

# 統合地震シミュレータにおける 高分解能強震動シミュレータと都市域の電子情報の利用について

—地盤構造の推定手法が強震動分布に及ぼす影響の基礎検討とGISを中心とした統合地震シミュレータの雛型の構築—

Development of Prototype of Integrated Earthquake Disaster Simulator

市村強\*, 堀宗朗\*\*, 寺田賢二郎\*\*\*, 山川貴弘\*\*\*\*

Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, Kenjiro TERADA, Takahiro YAMAKAWA

\*正会員 博士(工学) 助手 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

\*\*正会員 PhD. 教授 東京大学地震研究所 (〒113-0032 文京区弥生1-1-1)

\*\*\*正会員 PhD. 助教授 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

\*\*\*\*学生会員 学士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

Realistic simulation of a possible earthquake is important for making rational counter plan against earthquake disaster. This paper proposes such a simulation method, Integrated Earthquake Disaster Simulator (IEDS), using a high-resolution strong motion simulator and constructing a simulation model for a whole city. The validity of this strong motion simulator is estimated, and preliminary discussion is made for the sensitivity of resulting strong ground motion against input soil structure data. The methodology of constructing these models and the prototype of the IEDS is studied. An example of a city model is constructed and some earthquake disaster simulation is made to examine the performance of the IEDS.

**Key Words** : *Integrated Earthquake Disaster Simulator, Strong Motion Simulator with High-resolution*

## 1. はじめに

合理的な震災対策策定のためには、どのような震災が起りうるのかを明らかにし、適切な評価を下す必要がある。統合震災シミュレータ<sup>1)</sup>は、(i)GIS/CADデータなどの電子情報を用いて計算機上に都市の再構成を試み、(ii)これをコンクリート・土・鋼・建築構造などの各構造物のシミュレーションツールと高分解能強震動シミュレータとを連成させることによりどのように揺れるかを解析し、(iii)その結果・影響に対して評価を下すことを目指している。

このように統合的に街全体を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や平均的に与えられている脆弱性カーブの精緻化などの面的な震災評価を支援することが可能になると考えられる。

本論文では、このシステムの構築を図るための基礎検討を行った。各シミュレーションツールの充実を図ると同時にデータに関しても留意しなければならない。データが完全に与えられるわけではないので、どのようなデータが結果に対してどの程度の影響を与えうるのかという感度を知ることが重要となる。しかし、どのようなデータが結果に対してどの程度の感度をもっているのかが明らかにされていない。各種データに関し

て検討を今後行う必要があるが、本論文では、高分解能強震動シミュレータの開発に関して述べ、次に高分解能強震動情報の地盤データへの鋭敏さに関する基礎検討を行う。最後に統合地震シミュレータのプロトタイプ開発のために、上述の(i)~(iii)の流れを踏まえたシステムのプロトタイプの構築を行い、幾つかのケーススタディを行い、本システムの有用性を示す。

## 2. 高分解能強震動シミュレータの開発とその適用に関する基礎検討

### 2.1 階層型解析手法に基づく 高分解能強震動シミュレータの開発

近年の観測により、断層の破壊過程・地殻内の波動伝播・地表付近の増幅効果が強震動分布に及ぼす影響が大きいことがわかってきている。強震動分布を高分解能で定量的に予測するためには、これらを考慮した三次元数値シミュレーションが有効な方法と考えられるが、膨大な計算量・地盤情報の不確実性・地盤のモデル化の困難さなどから実現が難しいとされている。本高分解能強震動シミュレータでは、階層型解析とバウンディングメディア理論を組み合わせたマクロ-ミクロ解析手法<sup>2)3)</sup>を用いて上記の問題点の解決を図っている。更に、地理情報システム(GIS)にボーリングデータ及びモデリングツールを実装し、三次元地盤構造を自動

表-1 震源の諸元

Date	Magnitude	Epicenter location	Strike	Dip	Rake	Epicenter depth
2000/09/29	4.5Mj	35.5222N 139.7350E	318°	80°	-120°	74km

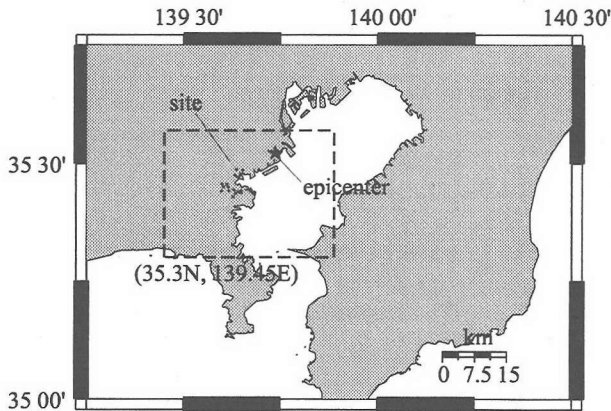


図-1 震源と観測サイト

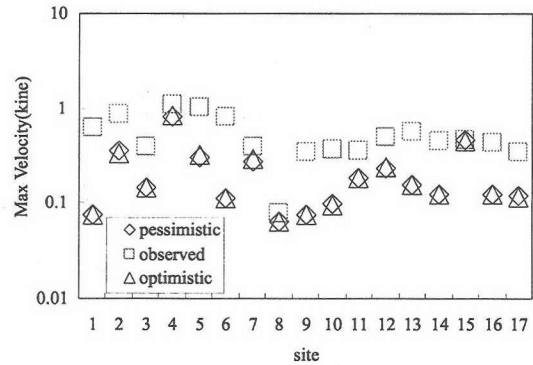


図-2 観測との比較 (東西成分)

