

CPU 環境での大規模 3 次元地震応答解析の高度化

東京大学	学生会員	○日下部 亮太
東京大学	正会員	市村 強
東京大学	正会員	藤田 航平
海洋研究開発機構	正会員	堀 宗朗
東京大学	正会員	Lalith Wijerathne

1. 背景

大規模な地震は、様々な被害を引き起こしてきた。この被害を軽減するために、物理シミュレーションに基づく地震応答解析により地震時の地盤・構造物の複雑な応答を再現するための数多くの研究がされてきた。近年、IT 技術を活用して生活を豊かにするという概念である、デジタルフォーメーションが注目を集めている。その 1 つに、デジタルツインを使った都市の意思決定手法がある。デジタルツインとは、サイバー空間に構築された現実の都市の精巧なモデルである。デジタルツイン上で経済シミュレーションや交通シミュレーションなどの仮想実験を行い、その結果を踏まえて、意思決定を行う。このデジタルツイン上での仮想実験の中でも特に実現が困難であると考えられるのが、地震シミュレーションである。デジタルツイン上での地震シミュレーションでは、地盤と構造物を含む高詳細な都市モデルに対して、複数の構成則を組み込んだ高分解能な 3 次元解析を行う必要がある。そのため、必要な計算コストは膨大になりうる。

大規模な 3 次元地震応答解析のための手法の研究は計算科学・計算機科学の分野で精力的に行われており、東京の山手線内の領域を対象とした 1 兆自由度を超えるような大規模な解析も実現している [1]。しかし、これらの研究では、主に計算アルゴリズムの開発に焦点が当てられており、地盤などの構成則に関しては、簡易な RO モデルなどが用いられている。デジタルツイン上での地震シミュレーションを行うには、地盤や構造物の応答を正確に再現するために、複雑な構成則を組み込む必要がある。

本研究では、その試みの 1 つとして、複雑な構成則を使った地盤応答解析の 1 つである液状化解析を対象とし、計算科学・計算機科学の分野で開発されてきた手法をもとに、大規模 3 次元液状化解析手法を開発した [2]。近年のスーパーコンピュータ開発の主流の 1 つである広い SIMD 幅を持つメニーコア CPU が搭載された計算機を対象として、計算機のアーキテクチャを考慮しながら液状化解析に適したアルゴリズムを開発した。

2. 問題設定

本研究では、非構造 2 次要素を用いた有限要素法に基づく動的 3 次元地震応答解析を対象とする。また、構成則としては、非排水条件下での液状化解析の構成則を使用した。支配方程式を式(1)に示す。ただし、空間方向には有限要素法で、時間方向には Newmark-beta 法で離散化されている。

$$\left(\frac{4}{dt^2} \mathbf{M} + \frac{2}{dt} \mathbf{C}^{(n-1)} + \mathbf{K}^{(n-1)} \right) \delta \mathbf{u} = \mathbf{f}^{(n)} - \mathbf{q}^{(n-1)} + \mathbf{C}^{(n-1)} \mathbf{v}^{(n-1)} + \mathbf{M} \left(\mathbf{a}^{(n-1)} + \frac{4}{dt} \mathbf{v}^{(n-1)} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ はそれぞれ、質量行列、レイリー減衰行列、剛性行列、 $\mathbf{f}$, $\mathbf{q}$, $\delta \mathbf{u}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{a}$ はそれぞれ、外力、内力、変位増分、速度、加速度、 dt は時間ステップ幅である。また、 $^{(n)}$ は変数*が第 n 時間ステップの変数であることを示す。各時間ステップで、この支配方程式を解き、構成則に基づき、内力 $\mathbf{q}$ と剛性 $\mathbf{K}$ を更新する。

3. 手法

本研究では、液状化解析を考慮していない大規模 3 次元地震応答解析手法[1]をもとに、大規模 3 次元液状化解析手法を開発した。近年のスーパーコンピュータ開発の主流である SIMD 幅の広い CPU を搭載した計算機を対象として、この計算機のアーキテクチャと液状化解析の特徴を考慮したアルゴリズムを構築した。

キーワード 地震応答解析, 有限要素法, 大規模解析

連絡先 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 東京大学 地震研究所 TEL 03-5841-8262

