

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

Construction of Digital City KOBE &
A Basic Discussion on Application of IES approach to Earthquake Disaster Simulation

市村強*, 伊丹洋人**, 佐茂隆洋***, 堀宗朗****, 山口直也†

Tsuyoshi ICHIMURA, Hirohito ITAMI, Takahiro SAMO,

Muneo HORI and Naoya YAMAGUCHI

*博(工) 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

***東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

****Ph.D 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

†博(工) 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒 210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-2)

Reasonable earthquake disaster information has an important role for reduction of earthquake disaster. For generation of such information, we have developed Integrated Earthquake Simulator (IES), which combines virtual reality city, numerical simulation tool for each structure and strong ground motion synthesizer with high resolution. In this paper, prototype Digital City KOBE is constructed as virtual reality city, and IES approach is applied into Digital City KOBE. Some case studies are shown as application example and present a potential usefulness of the IES approach.

Key Words : *Integrated Earthquake Simulator, Digital City KOBE, Strong Ground Motion Distribution, 3D underground structure*

キーワード：統合地震シミュレータ, デジタルシティ神戸, 強震動分布, 三次元地盤構造

1. はじめに

震災情報を高度化し理解しやすい形で社会に伝えていくことは、震災の軽減を図る上で重要である¹⁾。意思決定者である一般の市民の方々、行政官、技術者の間で震災に対する共通認識を構築し、様々な主体が様々な尺度で評価を行うことが可能な仕組みを作ることが重要である。

著者らは、この目的のため、震災の諸過程をシミュレーションの積み重ねによって再現し、その震災に対して評価を加えることによって得た高度震災情報を分かりやすい形で社会に提供する「統合地震シミュレータ」^{2),3),4)}の開発を試みている。現在までにシステム構成の雛型の構築が終了し、都市を構成する構造物だけではなくものの簡単なシミュレーションができるようになっていく。

本論文では、まず統合地震シミュレータの概要について述べ、次にデジタルシティ神戸のプロトタイプ構築について述べる。最後に、統合地震シミュレータのプロトタイプとデジタルシティ神戸を用いて複雑な都市の動的応答解析を試みる。いくつかのケーススタディから、入力地震動や地盤構造の変化によって都市の地震時応答及び被災度が顕著に変化しうることが分かり、このような変化を捉えうる統合地震シミュレータの有用性・有効性が示唆された。

2. 統合地震シミュレータの概要

近年の地震観測技術の発展の結果、地表面での揺れは、「断層の破壊過程」、「断層から放射された地震波が伝播する地殻構造」、「地表面での地震波の増幅の特性」の三つに大きく影響され、複雑な分布を示すことが分かってきた。震災はこの複雑な地震動分布によって各々の対象が揺らされ引き起こされる。より高精度かつ高分解能な高度震災情報を提供しさらにこれに対する評価を可能とするためには地震動及びそれによって揺らされる各対象物の挙動を十分な精度・分解能で調べる必要がある。さらに、この構造物の被害が人・社会に対してどのように影響を及ぼし、その影響がどのように波及していくのかということについても詳細に調べ、評価を行う必要がある。既存の統計的・経験的手法によって震災情報をもとめ、評価を下すことは可能とは考えられるが、これらの方法は、過去の例を用いて未来を予測するため、日々高度化・複雑化が進んでいる都市部などでの今後起こるであろう新しい複合的な震災の予測は難しい。また、多くのデータを平均化してしまうため、局所的な性質を考慮することが難しく、各地点固有の性質が埋没してしまう可能性がある。

統合地震シミュレータは、震災の諸過程をシミュレーションの積み重ねによって再現し、それに対して評価を加えることによって得た高度震災情報を分かりやす

い形で社会に提供することを目指している。本シミュレータは、断層から地表までの地震動の生成過程をシミュレーションする強震動シミュレータ、鋼構造・コンクリート構造・土構造・建築構造物などの構造物応答をシミュレーションする解析ツール、人の動きなどを踏まえ災害をシミュレーションする災害シミュレータ、そして、これらを踏まえ震災を総合的に評価し、分かりやすく高度震災情報を提供する評価システムからなる（図-1 参照）。デジタルデータ群を管理する基幹システムと各事象・構造物の数値解析ツールをプラットフォーム・プラグイン仕様で結びつけることにより陳腐化しない全体システムの構築を目指し、さらにデジタルデータ群を動的に更新することにより絶えず最新の情報を提供するシステムを目指す。シナリオ地震毎にどのようなかなどの比較検討なども可能であると考えられる。このように統合的に評価することにより、構造物単体の耐震評価などだけではなく、例えば、道路閉塞などにより道路ネットワークが寸断された場合の影響評価などの面的な震災評価を行うことができる。また、平均的に与えられている脆弱性カーブの精緻化などにより、より詳細な震災評価などを支援することが可能になると考えられる。また、一つ一つの構造物の挙動予測を数値シミュレーションの積み上げにより評価するため、それぞれの震災情報を必要に応じて確度をあげることが可能であり、「地震が起きた場合に何が起きるのか？」という問いに対して、より説得力のある情報を提供することが可能であると考えられる。

