

HPC による地盤構造を考慮した 広域の構造物地震応答解析システムの開発

藤田航平¹, 市村強², 堀宗朗³, M. L. L. WIJERATHNE⁴, 田中聖三⁵

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: fujita@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: lalith@eri.u-tokyo.ac.jp

⁵正会員 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: stanaka@eri.u-tokyo.ac.jp

本研究では、設計実務で使われる地盤・構造物の地震応答解析に高性能計算 (High Performance Computing, HPC) 手法を適用し、これらの解析プログラムを組み合わせることで、地盤構造を考慮した地震応答解析を広域で行うことができるシステムを開発する。ここでは、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) に蓄えられた都市データから地盤・構造物の応答解析プログラムに入力する都市モデルを自動構築し、地盤応答解析で得られる地表面での応答波形を構造物応答解析の入力波形として使う。大型計算機上でこのようなシステムを使うことで、数十万棟の広域の構造物の応答解析や、入力地震動・地盤・構造物の性質にばらつきを与えた多数の解析ケースを短時間で解析できるようになる。

Key Words : structural response analysis, wave amplification analysis, high performance computing

1. はじめに

想定される首都直下地震や東海・東南海・南海地震に対して効果的な防災対策をとるには、広域の地震被害を見積もることが重要である。都市の地盤には多様性があり、局所的な地盤の性質に応じて被害の様相は大きく異なることが予測される。また、各建物の特徴により、同じ入力波に対しての被害はそれぞれ異なる。一方で、入力地震動・ボーリング調査等で得られた地盤の物性・建物の物性などには大きなばらつきがあり、これらのばらつきを考慮した災害予測は地震防災の高度化に必要である。

現在の災害予測は損傷度曲線を使用する方法など、過去の災害データの統計分析によるものが主であり、入力地震や地盤特性を考慮した災害予測を高精度・高分解能で行うことは難しい。一方で、物理ベースの計算手法を使った地盤・構造物の応答解析手法は簡易的なものから詳細なものまで各種開発されており、実務設計の面からは構造物の重要度に合わせてこれらの解析手法の中から適切なものを選び、実用に供してきた^{1),2),3),4)}。そこで著者らは物理ベースの数値計算手法を組み合わせることで都市の統合的な地震被害を予測する統合地震シミュレータ (Integrated Earthquake Simulator, IES)⁵⁾の開

発を進めてきた。IES は地理情報システム (Geographic Information System, GIS) から都市を構成する建物などの情報を読み込み、震源から地表までの地震波の伝播・構造物の応答・住民の避難などの地震災害の各段階を数値解析プログラムを使って解析することで、災害に対する都市の統合的な応答を予測するものである。

一方で、近年においても計算機の進歩は著しく、最新の大型計算機は一昔前の PC の 4-6 桁も高速なものになっている⁶⁾。また、ハードウェアの整備に加え、大型計算機を有効に使うための並列計算のインタフェースは各種整備されており、比較的少ない労力で並列計算プログラムを開発し、工学的応用に対して使うことが可能となっている^{6),7)}。以上を踏まえ、著者らは上記のような高性能計算 (High Performance Computing, HPC) 手法を IES に適用し、広域の都市に対しての適用性を向上させてきた^{8),9)}。ここでは、前述の初期の IES で実装されていた震源から地表までの地震波の伝播と住民の避難シミュレーションは置いておき、構造物の地震応答シミュレーションに焦点を絞って開発を進めてきた。本研究ではこの HPC が実装された IES を拡張し、HPC を適用した地盤応答解析と構造物の地震応答解析を組み合わせることで広域の都市の各構造物に対して地盤特性を考慮した地震応答を解析するシステムを構築す

る．個々の解析には実務設計で用いられる手法を使うことを前提とし，目的（精度）や計算資源・計算時間に応じてそれぞれの解析に使う解析プログラムを選ぶことができるような設計とする．旧来の IES との差は広域・多数回の解析が容易に行えるようになる点にあり，これにより複数のパラメータに対して解析を行うことで入力地震動・地盤・構造物のばらつきに対する構造物の応答を解析することが可能となる．

