

[地震動・地盤]

兵庫県南部地震の震源域における被害分布および基盤地震動に関する解釈

若松 邦夫 江尻 譲嗣
野畑 有秀

概 要

1995年兵庫県南部地震の震源域における地震動の問題として、次の2点を取り上げ検討を行った。一つは、震度Ⅶの地域がやや内陸側に帯状に分布した理由の解明であり、もう一つは表層の増幅や深い地下構造の影響を強く受けた強震記録からその影響を取り除いた基盤地震動特性の把握である。結果は以下のように要約される。長周期微動のH/Vスペクトルから推定される地下構造に基づく地盤増幅率の解析から、震度Ⅶの特徴的な分布の要因は、花崗岩基盤の不整形性による焦点効果と表層の増幅効果が組み合わされた結果であると考えられる。基盤地震動に関しては、1次元波動から求まる工学的解放基盤（S波速度で300～500m/sec程度）における最大加速度は500～800galと推定された。また、地表および基盤の不整形性を考慮したモデルにより、気象台の記録から推定された基盤（S波速度で1500～3000m/sec程度）の最大加速度は250～450gal程度であり、各基盤レベルでの大よその地震動特性が把握された。

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震の震源域における地震動の問題として、次の2点を取り上げ検討を行った。一つは、震度Ⅶの地域がやや内陸側に帯状に分布した理由の解明であり、もう一つは表層の増幅や深い地下構造の影響を強く受けた強震記録からそれらの影響を取り除いた基盤地震動特性の把握である。前者については、微動観測に基づき数箇所において神戸地域の地下構造を推定し、マクロにみた場合の被害分布の特徴について検討した。また、後者については、1次元のみならず地表・基盤の不整形性も取り込んだ2次元構造により地表の強震記録から工学的基盤あるいは基盤における地震動強さを定量的に評価した。震源域の地震動は極めて複雑であり¹⁾、一義的に基盤地震動を特定することは出来ないと思われるが、構造物を設計する立場から大よその特性を把握したものである。

2. 震災の帯に関する解釈

ここでは微動の水平/上下スペクトル比(以後、H/V)から推定される神戸地域の地下構造および被害分布に及ぼす地下構造の影響について示す。

2.1 微動から推定される神戸地域の地下構造

微動観測はFig. 1に示すように、神戸地区の震度Ⅶの地域を中心に、それが途切れた地域を含むA～Eの5箇所

について行い、いずれも六甲山系から海岸へ向かう南北測線を中心に実施した。各地域の測定時期は、Aが95年3月、B～Dが同6月およびEが96年3月であり、気象条件等の外的な要因は恐らくかなり異なっていたものと思われる。観測システムの総合的な周期特性は、0.03秒～10秒程度までほぼフラットである。

データ処理は、全観測記録から40.96秒のデータを重複せずに10組程度取り出し、周波数領域に変換した後加算平均し、H/Vを求めた。

代表的なH/Vとして、A(三宮)ラインの代表点の観測例をFig. 2に示す(観測位置はFig. 3参照)。同図より、各H/Vには大よそ3つのピークが認められる。最も明瞭な長周期側のピークは、山側の3秒からポートアイランドの5.5秒程度まで連続的に伸びているのが分かる。三宮北方における温泉ボーリング(GL-700～800mで花崗岩を

