

大地震を計算する統合地震シミュレータの開発について

堀宗朗¹, 市村強²

Muneo HORI¹ and Tsuyoshi ICHIMURA²

¹ 東京大学地震研究所

² 東北大学工学部土木工学科

統合地震シミュレータとは、さまざまな地震動のシミュレーションと構造物の動的解析を組み合わせたものであり、地理情報システムから都市のモデルである仮想都市を構築し、断層から地震を発生させ、各地点での強震動とそれに伴う構造物の応答を計算する。都市モデルの構築という大きな課題はあるものの、地震動と構造物応答のシミュレーションを統合することで、リアリティのある地震被害予測を可能とし、さらに地震防災に関する新しい知識を発見することが期待できる。本報告では、統合地震シミュレータの基幹をなす高い空間分解能で計算する強震動シミュレーションと、簡単な地下構造と構造物集合からなる仮想都市の地震動の例を紹介する。

1. はじめに

地震被害の軽減は地震工学の究極の目的である。これには、該当地点において発生する地震動を予測し、対象構造物の地震に対する挙動を推定することが必要である。構造物の挙動の推定に関しては、実用的かつ簡易な構造モデルを用いて構造物の挙動を推定することとは別に、構造物の挙動を数値計算することが考えられている。実際、構造工学・耐震工学の進歩と計算機の発展により、入力された地震動に対する構造物の挙動を数値解析によって計算することは、従来に比べ格段に容易になり、また精度も向上している。破壊時の挙動を完全にシミュレートすることには課題が残されていることは事実ではある。しかし、線形応答の範囲を超えて、建物の地震動の応答を適当な精度で計算する時刻歴動的応答解析は実用の域に達している^{1,2)}。

一方、地震学においても地震のシミュレーション^{3,4)}は長足の進歩を遂げている。勿論、地震の源である震源断層の破壊過程を解明することや、地質構造の形状や材料特性をより詳細に同定すること等、解決すべき課題が残されていることは否定できない。しかし、適当な震源過程と地質構造のモデルに対して、断層から地表に伝播する地震動を適当な周波数域で精度良く計算することは十分可能である。また観測結果の再現にも成功しており、特に、阪神大震災で被害が集中したいわゆる震災の帯には、地質構造の影響で強い地震動が集中していることが数値シミュレーション³⁾によって示されている。

地震学の観点からみて妥当な地震動を使って、場合によっては破壊に至る構造物の動的応答を数値計算することは、特定の構造物に対する地震被害を予測する上で一つの合理的な方法である。このような数値計算は、原理的には、構造物の集団に統一的に適用することが可能である。すなわち、一つの都市を取り上げ、その都市にある全ての構造物を対象とし、共通の地震に対する動的挙動を解析し、起こりうる地震被害予測の計算をするので

ある。

都市を丸ごと対象とした地震被害の数値計算は、地震発生時の災害シミュレーション⁵⁾も現実的なものに行うことができる。ここで言う災害シミュレーションとは、地震発生中及び発生後の個人や組織を対象とする人間行動のシミュレーション¹⁾である。例えば、建物が被害を受けた時にその中にいる人々がどのように行動するかを計算する非難シミュレーション、消防・警察等が被災者を救出し火災を鎮火する救助シミュレーションを指す。

本報告では、上記の構想に基づいて開発を進めている統合地震シミュレータの現状を説明する。統合地震シミュレータとは、さまざまな地震動のシミュレーションと構造物の解析ツールを組み合わせたものであり、地理情報システム(Geographical Information System, GIS)に蓄えられたデータの利用を前提に、地下構造や構造物群を含む都市モデルである仮想都市を計算機内に構築し、都市全域の地震動と構造物の動的応答を数値計算する。第2章と第3章において統合地震シミュレータの目的と課題を詳しく述べる。強震動の計算とGISを用いた仮想都市とその地震シミュレーションの例を第4章と第5章において説明する。

2. 統合地震シミュレータの目的

統合地震シミュレータの概念図を図1に示す。統合地震シミュレータは、大きく強震動シミュレータと種々の構造物を対象とした解析ツール群に分かれている。強震動

¹現時点ではまだまだ構想に留まっているが、このような災害シミュレーションの延長には、建物・構造物の被害の他に人的被害を積み上げることで都市全体での地震被害を算定する被害額算定シミュレーション、さらには、被災後の復興を効果的にするために、どのような復興計画を練るための復興シミュレーションがある。

