

兵庫県南部地震における神戸の揺れを不整形地盤震動から捉える

岡山大学環境理工学部教授 竹宮宏和
 岡山大学大学院自然科学研究科 アダムマール

兵庫県南部地震波は神戸において建物、高架橋を始め社会基盤構造物に甚大な被害を与えた。特に「震度7の震災の帯」の出現で伏在断層説と共に、神戸の特異な地形・地盤構造説がクローズ・アップされた。この被災帯は、軟弱な浅い沖積層上にあり、その下には硬い大阪層群、神戸層群が六甲山（花崗岩）の麓から急激に段差をなし、海岸に向かって厚く堆積している地層構成である。本論文では、コンピュータ・シミュレーションから地震波の伝播においてこの特徴ある地形・地盤構造の影響を調べ、地震波の増幅、卓越周期成分から上の被災帯の究明をしている。その結果、深層地盤の不整形よりも軟弱表層地盤が「震度7の震災の帯」により関係したと結論付けている。

1. まえがき

1995年1月17日に起きた阪神大震災は神戸において甚大な被害を建物、高架橋を始め多くの社会基盤構造物に与えた。震災の調査結果、六甲山と海岸の中間で帯状に25kmにわたって「震度7の震災の帯」が浮かび上がった。その原因に関して著者らは、表層の軟弱地盤による地震波の伝播特性をシミュレーションから、鉛直方向と水平方向に伝わる地震波の干渉による増幅効果を指摘し、「バンプ現象」と称した。^{1), 2)}

神戸のその時の揺れを把握するために、代表的に、神戸海洋気象台と神戸大学の観測記録が引用される。記録計は前者では丘陵の上に位置している。一方、後者では風化花崗岩中の地下道に設置されている。それらの加速度波形をみると、最初に立ち上がりの鋭い大きな周期の長い揺れがあり、その後周期の短い揺れが続く。時刻歴の主要な継続時間でフーリエ・スペクトルをとると、神戸海洋気象台の加速度波形では0.3～0.5秒、0.7～0.8秒、1.2秒付近に卓越した周期を有する。神戸大学記録では、1.2秒付近に卓越した周期、そして相対的に僅かである1秒以下と2秒以上の周期成分を有する。

観測波形に含まれている周期特性を地盤内の地震波の伝播メカニズムとの関係で把握できる。国土地理院の地質図を基にすると、六甲山から急激に基盤面が地中に潜り込む段差構造、そして市街地を覆う薄い軟弱沖積層がかなり堅いが深い大阪・神戸層群

の上に広がっている（図1）。そこで神戸における地震波の増幅を考える場合、これらの深層および浅層地盤構造によるものを考慮する必要がある。

本論文では、神戸の地盤で六甲山に直交する代表的な断面を想定して、その面内波動、面外波動の解析から地震波の伝播に及ぼす地形・地盤構造の影響を調べる。解析モデルを数値計算上の都合から、深層地盤と表層軟弱地盤モデルに分けている。解析手法には2次元FEMとBEMの時間領域ハイブリッド法を採用する。これらのシミュレーションをとおして今回の神戸の地震動において地形・地盤構造がどのように係わったかを推論している。