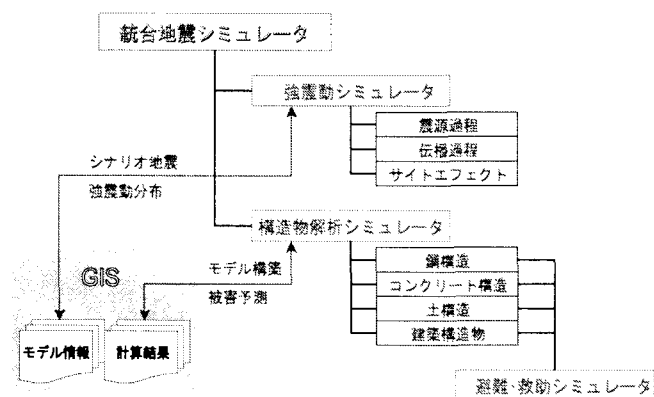


図-1 統合地震シミュレータの概要

このように一連の流れを高度な数値シミュレーションの積み重ねによってシミュレーションし、評価することは近年の計算科学と情報科学などの目覚ましい発展、構造物の数値解析技術の格段の進歩、デジタルデータの整備の進展により実現がみえてきたものである。自然科学、社会科学などの区別をすることなく統合的に社会に起こる事象を高度な数値シミュレーションの積

み上げによって明らかにし、分かりやすい形で社会に提供していくという新しいアプローチであり、相互に依存し、複雑にからみあった社会問題の解決を図るための一つの手段となりうるものと考えている。

3. デジタルシティ神戸の構築

利用可能なデジタルデータを用いて仮想現実都市を計算機上に構築し、統合地震シミュレータのプロトタイプにより震災のシミュレーションを行う。本論文では、神戸近傍（（東経 $135^{\circ} 17' 40''$ 、北緯 $34^{\circ} 42' 58.5''$ ）～（東経 $135^{\circ} 18' 4.5''$ 、北緯 $34^{\circ} 43' 19.5''$ ））の 500×700 [m] を対象領域として、仮想現実都市を構築した（図-2）。これをデジタルシティ神戸と呼ぶこととする。後に述べるが、限られたデータ内で構築しているため、本論文で紹介しているデジタルシティ神戸はプロトタイプ段階である。

本論文では、利用可能なデータを元にして、地盤構造・橋梁・建築構造物からなる仮想現実都市を構築した。本論文で用いたデータを以下に挙げる。

- ボーリングデータ⁵⁾
- 50m メッシュ標高データ⁶⁾
- 建物平面幾何形状データ^{7),8)}
- 建物種別^{7),8)}
- 橋梁図面

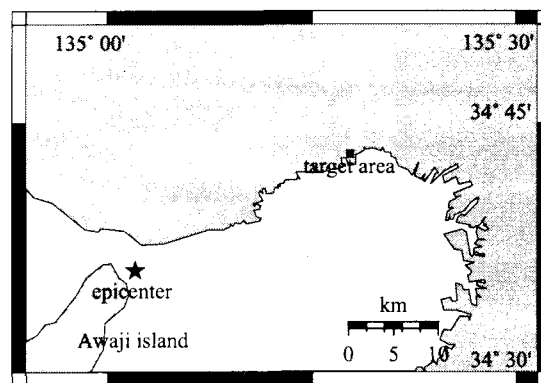


図-2 対象領域の位置

3.1 対象領域の三次元地盤構造モデル

対象領域近傍 10 [km] 四方の領域内のボーリングデータを利用し三次元地盤構造を推定した。参考文献⁵⁾内のボーリングデータには、多くの地層が含まれているが、ここでは簡単のため、堆積層と工学的基盤層の二層からなると仮定して三次元地盤構造を推定した。デジタルデータベース化したボーリングデータから、工学的基盤と堆積層との境界面の深さ及びボーリングデータの水平位置を抽出し、参考文献^{2),9)}の方法により境界面を推定した。この方法は、与えられたデータを満足す