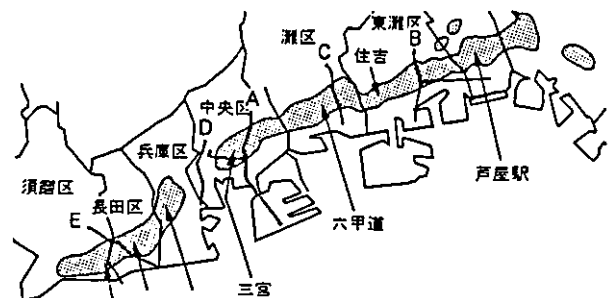


Fig. 1 微動観測位置
Location of Microtremores Observation

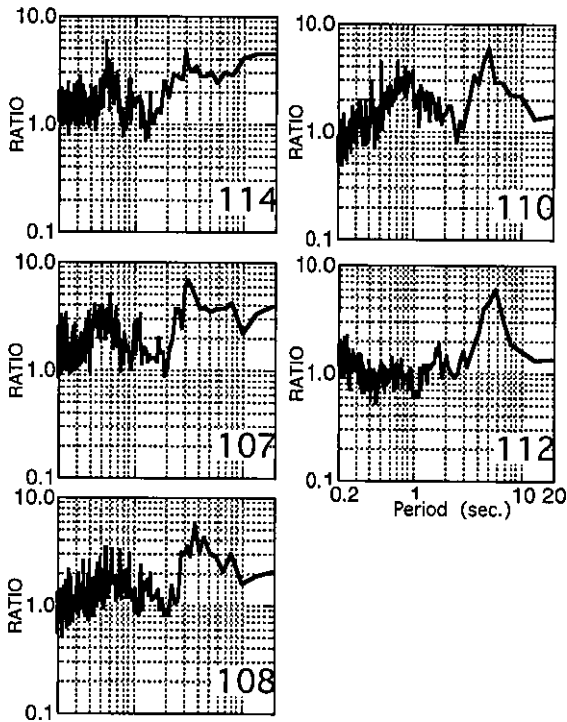


Fig. 2 H/Vの観測例 [A (三宮) ライン]
Examples of the Spectral Ratio of Horizontal to Vertical Component of Microtremores at A-line

確認)や既往の研究にみられるS波速度から推定して花崗岩基盤からの特性を反映したピークであると考えられる。次に大きなピークは、山側の0.5秒付近から海岸沿いの0.8秒程度にみられる短周期側のピークである。これは上部大阪層群中の比較的コントラストの強い境界からの特性を反映したピークと思われる。ただし、このピークはポートアイランド先端部では認められない。理由は不明であるが、埋立て材料やポアソン比の影響も考えられる。もう一つのピークは、山側の1秒程度からポートアイランドの1.8秒付近まで長周期側のピークとほぼ連動するかのように変化するピークである。このピークが何を意味するか現在の情報からでは判断できないが、以下の二つのことが考えられる。一つは、一次周期の約1/3の周期にピークを示すことから全体の2次周期と考えられること、もう一つは下部大阪層群辺りから上位層の特性を反映したピークと推測されることである。いずれにしても系統的に変化することから判断して地盤特性を反映しているものと思われ、今後の検討が必要である。これらのピークの内、最も長周期側のピークに着目して、各地域のピーク周期の変化を描いたのがFig.3である。図中、基盤露頭の位置は地質図から判断した。これらの図より、基盤は六甲山地から急激に落ち込んでいる場合が多く、反射法探査等による結果と整合している。しかしながら震度Ⅶが途切れたD(神戸駅)ラインでは、基盤構造はやや緩やかに変化している。このことが被害分布に影響を及ぼしているか以下に検討する。

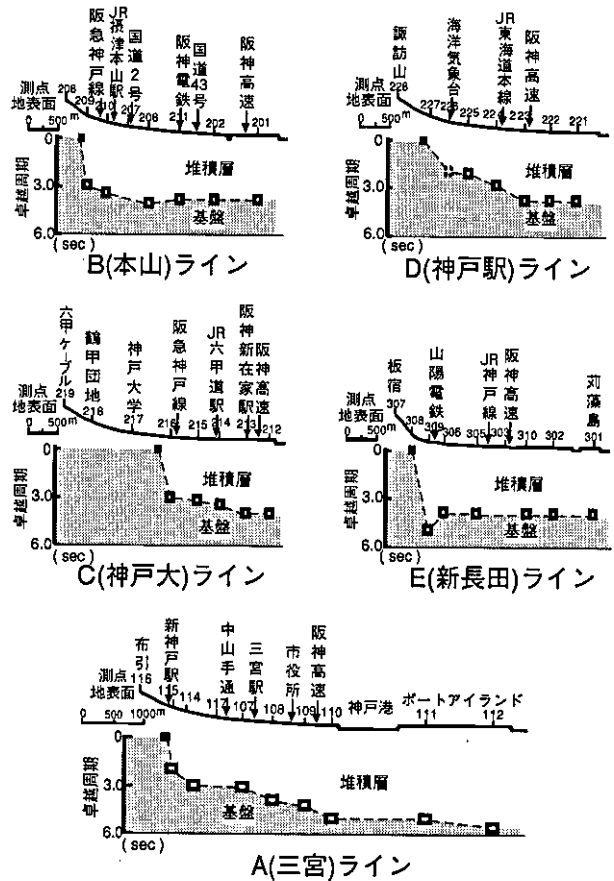


Fig. 3 各観測ラインにおけるH/Vのピーク周期の変化 (最も長周期側のピークによる)
Changing the Peak Period of H/V in Each Observation Line. Peak Period is Due to the Longest Period

