

深層地盤構造の不整形性による 地震波の増幅特性

岡山大学環境理工学部教授 竹宮宏和*

岡山大学大学院工学研究科 川東 靖**

兵庫県南部地震において、被害の集中が神戸・大阪域の特定の場所において点在した。地形・地質構造による地震波の増幅作用が主原因であったことがその後の研究で明らかになりつつある。神戸市域と大阪市域の深層の地形・地質構造において、前者は露頭した基盤から急激に大きな落差をもって深い堆積層（大阪層群）を形成しているが、後者は地塁構造の上に一面に厚い堆積層が分布している。そこで本研究ではこれらのモデル化に応じて、BEMを適用して、地震波動場のシミュレーションをSH波入射の仮定の下に行い、地形・地質構造の差による増幅メカニズムを筆者らの唱えるバンプ現象から説明している。

1. はじめに

兵庫県南部地震による被害の特徴は、図. 1 に示すように震度7の甚大な帯が神戸市須磨区から宝塚市にかけて、幅1-2km、長さ約20数kmにわたって帯状に広がったことである。木造家屋やビル、高速道路などの倒壊は、六甲断層群の南側の海岸線からある距離をとって集中した。いわゆる「震度7の震災の帯」の出現である。

「震度7の震災の帯」について、地質学や地盤工学などの研究者らでつくる「阪神地域活断層調査委員会」は、神戸・阪神地域の地盤構造を握むため、上記の震度7の帯を含む地域において反射法地震探査により、地質断面の調査を実施した。その結果、震災の帯に当たる神戸・東灘区の直下には活断層はなく、その代わり平野部において基盤岩までの深い堆積層が改めて示され、神戸市東灘区の調査測線では基盤岩が六甲山裾で400m~1000mもの落差で急激に落ち込む地形構造が明らかにされた。¹⁾

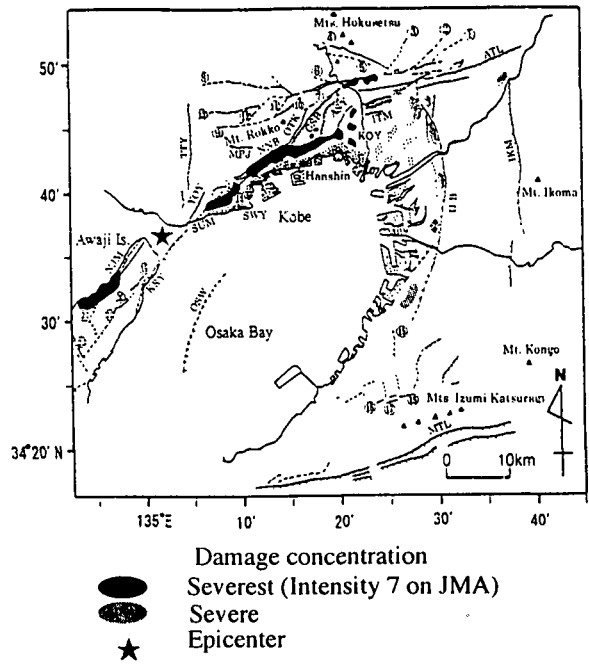


図1 兵庫県南部地震における阪神地域の被害分布

地形構造が被害に関係したと思われるいま一つの例として大阪地域の仏念寺-上町断層に沿ったところでの南北に細長く延びた被害の集中箇所である(図. 1 参照)²⁾。ここの深層構造は、神戸のそれとは異なり断層形成によるホルスト(地塁)構造となっている。

キーワード：不整形深層地盤構造、
波動の増幅メカニズム

* 岡山大学環境理工学部、086-251-8146

** 岡山大学大学院工学研究科修士過程

地形構造に起因して場所により地震波の増幅特性に差が見られることに関して、不整形地盤としての波動伝播解析が必要である。堆積層とその周辺基盤で堅さにおいて大きな差があると、不整形な境界の影響で堆積層の特定の箇所で大きな応答が発生する。この原因として、著者らは鉛直方向に伝播する重複反射波と堆積層のエッジに発生する表面波の干渉にあることを示した。^{3, 4)} 竹宮・アダムは表層沖積層を対象にして解析し、地震波の特定の場所で生じる増幅効果をバンプ現象と呼んだ。