る曲面の中から曲面の振動と滑らかさが最小となるものを選ぶものである。地表面形状は、数値地図 2500(標高データ)⁶⁾を用いて同様に推定した。以上の地表面形状及び工学的基盤と堆積層との境界面を合わせ、三次元地盤構造を推定した(図-3)。地表面形状には大きな起伏・変化がみられないが、工学的基盤と堆積層との境界面形状は図に示すようにやや南西向きに落ち込んでいることが分かる。後述のように本論文では、地盤を線形弾性体と仮定して、波動解析を行うため、表-1に示す物性のみを設定している。

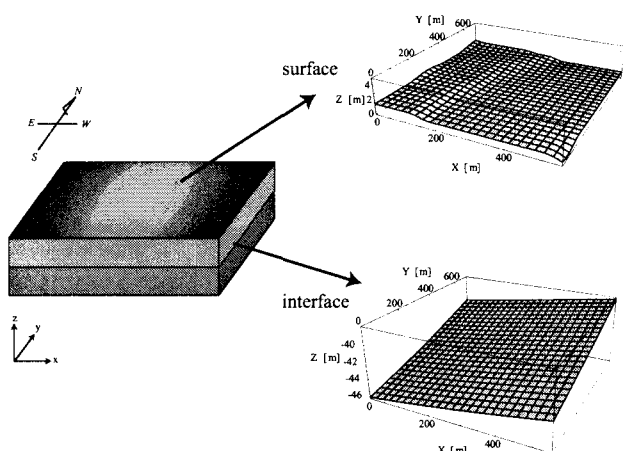


図-3 推定された三次元地盤構造モデル

表-1 地盤モデルの材料定数

	堆積層	工学的基盤層
縦波の速さ [m/sec]	300.0	1000.0
横波の速さ [m/sec]	200.0	600.0
密度 [kg/m ³]	2000.0	2500.0
減衰定数 [-]	0.02	0.008

3.2 橋梁モデル

実構造物の線形・縦断面図や下部工関係図・横断面図・側面図から、形状データ及び位置データを抽出し、デジタル三次元データを作成した(図-4)。このデジタル三次元データは、部材単位で固有のIDを割り振ったデータ構造をもっており、様々なデータ加工等を簡便に行うことができる。対象とする地域内の橋脚14本を、図-5のようにモデル化した。後述のように、本論文では橋梁を線形弾性体と仮定して動的解析を行う。ここでは、この橋梁がコンクリートのみからなると仮定して、ヤング率、ポアソン比、密度、減衰定数を各々 2.646×10^{10} [N/m²], 0.170, 2500 [kg/m³], 0.01 と設定している。

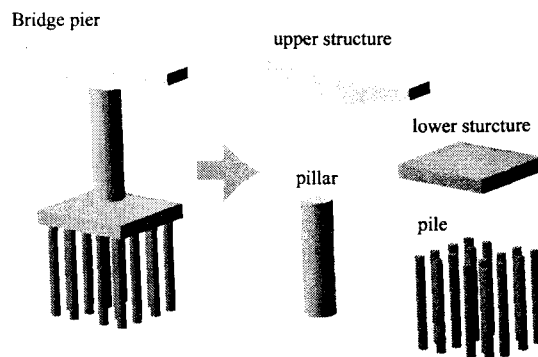


図-4 構築されたデジタル三次元データの一例

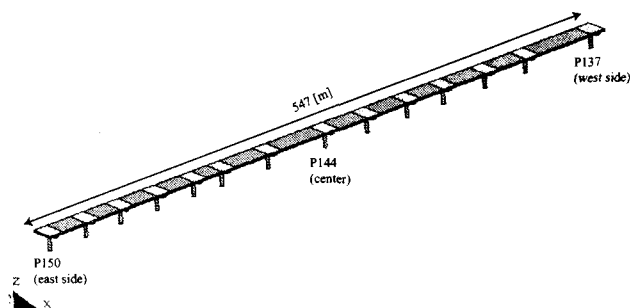


図-5 対象領域内の橋梁モデル

3.3 建築構造物

阪神・淡路大震災の後に作成された建築物被災度数値化データ^{7),8)}内の建築構造物の平面形状データと建物の種類・用途を用いて建築構造物群を作成した。高さに関するデータが得られなかったので、このプロトタイプでは、個々の構造物の種類により高さを決定している。同様にその種類によって建物の階数、階層の高さ、一次固有周期係数、減衰定数の推定をした。ここでは、一次固有周期を建物の高さで除した値を一次固有周期係数としている²⁾。各々の値を表-2に示す。対象とする領域には、1261個の構造物があり、ひとつひとつの構造物にIDを割り振り、各構造物毎にデータファイルを作成している。個々のデータファイルには、位置データ、三次元形状データ、種類、用途が格納されている。図-6に建築構造物群と橋梁を含むデジタルシティ神戸の全景を示す。

