

# 都市デジタルデータと数値シミュレーションによる 震災シミュレーションシステムの開発

市村 強<sup>1)</sup>, 篠竹 英介<sup>2)</sup>, 堀 宗朗<sup>3)</sup>

- 1) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, ichimura@cv.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, shinotake@e-society.cv.titech.ac.jp
- 3) 東京大学 地震研究所, hori@eri.u-tokyo.ac.jp

## 1. はじめに

都市の複雑化, 高密度化によって建物・社会基盤等都市を構成する要素間の相互作用による未経験の震災が起こりうる。都市広域を対象とした既往の震災評価では, 経験的あるいは統計的な手法が主に用いられており(例えば[1]など), 未経験の震災を予測・想定するには限界があるのではないかと考えられる。一方で, 地震学の進歩により, 地震現象の解明も進み, 地震動予測も試みられるようになりつつある。また, 建造物の地震応答解析も高い水準にある。これら要素技術を統合し, 断層から人間行動までを, 予測・想定する地震防災・危機管理システムを開発することがひとつの理想的な方法として考えられる(例えば, 断層-建物系を主な対象とした都市広域の震災評価や構造解析の試みとして[2, 3, 4]など, 構造被害を踏まえた避難解析[5]など, 人工空間内での人間行動解析の試みとして[6]など)。本報告では, 広域で整備されている GIS/CAD データを用いて, 建物・社会基盤・人間行動までを含む広域都市震災想定シミュレータ用都市モデル構築の基礎検討を行う。また, その有効性を検討するため, 構築した都市モデルを用いた簡単な震災シミュレーションを試みる。

## 2. 統合地震シミュレータ

著者らは, 上述の広域都市震災想定を目的として, 統合地震シミュレータ(Integrated Earthquake Simulator, IES, Fig.1 参照)の開発を行ってきた[7, 8, 9]。IES は, 1) GIS/CAD データから構築された都市モデル, 2) 断層から地表までの地震動の生成過程を解析する高分解能地震動シミュレータ, 3) 鋼構造・コンクリート構造・土構造・建築構造物などの建造物応答をシミュレーションするシミュレータ, 4) 人間行動を解析するシミュレータからなる。デジタルデータ群(*data*)を管理する基幹システムと各事象・建造物の数値解析ツール(*method*)をプラットフォーム・プラグイン仕様で結びつけたシステムである。これらを組み合わせ, 想定した地震

シナリオについて震災の諸過程の予測・想定を試みる。

IES の構築に際し, 技術的課題はモデル化と統合化である。GIS/CAD のデータは質・量ともに限られているため, 適切なレベルのモデル構築手法が必要となる。また, 広域な都市内の全建造物を計算するため, 実際に計算を可能とする合理的なデータ構造が必要であり, これを踏まえた *data* の構築が必要である。モデル化とデータ構造の観点から, *method* では, 二つのアプローチを採用している。一つは, 動的 FEM 解析を行うのに十分なデータが得られる場合には, 共通の動的 FEM を用いて建造物の応答を予測する (type I)。一方, 十分な *data* が利用できない場合, *data* に応じて耐震設計で使用されている各種建造物に特化した応答解析手法を選定し, 建造物の応答を想定する [10] (type II)。type I は高度な *data/method* による現象の予測を志向し, type II は限られた *data* 内での合理的な *method* による現象の想定を志向している。

IES のプロトタイプを用いて, 数例の広域震災シミュレーションを試みているが, 特殊な GIS/CAD データを用いており, 任意地点での広域震災想定は難しかった。本報告では, 既存の GIS/CAD データ利用/不足データの追加を前提として *data* を構築する手法を検討する。また, 地震動解析・地盤増幅解析・建物解析を *method* として組み込み, 上述の type II による震災想定を試みる。

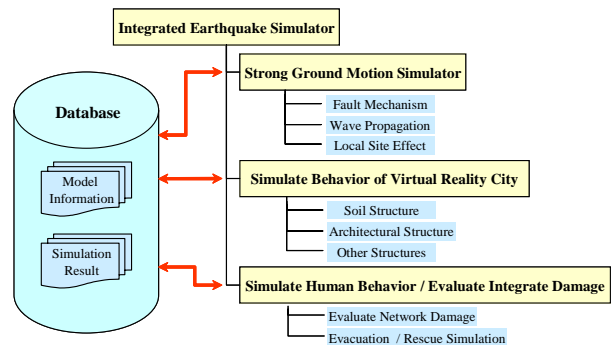


Fig. 1 Schematic view of IES

## 都市モデルの構築とその適用例

以下は、IES プロトタイプを東京都内のある領域 2000[m] × 1500[m] に適用した例である。堆積層地盤と建物群からなる都市モデルを構築し、想定した地震波を入射し、震災評価を行った。

