

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760360

研究課題名（和文） 粒子法と有限要素法の混合法による液状化地盤の大変形解析

研究課題名（英文） Large deformation analysis of liquefied ground by using a hybrid method on the basis of particle method and finite element method

研究代表者

小林 義和（KOBAYASHI YOSHIKAZU）

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：20339253

研究成果の概要（和文）：粒子法においては、有限要素法などと比較し、同程度の解析精度を確保するためにはより詳細な離散化が必要であるため、近年利用されつつある GPGPU による解析の効率化を個別要素法を対象として実施した。また、粒子法として当初は MPS 法を採用する予定であったが、解析精度の向上などに鑑み、HMPS 法を採用することとし、HMPS 法に関する検討および有限要素法と HMPS 法の混合法についての検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The applicability of GPGPU was evaluated for the particle methods by using discrete element method as an example for overcoming the difficulty on the computational cost of the particle methods. Hamiltonian Moving Particle Semi-implicit was adopted as the particle method instead of MPS for raising the accuracy of its result, and its feature was evaluated. The development of the hybrid method of HMPS and Finite element method was discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：粒子法、GPGPU、並列計算、HMPS、SPH、DEM

1. 研究開始当初の背景

粒子法は、主として数値流体解析の分野で発展してきた手法であるが、現在は固体解析などにも応用が進められている。粒子法は、連続体を従来から利用されている有限要素法のようにメッシュによって離散化するのではなく、粒子の集合として離散化することで特徴づけられる。各粒子は移動することが可能であり、このような特徴により、主として対象の変形が微小変位の枠組みで取り扱うことができない移動境界問題にその強み

を發揮する手法である。同様に対象となる連続体を粒子の集合により表現する手法として個別要素法が挙げられるが、個別要素法と粒子法は、粒子間の関係の定義の違いによって区別することができる。個別要素法では、粒子間の関係を、粒子間に設けられたバネとダッシュポットによって表現するのに対し、粒子法では粒子間の関係を固体や液体の構成方程式によって表現するため、既存の構成方程式を利用することができる。これにより、従来の有限要素法で培われてきた連続体に

対する構成方程式を利用しつつ、移動境界問題にも適用可能な手法として期待されており、地盤工学の分野においても、従来から利用されてきた地盤材料の構成方程式を組み込むことにより、地盤材料の特性を考慮した地盤の大変形解析が実施されつつある。しかし、それらの取り組みは、従来の粒子法の枠組みの上で実施されており、以下のような問題が挙げられる。

- ・ 粒子法では、計算コストが一般的に従来から利用されている有限要素法と比較して高く、液状化地盤の大変形問題のように、その対象が広範囲に渡る場合には、その適用が難しい。
- ・ 時間積分法として、半陰解法を採用しているため、一般的な有限要素法による解析と比較すると、より小さな時間刻みが必要であり、本研究で対象としている液状化地盤の大変形のような現象の継続時間が長くなる問題では、その応用が困難である。

このような問題点を解決するために、研究代表者は有限要素法と粒子法の一つである MPS の混合法の開発と、MPS の陰解法化について検討をしてきた。

粒子法による基づく解析では、その離散化の特性から、有限要素法と比較して高精度な解析を行うためには解析対象領域を非常に多くの粒子によって離散化する必要があり、それに伴って解析コストが非常に高価になる。このため、研究代表者は、液状化地盤の変形解析において、大変形が卓越する領域のみを MPS によって離散化し、そうではない領域を有限要素法によって離散化して解析を行う手法の開発を実施してきた。これにより、大変形が卓越しない領域では計算コストが MPS と比較すると安価な有限要素法を採用することが可能となり、解析コストを低減することが可能になっている。しかし、地盤工学において有限要素法は、MPS のような半陰解法は採用されておらず、時間積分法が大きく異なる。このため、有限要素法による境界では、応力が連続となるような条件を課していたが、そのために、まず MPS による領域において圧力を求めた後、その圧力を外力として有限要素法に作用させて境界の処理をしていたため、MPS 領域で発生した圧力が1時間ステップ後に有限要素法による領域に作用することになり、解析精度を低下させる一因となっていた。更に、一般的な有限要素法による地盤の解析では、主として陰解法が採用されており、地盤材料の構成方程式の適用についても陰解法によるアルゴリズムが確立されている。このため、MPS の時

間積分法を変更することによって、有限要素法と MPS の結合と地盤材料の構成方程式の粒子法への導入を容易にするため、陰的な時間積分法に基づく粒子法を開発する必要性が認識されていた。