地下深部の不規則な地形・地質構造の観点から、阪神大震災を説明した報告の中で、²⁾ 地震波が断層で反射、屈折されその近傍に波が集中する「フォーカシング」という現象が神戸や大阪でも発生していたとする説がある。^{2, 5, 6)} 波線理論からは地層構成に従って、地表面における波のエネルギーの集中化、希薄化の様相を定性的には表現することができる。神戸の地形に対して、志知、青木の解釈⁵⁾ は、基盤と堆積層がナイフ型にのみ限られる直感的なところがある。入倉⁶⁾ は断層を含む堆積層内の波動伝播を差分法からシミュレーションして、応答増幅の解釈にはフォーカス現象説をとっている。有限要素法からシミュレーションしたもので、川瀬・林⁷⁾ は応答増幅度を求めている。源榮・長野⁸⁾ は地震波の増幅は水平と鉛直の基盤面からの実体波のフォーカシングと結論している。中川ら²⁾ は大阪の堆積層平野で仏念寺一上町断層の存在する場所を対象にして、波線理論から深層地形のホルスト（地塁）に対する波動場の検討をして地震波のフォーカス現象を定性的に説明して、波線の集密化が地盤応答の増大になる原因としている。ただし、その場合、フォーカシングする波間の位相に注目しないとそれらの波の重ね合わせが応答の増大につながるのか、低減になるのかの定量的な評価ができない。波線理論から応答様相の推定ができるのは波長が地層構造のサイズに比べて非常に短いときである。

以下、本研究では境界要素法による時間領域解析から⁹⁾、特に神戸のような断層の存在による堆積層の急激な落差、大阪堆積盆地のようなホルスト（地塁）構造における地震波の増幅現象をSH波の入射を対象にしてシミュレーションから究明する。