2. 手法

IES では災害の各段階を解析する複数の数値解析プログラムを組み合わせることで地震に対する都市の統合的な被害予測を行う．ここでは，実在の都市を対象にシミュレーションを行うため，GIS 上に蓄えられた都市データから各数値解析プログラムにおいて都市の形質を表す都市モデルを構築し，先に行う数値解析の出力を次の数値解析プログラムの入力に使う．広域の都市を対象に適用できるように，IES では上記の都市モデルの構築や出力データの変換を自動・ロバストに行うデータ変換モジュールを開発してきた^{10),11),12)}．

本研究では，GIS に蓄えられた建物データを地盤応答解析と構造物応答解析用の都市モデルに変換し，地盤応答解析で得られた出力波形を構造物応答解析に入力する．以下，地盤応答解析・構造物応答解析手法を説明した上で，これらの解析手法を統合する方法を説明する．また，以上の手法に対する HPC の適用方法について説明する．

(1) 解析手法

a) 地盤応答解析

地盤の応答解析には設計実務で用いられる等価線形化解析¹⁾を使い，工学的基盤層上面での波形を入力に地表面での応答波形を求める．等価線形化解析は地盤を成層構造と仮定し，各層のひずみ依存の非線形な物性を有効ひずみ γ_{eff} における物性値で代表して周波数領域で線形計算するものである．その際，各層での有効ひずみ γ_{eff} は各層での時刻歴のひずみの最大値である最大ひずみ γ_{max} を用いて

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\text{max}},$$

と表せると仮定し，有効ひずみが一定値に収束するまで繰り返し周波数領域での線形計算を行うことで地盤の非線形挙動を簡易的に解析する手法である．本研究ではパラメータ α には一般的に用いられる値 0.65 を用い，地盤の非線形モデルに Hardin-Drnevich モデル¹³⁾

$$G = \frac{G_0}{1.0 + \gamma/\gamma_r},$$

$$h = h_{\text{max}}(1.0 - G/G_0),$$

を用いた．ここで， G : せん断剛性率， G_0 : 初期せん断剛性率， γ : せん断ひずみ， γ_r : 規準せん断ひずみ， h : 減衰定数， h_{max} : 最大減衰定数である．等価線形化解析で用いた周波数領域での線形計算の詳細は^{2),3)}に詳しい．

地盤応答解析の入力は基盤層上面での加速度入力波形，地盤の層数及び各層の厚さと物性（初期せん断剛性率，最大減衰定数，規準せん断ひずみ，単位体積重量）であり，出力は地表での加速度応答波形である．

b) 構造物応答解析

構造物の地震応答解析には構造物の梁・柱を非線形バネでモデル化し，梁・柱の接合部に質点を設定する One Component Model (OCM)⁴⁾を使う．ここでは，梁はせん断バネと両端での二つの回転バネを用いてモデル化し，柱はせん断バネ・軸方向のバネと，両端での二つの回転バネでモデル化する．本研究では，せん断バネに Takeda モデル¹⁴⁾，軸方向のバネに Axial Stiffness Model を使う．構造物底面における時刻歴加速度波形を与え，非線形時刻歴解析を行う．

入力となる都市データには各構造物の構造部材の配置や物性情報は含まれていないため，GIS に含まれる構造物外形情報から RC 構造物の設計指針¹⁵⁾に沿うように階数や各階の質量，バネ定数等のパラメータを推測・変換するモジュールを開発した．

構造物応答解析の入力は地表での加速度波形と構造物モデルであり，出力は各階での変位の時刻歴である．

(2) 統合手法と HPC の適用方法

各構造物直下の地盤の応答解析を行い，その結果を構造物の応答解析に用いる場合，(i) 各構造物ごとに地盤応答解析と地震応答解析を行う方法と，(ii) 全地点での地盤応答解析を行った後に全構造物の地震応答解析を行う方法の 2 種類が考えられる．(i) の方法は地盤応答解析の結果を出力する必要が無い半面，3 次元解析手法など，全地点の応答解析を一度に行う地盤応答解析には対応できず，拡張性に乏しい．そこで本研究では (ii) の方法で地盤応答解析と構造物応答解析を統合する．この際，地盤応答解析から構造物応答解析へのデータの受け渡しのフォーマットを統一することで，目的に応じて各種の解析手法を地盤・構造物の応答解析に使うことができるようになる．