シミュレータは、階層型解析を用いて高い空間分解能を確保して数ヘルツの周波数まで地震動を計算する。階層型解析は特異摂動を用いた手法であり、最初に粗い分解能で断層から地表までを計算し、次に高い分解能で地表の強震動を計算する。構造物の解析ツール群は、鋼・コンクリート・合成構造物、地中構造物等といった構造物の形式や様式に合わせて、動的解析、もしくは地震変位に対する応答を数値計算するものである。

統合地震シミュレータでは、種々のGISに整備されたデータを使って地下構造や構造物のモデルを作り、そのモデルに強震動シミュレータと構造物の解析ツール群を適用させる。地下構造や構造物のモデルが、電子計算機内の仮想都市となる。したがって、強震動シミュレータや解析ツールという解析手法の性能と同時に、シミュレーションの対象となる地下構造や構造物のモデルの良否が地震被害予測の精度を支配することになる。次章で説明するが、仮想都市ないしシミュレーションモデルの構築が統合地震シミュレータの開発に関する最大の課題である。

原理的には、現実的な仮想都市が構築され数値解析手法が十分に機能すれば、統合地震シミュレータは想定された地震に対する都市の被害を精度良く予測することができる(図2参照)。また、種々の地震のシナリオを想定することで、被害の集中域の違いはもとより、被害のばらつきも把握することができる。これとは別に、地震に関する種々のシミュレーションの統合化には独自のメリットがある。これは、多数のシミュレーション結果を俯瞰することで、個々のシミュレーションからは見逃されていた地震被害や地震防災に関する新しい知識を発見することである。この意味において、情報科学で指摘されている統合化は極めて重要である。特に、空間的に大きい規模で発生し、時間的にも波及していく地震災害に対しては、統合化により新しい対策を見出すという期待は強く持てる。

3. 統合地震シミュレータの課題

現時点では、数値計算のモデルの構築に必要なデータが整備されていないことは強調すべきである。地下10km程度の深さの地質構造はさまざまな探査が進んでいるものの、全貌は明らかにはなっていない。増幅を支配する地表数十メートル付近の堆積層の層厚や材料特性のデータも限られている。一方、構造物に対しても、有限要素法の解析モデルが構築できるような部材の形状や材料特性に関するデータを入手することは難しい。

現時点で利用できるGISデータとしては、地下構造に関しては標高やボーリングデータがあり、構造物に関しては位置と高さ程度である。これから簡単な地盤構造モデルや構造物モデルを構築することは可能である。このような簡単なモデルを使ってでも、都市全体を丸ごと計算することが地震防災に有用であることを示すことができれば、モデルの基となる地下構造や構造物のデータの整備が進むことが期待できる。また、今後整備が予定されている構造物のCADデータをGISに取り込むことができれば、構造モデルの整備は進む。

一つの方針として、構造物の所有者が構造物のデータを提供するインセンティブを与えることを考えている。高度なモデルが与えられた構造物は、より確実に地震時の安全性が評価できることになるためであり、統合地震シミュレータの利用を公開することがインセンティブを高めると思われる。さらにGISから構造物データを取り、計算された地震時の挙動をGISに返すことで、被害予測が高精度化され、この結果GISの防災情報基盤としての役割が高度化することも期待できる。このようなGISとの連携は重要である。

なお、統合地震シミュレータの開発に際しては、高度な動的解析を行う新しい解析ツールは必要としていないことを強調する。解析ツールの高度化は勿論重要であるが、現在利用できるツール群を統合することに力点が置かれる。ここで言う統合とは、解析モデル、入力される

