

阪神地域の地震動予測—浅層地盤の地震動応答の計算

Ground motion prediction in Hanshin area - Seismic response of shallow sediments

関口春子¹

Haruko Sekiguchi¹

¹ 活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, haruko.sekiguchi@aist.go.jp)

Abstract: Seismic response of shallow sediments is evaluated in the ground motion prediction for a scenario earthquake on the Uemachi fault. Ground motion on the engineering basement is computed by the 3D finite difference method in the 3D Osaka sedimentary basin structure model (Horikawa *et al.*, 2003). Response of the shallow sediments above the engineering basement (in this study, top of a layer with 550 m/s of S-wave velocity) is evaluated by 1D equivalent linear analysis (Yoshida and Suetomi, 1996). The structure model of the shallow sedimentary layers is modeled based on Yamamoto (2003, personal comm.) which compiled shallow boring data in the Osaka plain. The models of strain-dependent characteristics of shear modulus and damping rate for alluvium clay, diluvium clay and alluvium and diluvium sand by Public Works Research Institute (1982) are assumed. As the input ground motion at the engineering basement is already large (100 - 150 cm/s), nonlinear response appears largely in the alluvium site. Strains exceed the limit of application of the linear equivalent analysis in a large area. Under the condition of peak strain lower than the application limit of the linear equivalent analysis, the shallow sedimentary layers amplify the peak ground velocity by up to about 2.5 times. I also evaluate the error generated by approximating the response of the shallow sediments by 1D response analysis using 2D finite difference method. A simplified 2D cross section model of the Osaka plain is assumed. When the response of the shallow sediments with S-wave velocity less than 550 m/s is evaluated by 1D method, as I do in the ground motion prediction calculations, direct wave portion is sufficiently well approximated. Therefore, the evaluation of peak ground velocity values is expected not to be affected by the approximation error, because in most cases, the peak ground velocity occurs at the arrival of the direct wave. But the later surface waves are deformed; the dominant frequency and amplitudes are misestimated. When ground motion in heterogeneous medium is modeled up to the depth of 350 m S-wave velocity (about a few tens of meters), the surface wave part is also sufficiently well modeled in the period range between 1 to 6 s.

キーワード: 地震動予測, 大阪堆積盆地, 浅層地盤応答, 非線形応答, 等価線形解析

Keywords: ground motion prediction, Osaka sedimentary basin, site effect, nonlinear response, equivalent linear analysis

1. はじめに

同じ堆積層の地盤上であっても、地下数十 m から 100 m 程度までの浅層部分の違いが、地震動の応答に大きな違いを生じることが指摘されている。例えば、1923 年関東地震の際、旧中川によって形成された沖積低地の広がる埼玉県東部から東京都東部の東京湾沿岸では、より震源に近い東京都の中・西部に比べ震度が大きく、6 強から 7 であったが、この違いは、沖積低地と洪積台地という地盤の違いであると推定されている (武村, 2003)。

一方、松岡・翠川 (1994) では、表層地盤の違いによる最大地震動速度の増幅率について、数多くの

観測事例にもとづく経験式を提案している。この式によると、たとえば、地表から地下 30 m までの平均 S 波速度が 200 m/s 程度の地盤の場合、工学基盤に相当する S 波速度 600 m/s の地盤と比べて、最大地動速度がおおよそ 2 倍になる。この式は、軟弱な浅層堆積層が、最大速度で統計的に数倍程度の増幅を示すことを示している。回帰式に対し観測値はばらついているが、その原因のひとつには、増幅の周波数依存性がある。よって、高度の地震動応答評価には、時刻歴による解析が欠かせない。

我々の地震動予測計算では、特に 1 Hz 以下の長周期では、大阪堆積盆地全体の構造の影響が大きい

め、盆地構造を3次元的にモデル化し、3次元差分法 (Pitarka, 1999) を用いて行っている (第1図) (関口ほか, 2003). しかし、堆積層上部はS波速度が小さく非線形性が強いため、3次元差分計算はコストがかかるだけでなく計算の不安定も引き起こし現実的でない。そこで、3次元構造を考慮した差分計算は、工学基盤 (ここでは、S波速度 550 m/s の地層) までとして、これより浅い部分は工学基盤の媒質に置き換えて計算を行い、工学基盤より浅い部分の地震動応答については、差分計算の地表での波形を工学基盤での入力波とみなして1次元等価線形法により付加することとした。

本稿では、1) 既存のモデルをもとに浅層地盤構造をモデル化し、2) 上町断層系の想定地震シナリオに対して工学基盤を地表とする3次元地盤構造で計算された地震動波形に、上記の方法で浅層地盤応答を付加した。さらに、3) 浅層地盤の応答を1次元で評価する際の誤差を数値実験で見積もった。

2. 手法

2.1 モデル化の基礎—地表変位と震源断層面上でのすべりに関する従来の知見の検討

大阪盆地の堆積層上部の土層の地震動に対する非線形応答を評価するため、吉田・末富 (1996) による等価線形法のコードDYNEQを用いた。DYNEQは、重複反射理論と等価線形手法を合わせた方法である。土はせん断ひずみが増大すると、時々刻々、剛性が低下し、減衰定数が増大する (第2図)。等価線形法では、与えられた地盤と入力地震動に対し、土の物性の変化を近似する等価な線形系を求め、この等価線形系による応答を計算する。

DYNEQでは、等価な線形系の材料特性に、非線形挙動に見られる周波数依存性が考慮されている。等価な線形系の剛性率、および、減衰定数は、以下の式により求められる有効ひずみ γ_{eff} に対する値として定義されている。

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f < f_p \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f > f_e \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 γ_{max} 、 f_p は、ゼロクロス法により求めたせん断ひずみの最大振幅とその周波数、 f_e は、これより大きい周波数では弾性挙動とする周波数である。経験的に、 f_p は15 Hz程度、 m は2ということなので、本研究でもこれらの値を用いた。(1)式を満たす材料特性は、系が非線形であるため一意に決めることができない。したがって、応答計算のイタレーションを行い、(1)式を満たす材料特性を探索する。応答は、1次元波動理論により周波数領域で計算する。

等価線形系の探索は、まず、微小ひずみ時の剛性率と減衰定数を用いて入力地震動に対する各土層の線形応答ひずみを計算し、これを第一近似とする。第一近似の応答ひずみに応じた等価剛性、等価減衰定数を、各土層の剛性率と減衰定数のひずみ依存性にもとづいて設定し、この等価剛性、等価減衰定数を用いて再度、線形応答ひずみを計算する。これを第2次近似とする。次は、第2近似の応答ひずみに応じた等価剛性、等価減衰定数を設定し、応答計算を繰り返す。このようにして、等価剛性率、等価減衰定数の変化が誤差範囲 (5%) 以内に収束したところで最終結果とする。

3. 浅層地盤モデル

P波、S波速度、および、密度の構造は、山本 (2003, 私信) によるモデルをもとに設定した。山本 (2003, 私信) は、関西圏地盤情報の活用協議会の保有する大阪平野内の浅層ボーリングデータをもとに、大阪府全域を対象として浅層地盤のモデル化を行った。沖積層部分を、表土または埋立層、上部沖積砂層、Ma13層 (沖積粘土層)、下部沖積砂層、沖積砂礫層に区分して、その層厚、密度、平均N値、S波速度を整理し、これを内・外挿して500 mの等間隔なメッシュ点においてモデル化している。ただし、土質の情報が不足している領域については、沖積層、洪積層という単純化した分類をしている。S波速度は、大阪平野のPS検層による、S波速度と土質、N値の相関をとって得られた式 (岩崎ほか, 1987)、

$$V_s = 34.824F(N+1)^{0.244} P^{0.175} \quad (2)$$

をもとにしている。なお、 V_s はS波速度 (m/s)、 N はN値、 P は平均有効土被り圧 (gf/cm^2)、 F は土質による定数で1.000 (粘土)、0.922 (砂)、0.851 (礫) の値をとる。第3図に、沖積層下面深度分布と代表点の構造モデルを、第1表に各層の物性値のとり範囲を示す。

山本 (2003, 私信) は、S波速度でおよそ300 ~ 350 m/s以下の層をモデル化しており、3次元差分計算で地表とする工学基盤 (S波速度 550 m/s) との間にはギャップがある。このギャップの深度範囲のS波速度は、深層ボーリングでのPS検層 (小池ほか, 1997) によると、ほぼ深さに比例して増加していることから、本研究ではギャップの区間のS波速度を線形補間した。密度も同様とした。

