

地表付近の三次元地下構造を考慮した強震動シミュレータの開発

DEVELOPMENT OF STRONG MOTION SIMULATOR
CONSIDERING 3-D SOIL-STRUCTURE NEAR SURFACE

市村 強*・堀 宗朗**

Tsuyoshi ICHIMURA and Muneo HORI

*正会員 工博 東北大学助手 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 Ph.D. 東京大学助教授 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

The strong motion prediction is important to make an efficient and rational counter measurement against huge earthquakes. Since the complicated 3-D soil structure near the surface has strong effects on strong motion distribution, this structure must be taken into consideration for strong motion simulation with high-resolution and high-accuracy. In this paper, the three-dimensional strong motion simulator is developed by making use of finite element method, which built in the fundamental hysteresis attenuation for analyzing the complicated soil behavior. The validity of this simulator is verified with comparison of conventional method. After that, the effect of three-dimensional soil-structure and frequency component on the maximum velocity distribution, which is simulated by proposal method, is discussed. From the comparison between results by the conventional method and proposal method, it is shown that the conventional method cannot accurately catch the effect of 3-D soil structure and the 3-D simulator such as this simulator is needed for strong motion prediction with high-resolution and high-accuracy.

Key Words : 3-D Strong Motion Simulator, Hysteresis Attenuation, 3-D Soil Structure, Finite Element Method

1. はじめに

震災対策の合理化・効率化を考える上で、高精度・高分解能な強震動予測は重要である。工学的に有用とされる構造物の動的解析・被害シミュレーションなどを考えると、およそ $0.1 \sim 10$ [Hz] でいどの分解能で強震動が予測されることがのぞまれる。強震動は、断層の破壊過程、地殻・地盤内の波動の伝播、地表近傍の複雑な地質構造による影響を経て生成される¹⁾。従来の強震動予測では、1) まず、断層から工学的基盤までの強震動をもとめ(断層の破壊過程、地殻・地盤内の波動の伝播)、2) その強震動に地表の地質構造による影響を加味するという方法がよく使われる。本論文では2)の部分のシミュレーションについて検討する。

2)の部分での高精度・高分解能な強震動シミュレーションのためには地表付近の複雑な地質構造と土の動的挙動を取り入れて三次元でシミュレーションをおこなえばよい。しかし、土の動的物性が非常に複雑であることと膨大な計算量という二つの課題があり難しいとされている。従来の方法ではこれを以下のように取り扱うことによって、シミュレーションをおこなっている。エネルギーの消散量が周波数に依存しないとい

う土の履歴減衰をモデル化して考慮し、等価線形化法によって弱非線形性を近似的に表現する。これを三次元でシミュレーションすることは計算量の観点から難しいので、一次元若しくは二次元で解析する。そのため、従来の方法では、地質構造の三次元的な効果を考慮することができない。しかし、観測の事実やいくつかのシミュレーションから地表付近の三次元構造による影響が大きいことが知られている。また、特に詳細な強震動予測が必要とされる都市部の地質構造は複雑であり、三次元的な地質構造に富んでいる。

本研究では、高精度・高分解能な強震動シミュレーションのため、地表付近の複雑な地質構造と土の動的挙動を取り入れて三次元でシミュレーションすることのできる強震動シミュレータを開発することを目的としている。本論文では、この開発の第一歩として、履歴減衰を考慮した三次元の強震動シミュレータを開発する。このシミュレータをもちいて三次元的な地質構造をもつサイトでの強震動をシミュレーションし、その分布について三次元的な地質構造との関連をふくめて検討をおこなう。また、従来もちいられている一次元波動論にもとづく結果と比較することにより、本強震動シミュレータの有効性をしめす。

2. 地表付近の三次元地下構造を考慮した強震動シミュレータ

2.1 土の動的挙動と従来の解析法

土粒子・水・空気の混合物であるため、土の挙動は拘束圧や含水比などの条件に依存して大きく変化する。十分な拘束圧がかかっている時には弾性体としてモデル化できるが、拘束圧が十分でないときの挙動は極めて複雑になる。とくに、動的挙動はひずみの大きさによって敏感に変化する。ひずみが 10^{-4} 程度のレベルであればほぼ弾性体として近似できるが、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ のレベルになると非線形性が顕著になる。そして 10^{-2} を超えるようなレベルになると崩壊などをおこす²⁾³⁾。

単純な粘弾性体では、このような複雑な土の減衰特性を表現することはできない²⁾³⁾⁴⁾。土の減衰定数は、周波数に依存しない履歴減衰といわれるものである。この減衰定数は $\frac{1}{4} \frac{\Delta W}{W}$ で定義される。ここで、 ΔW と W はそれぞれある周波数 ω で載荷されたときの一サイクルあたりの仕事と蓄えられるひずみエネルギーを表している。実際の土の減衰定数は周波数に依存しない。しかし、単純な粘弾性体の減衰定数は周波数に依存してしまう。例えば、フォークト型のモデルでは減衰定数は $\frac{1}{2} \frac{\eta \omega}{G}$ であり、マックスウェル型のモデルの減衰定数は $\frac{1}{2} \frac{G}{\eta \omega}$ となり、周波数に依存する⁴⁾。ここで η は減衰係数、 G はせん断係数である。結果として、このような単純なモデルをもちいると高周波成分で大きな誤差を生じることになる⁵⁾。この履歴減衰を表現するために、単純ではあるが有効な履歴減衰型のモデルが提案されている。どのようにモデル化をおこなうか一次元のときを例にとって説明する。