また、研究代表者は、前述した事項に基づき、陰的な時間積分法に基づく MPS の開発を実施した。本手法では、時間積分法として、Newmark- β 法を採用したが、当時は、まだ有限要素法との結合は考慮されておらず、対象も流体のみであった。

2. 研究の目的

本研究では、有限要素法と粒子法の混合法による解析を実施するために必要な事項の検討を実施することを目的とした。粒子法による解析については、一般に解析に必要な計算コストが有限要素法を上回るため、並列計算などの手法を用いて解析の効率化を図る必要がある。このため、近年利用が進みつつある GPGPU を使った解析の効率化について検討を行った。また、現状における粒子法の安定性を確認するため、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) において、境界の強制変位を伴う現象の解析を実施し、その数値解析上の特性などについて検討を行った。また、粒子法としては、当初は MPS 法を採用する予定であったが、数値的安定性等に鑑み、越塚らによって提案された Hamiltonian Moving Particle Semi-implicit (HMPS) を粒子法として採用することを想定し、その数値的な特性の確認及び混合法の開発に関する理論的検討を実施した。

3. 研究の方法

GPGPU による解析の効率化の検討については、個別要素法によって実施する。個別要素法は、対象を粒子の集合としてとらえ、その各粒子を解析上においても粒子としてとらえる方法である。解析の特徴としては、粒子間の相互作用がスプリングとダッシュポットによってモデル化されているため、それらのパラメータの設定には困難があるものの、解析自体は容易である。また、一般的に個別要素法は完全な陽解法によって解析が実施されることが多く、この部分を並列化することによって、HMPS における陽解法の部分を加速することが可能になる。図.1 に個別要素法における解析対象のモデルの代表例を示す。このモデルでは、土柱の側面が拘束されており、その拘束が解放された場合の想定をして、自重によるその崩壊をさせた後、地震波として正弦波を入力することによってその解析の安定性を確認しつつ、これらの解析の効率化について図.1 のモデルの粒子

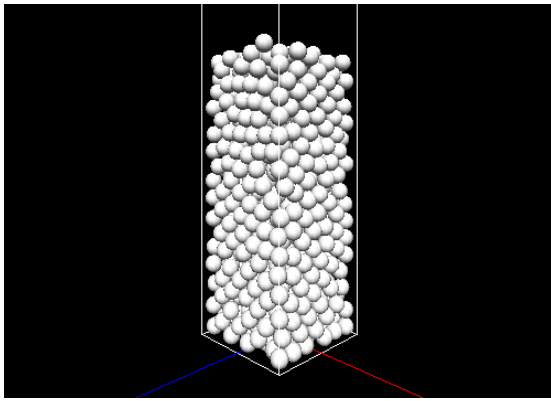


図. 1 個別要素法の解析モデル

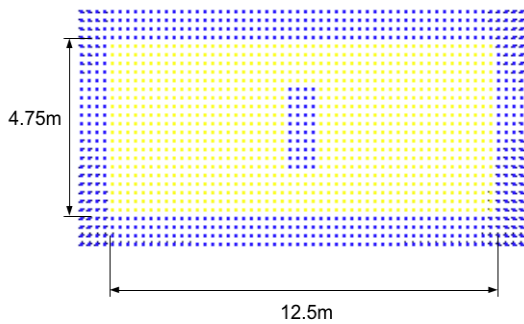


図. 2 SPH の解析モデル

径を変更することによって総粒子数を変更し、粒子数と解析時間の関係について検討を実施した。

SPHにおいては、図. 2 のような閉鎖された矩形空間中を剛体の板が動くような解析を実施することによって、その解析における安定性などの確認を実施した。ここで、図. 2 においてモデルの周囲の青い粒子は壁面であり、中央の青い粒子で構成された矩形が剛体壁である。黄色の粒子は粘性流体を表しており、流体部の非圧縮性を強く課した例と緩和した例について解析を実施し、解析結果の安定性について検討を実施した。ここで、通常のSPHにおいては、固定壁と剛体壁を構成する粒子もその位置情報が更新されるが、固体壁については、元の位置に、剛体壁についてはその形状を維持するようにそれらの粒子の位置を補正することによって解析を実施した。また剛体壁の変位を正弦関数で与えた。

また、粒子法を当初予定していたMPS法からHMPSに変更したことから、HMPSに関する検討も実施した。HMPSでは、図. 3 に示されるような2次元のダムブレイク問題を解くことによってその数値的な安定性に関する検討を行った。ここで、図中の黒い粒子が壁面粒子であり、青い粒子が流体粒子である。