### 3.1 都市モデルの構築

広域で整備されている、ボーリングデータ、数値地図 50m メッシュ [11]、都市 3D 形状データ MAPCUBE [12]、数値地図 25000 [13] を用いて都市モデルの構築を行う。これらのデータは、東京都 23 区・全国政令指定都市で整備されており、この範囲であれば任意地点で同様の都市モデルを構築することができる。Fig.2 に構築した都市モデルの一部を示す。

地盤構造はボーリングデータと 50m メッシュ標高データから推定した。本研究で使用したボーリングデータには、地表を原点とした地層境界面の深度、各地層の地盤物性 (P 波伝達速度, S 波伝達速度, N 値) が記載されている。これらのデータを Kriging 法 [14] により補間し 4 層からなる 3D 地盤構造モデルを推定した。推定された地盤構造には、上述の属性のみが含まれている。等価線形解析のような比較的簡便な手法は適用可能であるが、より詳細な解析を行うのは難しくデータ追加を検討する必要がある。建物モデルは、MAPCUBE データを用いて構築した。しかしながら、MAPCUBE データは 3D 幾何形状情報のみが含まれており、構造種別や用途といった属性が含まれていない。そのため、この 3D 幾何形状情報をもとに、[7, 15] の手法により推定した。作成した地上建築構造物モデルは建物外形の幾何形状と上記属性情報から構成されており、近似モード解析のような簡便解析には十分であるが、詳細なモデルを必要とする解析には現状では不十分であり、今後データ追加を検討する必要がある。対象領域内には 10225 棟の構造物が存在しており、それぞれの構造物に木造、鋼構造、RC 構造、SRC 構造のいずれかの構造種別を割り当てた。

広域な都市内の全構造物を計算するため、実際に計算を可能とする合理的なデータ構造が必要であり、これを踏まえた data の構築が必要である。計算機上に構築された都市モデルのデータ構造を とし、method で用いるデータ構造を とした場合、必ずしも、 と は一致しない。また、を前提として を構築すれば、異なる method を適用する際には必ずしも が効率的なデータ構造ではなくなる。以上を踏まえて、本研究では、まず GIS レイヤを基調とする を構築し、各 method の を分析することにより、各 method に応じて から を自動生成する翻訳プログラム (mediator) を開発し、 から を自動生成し都市全域の構造物の自動解析を行って