多数の地盤・構造物の応答解析を行う場合，現実的な時間内で解析を行うには計算資源の増減に応じて問題規模の拡大・計算時間の短縮を図ることができるスケラブルな並列解析プログラムが必要となる．本研究で用いる地盤・構造物の応答解析手法は地点ごと・構造物ごとに独立しているため，各地点の解析を一つのプロセスが受け持ち，複数のプロセスで解析を行うことで同時に複数地点の解析を行うことができる．各プロ

セス間では入力データの受け渡しを除いて情報のやり取りは必要ないため、適切に負荷を分散することで高いスケーラビリティが期待できる。一方で、本研究のように各解析プログラムを統合する際にデータの受け渡しをハードディスクへの書き出し・読み込みを通じて行う場合、問題規模に応じて書き出し・読み込みコストが大きくなる。従って、並列解析プログラムの実装時にはプロセス間の負荷分散に加え、ファイル入出力の高速化が重要となる。

本研究では数百万棟といった大規模な問題に対応できるよう、分散メモリ型の並列化手法を使う。プログラム開発には C++ と Message Passing Interface (MPI)⁷⁾ を使い、MPI 2.0 で整備されたファイル入出力関数 (MPI-IO) を使うことで高速なファイル入出力を行う。

a) 地盤応答解析

地盤物性や層厚等のパラメータにばらつきを与え、応答のばらつきを評価する目的で使用することを念頭に、一度の解析で多数のケースが解析できるよう、MPI のコミュニケータを分割し、各ケースごとに独立に解析を行う。ここでは、各解析ケースのマスタープロセスが入力データを読み込み、各スレーブプロセスに担当分を送信する。負荷分散には解析地点の層数を用いた静的負荷分散を使う。

スケーラブルなプログラムの開発にはファイル出力の高速化が重要である。そこで、地表面での出力波形の書き出しには binary フォーマットを使う。地点毎にファイルを出力すると多数の小さなファイルを出力することとなり、大きなオーバーヘッドが生じる。そこで各 GIS タイル毎に含まれる地点をまとめて一つのファイルに出力する。GIS タイルに含まれる地点は複数のプロセスに跨って計算されるため、解析結果を同一のファイルに出力するには通常一つのプロセスに結果を集めた上で解析結果を出力する必要がある。しかし、この方法はプロセス間で大きな通信が必要となることに加え、一つの GIS タイルに含まれる地点数が多い場合には解析結果が単一の計算機のメモリに乗りきらなくなる。そこで本研究では MPI-IO による集団出力 (collective write) 関数を使うことで GIS タイル単位で出力を行う。集団出力関数とは、同一のファイルに対して複数プロセスが集団で書き込みを行う関数で、一つのプロセスに解析結果をまとめる必要なく、複数プロセスの書き込みをハードウェア・ソフトウェアで最適化することで高速に書き出しを行うことができる¹⁶⁾。集団出力関数にはファイル書き出しの開始と終了を分けて行う関数があり、対応したシステム (ハードウェア・ソフトウェア) を使うことでファイル入出力と計算を同時に行うことができる。本研究ではこの関数を使って、次の GIS タイルに含まれる地点の解析時間とファイル出力をオー

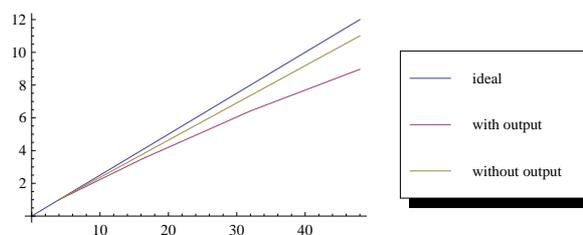


図-1 地盤応答解析の高速化率。横軸はプロセス数、縦軸は4プロセスに対する高速化率。With output のケースではファイル出力と計算のオーバーラップは行っていない。