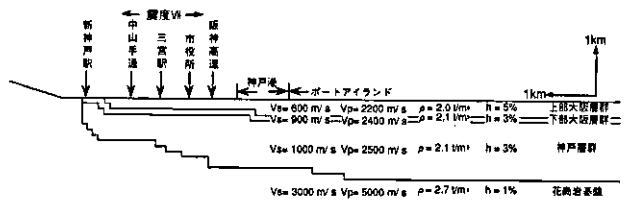


Fig. 4 Aラインの想定地下構造
Assumed Underground Structure of A-line

2.2 震災の帯の発生要因および地震動強さについて

まず、AおよびDラインについて2次元FEMモデルにより検討する。Aラインの地下構造モデルをFig.4に示す。このモデルは、マクロな地震動特性を把握するためのものであり、大阪層群以深をモデル化したものである。層構造は微動、PS検層(ただし、100m以浅)、温泉ボーリングによる花崗岩深度およびS・P波速度に関する既往の研究結果等を参考に想定したものである。Dラインのモデルは割愛するが、ほぼ同様な堆積環境にあるものとして設定した。本震の震源域の記録には、1秒付近に卓越

した波動が認められたため、1秒のsin波1波を鉛直入射させた場合の振幅比をFig.5に示した。同図から、基盤が急激に落ち込むAラインは震度Ⅶの付近で振幅比が増大するのに対して、Dラインではその傾向がやや鈍く、基盤形状の変化が震度分布にある程度の影響を及ぼしていることが推測される。しかしながら、両ラインのレベルの差は極端に異なるものではなく、震度Ⅶが途切れた原因に関しては、震源特性あるいは表層地盤の増幅特性に求めるのが妥当とも思える。

つぎに、種々の周期成分を含む地震動に対する増幅効果について、Aラインを例に取り検討する。震源域の地震動は、若松¹⁾にみられるように断層面の不均質な破壊と観測点との位置関係によって極めて複雑な性状を示すため、地震動強さの推定には、対象ライン近傍における基盤地震動が必要になる。Aラインにおいては、岩盤上ではないが岩露頭位置に比較的近い位置で強震記録(S0222)が得られており、これを基盤地震動として採用した。Fig.5にもみられるように、基盤の近傍においてはその拘束効果により、堆積層上であっても基盤に比較的近い性状をもつ地震動が観測されていると思われるからである。Fig.4のモデルにこの強震記録を入力したときの地表面での最大速度の比をFig.6に示した。同図にみられる震度Ⅶの領域の盛り上がりはFig.5に比べて小さく、海側の地点に比べて平均的に大よそ20%大きな値を示す程度である。しかしながら、実際の観測記録では、検計測線からやや東に位置する葺合の地表記録(EW方向:122.8cm/sec)と液状化の影響が小さいと思われるポートアイランドのGL-83mの記録(NS方向:67.3cm/sec)とでは、観測レベルは異なるが、より大きな差が認められ、基盤の不整形性以外に表層の増幅特性や地盤の非線形性の影響も今回の特徴的な被害分布を引き起こした大きな要因の一つであることが推察される。

以上は、相対的な地震動強さの比較であるが、特定地点の絶対的な地震動強さを評価するには、広域の2次元モデルで計算するのは非現実的であり、今回のような内陸直下型で実体波が優勢な地震においては、サイトの1次元モデルから短周期成分までを含んだ地震動を計算し、