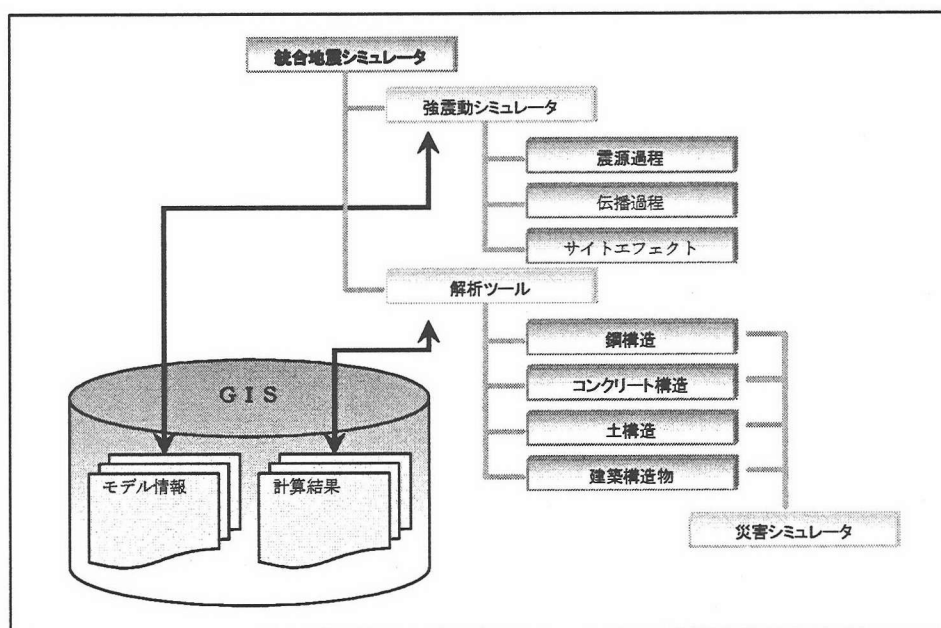


図1 統合地震シミュレータの概念図：強震動シミュレータと構造物の解析ツール群からなる。GISから仮想都市モデルを構築し、シミュレーション結果をフィードバックする。災害シミュレーションにもデータを適用する。

地震動、出力される構造応答のデータのフォーマットやそれに関するプロトコルを統一することである。統合の結果、モデル構築やビジュアライゼーションも含む結果の出力が容易となる。また、新規の解析ツールであっても、いわゆるプラグイン形式で統合地震シミュレータに簡単に組み込むことが可能となる。

4. 強震動シミュレーション^{6,7)}

強震動シミュレーションは統合地震シミュレータの基幹である。構造物の入力地震動が計算されるため、このシミュレーションを高度化すると、構造物の解析ツール群の結果が現実的なものになる。強震動シミュレーションでは、レベル2地震と同様、対象とする断層と断層の破壊過程を入力し、

- 1) 地質構造を経由する地震動の伝播過程を計算
 - 2) 地表付近の地盤構造での地震動の増幅を計算
- という手順で、地表（ないしは基盤面上）の強震動を出力する。

伝播過程と増幅過程は長さの尺度が異なる地質構造と地盤構造で起こるため、強震動シミュレーションでは階層型解析を用いている。地震動の変位を $u_i(x,t)$ とすると、階層型解析は

$$u_i(x,t) = u_i^0(x,t) + \epsilon u_i^1(x,y,t) \quad [1]$$

として二つの関数の和に展開する。ここで x と t は空間座標と時間、 y は次のように定義される空間座標である。

$$y = \frac{1}{\epsilon} x \quad [2]$$

この定義[2]から明らかなように、 x に比べ y の変化は速く、 x と y を粗い分解能と高い分解能の座標とみることができ、係数 ϵ は二つの分解能の長さスケールの比を与える。階層型解析では最初に[1]の第一項を計算し、ついでその解を基に第二項を計算する。前者をマクロ解析、後者をマイクロ解析とし、この階層型解析方法をマクロ-マイクロ解析手法⁶⁾と呼ぶ。

波動計算では、空間の離散化が精度を保障して計算できる周波数範囲を制限する。マクロ解析では1Hzまで精度を保障しているが、マイクロ解析では数Hzまでの周波数域の精度を保障する必要がある。このため、マクロ解析の解に対して、地震動の統計データを利用して適当な1Hz以上の高周波数成分を推定し、その推定分を含むマ