3.4 データ変換例

このデジタルシティでは、前述のように、データ構造を定義しながら、個々の構造物に対してファイルを割り振り、固有のIDにより管理することにより、データのハンドリングを容易にしている。例えば、IDを指定することにより、自由に都市のデータを抽出することができる。さらに、それぞれのデータに対応して、デー

表-2 建築構造物の諸元

建物種別	階層の高さ [m]	階数 [-]	一次固有 周期係数 [sec/m]	減衰 定数 [-]
木造	3.5	2	0.02	0.07
無壁舎	3.5	2	0.03	0.03
RC	3.5	3	0.03	0.05
SRC	3.5	4	0.03	0.02

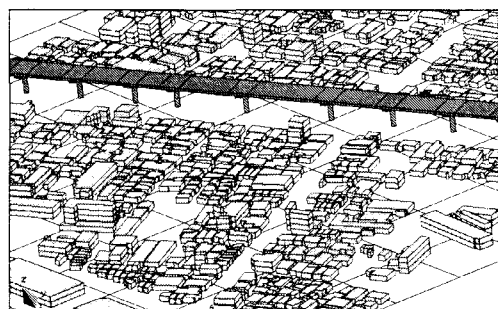
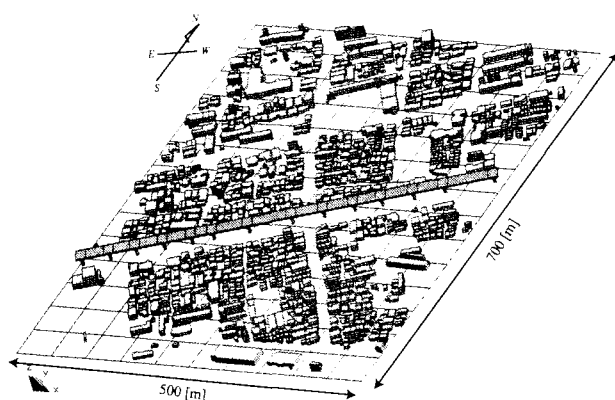


図-6 デジタルシティ神戸全景

タを加工し、モデル化も容易に行うことができる。例えば、構造解析でよく用いられる質点系にモデル化することも容易である(図-7 参照)。

4. デジタルシティ神戸を用いた 統合地震シミュレーション

上記で構築したデジタルシティ神戸を用いて、プロトタイプの統合地震シミュレータにより震災シミュレーションを行う。本論文では、強震動シミュレータ及び橋梁の動的解析シミュレータとして微小変形線形弾性体を仮定した動的有限要素法を、建築構造物の動的解析シミュレータとして近似モード解析法^{10),11)}を組み込んだ統合地震シミュレータによりシミュレーションを行っている。構造物間での相互作用は未だ考慮してい