S波の減衰は、大阪平野にある鉛直アレイ観測記録の解析から得られたS波速度との経験式 (堀家, 2004, 私信)

$$Q = aV_s \exp(-bf) \quad (3)$$

$$a = 0.15 \sim 0.18, \quad b = 0.5 \sim 0.8$$

に基づき、係数 a 、 b については上記の中央値を採用した。 V_s はS波速度 (m/s)、 f は周波数 (Hz) である。

動的変形特性（剛性率と減衰定数のひずみ依存性）のモデルとしては、実験に基づく式（Hardin and Dnevich, 1972; 吉田ほか, 1990; 日本港湾協会, 1989; 安田・山口, 1985; 土木研究所, 1982; 建築基準法告示 1457 号; 鉄道構造物設計標準）や理論に基づく式（双曲線モデルや Ramberg-Osgood モデル, たとえば, Yoshida, 1993）がある。本研究の計算は、詳細な土質試験結果がある地点での計算ではなく、面的に広がりのある領域に対して土質と層厚, N 値, S 波速度, 密度のみが整理された浅層地盤のモデルに基づいて行う。そこで、浅層地盤モデルの有する情報で地盤の動的変形特性を与えられ、かつ浅層地盤モデルの有する情報をなるべく有効に取り込めるモデルを用いることにした。土木研究所の式（建設省土木研究所, 1982）は、洪積・沖積の砂質土・粘性土に分けてモデル化された実験式で、比較的少ないパラメータで指定することができるため、これを用いた。また、砂質土・粘性土の区別が不明の第 1 表中の R 層, A 層, D 層については、ここでは全て砂質土を仮定した。R 層は場所による変化が非常に大きい、ボーリング柱状図を見ると、砂質土の割合が高いものが多い。また、表層を A 層で分類された地域の表層地質は、砂礫が多いとのことである（山本, 2003, 私信）。洪積層以深（ S 波速度が 300～350 m/s 以上）は弾性体を仮定した（ただし減衰は考慮）。

4. 地震動計算結果

第 4 図に、非線形性を考慮して浅層地盤応答を計算した際の、地表の地震動速度の水平成分最大値の分布と、その、工学基盤での値に対する比を示す。また、比較のため、非線形性を考慮せずに浅層地盤応答を計算した際の分布を第 5 図に示す。非線形性を考慮した計算では、結果として等価線形計算の適用限界と言われる 1% を超えたひずみとなった地点が多数生じた。最大ひずみが 1% を超えない領域での、地震動速度の最大振幅は、工学基盤に対し大きいところで 2.5 倍ほどになっている。

第 6 図に、大阪城を横切る東西ラインの波形を示した。このラインでは、地表を工学基盤とする地震動波形に比べ、線形で浅層応答を仮定した場合は、比較的高周波数成分が強められ、非線形を仮定した場合は、非線形挙動が現われた場所では高周波数成分が抑えられ長周期化している様子が見られる。この様子は、第 7 図に示したスペクトルに、より明確に現われている。

5. 議論

本稿では、3 次元構造を考慮した 3 次元差分計算の中では、工学基盤（ここでは、 S 波速度 550 m/s 層上面）までを考慮し、これより浅い部分は工学基盤の

媒質で置き換えている。そして、その地表での計算波形を工学基盤での入力波とみなして 1 次元等価線形法による応答計算を行うことにより、工学基盤より浅い部分の影響を付加している。堆積層上部の応答を 1 次元の計算で近似することによる誤差は、その層による卓越周波数が計算の有効周波数より高い場合や、層の水平方向の連続性が低い場合は、小さいと考えられる。しかし、本稿の計算で 1 次元応答で近似している浅層部分の厚さは、大阪平野湾岸部では 300 m 近くにもなり、厚さに変化はあるが広く連続的に分布している。堆積層上部の卓越周波数については、 S 波速度にグラデーションがあるため一概には言えないが、1 次元応答で近似することの誤差は、計算有効周波数内に十分影響してくると推定される。

そこで、この近似誤差を見積もるため、2 次元 SH 波動場の差分法（Boore, 1972; Vidale *et al.*, 1985）を用いて比較計算を行った。比較計算のための地盤構造モデルは、大阪盆地の 3 次元構造モデル（堀川ほか, 2003）から、大阪城を横切る東西測線の断面を切り出し、堆積層を単純化して 4 層にモデル化したものを用いた。4 層モデルの堆積層の深いほう 3 層は、香川ほか（1993）の層厚（基盤深度に対する比率）および S 波速度を参考に与え、最上層は、山本（2003, 私信）の S 波速度 350 m/s 程度の層の深度分布と、それ以浅の平均的な速度を与えた（第 2 表）。さらに、4 層モデルの上から 2 層分（I, II 層）を、III 層の媒質で置き換えた堆積層 2 層モデル、4 層モデルの最上層（I 層）を、II 層の媒質で置き換えた堆積層 3 層モデルを作成した。堆積層 2 層、3 層モデルによる 2 次元差分計算を行い、次に、その地表での計算波形を入力として、省いた部分を 1 次元でモデル化した構造モデルに対し、1 次元線形応答を DYNEQ により計算した。以後、それぞれ、[2 次元差分 2 層 x 1 次元 2 層]、[2 次元差分 3 層 x 1 次元 1 層]と呼ぶ。我々の地震動予測計算は、前者の状況に対応する。堆積層 4 層モデルによる 2 次元差分計算は、[2 次元差分 4 層]と呼ぶ。入力地震動には、大阪堆積盆地内での表面波の卓越周期を考え、パルス幅 1, 2, 4, 6 s のコサイン波を鉛直入射させた。第 8a～d 図に、[2 次元差分 2 層 x 1 次元 2 層]、[2 次元差分 3 層 x 1 次元 1 層]の波形と、[2 次元差分 4 層]の波形の比較を示す。ほとんどの位置で最大振幅は直達波の到来時に生じているが、直達波部分の振幅、パルス幅ともにいずれの近似計算でもよく近似されていることがわかる。後続の表面波は、[2 次元差分 3 層 x 1 次元 1 層]ではどのパルス幅の入力に対しても、ターゲットにはほぼ一致しているが、[2 次元差分 2 層 x 1 次元 2 層]では、卓越周波数や振幅、伝播速度が変わるなどの影響が見られる。この影響は、スペクトルで見るとより顕著である（第 9 図）。数値実験を行った範囲では、[2 次元差分 3 層 x 1 次元 1 層]のスペク

トルは、ターゲットのスペクトルと概ね一致している。これに対して、[2次元差分2層 x 1次元2層]のスペクトルは、スペクトルピークのシフトや高周波数成分の近似不良が見られるが、特に、1秒の入力パルスするとき、また表面波の振幅の大きい $x = 30.5 \text{ km}$ で顕著である。

6. まとめ

本稿では、上町断層系の1 Hzまでの地震動予測計算において、大阪平野北部地域で、工学基盤で浅の軟弱層の応答を考慮した計算を行った。計算は、工学基盤までを3次元差分法で、工学基盤より浅い軟らかい地層を、1次元重複反射理論を用いた等価線形解析で考慮した。浅層地盤構造モデルは、山本(2003, 私信)をもとに設定した。

上町断層系が北端から破壊するシナリオでは、大阪平野北部を中心に大きな地震動が予測され、工学基盤レベルでも100~150 cm/sの最大地震動速度が推定されている。このような強い入力のため、沖積層の厚いところは広範囲に非線形挙動を示し、地震波の長周期化が見られた。等価線形解析の適用範囲を越えたひずみも得られた。等価線形解析適用の限界とされる、最大ひずみが1%を超えない領域では、地震動速度の最大振幅は、工学基盤での値に対し大きいところで2.5倍になっている。

また、工学基盤で浅の応答を、1次元応答解析で近似的に行なうことによる誤差を、2次元差分法を用いた数値実験で見積もった。大阪平野でS波速度550 m/sの深さから上の部分の応答を一次元で考慮した場合、全て2次元で計算した場合と比べ、直達波部分は振幅も卓越周期もよく近似されるが、後続の表面波は振幅や卓越周期が影響を受けることがわかった。本稿の数値実験のような状況では、盆地端部を除く概ねの地点で、最大速度振幅は直達波によって生じているので、地震動の最大振幅の見積もりには、大きな影響を与えない。しかし、盆地への入力に表面波が卓越するような場合は、影響がより顕になると考えられる。表面波部分の応答までより精度よく見積もるには、さらに浅いところまで3次元波動場の計算をする必要がある。S波速度350 m/s程度の深さまで3次元差分法で計算すれば、1 s以上の周期帯で後続波までほぼ完全に近似できる。