本研究が基として大規模解析手法[1]では、支配方程式の求解に可変的前処理付き共役勾配法を用いることで、MPI 並列と OpenMP 並列による大規模な並列計算においても高い性能を発揮している。その一方で、構成則には簡易的な RO モデルが使われており、液状化解析を扱うには、構成則を組み込む必要がある。さらに求解アルゴリズムが液状化解析を想定していないため、この手法をそのまま液状化解析に適用しても、性能が低下してしまう。大規模並列計算において最も重要なのが計算負荷分散である。並列計算時に各 CPU の計算量が不均一であると、計算資源が有効に利用できず、性能が低下してしまう。液状化解析では、液状化層内の地盤要素は非線形構成則などの計算量の多いが、基盤層や構造物など線形構成則で計算する要素は計算量が少ない。既往手法では、要素物性を考慮せずに計算負荷分散を行っていたため、液状化解析にそのまま用いると、CPU ごとの計算量が偏ってしまう。そこで本研究では、要素物性を考慮した計算負荷分散手法を開発することで、計算量の偏りの解消を図った。まず、MPI プロセス間の計算負荷分散では、線形層と非線形層をそれぞれ分割し、各 MPI プロセスに、線形層の 1 分割と非線形層の 1 分割を割り当てることで、計算量の偏りの解消を図った。次に OpenMP スレッド間の計算負荷分散のために、要素の並べ替えを行った。既往手法では、線形要素と非線形要素が混在して配列に格納されていたが、この状態では、OpenMP 並列時にスレッド毎の線形要素・非線形要素の割当量に偏りが生じてしまう可能性がある。そこで、線形要素が配列の前半に、非線形要素が配列の後半になるように要素の並べ替える処理を解析の最初に行うこととした。これにより、線形要素の計算と非線形要素の計算を分離できるため、それぞれ別々に OpenMP 並列を行うことができ、計算量の偏りが解消されることが期待される。

既往手法では、支配方程式の求解に可変的前処理付き共役勾配法が使われている。この手法では、前処理の計算に混合精度演算やマルチグリッド法を用いることで、高速化を図っている。本研究では、この前処理の計算の際に、液状化現象は計算領域全体ではなく、局所的に発生するという特徴を考慮することで、液状化解析に適した前処理を開発した。

4. 数値解析

本研究の開発手法の性能計測を実施した。スーパーコンピュータシステム Oakforest-PACS (OFP) の 64 計算ノードを使用した。54,725,427 自由度の地盤モデルを使用し、時間ステップ幅 0.001 s、時間ステップ数 7500 の液状化解析を実施した。次の 3 ケースについて解析時間の比較を行った。SC14：液状化解析の特徴を考慮していない大規模 3 次元地震応答解析手法をそのまま液状化解析に適用したもの、Proposed1：本研究の開発手法のうち計算負荷分散手法を適用したもの、Proposed2：本研究の開発手法（計算負荷分散手法＋前処理の改良）。Proposed1 は SC14 と比較して、支配方程式の求解で 2.3 倍、構成則の計算で 12.8 倍の高速化を達成した。また、Proposed2 は proposed1 と比較して、支配方程式の求解が 13% 高速化し、解析全体としては SC14 と比較して 4.9 倍高速化した。

5. まとめ

本研究では、デジタルツイン上での複雑な構成則な構成則を使った大規模 3 次元地震応答解析にむけて、大規模 3 次元液状化解析の実現を図った。計算機のアーキテクチャと液状化解析の特徴を考慮することで効果的なアルゴリズムを構築した。開発手法は、液状化解析を想定していない大規模解析手法を使った場合と比較して、4.9 倍の高速化を実現した。

謝辞：液状化構成則の導入にあたり、東電設計株式会社の溜幸生博士、大塚悠一博士から有益なコメントをいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Ichimura, T., et al.: Physics-Based Urban Earthquake Simulation Enhanced by 10.7 BlnDOF × 30 K Time-Step Unstructured FE Non-Linear Seismic Wave Simulation, *SC'14: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, pp.15-26, 2014.
- [2] Kusakabe, R., Fujita, K., Ichimura, T., Hori, M., & Wijerathne, L.: A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis. *International Conference on Computational Science*, pp. 349-362, 2019