さらに、HMPSと有限要素法との混合法の開発に当たり、有限要素法においても従来と異なる定式化をしなければならないことが明

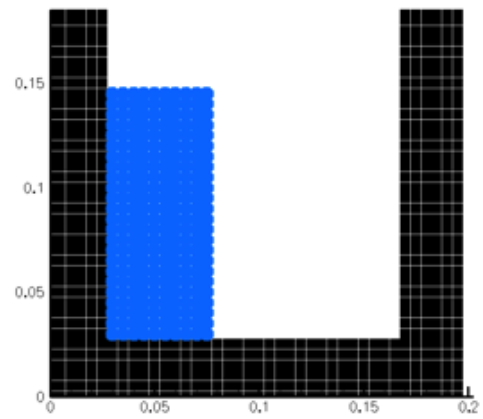


図. 3 HMPSによるダムブレイクモデル

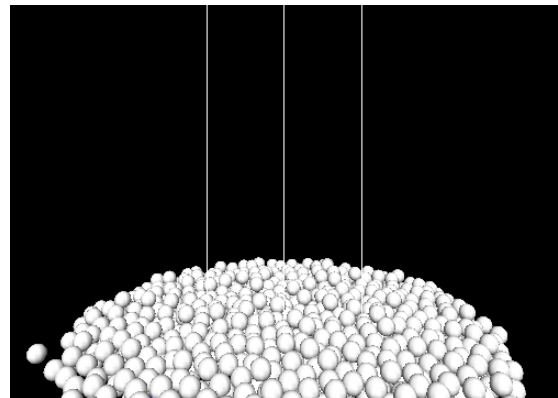


図. 4 個別要素法による土柱崩壊変形図

らかとなったため、それに関する検討も実施した。

4. 研究成果

個別要素法による土柱崩壊解析の変形図を図. 4 に示す。図. 4 によれば、土柱は自重により、拘束が解放された面の方向に崩壊しており、解析が妥当に実施されていることが確認できる。図. 5 にGPGPUによる解析の効率化を示す。図. 5 によれば、GPGPUを採用することにより、解析効率の改善ができることを確認した。しかし、この解析では、GPU内での解析だけではなく、CPUによる処理を多く含んでいるためにGPU内のメモリとメインメモリの間でのデータのやり取りがあるため、解析速度の倍率がCPUによる1スレッドでの解析と比較して21倍、8スレッドでの解析と比較して5倍程度となっているが、CPUでの処理を低減し、GPUでの処理の比率を増加させていくことによってより効率的な解析を実施することができると思われる。

図. 6 及び図. 7 にSPHにおける解析における剛体壁に作用する力の時系列を示す。ここで、赤い点は実際に算出された力の値であり、実戦で示されているものが算出された力の

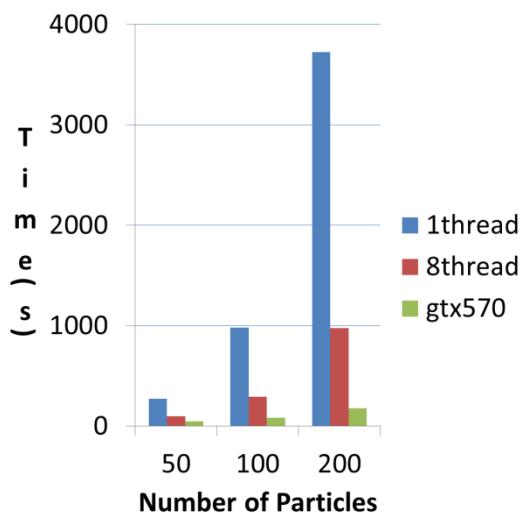


図. 5 GPGPU による解析の効率化

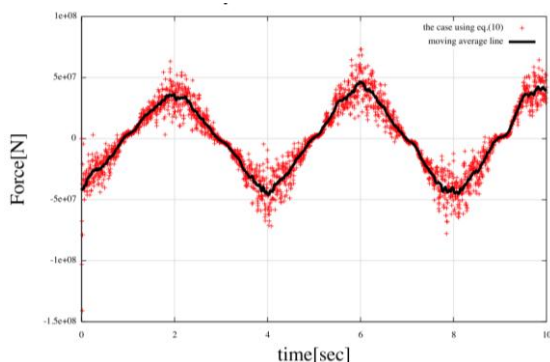


図. 6 非圧縮性が緩やかな場合の剛体壁に作用する力

移動平均値を示している。図. 6 及び図. 7 によれば、元々算出される力の値は、非圧縮性が緩やかな場合でも大きな変動を示しているが、非圧縮条件を強く課すことによって算出される力の変動がより大きくなることを示唆しており、解析の安定性に影響を与えることが示唆された。