1. フォークト型のモデルをもちいて、周波数領域で構成方程式 $\tau = G\epsilon + \omega\eta\epsilon$ をたてる。ここで、 τ はせん断力、 ϵ せん断ひずみである。この場合、前述のように減衰定数は ω に比例することになる。
2. 減衰定数を周波数に依存しないようにするため、減衰係数を $\eta = \frac{\eta}{\omega}$ と再定義する。このようにすると支配方程式は、 $\tau = G\epsilon + \eta\epsilon$ となる。ここで、 η は修正減衰係数で定数である。このようにすると、この支配方程式の減衰定数は周波数に依存しなくなる。

多くの場合、強震動予測のための地表付近での土の動的挙動のシミュレーションは、水平半無限成層構造を仮定した一次元波動論をもちいておこなわれている。このようなシミュレーションの手順をまとめると以下のようになる；

1. 地層構造を水平半無限成層構造と仮定する。
2. 対象領域を線形粘弾性体でモデル化する。
3. 上述のように減衰係数を修正して減衰定数が周波数に依存しないようにする。
4. 等価線形化法により土の非線形挙動を考慮する。

この適用過程は単純であるが、計算量が非常に多くなるため一次元若しくは二次元の問題に適用が限られている。そのため、これらの方法では、地質構造の三次元的な効果を考慮することができない。しかし、観測の事実やいくつかのシミュレーションから地表付近の三次元構造による影響が大きいことが知られている。また、特に詳細な強震動予測が必要とされる都市部の地質構造は複雑であり、三次元的な地質構造に富んでいる。このようなことから従来の方法では、精度の良い強震動予測が難しい可能性があるため、三次元的なシミュレーションが可能なシミュレーションツールが必要となる。

2.2 三次元地下構造を考慮した強震動シミュレータ

一次元・二次元でおこなわれているシミュレーションを三次元に拡張するための基本的なアプローチを整備するのがこの論文の目的である。その第一段階として、履歴減衰を考慮した三次元シミュレーションツールの開発をおこなう。簡単のため、時間領域での支配方程式から説明する。三次元の時間領域での波動方程式は

$$d_i(c_{ijkl}(d_l u_k)) + f_j - \rho \ddot{u}_j = 0, \quad (1)$$

となる。ここで、 u_i は変位、 d_i は空間微分 ($d_i = \partial/\partial x_i$)、 c_{ijkl} は弾性テンソル、 ρ は密度をあらわしている。 f_j は見かけの物体力をあらわしており、履歴減衰の性質をあらわす。時間領域では複雑にひずみに依存する。しかし、周波数領域では一次元の拡張として、 f_j は u_j と線形の関係にあると近似して、

$$d_i(c_{ijkl}(d_l u_k)) + i\eta u_j - \rho \omega^2 u_j = 0. \quad (2)$$

となる。

周波数領域の波動方程式、式 (2)、は有限要素法をもちいて以下のように離散化される；

$$\mathbf{K}\mathbf{u} + i\mathbf{C}\mathbf{u} - \omega^2\mathbf{M}\mathbf{u} = \mathbf{f}. \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は変位 u_i のベクトル表示、 $\mathbf{f}$ は外力のベクトル表示、 $\mathbf{K}$ は弾性テンソルに関する剛性マトリクス、 $\mathbf{C}$ は修正減衰係数に関する減衰マトリクス、 $\mathbf{M}$ は質量に関する質量マトリクスである。 $\mathbf{M}$ として近似的に集中質量マトリクスをもちいた。また $\mathbf{C} = \gamma\mathbf{M}$ とする⁶⁾。

有限要素法によって離散化された式 (3) にもとづき、シミュレーションをおこなう。シミュレーションをおこなうために、図-1 のように、地表付近の地盤構造を半無限の実際の地盤構造からきりだす。本論文では、 $160 \times 160 \times 40$ [m] (東西、南北、深さ方向) の領域を切り出した。そして、地表面をのぞく側面、底面 (仮想境界) に逸散条件としてパラキシャル条件を適用した⁸⁾。この領域を $2 \times 2 \times 2$ [m] の線形のボクセル要素で離散化する (自由度は 413343)。そして、この領域の底

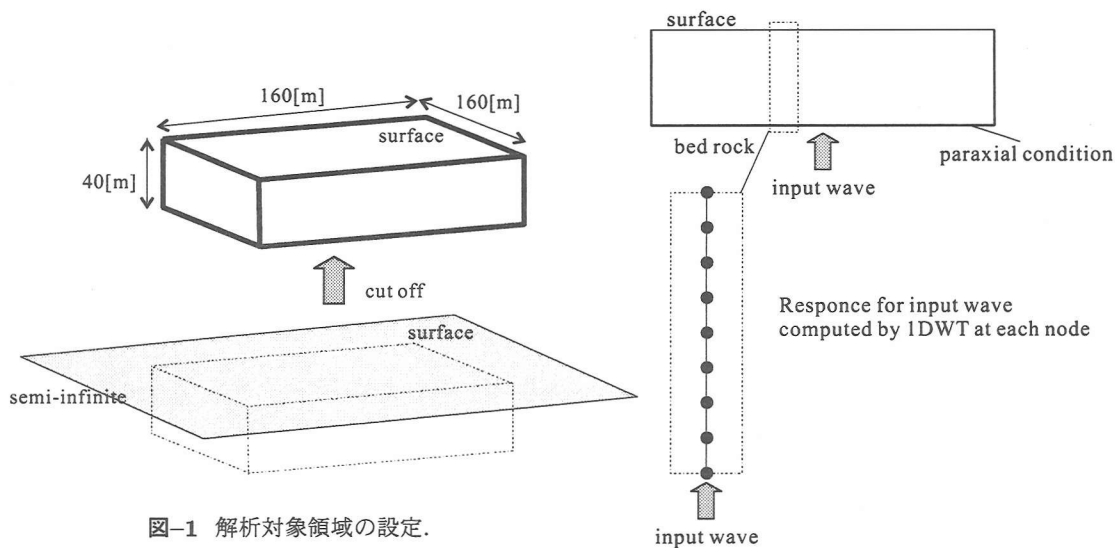


図-1 解析対象領域の設定.