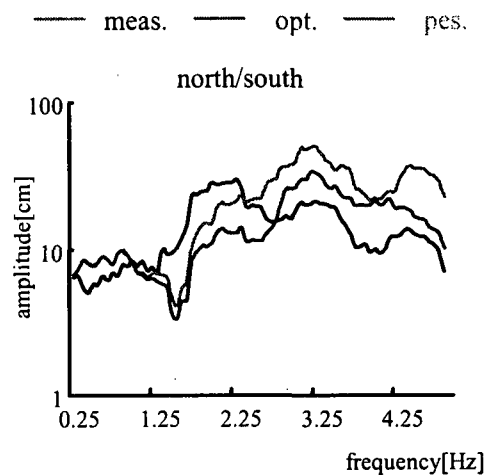


図2 マクロ-マイクロ解析手法の計算例：速度スペクトルの観測結果との比較

表1 マクロ-マイクロ解析手法の計算例：最大速度とSI値の比較

	meas.	opt.	pes.
PGV [kine]	0.170	0.264	0.292
SI	0.191	0.318	0.339

クロ解析の結果をマイクロ解析に適用している。

マクロ-マイクロ解析手法の計算例⁷⁾を図2と表1に示す。これは1999年8月11日に東京湾地下で発生した地震をシミュレートし、横浜市強震計ネットワークの観測結果と比較したものである。地震の諸元は、震央位置が北緯35.4、東経139.8、深度53kmであり、メカニズムはstrike=62, dip=85, rake=73, Mw=4.0である。地盤構造モデルを二通り（optimisticとpessimistic）設定し、計算結果と対しサイトas06の計測結果に対し、南北方向成分の速度スペクトルと最大速度・SI値を比較した（図2と表1参照）。マクロ-マイクロ解析手法地下構造モデルや震源過程等、初歩的な段階ではあるが、解析結果が観測結果とさほど離れていないことがわかる。

5. GISを用いた仮想都市と地震シミュレーション

構造物の解析ツール群は、マイクロ解析で計算された強震動を入力してさまざまな構造物の応答を数値解析する。解析に際しては地盤-構造物の相互作用や構造物同士の連

表2 仮想都市の構築に必要なデータと現時点で利用できるGISデータ

	required	available
underground structure		
configuration	boundary depth soil type, etc.	elevation data (5m[m] mesh GIS data) borehole data
material properties	density wave velocity non-linear properties	database for soil type- material parameter relation
structure		
basic	location structure type	digitized perspective view
configuration	structure dimension member dimension	height data (satellite image)
material properties	member elastic property member non-elastic property	none

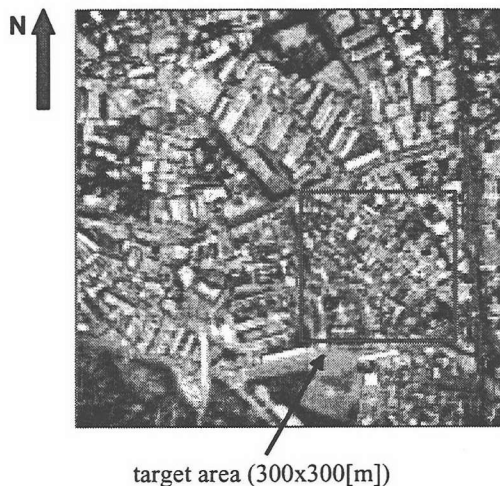
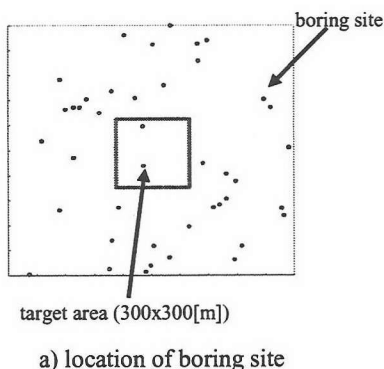
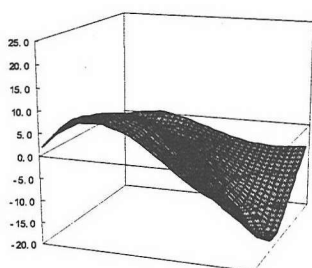