いる。これにより汎用性を持ちかつ効率性を失わない data 構造を実現している。

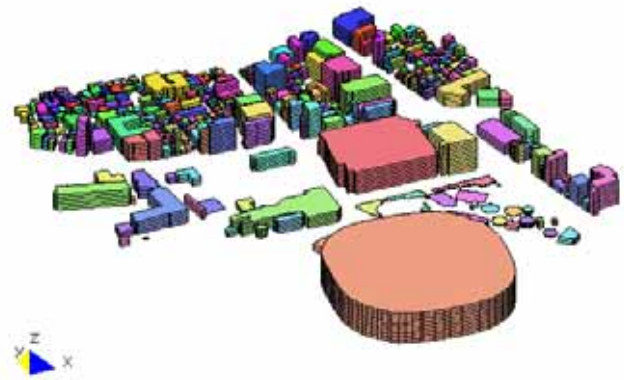


Fig.2 A Part of Virtual Reality City

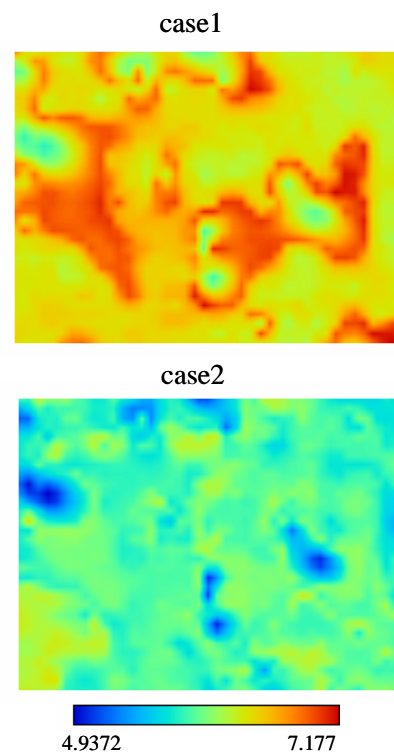


Fig.3 Distribution of Seismic Intensity on Surface

### 3.2 構築した都市モデルを用いた震災評価解析例

構築した都市モデル及び type II の IES プロトタイプのフレームワークを用いて、2 種類の地震波を入射し、それぞれのケースで地盤及び構造物の応答を求め、震災評価解析を行った。使用した地震波は、case1: 兵庫県南部地震 (鷹取), case2: 2003 年十勝沖地震 (池田) の地震波を、文京区の代表的な堆積層情報を用いて一次元重複反射理論で工学的基盤までゆれ戻したものである。これら case1, 2 の地震波を 3.1 で作成した都市モデルに入射する。強震動シミュレータには等価線形解析を、建物解析には近似モード解析 [7, 15] と層間変位角による被

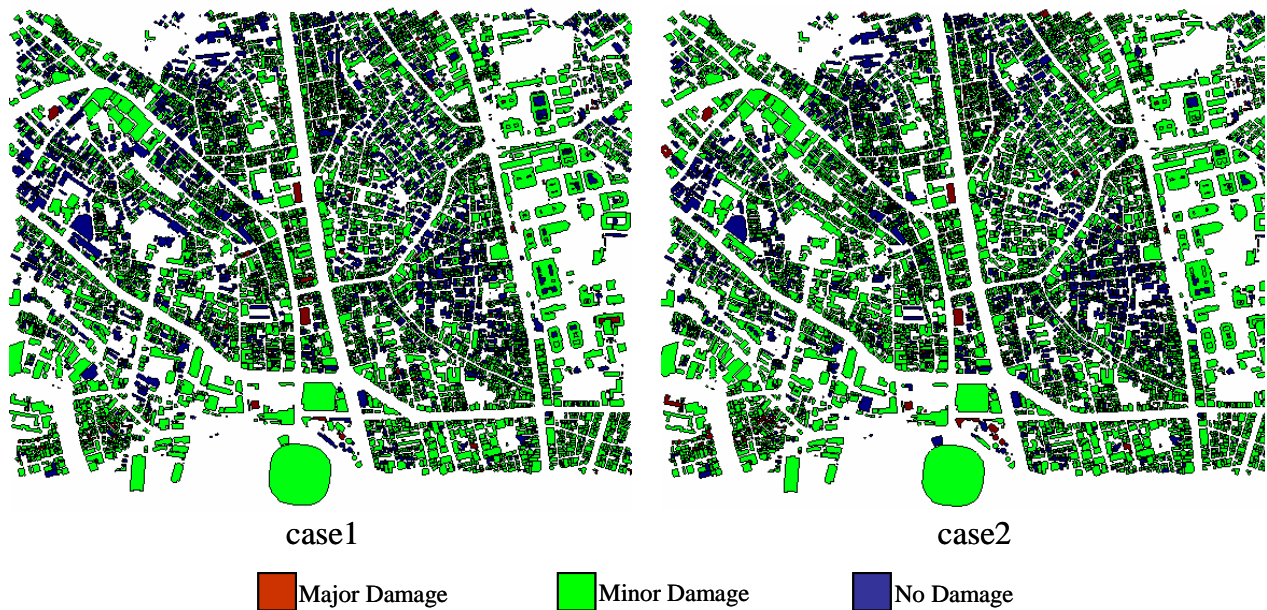


Fig. 4 Distribution of structural damage

災判定[16, 17]を *method* として各々組み込んだ。都市モデルから *mediator* により *data* を抽出して各解析に用いる。

地表面の震度分布を Fig.3 に示す。また構造物の種類毎に小破・大破の閾値を設定し、最大層間変位角から損傷度を評価した(Fig.4, Table1)。case1, case2 の比較から入力波の違いが、地盤の応答及び構造物の応答に違いを与えることが見て取れる。今後更なる精度の向上を図る必要があるものの、GIS/CAD データと数値シミュレーションを組み合わせることで、数値シミュレーションの積み重ねによって複数の震災シナリオを提供可能なフレームワ

Table 1 Number of Damaged Buildings

	大破	小破	無被害
case 1 (鷹取波)	250	7408	2567
case 2 (十勝波)	292	7740	2193

(unit: number of buildings)

