

断層-都市系を考慮した 広域都市震災シミュレータに関する基礎的研究

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非会員 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

都市地震災害想定信頼性向上のため、多種の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が開発されてきた。本論文では、工学的基盤以浅を対象にしていた従来の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。また、開発した手法を仙台都市域 22,800 棟の構造物に適用することで、断層から都市までの広域都市の震災シミュレーションが可能であることを確認した。本手法を高性能計算機上でのモンテカルロシミュレーションに使うことで、断層から都市までの地震の各段階における入力データの曖昧さを考慮した被害想定ができるようになる可能性がある。

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

1. はじめに

広域都市震災想定手法の高分解能・高精度化は、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、また復旧段階におけるリソース配分等の効率化に資すると期待される。このような広域都市震災想定手法を目指して、統合地震シミュレータ (IES: Integrated Earthquake Simulator) が開発されてきた^{1),2)}。IES では、設計に用いられてきた実績ある解析プログラム群と地理情報データ (構造物や地盤構造データ等) を組み合わせて広域での都市震災想定を行う。既往の IES では、工学的基盤以浅の地盤構造と都市全域の構造物をモデル化し、工学的基盤に地震波を入力することで対象領域の地震応答をシミュレーションしている (図- 1b), c) 参照)。計測の方法や情報の不足に起因する地震波、地盤構造データ、構造物データ等の不確実性を想定結果に反映するため、高性能計算機上で多数回・多数ケース解析 (capacity computing) を可能とする検討も行われている。例えば、²⁾の手法を京コンピュータ 160,000 プロセス (20,000 計算ノード) 上で使うことで、1,000 の地震波に対する首都圏の 253,405

棟の構造物群の応答を 3,446 秒で解析することができるようになっている。

本研究では、工学的基盤以浅を対象としていた IES²⁾を拡張し、断層-都市系を解析対象とする (図- 1a)~ c) 参照)。適切な知見に基づく多数の断層シナリオに対して、地盤構造や構造物データの曖昧さを考慮した断層から都市内の構造物群の応答まで一貫通貫でシミュレーションするための仕組みを構築し、適用例を示す。

2. 手法

IES における各モデル生成手法及びシミュレーション手法は、電子的に蓄積されている GIS データ、CAD データや地盤ボーリングデータといった地理情報データを、入手可能な範囲の高分解能で利用し、かつ様々な都市と災害シナリオに適用できるよう、汎用性を重視して設計されている。また、高密度広域の都市解析を行うためには膨大な計算コストが必要とされ、これに対応するためにハイパフォーマンスコンピューティングの技術が応用されている。一方で、広帯域のシミュレーションを決定論的手法によって行うことは現状で

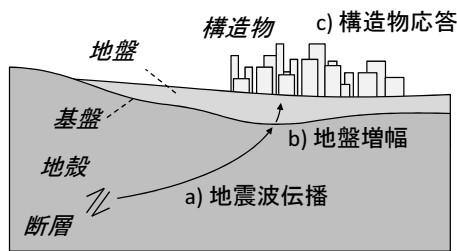


図-1 IES の対象とする地震災害過程．従来の IES では b), c) を，本研究の IES では a)~c) を対象とする．

は難しく，また，シミュレーションに入力するモデルを作成する際の断層，地盤，構造物データも十分ではない．曖昧さを持つ入力データに対応したモンテカルロシミュレーションをこれらへの対策として考え，上記の解析を多数回行うための，capacity computing へ向けた拡張を行ってきた．

本研究では，従来の IES を拡張し，次に説明する解析プログラム群と，地理情報データを統合することで断層-都市系を考慮した震災想定を行う（図-2）．ここでは，仮定した断層シナリオによる基盤波を算出し，各構造物位置での基盤波に対する地盤増幅計算により地表面の波形を求める．さらにそれを入力とした各構造物の応答計算を行う．

(1) 地震動解析

与えられた断層シナリオに対して，観測記録を利用できない任意地点における広帯域の地震動のシミュレーションを行うため，統計的グリーン関数を用いる．本論文では，^{3),4)}に基づく統計的グリーン関数法により，与えられた断層シナリオによる基盤面上での時刻歴波形をもとめる．