図-2 一次元波動論にもとづく初期解の設定.

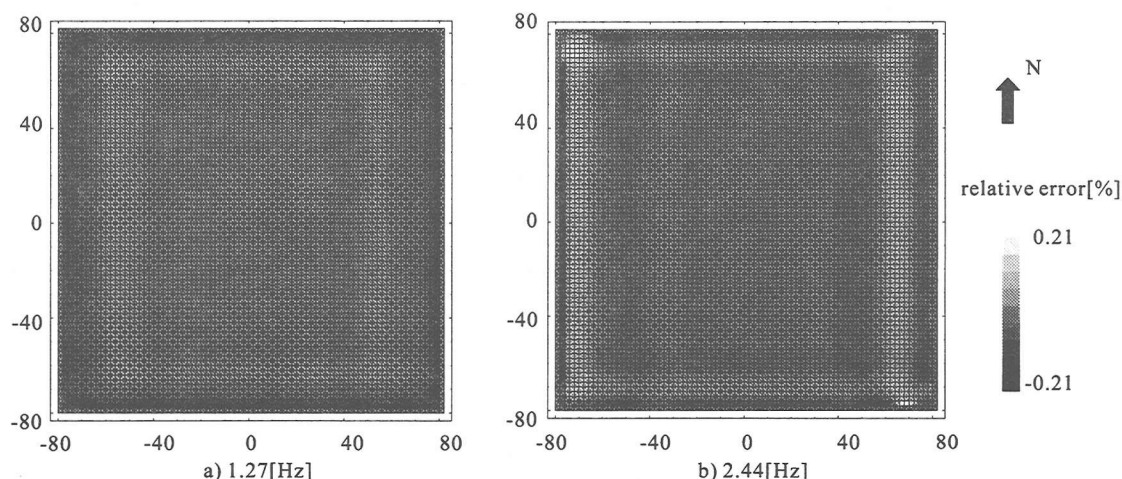


図-3 誤差の地表面上での空間分布.

面から地震動を入力し、周波数領域で応答を 0[Hz] から 2.5[Hz]¹ までの 0.098[Hz] ごとに計算し、FFT（高速フーリエ変換）をもちいて時間領域の応答を計算する。

このシミュレーションをおこなうためには、以下の二つの課題を克服しなければならない：

1. **桁落ち**: 式 (3) が非常に大きな自由度をもつ場合、すなわち、 $\mathbf{u}$ の次元が多い場合、式 (3) を数値的に解く場合におこる桁落ちが無視できなくなる。この方程式にあらわれるマトリクスとベクトルの実部と虚部のオーダーが大きく異なるとき、それらの演算で桁落ちがおきる。演算を重ねるに従い誤差が累積され、結果として正しい結果がえられない。

2. **収束が遅い**: 自由度が大きい問題を解くので、反復法を適用する。このとき、自由度が多いので実用的な範囲で計算するために収束性を向上させる必要がある。

桁落ちを防ぐため、式 (3) を桁落ちに強い形に変形してから解くことを考える。桁落ちの危険性が高いのは式 (3) の実部と虚部が数オーダー違うことにあるので、実部と虚部をわけて解くことができれば桁落ちの危険性は大きく軽減される。そのため、ここでは実部と虚部をわけて解くことを考える。式 (3) は以下のように書き直せる。

$$(\mathbf{A} + i\mathbf{B})(\mathbf{a} + i\mathbf{b}) = \alpha + i\beta, \quad (4)$$

ここで $\mathbf{A} \sim \beta$ は実数のマトリクスとベクトルであり以下のように与えられる。

$$\mathbf{A} = \Re\{\mathbf{K} + i\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}\}, \quad \mathbf{B} = \Im\{\mathbf{K} + i\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}\},$$

¹ 地表付近の最も遅いせん断波速度は 50[m/sec] 程度である。一波长を表すのに 10 要素程度の要素が必要とされる⁷⁾。ここで用いている要素の大きさは $2 \times 2 \times 2$ [m] である。以上の条件より、実際の地盤において、最大で 2.5[Hz] までの解析ができる。

$$\mathbf{a} = \Re\{\mathbf{u}\}, \quad \mathbf{b} = \Im\{\mathbf{u}\}, \quad \alpha = \Re\{\mathbf{f}\}, \quad \beta = \Im\{\mathbf{f}\}.$$

$\mathbf{a}$ と $\mathbf{b}$ に関する式 (4) は以下のように分解される。

$$(\mathbf{AB}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{a} = \beta + \mathbf{AB}^{-1}\alpha, \quad (5)$$

$$(\mathbf{AB}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{b} = -\alpha + \mathbf{AB}^{-1}\beta. \quad (6)$$