的に作成可能なツールを開発し、上記手法と連成させた高分解能強震動予測システムの開発を行っている。開発した高分解能強震動予測システムの有効性を検討するため、横浜市で観測されたデータの再現を試み、最大速度等の地震被害を表す指標などとの比較を行った。

マクロ-マイクロ解析手法は、階層型解析とバウンディングメディア理論を組み合わせた手法である。階層型解析は、一度に必要な計算量を抑えながら高い空間分解能と時間分解能を獲得するために導入される。まず、低分解能で全体について計算を行い、つぎに、その結果を用いて高分解能で部分領域で計算を行う。バウンディングメディア理論は、物性情報の不確実性に対処するために導入され、もっとも起こりうる挙動を挟み込むような二つの挙動を与える構造を与える。

強震動シミュレーションには以下のように適用する。

- i) 地盤・地殻構造情報の不確実性を考慮して、物性が確率的に変動する地盤・地殻構造の確率モデルを構築する (1 (m) オーダーの分解能)。
- ii) この確率モデルに対して、バウンディングメディア理論を適用し、最も起こりうる強震動を挟み込む解を与える二つの構造を (上限と下限の構造) を設定する。
- iii) ii) で作成したモデルから等価な低分解能なモデルを作成する (階層型解析の導入: 100 (m) オーダーの分解能)。
- iv) iii) で作成したモデルを用いて断層から地表までをふくむ領域で強震動シミュレーションを行う (マクロ解析: 100 (m) オーダーの分解能)。
- v) 高分解能で強震動をシミュレーションしたい地点において、i) で作成した高分解能な地盤構造と iii) で得られた低分解能な強震動を用いて高分解

能な強震動シミュレーションを行う (マイクロ解析: 1 (m) オーダーの分解能)。

- vi) iv) ~ v) を上限の構造・下限の構造についてそれぞれ行い、高分解能で最も起こりうる強震動を挟み込む強震動をシミュレーションする。

マイクロ解析では、地表付近の三次元地盤構造をモデル化しシミュレーションを行う。工学的に重要な周波数帯までの精度を保証してシミュレーションするには、三次元構造を 1 (m) オーダーの空間分解能で評価する必要があるが、これは膨大な計算量及びボーリングデータなどへの評価を必要とする。ここでは、GIS に関東一円のボーリングデータを実装し、これを用いて三次元地盤構造を推定するプログラムを開発した。具体的には、以下の手順により地盤構造を推定する。i) ある地点を指定し、推定すべき領域を指定する。ii) そこを中心とした領域にあるボーリングデータ及び国土地理院の 50 (m) メッシュ標高データを取得する。iii) 層序を Yang *et al.*<sup>1)</sup>の方法により推定し、この層序を用いて塩野ら<sup>4)</sup>の方法を用いてもっとも滑らかなように各層境界を推定する。

横浜市近傍で起きた地震動の 0.1-5.0 (Hz) の成分をターゲットに再現を試み、観測された地震動と 17 サイトで比較を行った。震源とサイトの位置関係は図-1 の通りである。地震の諸元を表-1 に示す。強震動シミュレーションのための計算領域として、北緯 35.3 度、東経 139.45 度を左下端とする東西南北 40×30 (km) の領域を深さ 70 (km) まで切り出した (図-1 破線部)。三次元地殻構造は山中ら<sup>5)</sup>の構造を用い、地表付近の地盤の三次元構造は上述の手法により推定した。さらにこの構造の曖昧さを考慮するために、ヤング率に標準偏差 0.1 の正規分布となるような確率的なばらつき

を与えた。この確率的なモデルに対して、マクロ-ミクロ解析を適用し、強震動の再現を試みた。波動場の計算には、マクロ解析、ミクロ解析ともにボクセル有限要素法を用いた。マクロ解析では、1.0 (Hz) までの精度を保証して断層から地表までを計算している。これは、従来の研究で行われている数値計算による強震動シミュレーションとはほぼ同じことをおこなっており、他の研究と同様に最大速度などで実測データと良好な一致を得ることができている。マクロ解析では、低分解能で波動場計算を行うため、1.0-5.0 (Hz) の高周波数成分を補う必要がある。このため、強震動のスペクトルを過去の地震動のデータより求め、低周波成分に基づいて外挿することによって高周波数成分を求めた。この低周波数成分と高周波数成分により、5 (Hz) までの成分をもつ入力波を合成し、ミクロ解析を行った。

図-2に実測された最大速度と本手法により得られた最大速度を示す。計算結果には、0.1-5.0 (Hz) のバンドパスフィルターを適用した。いくつかのサイトでは、良好な結果が得られているが、大きく差がみられるサイトもある。低周波成分を考えているマクロ解析では、ここまでの差がみられなかったことから、高周波成分の評価に寄与する地表付近の地盤構造の推定手法及び影響評価や上述の高周波成分の補間が十分でないことがこの大きな差の原因と考えられる。