バーラップさせることで書き出し時間を隠蔽する。

図 1 に地盤応答解析の高速化率 (strong scaling) を示す。ここでは、評価地点が 253,405 点、すべての地点で層数が 3、解析ステップ数 8,192 である問題に対して、6 コア Intel Xeon X5680 (3.33GHz) を 2 つ、48GB DDR3 メモリを搭載した計算ノード 24 台からなる計算クラスタを用いて測定を行った。クラスタの計算ノード間は QLogic 12200 InfiniBand Switch で接続されている。横軸は使用したプロセス数、縦軸は 4 プロセスに対する高速化率を示している。図から、出力が無い場合 (without output)、並列化効率は 48 プロセスで 92% 程度、出力がある場合 (with output) で 75% 程度となっていることがわかる。なお、with output の場合はファイル出力と計算のオーバーラップは行っていない。対応したシステムの使用により高速化率の向上が期待できる。

HPC を使わずに広範囲に対して複数ケースの応答解析を行おうとした場合、スクリプトを用いて複数台のコンピュータ上で解析プログラムを多数呼び出すこととなり、多数のファイル入出力やコンピュータ間のファイル転送が必要となる。また、負荷分散を手動で行う必要があることや、プログラム・入出力ファイルが複数台のコンピュータに散らばることでファイル管理が煩雑になるなど、効率的に計算資源を活用するにはプログラム実行者に知識・経験が必要となる。HPC を使うことでプログラム実行者は解析ケースのパラメータを設定するだけで大規模・多数の解析ケースを実行でき、一か所にプログラムや入出力ファイルをまとめることでシステムの保守が容易となる。

b) 構造物応答解析

著者らは広域の構造物の地震応答シミュレーションを行うため、分散メモリ型の並列解析プログラムを開発してきた⁹⁾。地盤応答解析プログラムと同様に、構造物応答解析プログラムでは各プロセスは担当の構造物の応答解析を行い、入出力を除いて各プロセス間での通信はない。負荷分散には過去の解析所要時間を使い、静的負荷分散を用いている。解析結果の書き出しには MPI-IO の集団出力関数を用いている。以上の構造物応

表-1 地盤物性値

層番号	V_s m/s	G_{max} tf/ms ²	ρ tf/m ³	h_{max}	γ_r
1	120	26,640	1.85	0.18	0.14
2	220	72,600	1.5	0.20	0.09
3	300	135,000	1.5	0.22	0.15

答解析プログラムでは、すべての構造物に対して同一の入力波形を使っているため、本研究ではこのプログラムに変更を加え、複数プロセスが同一のファイルを開き、ファイルのうち必要な部分を各プロセスが選択的に読み込む MPI-IO の集団入力 (collective read) 関数を使って各構造物直下での時刻歴波形を入力する。

3. 適用例

(1) 広域への適用

解析例として 253,405 棟の構造物からなる東京の 8.0×7.5km の一街区を設定する。ここでは、GIS データから自動的に構造物のモデルを作成し、 x 方向に変化する以下の仮想的な成層構造地盤モデルを使う。

$$h_i = 5.0 + 10.0 x/\bar{x}, \quad (i = 1, 2, 3)$$

ここで h_i [m] は地表から数えた第 i 番目の層の厚さであり、 x [m] は街区の左下の角を原点とした場合の x 座標、 \bar{x} [m] は解析領域の x 方向の長さで、この場合は 8,000m である。各層の物性を表 1 に示す。

まず、基盤層上面に 2007 年新潟県中越沖地震での観測波形 (KiK-net¹⁷⁾ NIGH13, 牧, station 2) を入力し、地盤応答解析を行う。ここで、時間増分は 0.01s、解析ステップ数は 8,192 である。図 2 に地表面での最大加速度の解析結果を示す。図から、 x 方向に応答が変化している様子が見える。

