断層-都市系のパラメータ不確実性を考慮可能な 統合地震シミュレータの開発

本間 俊介¹・藤田 航平²・市村 強³・堀 宗朗⁴・Seckin CITAK⁵・堀 高峰⁶

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: homma@eri.u-tokyo.ac.jp

²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)・日本学術振興会特別研究員 DC

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

⁵非会員 海洋研究開発機構 (〒 236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173 番 25)

E-mail: citak@jamstec.go.jp

⁶非会員 海洋研究開発機構 (〒 113-0032 236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173 番 25)

E-mail: horit@jamstec.go.jp

地震被害想定信頼性向上を目的として、地理情報データおよび地震応答解析手法を統合する統合地震シミュレータを開発してきた。本論文では、工学的基盤以浅を対象にしていた統合地震シミュレータを、断層から都市までを一貫して扱えるように拡張した。実際に仙台都市域 22,800 棟の構造物について解析を行い、シミュレータの適用性を確認した。また、地盤と構造物に関して、不確実性のあるパラメータに対して複数の想定を行い、パラメータの変動を反映した解析結果の検討が可能であることを確認した。本研究の方法を利用し、高性能計算機上でモンテカルロシミュレーションを行うことで、地震被害想定確からしさに関する検討ができる可能性がある。

Key Words: earthquake disaster simulation, fault to city simulation, high performance computing, uncertainty analysis

1. はじめに

広域地震被害想定確からしさの向上は、耐震補強のような構造物対策、保険によるリスク移転のようなソフト的対策、震災復旧段階におけるリソース配分の効率化等に資すると期待される。広域地震被害想定例として、東京都の「首都直下地震等による東京の地震被害想定」¹⁾がある。東京都の被害想定手法に関して、表層地盤による地盤増幅は、地盤の性質に基づく震度増分を用いて行われ、構造物の被害予測は構造物の分類毎に倒壊率曲線を用いて行われている。しかし、震度増分や倒壊率曲線といった方法は、過去に経験した地震の記録や統計に依拠しているため、未経験の地震や都市環境の変化に対応することが難しいという欠点がある。また、地震シナリオには東京湾北部地震、多摩直下地震、元禄型関東地震、立川断層帯地震の4つが考慮されているが、少数であるため、想定外の事態が起きやすい。そのため、都市構造物の変化や、地震波と地盤の性質の相互関係を明確に反映でき、かつ多数の地震シナリオを考慮可能な手法の利用が必要であ

ると考えられる。

このようなことを実現するために、物理シミュレーションを用いた、より信頼性が高く、未経験、多数の地震シナリオを考慮可能なシステムを目標として、当研究グループでは統合地震シミュレータ (IES: Integrated Earthquake Simulator) の開発を行ってきた²⁾。IESは、地震工学の分野で、構造物等の設計照査に用いられてきた実績のある解析手法と、情報の整備が進んでいる地理情報システム (GIS: Geographic Information System) のデータを組み合わせて、高分解能な地震被害想定を行う。このことにより、構造物や、構造物位置での地盤特性をそれぞれ詳細に考慮可能になる。使用するデータには全国で入手可能な、汎用的なデータを選択し、解析モデルの生成手法も自動化しているため、既開発のデータ形式であれば、様々な都市、地域の解析が自動的に短期間で行える。

広域多点において地盤や構造物の物理シミュレーションを行うことの困難として、膨大な計算コストが要求されることがある。この計算コストは現状の小規模計算機では対応が難しい規模であり、コンピュータサイ

エンスの知見を活用し、スーパーコンピュータのような高性能並列計算機の利用や、大規模計算用の専用プログラムの開発を行うことが必要になる。高性能並列計算機を利用した大規模計算、高速計算を行うための知見として、ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)がある。IESにはHPCが応用され、計算機のハードウェアに対応した計算の割り当て等を含む、並列計算用の解析プログラムの開発が行われてきた³⁾。さらに、地震被害想定が含む不確実性に対して、モンテカルロシミュレーションを用いたアプローチを行うことを目的として、多数回解析を可能とする拡張も行われている⁴⁾。1,000のオーダを超える多数回解析では、高速化が必須になる。高速化は数値解析そのものだけでなく、計算時間の大半を占める場合もあるデータの受け渡しと入出力にも必要になる。データの受け渡しと入出力は大規模数値計算の障害として広く認識されており、当研究グループはこの高速化のための手法を開発している。これらの検討を基にした多数回解析の例として、京コンピュータ 160,000 プロセス(20,000 計算ノード)により 1,000 地震シナリオに対する首都圏の 253,405 棟の構造物群の応答を 3,446 秒で解析可能となっている。