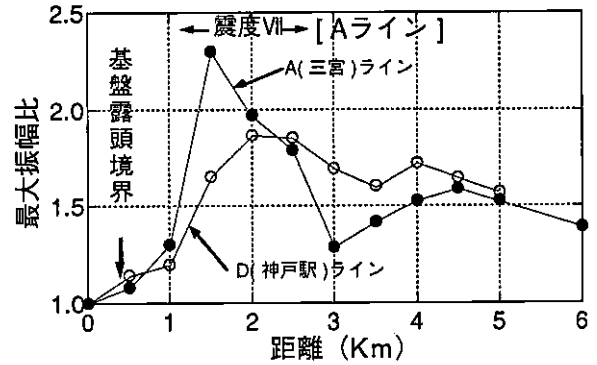


Fig.5 AラインとDラインの増幅特性の比較 (Input:周期1秒のSin波1波) Comparison of Amplification Characteristics Between A-line and D-line. Input Wave is one Sin-wave Having a Period of 1 Second.

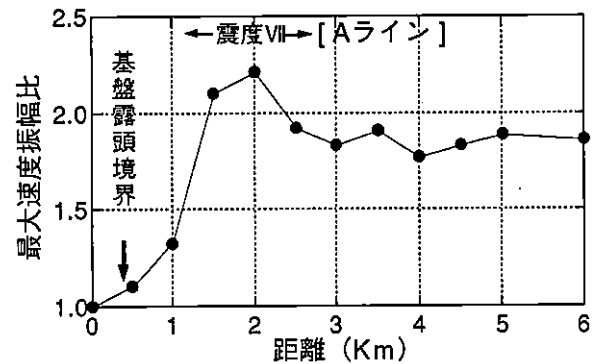


Fig.6 Aラインにおける本震時の推定増幅特性 (Input:S0222 [N33W]) Estimated Amplification Characteristics at the Time of 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake at A-line. Input Wave is the Earthquake Record Obtained from the North Part of A-line.

その結果にマクロにみた不整形性の影響を反映させる方法で地表あるいは建物入力位置の地震動を求めるのが現実的であると思われる。しかしながら、モデルに入力する地震動が記録された位置の地盤物性値や記録に含まれ

Table 1 工学的基盤における最大地動 Peak Ground Motions on Base Layer

観測地点	断層最短距離(km)	主軸方向	主軸方向最大加速度観測値(gal)	工学的基盤深度(GL-m)	工学的基盤S波速度(m/s)	工学的解放基盤最大加速度(gal)	工学的解放基盤最大速度(kine)
JMA神戸	0.3	N28W	838	24	410	668	75
神戸市 ポートアイランド	2.9	N34W	406 (GL-83m)	83	320	611	97
大阪ガス葺合	0.8	N46W	831	3	310	815	125
関電新神戸	0.4	N12E	641	4	450	564	74
関震協本山	2.8	N58W	718	19	350	560	76

る諸々の条件および深層も含めた剛性・減衰のひずみ依存性、減衰の周波数依存性等十分慎重に考慮することが肝要であると思われる。

3. 基盤地震動について

3.1 工学的基盤における地震動特性

今回の地震の工学的基盤における地震動特性を観測記録から明らかにしておくことは将来の内陸型活断層から生じる地震動を評価する上で有益である。ここでは震源近傍の地盤上または地中の5観測点における加速度波形記録を用いて、はぎ取り法によりS波速度が300から500m/sの工学的基盤における加速度波形を推定しその特性を調査した。まず、加速度波形記録の水平2成分を用いて振幅のRMS値が最大となる主軸方向加速度波形を求めた。

つぎに、5観測点近傍のボーリング柱状図^{2),3)}を基に地盤構造ならびに表層地盤の非線形特性を含む地盤特性を適宜選定しモデル化を行い、これを基に周波数依存型一次元重複反射解析によりはぎ取りを行った。ポートアイランド⁴⁾については、地盤が液状化しているため、4点鉛直アレー観測記録を用いた逆解析により同定した地盤特性をはぎ取りに使用した。本山については、香川⁴⁾による計器の振り切れ補正後の速度波形を微分して用いた。