謝辞 Arben Pitarka氏には2次元および3次元差分法のコードを使わせていただいた。また、公開されている等価線形計算のコード、DYNEQ(吉田・末富, 1996)を使わせていただいた。図の作成には、Wessel and Smith(1998)によるGMT(Genetic Mapping Tools)を使用した。以上、記して感謝します。

文献

- Boore, D. M. (1972) Finite-difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials, in *Methods in Computational Physics*, ed. B. A. Bolt, Academic Press, New York, Vol. 11.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972) Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. *J. SMFD, Proc., ASCE*, **98**, SM7, 667-692.
- 堀川晴央・水野清秀・石山達也・佐竹健治・関口春子・加瀬祐子・杉山雄一・横田 裕・末廣匡基・横倉貴伸・岩淵 洋・北田奈緒子・Arben Pitarka (2003) 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデルの作成. 活断層・古地震研究報告, No. 3, 225-259.
- 岩崎好規・澤田純男・香川敬生 (1987) 大阪府南部における地震動予測マイクロゾーネーション. 都市防災シンポジウム講演集, 土木学会関西支部, 93-98.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南荘 淳 (1993) 大阪堆積盆地における深部地下構造のモデル化. 第22回地震工学研究発表会講演概要, 199-202.
- 加瀬祐子・関口春子・堀川晴央・石山達也・佐竹健治・杉山雄一 (2003) 活断層情報から推定した不均質応力場中の動的破壊過程: 上町断層系・生駒断層系への応用. 活断層・古地震研究報告, No. 3, 261-272.
- 建設省土木研究所 (1982) 地盤地震時応答特性の数値解析法 - SHAKE:DERSA -. 土建資料第1778号.
- 小池章久・松本正毅・藤原吉美・山田雅行・伊藤佳洋・岩崎好規 (1997) 大阪平野深部の速度構造調査(その1) - 概要および結果 -. 土木学会第52回年次学術講演会梗概集, 62-63.
- 松岡昌志・翠川三郎 (1994) 国土数値情報とサイスマックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会.
- 日本港湾協会 (1989) 港湾の施設の技術上の基準・同解説.
- Pitarka, A. (1999) 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 54-68.
- 関口春子・加瀬祐子・堀川晴央・石山達也・佐竹健治・杉山雄一 (2003) 活断層情報を用いた想定地震の不均質すべり・応力分布の推定. 活断層・古地震研究報告, No. 3, 273-284.
- 武村雅之 (2003) 関東大震災 - 大東京圏の揺れを知る, 鹿島出版会, 139pp.

- Vidale, J. E., Helmberger, D. H. and Clayton, R. W. (1985) Finite-difference seismograms for SH waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **75**, 1765-1782.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of Genetic Mapping Tools released. *Eos*, **79**, 579.
- 安田 進・山口 勇 (1985) 種々の不攪乱土における動的変形特性. 第20回土質工学研究発表会講演集, 539-542.
- 吉田 望・辻野修一・石原研而 (1990) 一次元非線形解析における土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化. 日本建築学会大会学術講演郊外集 (中国), 1639-1640.
- 吉田 望・末富岩雄 (1996) DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム. 佐藤工業 (株) 技術研究所報, 61-70.
- Yoshida, N. (1993) Subsurface investigation and soil dynamics. *Earthquake motion and ground conditions*, Architectural Institute of Japan.

(受付:2004年10月15日, 受理:2004年11月4日)

第1表. 山本(2003, 私信)による浅層地盤モデルの地層分類と各層に与えられている層厚, N値, 密度, S波速度の範囲.

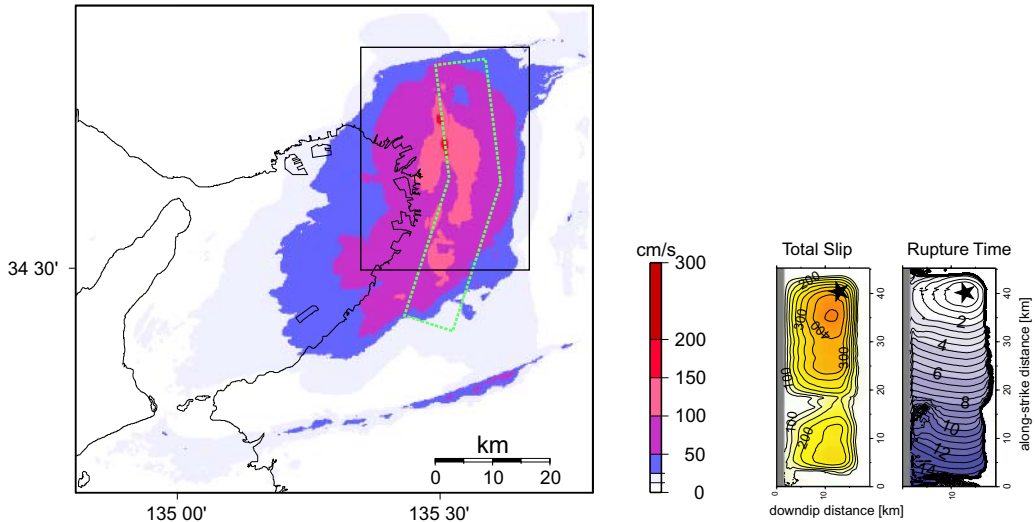
Table 1. Layer classification, range of thickness, N-value, density and S-wave velocity in the shallow sediments layer model by Yamamoto (2003, personal comm.).

Layer name (geology)	Thickness (min/max) [m]	N (min/max)	Density(min/max) [g/cm ³]	Vs (min/max) [m/s]
A (alluvium)	0.4 / 20.8	1.5 / 28.9	1.6 / 2.1	105.7 / 231.4
D (diluvium)	2 / 5	20 / 20	2.1 / 2.1	250. / 250.
Rock (Vs=350 m/s base)	-	-	2.2 / 2.2	350. / 350.
R (reclaimed land or fill)	0.3 / 19.8	1 / 35.5	1.6 / 1.8	106.4 / 253.1
AsT (alluvium sand)	0.1 / 16.9	0 / 34.1	1.8 / 1.8	98.6 / 283
Ma13 (alluvium clay)	0.1 / 20	0 / 9.5	1.5 / 1.5	116.6 / 224.2
AsB (alluvium sand)	-2.3 / 11	2.5 / 31.5	1.6 / 2.1	162. / 285.
Asg (alluvium sand)	4.4 / 24.5	20.6 / 43.5	2.1 / 2.2	244 / 299.5

第2表. 数値実験用に単純化した, 大阪平野2次元断面の地盤構造モデル.

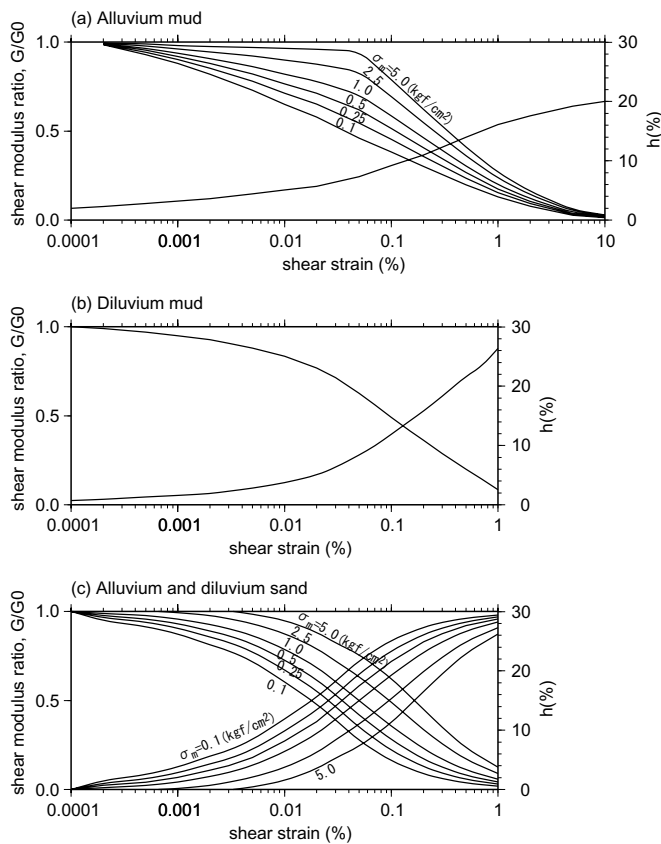
Table 2. Simplified 2D basement structure model for the Osaka plain for the use in the numerical tests.