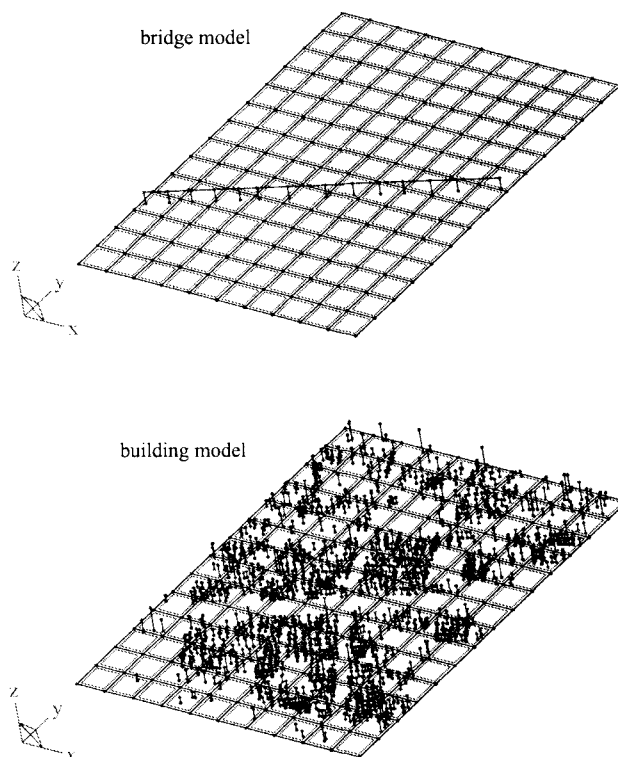


図-7 データ変換例：三次元構造モデルから質点系モデルへ

ない。

三次元地盤構造の影響、波動伝播の位相効果を考察するため、以下の case 1 ～ case 3 の 3 ケースについてシミュレーションを行った。

case 1: 3.1 で推定した 3 次元地盤構造に地震動が鉛直下から入射された場合

case 2: 1 次的に簡略化された地盤構造に地震動が鉛直下から入射された場合

case 3: 3.1 で推定した 3 次元地盤構造に地震動が x 軸周りに 5° 傾いて入射された場合

case 2 の簡略化された地盤は、地表面・地層の境界面の平均値をもとめ、水平成層構造としたモデルである。地盤構造モデル下端から、東西方向、南北方向に中心周波数 1.0[Hz]、中心時間 1.0[sec] の Ricker Wavelet を入力した。また、後述する被害評価のため、case 2 の最大速度が神戸鷹取地震波の最大速度(東西方向 70.8[kine]、南北方向 70.4[kine])に等しくなるように振幅を補正した。

4.1 強震動シミュレーション

空間方向を六面体アイソパラメトリック要素を用いた微小変形線形弾性体有限要素法により、時間方向を中心差分法により離散化し、強震動シミュレーションを行った。側面には半無限吸収境界条件を適用し地盤の半無限性を考慮している(図-3 参照)。解析時間は 5.12[sec]、解析時間ステップはクーラント条件を考慮して 0.001[sec] とし、0.01[sec] 刻みでデータを出力した。

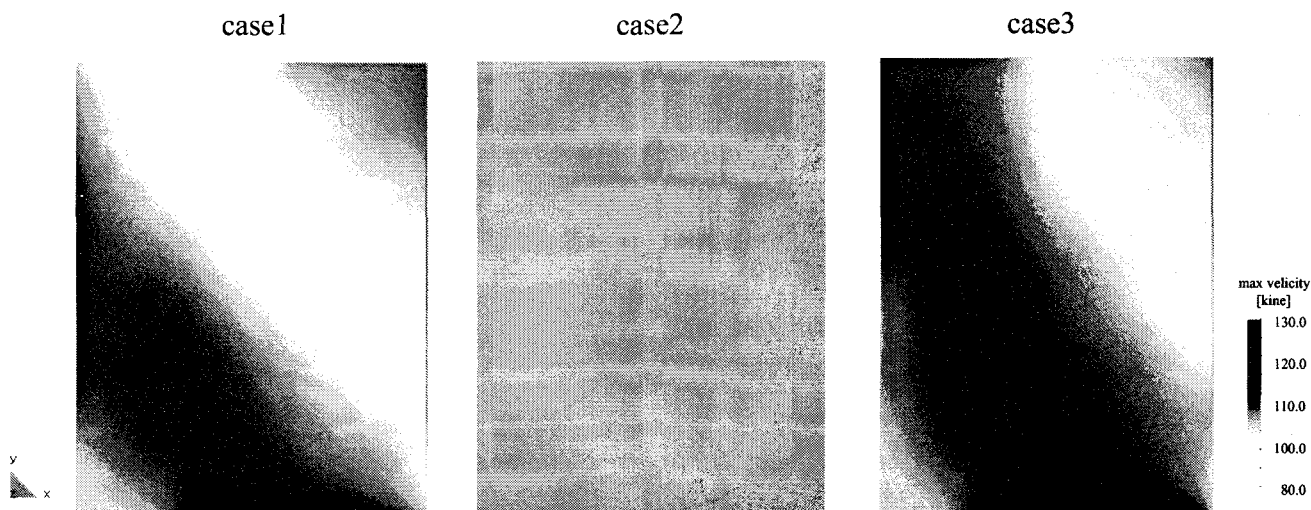


図-8 最大速度分布 [kine]

