

清水建設(株) 正会員 ○福武 毅芳 野澤剛二郎
吉田 順 藤川 智
本多 眞 石井 清

1. はじめに

地震時の地盤の液状化に伴う側方流動現象は、杭などの基礎構造物の耐震設計における課題の一つである。しかし、側方流動はその重要性が認識されているにも係わらず、状態の変化を伴う移動境界問題という現象の特殊性から、解析的な取り扱いが困難である。一方、流体解析においては従来の格子を用いたオイラー記述の有限差分法や有限要素法などでは取り扱いにくい自由表面が変化したりする問題に対して、格子を用いないラグランジュ記述の粒子法が提案されている。本研究は、非圧縮性流体に対する粒子法の一つであるMPS法(Moving Particle Semi-Implicit Method)を側方流動現象の解析に適用することを試みたものである。MPS法は越塚らによって提案された数値解析手法であり、ダムブレイクやスロッシングなどの解析に用いられているものである。著者らはMPS法に粘性を導入することにより、まず側方流動問題への適用の第一歩として濱田らによる実験をシミュレートすることを試みた。現状では、単なる流体解析であるが、今後の発展として間隙水圧の消散による状態の変化を解析に取り入れる予定である。

2. 粒子法(MPS法)の概要¹⁾

MPS法では、連続体を有限個の流体粒子で表すが、空間に連続的に分布する物理量を粒子間相互作用で置き換えることで離散化を行う。つまり、物理量は流体粒子の重み関数 w に基づいて周囲に分布しており、各粒子の分布の重ね合わせによって場全体の分布が与えられる。例えば、粒子1つづは砂粒子1つづを表すものではない。本研究では、流体の運動は非圧縮性ナビエ・ストークスの式と連続の式に支配されるが、MPS法はラグランジュ的な手法であるため、移流項は流体粒子の移動により計算される。一方、粒子 i に対する圧力項と拡散項は周辺の粒子の物理量を用いて以下の様に表すことができる。

$$-\langle \nabla P \rangle_i = -\frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{P_j - P_i}{r_{ij}^2} \tilde{r}_{ij} w(r_{ij}) \right\} \dots (1), \quad v \langle \nabla^2 u \rangle_i = v \frac{2d}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} \left\{ (u_j - u_i) w(r_{ij}) \right\} \dots (2), \quad w(r_{ij}) = \begin{cases} r_e/r_{ij} - 1 & (r_{ij} \leq r_e) \\ 0 & (r_e < r_{ij}) \end{cases} \dots (3)$$

ここで、 P : 圧力、 u : 流速、 v : 動粘性係数、 d : 空間の次元数、 n^0 : 初期粒子数密度、 r_{ij} : 流体粒子 i と j の距離、 r_e : 相互作用の及ぶ半径、 λ : 変数分布の分散を解析解と一致させるための係数である。計算手順は、まず拡散項と外力項から流体粒子の速度を求めて粒子を移動させる。つぎに、粒子数密度 n に置き換えられる連続の式をソース項とする圧力のポアソン方程式を反復法により解き、その圧力を用いて粒子速度と位置を補正する。

3. 解析条件

解析対象とした問題は、濱田らによる護岸の移動を模擬した側方流動の模型実験²⁾であり、実験の諸元を考慮して図1のような解析モデルを設定した。解析領域は模型土槽と同様に境界Aで仕切られた飽和砂と、境界Aから30cm左にある境界Bまでの長さ1.7mを対象とした。また、水面の反射波の影響を小さくするために、実験に比べて水深を深くしている。設定したモデルの粒子間隔は一定であり、計8352個の粒子で表している。ただし、壁は粒子数密度などの取り扱いを容易にするため3列の不動粒子で表現している。物性は、濱田らの実験²⁾に基づいて砂層と水の単位体積重量 γ をそれぞれ $9.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 、 $1.9 \times 9.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 、動粘性係数 ν を $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。解析は、液状化後の側方流動のみを取り扱い、実験で砂層と水のしきり板(境界A)を瞬時に取り除いた時点解析の開始点とし、その後の境界B方向への流動挙動を時刻歴で追跡したものである。