## 2.2 高分解能強震動シミュレータの適用に関する基礎検討

高分解能で強震動をシミュレーションするためには、高分解能な地盤構造モデルがなければならないが、一般に、データが限られているため詳細なモデルを構築することは難しい。上述の高分解能強震動シミュレータでは、バウンディング・メディア理論を適用することによって曖昧さを克服することを図っているものの、より現実的なモデル化などを考慮するためには、どの程度のデータのばらつきによってどの程度強震動分布が変化するのかについて考慮することは重要である。例えば、地盤構造の推定手法の選択などが結果に及ぼす感度を考慮する必要がある。ここでは、この目的のため、地表データが与えられたときにそのデータの補間手法の選択が強震動分布に及ぼす影響に関して、基礎的な検討を行う。

図-3-a) に示す、 $4 \times 4 \times 1$  (km) ( $x \times y \times z$ ) の領域を半無限領域から切り出し、数値実験を行う。地表面を除く五つの面には半無限条件を適用している。50 (m) メッシュ標高データを模して、地表面の形状は図-3-b) で示されるグリッド格子上で与えられた値を、case a) では一次関数で補間、case b) では二次関数で補間、case c) では三次関数で補間、case d) では四次関数で補間することによって求める。具体的には、 $x$  方向、 $y$  方向

をそれぞれ 0.5(km) のグリッド格子状に区切り、その点上で各々に値を設定している。(2,2,1), (1.5,2,0.75), (2.5,2,0.75), (2,1.5,0.75), (2,2.5,0.75) とそれ以外のグリッド上の点では、 $z$  の値を 0 にしている。図-4に地表面の形状を示す。各 case とも多少の違いはみられるが、大きな違いはないようにみえる。

上記で設定した case a) ~ case d) を用いて数値実験を行う。これらの数値モデルの媒質の物性は、簡単のため微小変形弾性体を仮定し、縦波速度 1.7(km/sec)、横波速度 1.0(km/sec)、密度 1.0( $t/m^3$ ) とする。入射波として、領域直下から  $x, y$  方向に振幅 1 (m) 周期 1 秒のサイン一波をもつ平面波を速度波として入力する。解析の手法としては有限要素法を用い、2(Hz) 以上の周波数成分が精度保証可能となるように離散化し(通常より厳しい線形一次要素で一波長あたり 16 要素の条件)、中心差分法を用いて陽的に解析を行った。

図-5に各 case で得られた測線 A-B 上での  $x$  方向の速度波動場を示す(測線 A-B は図-3-a) の (2,0,0) と (2,4,0) を結んでいる地表面上の曲線)。振幅、位相ともに一見すべて同じようにみえる。しかしながら、各波動場を各々重ね合わせると振幅、位相ともに異なっていることがわかる。ここでは、測線 A-B 上の二点 P, Q 上での速度波形を代表として選び考察をくわえる。図-6に点 P, Q 上での各 case の時刻歴波形を示す(点 P は測線 A-B 上の  $x=2, y=2$  の点、点 Q は測線 A-B 上の  $x=2, y=1$  の点)。まず、点 P 上の波形についてみる。図-6-i) から、case a) の波形のみが他の case と比較して位相・振幅ともに大きくずれていることがわかる。他の case 間でも、振幅・位相のずれなどがみられるものの case a) との差ほど大きくはない。この傾向は、より低周波成分の、1.0(Hz) 以下の成分を含む波形、0.5(Hz) 以下の成分を含む波形についても同様にみられる。表-2-a) の各 case の最大速度より、2(Hz) 以下の成分を含む波形では最大速度で 50% 以上の差があることがわかる。1.0(Hz) 以下の成分の波形、0.5(Hz) 以下の成分の波形についても同様に case a) のみの最大速度が大きく異なっている。表-3-a) より、最大速度についても同様である事がわかり、他の case と比べて case a) に系統的なずれがあることがわかる。波形の周波数成分をみてみると、図-7-a) に示すように、case a) のみが他の case とは低周波領域から大きく異なっている。

次に、点 Q 上の波形についてみる。図-6-ii) から、点 P の場合とは異なり、ひとつの case だけが大きく異なることはないものの、各々の case で小さな振幅・位相のずれがみられる。しかし、点 P の場合と比較すると、振幅・位相のずれは小さく、最大速度で高々 10% 程度の差しかみられない(表-2-b))。これは最大加速度についても同様である(表-3-b))。この傾