(2) 地盤増幅解析

基盤面から地表面までの地震動をシミュレーションする．修正 RO モデルを用いた非線形一次元有限要素法による全応力解析を用いた．地盤構造モデルは，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作成する．

(3) 地盤増幅解析

地表面での地震動を用いて非線形多自由度モデルにより建物の地震応答をシミュレーションする．建物モデルは，GIS データから生成される⁵⁾．非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非線形ばねで構成される．階数，階高，構造形式が GIS データから推測され，これらの情報をもとに非線形多自由度モデルを構築する．

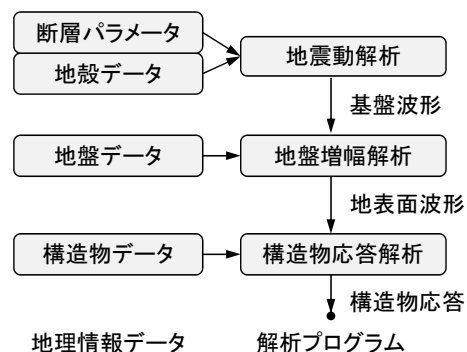


図-2 IES の概念図．地理情報データと各種の解析プログラムを組み合わせることで断層から都市までの応答解析を行う．

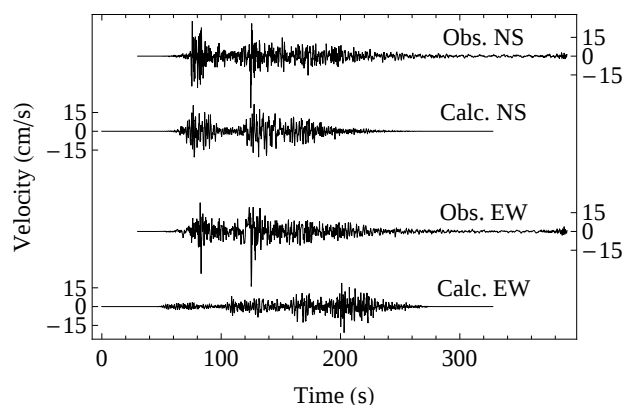


図-5 宮城野区五輪観測地点における観測波形と計算波形の比較

表-1 地盤物性値．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 m/s	ρ kg/m ³	$h, h_{\max}$	γ_r
1	100	1,500	0.23	0.005
2	100	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	-

3. 適用例

本論文の手法により，断層から都市まで一貫した解析が広域都市に対して適用できること，また，複数ケースの解析を通して，入力データの変動が想定結果に与える影響を見積もることができることを示す．対象領域は仙台都市域 2.6km × 4.8km の領域であり，この領域には構造物 22,800 棟が存在する．東北地方太平洋沖地震を対象とし，⁶⁾により推定された断層シナリオを用

