

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 16 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18110

研究課題名（和文）地震動増幅特性の評価のための、地盤-地下構造物群の3次元連成応答解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of three-dimensional ground-underground structure analysis method for evaluating ground motion amplification

研究代表者

藤田 航平 (Fujita, Kohei)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・特別研究員

研究者番号：00744856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：地下構造物群の周りでは地震時に複雑な波動場が生じ、地表において局所的な地震動増幅が発生する可能性がある。本研究ではこのような増幅特性の評価のため、地盤-地下構造物群の詳細な3次元連成解析を行うための技術開発を行った。ここでは、デジタル都市データから地盤と地下構造物群の大規模3D有限要素モデルを高速・並列・ロバストに自動構築する方法、及び、京コンピュータ全系において高い性能の出る有限要素法プログラムを開発した。

研究成果の概要（英文）：Complex waves can occur around underground structures in an earthquake, and cause localized ground motion amplification on surface. In this study, we developed methods to enable high-resolution three-dimensional analysis of ground-underground structure systems. Here, we developed an automated parallel method to generate large-scale three-dimensional finite-element models of ground-underground structure systems, and developed a finite-element solver capable of attaining high-performance on full K computer system.

研究分野：計算地震工学

キーワード：地震応答解析 高性能計算 有限要素法 地下構造物 メッシュ生成方法

1. 研究開始当初の背景

大都市の中心部では、地下街や地下鉄などの地下構造物と、高速道路や鉄道、高層建築物などの構造物が高密度で整備されている。上記のような高密度都市の特徴として、複雑な地下構造物の存在がある。地下トンネルが交差するような、3次元的に複雑な形状を持つ地下構造物の周囲では波動場が複雑に反射し、地表面応答が局所的に増幅する可能性がある。地下構造物による地震動の局所的な増幅現象を見積もるためには、地盤と地下構造物群を一体としてモデル化した3次元の高詳細地震応答解析を使うことが合理的である。この際、地盤・構造物群の形状が波動場に支配的な影響を与えるため、形状の正確なモデリングが重要となる。また、地上構造物の応答評価に使うため、これらの構造物の固有周波数までの時間分解能が必要となる。これらの要件を満たすには詳細な3次元動的有限要素解析が適切であるが、地盤-地下構造物群系の一体解析の実現には以下2点が課題となっている。

第一の課題は、解析対象領域の有限要素モデルの作成である。既往の研究では汎用メッシュ作成ソフトウェアを使ってトンネル等の複雑形状の3D有限要素モデルを作成することが一般的であるが、汎用メッシュ作成手法は完全ではないために大規模モデルを作成するには多大な労力(手作業を含むトライ・アンド・エラー)が必要となるのが現状である。都市規模の地盤-地下構造物群系の一体解析は大規模問題となるため、複雑形状問題に対して大規模な3次元有限要素モデルをロバスト・高速に自動生成する手法を開発する必要がある。

第二の課題は、地盤-地下構造物群系で意味のある解析(領域サイズ1km x 1km x 200m, 要素サイズ数10cm)を行う際に帰着する、1000億自由度規模の超大規模問題の数値解析の実現である。現状では、京コンピュータを使い、地盤単体の100億自由度解析は実現できているが、地盤-地下構造物群系の問題の解析には計算コストの削減が必要となっている。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では以下を目的とする。

- (1) 大規模3D有限要素モデルの自動構築手法の開発
- (2) 地盤-地下構造物群系の連成地震応答解析に使うことができる高性能有限要素法の開発
- (3) 京コンピュータ等の高性能計算機を使った連成地震応答解析の実施

3. 研究の方法

(1) 本研究では、まず、多数の物性・複雑形状からなる地盤-地下構造物連成モデルを作成するための並列非構造格子有限要素モデル生成手法を開発した。この方法では、対象領域をoctreeで分割し、各octree leafにマルチマテリアルマーチングキューブ法を適用することで、並列・ロバストに四面体要素メッシュを生成する(図1参照)。