このように実部と虚部を分けてとくことにより、実部と虚部が数オーダー異なるときでも桁落ちに強い計算をおこなうことができる。実際の計算では、式 (2) を計算して解をえるのではなく、式 (5)(6) をそれぞれ計算し、その解を実部、虚部それぞれたし合わせて解をえる。通常、このような方法で計算をおこなうと、 $\mathbf{B}^{-1}$ の計算がはいっているため式 (2) を直接解くときに比べて計算量が膨大になる。しかし、この場合では、集中質量マトリクスを仮定したので $\mathbf{B}$ は対角項のみになり、 $\mathbf{B}^{-1}$ は簡単に計算できる。そのため、この手法は実用的なアルゴリズムたりうる²。

次に、収束性を向上させることを考える。方程式 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ を反復法によって解く場合の収束性を向上させる方法として大きく二つの方法がある ($\mathbf{A}$ はマトリクス、 $\mathbf{x}$ は未知量ベクトル、 $\mathbf{b}$ は既知量ベクトル)。ひとつは、 $\mathbf{A}$ に処理をくわえて性質の良いマトリクスにしてからとく方法 (前処理) で、 $\mathbf{A}$ の対角項の逆数を $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ にかけることなどがよくおこなわれる。ここでは、式 (5)(6) のマトリクスである $\mathbf{AB}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{B}$ の対角項の逆数を式 (5)(6) のそれぞれにかけて収束性の向上をこころみた。もうひとつは、よい初期解をあたえることである。よい初期解が与えられれば、収束に要する反復回数は軽減される。ここでは、一次元波動論にもとづいて初期解をあたえることによって収束性の向上をこころみた³。図-2 のように深さ方向にそれぞれ切り出してきて、最下面に地震動を入力する。この入力に対する応答を一次元波動論により各ノードで計算し、それを初期解とした。

以上の取扱いにより、桁落ちと収束性に関する問題が解決され、大きな自由度をもつ三次元シミュレーションをおこなうことができるようになった。次に、このシミュレータの妥当性を検証する。物性を、縦波速度、横波速度、密度をそれぞれ 1040[m/sec], 600[m/sec], and 1800[kg/m³] の均質とした場合の問題を考える ($\gamma = 0.02$ とした.)。このモデルに対して底面からサイン半波を入力する。このとき、この三次元のシミュレーションでえられた解 (3DS_{sol}) と一次元波動論⁴) をもちい

てえられた解 (1DWT_{sol})⁴ を比較することによってこの三次元シミュレーションの妥当性を検証する。図-3 に、 3DS_{sol} と 1DWT_{sol} の相対誤差の地表での空間分布をしめす。ここで相対誤差は $3\text{DS}_{\text{sol}}/1\text{DWT}_{\text{sol}} - 1$ と定義した。仮想境界近傍では相対誤差が大きくなるものの、それ以外の部分では小さな誤差になっていることがわかる。他の周波数に対するこの相対誤差の分布はもとめており、ここにしめしたものと同様な結果がえられている。これらの検証から、相対誤差の閾値を 0.1[%] とした場合、モデルの中心から 100×100[m] の範囲の結果に関しては、仮想境界からの影響もなく精度が保証されており、信頼できる結果がえられると考えられる。

3. 数値シミュレーション

先の節で開発した履歴減衰を考慮できる三次元強震動シミュレータをもちいて、実際の地盤構造を適用した強震動シミュレーションをおこなう。またシミュレーションされた強震動分布 (最大速度分布) に対する地盤構造の影響を検討する。また、この三次元シミュレーションと従来の一次元波動論にもとづく強震動シミュレーションを比較することによって、この三次元シミュレーションの有効性を検討する。

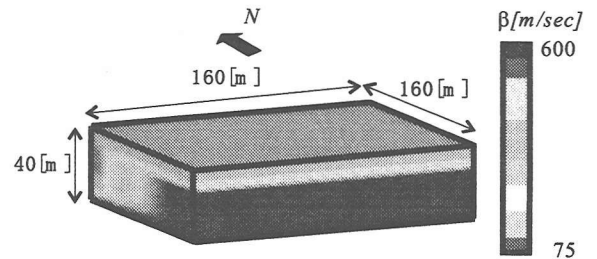


図-4 $kz07s$ における三次元速度構造。

3.1 高精度・高分解能な強震動シミュレーション

三次元的な地盤構造をもつサイト $kz07s$ を例にとつて強震動シミュレーションをおこなう。三次元的な地盤構造は図-4 にしめすようである。レジェンドの β はせん断波速度をあらわしている。先の節で説明したように、この $160 \times 160 \times 40[\text{m}]$ (東西, 南北, 上下方向) の領域を、 $2 \times 2 \times 2[\text{m}]$ のボクセル要素で離散化し、0[Hz] から 2.5[Hz] まで 0.098[Hz] ごとに計算し、FFT (高速フーリエ変換) をもちいて時間領域の応答を計算する。側面、底面にはパラキシアル条件を適用し逸散条件を近似する。この解析では、2.5[Hz] までの精度が保証されている。モデルの中心 100×100[m] の範囲の精度が

² 式 (4) の実部は $\mathbf{Aa} - \mathbf{Bb} = \alpha$ であり、 $\mathbf{B}$ は対角項のみである。そのため $\mathbf{a}$ をもとめたあと $\mathbf{b}$ はもとめるのは簡単のように考えられる。しかし、 $\mathbf{Aa} - \alpha$ を計算する際の桁落ちのため $\mathbf{b}$ を正確に計算することはできない。