Layer name	Vs [m/s]	Density [g/cm ³]
I	200	1.5
II	350	1.7
III	550	1.8
IV	1000	2.1
basement	3200	2.7



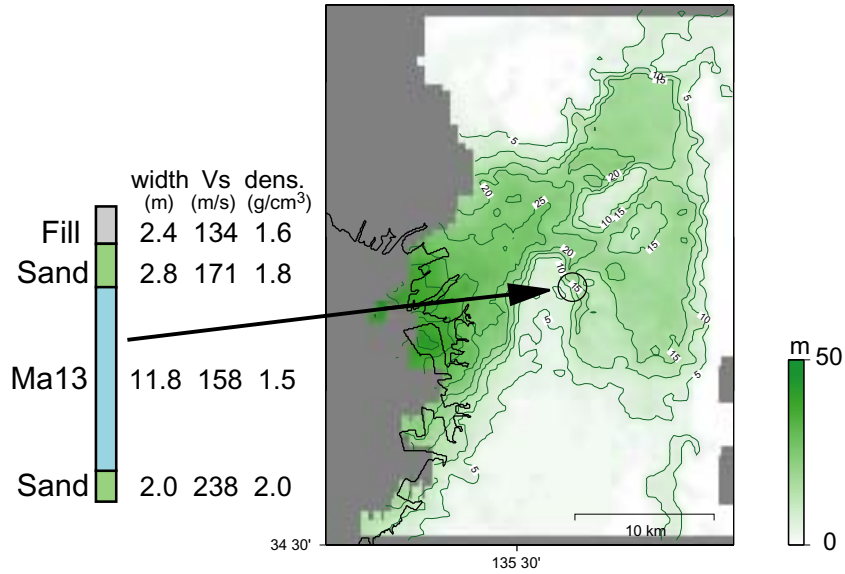
第1図. (右) 上町断層系の1つの地震シナリオの最終すべり量と破壊時刻の分布 (加瀬ほか, 2003). (左) この地震シナリオに対し, 工学基盤 ($V_s = 550$ m/s) を地表とする地盤構造モデルで3次元差分法により計算された1 Hz以下の地震動の, 地震動速度水平成分の最大値の分布 (関口ほか, 2003) (ただし原論文では, 3成分ベクトルの最大値分布が示されている). 図内の黒枠は, 浅層地盤構造を考慮する領域.

Fig. 1. (Right) Total slip and rupture time distributions of an earthquake scenario on the Uemachi fault system (Kase *et al.*, 2003). (Left) Peak ground velocity distribution calculated for the earthquake scenario in the frequency range ~ 1 Hz using 3D finite difference method assuming engineering basement ($V_s = 550$ m/s) on the surface (Sekiguchi *et al.*, 2003) (the peak of 3 components' vector summation of the ground velocity is shown in the original paper.). The black frame in the map indicates the area where shallow sediments response is evaluated.



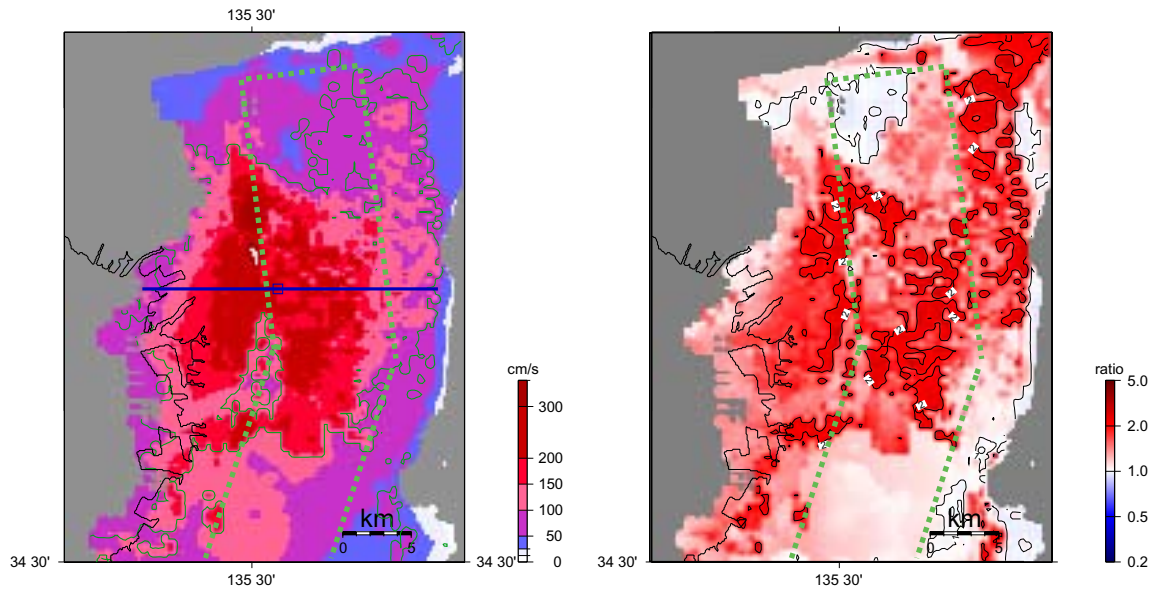
第2図. 土木研究所の式による, (a) 沖積粘性土 (b) 洪積粘性土 (c) 沖積・洪積層の砂質土に対する動的変形特性モデル.

Fig. 2. Strain-dependent characteristics of shear modulus and damping rate for (a) alluvium clay, (b) diluvium clay and (c) alluvium and diluvium sand (Public Works Research Institute, 1982).



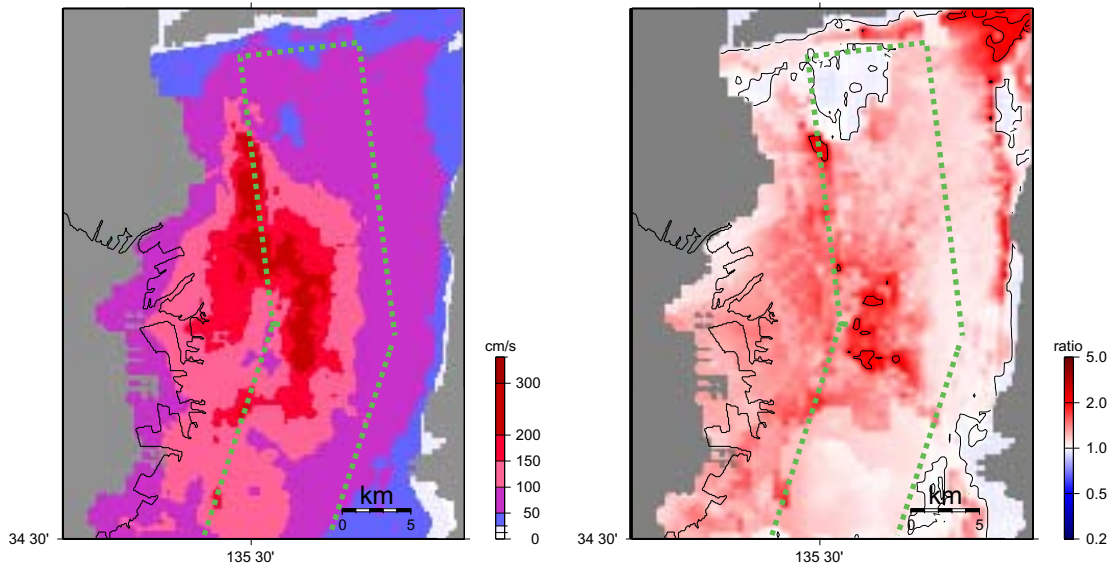
第3図. 山本 (2003, 私信) でモデル化されている沖積層の層厚分布. 例として図中丸で示した位置のモデルプロファイルを示す. 灰色部分はモデル化されていない領域.

Fig. 3. Thickness distribution of alluvium layers modeled by Yamamoto (2003, personal comm.). A structure profile at a point is shown as an example. The gray area is where the shallow sediment structure is not modeled.



