

不確実性を考慮した高分解能震災想定に向けた広域都市地震応答解析手法の開発

東京大学・日本学術振興会特別研究員 DC 学生会員 ○藤田 航平

東京大学 正会員 市村 強

東京大学 正会員 堀 宗朗

東京大学 正会員 M. L. L. Wijerathne

東京大学 正会員 田中 聖三

1. はじめに

震源から都市までの地震波伝播・表層地盤による地震波の増幅・構造物の応答といった地震災害の各過程を計算する高分解能な数値解析手法を積み上げ式で使うことで、過去の地震の統計分析に基づく地震被害想定を高度化できる可能性がある。震源パラメータや地殻構造などの地震パラメータには不確実性があり、信頼性の高い被害想定を求めるためにはこれらの不確実性を考慮することが望ましい。

大規模数値解析手法を組み合わせる積み上げ式に地震災害を解析する方法の一例として、統合地震シミュレータ(Integrated Earthquake Simulator, IES)が開発されてきた[1]。都市を構成する構造物群の一軒一軒を解析する IES は計算量が大きくなるため、既往研究では IES に高性能計算手法を適用してきた。これにより、数十万棟の構造物からなる都市の地震応答を短時間で計算することができるようになった[2,3]。本研究では、モンテカルロシミュレーションや感度分析などを通して地震パラメータに含まれる不確実性を反映した地震被害想定に使うことを目的に、IES を多数回解析に対応できるよう拡張する。最後に、開発した IES を京コンピュータ上で運用することで、東京の約 25 万棟の構造物の地震応答を 400 ケース同時並行で解析できることを示す。

2. IES の概要

IES では、地震災害の各過程を解析する既開発のプログラムを組み合わせ、先のプログラムの解析結果を次の解析プログラムの入力とすることで、地震被害想定を積み上げ式に行う。本研究では IES のうち、工学的基盤層から地表面までの地震波の伝播を解析する地盤応答解析と、構造物応答解析を対象とする。地盤応答解析には 1 次元等価線形化解析、構造物応答解析には非線形多自由度モデルを使い、各々の各構造物直下の地盤構造を踏まえた構造物応答を構造物一軒一軒に対して計算する[2,3]。

3. 多数回解析のための IES の拡張

多数回解析を行うには、計算資源の大きさに応じて大規模な問題を解くことができる、weak scaling の性能が重要となる。ここで weak scaling とは、

$$s_w(p) = T_1/T_p, \quad (1)$$

であり、 T_1 は 1 プロセスを使って基準となる問題を解いた場合の計算時間、 T_p は p プロセスを使って基準となる問題の p 倍の規模の問題を解いた場合の計算時間を示す。図-1 に従来の IES[3]の weak scaling を示す。横軸はケース数、縦軸は weak scaling s_w であり、 s_w が 100%に近いほど効率よく計算できていることを示す。図から、地盤応答解析プログラムを使って 20 ケース同時並行で計算する場合で $s_w = 82.5\%$ 、構造物応答解析プログラムを使って 4 ケース同時並行で計算した場合で $s_w = 27.2\%$ となっていることがわかる。 s_w の低下を抑えない限り、 10^2 ケースといった多数ケースの応答を現実的な時間内で効率良く求めることはできない。従来の IES では地盤応答解析と構造物応答解析は独立したプログラムとして整備されており、これらのプログラム間での情報の受け渡しはファイルシステムを通じて行ってきた。計算コアの増加に対し、ファイル入出力

キーワード 地震被害想定, 不確実性, モンテカルロシミュレーション, 高性能計算

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 Email: fujita@eri.u-tokyo.ac.jp