従来の IES では、対象都市域に含まれる、工学的基盤面以浅の地盤と構造物をモデル化し、工学的基盤面に観測地震動を入力することで対象領域の地震応答を解析していた(図-1の2)地盤増幅, 3) 構造物応答)。しかし、過去に記録のない極低頻度の大地震を考慮する場合や、十分な地震記録のない地域での解析を行うおうとする場合には、地震波の発生と対象都市域までの伝播に関しても、IES に統合する必要がある。またそうすることで、断層-都市系全体の不確実性を一貫した解析で考慮可能になると考えられる。地震発生の不確実性を扱うことで、組み合わせ数が急増することが懸念されるが、最近の地球物理学分野の知見⁵⁾によれば、断層パラメータ推定の研究により、ある程度合理的にパラメータの選択範囲を限定できると考えられ、現実的な多数シナリオ構築のための研究が進められている。さらに、IES で断層-都市系全体の不確実性を扱うことで、地震被害想定の高からしさを向上するのに必要なデータ、あるいはモデル推定手法の高精度化等を示唆できる可能性がある。

そこで、本研究では、工学的基盤面以浅を解析対象としていた従来の IES を、地震発生から構造物応答までの断層-都市系全体を解析対象とできるように拡張する(図-1の1)地震波伝播~3) 構造物応答)。次に、拡張した IES によって、設定した地震シナリオに対する断層-都市系のシームレスな解析が可能であることを、実際に仙台都市域への適用例によって示す。既往研究

図-1 IES の対象とする地震災害過程。従来の IES では 2), 3) を、本研究の IES では 1)~3) を対象とする。

にも、断層からの解析による、広域的な地震動算出と構造物応答解析が統合的に行われた例^{6),7)}がある。これらに比べて、IES の重要な特徴は GIS データを利用し、実在する多数の都市構造物をモデル化して解析を行う点であり、不確実なパラメータの変動を対象域の個々の構造物に明確に反映できるという利点がある。本研究では拡張した IES を用いて、地盤モデルと構造物モデルの不確実なパラメータに関する段階的に異なる複数の設定を用いた解析を行い、それが断層-都市系地震シミュレーションの結果に妥当に反映できていることを確認する。この試みによって、本研究の手法と多数回解析を組み合わせた、大規模モンテカルロシミュレーションによる不確実性分析を行う可能性を提示する。

2. 手法

IES は、GIS データ、CAD (Computer Aided Design) データ、地盤ボーリングデータといった高分解能な地理情報データを利用している。また、これらの高分解能なデータからの自動的なモデル生成手法が準備されているため、広域において各構造物やその位置の地盤特性をモデルに反映することが可能である。

本研究では、工学的基盤面以浅を扱っていた従来の IES を拡張し、地震発生から構造物応答までを一貫して扱うため、以下に説明する解析手法群と地理情報データを用いて断層-都市系の地震シミュレーションを構築する。図-2 は、ここで構築する断層-都市系地震シミュレーションの解析フローであり、各段階の解析と用いるデータ、出力(次の段階の入力)を示している。最初に、設定した地震シナリオに基づく地震解析により基盤波を算出し、地盤増幅解析により各構造物位置での地表面波形を求める。さらにそれを入力として各構造物の応答解析を行う。IES においては、各解析は、その前の段階の出力結果を入力として解析が行われる。各解析は独立して行われるため、以下に説明する各解析は、そのみを差し替えてより高度な手法を利用することも容易である。