図3 仮想都市のターゲット

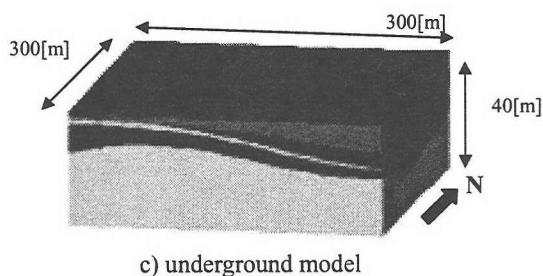
成も考慮する必要がある。したがって、地盤や構造物のモデルからなる仮想都市の構築には、形状や材料特性のようなデータが必要である。以下に、構築に必要なデー



a) location of boring site



b) example of interface between soil layers: bottom layer and base rock



c) underground model

図4 地盤構造モデル

タとGISに蓄えられているデータを整理する。

(1) 地盤構造

地盤構造は複数の堆積層を重ねてモデル化するため、必要なデータは各堆積層の形状と材料特性である。形状は層境界の深さであり、材料特性としては密度・弾性波速度は勿論、非線形材料特性のパラメータも必要となる。液状化も考慮する必要がある。

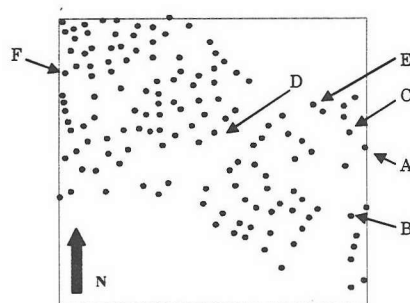
現在、標高に関するGISは整備されている。また、測定されたボーリングのデータを組み込んだGISもある。しかし、ボーリングデータは密ではなく、さらに、隣接するボーリングデータにおいて層順が逆転する例が少なからずある。地盤種類と材料パラメータのデータベースを利用すると、ボーリングデータから密度や弾性波速度を推定することができる。この他PS検層等のデータも利用できる場合がある。

(2) 構造物

構造物のモデルは、利用できるデータの質と量に応じて、一自由度系ないし多自由度系の簡単なモデルから非線形有限要素法解析に供用できる高度なモデルまで多岐にわたることになる。基本的な構造物のデータとして、位置と構造形式が必要であり、次に構造全体や部材の寸

表3 地盤モデルに使われた堆積層の材料特

layer number	soil type	density [g/cm ³]	S wave velocity [m/s]	P wave velocity [m/s]
1	surface soil	1.625	120.0	204.0
2	loam	1.550	135.0	229.5
3	sand	1.800	400.0	680.0
4	clay	1.750	200.0	340.0
5	fine sand	1.900	425.0	722.5
Bottom	rock	1.850	600.0	1020.0



a) location of building



b) bird-view of building

図5 構造物モデル

法等の形状に関するデータ、そして部材の材料特性が必要となる。部材の接合も重要である。また、非構造部材の取り扱いも検討する必要がある。

現在、構造物に関して利用できるGISデータは限られている。位置に関するデータは整備されているが、構造形式や寸法・材料特性に関するデータは、ごく特殊な例を除き、整備されていないようである。しかし、CADの普及により構造物のデジタルデータは作成されており、このCADデータを入手することが重要である。

現在、構造物の高さは航空・衛星写真を基にしたGISデータに蓄積されている。したがって簡単な多自由度系のモデルを構築することは可能である。精度はさておき、このモデルのパネ定数や減衰のパラメータを推定することは可能である。

上記の検討は表2に整理する。前述のように、現時点ではGISに蓄積されたデータは限られていることは事実であるが、統合地震シミュレータの有効性が広く確認された場合、所有者が構造物の安全性の確認・公表のためにデータをGISに入力することを期待している。逆にこの期待を実現するためには、統合地震シミュレータの有効性を示すことが鍵を握る。

以上の点を考慮し、仮想都市を実際に構築し、地震シミュレーションを行った例⁹⁾を示す。まだまだサイズは小さいが、仮想都市は図3に示す300x300[m]の領域とした。この仮想都市は一般に利用できるGISを用いて構築した。具体的な構築方法は以下の通りである。

(1) 地盤構造モデル

標高とボーリングデータのGISから地盤構造のモデルを作る。異なるボーリングデータの層順の逆転を補正する作業と、そのデータを補間して層構造を決定する作業は自動化されている。