次に得られた波形を構造物応答解析に入力する。図 3 に最大変位の解析結果を示す。図 4 に図 3 中央部白色の領域を拡大して表示する。以上より、本手法を用いることで広域で地盤構造を考慮した構造物の地震応答が解析できることがわかる。

(2) 地盤構造の変化に対する構造物応答の比較

仮想的な都市を対象に、地盤性質を変化させた場合の構造物の応答解析結果の変化を調べる。ここでは、11,169 棟の構造物からなる東京の 2.0×1.5km の一街区の GIS データから構造物モデルを作成し、地盤には x 方向に変化する以下の成層構造を仮定した。

$$h_i = 5.0 + \alpha x/\bar{x}, \quad (i = 1, 2, 3)$$

ここで表記は前記の適用例と同様とし、 $\bar{x} = 2000$ m、各層の物性は表 1 のものを用いた。 α を 0.0, 5.0, 10.0, 15.0 と変化させた 4 つのモデルに対し解析を行う。

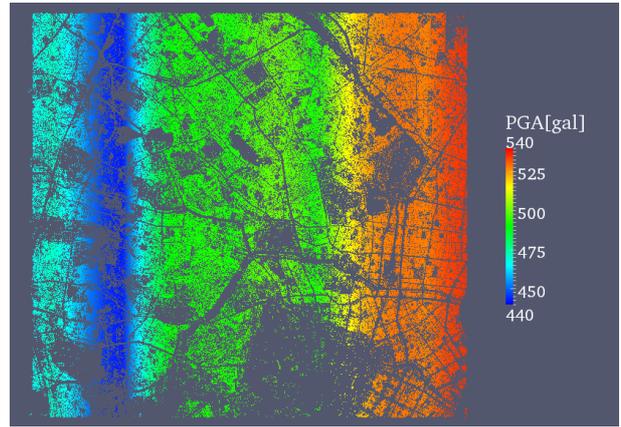


図-2 地盤応答解析結果 (地表面での最大加速度)

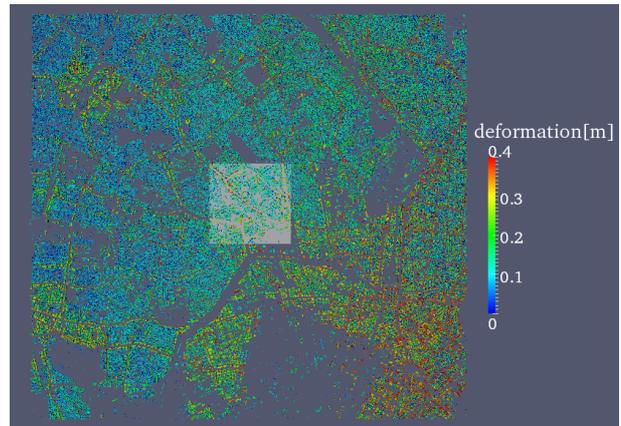


図-3 構造物応答解析結果 (最大変位)

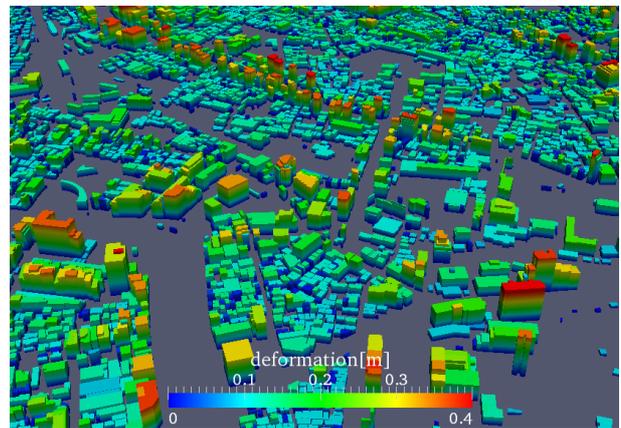


図-4 構造物応答解析結果 (最大変位) . 図 3 の中央部白色の領域を拡大 .