図-2 断層-都市系シミュレーションの解析フロー。地理情報データと各種の解析プログラムを組み合わせることで断層から都市までの応答解析を行う。

(1) 地震解析

統計的グリーン関数法を用いて、設定した地震シナリオに基づく地震基盤面上での時刻歴波形を求める。統計的グリーン関数法⁸⁾は、断層や地殻に関する設定を行い、地震波の経時特性やスペクトル特性に制約を設けて人工的に地震波を生成する手法である。本研究では、大西らにより提案されている、統計的グリーン関数法を利用し、複数の小断層からの3成分合成地震動を計算する手法^{9),10)}を用いる。

(2) 地盤増幅解析

軟らかい表層地盤による増幅は著しい影響を地震波に与えるため、地震解析に用いた統計的グリーン関数法に加えて、微地形のデータを反映できる方法が必要である。本研究においては、一次元有限要素法を用いて波動方程式を解き、地震基盤面から地表面までのせん断波の鉛直伝播および、それによる地震動の増幅を求める。ここでは、地盤の非線形構成則に修正 Ramberg-Osgood モデル¹¹⁾と Masing 則¹²⁾を使い、Rayleigh 減衰、時間積分に Newmark- β 法を使い、地震基盤上での波形のうち上昇成分 (E) を入力としている。ボーリングデータに基づく表層地盤モデルと、物理探査資料などに基づく深部地盤モデルを結合して解析に用いる三次元地盤モデルを作成する。ここから、各構造物直下での成層一次元構造を抽出して地盤増幅解析が行われる。

(3) 構造物応答解析

線形多自由度モデルを用いて、地表面地震動に対する構造物応答を求める。線形多自由度モデルは、各層を表わす質点と、それらをつなぐ線形ばねで構成される。構造物モデルの作成は、GIS データに基づいて行う。GIS データに含まれる情報は提供される形式によって異なるが、軒高および構造物の平面形状が得られる場合が多い。典型的な階高を設定し、これで軒高を除

図-3 星は震源位置、SMGA (Strong Motion Generation Areas) 1-5 はアスペリティ、黒丸はそれぞれアスペリティの破壊開始点、青の四角は計算の対象とした仙台の都市域を示す。また、KiK-net 観測点 MYGH06 および MYGH08 の位置を赤色の点で示す。

することで階数 (質点数) を推定する。また典型的な面積あたりの床の重さを設定し、これと床面積を掛けることで各階 (各質点) の質量が推定される。さらに、軒高からは構造物の一次固有周期を推定することが可能である。推定された質点数、各質点の質量、構造物の一次固有周期を用いて、各線形ばねの剛性を推定することができる。構造物モデルの推定方法の詳細は参考文献^{13),14)}に説明されている。

3. 適用例

前節で構築した断層-都市系の地震シミュレーションを、構造物 22,800 棟を含む仙台都市域 (2.6km × 4.8km) に適用し、シームレスな解析が行われていることを確認する。また、地盤と構造物の不確実なパラメータに対して、複数の段階的なパラメータ設定を行い、それぞれの場合において妥当に地震被害想定の変動を考慮可能であることを示す。

表-1 震源パラメータ. L [km] は断層長さ, W [km] は断層幅, M_0 [N·m] は地震モーメント, $\Delta\sigma$ [MPa] は応力降下量, $Delay\ time$ [s] は破壊開始時間の遅れをそれぞれ表わす.

SMGA#	L	W	M_0	$\Delta\sigma$	$Delay\ time$
1	34.0	34.0	2.68×10^{20}	16.0	24.5
2	25.5	25.5	1.41×10^{20}	20.0	66.5
3	42.5	42.5	6.54×10^{20}	20.0	66.5
4	23.1	23.1	1.24×10^{20}	25.2	117.5
5	35.2	35.2	5.95×10^{20}	26.0	127.5

(1) 断層-都市系シミュレーション

以下では, 地震解析, 地盤増幅解析, 構造物応答解析に関し, 実際にどのようにモデル構築, 各解析間でのデータの受け渡しを行ったかを説明する. また, 本項で示すシミュレーションを基本ケースとして扱うことにする.