図4に地盤構造のモデルを示す。仮想都市周辺のGISに蓄えられていたボーリングデータの位置を図4a)に示す。都市内には図に示すデータが利用できた。ボーリングデータは概ね深さ40[m]までである。データを見る限り、この領域には工学的基盤の上に五つの堆積層が存在することがわかった。この堆積層と工学的基盤の材料特性を表3に示す。また、工学的基盤との境界面を図4b)に、深さ40[m]までの地盤モデルを図4c)に示す。

(2) 構造物モデル

衛星写真と航空写真を基に作られた(建築)構造物のGISから構造物の位置と高さを決め、線形多自由度系モデルを作る。構造物の高さから系の自由度と動的特性を自動的に決定する。

図5に仮想都市内の構造物を示す。約140の構造物がある。構造物の断面の中心を図5a)に示す。高さはGISに蓄積されていたため、同一の四角形断面を与え高さのみ変えた四角柱として構造物を表す。この取り扱いでの仮想都市の鳥瞰図が図5b)である。全構造物に対し、高さに応じて木造家屋、RCビル、SRCビルの構造形式を設定した。図5a)のAはSRC、BとCはRC、DからFは木造である。構

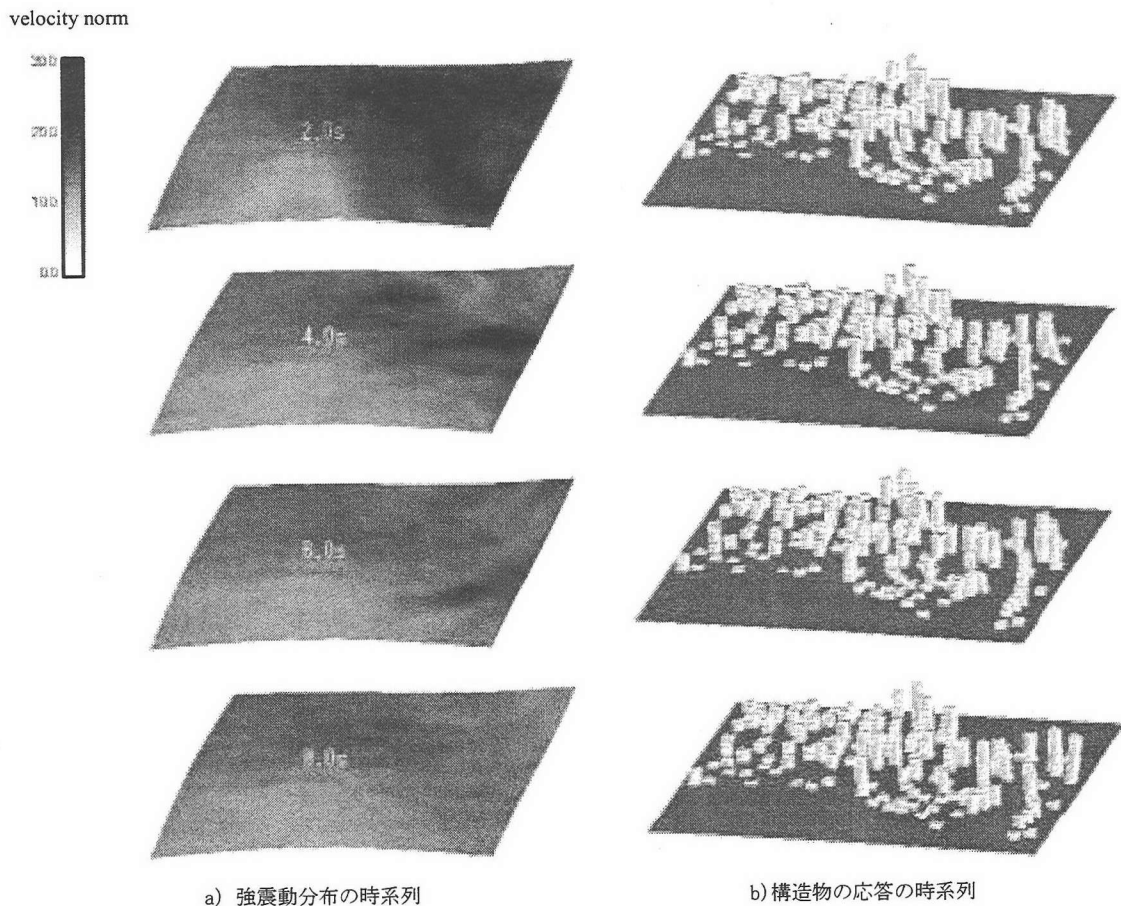


図6 仮想都市の地震シミュレーションの例

表4 構造物モデルの応答の例：最大変位

a) SRC構造とRS構造

building	type	T_1 [sec.]	E-W	N-S	U-D
A	SRC	1.16	11.01	12.81	2.56
B	RC	0.77	4.61	4.38	1.70
C	RC	0.77	3.38	4.20	1.44