クのプロトタイプを構築した。

#### 4 まとめ

本報告では、汎用性を持ちかつ効率性を失わない広域都市震災想定シミュレーション用の都市モデルプロトタイプを構築を目的として、1) 広域で整備されている GIS/CAD データを主に用いて東京都 23 区・全国政令指定都市の任意地点で *data* 作成可能な GIS レイヤを定義した。また、2) *data* の質・量に応じた *method* を選定し、各 *method* に応じた *mediator* を開発し、都市内全構造物のシミュレーションを自動化した。最後に、3) 開発した *data*, *mediator* と選定した *method* を組み合わせ type II

の IES により、地震時の都市挙動を想定した。組み込んだ *data* が不足していること、また、本報告で使用した *data method* の組み合わせは必ずしも合理的かつ最適なものではないため、現段階では十分な信頼性をもった想定を行うのは難しい。今後、*data method* の関係を比較検討し、必要に応じて *data* を追加しながらより合理的かつ最適な *data method* の組み合わせを模索し、より信頼性の高い想定を行うことができるように開発をすすめることが必要と考えられる。また、想定信頼性向上を試みるだけでなく、予測精度を向上させるため type I の開発もあわせて行う必要があると考えられる。

#### 謝辞

(株)パスコより 3D 都市デジタルデータを提供して頂いた。防災科学技術研究所 K-NET のデータを使用させていただいた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 宮腰淳一, 林康裕, 渡辺宏一, 田村和夫: 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価, 構造工学論文集, Vol. 43B, pp. 269-276, 1997.
- [2] 長戸健一郎, 川瀬博: 建物被害データと再現強震動による RC 構造物の被害予測モデル, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 544, pp. 31-37, 2001.
- [3] 長戸健一郎, 川瀬博: 鉄骨建物群の被害予測モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 559, pp. 101-106, 2002.
- [4] 新井洋, Nelson Pulido, 久保哲夫, 楠浩一: 1999 年コジャエリ地震時にギョルジュクの地盤応答が強震

- 動と建物被害に与えた影響，日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 11，pp. 317-322，2002．
- [5] 目黒公郎：災害軽減ツールとしての数値シミュレータの可能性，「1995年兵庫県南部地震」5周年特別企画シンポジウム講演集，土木学会，pp.153-156，2000.
- [6] Bin Jiang, SimPed: Simulating Pedestrian Flows in a Virtual Urban Environment : Journal of Geographic Information and Decision Analysis, Vol.3, No.1, pp. 21-30, 1999.
- [7] F. Yang, T. Ichimura, and M. Hori : Earthquake Simulation in Virtual Metropolis Using Strong Motion Simulator and Geographic Information System, Journal of Applied Mechanics JSCE, Vol.5, pp. 527-534, 2002 .
- [8] 市村強，伊丹洋人，佐茂隆洋，堀宗朗，山口直也：デジタルシティ神戸の構築とその震災シミュレーションへの応用に関する基礎検討，構造工学論文集 JSCE，Vol.51A, pp. 513-520, 2005 .
- [9] T. Ichimura, M. Hori, K. Terada, T. Yamakawa : On Integrated Earthquake Simulator Prototype: Combination of Numerical Simulation and Geographical Information System, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.22, No.2, pp. 233s-243s, 2005.
- [10] 堀宗朗，井上純哉，市村強，中村光，若井明彦，海老澤健正，山口直也：防災担当者の技術力向上のための耐震設計の共通化と地震応答の統合的可視化，土木学会論文集，No. 794/ -72, pp. 171-188, 2005 .
- [11] 国土地理院刊行：数値地図 50m メッシュ (標高)，(財)日本地図センター，2001.
- [12] <http://www.mapcube.jp/>
- [13] 国土地理院：数値地図 25000 (空間データ基盤).
- [14] Hans Wackernagel 原著，地球統計学研究委員会訳編，青木謙治監訳：地球統計学，2003.
- [15] Zhu P, Hori M, Kiyono J, and Fujino Y : Constructing Structural Database Using 3D GIS Data for urban Earthquake Disaster Simulation, Proceedings of The third International Conference on Continental Earthquake (III ICCE), 2004.
- [16] 建築基準法施行令，1995 .
- [17] 国土交通省住宅局建築指導課他：2001年版 限界耐力計算法の計算例とその解説，2001 .