一波長あたり 10 要素程度で精度が保障され则认为、波動計算の精度は 5.0[Hz] まで保障されているとした。

最大速度分布を図-8 に示す。case 2 は水平成層構造としてモデル化されているため、一様な地震動分布となっている。これに対し case 1 のように三次元地盤構造をもつケースでは、領域内において顕著な地震動分布の偏りがみられた。また、位相差を考慮した case 3 では case 1 と比較して地震動の分布が南北方向に伸びており、位相差の影響により地震動に顕著な差が現れうることを示している。case 2 の最大速度が約 100[kine] 程度であることを考えると、単純化した case 2 と比べ、 $\pm 20 \sim 30[\%]$ の差が生じており、被害分布にも十分影響を及ぼしうるオーダーの差であると考えられる。

4.2 橋梁の動的応答解析

上記の case 1 ~ case 3 で得られた強震動データを用いて、橋梁の動的応答解析を行った。空間方向を四面体二次要素を用いた微小変形線形弾性体有限要素法（節点数: 33960, 要素数: 16612）により、空間方向をニューマークの β 法 ($\beta=1/4, \delta=1/2$) により離散化した。入力地震動として、各橋脚位置における強震動データをそれぞれ取り出し、橋脚底面から入力している。解析時間は 5.12[sec]、時間刻み 0.01[sec] とした。最大 von Mises 応力分布図を図-9 に示す。応力値は最大値が 1 となるように正規化している。各ケースで各橋脚や桁にかかる応力にばらつきが現れ、応力の分布が異なっていることが分かる。図-10 に東端 (P137)・中央 (P144)・西端 (P150) の各橋脚位置での地震動の応答スペクトルを示す (P137, P144, P150 の位置は図-5 参照)。地盤に入力された波は同様の単純な Ricker wavelet 波であるにも関わらず、3 次元地盤構造及び位相差の影響により各地点の応答スペクトルは大きく異なっている。そ

