

微小変形及び有限変形問題に対する多相連成 GIMP 法の検証

京都大学大学院（現西日本旅客鉄道） 学生会員 ○竹内 智昭
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介
 清水建設技術研究所 正会員 桐山 貴俊

1. はじめに

Material Point Method (MPM) は物質点が物理量を持つが、支配方程式の解法は計算格子で行うため、格子法に見られる大変形時のメッシュの絡合い等の問題を特別な処理を要さず回避できる変形解析法である。筆者らは、この MPM に多相連成理論を持ち込み、固相、液相、気相を連成した地盤材料の大変形解析法に拡張した¹⁾。筆者らの手法を含め、多くの粒子法を用いた多相連成解析法が開発されてきているが、いずれも大変形問題をデモンストレーション的に表現できるものの、解析精度の検証は十分ではない。そこで本研究では、微小変形及び有限変形問題に対する多相連成 MPM の検証を行うことを目的に、各種の理論解と数値解析解の比較を行った。

2. GIMP-FDM 連成解析法の計算アルゴリズム

本手法の支配方程式は u - p 定式化された全体相の運動方程式と液相の連続式である。運動方程式は、粒子が格子を移動する際に起こる数値的散逸を軽減可能な Generalized Interpolation Material Point (GIMP) 法で離散化した。GIMP では粒子の支配領域また、連続式は計算格子中心に間隙水圧を定義した有限差分法 (FDM) を用いて離散化した。詳細は参考文献を参照されたい¹⁾。MPM では粒子が持つ質量、外力、応力、ひずみから補間関数を用いて計算格子点で運動方程式と連続式を定式化し、解として計算格子点の運動量増分と格子中心の間隙水圧を得る。これらから、粒子の速度、ひずみ、応力、粒子支配領域を更新する。計算格子情報は一度消去され、新しい計算格子を任意に設定し、次のステップ進む。このように、毎ステップ更新された格子において支配方程式を定式化し、ひずみは現配置を基準に求められるため、updated Lagrangian 法に準じた手法となっている。

3. 微小変形問題に対する GIMP 法の比較検証

微小変形問題に対する検証として、Terzaghi の一次

元圧密理論との比較を行った。厚さ 10m の粘土層上部に砂質土が埋め立てられ、上載圧が作用した片面排水条件を想定している。図 1 に用いた解析モデルを示す。格子数は 20 で各格子に 4 つの粒子を配置した。間隙水圧の等時曲線を図 2 に示す。実線が理論解をプロットが数値解析結果を示している。非排水境界である底部において、わずかに解析結果の方が早く排水しているものの、解析結果と理論解はよく一致している。また、図 3 に平均圧密度について示す。解析結果の方がわずかに早く圧密が進行しているが、数値解析結果と理論解はよく一致している。

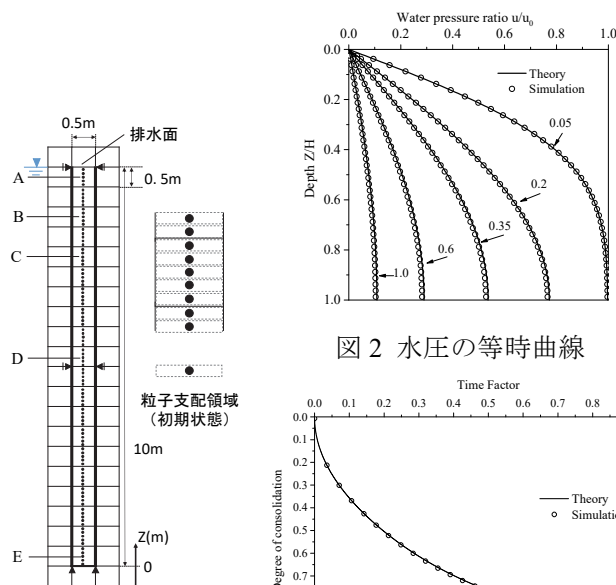


図 1 解析モデル

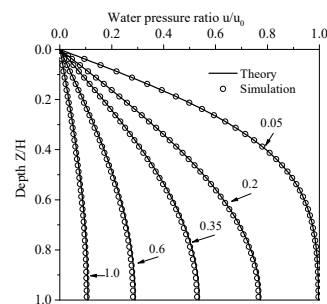


図 2 水圧の等時曲線

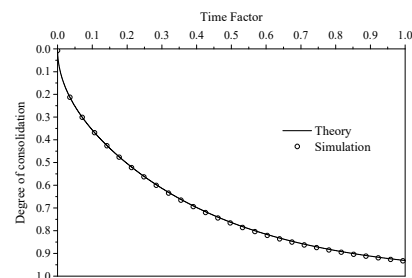


図 3 平均圧密度

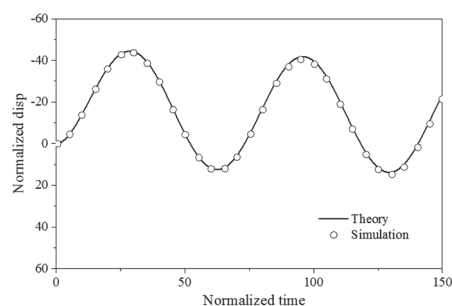


図 4 変位の時刻歴

つぎに、動的問題の検証として、Simon ら²⁾が一次元多孔質飽和弾性柱の上部に荷重を上部に荷重を作用させた時の過渡応答の理論解と比較する。高さ100mの弾性柱を想定し、初期水位を柱上部と同様の高さとした。底面を固定境界、側面を水平固定とし、柱の上面を排水境界とし、その他の境界を非排水条件とした。モデル上面にサイン波の表面力を作用させた時のモデル上面の正規化した変位を比較する。図4に正規化した変位の時刻歴を示す。図4を見ると、GIMP法の解析結果は理論解とよく一致している。

