

III-A121 金属の凝固解析を応用した液状化地盤の流動解析

理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター 正会員 渦岡良介, 久保哲夫
ハザマ 技術設計部 正会員 三原正哉, 足立有史

1. はじめに

液状化による地盤流動は基礎構造などに大きな被害を与えることから、その流動力や永久変位量を予測する手法の確立が望まれている。これまで液状化地盤を固体あるいは液体として扱う流動解析手法が数多く提案され、液状化地盤は液体か固体かという議論がなされている。筆者らの一人も液状化地盤を Bingham 流体として扱った解析手法を提案し、振動台実験から得られた流動速度などの再現を試みている²⁾。しかしながら、この手法は砂の大ひずみ領域でのダイレタンシーによる剛性の回復や過剰間隙水圧の消散の評価に対して課題を残していた。ここでは、特に後者に着目し、金属の凝固解析で用いられている手法を応用して、過剰間隙水圧の消散による液体から固体への相変態を考慮した解析手法を提案し、振動台実験結果をもとに検証する。

2. 解析手法

金属の凝固現象は、液体から固体への相変態に伴う潜熱放出現象として特徴づけられており、熱と流れの連成した複雑な現象である³⁾。溶融金属の流れを考慮した凝固解析には、非圧縮性粘性流体の質量保存側、運動量保存側、エネルギー保存側からなる以下のような場の方程式が用いられる⁴⁾。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + F \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho l \frac{\partial f_s}{\partial t} + Q \quad (3)$$

ここに、 u_i は速度、 ρ は密度、 p は圧力、 μ は粘性係数、 F は外力、 c_p は比熱、 T は温度、 λ は熱伝達率、 l は潜熱、 f_s は固相率、 Q は発熱量である。式(1)、(2)はそれぞれ連続式と Navier-Stokes の方程式、式(3)は凝固潜熱の発生を考慮した熱伝導方程式である。式(2)において、外力 F には重力や固液共存域での流れにくさをあらわす圧力損失の項が含まれている。なお、固相の流動は考慮していない。

純金属の融点是一定の温度を示し、液相と固相の境界面ははっきりしているが、合金の場合には融点に幅があり、固液境界もはっきりしていないのが一般的である⁵⁾。合金の相状態を知るには図-1に示すような平衡状態図が用いられる。図中の破線で示すような金属 A, B の合金の場合、温度が下がるにつれ、液相から固液共存域を経て固相に至る。それぞれの境界での温度は液相線温度、固相線温度と呼ばれている。この破線上での温度変化を横軸にとり、縦軸に固相率をとったものを図-2に示す。ここに固相率とは物質に占める固相の割合を示している。なお、ここでは単純に温度変化と固相率変化の関係を線形と仮定している。

さて、凝固解析の液状化地盤の流動解析への適用を考える。液状化地盤を粘性流体と仮定すれば式(1)、(2)を適用することは可能であり、Bingham 粘性を用いれば最小非排水強度を考慮することもできる²⁾。また、式(3)において温度を過剰間隙水圧と置き換え、潜熱の項を無視すれば、移流項を考慮した圧密方程式に対応する。図-2において、横軸の温度を過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧/初期過剰間隙水圧)に置き換えれば、過剰間隙水圧の消散に伴う液相から固相への変化をモデル化することができる。

3. 解析条件

解析対象は傾斜土槽を用いた側方流動実験⁶⁾である。この実験の特徴は、地盤を液状化させたあとに加振を止め、土槽を強制的に傾斜させる点にある。解析モデルを図-3に示す。図中の速度、過剰間隙水圧の出力点は実験での変位計、間隙水圧計の位置に対応している。解析では土槽の傾斜(4.2%)を再現するため、重力加速度を傾斜させて作用させている。解析は地盤が完全液状化した後を対象として、外力としては飽和单位体積液状化、流動化、数値流体解析、相変態、凝固

〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1 TEL:0794-83-6637 FAX:0794-83-6695 Email:uzuoka@miki.riken.go.jp