の結果、橋梁の動的応答が変化し、応力分布が各ケースで異なったものと考えられる。

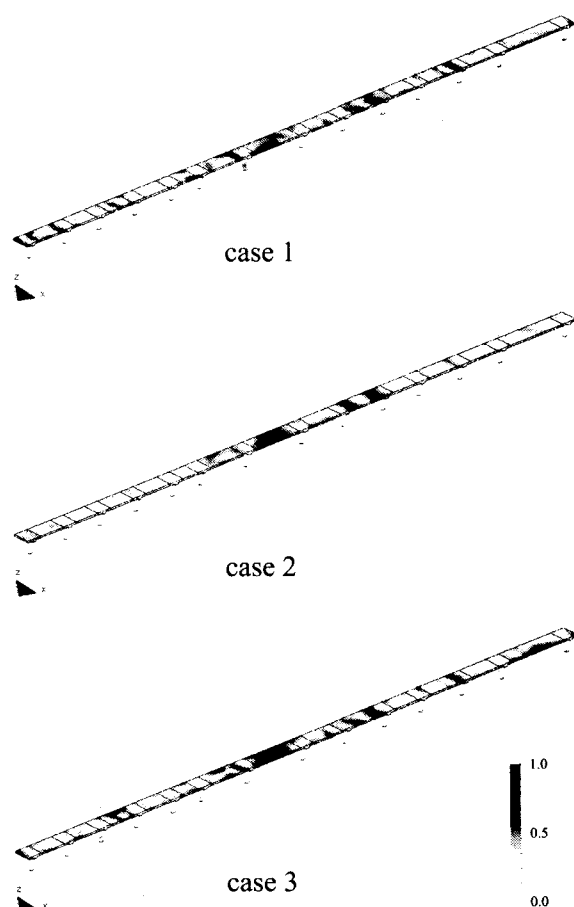


図-9 von Mises 応力分布

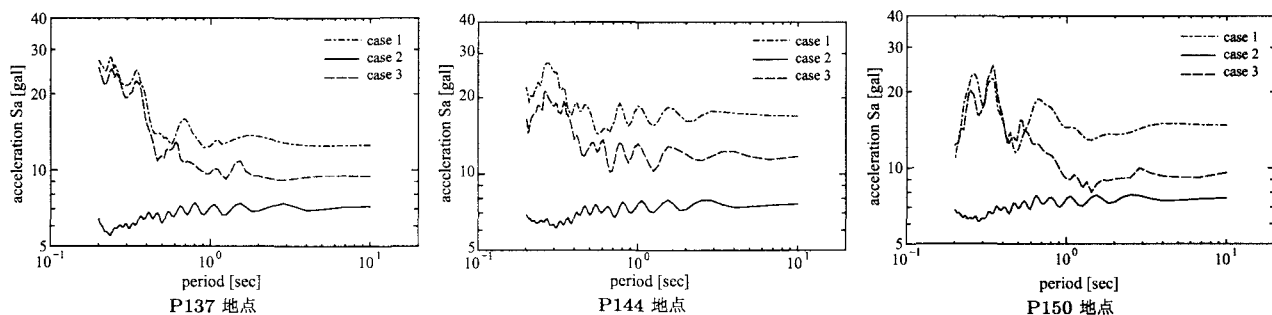


図-10 橋脚 P137, P144, P150 地点での地震動の加速度応答スペクトル（東西方向成分）

4.3 建築構造物の動的応答解析

4 次モードまでを考慮し近似モード解析^{10),11)}によって動的解析を行った。具体的には、表-2 の物性を用い、参考文献²⁾の方法により解析を行った。入力地震動として、各建物位置における強震動データをそれぞれ取り出し、建物底面から入力している。解析時間は 5.12[sec]、時間刻み 0.01[sec] とした。

各ケースの最大層間変位角の分布を図-11 に示す。case 2 では、地表面の地震動が領域内で等しくなっているため、同形式の構造物ではすべて同じ層間変位角になっている。それに対し、case 1 では三次元地盤構造による強震動分布に偏りがあるため、同様の構造でも層間変位角に大きなばらつきが見られる。また、case 1 と case 3 との間でも大きな差がみられ、位相差による影響も顕著であることがわかる。

4.4 建築構造物の被災評価の試み

層間変位角は被害を表す第一近似の指標としては有効であるが、そのままでは被災評価とまらない。構造物の種類毎に小破・大破の閾値を設定し、層間変位角の最大値から損傷度を評価し、被災評価を行った。本評価で用いた被害判定（大破・小破）の閾値を表-3 に示す。小破については建築基準法施行令¹²⁾に基づく値を用い、大破については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」¹³⁾を用いた。ただし、例外として木造の判定については文献¹⁴⁾を、RC の判定については文献¹⁵⁾を参考にした値を使用した。

図-13 に各ケースの被災分布を示す。case 2 では、同形式の構造物では等しい被災判定となっている。それに対して case 1, case 3 では、被災分布においても構造物の種類だけでなく地域的な偏りが現れていることが分かる。これは、同じ構造形式の建築構造物であっても、その立地条件により入力される地震動が異なるためであり、近傍の地盤構造が被災分布に影響を及ぼしうることを表しているものと考えられる。

更に詳しくみるために、図-12 に層間変位角の分布と閾値の関係を示す。図中上部の破線が各構造物の大破

の閾値を下部の破線が小破の閾値を示している。case 2 では、入力される地震動が一樣なため、層間変位角は各種構造様式のものに依存し、分布はみられないが、case 1, case 3 では閾値と比較して十分顕著な偏りが見られる。位相差による局所的な地震動の変化が敏感に建物の応答に影響を及ぼし、建物の層間変位角の分布が大きく異なっていることがみてとれる。これは局所的な建物被害が地震動の性質に敏感に左右されうること示しており、今後脆弱性カーブとの関連を含めて詳細な検討を行う必要があると思われる。

簡単のため、被害額を大破を 1.0、小破を 0.5 として、都市全体の建築構造物の被災額を評価する。各ケースの被害額は表-4 のように試算される。このケーススタディでは、case 2 では他の 2 つと比較すると被災状況が約 15% 少なく試算されている。地盤構造を 1 次元的に簡略し 3 次元構造による影響を無視したために、その被災状況が少なく評価されたことになる。また、case 1 と case 3 とでは、同程度の被災状況の試算になっているが、その内訳を詳しく見ると、case 1 では木造や RC の構造物に被災が集まっているのに対して、case 3 では無壁舎に被災が集まっている。つまり、基盤面への入力地震動の位相差のあるなしによって生じた地震動の性質の差が被災状況の内訳に現れているといえ、統合地震シミュレータはこのような差異も捉えうることがわかる。