2. 解析モデルとシミュレーション結果

(1) 露頭基盤から落差のある堆積層

解析ケースとして以下の6種類の地盤構造(図. 2 参照)を選んで、Ricker波の周期を $T_p=0.5$ 秒,1秒としたパラメータ解析を行った。

モデルA： 一様半無限地盤

モデルB： 2層半無限地盤

モデルC： ナイフ型地盤 $\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

モデルD： 神戸の深層地盤

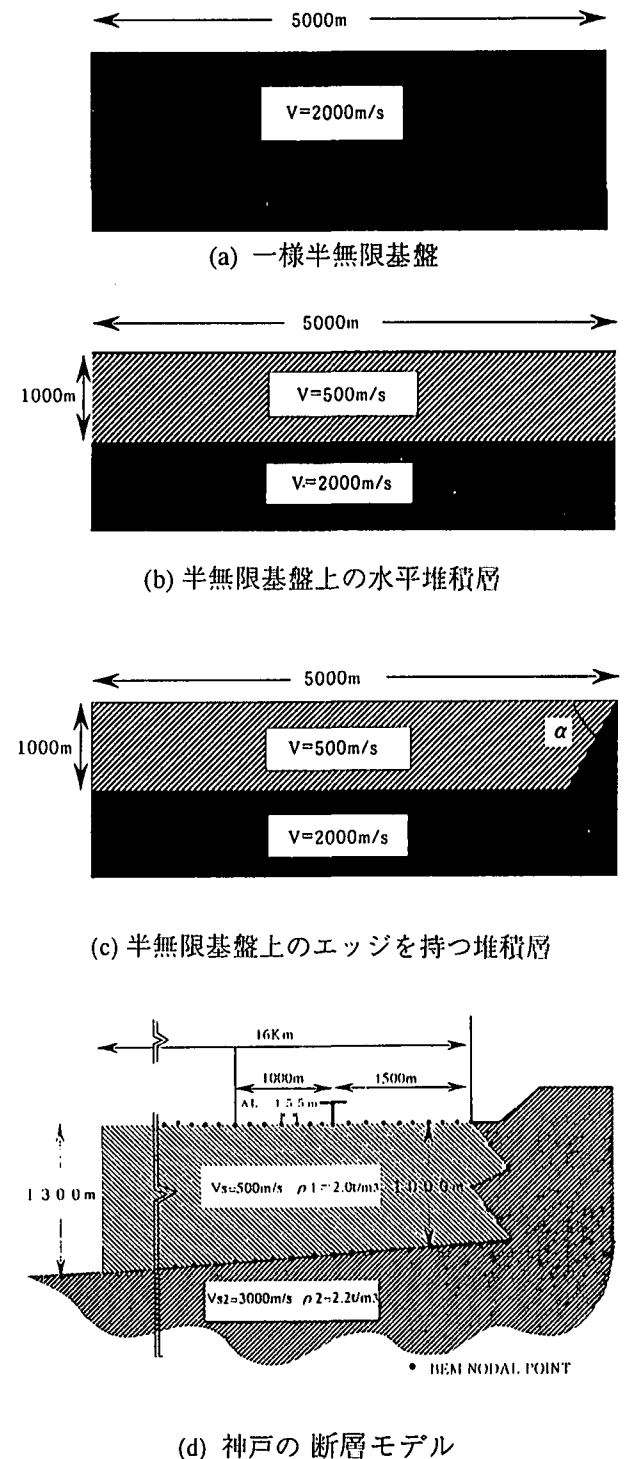


図2 基盤上の堆積層モデル

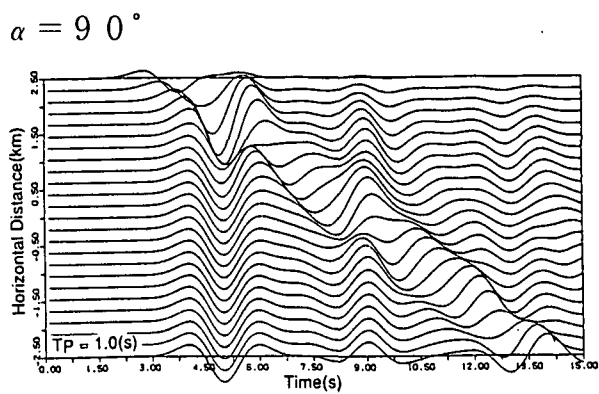
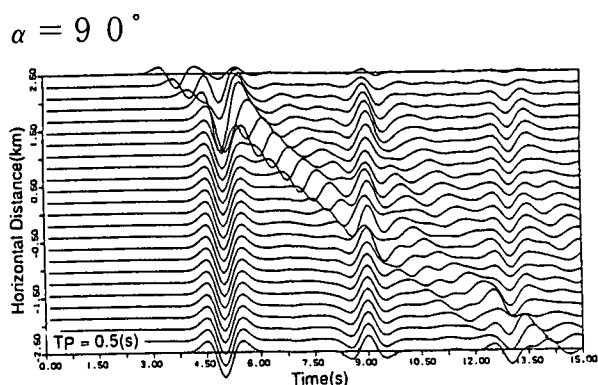
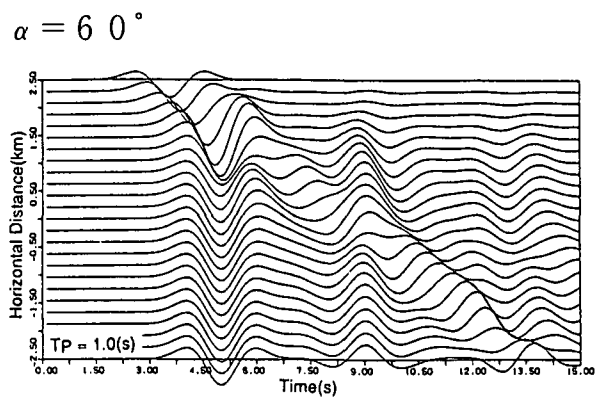
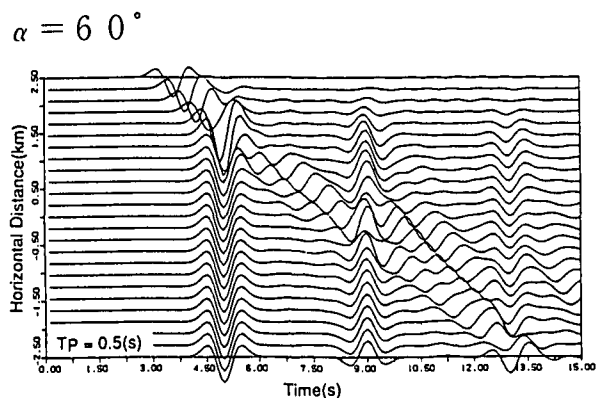
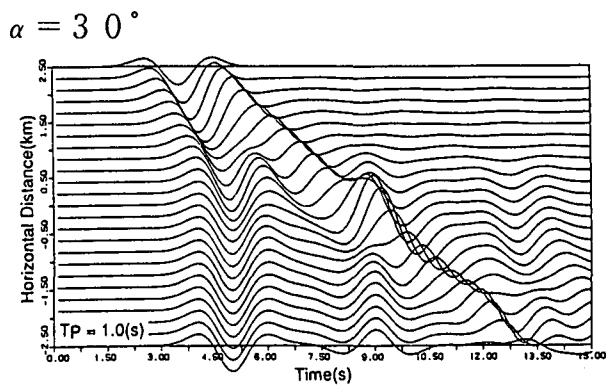