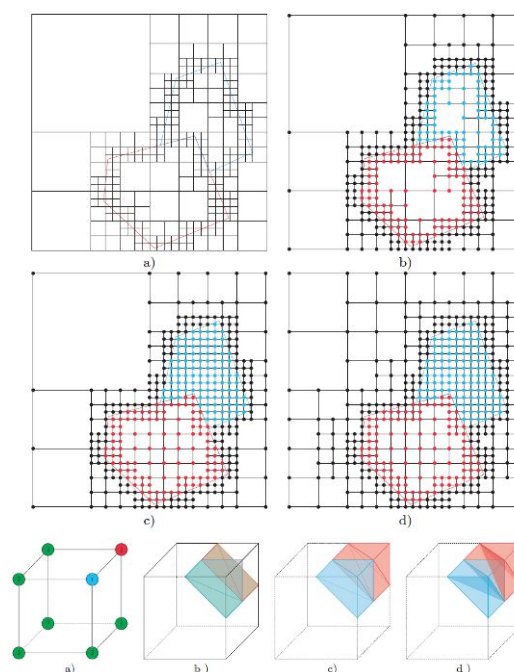


図1 モデル化手法の概要。上図：メッシュ生成に使うoctree構造(図中では2次元表記だが実際には3次元でoctree生成を行う)。下図：各octree leafを四面体に分割する手順。各octree leafで独立に四面体要素分割を実行できるため、複雑形状・多数の物性からなる問題の大規模有限要素モデルを並列・ロバストに生成できる。

(2) 次に、地盤震動解析プログラムGAMERAのアルゴリズム・実装を見直すことで、解析の高速化を図った。GAMERAは精度混合演算・マルチグリッド・可変前処理付き共役勾配法を使った非構造格子・動的な非線形有限要素法であり、2014年において高性能計算分野の最高の賞の一つであるGordon Bell Prizeのファイナリストに選ばれるなど高い性能が認められてきた。本研究ではGAMERAのアルゴリズムと実装を改善することで、さらなる高速化を達成する。ここでは、従来では問題全域を非構造格子で計算していたところを、構造格子と非構造格子を組み合わせて解析をすることで計算量・データアクセス量を大幅に削減した。その他に、SIMDやマルチコアといった計算機の構造にあわせたアルゴリズム開発とプログラム実装により計算性能を改善した。

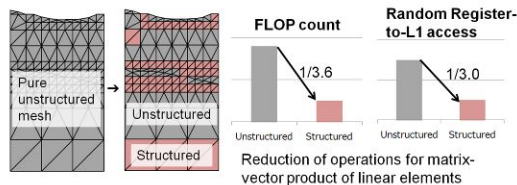


図 2 解析手法の高速化方法．対象領域のうち，単純形状部分は構造格子，複雑形状部分は非構造格子を使うことで，計算量(FLOP count)，データアクセス量(Random Register to L1 access)を大幅に減らすことができる．

4. 研究成果

(1)開発したメッシュ生成手法により，共有メモリ計算機 64 コアを使うことで，四面体二次要素 11,321,249,889 個(49,064,764,344 自由度)からなる複雑形状メッシュを 17 時間 22 分で作成できるようになるなど，大規模メッシュを高速・ロバストに作成できるようになった．また，作成したメッシュの要素品質の指標であるアスペクト比（解析結果の精度・解析ソルバーの収束性に影響する）が良好であることも確認された．この結果は Procedia Computer Science (2016)にて発表した．

(2)開発した解析手法により，京コンピュータ全系を使った性能計測問題において，標準的な解析手法である PCGE(3x3 ブロックヤコビ前処理付き CG 法)に比べて 8.55 倍の高速化を達成し，2014 年に開発した手法に比べて 3.68 倍の高速化を達成した(図 3 参照)．この成果は，SC15にて Gordon Bell Prize のファイナリストに選ばれ，また，SC16 にて Best Poster Award を受賞するなど高性能計算分野にて非常に高く評価されている．

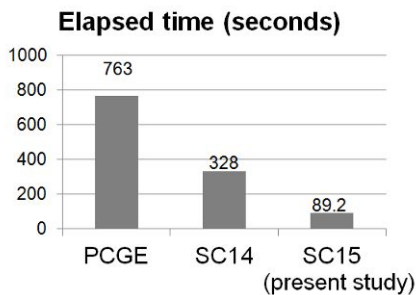


図 3 開発プログラムの性能．標準的な手法(PCGE)，及び，本課題開始前の計算手法(SC14)に比べて，高速解析が可能となった．

(3)生成した有限要素モデルと開発した解析手法が実際の問題で正常に動作することを確認するため，鉄筋コンクリート壁を対象に応答解析を実施した．ここでは，大きさ 2048mm x 250.5mm x 2048mm の異形鉄筋入りの鉄筋コンクリート壁を対象に要素サイズ

1mm でメッシュを生成した(四面体二次要素で，316,816,424 要素，432,132,505 節点，1,296,397,515 自由度)．図 4 に生成したメッシュを示す(鉄筋分のみ表示)．異形鉄筋の凹凸の突起が解像されたメッシュが生成されていることがわかる．図 5 に，壁底面固定で，壁上面に $(x,y,z)=(1\text{mm},0,0)$ の強制変位を与えた場合の歪・応力応答を示す．図から，鉄筋とモルタルの物性が異なることによる歪・応力分布の集中が解析できていることがわかる．このように，開発したメッシュ生成手法と解析手法を使うことで高詳細な 3 次元解析を実行できることがわかる．