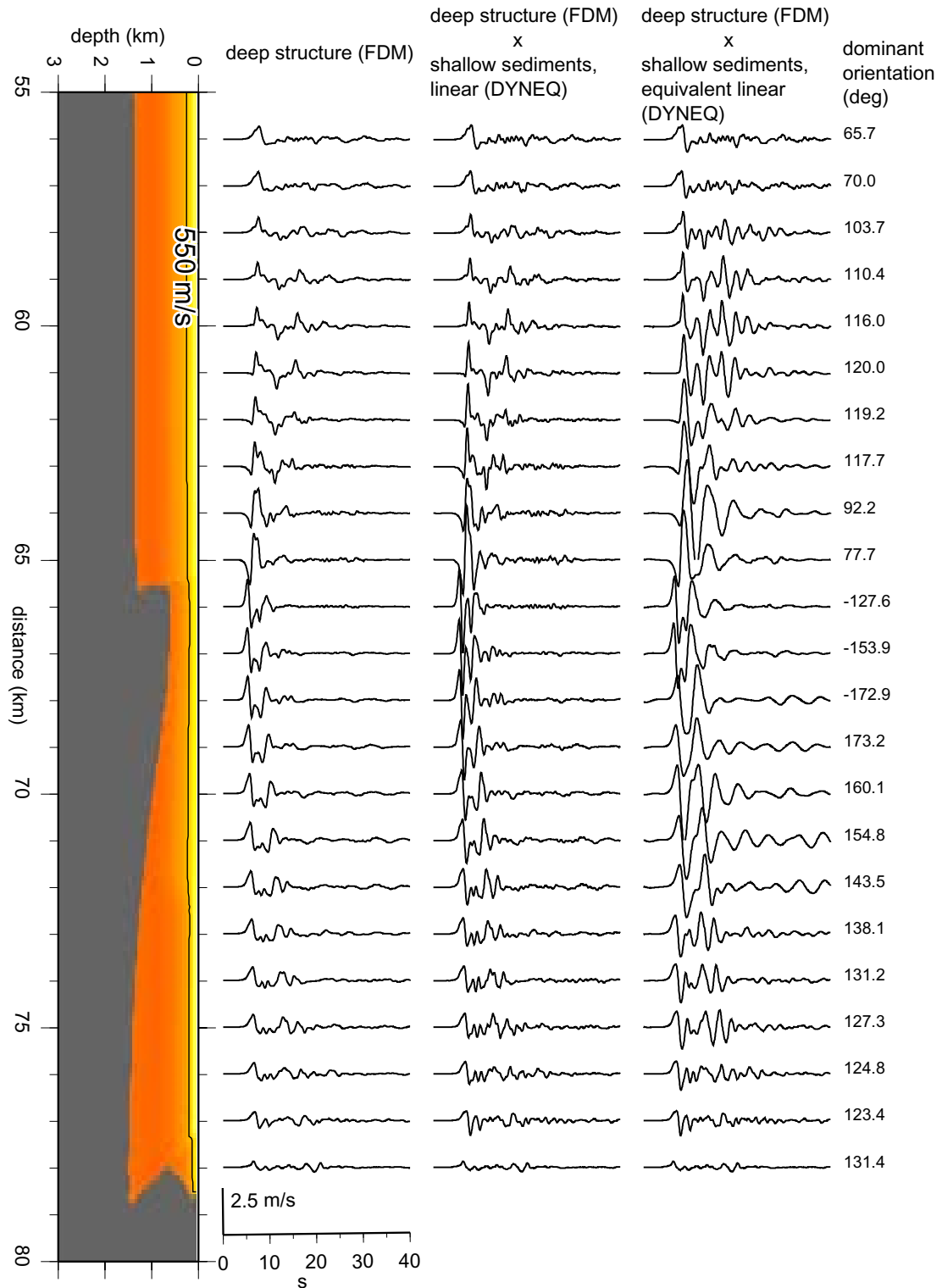
第4図. (左) 非線形を等価線形法で考慮して浅層地盤応答を付加した場合の, 地震動速度水平成分の最大値の分布. 緑のコンターは, 等価線形応答計算によるひずみの最大値が1%に達する場所を示している. 図中, 東西方向に延びる青い太線は, 第6図で波形および地盤構造の断面をとるライン. この線の中ほどの青い四角は, 大阪城のおおよその位置を示す. (右) 3次元差分法による工学基盤を地表とした計算の地震動速度水平成分最大値に対する, 非線形を等価線形法で考慮して浅層地盤応答を付加した場合の地震動速度水平成分の最大値の比の分布. (第1図の値に対する左図の値の比)

Fig. 4. (Left) Peak ground velocity distribution when response of the shallow sediment layers is evaluated assuming nonlinear response. Green contours show the distribution of maximum strain of 1%. Bold blue line extending eastwest across the Osaka Plain is the line along which the synthetics are shown in Fig. 6. (Right) Ratio of the peak ground velocity with nonlinear response of shallow sediment layers to that without the shallow layer response. (Ratio of values of the left hand side figure to those in the Fig. 1.)



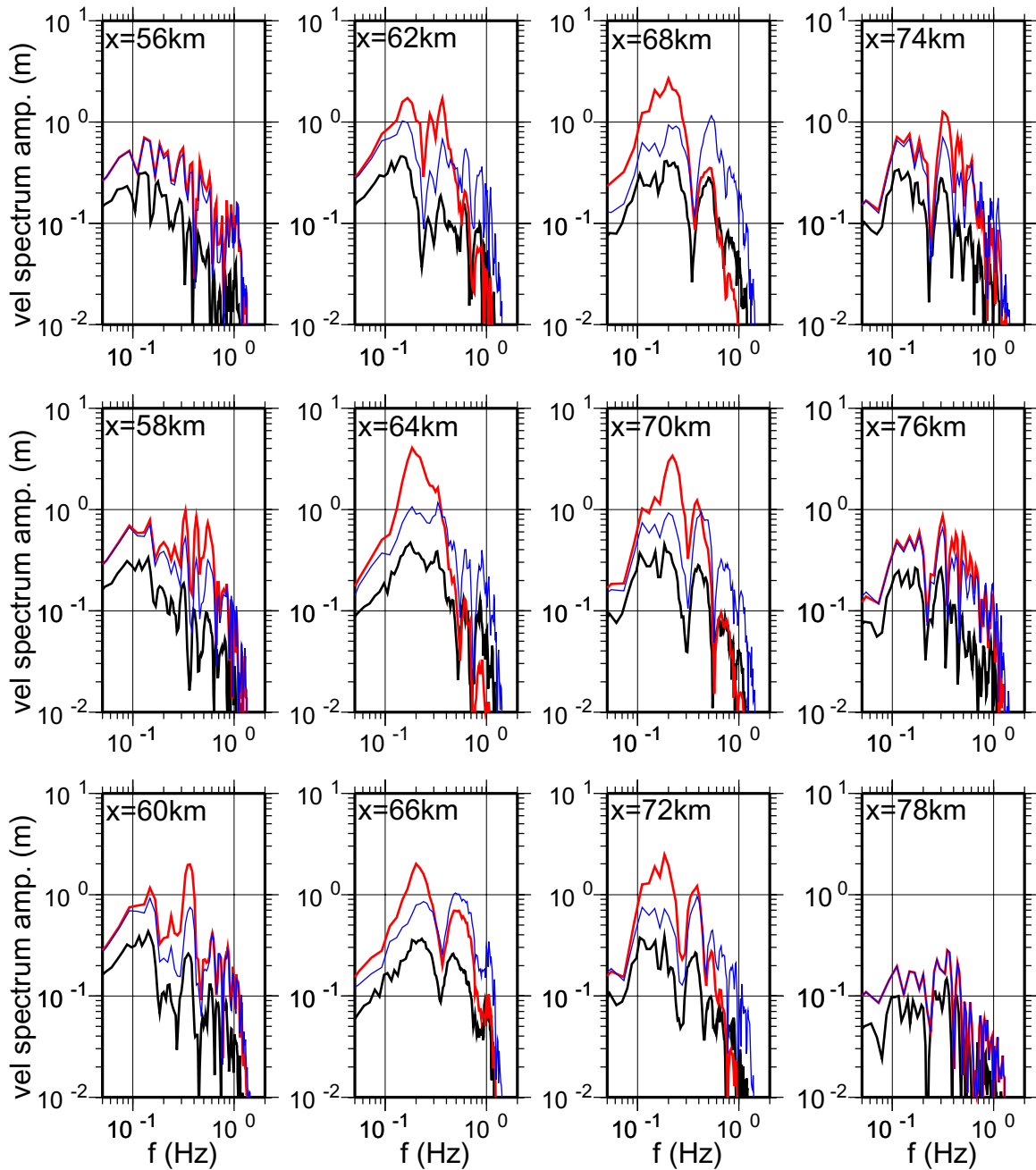
第5図. (左) 線形応答を仮定して浅層地盤応答を付加した場合の、地震動速度水平成分の最大値の分布. (右) 3次元差分法による工学基盤を地表とした計算の地震動水平成分最大値に対する、線形応答を仮定して浅層地盤応答を付加した場合の地震動速度水平成分の最大値の比の分布. (第1図の値に対する左図の値の比)

Fig. 5. (Left) Peak ground velocity distribution when response of the shallow sediment layers is evaluated assuming linear response. (Right) Ratio of the peak ground velocity with linear response of shallow sediment layers to that without the shallow layer response. (Ratio of values of the left hand side figure to those in the Fig. 1.)