4. 解析結果の検討

実験では、境界Aを撤去後加振を停止しており、徐々に過剰間隙水圧が消散しかつせん断ひずみが限界せん断ひずみ γ_c に達して液状化土の剛性が回復して固体の性質が戻り、ある斜面勾配(傾斜角 $\phi_m = 25^\circ$)を保ったまま変形は止まる。一方、解析では一定の動粘性係数 ν を仮定しており、時間が無限大で完全な水平地盤に変形してしまう。そこで、実験結果との比較においては、3つの時間断面(1秒、1.5秒、2秒)で比較することとした。

図2には、流動開始から1秒後の解析による粒子の変形を示す。境界直後の地盤が崩壊して傾斜部が生じ、傾斜部のさらに背後の地盤は沈

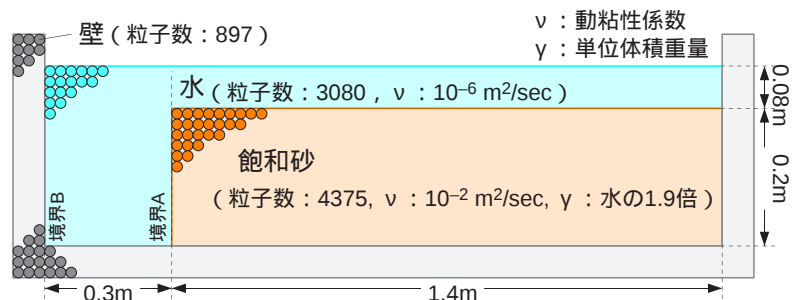


図1 解析モデル

キーワード: 液状化, 側方流動, 粘性流体, 混層流, 粒子法, 土槽振動実験

連絡先: 〒100-0011 東京都千代田区幸町 2-2-2 富国生命ビル 清水建設(株) TEL03-3508-8101 FAX03-3508-2196

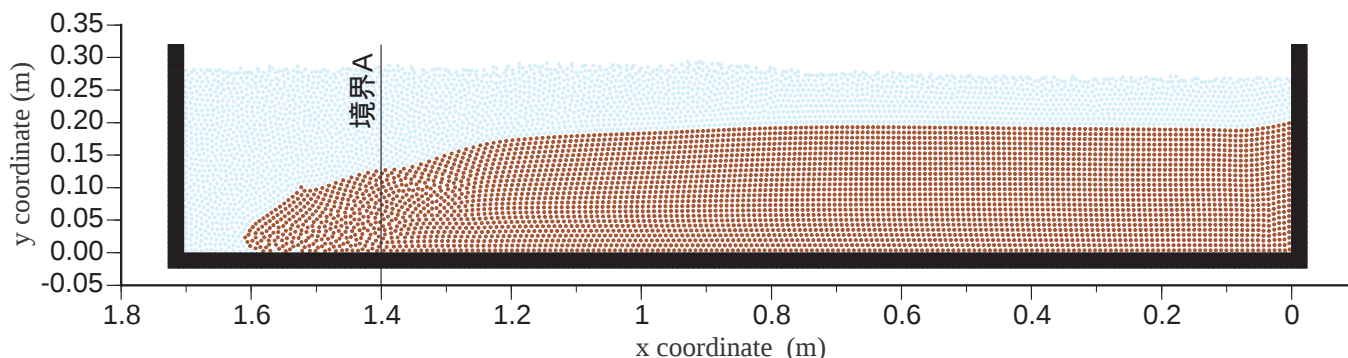


図2 解析結果 (1秒後の粒子流動状況)

下を生ずるものの地表面はほぼ平坦のまま維持される。このような傾向は実験結果と概ね一致している。

図3(a)には地表面の水平変位の比較を示す。境界Aでの変形量は実験では26cmなのに対し、解析では1秒で13cm, 1.5秒で20cm, 2秒で24cmとなっている。実験では変位は傾斜部において境界から30cmまでは直線的に減少し, 平坦部においてはほぼ一定値(5cm)を示している。解析でも境界Aから30cm背後にかけて変位量が急激に減少しており, 実験結果と対応している。1秒の解析結果(●印)では, さらにその背後で変位量が一定値(約2cm)となる領域があり, 実験の傾向と対応している。しかし1.5秒と2秒の結果では, 変位が負になっており地表面が流動方向と逆に動いている。この原因としては, 液状化砂の流動に伴って強制的に排除された水が水面に流動方向と逆向きの波を発生させ, 地表土粒子にその方向の力が作用したためと考えられる。