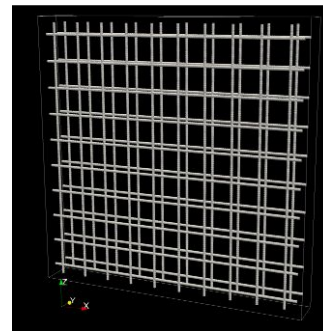


図 4 鉄筋コンクリート壁の有限要素モデル(要素サイズ 1mm，鉄筋部のみ表示)．異形鉄筋の凹凸部が陽に解像されたメッシュが生成されている．

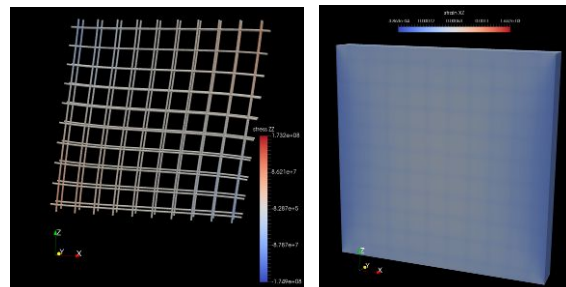


図 5 強制変位に対する鉄筋の応力応答分布．変位を 100 倍に拡大して表示している．右：強制変位に対する鉄筋コンクリート壁の歪応答分布．異形鉄筋の凹凸部が解析に反映されている．

本研究では，メッシュ生成手法と解析手法の開発により地盤-地下構造物群の解析の主要課題を解決した．今後は，メッシュ生成手法の入力データとなる地下構造物群の形状モデルをデジタル都市データから自動抽出する手法を開発し，都市規模の地震応答解析を実施する計画である．

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線) 〔雑誌論文〕(計 7 件)

Kohei Fujita, Keisuke Katsushima,
Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith
Madgedara, Octree-based

Multiple-material Parallel
Unstructured Mesh Generation Method
for Seismic Response Analysis of
Soil-Structure Systems, *Procedia
Computer Science*, 査読有, Vol. 80,
2016, pp. 1624-1634, ISSN 1877-0509,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.496>.

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura,
Development Of Large-Scale
Three-Dimensional Seismic Ground
Strain Response Analysis Method and
Its Application to Tokyo using Full K
Computer, *Journal of Earthquake and
Tsunami*, 査読有, Vol. 10, No. 4,
1640017,
doi:10.1142/S1793431116400170, 2016.

Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi,
Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith
Maddegadara, Acceleration of
Element-by-Element Kernel in
Unstructured Implicit Low-order
Finite-element Earthquake Simulation
using OpenACC on Pascal GPUs,
*Proceedings of Third Workshop on
Accelerator Programming Using
Directives*, 査読有, p.1-12, 2016,
doi>10.1109/WACCPD.2016.6.

Ichimura T, Fujita K, Errol Quinay P,
et al. Comprehensive Seismic Response
Analysis for Estimating the Seismic
Behavior of Buried Pipelines Enhanced
by Three-Dimensional Dynamic Finite
Element Analysis of Ground Motion and
Soil Amplification. *ASME. J. Pressure
Vessel Technol.*, 査読有,
2016;138(5):051801-051801-8.
doi:10.1115/1.4033250.

Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Pher
Errol Balde Quinay, Lalith
Maddegadara, Muneo Hori, Seizo Tanaka,
Yoshihisa Shizawa, Hiroshi Kobayashi
and Kazuo Minami, Implicit Nonlinear
Wave Simulation with 1.08T DOF and
0.270T Unstructured Finite Elements
to Enhance Comprehensive Earthquake
Simulation, SC15: International
Conference for High Performance
Computing, Networking, Storage and
Analysis, 査読有, 2015,
doi>10.1145/2807591.2807674.

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura,
Muneo Hori, Lalith Maddegadara and
Seizo Tanaka, Scalable many-case
urban earthquake simulation method
for stochastic earthquake disaster
estimation, *Procedia Computer Science*,
査読有, 51, pp 1483-1493, 2015,
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.338>.

Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA,
Seizo TANAKA, Muneo HORI, Lalith
MADDEGEDARA, URBAN EARTHQUAKE
SIMULATION USING 3D NONLINEAR GROUND
MOTION ANALYSIS AND MULTI-SCENARIO
BUILDING RESPONSE ANALYSIS, *Journal
of Japan Society of Civil Engineers*,
Ser. A1 (Structural Engineering &
Earthquake Engineering (SE/EE)), 査
読有, 71, 4, I_680-I_688, 2015, doi:
10.2208/jscjsee.71.I_680

[学会発表](計12件)

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura,
Kentaro Koyama, Masashi Horikoshi,
Hikaru Inoue, Larry Meadows, Seizo
Tanaka, Muneo Hori, Maddegadara Lalith
and Takane Hori, A Fast Implicit Solver
with Low Memory Footprint and High
Scalability for Comprehensive
Earthquake Simulation System,
*Research Poster for SC16:
International Conference for High
Performance Computing, Networking,
Storage and Analysis, Salt Lake City
(USA)*, 2016年11月13-28日.

藤田航平, 市村強, 堀宗朗, 大規模三次
元非線形動的有限要素解析による東京の
地盤地震動シミュレーション, 第36回地
震工学研究発表会, 金沢歌劇座(金沢市・
石川県), 2016年10月17-18日.

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo
Hori, Development of High-Performance
Finite-Element Solver and Application
to Seismic Ground Strain Analysis of
Tokyo, *Techno-Ocean 2016*, Kobe
Convention Center (神戸市・兵庫県),
2016年10月6-8日.

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, and
Muneo Hori, Integrated earthquake
simulation enhanced with fast wave
propagation analysis using full K
computer, WCCM XII & APCOM VI (The 12th
World Congress on Computational
Mechanics and 6th Asia-Pacific
Congress on Computational Mechanics),
Seoul (South Korea), 2016年7月27日.

Keisuke Katsushima, Kohei Fujita,
Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori and
Lalith Wijerathne, Parallel and Robust
Tetrahedral Mesh Generation Method for
Seismic Response Analysis of
Structures, WCCM XII & APCOM VI (The
12th World Congress on Computational
Mechanics and 6th Asia-Pacific
Congress on Computational Mechanics),
Seoul (South Korea), 2016年7月27日.

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, and
Muneo Hori, Urban earthquake
simulation of Tokyo metropolis using

full K computer, European Geosciences Union General Assembly 2016, Vienna, (Austria), 2016年4月22日(招待講演). 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会「計算物質科学の今と未来」藤田航平:「『京』全系を使った都市地震シミュレーション」, 東京大学物性研究所 6階 大講義室(柏市・千葉県), 2016年4月5日(招待講演).

スパコン「京」がひらく社会と科学 シンポジウム「スーパーコンピュータの今とこれから」, 藤田航平:「京」による都市地震災害の大規模シミュレーション, よみうり大手町ホール(千代田区・東京都), 2016年1月29日.

藤田航平, 市村強, 田中聖三, 堀宗朗, Lalith MADDEGEDARA: 大規模地盤震動解析を使った都市地震シミュレーション, 土木学会平成27年度全国大会第70回年次学術講演会, 岡山大学 津島キャンパス(岡山県・岡山市), 2015年9月18日.

藤田航平, 市村強, 田中聖三, 堀宗朗, Lalith Maddegedara: 3次元非構造格子有限要素法を使った大規模地盤地震動解析, 第20回計算工学講演会, つくば国際会議場(つくば市・茨城県), 2015年6月8-10日.

Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Maddegedara, Seizo Tanaka: Scalable multicase urban earthquake simulation method for stochastic earthquake disaster estimation, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE, Reykjavik (Iceland), 2015年6月2日.

藤田航平, 市村強, 田中聖三, 堀宗朗, Lalith Maddegedara: 3次元地盤震動解析のための高速な非構造格子有限要素法ソルバーの開発, 第18回応用力学シンポジウム, 金沢大学角間キャンパス(金沢市・石川県), 2015年5月16日.

[その他]

Best Paper Award, Third Workshop on Accelerator Programming Using Directives (WACCPD), (Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Maddegedara, Acceleration of Element-by-Element Kernel in Unstructured Implicit Low-order Finite-element Earthquake Simulation using OpenACC on Pascal GPUs), 2016.

Best Poster Award, SC16: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, (Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Kentaro Koyama, Masashi Horikoshi, Hikaru Inoue, Larry Meadows, Seizo Tanaka, Muneo

Hori, Maddegedara Lalith and Takane Hori, A Fast Implicit Solver with Low Memory Footprint and High Scalability for Comprehensive Earthquake Simulation System), 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 航平 (FUJITA, Kohei)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究機構・特別研究員

研究者番号: 00744856