

神戸市東灘区で観測された地震の地震動特性

栗田勝実・山中浩明・松岡昌志*・翠川三郎・瀬尾和大

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 (〒226 横浜市緑区長津田町 4259)

(*現在：財団法人リモートセンシング技術センター)

神戸市東灘区の住吉川流域で地震観測を実施し、その記録をもとに地震動特性の検討をした。六甲アイランドの観測記録には顕著な後続位相が現れ、分散性があることが確認された。次に、観測記録の地震動スペクトルから震源スペクトルと地盤特性を分離した。震源スペクトルは ω^{-2} 則に従っており、地盤特性は周波数2~3Hzで増幅が急激に減少する形状とそうでないものの2種類の形状に分類できた。求められた地盤特性は、震度Ⅶ地域外では一次元重複反射理論でほぼ説明可能であるが、震度Ⅶ地域では不可能であった。これは、地下構造の二次元効果による影響が弱震動記録にも現れていると考えられる。

Key Words : Hyogo-ken Nunbu earthquake, Aftershocks Observation, Later Phases, Source Spectrum, Amplification, Qs in the Sedimentary Layers

1.はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、淡路島北部から阪神地域にかけて大災害をもたらした。この原因を解明するために、地震発生直後から数多くのグループによって余震観測が行われた。例えば松波・他¹⁾は神戸市東灘区を流れる住吉川流域に地震計を展開し、比較的振幅の小さい余震記録から、表層地盤による増幅特性や深い地盤構造を反映した伝播特性等の知見を得た。しかし、この観測は地震発生直後の特殊な状況下であったため、観測点が六甲山地の麓から震度Ⅶの南限付近までで止まっている。ゆえに、それ以南の地域における地震動特性に関しては分かってない等の問題もある。本研究では、新たに被害地域を南北に縦断する地震動のアーレー観測を実施し神戸市東灘区の地震動特性について検討した。

2.観測概要

図1に観測点位置を示す。地震観測は合計9点で実施され、北側3点は松波・他¹⁾により展開された地点と同一であり、南側6点は新たに配置した点である。

一番山側に位置するMTJは、周辺に花崗岩が露出しておりほぼ岩盤とみなせる比較的地盤の良い環境

にある。一方、KNN、UOZおよびYKYは、気象庁によって決められた震度Ⅶに相当する地域である。この周辺は住吉川の氾濫等によって形成された扇状地に位置しており、表層は洪積層によって覆われている。また、KKMは砂・粘土等の沖積層に覆われた地点であり、六甲アイランド内の観測点は全て埋め立て地盤上にある。

観測には加速度強震計および帰還型速度計が用いられた。地震記録は水平動成分をトリガー信号として記録を開始するように設定し、10秒の遅延回路を経てサンプリング周波数100Hzで12~19bitsの記録器に記録された。なお、観測は1995年8月下旬から1996年6月まで実施され、30個以上の記録を得た(図2)。

3.地震波形の特徴

図3に1995/9/12の6:30に発生した地震(震央位置は図2のNo.6, M=3.4, 深さ16km)の速度波形を示す。MTJの波形は比較的単純な形状をしている。ところがUOZ以南から地震動継続時間が長くなり始め、後続位相も見られるようになる。特に六甲アイランドのそれは、S波初動部の振幅とほぼ同程度である。これらの伝播速度はS波初動部に比べてかなり小さな値であり、堆積層端部で励起された表面波ではないかと考えられる。そこで、六甲アイランドの記録