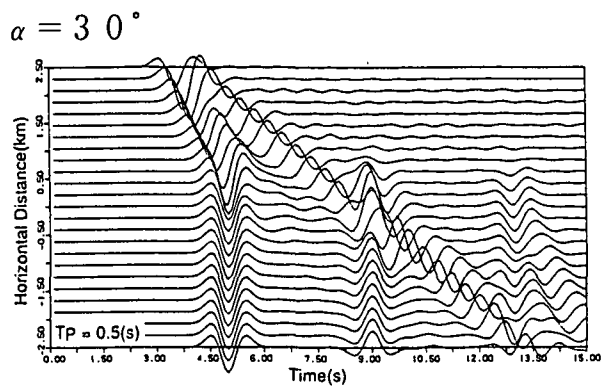


図3 リッカー波に対する時刻歴応答 ナイフ型地盤

モデルA, Bは本解析手法の精度の検討のためのモデルであり、モデルC ($\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)は傾斜基盤面の鋭敏度による波動の散乱度を調べるためのモデルである。モデルDは、実際に神戸の地盤の南北方向の特徴を捉えたものである。

モデルA, Bに関しては、入射波の周期 $T_p = 0.5, 1.0$ 秒の鉛直入射時について後述の他のモデルと併せて最大値分布のみを示しておいたが、それぞれ一様地盤、2層地盤の場合の表層の1次元解析から得られる値を正確に与えている。時刻歴(省略)においては、それぞれの地盤モデル化に従って位相特性を確認した。つまり一様地盤では入射波の一波の波形が現われ、自由表面のため入射波と反射波の振幅が

加算されて入射波振幅の2倍となる。2層地盤では自由表面と上下層の間で重複反射現象が生じ、応答の継続が周期的に起こる。そしてインピーダンス比によって応答増幅度が決定される。