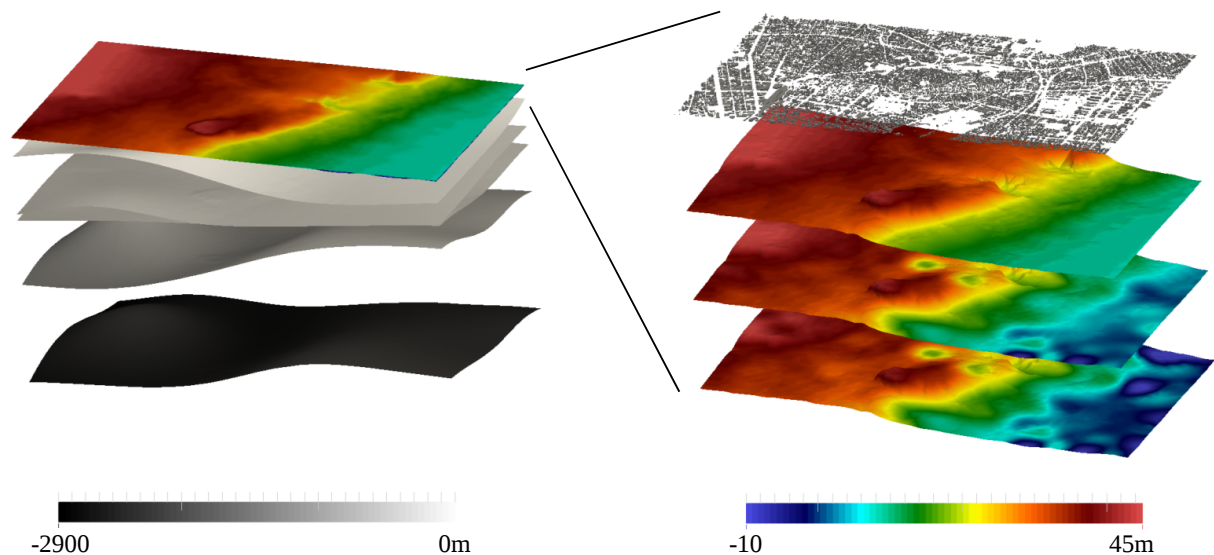


図-3 地盤構造モデルと構造物群モデル．左図に7層からなる深部と浅部地盤構造を，右図に浅部地盤構造と構造物群モデル（一番上）を示す．

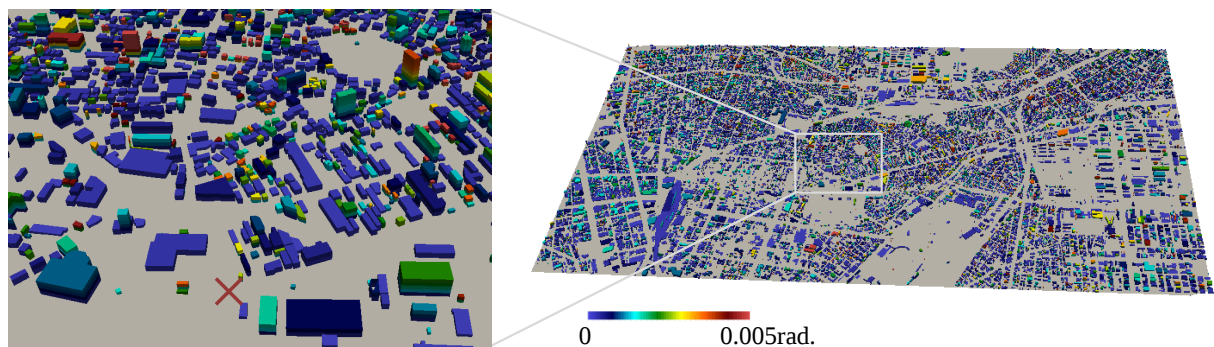


図-4 構造物群モデルの詳細と宮城野区五輪観測点の位置．観測点位置を左図×で示す．図中の色は最大層間変位角を表している．都市を構成する個々の構造物の応答が計算されていることがわかる．

いる．

地盤構造モデルのうち，深部地盤構造は地震ハザードステーション（J-SHIS）⁷⁾のデータをもとに，表層地盤構造は全国電子地盤図⁸⁾のデータをもとに作成する．深層地盤データにおいては地層が5層の成層構造として与えられている一方で，表層地盤データにおいては地層の数や物性が隣り合うボーリングデータ間で整合していないため，薄い層を厚い層にマージすることで2層の成層構造地盤モデルを作成する．離散的な間隔で与えられたデータの空間補間にはスプライン補間を用いる．表層地盤においてはボーリングデータのN値から代表的なせん断波速度を推定し，深部地盤ではJ-SHISで与えられた物性を使う．構造物モデルは，NTT空間情報のGEOSPACE⁹⁾データから生成する．GEOSPACEデータには構造物の軒高が記載されていないため，軒高既知の構造物データベースを使って構造物の平面形

状をもとに構造物モデルの階数を推定した上で，建築基準法に沿うように構造パラメータを推定する．図-3に作成した地盤構造と構造物モデルを，表-1に各層の地盤物性を示す．

上記モデルを用いて，本論文で構築したIESにより与えられた断層シナリオに対する都市の応答を計算する．統計的グリーン関数法により，500m間隔で基盤波形を求め，一次元地盤増幅解析を各構造物直下の層構造・物性を用いて行う．まず，気象庁ウェブサイト¹⁰⁾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同地点での計算波形を南北，東西方向に関して比較する．図-5に示す様に，南北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．一方で，東西方向では位相・振幅ともに異なっている．この差の主な原因は，経験的グリー