Table 1には5観測点の諸元と工学的基盤の最大地動の一覧を示す。主軸の方向は北東からほぼ北の範囲にあり最大加速度が500から800gal、最大速度は70から120kineであったことが分かる。Fig.7,8には、それぞれ工学的解放基盤における主軸方向波形の絶対加速度応答スペクトルと擬似速度応答スペクトルを示す。5観測点に大略共通して見られるスペクトル中の卓越周期は、加速度で0.2~0.4秒と0.7~1.0秒で、速度でもほぼ同じ周期帯が卓越している。加速度応答振幅は、0.3秒付近で関電新神戸が、また1.0秒付近ではJMA神戸と大阪ガス葺合が2000galを超過している。速度応答振幅は、0.7秒から3.0秒の周期帯でJMA神戸、神戸市ポートアイランド、大阪ガス葺合等が200kineをかなり超過している。屋根の重い木造家屋や5~10階建て程度のビルの固有周期は、ほぼ0.5から1秒の範囲にあるので今回の地震動がこれら構造物にとって極めて厳しいものであったことが分かる。各観測点のスペクトルを細かく見るとスペクトル振幅がピークを有する周期は観測点ごとに微妙に異なっている。この理由としては、5観測点が震源近傍にあるため今回の地震の複雑な震源メカニズムの影響を直接受けていることや各観測点間での数kmのやや深い地盤構造・表層地盤構造・地形等の相異等が考えられる。将来の内陸型活断層の震源近傍の地震動を適切に評価するためには特に震源メカニズムとやや深い地盤構造の地震動への影響を明らかにする必要がある。