まず, 地震解析について説明する. 解析対象は, 東北地方太平洋沖地震を想定し, Kurahashi ら¹⁵⁾が提案した断層モデルを採用した. このモデルは図-3に示すように, 5つのSMGA(アスペリティ)からなる. それらの震源パラメータを表-1に示す. Kurahashi らと同様に地震発生からの時間遅れを考慮し, それぞれのアスペリティは破壊開始点から同心円状に破壊するものとする. また, 破壊伝搬速度に関して, 参考文献¹⁵⁾の著者に確認の上, 同一の2.9km/sを設定した. 地震モーメント, 応力降下量及びライズタイムを用いて, Boore¹⁶⁾により提案された従来の統計的グリーン関数法による震源スペクトルから得られる加速度波形を利用し, d^3M/dt^3 として震源時間関数を推定する¹⁷⁾. 得られた震源時間関数を用いて, 内部減衰を考慮して地震基盤上における加速度波形を500メートル間隔で算出した. なお波面の広がりによる内部減衰は, P波とS波に対する幾何減衰で評価する.

次に, 地盤増幅解析について説明する. まず, 作成した深部地盤, 表層地盤のモデル(図-4)について説明する. 深部地盤モデルは地震ハザードステーション(J-SHIS)¹⁸⁾のデータに基づいて作成する. J-SHISのデータでは深部地盤の各層境界の標高(あるいは地表からの深さ)データ, 各層の物性データが標準地域メッシュの第3次メッシュまでの分解能で提供されている. 解析では, これらの離散的な標高データを, 3次スプラインを用いて空間的に補間し, 5層の成層構造として用いる. 表層地盤モデルは全国電子地盤図¹⁹⁾のデータに基づいて作成する. 全国電子地盤図では表層地盤の離散的なボーリングデータから, ボーリング位置の標高, 土質区分, N値が利用可能である. ボーリングデータの地層数や物性は, 隣り合う他のボーリングデータと必

ずしも連続していない. そのため, 参考文献²⁰⁾に説明される方法で地層の順序と数を推定し, 特に薄い層に関しては, 地盤増幅への影響が小さいことから厚い層にマージして除く. これらを3次スプラインを用いて空間的に補間し, 最終的に2層の成層構造を作成した. 表層地盤の物性の推定には土質区分やN値を用いる事が考えられるが, ばらつきが大きく非常に複雑である. 今回の解析ではこれらを用いることをせず, 一般的な物性を入力として, 妥当な解析が行えていることを確認した. また地盤増幅解析では層ごとに線形/非線形の設定を切り替えることが可能である. 今回は仮に第1層のみに非線形特性を与えて解析を行った. 表-2に用いた地盤モデル各層の物性を示している. 図-5に, 地震解析の出力結果の地盤増幅解析への割り当てを示す. 地震解析では500メートル間隔で基盤波が生成されている. 地盤増幅解析は各構造物直下で行われるが, それぞれの点では平面的に見て最も近い位置の基盤波を入力として行う. そのため, それぞれの格子内に含まれる構造物位置での地盤増幅解析は, 同一の基盤波を入力としている. また, 地盤増幅解析を行う際, 各構造物直下の物性にあわせて, 数値解が十分収束する程度に細かい一次元のメッシュを, 多点において自動生成する必要がある. 計算に影響の少ない薄い層を取り除いた上で, 解析対象の上限周波数(10Hz)及びせん断波速度から, 要素の大きさが線形層で波長あたり10要素, 非線形層で波長あたり20要素以上となるようにメッシュ分割を行った.

次に, 構造物群モデルについて説明する. 構造物群モデルは, NTT空間情報株式会社²¹⁾の提供するGISデータから作成する. このデータは構造物位置と構造物の平面形状を含むが, 軒高が含まれていない. 前節で説明した構造物モデルの構築手法に加え, 軒高についても推定する必要がある. ここでは, 株式会社パスコ²²⁾から提供された, 東京都における軒高既知の構造物データベースをもとに, 構造物の床面積と軒高を対応させる表を作成する. 次に, この表をもとに, 今回の解析

表-2 地盤物性値. V_s [m/s] はせん断波速度, ρ [kg/m³] は密度, h は減衰, h_{max} は非線形化層の最大減衰, γ_r は規準ひずみをそれぞれ表わす. 第1層は非線形化する層, 第2-7層は非線形化しない層とした.