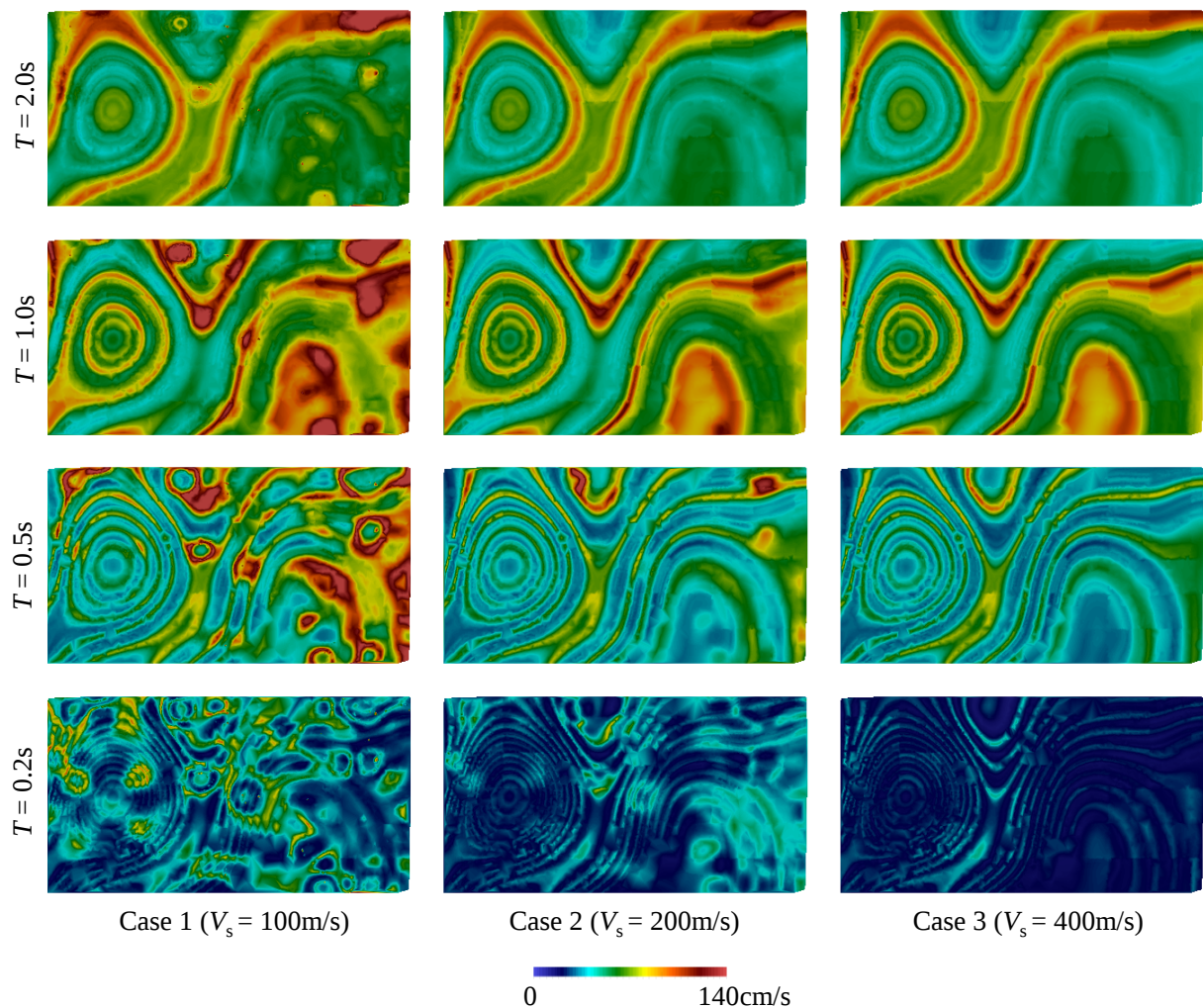


図-6 地表面物性を変えた 3 ケースの解析に対する地表面応答分布の比較．色は各周期における水平方向の速度応答スペクトル ($h = 0.05$) を示す．

ン関数によって推定された断層シナリオ⁶⁾を用いて、統計的グリーン関数により地震動を計算したことによると考えられる．今回は、任意地点での波形を計算するため、全周波数帯域において統計的グリーン関数を用いている．低周波成分は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等のいわゆるハイブリッド法を適用することにより信頼性の向上を図る必要があると考えられる．