3.2 基盤における地震動特性

前節では、工学的基盤の地震動特性について検討を行った。本節では、神戸海洋気象台の記録を基に風化花崗

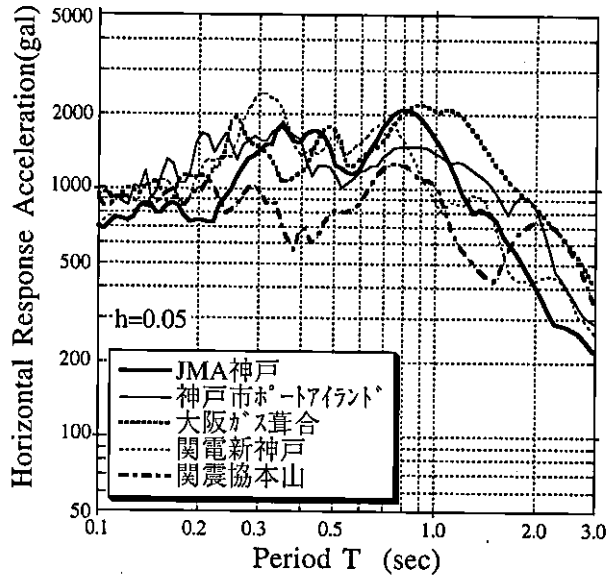


Fig.7 工学的解放基盤の絶対加速度応答スペクトル
Absolute Acceleration Response Spectra on Base Layer

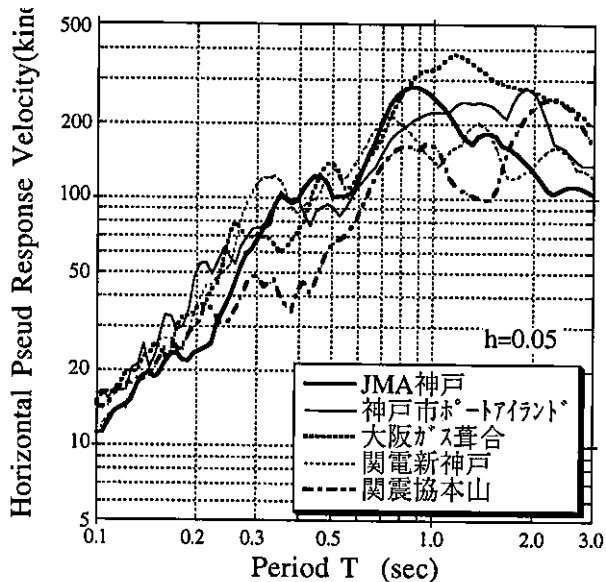


Fig.8 工学的解放基盤の擬似速度応答スペクトル
Pseud Velocity Response Spectra on Base Layer

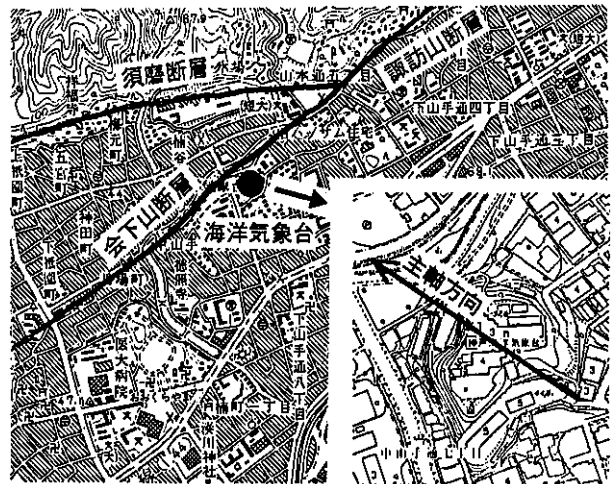


Fig.9 神戸海洋気象台付近の地形図
Topographic Map around Kobe JMA

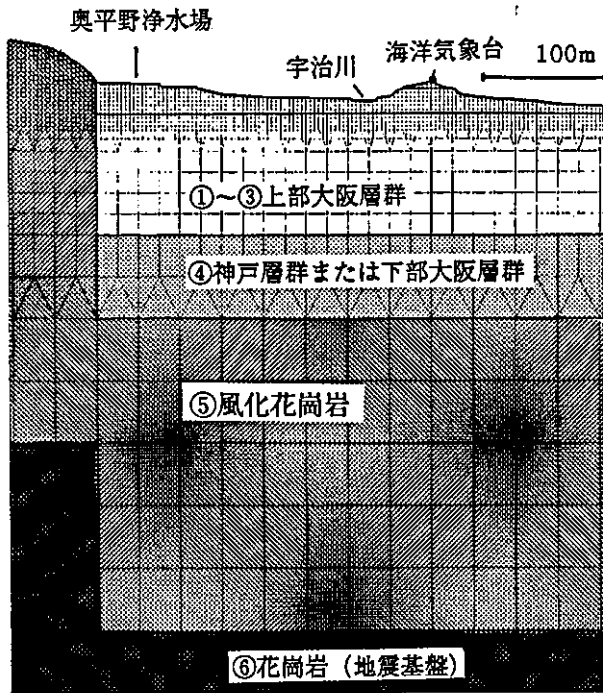


Fig. 10 地形断面図と解析モデル
Section of Topography and Model for Analysis

Table 2 気象台直下想定地盤構造
Estimated Soil Structure at JMA Site

層	層厚 (m)	Vs (m/sec)	Vp (m/sec)	密度 (t/m ³)	hs	hp
①	8	200	700	1.7	0.05	0.05
②	30	400	1000	1.8	0.05	0.05
③	145	600	2200	2.0	0.05	0.05
④	100	1000	2500	2.1	0.03	0.03
⑤	350	1500	2800	2.2	0.03	0.03
⑥	3000	5000		2.7	0.01	0.01

岩上さらには地震基盤上での地震動特性について検討する。Fig.9に海洋気象台の位置および地形図を示す。本気象台周辺の地形の特徴は、北西方向には宇治川沿いに会下山断層が、さらにその背後には須磨断層が存在する。すなわち、地下構造として北西方向に不連続であることが容易に推察される。また気象台回りの詳細図より、本地震観測点が、北北東に長軸を有する楕円形の山地形の頂点に位置していることがわかる。同図には、加速度記録を速度波形に変換し、その振幅のRMS値が最大となる主要動部20秒間の強軸方向を示している。この軸は、会下山断層にほぼ直行方向であり、さらには、山地形の短軸方向と一致している。Fig.10はその軸方向の地形断面図を示している。この山地形効果と、断層地形による地下不整形構造の影響を2次元FEMのSV鉛直入射問題として評価し、基盤地震動の特性についての検討を試みる。モデル化は、岩が露頭している諏訪山の裾野位置より気象台の山地形が