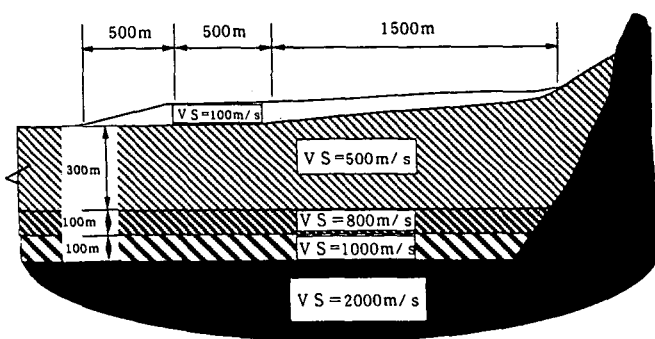


図1 神戸の地盤

キーワード：地震動の増幅、深層地盤、表層地盤

* 岡山大学環境理工学部、086-251-8146

** 岡山大学大学院自然科学研究科博士課程

2. 深層堆積層の地震波の伝播

(1) 深層堆積層モデル

震災後の反射法地震探査によれば、深層の大阪層群、神戸層群はかなり深く逆断層を形成していることが確認された。この六甲山麓の急激な段差構造に注目した解析を行うための深層モデルを図2に示す。地盤構成は洪積層、それ以下の大阪層群、神戸層群さらにその下の花崗岩の基盤としている。ここではSH波としてのリッカー波を入射を想定し、深層地盤の不整形基盤面が地震波の伝播に与える影響を調べた。

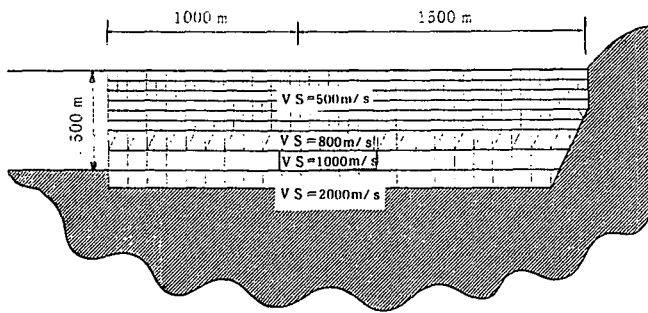


図2 FEM-BEMによる深層地盤モデル

(2) シミュレーション結果の考察

図3はリッカー波の代表周期を変化させた場合の解析モデルの表面の変位の時刻歴を描いたものである。地盤の不整形性効果は周期が1~2秒の入射波に対して大きく現れる。基盤の急激な段差構造は、そこから波が硬い堆積層内を海岸に向かって伝播する様相を示している。地表面の応答の位相をみるため、段差構造の近傍地点と離れた地点を選び、それらの時刻歴応答を比較すると、段差構造により、その近傍では1次元解析結果より早く地震波が地表面に到達しているのがわかる。図4の変位に関する増幅率でみると、段差構造から水平堆積層に約200m位入った箇所で幅200m程にわたって増幅しており、増幅度は周期の長い1秒以上の入射波の下で約4倍もあるが、入射波の周期が短くなるとに従い応答倍率は1になる。注目場所が段差構造から離れると、水平層としての応答倍率に近づく。なお、図4には比較のため、水平層としての1次元波動伝播解析結果も併せて記してある。