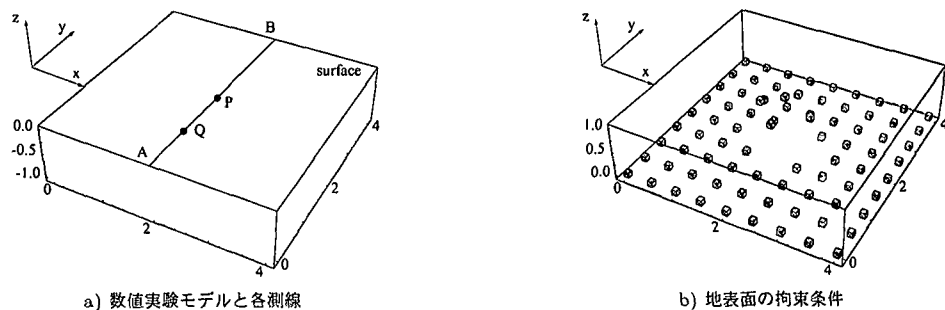


図-3 数値実験モデル

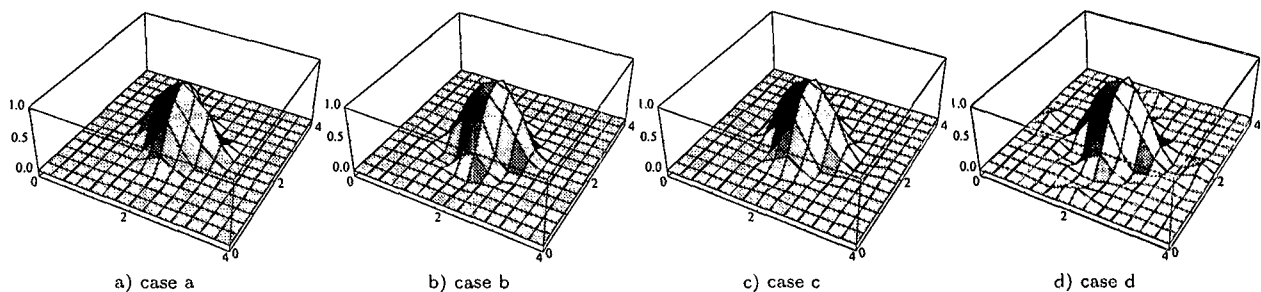


図-4 各 case の地表面形状

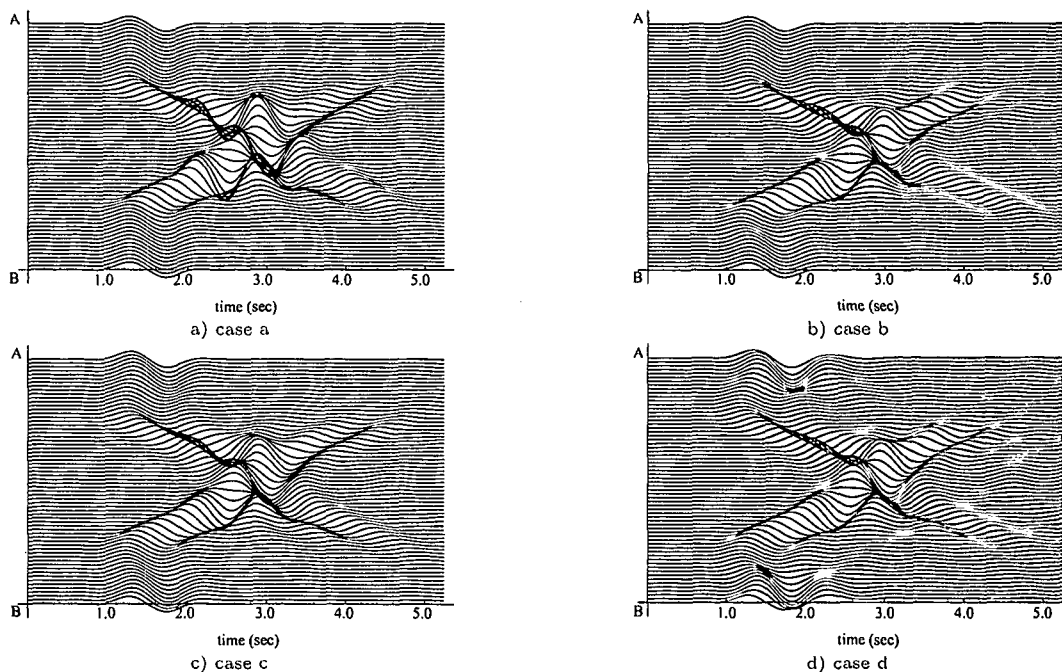


図-5 各測線上の時刻歴波形

向は、より低周波成分の、1.0(Hz)以下の成分を含む波形、0.5(Hz)以下の成分を含む波形についても同様にみられる。波形の周波数成分をみると、図-7-b)に示すように、一つの case の成分のみが極端に異なっているのではないことがわかる。

これらの波形の違いは、地表面形状の差からもたらされたものである。波長成分と構造の不均質性のレンジスケールの関係によって波動場が乱されることを考

え、点 P、Q 近傍の地表面形状の違いからこの波形の違いの説明を試みる。簡単な指標として、地表面形状のフーリエスペクトルを用いる。側線 A-B 上の点 P、Q を中心とする長さ 2 (km) の地表面形状を取り出し、フーリエスペクトルを求めた (図-8)。図-8-a) に示すように、点 P 近傍の地表面形状は、他の case の成分はほぼ一致しているが、長波長成分から系統的に case a) のみが異なっている。このため、case a) の波形のみ