³ 一次元波動論によるシミュレーションは三次元シミュレーションに比べて計算の負荷が著しく小さいので実用に耐えうる初期解のあたえかたである。

⁴ このモデルの物性は均質なので水平成層構造を仮定した一次元波動論によって得られた解は擬厳密解となる。

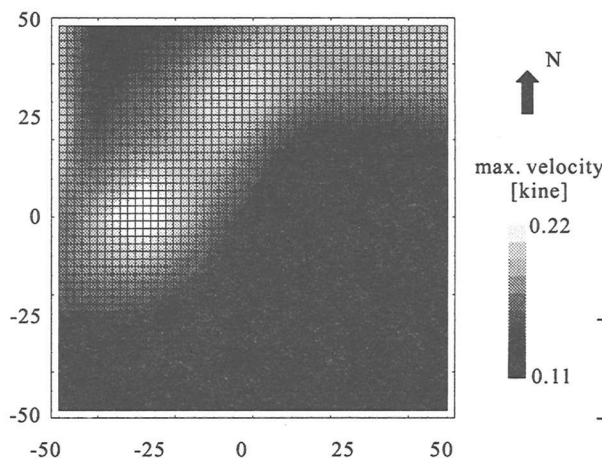


図-5 $kz07s$ での地表面における最大速度分布。

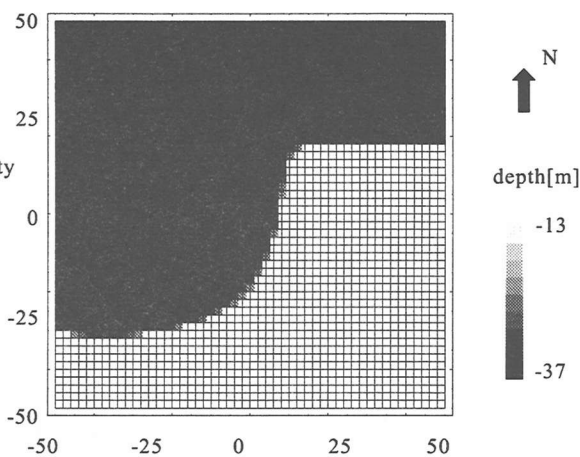


図-6 $kz07s$ での工学的基盤までの深さの空間分布。

保証されているのでその範囲内での強震動分布について考える。基盤からの入力波は、付録 I の方法によって作成した模擬地震動をもちいる⁵。図-5 にこの三次元シミュレーションによる最大速度分布をしめす。このような狭い範囲内でも最大速度分布は顕著な偏りをしめすことがわかる。最大の最大速度は $0.22[\text{kine}]$ 、最低の最大速度は $0.11[\text{kine}]$ と倍の差がある。また、最大速度の大きな偏りが北西の部分にあらわれている。この偏りは主に三次元的な地盤構造によるものと考えられる。せん断波の速度が $600[\text{m/sec}]$ の層を工学的基盤層というが、この工学的基盤層がこのサイトの北西部分で顕著な三次元的な谷のような構造をもっている（図-6 に工学的基盤層の深さのコンター図をしめす）。この工学的基盤による三次元構造と地表での強震動分布の間に対応関係がある。このような最大速度の偏りを観測事実と比較して検証することは難しいが、このような局地的な強震動分布の偏りが被害の偏りに果たしている影響は大きいと考えられる。このような観点からも強震動分布が高精度かつ高分解能に提供されることの地震工学上の意味は大きく、このような三次元シミュレータの意義は大きいと思われる。

3.2 強震動が含んでいる周波数成分の変化による分布の変化

強震動に含まれる周波数成分によって強震動分布がどのように変化するかをしめす。図-7 は上述の最大速度分布が強震動に含まれる周波数成分によってどのように変化するかをしらべたものである。四種類のローパスフィルターを適用して分布がどのように変化していくかをしめした；図-7a), b), c), d) はそれぞれ <1.0 , <1.5 , <2.0 , $<2.5[\text{Hz}]$ のローパスフィルターを適用し

た結果である。変化の度合いは以下のようにして計算した。1) $<2.5[\text{Hz}]$ のローパスフィルターを適用した場合の中心での値を使って正規化する。2) 正規化された値から 1 を引く。低周波成分ほど波長は長くなるので地質の三次元構造の影響を受けにくくなる。そのため、低周波成分のみの場合では、強震動の分布の偏りは小さいことが予測される。実際、 $1.5[\text{Hz}]$ までの範囲では顕著な偏りはみられない。しかし、 $2.0[\text{Hz}]$ 以上の成分をもつ分布では、北西部に明瞭な偏りがみられる；図-7c) and d) 参照。工学的基盤より上部の層の地盤構造のスケールは $10[\text{m}]$ のオーダーである。また、せん断波の速度はおよそ $100[\text{m/sec}]$ 程度であり、明瞭な偏りをつくり出しはじめる周波数成分は $2.0[\text{Hz}]$ である。このことから、波長 $50[\text{m}]$ 程度のものが $10[\text{m}]$ のオーダーの地盤構造の影響を受けていることが分かる。つまり、目安として波長の $\frac{1}{5}$ 程度の地盤構造によって強震動分布が影響をうけることがわかる。

3.3 速度応答スペクトルの分布

強震動による構造物の応答を簡便に表すことができるため、設計にも用いられている応答スペクトルという指標がある⁴⁾；応答スペクトルは構造物を一自由度系で近似し、強震動を入力することによってえられる応答値である。図-8 に $kz07s$ 近傍の a~g の 7 地点でえられた速度応答スペクトルを工学的基盤の深さのコンター図とともにしめす；入力する強震動は 3.1 でもとめらえたものを $2.5[\text{Hz}]$ までのローパスフィルターでカットしたものである。図にしめされている成分は東西方向成分である。この図から分かるように、このような狭い領域であるにもかかわらず、速度応答スペクトルは大きさだけでなく、形状までもが大きく変化していることが分かる。これは、工学的基盤による三次元的な地質構造によるものである。このように構造物の設計を考える上で考慮される応答スペクトルが地盤

