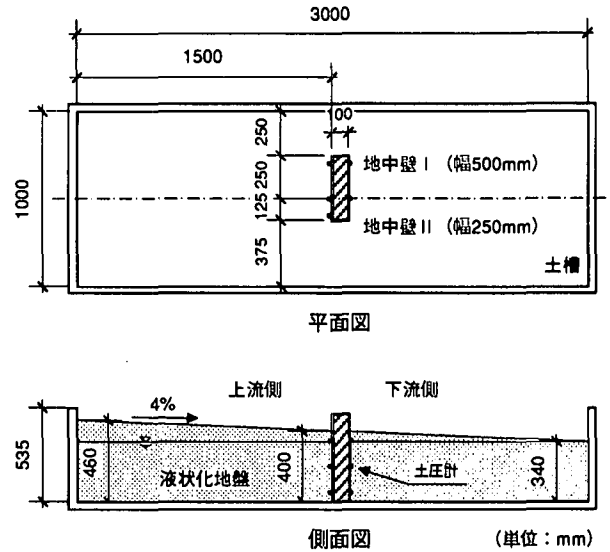


図-1 実験装置の平面図および側面図³⁾

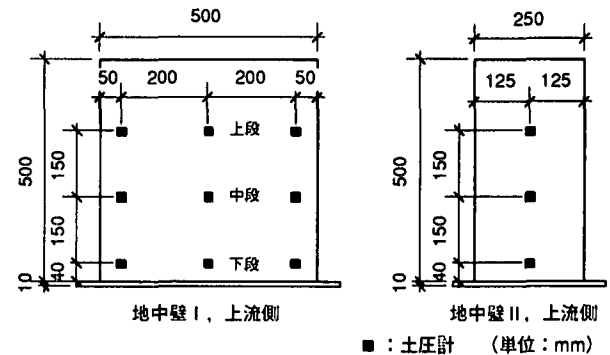


図-2 地中壁の土圧計配置図³⁾

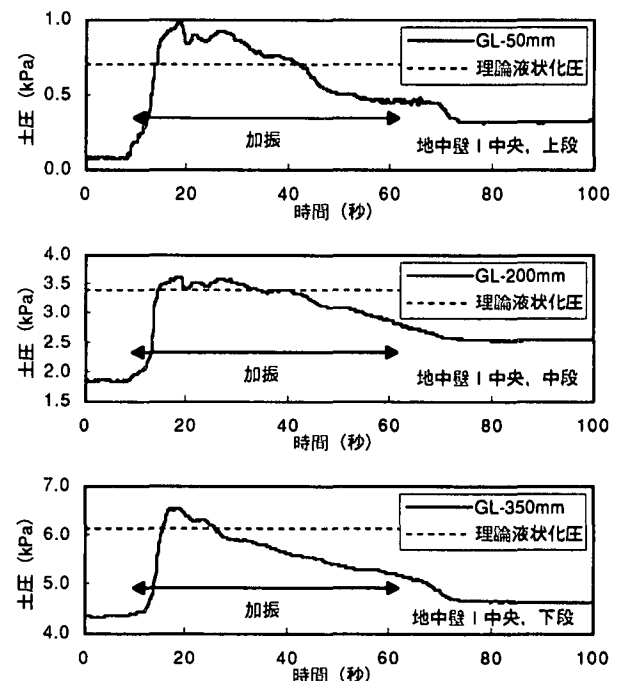


図-3 地中壁Ⅰの上流側の流動圧の時刻歴（実験値³⁾）

性係数測定試験結果をもとに設定されたものであり、側方流動地盤中の流動速度を適切に表現できるものである。パラメータ η 、 R_f はそれぞれ1.0、0.025である。

地中壁Ⅰの解析モデルを図-4に示す。差分格子間隔は水平、鉛直、奥行き方向とも2.5cmである。解析領域は土槽内部全体(3000mm×1000mm×500mm)であり、4%の傾斜を持つ初期地盤領域にVOF値が割り当てられている。地中壁は計算領域外とし、解析上剛体として扱っている。また、図中の圧力を出力するセルは実験での図-3に示した土圧計の位置に概ね対応している。境界条件として、土層壁面、地中壁面はnonslip境界(壁面との相対速度が0)とした。

本解析は地盤が完全液状化に至った後(図-3中の約15秒以降)の挙動を対象としている。解析時間は完全液状化後の5秒間(図-3中の約20秒まで)とし、過剰間隙水圧の消散過程は対象としない。また、解析で考慮する外力は自重のみであり、実験での土槽短辺方向の加振力は考慮していない。解析では地盤が完全液状化していると仮定して飽和単位体積重量(1840kg/m³)により物体力を算定している。