b) 木造構造

building	T_1 [sec.]	E-W	N-S	U-D
D	0.3	1.54	0.79	0.46
E	0.35	1.27	0.6	0.34
F	0.55	1.71	2.67	0.79

造形式と高さから建築耐震設計基準に基づいて一次の固有振動数を算定し、階数に応じた多自由時系を構造物モデルとした。

構築された仮想都市に対し、地震シミュレーションを行った。計算の手順は以下の通りである。

- 1) 地盤構造モデルのマイクロ解析から強震動を計算
 - 2) 位置に応じて各構造物の入力強震動を決定
 - 3) 各構造物の応答を計算し、時系列データを出力
 - 4) 全応答時系列データを仮想都市の地震として表現
- 簡単のため、1)で用いるマクロ解析の解を振幅1[cm]、周期2秒の正弦波半波としてマイクロ解析を行った。入力方向は、東西、南北、上下の三方向とした。東西方向の入力による計算結果を図6に示す。図に示された構造物の最大変位応答を表4に示す。表4a)はRCとSRC構造、表4b)は木造構造である。構造形式の違いや場所の影響によって、入力地震動毎の最大応答変位が大きく異なることがわかる。

個々の構造物の地震応答に関しては、このような結果は決して目新しいものではないことを強調する。表4の結果は仮想都市での地震シミュレーションの例に過ぎない。しかし、都市全体でこのようなシミュレーションを行うことは、少なくとも現実味のある地震を表示することにつながり、統合地震シミュレータの有用性の一端を示すものと考えている。

6. おわりに

統合地震シミュレータは、既に開発されている構造物の解析ツールを統合し、共通の地震動での応答を計算することで、都市全体の地震をできるだけ現実味のある形でシミュレートすることを最終的な目的としている。シミュレーションの場となる仮想都市はまだまだ簡単なものであるが、GISとの連携を進めることでモデルを高度化することが最大の課題となっている。

モデルの構築以外にも、統合地震シミュレータの開発にはさまざまな課題がある。しかし、統合によって、新しい地震防災に関する知識が発見できることも期待されることも事実である。したがって、シミュレータの有効性を示すよう、具体的により高度な仮想都市を構築し、モデルに応じた高度な解析ツールを利用した地震シミュレーションを行うことを予定している。

参考文献

- 1) 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，3月27日-28日，東京，土木学会，2000。
- 2) 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，3月8日-9日，東京，土木学会，2001。
- 3) Furumura T. and K. Koketsu, Specific distribution of ground motion during the 1995 Kobe earthquake and its generation mechanism, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 785-788, 1998.
- 4) Koketsu, K. and M. Kikuchi, Propagation of seismic ground motion in the Kanto basin, Japan, *Science*, 288, 19, 1237-1239, 2000.
- 5) 田所諭，北野宏明監修：ロボカップレスキュー——緊急大規模災害救助への挑戦，共立出版，2000。
- 6) T. Ichimura and M. Hori: Macro-micro analysis for prediction of strong motion distribution in metropolis, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, 17, 2, 175-185, 2000.
- 7) M. Hori and T. Ichimura: Macro-micro analysis for wave propagation in highly heterogeneous media - prediction of strong motion distributions in metropolis -, in *Proceedings of the International Workshop, Wave 2000* (ed. by N. Chouh and G. Schmid), Bochum, Germany, Dec. 13-15, Balkema, Rotterdam, pp. 379-398, 2000.
- 8) F. Yang, T. Ichimura and M. Hori: Methodology of constructing models for integrated earthquake simulator using geographical information system data (土木学会応用力学論文集に投稿中)。