⁵ 本シミュレータは履歴減衰を考慮しているものの土の非線形性はまだ考慮していない。そのため、模擬地震動は土の非線形性の影響を小さくするために、地表付近で十分に小さな振幅になるような小さな実測された地震をもとに作成された。

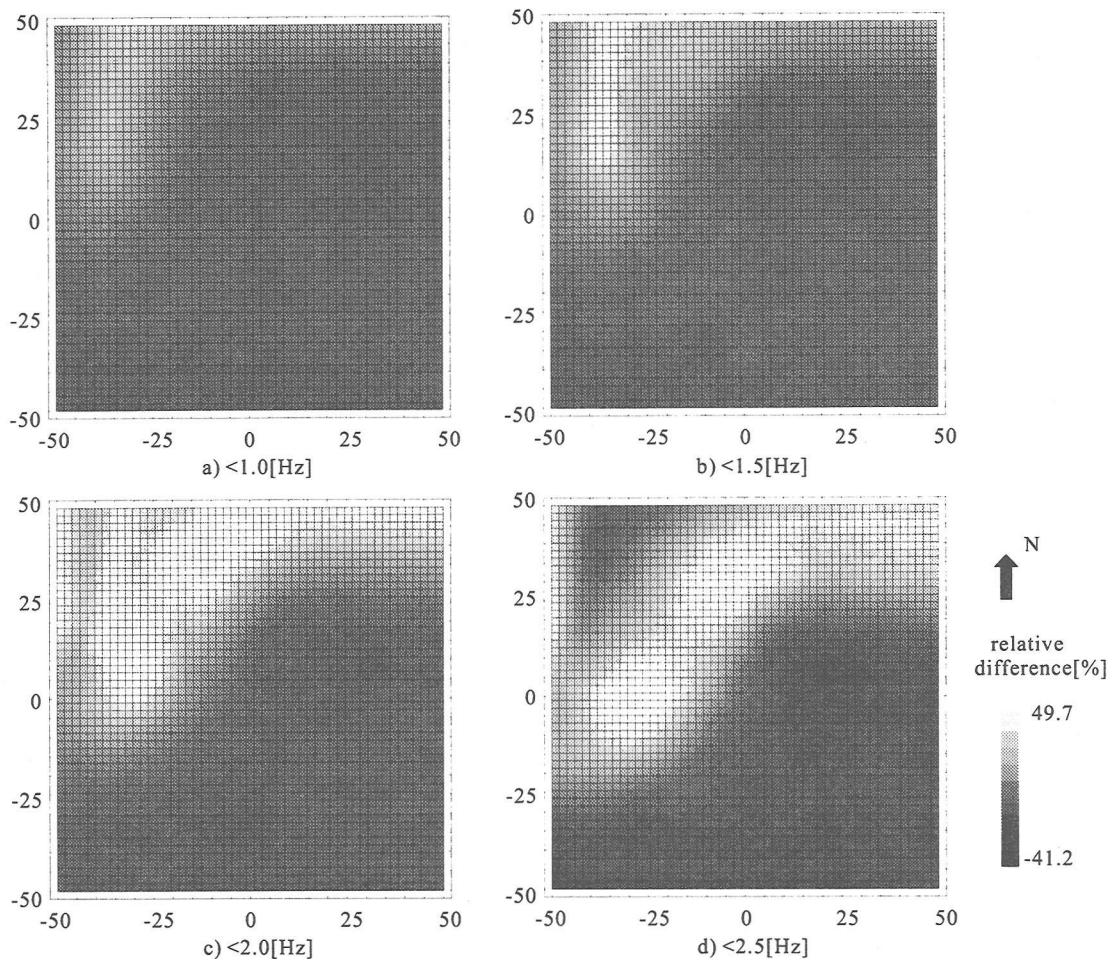


図-7 $k207s$ における強震動が含む周波数成分の変化による最大速度分布の変化.

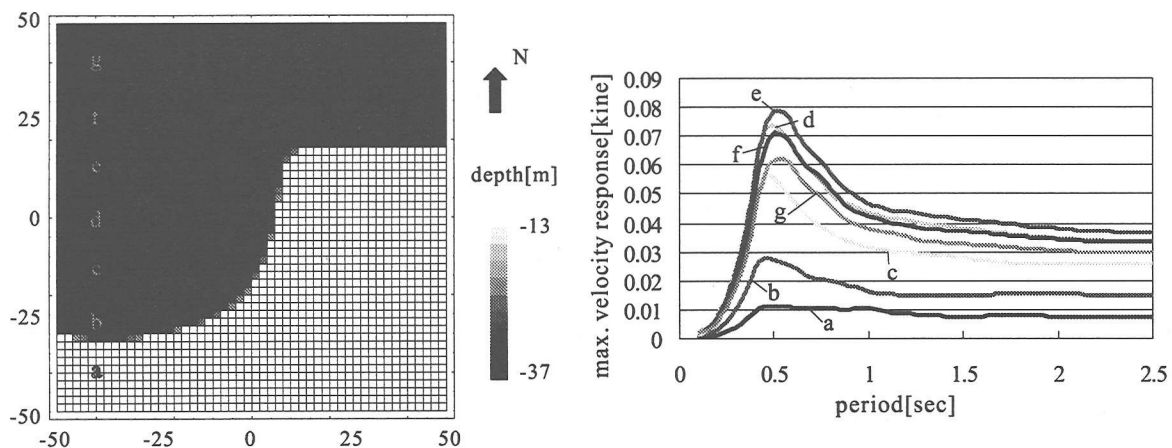


図-8 $k207s$ における速度応答スペクトルの分布.