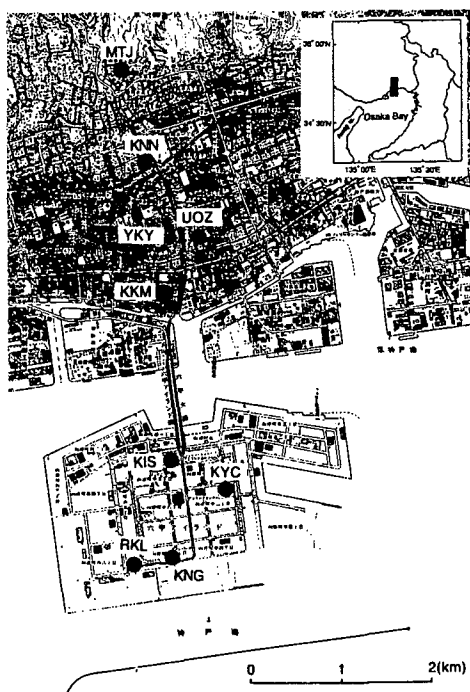


図1 地震観測点配置図

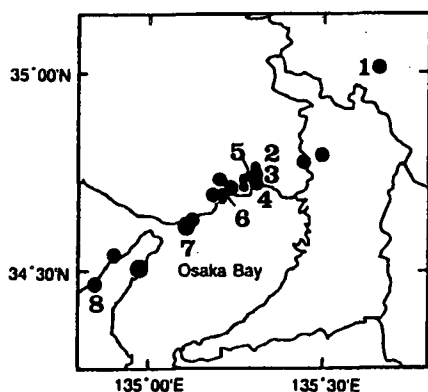


図2 記録された地震の震央位置

に対してマルチフィルター解析を行い分散性についての検討を行った。その結果を図4に示す。各周期毎の包絡線の最大または極大値(図中の●)から周期約0.5~3秒で分散が認められる。このことは後続位相の主成分が表面波によって形成されていることを示している。

そこで、図中の●印の時刻とMTJでのS波初動到達時刻の時間差から表面波が堆積層を伝播した走時を求めた。さらに、MTJとRKLの距離から図5に示すような表面波の群速度を得た。図には上下動成分の結果も示されている。伝播方向を詳しく求めているので、多少の誤差はあるが、正分散している様子がわかる。上下成分は六甲山麓と六甲アイランドの平均的なレーリー波の群速度と解釈出来る。EW成分については地質構造の変化が東西方向には少ないことを考慮すればラブ波である可能性が強いと考

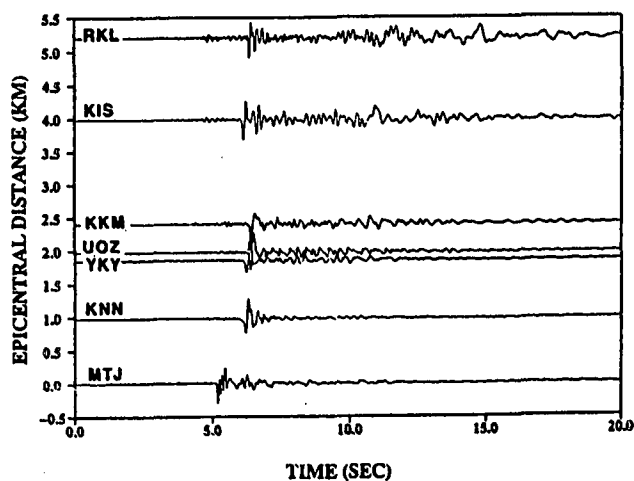


図3 速度波形例 (EW成分 '96/9/12 6:30)

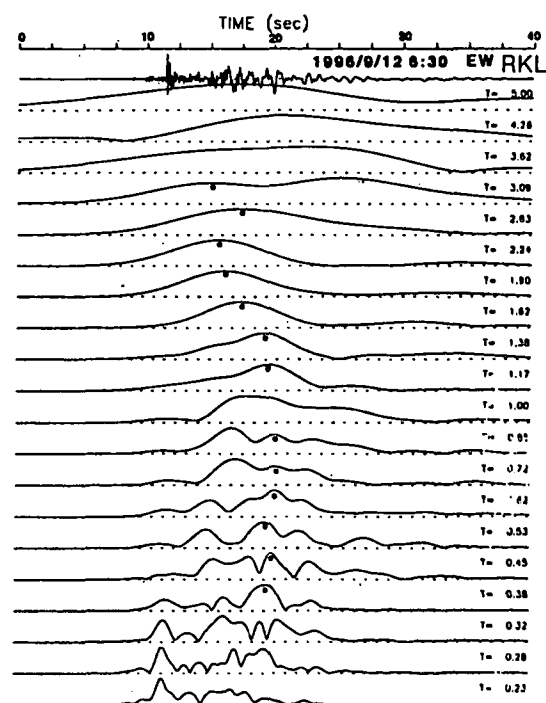


図4 マルチプルフィルター解析結果(RKL)