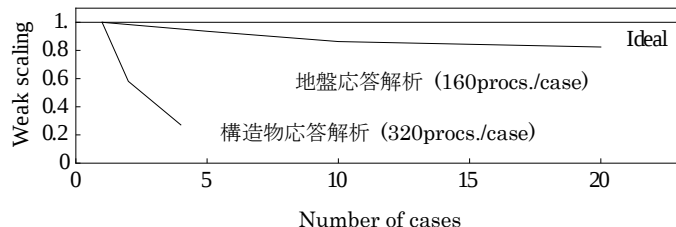


図-1 既往 IES[3]の並列性能

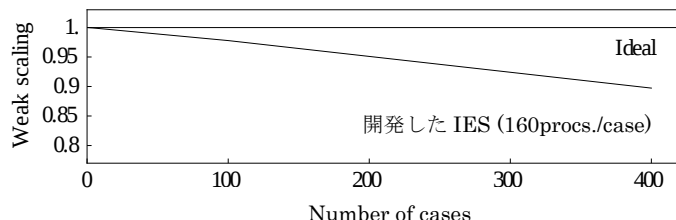


図-2 開発した IES の並列性能

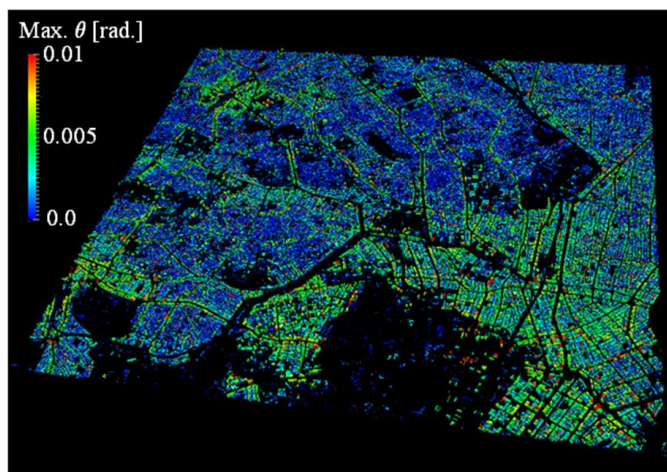


図-3 入力波 400 ケースに対する構造物の最大応答

速度が線形に高速化されていないため、ファイル入出力時間が増えてしまい、 s_w が低下している。そこで、2つのプログラムを一つの実行ファイルに統合し、メモリ上で地表面波形を受け渡すようにすることでファイル操作を削減する[4]。併せて、構造物応答解析の出力結果を指定したタイムステップのみ選択的に出力することでさらなるファイル出力の削減を行う。図-2に開発した IES の weak scaling を示す。400 ケースにおいて $s_w = 89.7\%$ となっており、効率よく計算資源を使うことができています。400 倍の規模の計算機を使うことで、1 ケースを解いた場合の $1/0.897 = 1.1$ 倍の計算時間で 400 ケースの解析を終わらせることができる。

4. 適用例

全国の KiK-net 観測点の工学的基盤において観測された 400 の波形に対し、大きさ $8.0 \times 7.5 \text{ km}$ 、253,405 棟の構造物からなる解析領域を対象に、地盤特性を反映した構造物応答を求める。ここでは、京コンピュータ 8,000 ノード(64,000 プロセス)を使って 400 ケース同時並行で計算し、各ケースにおける構造物の最大応答を出力する。計算時間は 3,786 秒であった。図-3 に 400 ケースの最大層間変位角の最大値を示す。図のように、多数の入力波に対して一番揺れる場合の想定を構造物毎に求めることができる。

5. おわりに

本研究では、多数ケースを同時並行で解析する場合のボトルネックとなるファイル入出力を工夫することで、都市を構成する構造物群の構造応答を多数ケース解析できるシステムを開発した。今後は開発した IES を地震パラメータの感度分析に適用することで不確実性を考慮した震災想定に向けた検討を進める計画である。

謝辞：本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費(課題番号 24・8183)の助成を受けたものです。また、本研究では理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用しました(課題番号: hp120308)。また、地盤工学会の全国電子地盤図、及び、防災科学技術研究所強震観測網(KiK-net)にて観測された地震波形を利用しました。

参考文献

- [1] Hori, M.: *Introduction to computational earthquake engineering*, Imperial College Press, 2011.
- [2] Wijerathne, M. L. L., Hori, M., Kabeyasawa, T. and Ichimura, T.: Strengthening of parallel computation performance of integrated earthquake simulation, *J. Comput. Civ. Eng. (ASCE)*, 2012.
- [3] 藤田航平・市村強・堀宗朗・M. L. L. Wijerathne・田中聖三：都市の高分解能な地震被害想定の高速化のための基礎的研究，土木学会論文集 A1 特集号 (accepted).
- [4] 藤田航平・市村強・堀宗朗・M. L. L. Wijerathne・田中聖三：多数の地震シナリオに対する高分解能な震災被害想定のための HPC による基礎検討，土木学会論文集 A2 特集号 (submitted).