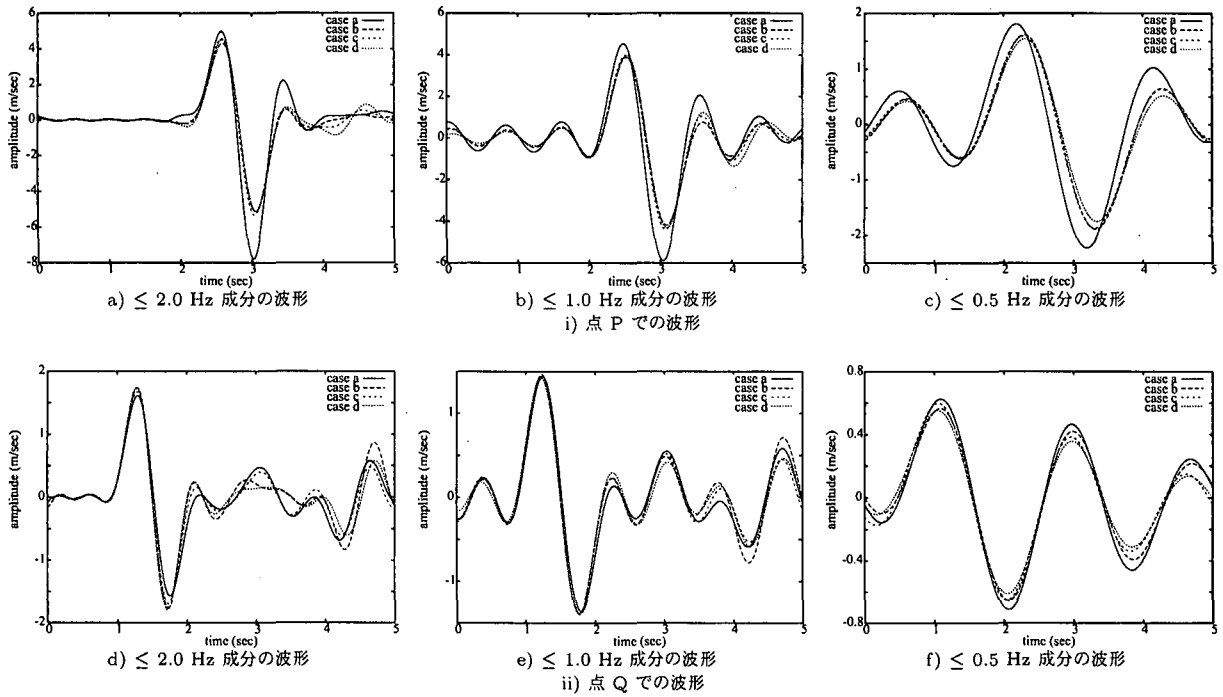


図-6 各点での時刻歴波形

	≤ 2.0 Hz	≤ 1.0 Hz	≤ 0.5 Hz
case a)	7.79	5.90	2.23
case b)	5.15	4.18	1.89
case c)	5.33	4.40	1.87
case d)	5.11	4.31	1.75

a) 点 P 上の波形の最大速度 (m/sec)

	≤ 2.0 Hz	≤ 1.0 Hz	≤ 0.5 Hz
case a)	1.61	1.44	0.71
case b)	1.76	1.45	0.66
case c)	1.70	1.46	0.65
case d)	1.79	1.42	0.61

b) 点 Q 上の波形の最大速度 (m/sec)

表-2 各ケースの最大速度

	≤ 2.0 Hz	≤ 1.0 Hz	≤ 0.5 Hz
case a)	46.01	30.01	6.38
case b)	32.68	22.71	5.46
case c)	34.27	23.69	5.37
case d)	33.07	23.38	5.09

a) 点 P 上の波形の最大加速度 (m/sec<sup>2</sup>)

	≤ 2.0 Hz	≤ 1.0 Hz	≤ 0.5 Hz
case a)	11.07	8.11	2.20
case b)	12.77	8.33	1.98
case c)	12.09	8.37	2.02
case d)	12.97	8.18	1.86

b) 点 Q 上の波形の最大加速度 (m/sec<sup>2</sup>)

表-3 各ケースの最大加速度

が他の case に比べ大きく異なっており、結果として振幅・位相に関しても大きな差を生んだと考えられる。一方、図-8-b) に示すように、点 Q 近傍の地表面形状は、一様にばらついており、どれかひとつの成分のみが系統的にはずれているということがない。このため、どの case も差はあるものの振幅・位相に関して大きな差が生じていないと考えられる。

最後に、各補間手法が構造物の動的応答に及ぼす影響について考察するため、点 P, Q で得られた各 case の波形について加速度応答スペクトルを求めた (図-9)。減衰定数  $\eta$  は 0.05 とした。点 P での加速度応答スペクトルは図-9-a) に示すように、case a) のみが他の case と比べ大きく異なっている。これは、波形・最大速度・