多数の地点において非線形一次元有限要素法により地盤増幅計算を行うため、本研究では一次元増幅計算で使うメッシュの自動分割を行う．ここでは、計算に影響の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．同様にして、各構造物に構造物応答解析を自動的に行うことで、構造物群の応答を求める．図-4 に構造物応答 (最大層

間変位角) を示す．図から、都市を構成する構造物群に対し、地盤特性・構造物特性を反映した個々の構造物応答が計算されていることがわかる．

地盤構造モデルや構造物モデルには、入力となる地理情報データの測定誤差や推定誤差に加え、モデル作成の際にデータの不完全性を補うための補間や推定誤差などからなる不確実性が含まれる．例えば、構造物データの構造は GIS から推定されるものの、床面積に対して適当に層厚や密度を仮定して作成するためにモデル自体に不確実性が存在している．また、地盤構造データには、物性の推定および層境界の空間補間の方法が不確実性の要因となっている．このようなデータの曖昧さ・不完全性に対して、複数の解析を行うことで解析結果の変動幅を調べることができる．今回は、表層地盤の物性を変えてその影響の検討を行う．ここでは、上層 2 層のせん断波速度を 3 ケース ($V_s = 100, 200, 400\text{m/s}$) に変えて、解析結果の比較を行った．本解析では、各層に均一な物性を仮定するため、応答が著し