Layer#	V_s	ρ	h, h_{max}	γ_r
1	200	1,500	0.23	0.005
2	200	1,500	0.005	-
3	306	2,000	0.005	-
4	1,600	2,300	0.00165	-
5	2,100	2,400	0.00165	-
6	2,100	2,400	0.00125	-
7	2,700	2,500	0.00125	-

図-4 構造物群モデルを左上に示す。構造物群モデル中の×印で宮城野区五輪観測点の位置を示している。また、地表と各地盤7層の境界面の標高を示す。表層地盤（左の列）と深層地盤（右の列）の境界面で異なるカラースケールを使用している。

での構造物床面積を用いて、その構造物の軒高を推定した。ただし、ある床面積に対応する構造物の軒高は複数あるため、乱数を用いてランダムに選択を行った。図-4の左上に作成した構造物モデルを示している。

以上に説明したモデルを用いて、断層-都市系の解析を行った。まず、地震解析は対象領域の地震基盤面上60点で計算される。地震基盤面が解放されていると仮定し、この60点それぞれでの速度応答スペクトルを図-6に示す。図より大きい部分で倍半分のばらつきがあることがわかる。

次に地震解析、地盤増幅解析を行った後の地表での計算波形に関し、気象庁ウェブサイト²³⁾に公開されている宮城県の強震観測点「仙台宮城野区五輪」（図-4）において記録された観測地震波形との比較を行った（速度波形）。比較の結果を図-7に示している。NS方向では波形の位相特性は概ね一致したものの、ピーク時の増幅が小さく、10cm/s以上の差が見られた。EW方向では位相、振幅ともにより一致は得られなかった。同様の解析条件で、「仙台宮城野区五輪」よりも北側にあるKiK-net²⁴⁾観測点 MYGH06や、南側にある同 MYGH08

において（それぞれの位置は図-3を参照）観測波形と解析波形を比較すると、EW方向においてもより調和的であるため、これは radiation pattern の影響によるものであると思われる。今後はすべり角等の震源パラメータの不確定性を考慮した解析の改善が必要であると考えられる。また、今回の解析では対象の全周波数帯で統計的グリーン関数を用いている。低周波数成分を有限要素法などの三次元波動場計算手法、高周波数成分は統計的グリーン関数手法により計算し、マッチングフィルターで合成するハイブリッド法を適用することで、信頼性の向上を図ることも今後の課題である。地表各地点での計算波を入力として、構造物応答解析を行った結果を図-8に示す。構造物被害の尺度の一つとして用いられる最大層間変形角をカラースケールで示している。都市を構成する構造物群に対し、個々の構造物応答解析が行われていることが確認できる。

(2) 不確実なパラメータの検討

断層-都市系の地震シミュレーションにより、地震発生から都市構造物応答までを一貫して扱えるようになって

図-5 地震解析出力結果の、地盤増幅解析入力への割り当てを示している。地震解析の結果は500メートル間隔で出力される。平面的に見て最も近い位置の地震解析の出力結果を入力とし、各構造物直下での地盤増幅解析が行われる。

図-6 地震基盤面におけるNS, EW方向の速度応答スペクトルのばらつきを示す。ただし、地震基盤面が解放であるとする。

たことで、構造物被害を想定するまでの全段階における不確実性を総合して扱える可能性がある。さらに、この拡張された地震シミュレーションをIESに準備されてきた多数回解析の仕組みと組み合わせることで、大規模なモンテカルロシミュレーションを行い、地震被害想定信頼性を向上できる可能性もある。ここではその導入として、前項で行ったシミュレーション（基本ケース）において用いた地盤モデルと構造物モデルのうち、不確実性のあるパラメータに段階的な変更を行い、それらが妥当にシミュレーション結果に反映できることを適用結果によって示す。

a) 地盤モデルに関する検討

ここでは、上層2層のせん断波速度を3ケースに変えて、解析結果を比較した。表層地盤の物性は各層で

図-7 宮城野区五輪観測地点における観測波形と計算波形の比較

図-8 構造物群モデルの基本ケースにおける応答解析結果を示している。図中の色は最大層間変形角を表している。都市を構成する個々の構造物の応答が計算されていることがわかる。