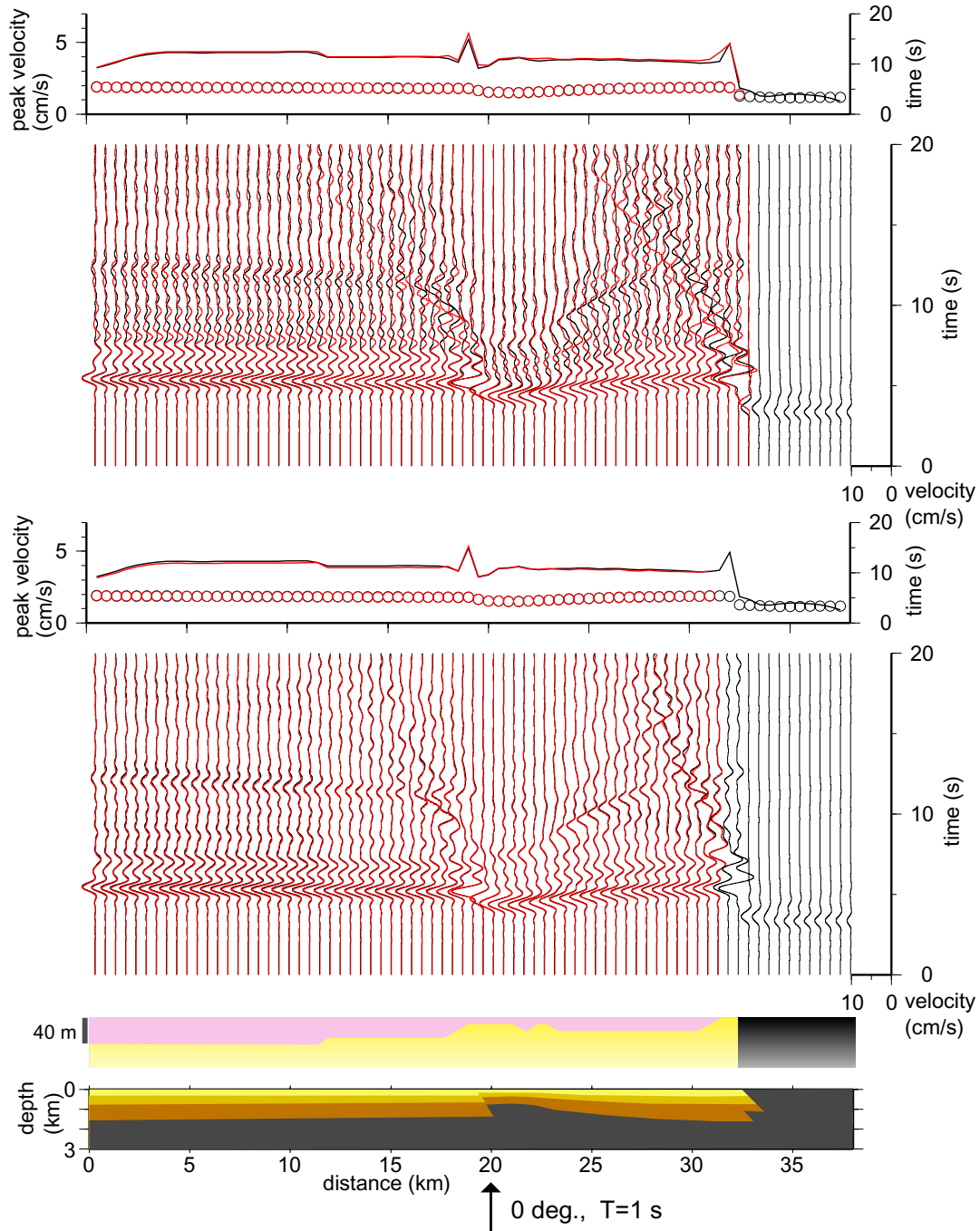
第6図. 大阪城を横切る東西ライン (第4図) の合成波形. 左の列は, 3次元差分法により盆地の深部構造のみを考慮し, 工学基盤を地表とする計算によるもの, 中の列は, 左の列の波形に線形応答を考慮して浅層地盤応答を付加したもの, 右の列は, 左の列の波形に非線形を等価線形法で考慮して浅層地盤応答を付加したもの. 各地点で工学基盤の地震動速度が最大振幅を生じた方向の速度波形 (右端に卓越方向を北から時計回りを正とする角度で表示).

Fig. 6. The synthetics along the line shown in Fig. 4. The synthetics in the left column are calculated by the 3D finite difference method assuming the engineering basement on the surface. The synthetics in the middle column are those with linear response of shallow sediment layers. The synthetics in the right column are those with nonlinear response of the shallow sediment layers. All the synthetics are of the orientation in which the peak velocity occurred at the engineering basement. The predominant azimuth is indicated at the right end of each row.



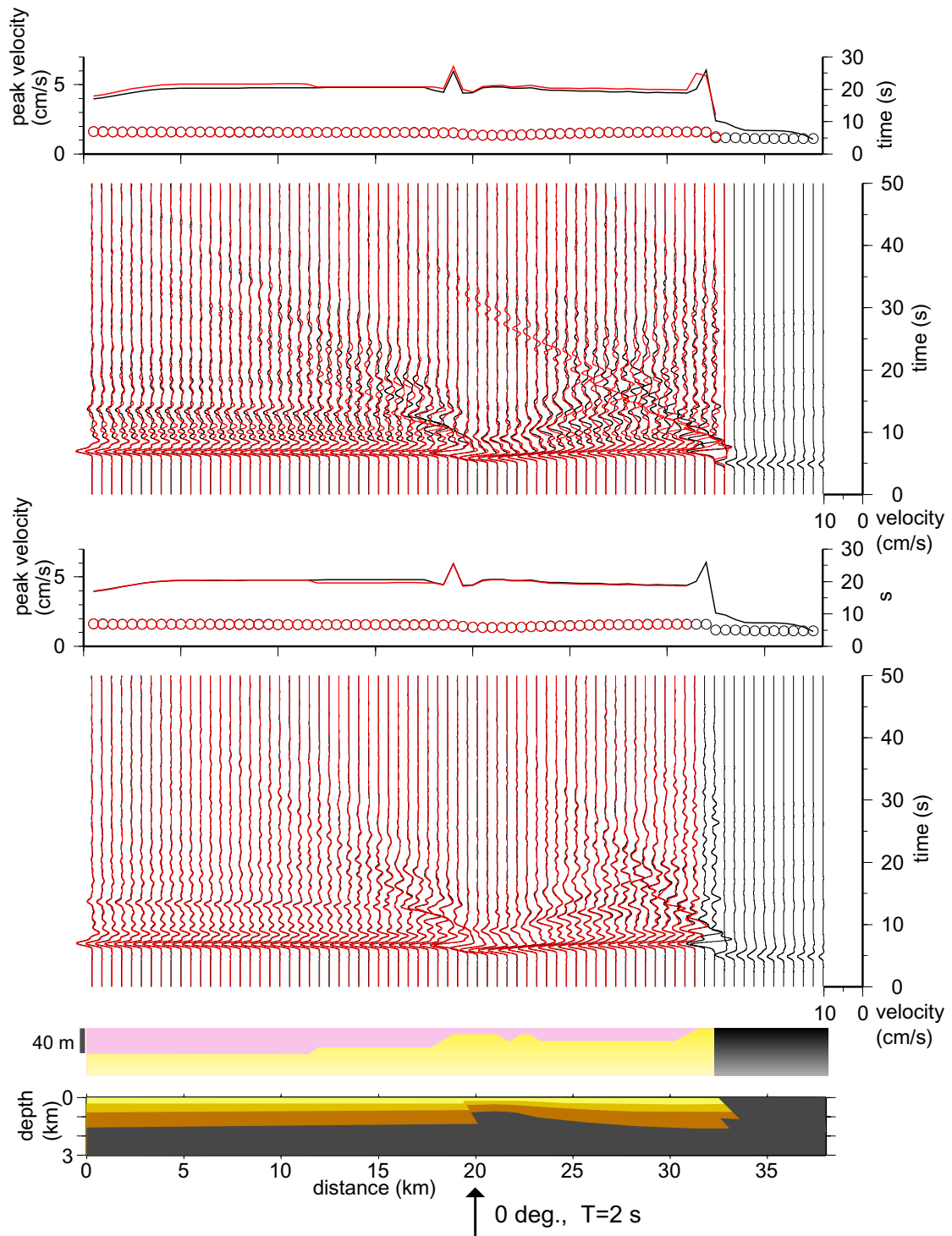
第7図. 第6図に示した波形の速度振幅スペクトル. 黒線が3次元差分法により盆地の深部構造のみを考慮し, 工学基盤を地表とする計算によるもの, 青線は, 3次元差分法の波形に線形応答を仮定して浅層地盤応答を付加したもの, 赤線は, 3次元差分法の波形に非線形を等価線形法で考慮して浅層地盤応答を付加したもの.