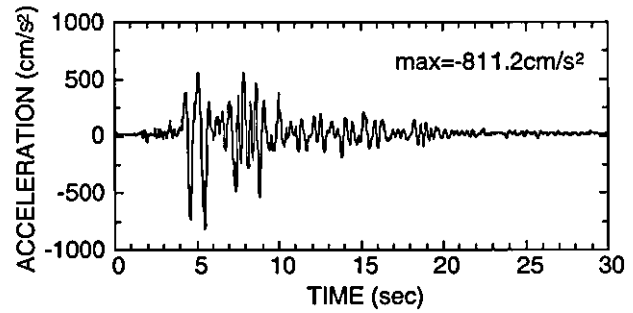
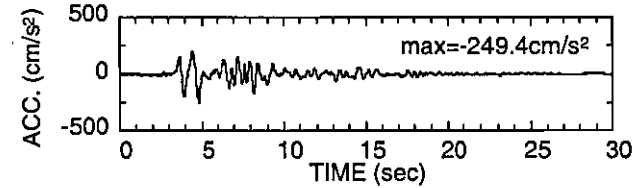
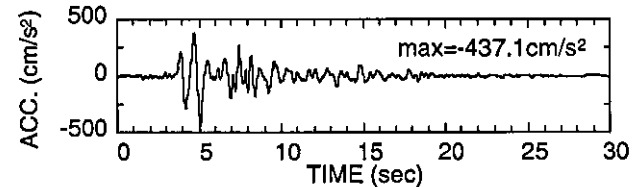


Fig.11 海洋気象台記録波形(主軸)
Accelerogram of Kobe JMA



(a) 地震基盤開放面推定波



(b) 風化花崗岩開放面推定波

Fig.12 推定基盤波形
Estimated Accelerogram on Base Layer

終わる範囲とした。また断面を切った方向は、前述した地震波の主軸方向(N35W)である。モデルをFig.10に示す。またFig.11には海洋気象台で得られた記録を主軸方向に変換した波を示す。速度波の強軸で座標変換したため、最大加速度はNS方向の818cm/sec²に比べ、若干下がっている。

地下構造のモデル化に当たっては、2章で述べた微動結果より地震基盤からの卓越周期が約2秒にあること、その深さが500~1000m程度に存在すること⁴⁾より、その卓越周期を1次元波動論で表現できるように設定した。なお、層構造は前述した温泉ボーリングの地層厚さにはほぼ比例して存在すると仮定している。表層地盤は、近傍のボーリング等を参考^{2),5),7)}に2層モデルに単純化して作成している。海洋気象台直下の推定地盤構造をTable2に示す。

Fig.11に示される気象台観測波の主軸方向の波をモデルの気象台位置の波としてdeconvolutionし、地震基盤開放面上の波を推定したのがFig.12(a)である。最大加速度として811cm/sec²が約250cm/sec²まで下がることがわかる。また、神戸において地表面で一般的に露頭している岩が、風化花崗岩であることに鑑みて、地震基盤面から1次元平行成層(不整形性の無い地盤)の風化花崗岩開放基盤面での加速度波形を推定したのが同図(b)である。風化花崗岩上でも最大加速度約440cm/sec²と前述した工学基盤上の波に比べかなり下がっていることがわかる。Fig.13

には各々の疑似速度応答スペクトル ($h=5\%$) を示す。同図には参考のため神戸大学の記録も併せ示している。神戸大学の観測点は、表層に若干の堆積層は存在するものの風化花崗岩に設置されていることが知られている²⁾。推定した風化花崗岩での基盤波と、神戸大学の記録は、ほぼ同レベルである。このことは、推定した気象台周辺のモデルが1次近似としてはほぼ妥当であることを支持している。ただし、卓越周期が気象台では0.8秒程度であるのに対して、神戸大学では1.2秒と異なっている。この理由は、前述したように震源メカニズムによる影響(サイトと断層の位置)、または地震基盤までに至る深層地下構造の違いによるものと考えられる。

Fig. 15は、本解析で得られた地震基盤上の水平波をSV波として鉛直入射させ、得られた気象台での上下動の推定波を示している。その最大加速度は 115cm/sec^2 と本震記録 332cm/sec^2 に比べ無視できない値であることがわかる。上下動への影響として、P波入射とともにSV波の斜め入射の影響がかなり強いことは良く知られているが、このような地形・地盤不整形による影響も上下動の特性を評価する上では、見逃せない問題である。