ナイフ型を有する傾斜地盤となると、図3に見られるように、入射波の堆積層のエッジへの到達と共に水平方向に伝わる散乱波が発生し、これが鉛直方向に伝播する波と干渉を起こす様相が明瞭に理解できる。傾斜角 α が変化しても水平方向の伝播の波の様相にはあまり影響が無い。これはエッジ部から表面波(ラブ波)が発生して伝播していることを示唆している。実際、位相速度を評価するとラブ波のそれに相当している。最大応答倍率の図4からは、

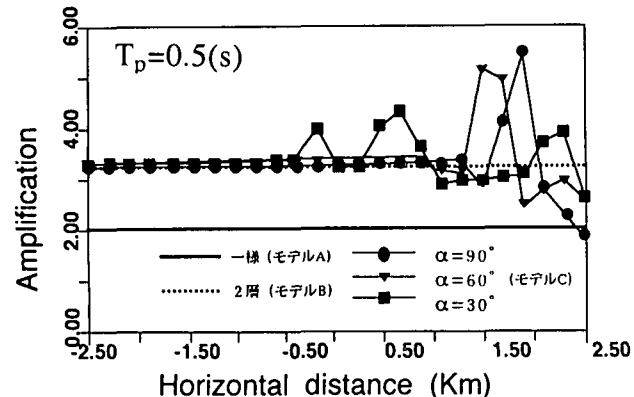
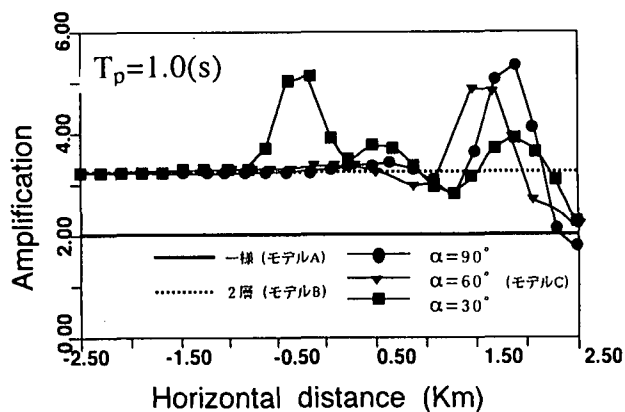


図4 リッカー波に対する最大応答
ナイフ型地盤

異なる方向に伝わる波の干渉のため傾斜基盤から少し水平基盤面に入った地表面で最大値が現われていることが判る。それは傾斜基盤の傾斜角がきつくなる程、傾斜面の立ち上がりに近い水平部の場所で、緩いとそれからより離れた水平場所である。その値は水平2層地盤の値の約1.6倍となっている。入射波長が長くなる（リッカー波の周期が長くなる）と増幅する範囲が広がる。

神戸地盤モデルDでは、側方境界が逆断層の構成で複雑に基盤面が傾斜しており、そのため堆積層内の鉛直方向伝播の波と水平方向伝播の表面波の干渉は、図5に示すように顕著を見られる。このケースでは、傾斜入射の場合（入射角 20° ）の波動場を示しておいたが、鉛直入射波の結果とそれほど差は見られない。図6の最大応答増幅率では断層面から500m離れた箇所でも幅500mにわたって増幅しており、断層面から2.5km離れたところと比較して約1.7倍となっている。入射波の周期の差は、最大増幅率に現れて、長周期波の2.0秒の方が短周期波の0.5秒より広い範囲で大きい値を与えている。短周期波の入射では増幅率において水平方向に周期性が現れてくる。