5. 解析結果

(1) 地中壁Ⅰの流動圧の時間変化

地中壁Ⅰの上流側中央列の upper 段、中段および下段の土圧計の位置に相当するセル重心での圧力(流動圧)の時刻歴を図-5に示す。図中の時間0秒での流動圧は液状化地盤の全応力に相当し、図-5は図-3での理論液状化圧線を越えた部分のみの土圧変化に対応している。いずれの深度でも解析開始後約1.7秒(実験では約16.7秒に相当)で流動圧が最大となり、実験結果(約18秒で最大流動圧発生)と同様に流動圧は流動開始後数秒で最大となることが分かる。流動圧が最大となった以降は、流動圧はすぐに減少し、解析開始後3.0秒ではほぼ一定値となっている。一方、実験では流動圧が最大値となった後、すぐに流動圧は減少せず、20秒以降も理論液状化圧を越える流動圧が発生している。実験、解析での継続時間の違いについては、さらに検討が必要である。

(2) 地中壁幅の影響と流動圧の深度分布

地中壁ⅠおよびⅡについて、地中壁と土槽側面の中間の深度212.5mmでの流動速度の時刻歴を図-6に示す。流動速度の最大値に着目すると幅の狭い地中壁Ⅱでは1.3cm/sであるのに対し、幅の広い地中壁Ⅰでは0.8cm/sとなっており、土槽側面と地中壁の間隔が狭くなったことで、粘性抵抗により速度が低下したものと考えられる。また、流動速度の時間変化は

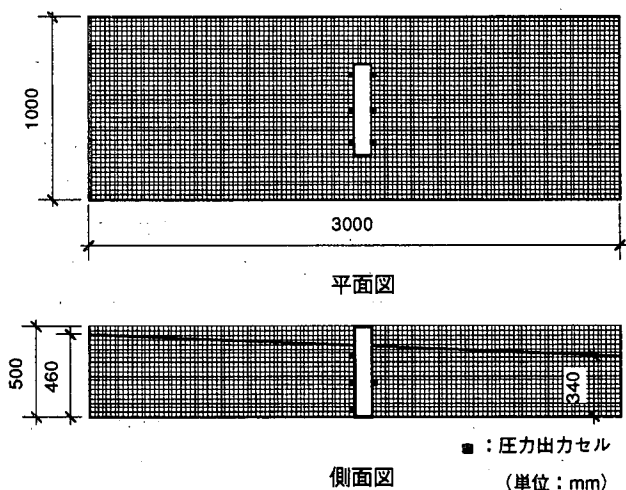


図-4 解析モデル(地中壁Ⅰ)

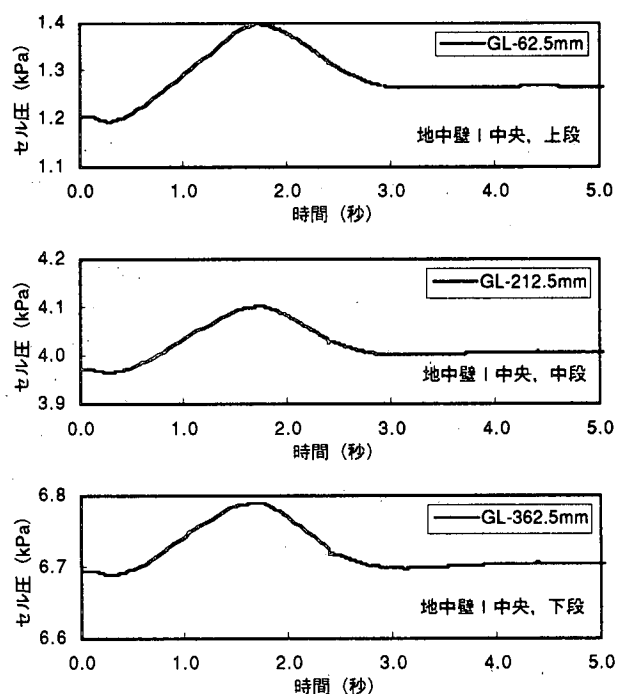


図-5 地中壁Ⅰの上流側の流動圧の時刻歴(解析値)

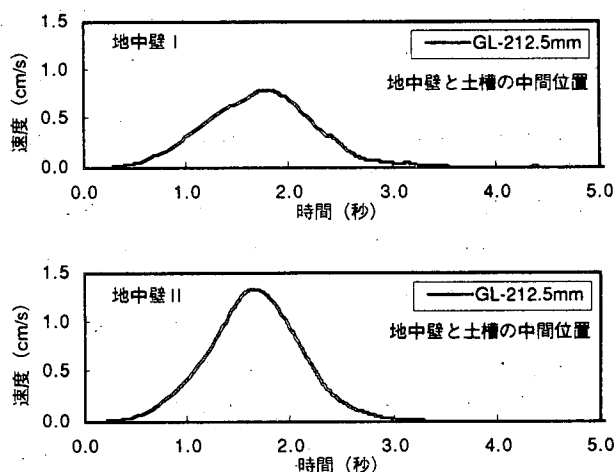


図-6 地中壁と土槽間の流動速度の時刻歴(解析値)

流動圧の時間変化にはほぼ対応しており、流動速度が最も速くなるときに、流動圧の値も最大値を示している。

地中壁ⅠおよびⅡについて、実験および解析の結果得られた上流側の最大流動圧の全応力に対する比を図-7、図-8にそれぞれ示す。実験結果の最大流動圧は、同条件で行われたいくつかの実験ケースで得られた最大土圧の平均値³⁾である。解析結果の最大流動圧は地中壁中央でのセル重心での圧力の最大値である。図-7、8より以下のことが分かる。