均一に、一般的な値を仮定して用いている。地盤増幅解析において重要なパラメータであるせん断波速度について、より詳細には土質区分やN値を参考とした推定を行うことが考えられる。これらの推定方法はそれぞれの土質区分に対して様々な推定式が提案されている。一方で、実測からはあるN値に対応するせん断波速度には倍半分のばらつきが存在することがわかっている²⁵⁾。仮に基本ケースの物性があるN値から推定されているとして、このようなばらつきが最も顕著に現れた場合を考える。せん断波速度が半分になったケース、基本ケース、倍になったケースの3ケースについて

図-9 表層地盤物性を変えた3ケースの解析に対する地表面応答分布の比較. 色は各周期における速度応答スペクトル ($h = 0.05$) を示す. 速度応答スペクトルは, NS, EW 方向それぞれの速度応答スペクトルをもつベクトルに関して, ノルムを表示している.

検討を行った. すなわち, それぞれのケースにおけるせん断波速度は $V_s = 100$ (Case (a)-1), 200 (Case (a)-2), 400 (Case (a)-3) m/s となっている. 各層で均一な物性を仮定しているためにかなり極端な設定の変更になり, シミュレーションの地盤増幅の結果は著しく変化することが予想される. この結果について, 図-9に, 周期 $2.0s$, $1.0s$, $0.5s$, $0.2s$ における各ケースの地表面波形の速度応答スペクトルの空間分布を示している. ただし, これは NS, EW の両方向について, それぞれの速度応答スペクトルをもつベクトルのノルムを表示したものである. せん断波の波長と地盤の層の厚さの関係で, 増幅しやすい厚さ, 増幅しにくい厚さが周期的に現れることから, 速度応答スペクトルの空間分布には複雑な縞模様が現れている. 表層地盤のせん断波速度の変化に伴い, とくに高周波数成分の様子が顕著に変化することや, これらの模様と図-4の地盤構造の比較から, 高周波数成分は表層地盤の影響を強く受け, 低周

波数成分は比較的深層の地盤の影響を強く受ける, という一般的な知見が妥当に反映された結果であることがわかる.

次に, 表層地盤の物性を変えた3ケースに対して, 構造物の最大層間変形角の空間分布を図-10に示す. 構造物の応答は, 表層地盤のせん断波速度が大きいほど小さくなっている. これも地盤の応答の変化が妥当に反映された結果だと考えられる.

b) 構造物モデルに関する検討

ここでは, 構造物の線形多自由度モデルを構築する際, ばね剛性を決定するのに用いられる一次固有周期の推定方法を3ケースに変えて, 解析結果を比較した. 図-11には建物の軒高と一次固有周期の実測データが示されている.

構造物の一次固有周期は軒高に基づいて推定することが可能だが, 実測データからはある程度のばらつきが存在することがわかる. このようなばらつきが顕著に現

図-10 表層地盤物性を変えた 3 ケースの解析に対する構造物応答分布の比較. 色は最大層間変形角を示す.

図-11 建築物の高さと一次固有周期の関係. 文献²⁶⁾のデータベースをもとに作成.