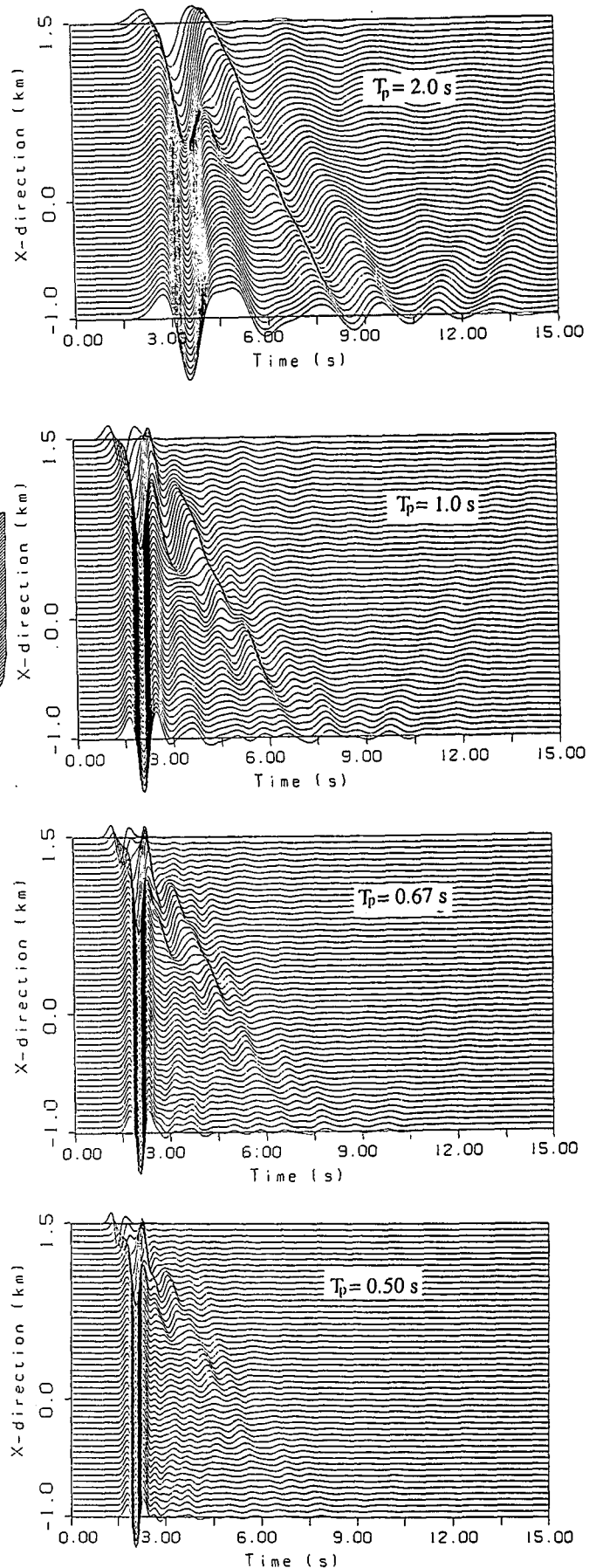


図3 リッカー波入射に対する時刻歴応答

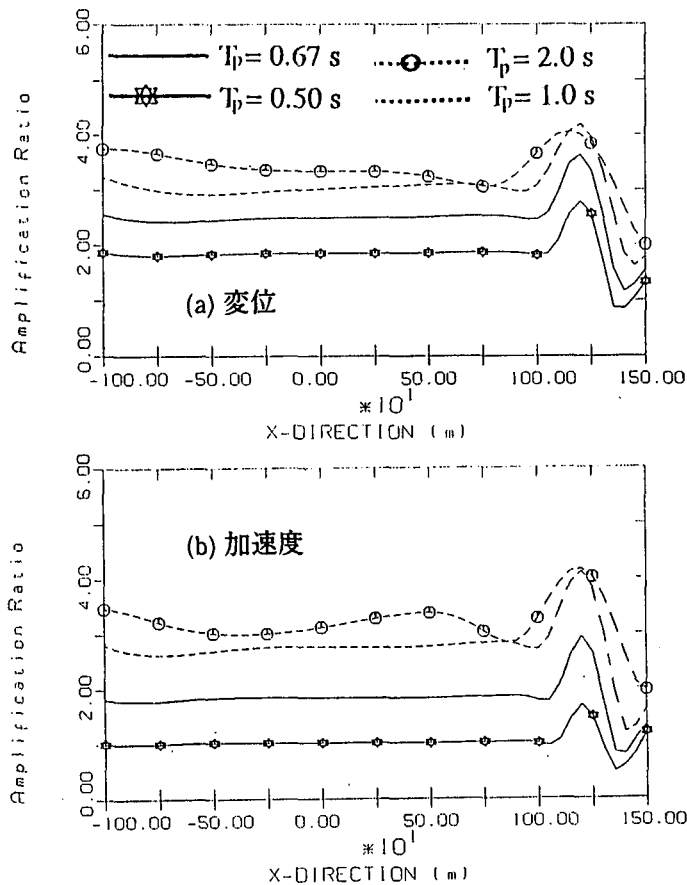


図4 最大増幅率(変位)