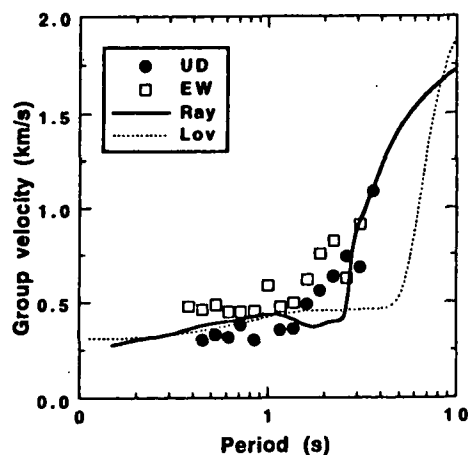


図5 群速度分散曲線

えられる。住吉付近の地盤モデル²⁾に対する基本モードのラブ波とレーリー波の群速度の理論値も図に示されている。観測値との一致の程度はそれほど良くないが、周期2秒以下の群速度が約0.5km/s以下の低速度であることは説明出来る。

4 震源特性と地盤特性の分離

(1) 解析方法

次に、震源および地盤特性の検討を行う。解析方法は、観測された地震動スペクトルから、震源特性、伝播特性および地盤特性を同時に分離する岩田・入倉³⁾の方法を用いた。ただ今回は、震源から観測点近傍までの伝播で受けた減衰を補正した後の地震動スペクトルを用い、震源特性と地盤特性の分離を行った。なお補正に用いた Q_s 値は、関西地震観測協議会によって観測された兵庫県南部地震の余震データから求めた近畿地方の値³⁾を採用した。また、分離の際に与える拘束条件として、ほぼ岩盤上の観測点とみなせるMTJの地盤特性 G を2.0とした。

用いた記録は震源の深さ6~12km、 $M=2.6\sim4.8$ の合計8地震(図2のNo.1~No.8)に対してKNGを除く8観測点で得られた記録である。地震動スペクトルは、水平動2成分のS波主要動部分5秒間のフーリエスペクトルをベクトル合成したものを用いた。

(2) 震源スペクトル

図6に分離された震源スペクトルの一例を示す。変位震源スペクトルはコーナー周波数 f_c を境に周波数 f の2乗で減少しており、ほぼ ω^{-2} モデルと一致している。そこで、これを ω^{-2} モデルに合わせることで、コーナー周波数 f_c と低周波数における変位スペクトル密度を求め、地震モーメント M_0 と応力降下量 $\Delta\sigma$ を推定した。 M_0 と f_c の関係はほぼ $M_0 \propto f_c^{-3}$ となり、自然地震のスケールリング則と調和している。また応力降下量は $\Delta\sigma=0.12\sim2.41\text{bar}$ と求まり兵庫県南部地震の余震データを用いた芝による解析⁴⁾よりやや小さい値になっている。

(3) 地盤特性

求められた地盤特性を図7に示す。その形状は周波数2~3Hzの増幅度に注目すると、六甲アイランド内の観測点で見られる様に急激に減少するものと、六甲アイランド以外で見られる様に3~5倍で推移するものに分類できる。また、後者タイプの地盤特性を観測点毎に見ると、震度Ⅶの地域では大きな値