れた場合を仮定し, 推定式を $T=0.020H$ (Case (b)-1), $0.014H$ (Case (b)-2), $0.008H$ (Case (b)-3) (T が一次固有周期, H が軒高を表わす) に変えて構造物モデルを構築し, 解析結果の検討を行った. 軒高による推定式の場合分けを行わないため, 特に高層の構造物で著しく振動性状が変わることが予想される. この結果について, 図-12 左側に各ケースにおける構造物の最大変形角の空間分布を示し, 右側に各ケースにおける全構造物の最大層間変形角のヒストグラムを示している. 一次固有周期が長く推定されるほど低い剛性が設定され, これを反映して最大層間変形角が増大している. とくに高層の構造物では推定式の差が大きく現れるため, ケース毎の応答の変化が顕著になっている. ヒストグラムを見ると, 分布全体の傾向の変化が確認でき, 一次固有周期を最も長く推定する Case (b)-1 ではほとんどの構造物がいくらかの層間変形角を生じているのに対し, Case (b)-3 では6割程度の構造物では層間変形角がほとんど生じないほど応答が小さい. これらは構造物モデル構築方法の変化が明確に反映された結果であると考えられる. また, このようなヒストグラムから, 構造物全体のうち, どの程度の割合の構造物が設計の要求を超えた応答を生じるか, といったような検討を行うことが考えられる. たとえば, 建築物の設計において最大層間変形角が $1/200$ 以下であることを要求されていることから, 最大層間変形角が $1/200$ を超えた構造物割合を各ケースに関して算出すると, それぞれ 4.37% ((b)-1), 3.99% ((b)-2), 3.94% ((b)-3) となっており, 設計の要求を超えるような応答を生じる構造物数にはそれほど大きな変化がないということが分析できる. これは, 今回の解析では入力地震動が比較的小さかったことや, 地震スペクトルの性質に関係すると考えられ, 異なる入力では異なる構造物被害の傾向が顕在化する可能性がある.

なお, 本適用例の解析は, Xeon X5680 CPU を二つ, DDR3 メモリを 48GB 搭載した計算機ノード 16 台を InfiniBand QDR で結んだ PC クラスタを用いて行った. 計算時間について, たとえば Case (a) に関しては, 5,314 秒 ((a)-1), 5,220 秒 ((a)-2), 5,517 秒 ((a)-3) のみで計算が可能である.

4. まとめ

IES の既往研究において, 地震波の工学的基盤面以浅での地盤増幅解析および構造物応答解析が行われてきたのに対し, 本研究では断層から都市までを包括的に扱うように IES を拡張した. 実際に, 仙台都市域に対して手法を適用して断層-都市系の解析が可能であることを示した. また, 地盤モデルや構造物モデルの不確実性を含むパラメータを段階的に変更し, それを反映した地震被害想定を検討可能であることを確認した.

本研究の適用例で扱った規模の解析であれば, 多数回解析の仕組みと組み合わせることで, 京コンピュータの計算能力によって $10^3 \sim 4$ ケースの計算を短時間で行うことができると考えられる. 本研究で行ったようなパラメータの段階的変更に対し, 不確実性のあるパラメータに対し確率分布を仮定した多数回解析を行うことで, 大規模なモンテカルロシミュレーションとし, 地震被害想定の実からしさについて分析できるようになる可能性がある. また, 断層-都市系の地震シミュレーションに存在する不確実性はより詳細な情報の導入や, モデル推定方法の高度化によって合理的に限定する必要があると考えられるが, どの不確実性についてどの程度の限定が必要であるかについて, 明確化していける可能性がある.

謝辞: 本論文の結果の一部は, 理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです (課題番号 hp120308). ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 東京都防災ホームページ地震の被害想定: <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/japanese/tmg/assumption.html> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
- 2) Hori, M. and Ichimura, T.: Current State of Integrated Earthquake Simulation for Earthquake Hazard and Disaster, *Journal of Seismology*, Vol.12, No.2, pp.307-321, 2008.
- 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 (構造・地震工学), 69, pp.1703-1713, 2013.
- 4) 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, Wijerathne, M. L. L., 田中聖三: 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のための HPC による基礎検討, 土木学会論文集 A1 (応用力学), Vol.69, No.2, pp.1415-1424, 2013.
- 5) 福山英一: 地震の動的破壊パラメータ, 地震第 2 輯, Vol.61, pp.S309-S314, 2009.