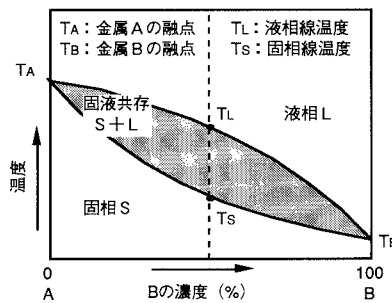


図-1 平衡状態図⁵⁾

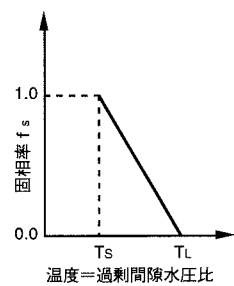


図-2 固相率

重量による自重のみを考慮している。解析に用いたパラメータを表-1に示す。なお、表中では図-2の T_L 、 T_S を液相線水圧比、固相線水圧比と呼んでいる。

4. 解析結果

過剰間隙水圧の時刻歴を実験値と解析値について図-4に示す。ここでの時刻0は土槽傾斜開始時刻である。この結果は実験での過剰間隙水圧の消散傾向を再現できるように、模型地盤の圧密係数を設定したものである。次に速度の時刻歴を実験値と解析値(凝固あり、なし)について図-5に示す。凝固を考慮したケースの固相率の時刻歴を図-6に示す。実験で流動の発生している時間(約1秒まで)中に固相が発生するのは最下点のFs3(V3位置での固相率)のみである。凝固の有無による解析結果を比較すると、V3では凝固が始まる1秒付近から減少しており、その上のV2も凝固の影響を受け速度が低下している。凝固なしの解析ではV3での速度が過大であり、各深度での速度差が小さいが、凝固を考慮することにより、その問題が解消される方向にある。

5. おわりに

液状化地盤の流動現象を液体から固体へ相変態現象と仮定し、金属の凝固解析手法を応用した。液相線水圧比や固相線水圧比の設定方法、固液共存域での流れにくさの表現方法などは今後の課題である。なお、本研究は「粉体が固体から液体へ遷移する際の諸条件と砂のクイックサンド発生時の諸条件が似ており、固体の融点は限界動水勾配に対応している」という福山大学柴田徹教授のアイデア⁷⁾に端を発している。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉田望：2. 液状化にともなう流動のメカニズム，地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集，委員会報告，pp.53-70，1998.
- 2) Uzuoka, R., Yashima, A., Kawakami, T. and J.-M. Konrad：Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading, Computers and Geotechnics, Vol.22, No.3/4, pp.243-282, 1998.
- 3) (社)日本機械学会編：相変態と材料挙動の数値シミュレーション，コロナ社，1991.
- 4) 安齊浩一：自由表面の移動を伴う非定常流れ場の数値解析法，鋳物，Vol.64, pp.410-416，1985
- 5) 新山英輔：金属の凝固を知る，丸善，1998
- 6) Hamada, M., Sato, H. and Kawakami, T., A consideration of the mechanism for liquefaction-related large ground displacement, Proceedings from the Fifth U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-94-0026, pp. 217-232, 1994.
- 7) 柴田徹：液状化雑論，液状化研究会話題提供，1998.

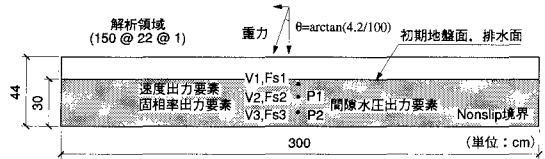


図-3 解析モデル

表-1 モデルパラメータ

密度	ρ (t/m ³)	1.83 ²⁾
最小非排水強度比	Rr	0.025 ²⁾
圧密係数	c_v (m ² /s)	2.0E-03
液相線水圧比	T_L	0.99
固相線水圧比	T_S	0.90

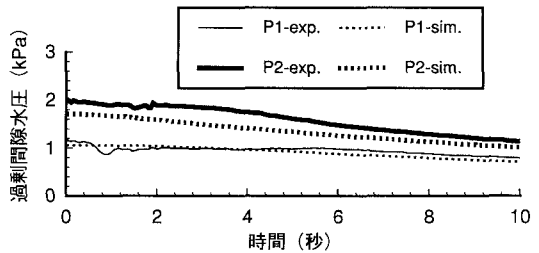


図-4 過剰間隙水圧の時刻歴

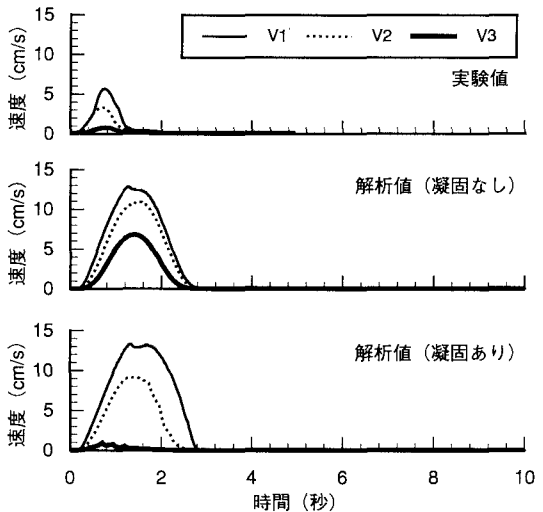


図-5 速度の時刻歴

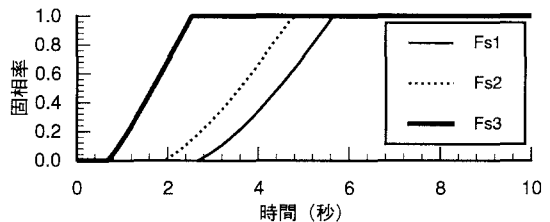


図-6 固相率の時刻歴