第Ⅲ部門

京都大学工学部	学生会員	〇竹内	智昭
京都大学大学院工学研究科	正会員	肥後	陽介
京都大学大学院工学研究科	フェロー会員	三村	衛

### 1. はじめに

近年の異常気象による大雨台風の水害や巨大地震などが原因で河川堤防が決壊し、甚大な被害をもたらしている.このような地盤 災害を軽減するには高精度な解析を行い効率的な対策を行う必要がある.本研究では、地盤の大変形解析に適用可能な粒子法の一つ であるGIMP法<sup>1,2)</sup>を用い、多相系地盤の大変形問題への適用性を検討した.まず、水圧計算部の改良を行った後、改良したGIMP法に よる一次元圧密問題の解析結果をGibson<sup>3)</sup>の有限変形一次元圧密理論解との比較し、その検証を行なった.また、不飽和堤防の地震時 大変形解析への適用を行った.

(1)

## 2. GIMP-FDM 連成解析法の概要

Generalized Interpolation Material Point(GIMP)<sup>4)</sup>法は粒子法の1つである MPM の補間関数を一般化し,粒子が計算格子の境界付近に接近した際の数値不安定性を合理的に改良する補間手法である。支配方程式は固相,液相,気相の三相混合体の運動方程式と液相の連続式で,前者は GIMP 法,後者は 有限差分法(FDM)を用いて離散化した<sup>1),2)</sup>.

## 3. 水圧計算の改良

従来のGIMP-FDM 連成解析手法では、粒子と格子の水圧に 関する情報の受け渡しに際し、粒子から格子へ水圧を移行す る場合、格子内の粒子の水圧を合計し粒子数で割って平均値 を求め格子の水圧とし、格子から粒子への水圧の移行の場合 は格子内のすべての粒子に格子と同じ水圧を与えていた.こ のことから、実際の水圧分布を正確に表現できないという問 題点が生じる.

本研究では、粒子の水圧を計算する場合、粒子と格子中央 の点の距離を重みとして内挿する.距離を比として $\alpha$ , $\beta$ とし、 これらを用いて粒子の水圧は

$$p_{p} = (1-\alpha)(1-\beta)p_{(i,j)} + (1-\alpha)\beta p_{(i,j+1)}$$

 $+\alpha(1-\beta)p_{(i+1,j)}+\alpha\beta p_{(i+1,j+1)}$ 

とすることができる.一辺だけ非排水条件に接している場合, 隣り合う格子に同じ水圧を与え,式(5)と同様に計算する.ま た,二辺に境界条件がある,もしくは排水条件の境界条件に 接している場合,圧力の外挿を行い粒子の水圧を求める.

格子の水圧を計算する場合は、粒子と格子中央の点の距離 を重みとして内挿する.すべての粒子で比を用いて移行計算 を行ったのちに合計した重みで割って格子の水圧を求める<sup>5)</sup>.

$$p_{(i,j)} = \frac{\sum w_k p_k}{\sum w_k}$$
(2)

pkはある粒子の水圧,wkはその粒子の重みである.

# 4. 大変形問題における GIMP 法の検証

大変形問題におけるGIMP 法の妥当性を検証するため,有限変形一次元圧密問題の解析を行い, Gibson(1980)<sup>4)</sup>による有限変形一次元圧密問題の理論解 との比較を行った.

Gibsonの有限変形一次元圧密理論において圧密方程式は次のように表される.

Tomoaki TAKEUCHI, Yosuke HIGO and Mamoru MIMURA. Mail: takeuchi.tomoaki.34z@st.kyoto-u.ac.jp

$$\frac{\partial^2 E}{\partial Z^2} + N \frac{\partial E}{\partial Z} = \frac{\partial E}{\partial T}$$
(3)

本研究では,式(3)をクランク=ニコルソン法を使い離散化 をした.理論解を求めるために用いたパラメータを表1に示す. 材料は大阪湾浚渫粘土を用いている.今回は堆積した粘土層 の上部に砂質土が埋め立てられ,9.8kN/m<sup>2</sup>の上載圧が作用した 両面排水条件の場合を想定した.また,GIMP法の数値解を求 めるために用いた解析モデルを図1に示す.