Fig. 7. Velocity spectral amplitudes of the synthetics shown in Fig. 6. Black lines show the spectra of synthetics assuming the engineering basement on the surface. Blue lines are the spectra of synthetics with linear response of shallow sediment layers. Red lines are the spectra of the synthetics with nonlinear response of the shallow sediment layers.



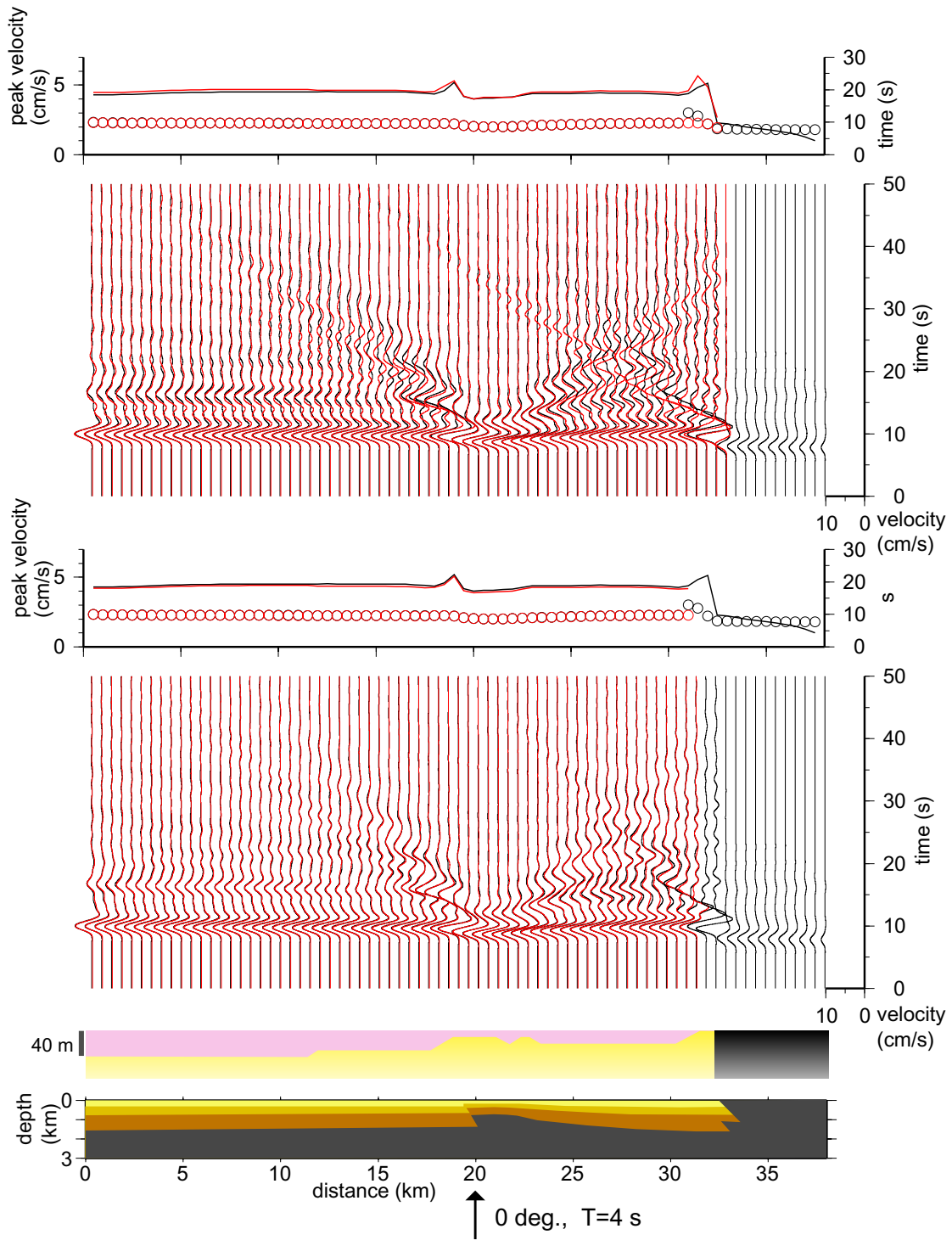
第8a図. 浅層地盤応答を、1次元応答計算で行なうことによる誤差の評価。1 s幅のコサイン波が鉛直入射した場合。黒線の波形は、堆積層4層モデル（第2表）における2次元差分計算（[2次元差分4層]）の波形。赤線の波形は、上段が堆積層2層モデルにおける2次元差分計算波形に1次元応答計算で堆積層1層、II層の応答を加味したもの（[2次元差分2層x 1次元2層]）、下段が堆積層3層モデルにおける2次元差分計算波形に1次元応答計算で堆積層I層の応答を加味したもの（[2次元差分3層x 1次元1層]）。波形群の上には、各波形の最大振幅とその発生時刻（○）を示す。下部には仮定した地盤構造の断面を、ごく浅層と全体とに分けて表示している。

Fig. 8a. Evaluation of error due to the approximation of shallow sediment layer responses by 1D response analysis. A 1 s wide cosine-shape pulse is input vertically. Black lines are the synthetics calculated by 2D finite difference method for the full 4-sediment layer model (Table 2). Red lines in the upper are calculated first by 2D finite difference method for the 2-sediment layer model (a model eliminating the upper two layers from the full 4-sediment layer model) and later convolved with the 1D response of the shallow two layers. Red lines in the lower are calculated first by 2D finite difference method for the 3-sediment layer model (a model eliminating the upper one layer from the full 4-sediment layer model) and later convolved with the 1D response of the shallowest layer. Above each group of synthetics, the peak amplitudes and the time of the peak amplitudes are shown. At the bottom, the basement model is illustrated.