- ・ 地中壁の幅が広い地中壁Ⅰの方が、幅の狭い地中壁Ⅱよりも最大流動圧が大きい。実験、解析とも同様の傾向を示しているが、実験の方が顕著である。
- ・ 深度が深くなるにつれて、最大流動圧の全応力に対する比が減少していく点において実験と解析はよく一致している。

(3) 流動圧の水平分布

地中壁Ⅰの上流側の中央列および外側列の土圧計の位置に相当するセル重心での最大圧力の全応力に対する比を図-9に示す。解析では図に示すように地中壁の中央部の流動圧の方が、地中壁の端部のそれよりやや大きな値を示している。一方、実験では地表面勾配2%のケースについて中央列と外側列の最大流動圧の比較がなされている³⁾。この結果、外側列の最大流動圧が中央列のそれよりもやや大きくなる結果が得られており、解析結果とは異なる傾向を示している。この点については、等価粘性係数のパラメータの値が影響していると考えられ、さらに検討する必要がある。

6. あとがき

液状化した地盤をBingham流体でモデル化した流体力学に基づく側方流動解析手法により、傾斜地盤中の地中壁に作用する流動圧を検討した。振動台実験の数値シミュレーションの結果、以下のことが分かった。

- ・ 流動圧が最大となるのは、地盤が液状化した後、流動開始から数秒後であること。
- ・ 地中壁の幅の影響により、地中壁と土槽間を流れる地盤の速度が変化し、地中壁の幅が広いほど流動圧は大きくなること。
- ・ 流動地盤中の地中壁に作用する流動圧の全応力に対する比は深さ方向に減少すること。
- ・ 流動圧の継続時間、地中壁の水平方向の流動圧分布については、解析と実験で異なる傾向がみられ、今後の課題である。

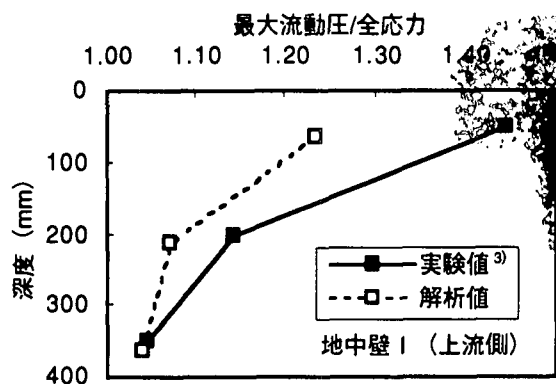


図-7 最大流動圧/全応力の比較（地中壁Ⅰ）

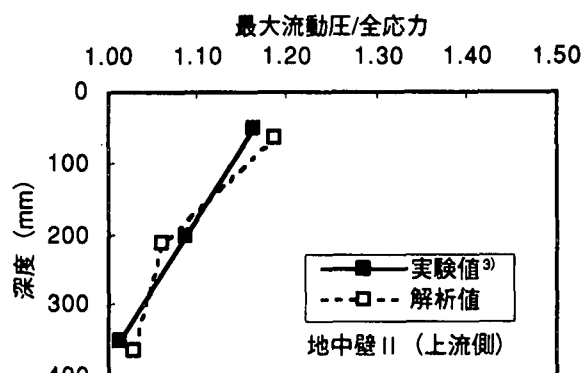


図-8 最大流動圧/全応力の比較（地中壁Ⅱ）

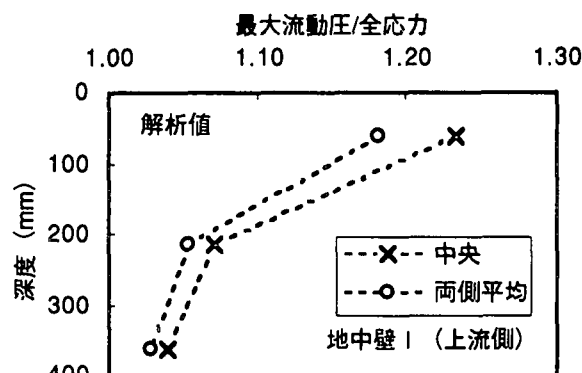


図-9 最大流動圧/全応力の水平分布（地中壁Ⅰ）

参考文献

- 1) 例えば 土木学会：土木学会阪神大震災震災調査第二次報告会資料，1995
- 2) Uzuoka, R., Yashima, A. and Kawakami, T.: An analysis of lateral spreading of liquefied subsoil based on Bingham model, Proc. of Int. Sym. of Numerical Models in Geomechanics, 1997
- 3) (財)地震予知総合研究振興会：軟弱地盤の地震時挙動とライフライン施設の耐震性に関する研究平成7年度調査・研究報告書，pp.30-61，1997
- 4) (株)ソフトウェアクレイドル：3次元熱流体解析プログラムSTREAM，1994