4. おわりに

兵庫県南部地震の震源域における特徴的な被害分布の要因および基盤地震動について示した。震源域における震度Ⅶの帯状の分布は、長周期微動のH/Vスペクトルから推定された地下構造に基づく地盤増幅率の解析から、花崗岩基盤の不整形性と表層の影響が組み合わされた結果であると考えられる。基盤地震動に関しては、1次元波動から求める工学的解放基盤(S波速度で $300\sim 500\text{m/sec}$ 程度)における最大加速度は $500\sim 800\text{gal}$ と推定された。また、地表および基盤の不整形性を考慮したモデルにより、気象台の記録から推定された基盤(S波速度で $1500\sim 3000\text{m/sec}$ 程度)の最大加速度は $250\sim 450\text{gal}$ 程度であり、各基盤レベルでの大よその地震動特性が把握された。しかしここで示した基盤地震動の特性は、必ずしも実測された地下構造に基づくものばかりではなく、今後構造が明らかにされた時点で再度検討し、より正確な基盤地震動特性を把握する必要がある。

今回の地震では複雑な震源過程や不整形な地下構造が地震動に大きな影響を及ぼすことが確認された。構造物をより安全に設計するには、建設地点の地震環境および地盤環境を十分に反映した入力地震動を適切に評価することが不可欠である。そのためには、最新の研究成果、評価技術を積極的に実務に取り込むことが必要であり、多くの実施例を積み重ねることにより、さらに合理的な設計用入力地震動の評価が可能になると思われる。

謝辞

本研究では、『気象庁の観測記録』、『関西地震観測研究協議会の観測記録』、『同協議会を通じて公開されている神

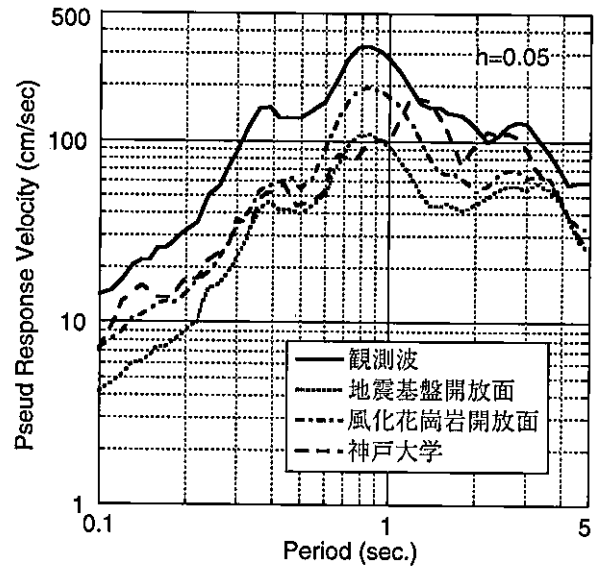


Fig.13 各地層解放基盤面における疑似速度スペクトル
Pseud Velocity Response Spectra on Each Layer

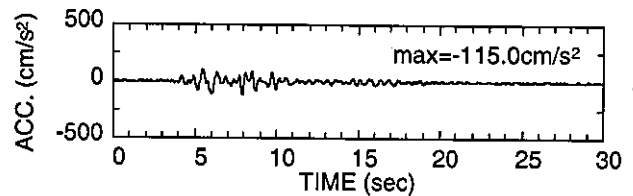


Fig.14 SV鉛直入射で生じる上下動
Vertical Motion Caused by Irregular Structure

戸市、関西電力株式会社、大阪ガス株式会社および株式会社竹中工務店の観測記録』を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 若松：震源域での強震動；第23回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，(1995.10.13)
- 2) 関西地盤：土質工学会関西支部，(1992)
- 3) 松本，小池，沢田：兵庫県南部地震強震動観測地点における基盤地震動特性，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，p.81～84，(1996)
- 4) 香川，入倉，横井：速度サーボ型強震計の飽和特性について兵庫県南部地震における飽和記録復元の試み，日本地震学会講演予稿集，No.2，A91，(1995)
- 5) 石田，野澤，古屋，高井，加藤，丹羽：神戸市街地直下における基盤岩震度分布の推定—やや長周期微動の水平/上下スペクトル比に基づく評価—，日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会WG1,SWG1資料
- 6) 岡本，前田，立石，守屋：兵庫県南部地震の神戸付近の基盤地震動の推定，土木学会第50回年次学術講演会，(1996.9)
- 7) 神戸市企画局総合調査課：神戸の地盤，(1980)