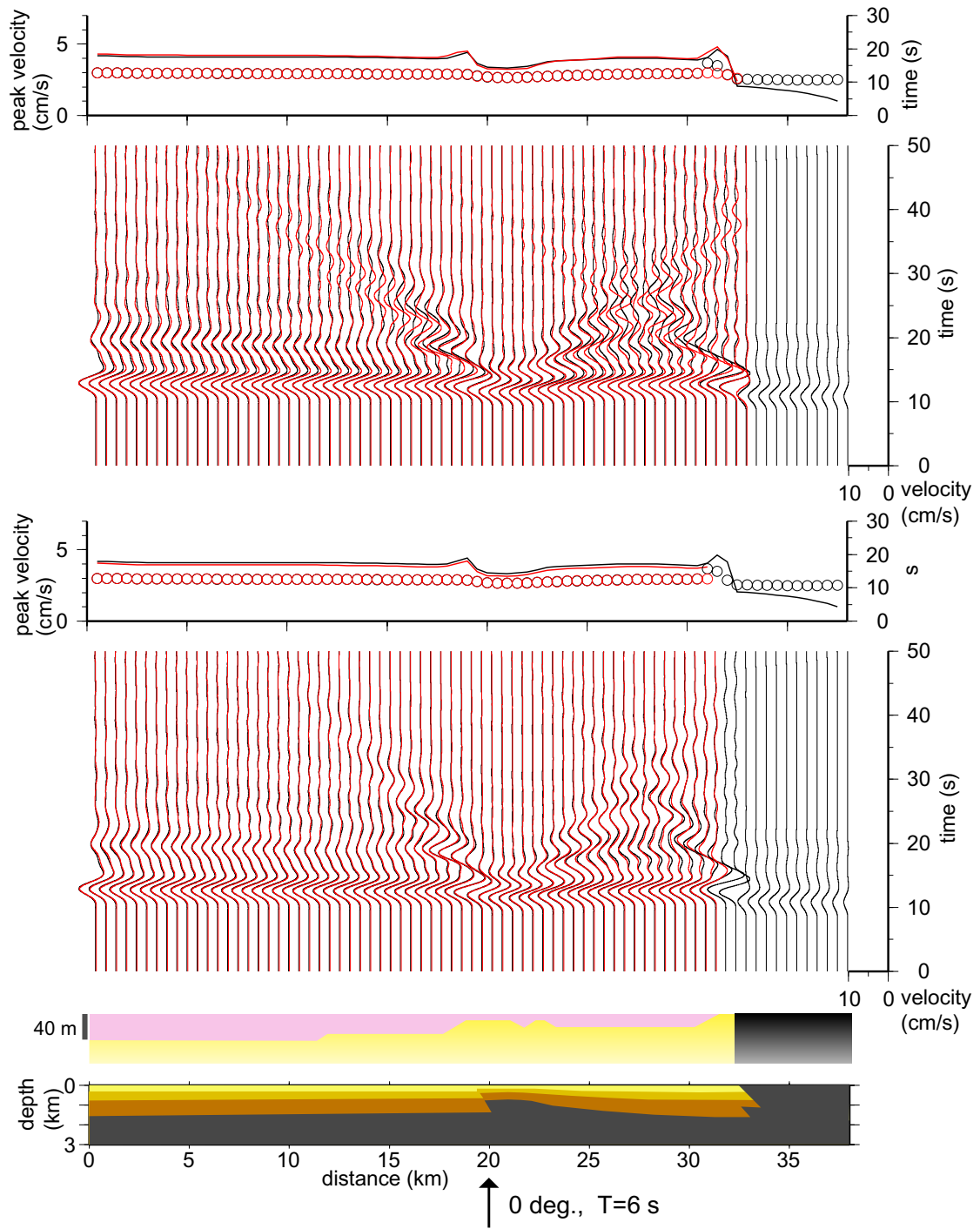
第8b図. 浅層地盤応答を、1次元応答計算で行なうことによる誤差の評価。2 s幅のコサイン波が鉛直入射した場合。

Fig. 8b. Evaluation of error due to the approximation of shallow sediment layer responses by 1D response analysis. A 2 s wide cosine-shape pulse is input vertically.



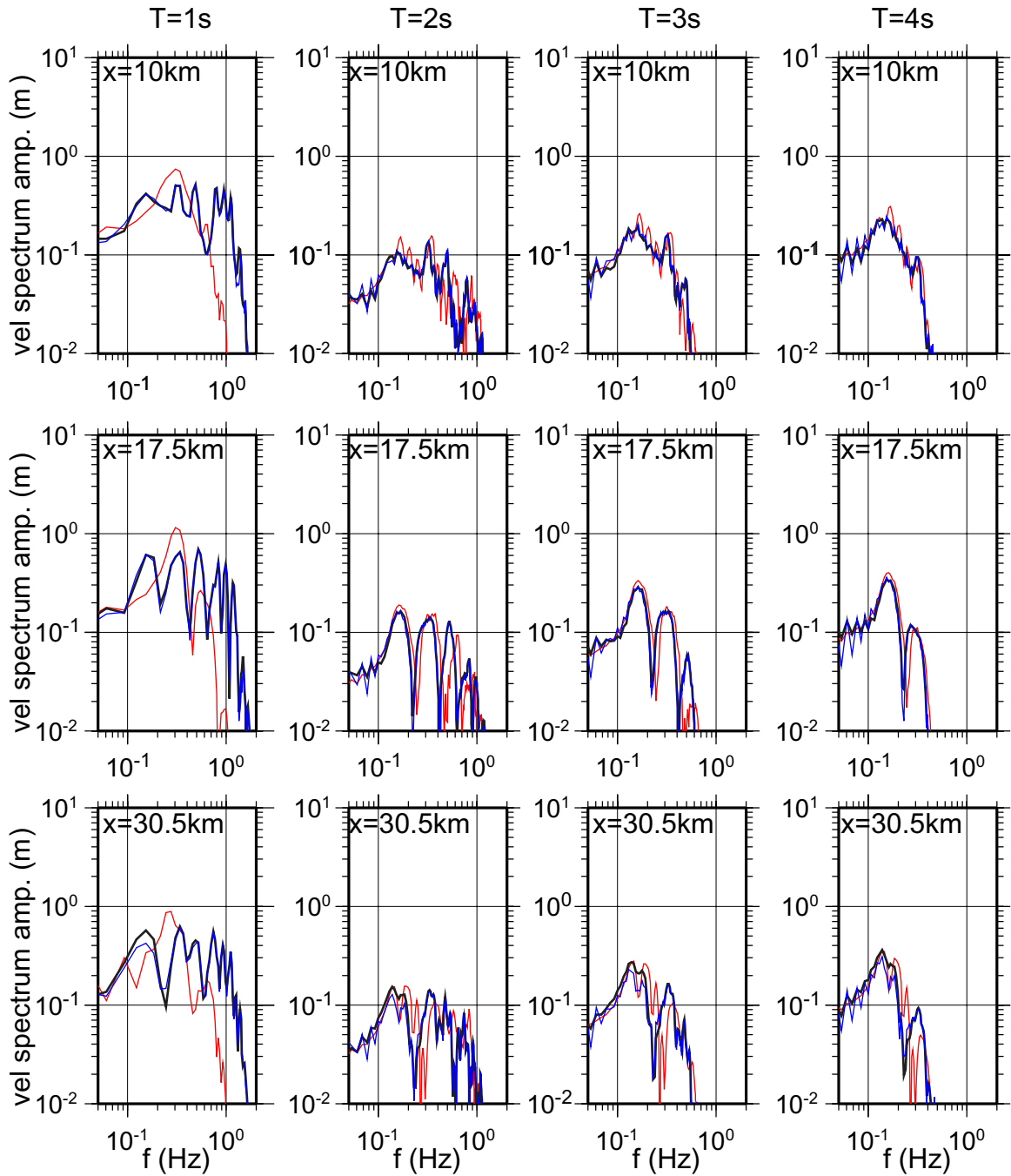
第8c図. 浅層地盤応答を、1次元応答計算で行なうことによる誤差の評価. 4 s幅のコサイン波が鉛直入射した場合.

Fig. 8c. Evaluation of error due to the approximation of shallow sediment layer responses by 1D response analysis. A 4 s wide cosine-shape pulse is input vertically.



第8d図. 浅層地盤応答を、1次元応答計算で行なうことによる誤差の評価. 6 s幅のコサイン波が鉛直入射した場合.

Fig. 8d. Evaluation of error due to the approximation of shallow sediment layer responses by 1D response analysis. A 6 s wide cosine-shape pulse is input vertically.



第9図. 浅層地盤応答を、1次元応答計算で行なうことによる誤差. 第8a～d図に示した波形のうち、位置 $x = 10, 17.5, 30.5$ kmにおける波形のスペクトル. 黒線は、2次元差分計算（[2次元差分4層]）、赤線は、上段が堆積層2層モデルにおける2次元差分計算波形に1次元応答計算で堆積層1層、II層の応答を加味したもの（[2次元差分2層x 1次元2層]）、青線は堆積層3層モデルにおける2次元差分計算波形に1次元応答計算で堆積層1層の応答を加味したもの（[2次元差分3層x 1次元1層]）.

Fig. 9. Evaluation of error due to the approximation of shallow sediment layer responses by 1D response analysis. The spectra of synthetics at $x = 10., 17.5, 30.5$ km shown in Fig. 8a-d are illustrated. Black lines for the synthetics calculated by 2D finite difference method for the full 4-sediment layer model (Table 2). Red lines are spectra for the synthetics calculated first by 2D finite difference method for the 2-sediment layer model (a model eliminating the upper two layers from the full 4-sediment layer model) and later added the 1D response of the shallow two layers. Blue lines are spectra for the synthetics calculated first by 2D finite difference method for the 3-sediment layer model (a model eliminating the upper one layer from the full 4-sediment layer model) and later added the 1D response of the shallowest layer.