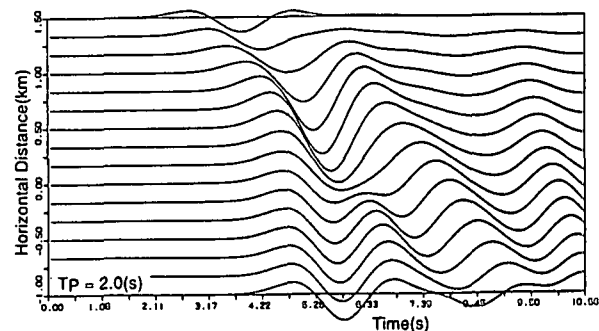
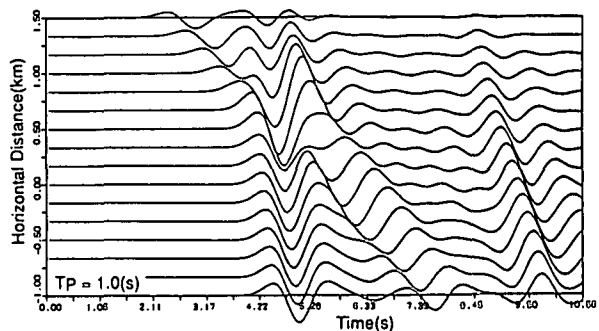
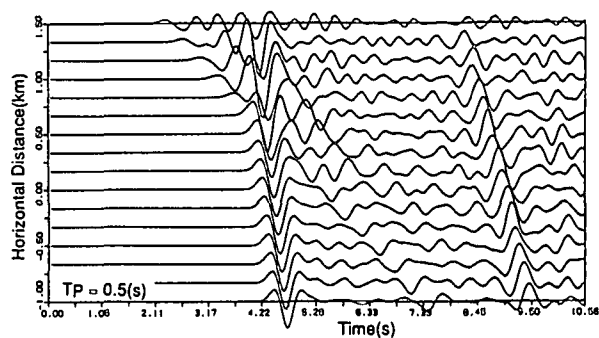


図5 リッカー波に対する時刻歴応答、
神戸の断層モデル、

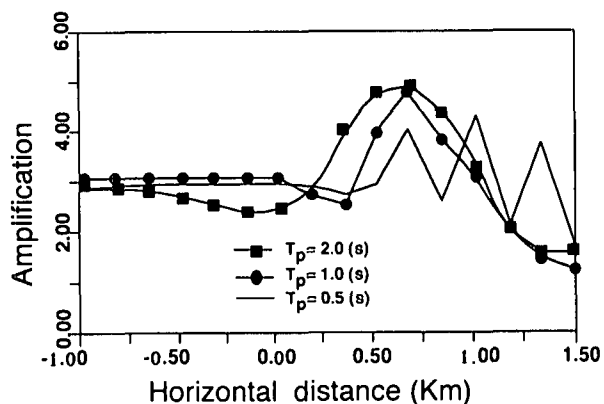


図6 リッカー波に対する最大応答
神戸の断層モデル、

(2) 露頭基盤を持たない不整形地盤構造

中川らの大阪地域の堆積地盤モデルを採用して、解析ケースとして以下の地盤構造を選んでRicker波の周期を $T_p=0.5$ 秒, 1秒としたパラメータ解析を行った。

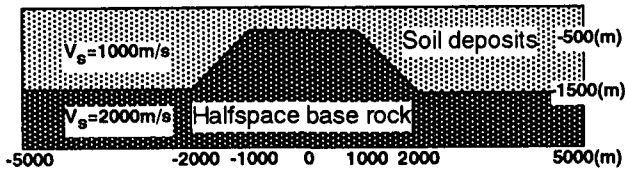
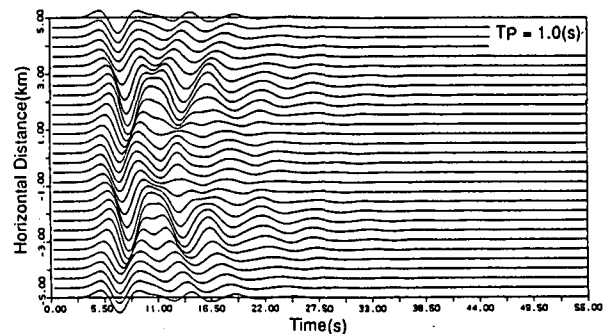
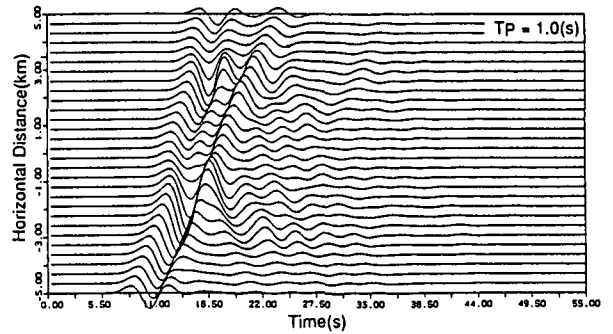