基盤層上面に適用例 (1) と同じ波形を入力した際の地表面での最大加速度の解析結果を図 5 に示す。図から、層厚に応じて地盤応答が変化している様子が見える。

次に得られた波形を構造物応答解析に入力する。図 6 に構造物の最大変位を示す。図から、 α の増加に伴い、領域左下の建物群の応答が大きくなっているなど、地

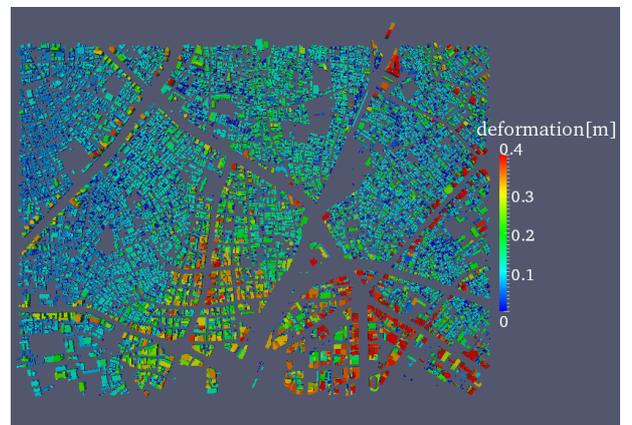
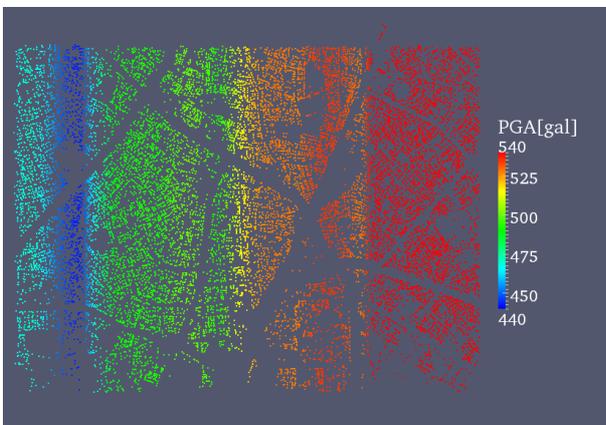