4.有限変形問題に対する GIMP 法の比較検証

まず、固相のみの一次元有限変形圧縮問題との比較を行う。Zhang³⁾は一次元有限変形圧密問題として、自重による圧縮過程に対して、鉛直座標に対する鉛直応力として理論解を示した。この理論解と解析結果を比較する。図7に鉛直応力の深度分布図を示す。ここでは、重力の値を10Gから50Gに変化させた場合の結果を示す。GIMP法の解析結果は理論解とよく一致している。

つぎに、固液2相系問題としてGibsonの有限変形一次元圧密理論⁴⁾との比較検証を行った。粘土層上部に砂質土が埋め立てられ、上載圧が作用した際の両面排水条件を想定している。解析モデルは図1と同じモデルを用いた。ただし、計算格子は沈下に伴い排水境界が最上部の粒子の支配領域上部と一致するように、毎ステップ更新した。図5に間隙水圧の時刻歴を示す。図中のAからEは図1に示す粒子位置を指す。また、沈下量の時刻歴を図6に示す。沈下量は解析結果と理論解は定性的に一致しているが、各粒子の間隙水圧の時刻歴を見ると、上部境界のごく近傍のAでは100～1000 secにおいて数値解析の間隙水圧は理論解より早く消散し、約30000 sec以降において全体に間隙水圧の消散が早くなる結果となった。

5. おわりに

微小変形問題に対して解析解は理論解と良く一致する結果を得ることができた。有限変形問題に対しては、1相系問題においては理論解と良い一致を示すが、2相系問題において大変形領域において数値解は理論解よりも水圧消散を早く評価する結果となり、水圧計

算に課題を残したが、変形量については精度よく解析できることを示した。

参考文献

- 1) Higo, Y., Nishimura, D. and Oka, F., Proc. 14th IACMAG, Kyoto, Japan, pp.1761-1766, 2014.
- 2) Simon, B.R., Zienkiewicz, O.C. and Paul, D.K., *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.8, pp.381-398, 1984
- 3) Zhang, D.Z., Ma, X., and Giguere, P.T., *Journal of Computational Physics*, 230: 6379-6398, 2011.
- 4) Gibson, R.E., Schiffman, R.L., and Cargill, K.W., *Canadian Geotechnical Journal*, 18, pp.280-298, 1981.

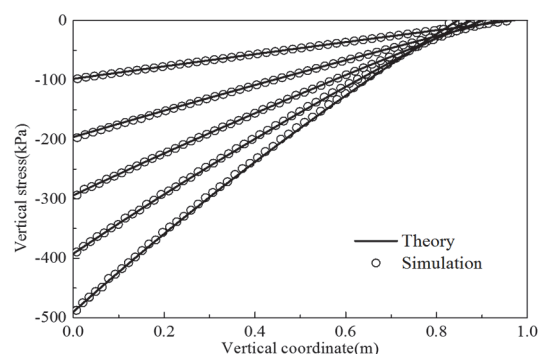


図5 鉛直応力の比較

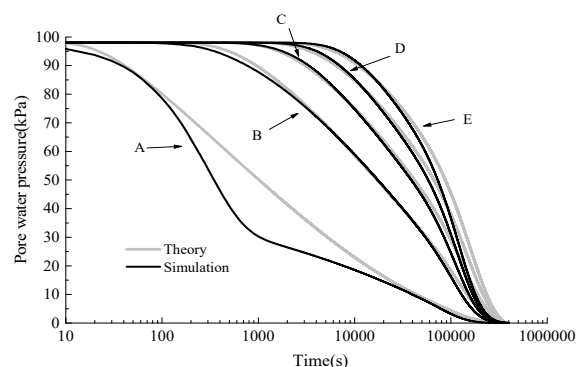


図6 間隙水圧の時刻歴

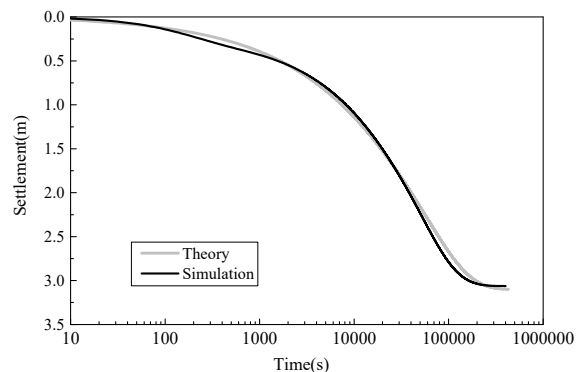


図7 沈下量の時刻歴