図. 8, 9, 及び 10 に HMPS によるダムブレイクの変形図を示す。図. 8, 9, 10 によれば、自重によって崩壊した水柱が壁面にぶつかり、跳ね返されている様子が再現されており、妥当な解析結果を得ていることを示している。また、図. 11 及び図. 12 にダムブレイクにおける力学的エネルギー量及び力学的エネルギーの変動量の時系列をそれぞれ示す。本来であれば、本解析においては粘性力を考慮しておらず、手法としてもハミルトニアンを保存するように手法が構築されていることから、この力学的エネルギーは保存されるべきであるが、本解析では、壁境界に設置されている粒子の固定条件を本来のラグランジェの未定乗数法ではなく、他の粒子法と同様に毎ステップ粒子位置を補正するような処理をしているため、壁面への流体粒子の衝

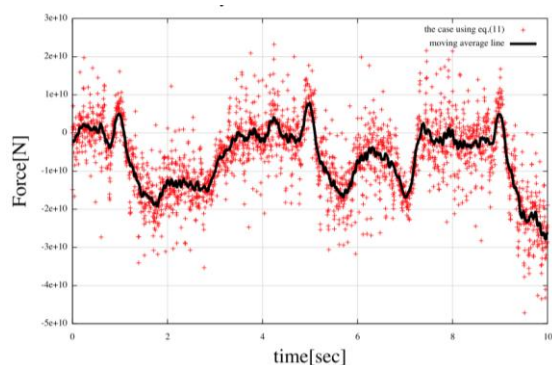


図. 7 非圧縮性が強い場合の剛体壁に作用する力

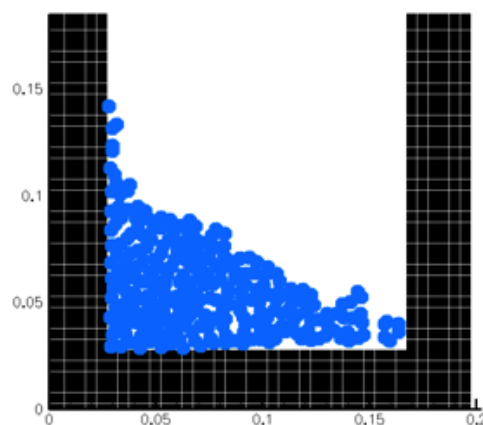


図. 8 HMPS による解析の変形図 [0.12s]

突によって壁面粒子に分配された力学的エネルギーがそのまま廃棄されるような処理になっており、この結果力学的エネルギーの減少が生じている。図. 11 及び 12 によれば、力学的エネルギーの損失量が最も大きいのは 0.10[s] から 0.20[s] 程度の範囲であり、図. 9 における変形図によれば、このあたりの時刻においては、崩壊した水柱の先端が対面する壁面に強く衝突していることを示しており、本解析におけるエネルギー損失がこれによって生じていることを裏付けている。一方、力学的エネルギーの変動量が小さい 0.3[s] あたりでは、図. 10 のように対面する壁面への衝突から戻っていく方向に変形が推移しており、衝突による影響が卓越していないことがわかる。これについては、境界条件の取り扱いを本来の方法に変更することによって改善できると思われるが、壁面への流体粒子の衝突の影響が卓越していない時刻においては比較的力学的エネルギー量は安定して推移しており、少なくとも力学的エネルギーの増加などは生じておらず、妥当な結果を示していると考えられる。

HMPS については、支配方程式が解析力学に基づくラグランジアンを基礎としたものに

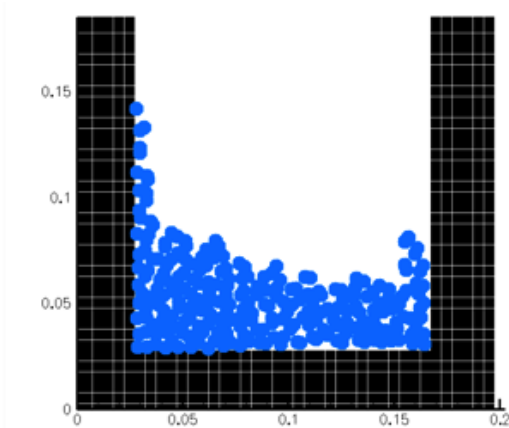


図. 9 HMPs による解析の変形図[0.15s]