構造の影響を受けて大きく変化することから、応答スペクトルを高精度・高分解能でもとめることのできるこのようなシミュレータは必要であると考えられる。

3.4 一次元波動論と三次元シミュレーションの比較

一次元波動論⁴⁾による解とこの三次元シミュレータによる解を比較する。三次元シミュレーションによる解は、3.1でえられた2.5[Hz]までのローパスフィルターでカットしたものを持ちいる。これを $3DS_{sim}$ とする。一次元波動論による解は3.1でもちいた模擬地震動を入力

として、対応する $2 \times 2[\text{m}]$ のグリッドポイント毎にもとめたものとする。これを $1DWT_{sim}$ とする。 $3DS_{sim}$ と $1DWT_{sim}$ は地表で同じ分解能をもっている。 $3DS_{sim}$ と $1DWT_{sim}$ の相対差を $3DS_{sim}/1DWT_{sim}-1$ と定義する。この相対差の空間分布を図-9 にしめす。一次元波動論は、水平半無限構造を仮定するので顕著な三次元構造をもつ場合には三次元シミュレーションの結果と大きな差を生じることが予想される。実際、この図からわかるように顕著な三次元構造近傍で大きな差が生じていることわかる；工学的基盤深さのコンター図は図-6 参照。三次元的な構造によって生じる波の集中（阪神大震災の震度七の帯の成因であるとされるなぎさ効果）のような偏りを一次元波動論では再現できないことがこの大きな差（この例では 50[%] 程度であり、倍の差があることとなる）になっていると考えられる。そのため、複雑な三次元的な地質構造をもつような場所での詳細な強震動シミュレーションのためには、簡便な一次元波動論に基づく方法では再現が難しく、このような三次元シミュレータが必要であることがわかる。

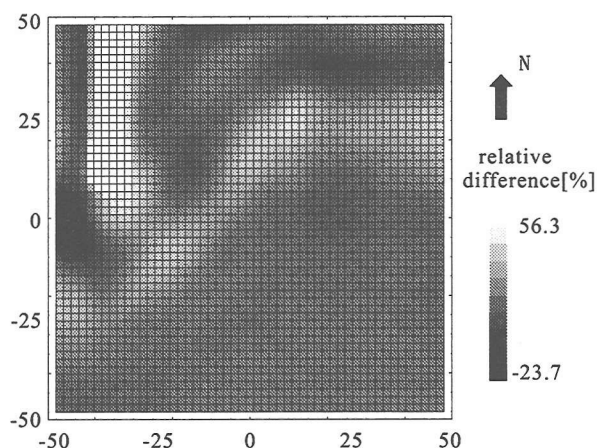


図-9 $kz07s$ における一次元波動論と三次元シミュレーションの結果の比較。

4. まとめ

本論文の内容を以下にまとめる。1) 地表近傍での強震動予測を高精度・高分解能でおこなうために、土の履歴減衰を考慮した三次元強震動シミュレータを開発し、精度の検証をおこなった。2) つぎに実際の三次元の地盤構造での強震動分布をもとめた。このことから、 $100 \times 100[\text{m}]$ という狭い領域でも、地表付近の地盤の三次元構造の影響によって、強震動は大きな偏りをしめし、最も差のある場合で最大速度値で倍程度の差が出る可能性があることがわかった。3) 強震動にふくまれる周波数成分によって強震動の分布がどのように変化するかをしらべた。波長が長ければ地盤構造の影響を受

けないが波長が短くなるにつれて構造の影響を顕著に受け、偏りがあらわれ始めることがわかった。このことから、工学的に重要とされる $\sim 10[\text{Hz}]$ までの成分による強震動分布を考慮する際には、十分に地表付近の三次元的な地盤構造の影響を考慮する必要があることが推察された。4) 設計などに用いられる応答スペクトルの空間分布をえられた強震動からもとめた。 $100 \times 100[\text{m}]$ という狭い領域ではあるが、応答スペクトルは大きさだけでなく、形までも大きく変化することがわかった。このことから、構造物に対する強震動の性質も地下の三次元地盤構造によって狭い範囲内でも大きく変化することがわかった。このことから地下の三次元地盤構造を十分に考慮したシミュレーションが必要であることが分かる。5) 従来用いられる一次元波動論によってもとめた強震動分布とこの論文で開発した三次元シミュレータの強震動分布の差をもとめた。一次元波動論のもちいている半無限水平成層構造という仮定からもわかるように、地盤構造が三次元的に急変する部分では、一次元波動論と本シミュレータのような三次元シミュレーションとでは大きな差（本シミュレーションでは最大 50[%] 程度）が生じることが分かった。

工学的に必要とされる $\sim 10[\text{Hz}]$ までの周波数成分の強震動を予測する場合には、地表付近の波長に比べて十分に大きな地盤構造までを考慮して予測しなければならないことがわかった。また、その三次元的な地盤構造が強震動分布に大きな影響を及ぼし、顕著な強震動分布の偏りをもたらすことが分かった。この強震動の偏りは応答スペクトルの分布にも反映される。そして、これらの強震動の偏りは三次元的な地盤構造が急変する箇所では従来からつかわれている一次元波動論でもとめることは難しく、本シミュレータのような三次元シミュレーションが必要であることがわかった。以上のことから本論文で開発された地表付近の三次元地下構造を考慮した強震動シミュレータの有効性がしめされた。特に都市部の地質構造は三次元的にいりくんでいるため、水平半無限成層構造のような仮定が成り立ちにくい。定量的な都市部での強震動予測を考える上で、このような三次元シミュレータは大きな効果を発揮すると思われる。