最大加速度の傾向と調和的である。長周期構造物の応答では補間手法の選択による影響は大きくないものの、短周期構造物の応答では影響が大きくなっている。特に、周期 1 秒付近では 50% 程度の差が生じている。また、点 Q での加速度応答スペクトルも図-9-b) に示すように、波形・最大速度・最大加速度の傾向と調和的である。長周期構造物の応答では補間手法の選択の影響は小さく、短周期構造物の応答では影響が大きくなる傾向は点 P と同じだが、周期 1 秒付近で生じている最大の差は高々 10% 程度にすぎない。

以上より、地表面で同じ拘束条件が与えていたとしても、補間の方法によって波形が大きく異なりうるということがわかった。また、構造物の動的応答に関しても

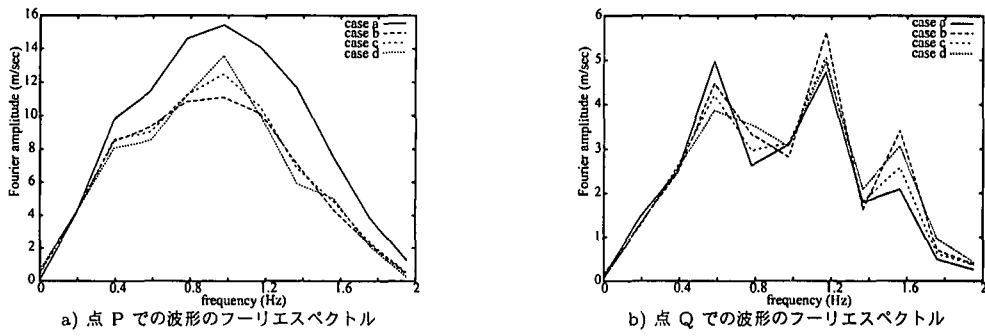


図-7 点 P, Q 上での波形のフーリエスペクトル

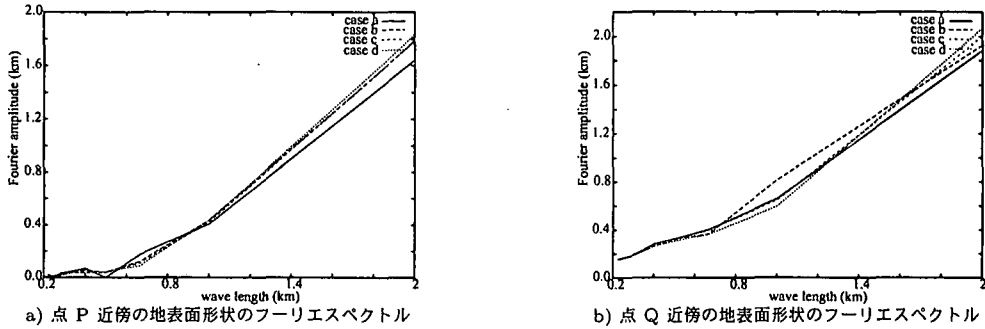


図-8 点 P, Q 近傍の地表面形状のフーリエスペクトル

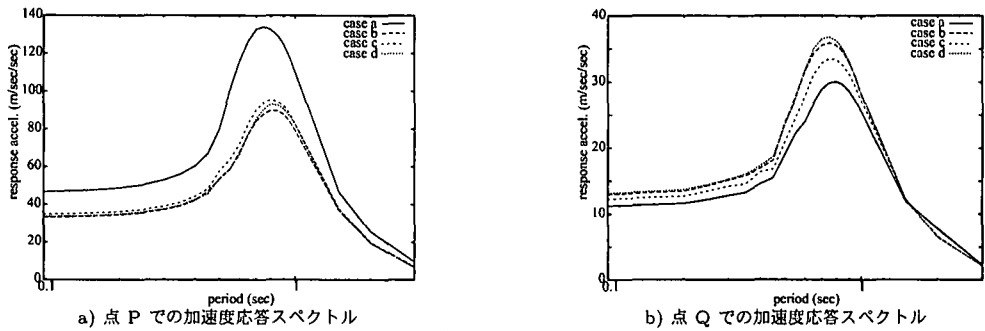


図-9 点 P, Q での加速度応答スペクトル

差が生じることがわかった。この差は求められた地表面形状のもつ波長成分に依存して生じていることから、構造の波長成分の変化が波形の成分に及ぼす影響や各種補間方法が波形に及ぼす影響をより詳細に評価し、実際の波形を再現するためには、より実地的な地盤データにおいて、どの程度のデータをどのように補間すればよいのかについて検討をくわえる必要がある。更に、推定される地震動がこのように地盤構造推定手法によることから、構造物の動的応答を再現するために、地盤構造推定手法がどのようなものであれば妥当であるのか？という構造物シミュレーションの結果に対する感度に関しても更に検討を行う必要がある。

### 3. 統合地震シミュレータの プロトタイプ構築

開発を続けている高分解能強震動シミュレータと電子情報により GIS 上に再構成した都市を用いて統合地震シミュレータのプロトタイプ構築を試みる。

GIS では、文字・数字・画像などを地図情報と結びつけ、計算機上に再現し、座標を指定してさまざまな情報を統合したり、分析することができる。さまざまな空間データを種類(レイヤー)毎に分けて記録し、これを重ね合わせるにより新たな領域データの作成、最短経路の抽出、空間データを用いたコミュニケーション、疑似体験や 3 次元分析などさまざまな空間シミュレーションが可能となる。従来、これらのデータは都市計画や都市景観の評価に際しての利用に限られてい