表-3 被災判定のための層間変位角の閾値

	木造	無壁舎	RC	SRC
小破	1/120	1/200	1/200	1/200
大破	1/30	1/50	1/30	1/50

5. おわりに

本論文では、統合地震シミュレータの概要について説明し、構築したデジタルシティ神戸を用いて、統合



図-11 各ケースの層間変位角分布

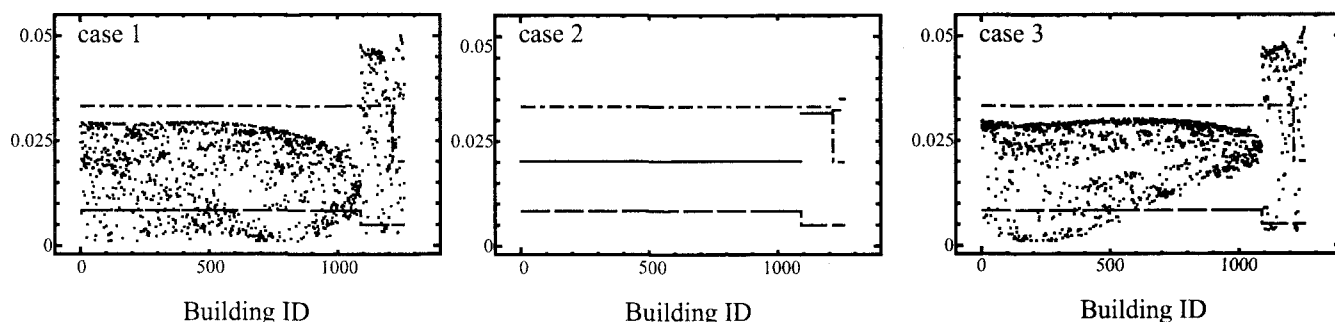


図-12 各ケースの建物種別ごとの層間変位角分布

表-4 被災状況の試算

	木造	無壁舎	RC	SRC	合計
case 1	545.0	62.0	28.0	19.0	654.0
case 2	525.0	17.5	13.0	9.5	565.0
case 3	500.0	105.5	19.5	19.0	644.0

地震シミュレーション例を提示し、本シミュレータの有用性を示した。今後はデジタルシティ神戸及び統合地震シミュレータの高度化を行い、阪神大震災の再現を試みる予定である。また、その過程で一般の都市を対象としたデジタルシティ構築のための方法論の検討についても行う。データ及び解析手法が結果に及ぼす感度を調べることにより合理的なモデル化及び解析手法の選定を行うための検討が必要であると考えている。

謝辞： デジタルシティ神戸の構築に際し、独立行政法人建築研究所・東京大学大学院工学研究科藤野陽三

教授・阪神高速道路公団のデータを使わせていただきました。また、社会技術研究地震防災グループ及び土木学会地震工学委員会統合地震シミュレータ研究小委員会の委員の方々から有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 堀宗朗, 市村強, 寺田賢二郎: 地震防災を促進する情報生成・伝達の技術に関する一考察, 社会技術研究論文集, Vol.1, pp. 367-373, 2003.
- 2) 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.
- 3) T. Ichimura, M. Hori, K. Terada, T. Yamakawa: ON INTEGRATED EARTHQUAKE SIMULATOR PROTOTYPE: COMBINATION OF NUMERICAL SIMULATION AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng. JSCE*, (accepted).
- 4) T. Ichimura and M. Hori: Development of Prototype of Integrated Earthquake Disaster Simulator using Digital City and Strong Ground Motion Simula-



図-13 各ケースの被害分布

- tor with High-resolution, 13th World Conference on Earthquake Engineering, No. 1418, 2004.
- 5) 神戸市財団法人建設工学研究所: 阪神・淡路大震災と神戸の地盤:「神戸 JIBANKUN」の構築ならびに地盤と被害の分析, 1998.
 - 6) 国土地理院: 数値地図 50 m メッシュ (標高) 日本-III, (財) 日本地図センター, 2001.
 - 7) 震災復興都市づくり特別委員会: 阪神・淡路大震災被害実態緊急調査被災度別建物分布状況図集, 1995.
 - 8) 建設省建築研究所: 平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996.
 - 9) 青山隆行, 塩野清治, 升本眞二, 野藤孝裕: 最適化原理による不連続な曲面の推定, 情報地質, 第 8 巻, 第 3 号, 157-175, 1997.
 - 10) 田治見宏: 建築振動学, コロナ社, 1965.
 - 11) 志賀敏男: 構造物の振動, 大学講座 建築学 構造編 2, 共立出版社, 1976.
 - 12) 建築基準法施行令, 1995.
 - 13) 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.
 - 14) 林康裕: コミュニティーレベルの適応的マネジメントのための地震被害シミュレータの開発, 2002.
 - 15) 川瀬博: 建物の地震被害の予測とその軽減への展望, *Journal of Geography*, 110(6) pp. 885-889, 2001.

(2004 年 9 月 17 日 受付)