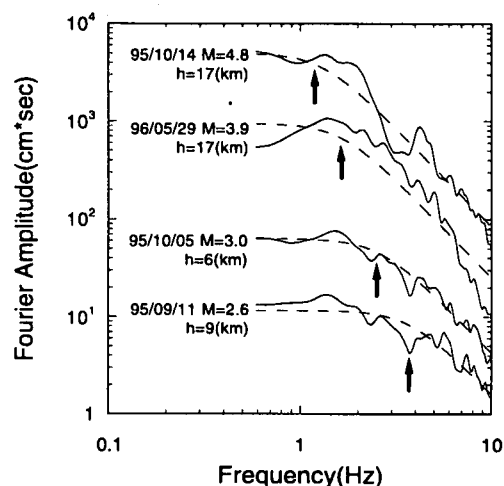


図6 震源スペクトル例。実線は観測値、破線は震源スペクトルを ω^{-2} モデルにfittingさせたもの、矢印はコーナー周波数を示す。

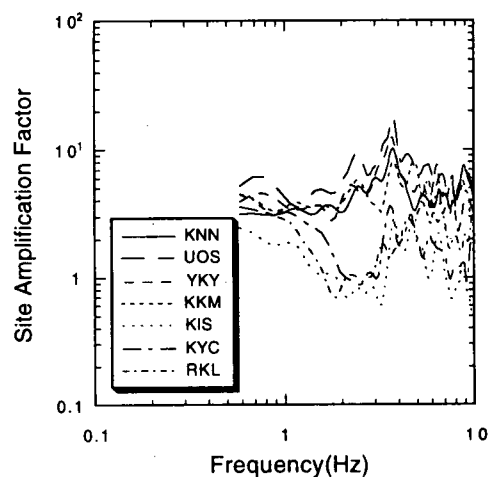


図7 地盤特性

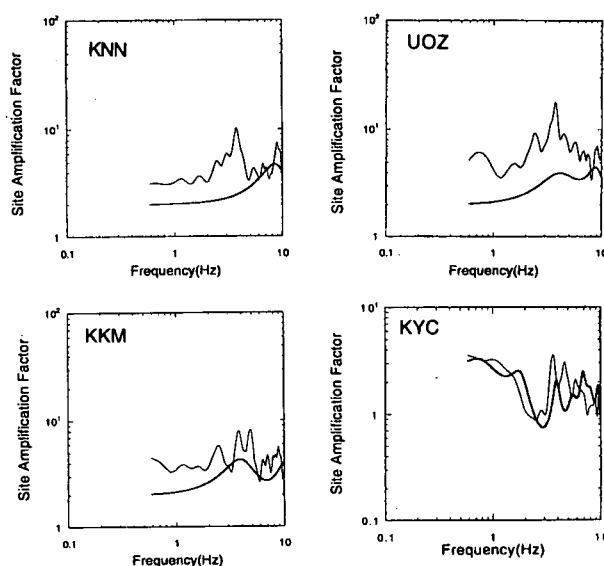


図8 求められた地盤特性(細線)と洪積層($V_s 400\text{m/s}$)を基準として計算された理論値(太線)の比較

を示しており、中でも UOZ が大きい。

次に、既往の研究による地盤構造^{5) 6)}を用い、一次元重複反射理論との比較を行った。図8に洪積層($V_s \sim 400 \text{ m/s}$)を基準とした場合の理論値との比較を示す。KNN、UOZ や KKM では6~7Hz 以上の高周波数帯域においてピーク位置や振幅がほぼ一致しているように見受けられるが、全体的に振幅や形状はかなりの差異がある。一方、KYC は2~3Hz 付近の増幅率の急激な減少がほぼ再現されており良い対応をしており、他の観測点以上に表層地盤の影響を大きく受けていると考えられる。次に、基準を地震基盤($V_s = 2.5 \sim 3 \text{ km/s}$)とした場合の比較を図9に示す。KKM では、洪積層を基準としたそれより形状、振幅共に改善されているが、若干振幅が大きい。これは KYC でも同じである。一方、震度Ⅶの地域に位置する KNN、UOZ でもかなり改善されているが、若干振幅は大きい。これは KYC でも同じである。一方、震度Ⅶの地域に位置する KNN、UOZ でもかなり改善されているが、理論では3~4 Hz 付近のピークが説明出来ない。