図3(b)には流動前・後の地表面形状の比較を示す。1秒の解析結果が実験結果と比較的良好に対応している。ただし斜面勾配は $\phi_m = 15^\circ$ であり, 実験結果に比べて小さい。

流動後の地表水平変位量については, 文献3)に兵庫県南部地震時の調査結果の比較がなされている。濱田らは護岸から相当離れた場所でもある一定の変位が生じると主張しているのに対し, 時松や石原らは護岸から指数関数的に減少するとしている。本解析結果は着目する解析時間にもよるが, 1秒の結果では濱田らの主張する形状にやや近いといえる。

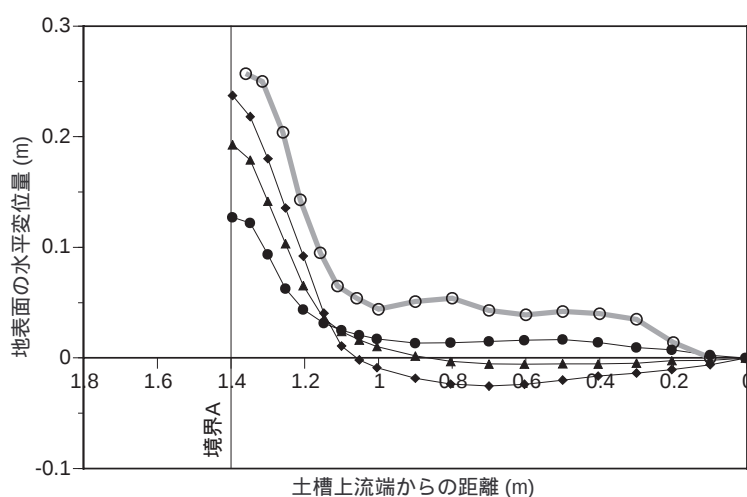
5. おわりに

今後は, 過剰間隙水圧の消散(圧密)に伴う動粘性係数 ν の時間的変化あるいは固体化を表現し, より実状に近い解析を行う必要がある。さらに実用化に当たっては, 本手法を三次元化し, 基礎との相互作用の検討をする必要がある。

謝辞 有益な助言をいただいた早稲田大学の濱田政則教授, 弊社技術研究所の清川哲志氏・奥野哲夫氏に感謝の意を表します。

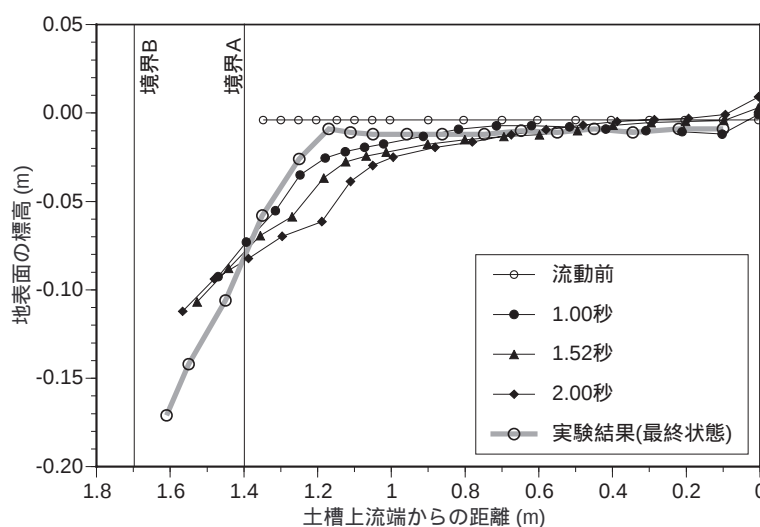
参考文献

- 1) 越塚誠一: 数値流体力学, 培風館。
- 2) 濱田政則・若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.189-208, 1998。
- 3) 福武毅芳・時松孝次: 地盤の応答の評価 - 地盤の多次元非線形応答と残留変形 -, 第5回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, 日本建築学会 基礎構造系振動小委員会, pp.51-85, 1998。



土槽上流端からの距離 (m)

(a) 地表面の水平変位



(b) 流動前後の地表面形状

図3 解析結果と実験結果の比較