図7 ホルスト（地壘）構造地盤

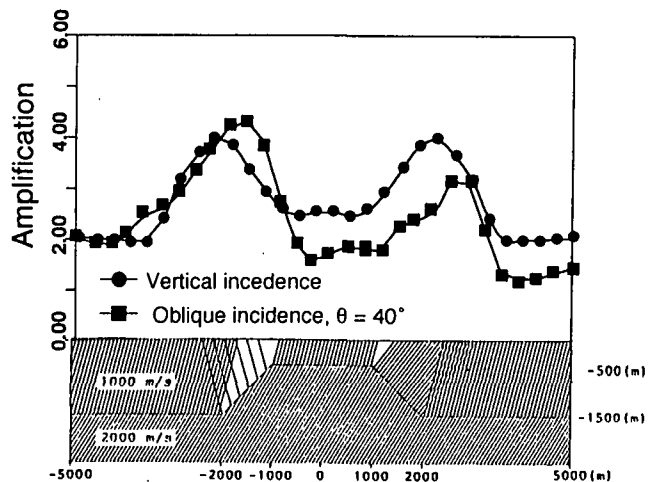
解析モデルとしてホルスト（地壘）構造上にかなり硬い厚い上層が堆積している状態を想定した。入射波の入射角は、上記の地震応答性状の基本的な知見を得るために、まず鉛直入射とし、つぎに兵庫県南部地震の震源域を考慮して鉛直から 40° とした。

図8のシミュレーション結果は地表面の波形（変位）を表す。鉛直入射の場合、基盤面の不整形構造により水平方向に伝播する波が発生する。この影響はホルスト(地壘)の直上の波動場を水平2層構成としたときより短周期化する。応答の増幅度は基盤面の傾斜面の立ち上がりを中心に生じており、水平層の応答に比べて最大2.0倍である。傾斜入射の場合、ホルスト(地壘)の凸基盤面上及び近傍では入射する方向に沿った水平伝播の波がそれに逆らって水平方向に伝播する波より優勢に現われる。その結果、前方に当たる傾斜基盤上の地表面の方は応答値が増大し、そして後方となる傾斜基盤面上の地表面応答は縮小される。

中川らは²⁾ホルスト(地壘)地形に対して波線理論から傾斜基盤面に原因して地表面の特定の箇所地震波が密に集まること、また疎になることをイラスト的に示したが($\theta=40^\circ$)、それらと本解析での時刻歴を対応させてみる。ホルスト(地壘)構造では、入射波の周期 $T_p=1.0$ 秒に対して、波線の集密あるいは過疎が起こる傾斜基盤上の地表面応答が大きく増幅する。その増幅率はホルスト(地壘)の直上の地表面と比べて2~2.5倍となっており、地震波の入射に対して前面となる傾斜基盤面上の地表面の方が背面に位置する基盤面上の値より大きい増幅となっている。



(a) 時刻歴応答



(b) 応答倍率

図8 ホルスト（地壘）地形の
リックカー波に対する応答

3 むずび

本研究では、深層地盤の不整形な形状により、地震波が増幅するメカニズムをコンピュータ・シミュレーションから調べ、地形構造の差による増幅作用の様相を明確にした。ここではSH波の入射波動場を対象としたが、露頭基盤が断層構造のため急激に