3. 軟弱沖積地盤の地震波の伝播^{2), 3)}

(1) モデル化

神戸の表層地盤を楔形の軟弱沖積層で置き換える。基盤は一様な洪積層、それ以下の大阪層群、神戸層群さらにその下の花崗岩基盤を一様な硬い基盤として扱う。軟弱沖積層のせん断波速度は $V_s=100$ m/s、基盤のそれは $V_s=1000$ m/s とコントラストを持たせた。その他の地盤物性値は図中に記入しておいた。図5は解析のためのBEM-FEMモデルを示す。入力地震波には、まず対象とする表層地盤の震動性状を把握するため、周期の異なるリッカーを使用する。さらに本シミュレーションを実証するため、神戸大学、神戸海洋気象台の観測記録をベースにしたものをSV波の入射と仮定して使用する。

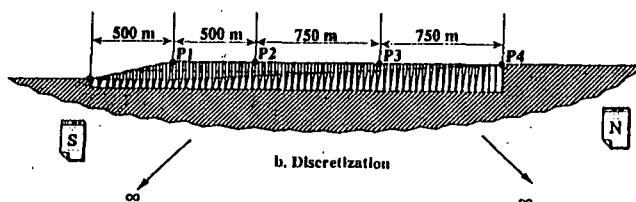


図5 FEM-BEMによる軟弱沖積地盤モデル

(2) シミュレーション結果の考察

図6はリッカー波の代表周期を変化させた場合の地表面の変位の時刻歴を描いたものである。地盤の不整形性効果は周期が0.3~0.7秒の入射波に対して大きく現れる。そこから波が海岸に向かって伝播する様相が判る。周期が1~2秒のときは波長と層厚の関係で地盤の増幅も無く入射波そのものが現れる。図7の増幅率で見ると、入射波の周期特性と増幅率の関係が明瞭で、短周期波に対して大きな増幅を示すが、長周期波には示さない。軟弱表層地盤の場合は深層堆積層モデルと逆の傾向をとっていることが判る。

入射地震波には、神戸大学地下道、神戸海洋気象台の記録波形の主要な部分(継続時間約12秒)とそれらを参考にした人工地震波の組み合わせを用いた。これを横波(S波)として、洪積層の深さGL-30m位置で鉛直方向に入射し、モデルの面内の波動の伝播に注目した。ただし、神戸海洋気象台の波形は基盤面への一次元引き戻し波形を採用した。

図8は変位、速度、加速度について、場所ごとの時刻歴のシミュレーション結果を示したものである。沖積層の厚さは解析地形モデルから水平距離を測って容易にわかる。全体的に振幅の非常に大きい長周期の変位を再現し、強度の大きい短周期の加速度を伴った揺れが沖積層のある深さで急激に現れることが明瞭に見られる。注目すべきは、これは地盤の揺れは長周期型の“ユサユサ”とか短周期型の“ガタガタ”という揺れではなく“ギクシャク”揺れる状況となる。構造物への作用の仕方は、“一方向へ足元を大きくすくうと同時に前後方向への速い慣性力の繰り返しの作用”となって現れる。このような揺れは、加速度の周期に共振する構造物では非常に危険な状態を与える。

地表面の揺れの加速度成分からは、場所ごとに位相差が異なって応答ピークが現れることがわかる。注意すべきは、沖積層の薄い場所では入射波の位相に従って地表面は応答するが、沖積層がある深さになると、新しい大きな加速度波が時間と共に出現する。それと同時に水平方向に波の伝播する様子が認められる。この揺れの様相には軟弱沖積層との共振に加えてバンプ現象が絡んでおり、応答の増幅となっている。特に震災ベルトの場所で、1次元波動理論で計算した応答値よりかなり大きい加速度値を示すことは、バンプ現象を裏付けている。