たものであるが、開発を目指している統合震災シミュレーターでは、これをシミュレーション・解析の形状データとして利用する<sup>1)</sup>。GISへ各種電子情報をレイヤーとして取り組み、座標をあわせることにより、この各レイヤーを正確に位置付け、都市を計算機上に再構成し可視化・解析することが可能となる。

統合地震シミュレータのプロトタイプ開発のために1×2km(東西×南北)の領域の仮想的な街を考える。この街の建築構造物に関するCADデータ、ボーリングデータ、50mメッシュ標高データが電子情報として与えられているとする。これらのデータからGISを利用して、図-10のように計算機上に街を再構成した。地盤構造は、ボーリングデータより、Yang *et al.*<sup>1)</sup>の方法により層序を求め、塩野ら<sup>4)</sup>の方法により層境界を求めた。みやすくするため、境界層とボーリングデータの深さを10倍表示している。

この再構成された都市と高分解能強震動シミュレータ及び建築構造物のシミュレータを用いて、この街の揺れをシミュレーションする。ケーススタディとして3 caseの周期の違う入射波を考えた。case 1では周期0.25秒、case 2では周期0.5秒、case 3では周期1.0秒のサイン1波振幅1の平面波を工学的基盤直下より入射した。

図-10に示した地盤構造と入射波により強震動のシミュレーションを行った。簡単のため、微小変形線形弾性体と仮定し、有限要素法により離散化し空間分解能を1mとして3次元的に動的解析を行った。各ケースの最大速度分布を図-11に示す。地盤の3次元構造を反映して強震動分布に偏りがみられることがわかる。また、入射波の周期が長くなるにつれ、強震動分布の偏りが弱まることから、入射波の主要成分の波長と地盤構造の不均質性のレンジスケールとの関係が、強震動分布の偏りの強弱に影響を及ぼしていることが分かる。これは地震が異なれば揺れ方が異なることを示しており、今後は、直下からの入力だけでなく傾きもった入射波を入力した場合での傾向を検討することや、これらの条件の変化でどの程度揺れ方が異なるのかなどを明らかにすることが、高分解能で強震動シミュレーションを行う上で検討すべきことと考えられる。

上記で得られた高分解能強震動情報を用いて、各建物の位置での強震動を入力地震動として建築構造物のシミュレーションを行った。簡単のため、地盤との連成を考慮しない簡便な近似モード解析<sup>6)</sup>により構造物の動的解析を行う。具体的な解析方法は、Yang *et al.*<sup>1)</sup>に拠った。近似モード解析では、構造物の動的特性を近似的に建物コードや統計的データに基づき与える。必要なデータは、自由度の数(GISデータで与えられている建物の階数)と各種建物種別である。GISデータから高さ情報を読みとる。各種建物種別情報がないた

め、本プロトタイプでは建物が1,2階の時は木造住宅、2~8階を鉄筋コンクリート、8階以上を鉄骨鉄筋コンクリートと仮定した。時間積分にはNew-markの $\beta$ 法を用い、計算時間間隔 $dt$ は0.01秒、解析対象時間は5.12秒とした。

結果の一例を、図-12に建物の損傷を表す指標の一つである層間変位角の分布として各ケースについて示す。層間変位角とは、隣合う二つの階の水平方向の相対変位をその間の高さで割ったものである。各ケースで層間変位角の分布が異なっていることが分かる。全体の傾向は、入射波の周期と建物固有周期の関係により説明されるが、局所的にこの関係からでは説明できない箇所があり、これは強震動分布の偏りを考慮することにより説明される。このような観点からも、シミュレーションを積み上げることによって街の挙動を求め、統合的に評価を行う本システムの有効性が示されると考えられる。

#### 4. まとめ

本論文では、統合地震シミュレータのプロトタイプの構築を図るための基礎検討を行った。開発を続けている高分解能強震動シミュレータにより横浜市で観測された地震波形の再現を試みた。また、誤差の原因のひとつと考えられる地盤構造の推定手法に関して基礎検討を行った。最後に、統合地震シミュレータのプロトタイプの構築を行い、幾つかのケーススタディを行い、統合的に震災をシミュレーションし、評価を下すことの必要性及び本システムの有用性を示した。今後は、より多くの構造物のシミュレータを取り込み、より実際の都市での震災のシミュレーションを試みる。また、各種シミュレータ間のデータの受け渡しのためのプロトコルの検討も行う。さらに、データに対する得られる結果の感度を検討することにより、どのようなデータが結果に対して大きな影響をもち、どの程度の評価のためには、どの程度のデータが必要なのかなどについて検討していきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) Yang, F., Ichimura, T. and Hori, M.: Earthquake Simulation in Virtual Metropolis Using Strong Motion Simulator and Geographic Information System, *Journal of Applied Mechanics JSCE*, Vol.5, pp.527-534, 2002.
- 2) Ichimura, T. and Hori, M.: Macro-Micro Analysis for Prediction of Strong Motion Distribution in Metropolis, *J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE*, No. 654/ -52, pp.51-61, 2000.
- 3) Ichimura, T. and Hori, M.: Macro-Micro Analysis Method for Computation of Strong Motion Distribution with High Resolution and High Accuracy, Amer-