この様に一部観測地点を除いて地盤特性がほぼ一次元重複反射理論で説明出来るので、一次元重複反射をモデルとしたインバージョンから地震基盤までの地盤構造とその Q_s を求めた。その際、拘束条件として $Q_s = V_s/15$ を仮定した。図10にKYCの結果を示す。この場合、地盤特性から求まる地盤構造は既往のモデルとほぼ同じものが得られた。KKMでも同様である。しかし、震度Ⅶ地域にある KNN や UOZ では、地盤特性に合わせこむことは可能であるが、得られた地盤構造は既往のモデル等から大きくかけ離れ、かなり厚い層の速度構造の逆転が現れるなど疑問が残る。このことから、余震記録等の記録にも震度Ⅶ地域の地盤特性には地下構造による二次元的な影響^{7) 8)}が入っていると考えられる。また、インバージョンから求められた堆積層全体の平均的な Q_s は、KKM と KYC 共に $Q_s \sim 40$ と求まった。

まとめ

神戸市東灘区住吉川流域に沿って地震観測を実施した。その結果は以下の通りである。

1. 六甲アイランドでは堆積層で生じた周期 0.5~3 秒の表面波が確認された。
2. 震源スペクトルは ω^{-2} 則に従っており、地盤特性の形状は2種類に分類できた。
3. 震度Ⅶ地域外の地盤特性は一次元重複反射理論で

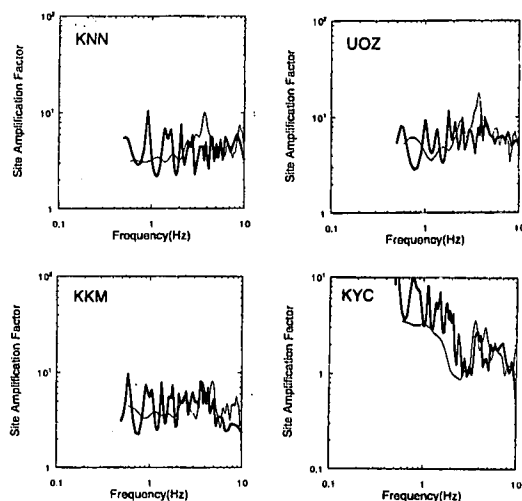


図9 求められた地盤特性(細線)と地震基盤($V_s 2500 \text{ m/s}$ 以上)を基準として計算された理論値(太線)の比較

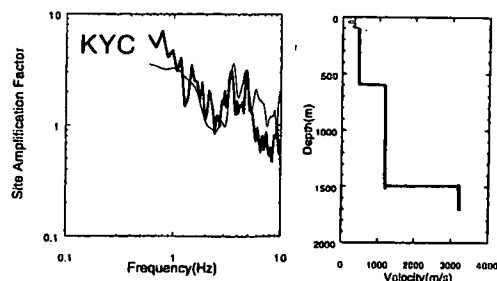


図10 観測値(細線)をもとにインバージョンで合わせた増幅特性(太線)と求められた地下構造構造

ほぼ説明可能であるが、震度Ⅶ地域では不可能であった。これは、地下構造の二次元の影響が弱震動記録にも現れているためと考えられる。

4. 堆積層内の平均的な Q_s 値は $Q_s \sim 40$ と求められた。

謝辞： 観測に御協力いただきました各機関の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 松波・他：平成6年度文部省科学研究費研究成果報告書(代表：藤原悌三)、155-178, 1995.
- 2) 岩田知孝・入倉孝次郎：地震2, 39, 579-593, 1986.
- 3) 田居：平成7年度文部省科学研究費研究成果報告書(代表：入倉孝次郎)、80-97, 1996.
- 4) 芝：平成7年度文部省科学研究費研究成果報告書(代表：入倉孝次郎)、108-115, 1996.
- 5) 岩田・他：平成7年度文部省科学研究費研究成果報告書(代表：藤原悌三)、155-178, 1996.
- 6) 時松・他：日本建築学会構造系論文集, 491, 37-45, 1997.
- 7) 川瀬：地球惑星関連学会1996年合同大会予行集, 52, 1996.
- 8) 源栄・永野：日本建築学会構造系論文集, 488, 39-48, 1996.