構造物の破壊の観点から、地盤の揺れを評価する場合、エネルギー量に直接関係する速度応答がもう一つの指標といえる。速度が大きいことはそれだけ

構造物への破壊エネルギーが大きいことを意味している。横揺れでは国道43号線をピークに六甲山寄りに500mにわたって、また海岸沿いに1m/秒に届くピークとなっている、これらは設計値(0.4~0.5 m/秒)をはるかに越える数値である。

加速度、速度、変位についての時刻歴応答の最大値を図9に示す。図中には神戸気象台と神戸大学での観測値を記入してあるが、神戸気象台の修正記録を用いた応答とよく一致すると思われる。また、ここで用いた人工地震波は約1秒を境に観測記録の短周期成分と長周期成分を表現できるようにしたものである(短周期型は卓越周期が0.43秒、長周期型は1.28秒)。

4. むすび

兵庫県南部地震の神戸の特異な地震動を説明するために、特に地形・地盤による地震波の増幅効果の観点から、本研究では、深層堆積層の急激な段差構造とくさび型の軟弱表層地盤の不整形性に注目して、それぞれの2次元BEM-FEMモデルから地震波の伝播メカニズムを数値シミュレーションから調べた。

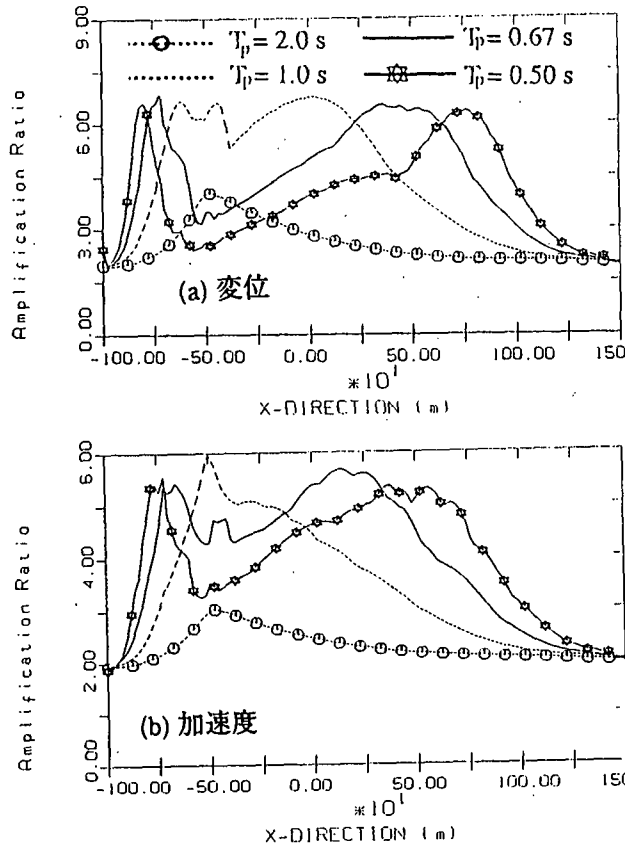


図7 最大増幅率

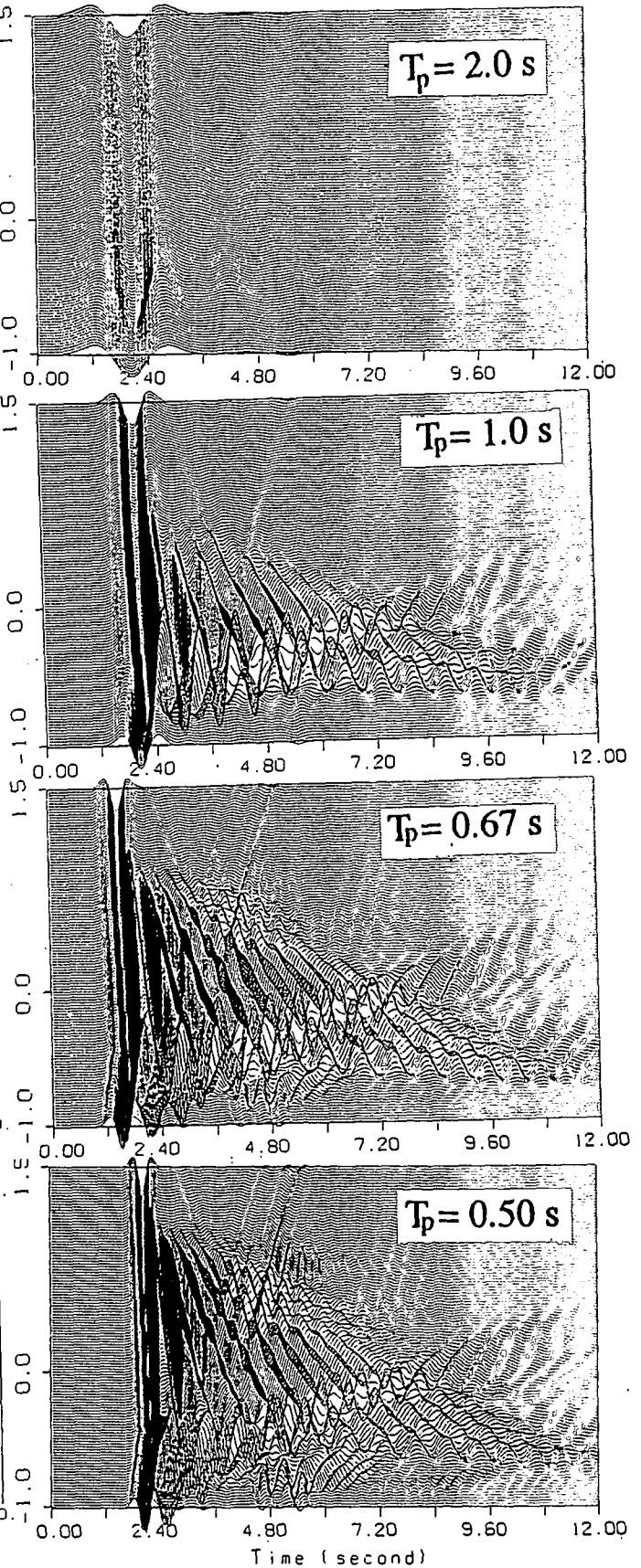


図6 リッカー波入射に対する変位時刻歴

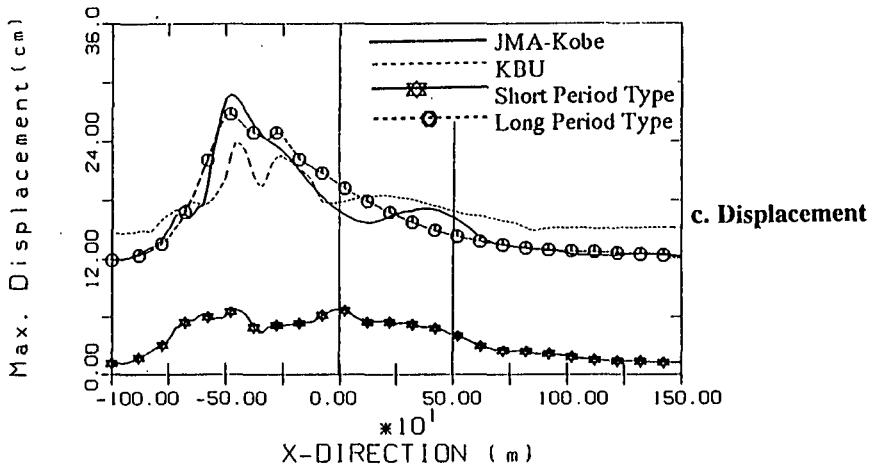
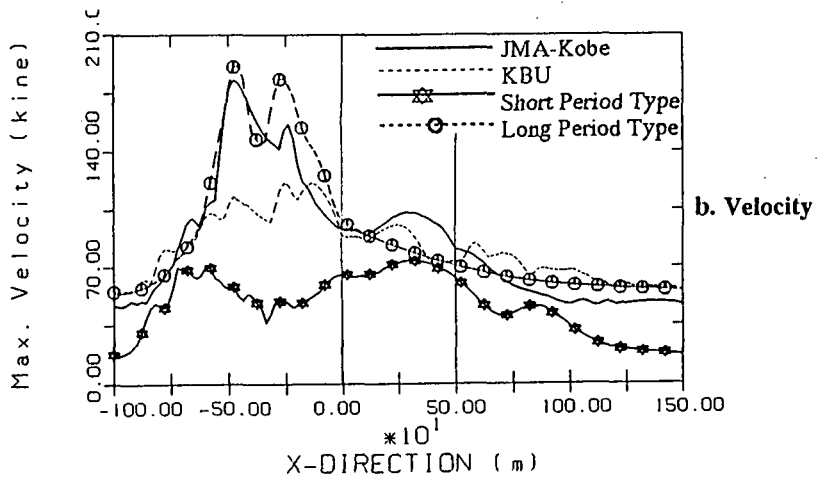
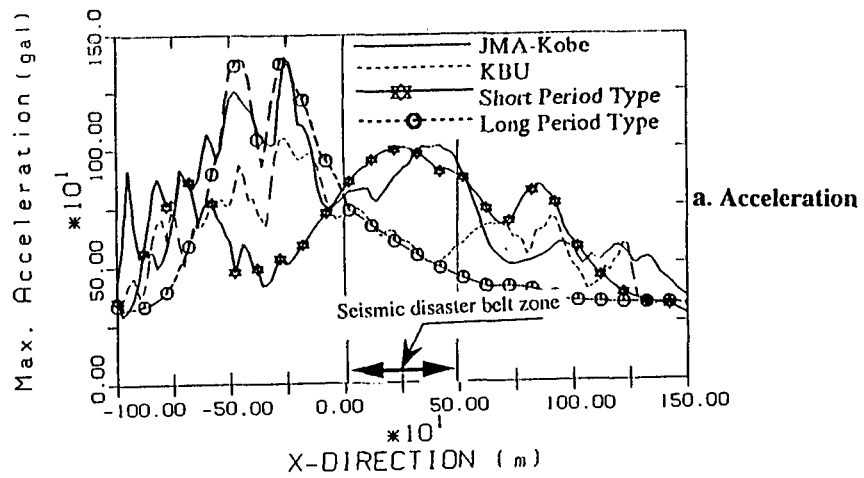