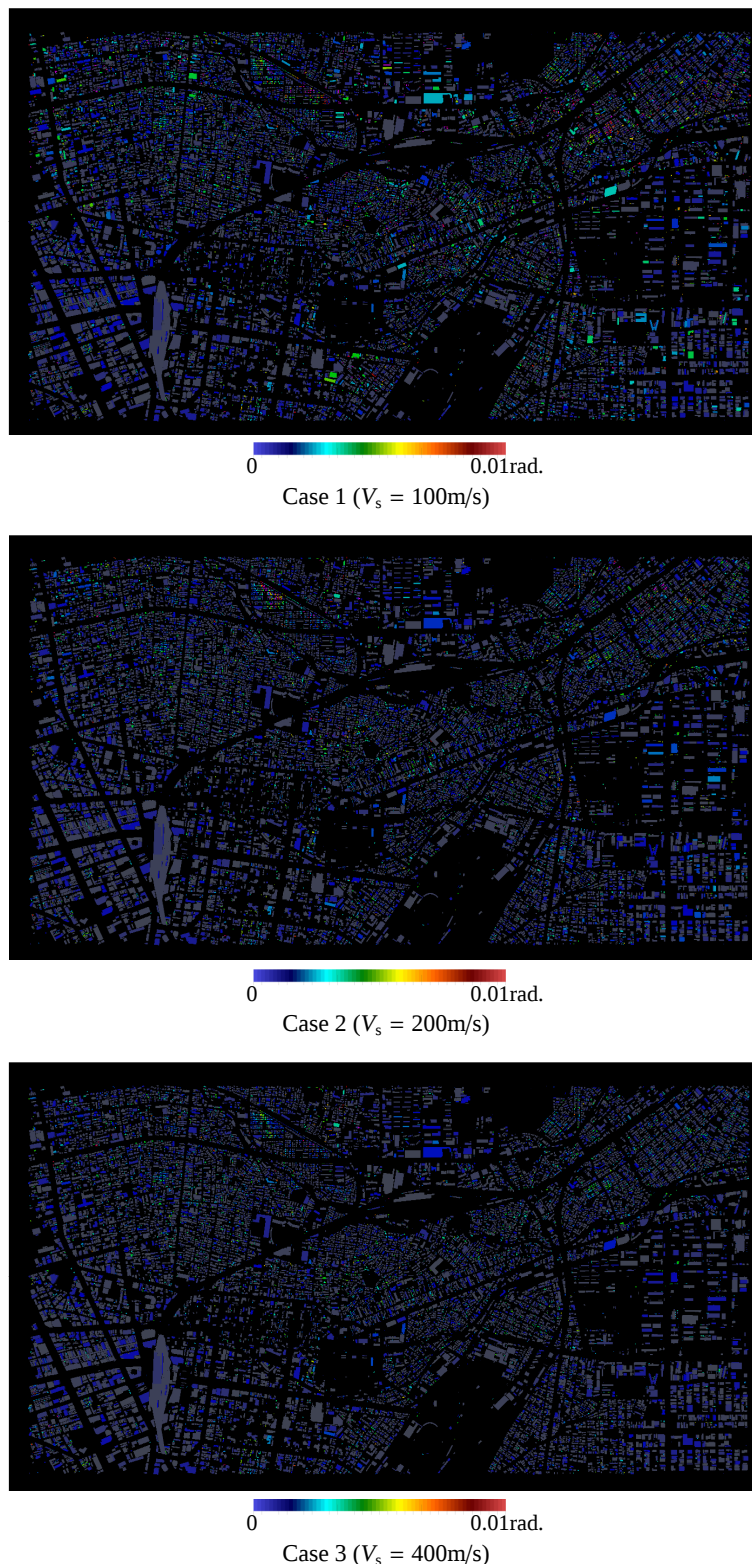


図-7 表層地盤物性を変えた 3 ケースの解析に対する構造物応答分布の比較．色は最大層間変位角を示す．

く変化することが予想される．図-6 は設定した各物性ごとに，周期 2.0s，1.0s，0.5s，0.2s における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．低周波数領域ではどのケースも同様の分布となっているが，高周波数領域では分布に差が生じている．せん断

波速度が大きいケースほど地盤剛性が高く設定されるため，速度応答が小さくなっていくこともわかる．また，周波数に依存して明確な増幅域が現れており，低周波数領域では深部の地盤構造，高周波数領域では表層の地盤構造に対して相関が高いことが推測される．一

方で、これほど明瞭な分布の差異が現れたのは、地盤の成層構造を仮定した一次元計算により地盤増幅を計算しているためであると考えられる。より現実的な地盤増幅を計算するためには、有限要素法等を用いた三次元波動場計算を用いる必要があると考えられる。次に、構造物の損傷程度の一次尺度である層間変位角の各ケースの分布を図-7に示す。一部の領域で大きい加速度・速度の発生に対応して層間変位角が増大している。また、構造物の応答も表層地盤のせん断波速度が大きい(剛性が大きい)ほど小さくなる、という自然な結果が示されている。また、その変化は表層地盤の影響を強く受ける短周期の揺れほど顕著になっている。地盤物性の違いによって構造物の被害分布に大きな差が生じる可能性がこのようなシミュレーションによっても示されることの意義は大きいと考えられる。

なお、本適用例での解析は、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 クラスタを用いることで、5,314s (case 1), 5,220s (case 2), 5,517s (case 3) で計算することが可能である。大規模計算機の活用や将来の計算機の高速化により、より規模の大きい問題をさらに短い時間で解析できるようになると考えられる。

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および構造物応答を対象とした手法が開発されてきたのに対し、本研究は断層から都市までを包括的に扱う手法を構築した。また、実際に仙台都市域に対して手法を適用し、入力データである地盤物性の変化に対する被害想定結果の変化の分析に使うことができることを示した。

本研究の解析例の問題規模の場合、京コンピュータの計算能力を使うことで 10^{3-4} ケースの計算を短時間で行

うことができるなど、今後は本手法を capacity computing で拡張することでより多種のデータの曖昧さと解析結果の関係性を分析できるようになると期待できる。また、地震被害想定解析フロー全体を扱うことができるようになることで、各段階に存在する不確実性が被害想定結果に与える影響を評価し、想定精度を見積もることができるようになる可能性がある。

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) 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.
- 2) 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.L415-L424, 2013.
- 3) 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.
- 4) Horike, M. and Onishi, Y.: Improvement of the shape function in the stochastic simulation method and reproduction of high-frequency motion recordings of the Kobe earthquake, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) J-SHIS 地震ハザードステーション: <http://www.jshis.bosai.go.jp/>
- 8) 全国電子地盤図: <http://www.denshi-jiban.jp/>
- 9) NTT 空間情報: <http://www.ntt-geospace.co.jp/>
- 10) 国土交通省気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

BASIC STUDY ON FAULT-TO-CITY EARTHQUAKE DISASTER SIMULATION OF LARGE AREAS

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.