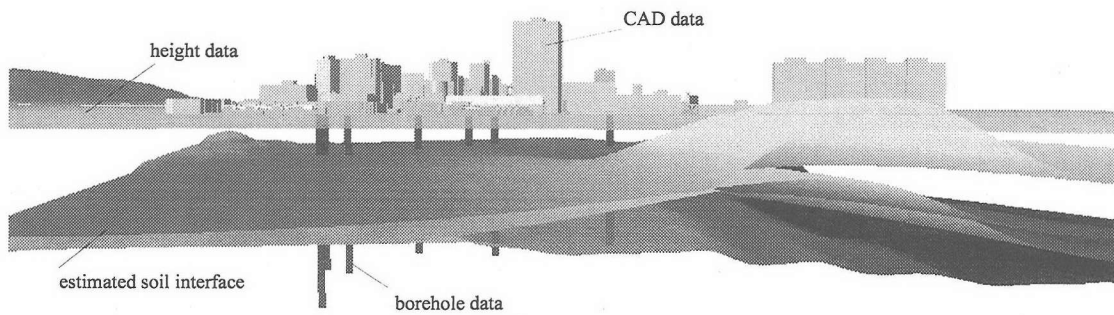


図-10 各種電子情報から構築された都市

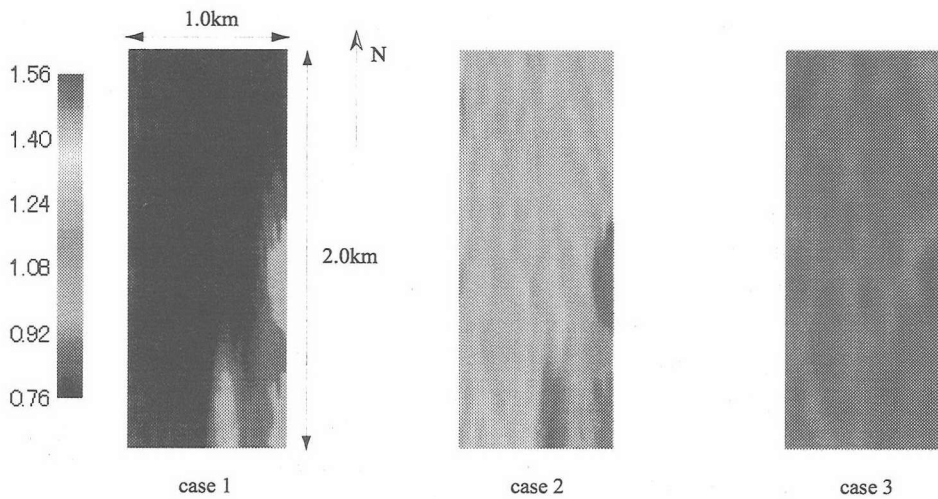


図-11 各ケースの最大速度分布

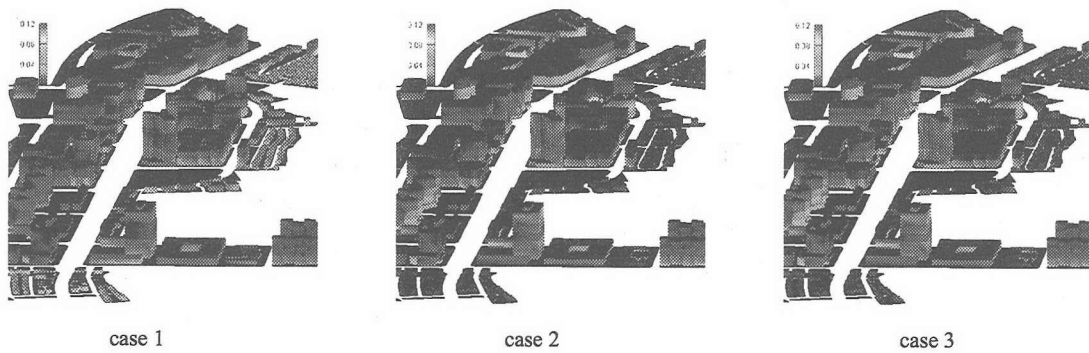


図-12 各ケースの層間変位角分布

ican Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, 6-10 December, S12B-1220, 2002.

- 4) 塩野清治, 弘原海清, 升本眞二: 最適化原理による地層面の推定, 情報地質 (12), pp.299-328, 1987.
- 5) 山中浩明・佐藤浩章・栗田勝実・瀬尾和大: 関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレイ観測-川崎市および横浜市のS波速度構造の推定-, 地震 第2輯, 51, pp.355-365, 1999.
- 6) 大澤胖・南忠夫・松島豊: 新建築学大系 38 構造の動的解析, 彰国社, 1999

#### 謝辞

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・社会技術研究地震防災グループの皆様から有益なコメントをいただきました。また、中央大学檜山和男教授からGISの利用に際して助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

(2003年4月18日受付)