図-12 構造物の一次固有周期推定方法を変えた3ケースの解析に対する構造物応答の比較。左側が最大層間変形角の空間分布を示す。右側のヒストグラムが最大層間変形角とその値をとる構造物の割合を示している。また、ヒストグラムの中央に層間変形角 0.005rad. ($1/200$) を点線で示している。

- 6) Taborda, R. and Bielak, J. : Large-Scale Earthquake Simulation: Computational Seismology and Complex Engineering Systems, *Computing in Science & Engineering*, Vol.13, No.4, pp.14-27, 2011.
- 7) Krishnan, S., Muto, M., Mourhatch, R., Bjornsson A. B. and Siriki H. : Rupture-to-Rafters Simulations : Cyber-Enabled Unification of Science and Engineering for Earthquake Hazard Mitigation, *Computing in Science & Engineering*, Vol.13, No.4, pp.28-43, 2011.
- 8) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.430, pp.1-9, 1991.
- 9) 大西良広, 堀家正則 : 震源近傍での地震動予測のための拡張統計的グリーン関数法とそのハイブリッド法への適用に関するコメント, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp.37-44, 2004.
- 10) 堀家正則, 大西良弘 : 統計的グリーン関数法の経時特性の改良とそれを用いた兵庫県南部地震の大阪平野における三成分加速度波形の再現, 日本建築学会構造系論文集,

- Vol.73, No.631, pp.1495-1502, 2008.
- 11) Idriss, I.M., Singh, R.D. and Dorby, R. : Nonlinear Behavior of Soft Clays During Cyclic Loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.104, No.GT12, pp.1427-47, 1978.
 - 12) Masing, G. : Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing, *Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics*, pp.332-335, 1926.
 - 13) 堀宗朗, 田中謙吾, Gholamreza, S., 市村強, 小国健二 : 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.
 - 14) Sobhaninejad, G., Hori, M. and Kabeyazawa, T. : Enhancing integrated earthquake simulation with high performance computing, *Advances in Engineering Software* Vol.42, pp.286-292, 2011.
 - 15) Kurahashi, S. and Irikura, K. : Short-Period Source Model of the 2011 Mw 9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.103, pp.1373-1393, 2013.
 - 16) Boore, D. M. : Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of The Radiated Spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
 - 17) Aki, K. and Richards, P. G. : *Quantitative Seismology: Theory and Method, Volume 1*, W.H.Freeman and Company, 1980.
 - 18) J-SHIS 地震ハザードステーション : <http://www.jshis.bosai.go.jp/> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
 - 19) 全国電子地盤図 : <http://www.denshi-jiban.jp/> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
 - 20) Hori, M. : *Introduction to Computational Earthquake Engineering, Chapter 11*, Imperial College Press, 2006.
 - 21) NTT 空間情報株式会社 : <http://www.ntt-geospace.co.jp/> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
 - 22) 株式会社パスコ : <http://www.pasco.co.jp/> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
 - 23) 国土交通省気象庁 : <http://www.jma.go.jp/jma/> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
 - 24) 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/> (2014 年 1 月 25 日閲覧)
 - 25) Ikuo Towhata : *Geotechnical Earthquake Engineering, Chapter 8*, Springer, 2010.
 - 26) 建築物の減衰小委員会 : <http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s7/index.htm> (2014 年 1 月 25 日閲覧)

(2013. 11. 8 受付, 2014. 3. 5 修正, 2014. 3. 7 受理)

DEVELOPMENT OF INTEGRATED EARTHQUAKE SIMULATOR ACCOUNTING FOR PARAMETER UNCERTAINTY IN FAULT-TO-CITY SYSTEM

Shunsuke HOMMA, Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI,
Seckin CITAK and Takane HORI

Aiming for improvement of reliability of earthquake disaster estimation results, an Integrated Earthquake Simulator (IES) is being developed by combining geographical data and simulation methods. In this study, we enhance the original IES, which simulates the response of city using input at bedrock, to fault-to-city simulation by integrating fault models, deep soil structure models, and simulation methods to obtain wave at bedrock. This new system is applied to an urban area of Sendai city which consists of 22,800 structures. We expect that the developed system can be used to evaluate the effects of uncertainties in the input data of each phase of an earthquake disaster to the final structural damage estimation results by running Monte Carlo simulations with different input parameters on high performance computers.