以下の二点を今後の課題と考えている。1) 大震動時のシミュレーションもできるように等価線形化法などを適用して非線形現象をあつかえるように拡張する。2) 現在はボクセル要素を用いてシミュレーションをおこなっているが、より詳細に地質の地層構造を取り扱うためには適合要素で離散化することがのぞまれる。そのため、適合要素の導入を考えている。

付録 I 入力地震動の作成法

強震動予測は1)断層から工学的基盤まで、2)工学的基盤から地表までの2段階にわけておこなわれることが多い。本論文では、2)の部分についてのシミュレータを開発しているが、高分解能かつ高精度な強震動予測のためには、2)だけでなく1)についても十分な検討が必要とされる。

1)の部分では、地形調査やトレンチ調査などからえられた地表付近のデータから断層長を推定し、経験的關係から地震マグニチュードを推定し、距離減衰式から工学的基盤上での最大加速度などの空間分布がもとめられる方法などが用いられてきた。しかし、このような方法では、近年の大地震の観測によって明らかになったそれぞれの地震のもっている強震動の特徴を説明できないことがわかった⁹⁾。例えば、兵庫県南部地震での“震災の帯”のような現象は地下深部の三次元構造による増幅であり従来法では再現が難しい。高精度かつ高分解能な強震動予測のためには従来の方法では取り扱うことが難しかったこれらの現象をも取り扱うことが必要である。近年、いくつかの方法が提案され、適用の検討がおこなわれている。例えば、計算機でシミュレーションできる帯域までは、シミュレーションをおこない、それ以上の帯域については統計的・経験的方法をもちいて強震動を予測する手法がある⁹⁾。ここでは、この手法に基づいて、実際の地震をシミュレーションし、よりもっともらしい入力地震動を作成する。

本研究で開発したシミュレータはまだ非線形性を扱うことはできない。そのため、なるべく振幅の小さい地震動がよい。そのため、規模の小さな深発地震を対象に選ぶ。1999年8月11日に横浜市近傍でおきた表-1にしめす深発地震をシミュレーションの対象としてえらんだ。断層パラメータは、防災科学技術研究所のFREESIA Projectのデータに拠った。シミュレーションのモデルは断層領域とサイト $kz07s$ を含む領域 $40 \times 30 \times 70$ [km] (東西、南北、深さ方向)を切り出して、有限要素法によって離散化した。地下の三次元構造は¹⁰⁾を参考にして決定した。深発地震であること、規模が小さいことから断層は点震源を仮定し、食い違い変位をランプ関数で表して入力した。立ち上がり時間は¹¹⁾を参考に 0.35 [sec] とした。このシミュレーションでは、計算機の制約があるため 1.2 [Hz] までの精度しか保証できないので、¹²⁾の方法に基づいて $1.2 \sim 2.5$ [Hz] の成分を作成し、シミュレーションでえられた結果にたし合わせた。このようにして、 $0 \sim 2.5$ [Hz] の成分をもつ $kz07s$ での入力地震動を作成した。

表-1 地震動作成のためにもちいた地震特性

Lat.	Long.	Depth	Strike	Dip.	Rake	Mag.
35.4N	139.8E	53[km]	62°	85°	73°	4.0Mw

参考文献

1) Aki, K : Local site effect on ground motion. In J. Lawrence Von Thun, editor, Earthquake Engineering and Soil Dynamics. II: Recent Advances in Ground-Motion Evaluation, ASCE, 1988.

2) 石原研而：土質動力学，鹿島出版会，1976.

3) 土木学会：：動的解析と耐震設計 第1巻地震動動的物性，1997.

4) 大崎順彦：新地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1996.

5) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集 III, 493, 49 - 58, 1994.

6) 鷺津久一郎，宮本博，山田嘉昭，山本善之，川井忠彦：有限要素法ハンドブック 2 応用編，培風館，1997.

7) Hori, M. and T. Ichimura, : Macro-micro analysis for wave propagation in highly heterogeneous media- prediction of strong motion distribution in metropolis - in International Workshop WAVE2000, December 13-15, 2000, at RUHR University of Bochum, 2000.

8) Wolf, J. P. (動的解析研究会訳)：構造物と地盤の動的相互作用解析：時間領域処理，鹿島出版会，1996.

9) 入倉孝次郎：特定の活断層を起震断層とした強震動の評価手法，第2回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ「地震動予測地図の作成に向けて-現状と今後の課題-」，2001.

10) 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 2, 51, 355-365, 1999.

11) Kikuchi, M. and M. Ishida : Source retrieval for local earthquakes with broadband records, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1885-1870, 1993.

12) 年縄巧，渡部義之，小林孝至，内山泰生：震源域毎に分類した首都圏南西部における工学的基盤からの入射波スペクトルの特性，土木学会論文集 I, 619, 121-130, 1999.

謝辞

本研究は第一著者が日本学術振興会特別研究員であった期間中に行われ、平成12年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の補助を受けた。本研究のために、東京大学地震研究所地震予知情報センターの計算機システムを利用しました。匿名の査読者の方々より有益なご意見をいただきました。ここに記して感謝いたします。

(2001年4月20日受付)