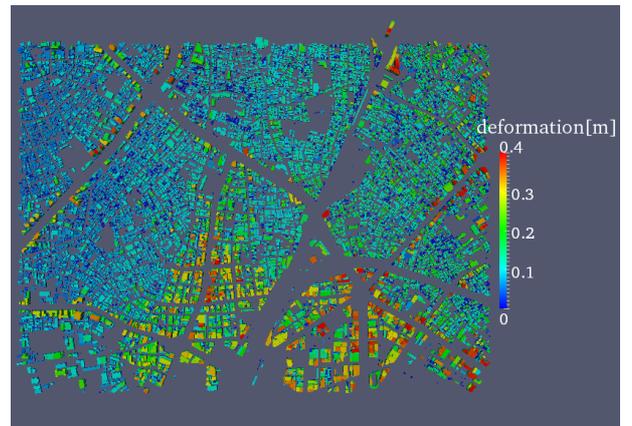
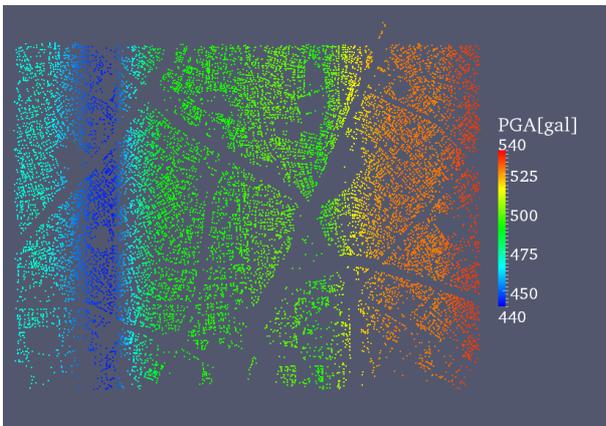
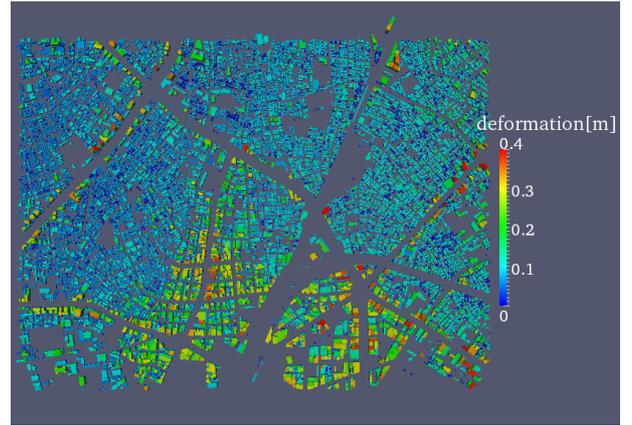
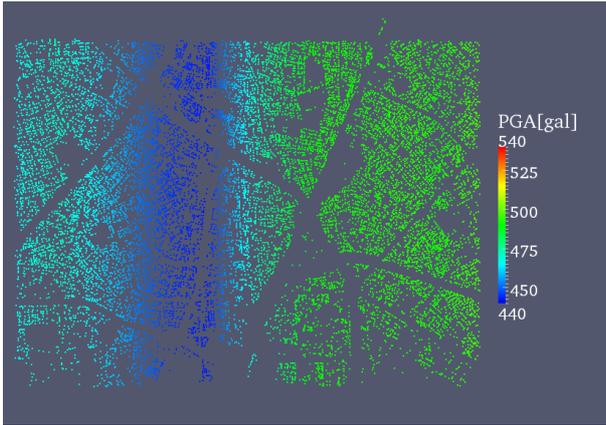
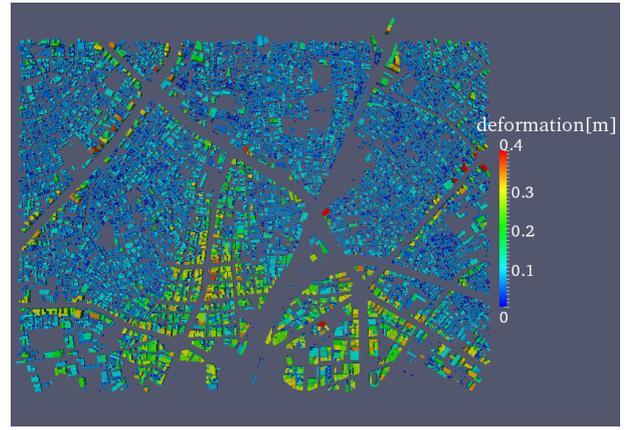
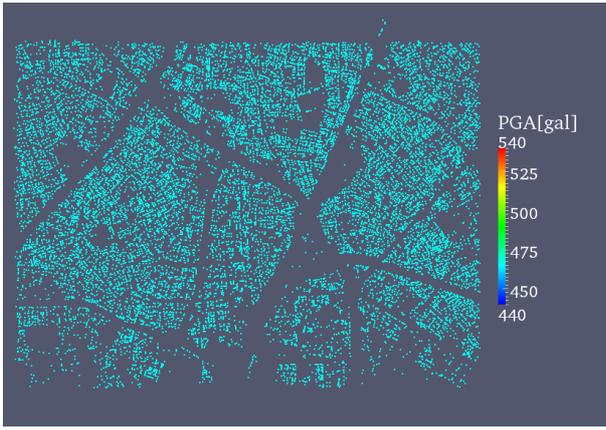