図9 軟弱沖積地盤の地表面最大応答

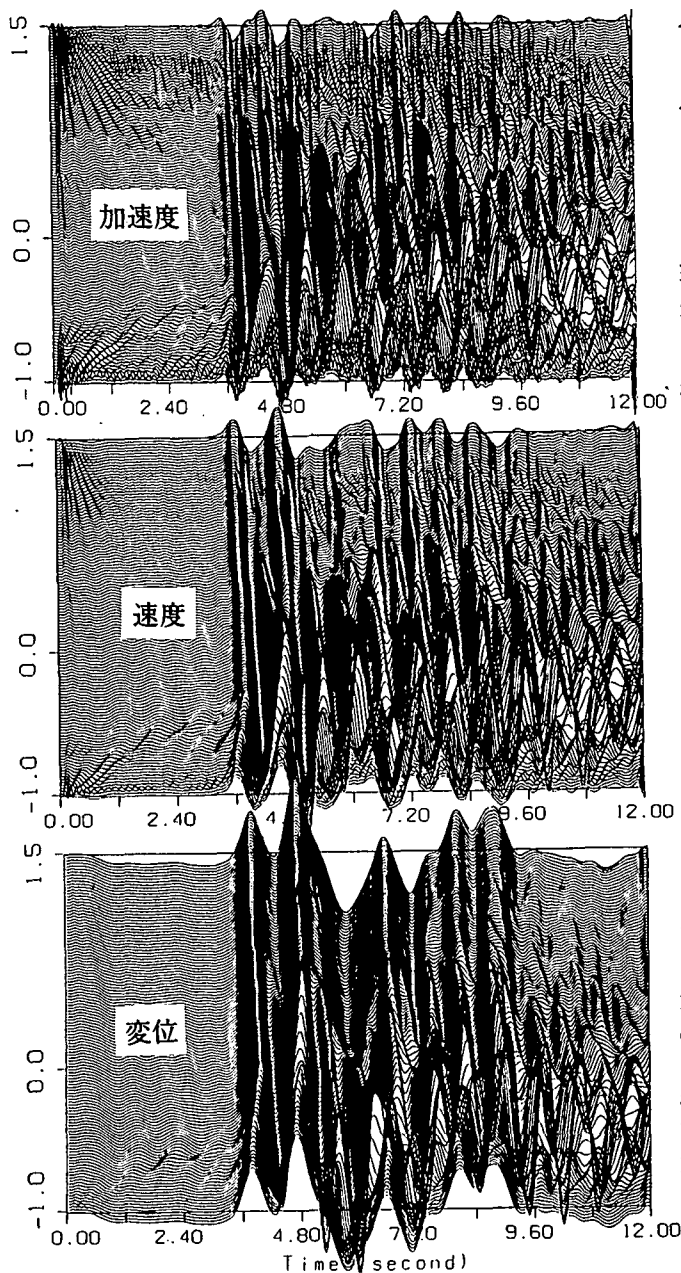


図8 地震動シミュレーション

Ground motions in Kobe amplified by topography, in the Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Hirokazu Takemiya, Adam Maher

The Hyogo-ken Nanbu Earthquake, caused heaviest structural damages in Kobe and its vicinity, registering as 6 and partially 7 (severest) on the Japan Meteorological Agency seismic damage scale. The heaviest damages were centered on the areas along the Kobe coast but at some distance inland in a belt.

This paper focuses on the geological features in the Kobe area and makes clear the seismic wave propagation mechanism related to those unexpected damages there. The computer simulation has been conducted by taking a deep soil model with abrupt dipping rock base in addition to a soft surface soil layer on a relatively stiff soil. The computation results indicate that the soft soil effect is more concerned with the above damage belt zone than the deep soil effect.

その結果

(1) 深層堆積層は、花崗岩基盤の段差構造のため、その近くでは、幅約200mにわたって応答の増幅を示す(フォーカシング現象)。増幅率は周期1~2秒の入射波に対して最も大きく、端周期の入射波に対しては小さい。いずれの場合も、ピーク値は基盤面よりほぼ2倍強に増幅され、それは水平層の応答の約1.5倍になる。

(2) 軟弱表層地盤の応答増幅作用には同層の共振現象とくさび型の先端から水平に伝わる波が係わっており、0.4~0.7秒の短周期の入射波が最も大きな4倍もの増幅率を示し、長周期の入射波に対しては小さい。そして漸増する層厚のため入射波の周期によってピーク値を示す場所が移動する(ランプ現象)。記録波形に基づくシミュレーションからは加速度の増幅の大きな場所は震災の帯と一致した。

(3) 記録波形における予想外の大きな変位、速度成分は入射波形のそのものに含まれる長周期成分に起因するが、加速度成分は短周期成分に依存して、沖積地盤によって増幅された。地上構造物の破壊は、周期的に後者の成分で共振してもたらされたと推定される。

参考文献

- 1) 毎日新聞(大阪版)1月7日付
- 2) Takemiya, H. and Adam, M.: Why the heaviest damages occurred in Kobe during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan 1995, 7th Soil Dyn. Earthq. Eng. (to appear Kobe Earthquake, Comp. Mech. Pub., Ltd.)
- 3) 竹宮宏和、アダムマヘル: 縦と横に伝わる波が録合わせ地盤の加速度が異常に増幅、日経コンストラクション, pp.123-129, 1995.7.