堆積層の下に落ち込む地形では、表面波が不整形境界(エッジ部)から発生して、水平方向に伝わる。これと表層内を鉛直方向に伝わる波との鉢合せで地表面の応答が異常に増幅される(バンプ現象)が明瞭に理解できた。このため、応答の増幅は表層内の重複反射に要する位相差を以て複数回起こる状況もある。最も増幅する位置は入射波の周期により場所的に移動するが、傾斜基盤面から水平基盤面へ入った直上のところである。また鉛直の境界面を持つ堆積層においても上の増幅メカニズムは生じている。このことから、神戸の堆積層では著者らの唱えるバンプ現象説が裏付けられる。結論として、バンプ現象による応答の増幅は不整形面の近傍でのみ生じる。それは一波長より深い堆積層では一波長余りの水平距離の場所である。神戸の逆断層モデルからは、入射波の周期が1~2秒のとき断層から1~2波長の距離で増幅率が大きく、断層から遠く離れた場所に比べて約1.7倍となる。

堆積層が一面に表層を覆っているホルスト(地壘)地形の場合も、傾斜基盤面により水平方向に伝播する散乱波が発生し、入射方向の実体波と重なって、特定の場所で応答が増大する。波線理論から波の集中する場所は必ずしも最大応答倍率を示さない。波線法では位相を考慮にいれていないからである。ホルスト(地壘)構造では、入射に対して前面となる傾斜基盤上の地表面で最大となる。

参考文献

- 1) 阪神地域活断層調査委員会報告、朝日新聞記事、1995.10.13
- 2) Nakagawa, k., Shino, k., Inove and Sano, M.: Geolocal characteristics and problems in and around Osaka basin as a basis for assessment of seismic hazards, Special issue of Soil and Foundations, Japan Geotechnical Society, pp.15-28, 1996.1.
- 3) Takemiya, H. and Adam, M.: Why the heaviest damages occurred in Kobe during the Hyogoken Nanbu Earthquake, Japan 1995, The Kobe Earthquake: Geodynamical Aspects, Ed. by C.A. Brebbia, Advances in Earthquake Engineering, Computation Mechanics Publications, Chap. 3, pp.40-58, 1995.
- 4) Takemiya, H. and Adam, M.: Seismic wave amplification due to topography and geology in Kobe during Hyogo-ken Nanbu Earthquake, J. Struc. Mech. and Earthquake Eng. (投稿中)
- 5) 志知、青木 1995年兵庫県南部地震震源の重力異常、月刊地球、号外、No.14, pp.11129-134, 1995.
- 6) 入倉: "震災の帯" をもたらした強震動, 科学, Vol. 66, No. 2, pp. 86-92, 1996. 2
- 7) 林、川瀬: 1995 兵庫県南部地震における神戸中央区の地震動評価、日本建築学会構造系論文集、第 481, pp 37-46, 1996.3.
- 8) 源榮、長野: 神戸市の基盤不整形構造を考慮した地震動の増幅特性に関する解析的検討、土と基礎、Vol. 43, No. 7, pp 15-20, 1995. 7.
- 9) 竹宮・王・藤原: SH波入射に対する不整形地盤の遷移/定常応答性状土木学会論文集, No. 450/1-20, pp161-170, 1992. 7.

SEISMIC WAVE AMPLIFICATION DUE TO DEEP SOIL IRREGULARITY

Hirokazu TAKEMIYA and Yasushi KAWAHIGASHI

Damage concentrations to specific locations in and around Kobe and Osaka area were observed in the Hyogo-ken Nanbu earthquake, 1995. The deep soil condition is pointed out for the clue for seismic wave amplification. The Kobe area has deep soil deposits with abrupt fault dipping while the Osaka area has a spread-out soil covering on irregular base rock formation. In this paper, by applying the BEM to the 2-dimensional modeling of the deep soil deposits, the seismic wave field is investigated with respect to the above unique features for the SH wave incidence and the resulting amplification mechanism of the surface response.