間隙水圧の時刻歴の理論解を図2に、GIMP法による解析結 果を図3に示し、理論解と解析結果の沈下量の時刻歴を図4に 示す.解析結果では層の中央部付近における水圧計算は理論 解と近い結果を得ることができたが、境界付近の粒子の水圧 が初期条件として与えた水圧よりも大きな値を示すなど、理 論解と異なる結果を得た.また、粒子法では層の沈下量を求 めることができず、一番上の粒子の沈下量を出すことしかで きないため、沈下量の比較の図を見ると理論解と解析結果に は差が生じた.



表1 パラメータ表



図4 沈下量の時刻歴

#### 5. 堤防の地震時大変形解析への適用

Higo et al.<sup>2</sup>はGIMP法を不飽和堤防の動的解析に適用し,同 じ問題のFEMによる解との比較から妥当性を示した.しかし, FEM では追跡が困難なレベルの大変形問題において動的解 析はまだ行われていない.よって本研究では不飽和堤防の大 変形問題に対し,より堤防が大変形すると考えられる兵庫県 南部地震を用いた.用いたパラメータを表2に,解析モデルを 図5に示す.本研究では、メッシュサイズは0.5m 四方で,1 つ のメッシュの中に4 つの粒子を配置している.入力波は図6に 示す通りである.

まず図7に解析各段階における骨格応力減少比分布を示す. 5秒経過時,堤体の下部の基礎地盤部には液状化しておらず法 尻部で骨格応力が減少している様子が確認できた.時間が経 過するにつれて基礎地盤部に広く液状化が広がる様子が確認 でき,堤体が沈下傾向を見せて,それに伴い周辺の基礎地盤 部が押し上げられるような大変形を示している.つぎに変位 ベクトル分布図を図8に示す.図を見ると,10秒経過時点から 堤体の法面で変形が集中していることがわかる.

Initial void ratio e <sub>0</sub>	1.192	Hardening parameter B <sub>1</sub> *	1.1
Compression index λ	0.025	Hardening parameter C <sub>f</sub>	95
Swelling index K	0.0025	Quasi-OCR OCR*	2.0
Normalized Ini.shearcoefficient ratio $G_0/\sigma'_{m0}$	681.2	Anisotoropy parameter C <sub>d</sub>	2000
Permeability k (m/s)	$5.0 \times 10^{-5}$	Dilatancy parameters D <sub>0</sub> *,n	0.5, 8.0
Gravity acceleration g (m/s <sup>2</sup> )	9.8	Plastic ref. strain Y ref	0.015
Density $\rho(t/m^3)$	1.8	Elastic ref. strain y ref	0.15
Stress ratio at PT Mm*	0.909	水分特性曲線のパラメータ α	2.0
Stress ratio at failure M <sub>f</sub> *	1.302	水分特性曲線のパラメータ n	4.0
Hardening parameter B0*	3000	初期飽和度 Sr	初期水位以上0.6



図5 解析モデル



図7骨格応力減少比図

図8 変位ベクトル分布図

# 6. まとめ

GIMP-FDM 連成解析の問題点の一つである水圧の補間ア ルゴリズムの改良方法を提案し課題をまとめた. 今回の改良 案では境界付近の粒子の値が正しく計算できなかったため, 今後は境界付近の補間方法を改良して比較検討を行う予定で ある.

また,堤防の地震応答解析への適用を行った結果,大変形 領域においても破綻することなく挙動を追跡することができ た.今後実験結果との比較などによりさらに検証を行う必要 がある.

#### 参考文献

 Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Morinaka, Y., Goto, Y. and Chen, Z. (2010), A coupled MPM-FDM analysis method for multi-phase elasto-plastic soils, Soils & Foundations, 50(4), pp.515-532.
 Higo, Y., Oka, F. and Nishimura, D. (2014), A coupled GIMP-FDM scheme for analyzing dynamic response of multiphase unsaturated soils, Proceedings of the 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, 13-16 April 2014, Sendai, Japan, pp.154-155.

3)Gibson,R.E.,Schiffman,R.L., and Cargill, K.W.; The theory of one-dimensional consoli-dation of saturated clays. Finite nonlininear consolidation of thick homogeneous layers,*Canadian Geptechnical Jpurnal*, **18**, pp.280-298,1981.

4) S.G. Bardenhagen and E.M. Kober: The Generalized Interpolation Material Point Method, CMES, Vol. 5, No. 6, pp.477-495, 2004.
5) Bridson, R.: Fluid Simulation for Computer Graphics, A K Peters, Ltd., 2008.