図-5 地盤応答解析結果 (地表面における最大加速度). 上から $\alpha = 0.0, 5.0, 10.0, 15.0$.

図-6 構造物応答解析結果 (最大変位). 上から $\alpha = 0.0, 5.0, 10.0, 15.0$.

盤の性質に応じて地盤増幅が変化し、構造物の応答が変化していることが分かる。図からは判別しにくいですが、構造物の応答は地盤厚さに対して線形に変化しているのではなく、各構造物の性質や地盤の性質に合わせて複雑に変化している。

4. おわりに

本研究では、GISに蓄えられた都市データから地震応答解析と構造物応答解析用の都市モデルを構築し、地盤応答解析で得られる地表面での地震波形を構造物応答解析に入力することで個々の構造物とその直下の地盤の性質を考慮した広域の構造物地震応答シミュレーションを行った。多数の構造物の解析を現実的な時間内で終わらせるため、分散メモリ型の並列化手法や高性能なファイル出力といった HPC 手法を地盤応答解析プログラムに適用した。

適用例では 8.0×7.5 km, 約 25 万棟の構造物に対して地盤応答解析・構造物応答解析を行うことができることを示し、また、地盤層厚が変化した場合の構造物応答の変化を調べることができるなど、広域を対象に複数ケースの地盤構造を考慮した構造物の地震応答解析が可能であることを示した。

今後は地盤データベースから地盤データを入力するモジュールを作成し、実地形に対して本手法を適用する計画である。その上で、大型計算機上でのモンテカルロシミュレーションを通して地盤データに含まれる不確かさや、基盤層への入力波形の不確かさを考慮した構造物の応答解析を行う計画である。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会・地震防災技術普及小委員会編: 実務の先輩たちが書いた土木構造物の耐震設計入門, 土木学会, 2001.
- 2) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 3) 吉田望: 地盤の応答解析入門, <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/inform/document/eqresp.pdf>

- 4) Giberson, M. F.: The response of nonlinear multi-story structures subjected to earthquake excitation. Earthquake Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, EERL Report, 1967.
- 5) Hori, M., Ichimura, T.: Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster, *Journal of Seismology*, Vol.12, pp.307–321, 2008.
- 6) 小柳義夫, 中村宏, 佐藤三久, 松岡聡: 岩波講座 計算科学 別巻 スーパーコンピュータ, 岩波書店, 2012.
- 7) The Message Passing Interface (MPI) standard, <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/>
- 8) Sobhaninejad, G., Hori, M. and Kabeyasawa, T.: Enhancing integrated earthquake simulation with high performance computing, *Advances in Engineering Software*, Vol.42, No.5, pp.286–292, 2011.
- 9) Wijerathne, M. L. L., Hori, M., and Kabeyasawa, T.: Strengthening of parallel computation performance of integrated earthquake simulation, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000235.
- 10) 堀宗朗, 田中謙吾, Sobhaninejad Gholamreza, 市村強, 小國健二: 自然災害シミュレーションのための GIS から都市モデルへの汎用的データ変換, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.1–12, 2010.
- 11) 上戸恭介, 堀宗朗, 市村強, Lalith Wijerathne: 統合自然災害シミュレーションのための堅牢性の高い都市モデル構築手法の開発, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学), Vol.67, No.2, pp.L451–L460, 2011.
- 12) 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne, M. L. L., 田中聖三: 粒子法による高分解能な津波解析のための GIS データから都市モデルへの変換手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.L1159–L1170, 2012.
- 13) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, *Proc. of the American Society of Civil Engineers*, Vol.98, No.SM7, pp.667–692, 1972.
- 14) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N., N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Journal of the Structural Division*, Vol.96, No.12, pp.2557–2573, 1970.
- 15) 2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2007.
- 16) Gropp, W., Lusk, E. and Thakur, R.: 実践 MPI-2 メッセージパッシング・インタフェースの上級者向け機能, ピアソン・エデュケーション, 2002.
- 17) 防災科学技術研究所強震観測網 (K-NET, KiK-net) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

Development of system for computation of seismic response of structures in large areas considering local soil structures using high performance computing

Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, M. L. L. WIJERATHNE and Seizo TANAKA

We develop a system to perform structural response analysis of structures regarding local soil properties in large areas by combining high performance computation enhanced soil amplification analysis and structural response analysis programs. Here, we convert urban data stored in the geographic information system to input city models for each simulation, and use output wave computed by soil amplification analysis to input of structural response analysis. By using such a system on high performance computers, we can simulate large areas with more than 10^5 structures or simulate multiple cases with different input ground motion, soil structure, or structural properties in a short time.