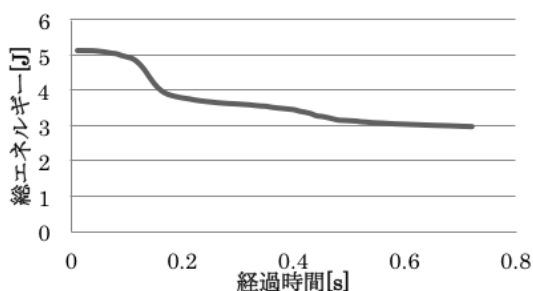


図. 11 総力学的エネルギー

なっており、従来用いられている運動方程式に基づく定式化とは異なったものになっている。このため、有限要素法と HMPs の混合法を開発するためには、固体解析における有限要素法の定式化としては、連続体の運動方程式を仮想仕事の原理に基づいて弱形式化することが一般的であるが、これを HMPs に合わせてシンプレクティックスキームによって時間積分をするために、ラグランジアンを用いて記述しなければならないことが明らかになった。一般的なラグランジアンは、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの差として与えられており、これによって有限要素法の定式化が可能であるかどうかを確認した。ここで、連続体における運動エネルギーとポテンシャルエネルギーは、有限要素法における内挿関数によって変位場と速度場を離散化し、これによって作成されたラグランジアンをラグランジェの運動方程式に代入することによって、従来の方法によって運動方程式を弱定式化したうえで離散化したものと、同様のマトリクス形式のつり合い方程式が得られることを確認した。このため、一般的に用いられている運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの差として示されたラグランジアンは、一般的な有限要素法の定式化と等価な運動方程式を与えることが示され、これをもとにシンプレクティックスキームを適用することによって解析の実

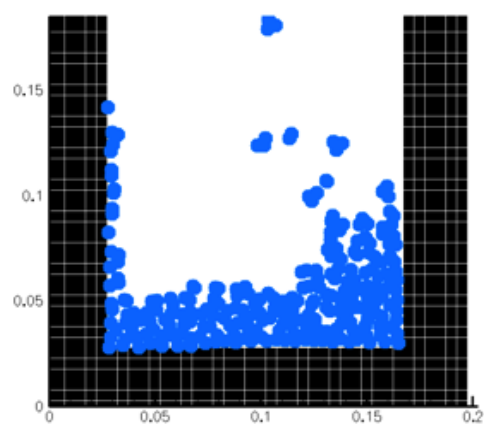


図. 10 HMPs による解析の変形図[0.30s]

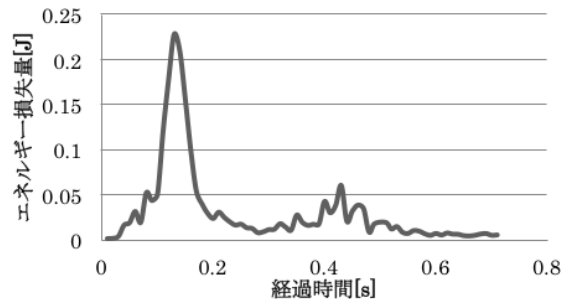


図. 12 総力学的エネルギーの変動量

施が可能になることが示唆された。

また、HMPs と有限要素法の混合法を構築するために必要な HMPs 領域と有限要素法領域における境界条件については、越塚らによって提案されている壁境界のようにホロノミックな境界条件としては表すことができず、非ホロノミックな境界条件とする必要があることが明らかになった。さらに、粒子の位置が時間の関数としてあらわされることから、この境界条件はレオノーマスな境界条件となることとなるため、HMPs と有限要素法の混合法を構築するためには、非ホロノミックかつレオノーマスな境界条件を考慮することが可能である手法の開発をする必要があることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① Y. Kawamura, Y. Kobayashi, Basic study on application of discrete element method for slope failure analysis, 査読有, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012
- ② Takaaki Fuse, Yoshikazu Kobayashi,

Solid-Fluid Interaction Analysis with
Compulsory Displacement by Smoothed
Particle Hydrodynamics, 査読有,
Proceedings of the Twelfth
International Summer Symposium, Chiba,
Japan, pp.77-80, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 義和 (KOBAYASHI YOSHIKAZU)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：20339253

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし