

金属凝固の概念を応用した 液状化地盤の流動予測

渦岡 良介¹・久保 哲夫²・三原 正哉³・足立 有史³

¹正会員 工修 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

²工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1)

³正会員 ハザマ 土木本部技術設計部 (〒107 東京都港区北青山2-5-8)

金属の鋳造シミュレーションで用いられている凝固解析手法を応用して、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液状化地盤の流動解析手法を提案する。熔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場の方程式が用いられる。液状化地盤を粘性流体と仮定し、エネルギー保存側においては温度を過剰間隙水圧と置き換えることにより、これらの場の方程式を液状化地盤に適用する。また、過剰間隙水圧の消散に伴う液相から固相への変化を固相率を用いてモデル化する。振動台による側方流動実験のシミュレーションを行った結果、凝固解析を行うことにより、これまでは過大評価していた地盤下層部での流動速度の時刻歴をよりよく再現することができた。

Key Words : Liquefaction, Flow, Solidification, 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。

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²⁾。筆者らの一人も液状化地盤を Bingham 流体として扱った側方流動解析手法³⁾を既に提案している。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⁴⁾をもとに検証する。

2. 解析手法の概要

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⁵⁾。熔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⁶⁾。

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

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

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

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かず圧力損失の項が含まれている。固液共存域での流れのモデル化の方法⁷⁾としては、粘性係数を固相率に応じて増加させる方法やダルシー則を用いて、圧力損失を考慮する方法などがある。ここでは、ダル

シー則を用いる手法を応用して、固液共存域において、次式のような圧力損失を考慮する。

$$\frac{dp}{dx_i} = -B\mu f_s u_i \quad (4)$$

ここに、 B は定数であり、ここでは圧力損失係数と呼ぶ。この式より固相率が大きくなるほど、固液共存域は流れにくくなる効果を考慮することができる。なお、固相の流動は考慮していない。

一般に純金属の融点はある一定の温度を示し、液相と固相の境界面ははっきりしている。一方、合金の場合は融点に幅があり、固液境界もはっきりしていない⁸⁾。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³⁾。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. 振動台実験の概要⁴⁾

解析対象とする実験は、東海大学で行われた強制傾斜土槽を用いた振動台実験である。この実験の特徴

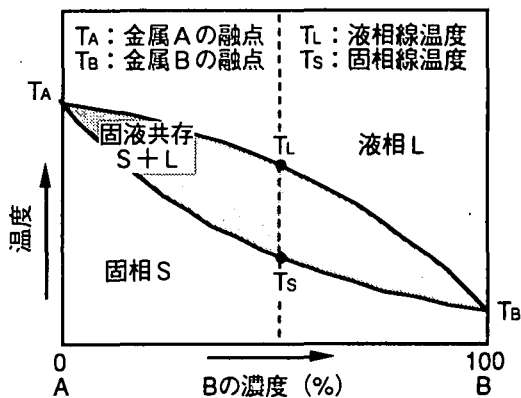


図-1 平衡状態図⁸⁾

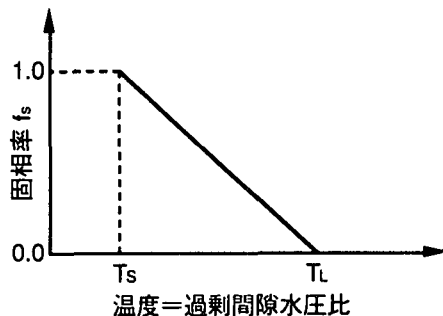


図-2 固相率

は、地盤を液状化させたあとに振動を止め、土槽を強制的に傾斜させる点にある。振動台実験装置を図-3に示す。模型地盤には、遠州灘浜砂を使用し、地盤をポイリングさせ、緩詰め均質な模型地盤を作成している。計測項目は、最終変位量（地盤中のターゲットによる）、流動中の変位（巻き込み型変位計による）、流動中の過剰間隙水圧（間隙水圧計による）である。

解析は模型地盤の相対密度41%、最大土槽傾斜4.2%、非液状化層なし、載荷圧なしの実験ケースを対象に行う。本ケースでの過剰間隙水圧、巻き込み式変位計の時刻歴を図-4に示す。地盤内の過剰間隙水圧は、土槽傾斜開始と同時に、やや減少していく傾向を示しており、地盤の流動がほぼ停止する時（約10秒）には、P1（深度12cm）で急減している。なお、傾斜

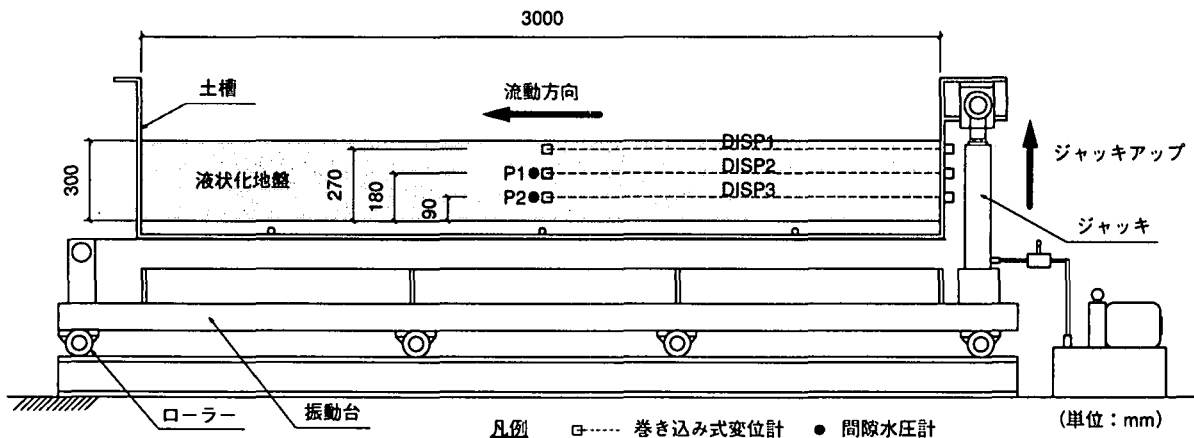


図-3 振動台実験装置⁴⁾

による水位の変動分を差し引いても過剰間隙水圧は減少することが確認されている。

4. 解析条件

解析モデルを図-5に示す。土槽鉛直断面を対象とした二次元モデルであり、差分格子は、水平、鉛直方向とも2.0cmピッチである。土層壁面（左右面、底面）はNonslip境界（壁面との相対速度が0）とした。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。実験では、液状化後に土槽を傾斜（4.2%）させているが、解析開始時から重力加速度を傾斜角に合わせて傾斜させている。解析は地盤が完全液状化した後（図-4において約9秒後）を対象とし、解析時間は10秒間である。外力としては飽和単位体積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。Binghamモデルのパラメータ（最小非排水強度、降伏後の粘性係数）は既往の解析事例³⁾より設定した。本研究は過剰間隙水圧の消散現象そのものではなく、消散による固相率の変化とそれに応じた流動挙動の変化を主な対象としている。そこで、本来は透水係数、体積圧縮係数から算定すべき圧密係数を、ここでは図-6（傾斜後のみ対象）に示すように解析による過剰間隙水圧の消散が実験とほぼ一致するように試行錯誤で設定した。ただし、解析で扱っている過剰間隙水圧の変化は、透水の影響を考慮した時間変化の滑らかなものであり、砂が大きなせん断変形を受けたときに生じる正のダイレイタンスーに起因する過剰間隙水圧の変化は考慮していない。例えば、図-4のP1の10秒付近での水圧の変化は、流動が停止する際の砂のせん断剛性の回復、すなわち有効応力の回復に起因すると考えられるが、本手法ではこのような剛性の回復を考慮することはできない。液相線水圧比、固相線水圧比（図-2の T_L 、 T_S ）については過剰間隙水圧が少しでも消散すれば、固体的な挙動となると仮定して、表のように設定した。

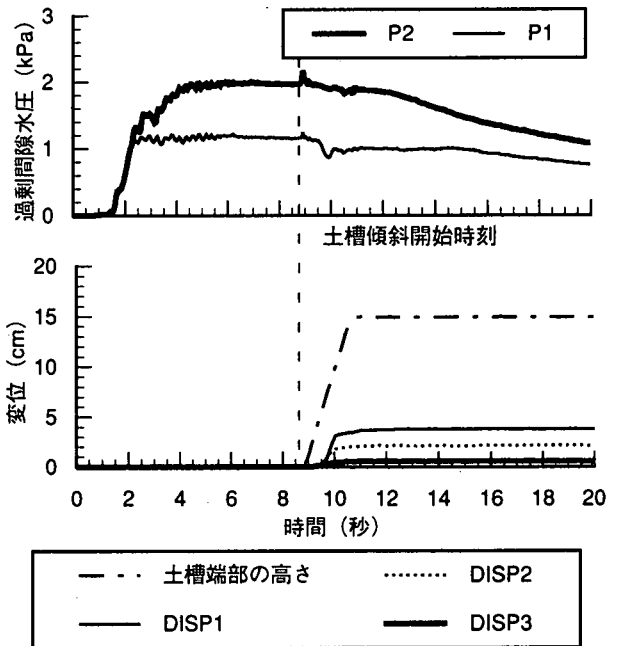


図-4 実験結果⁴⁾

表-1 モデルパラメータ

密度	ρ (t/m ³)	1.83
最小非排水強度比	Rr	0.025 ³⁾
降伏後の粘性係数	μ' (Pa*s)	1.0 ³⁾
圧密係数	c_v (m ² /s)	2.0e-3
液相線水圧比	T_L	0.99
固相線水圧比	T_S	0.90

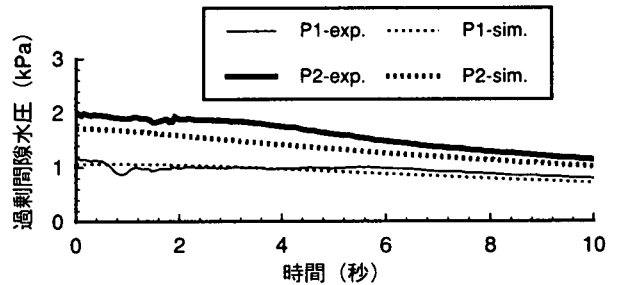


図-6 過剰間隙水圧の時刻歴

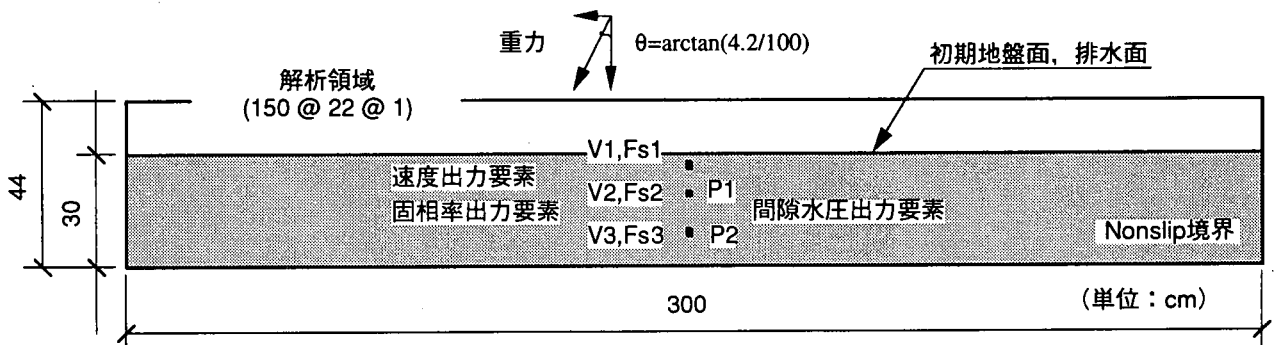


図-5 解析モデル

5. 解析結果

流動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-7に, 凝固を考慮したケースの過剰間隙水圧比および固相率の時刻歴を図-8に示す。いずれも流動後の挙動を対象としたものであり, 時刻0秒は図-4における約9秒に相当する。いずれのケースについても, 解析は流動速度を過大に評価しているが, これは大変形時の正のダイレイタンスによる剛性の回復がモデルでは考慮されていないことが原因として考えられる。

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。(b)凝固なしと(c)凝固あり($B=1.0e+4$)の解析結果を比較すると, V3での流動速度は凝固が始まる1秒付近から減少しており, その上のV2でも凝固の影響をうけ流動速度が低下している。凝固なしの解析ではV3での流動速度が過大であり, 各深度での速度差が実験値よりも小さい。凝固を考慮することにより, 実験値のように深度方向の速度差が大きくなる傾向にある。しかしながら, V1やV2での流動速度は依然過大である。また, V3での流動速度は固液共存域のモデル化の影響を大きく受ける。図-7(d)に示すように式(4)の係数Bの値によっては凝固なしと同様な結果ともなり得る。

6. 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今後の課題は多いが, 相変化を考慮した流体解析により固体と液体が共存している液状化による流動現象を表現できる可能性がある。

謝辞: 本研究に際し, 岐阜大学八嶋厚教授から貴重なアドバイスを頂いた。また, 本研究は「粉体が固体から液体へ遷移する際の条件と砂のクイックサンド発生の条件が似ており, 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⁹⁾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) 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) 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.
- 3) Uzuoka, R., Yashima, A., Kawakami, T. and J.-M. Konrad: Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral

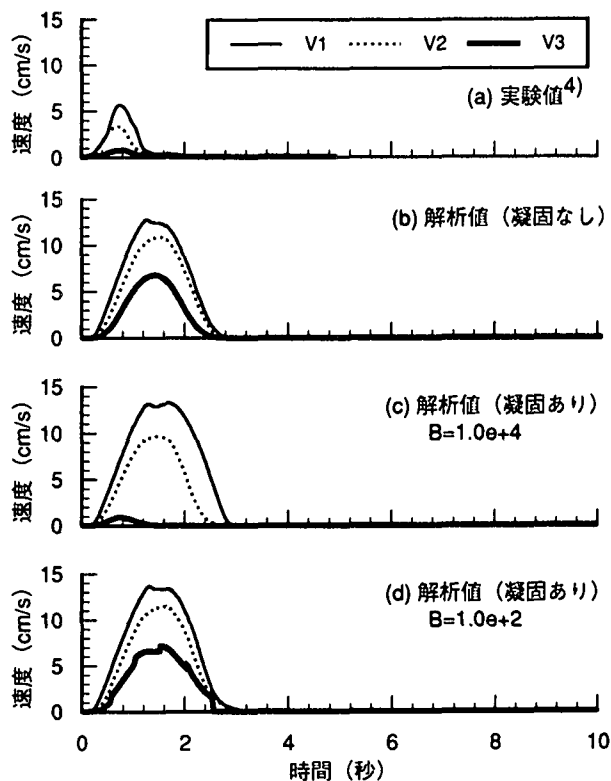


図-7 流動速度の時刻歴

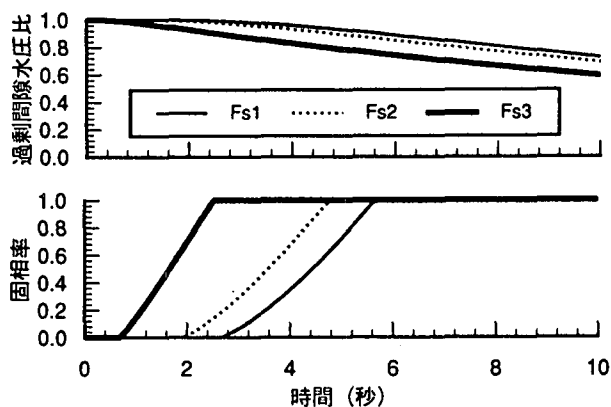


図-8 過剰間隙水圧比と固相率の時刻歴

spreading, *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 3/4, pp. 243-282, 1998.

- 4) 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.
- 5) (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.
- 6) 安斉浩一: 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.
- 7) Salcudean, M. and Abdullah, Z.: On the numerical modelling of heat transfer during solidification processes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 25, pp. 445-473, 1988.
- 8) 新山英輔: 金属の凝固を知る, 丸善, 1998.
- 9) 柴田徹: 液状化雑論, 液状化研究会話題提供, 1998.