

兵庫県南部地震の強震動と被害の特徴

入 倉 孝次郎

Strong Ground Motions and Damages from the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake

By Kojiro Irikura

Synopsis

The January 17, 1995, Hyogoken-nambu earthquake was damaging to strike Kobe and adjacent cities, bringing a catastrophic disaster, more than 5,500 people dead, about 300,000 injured, and more than 100,000 buildings destroyed. Strong ground motions were recorded including 3 stations (JMA Kobe, Kobe Univ., and Motoyama) very close to the seismic faults. The peak horizontal accelerations and velocities of observed records match well the existing empirical attenuation relations. We find significant amplification of ground motions in severely damaged areas compared with those in slightly damaged areas from the array observation of ground motions in Higashinada ward, Kobe city.

1. はじめに

東京・横浜, 名古屋, 京都・大阪・神戸など日本の主要都市は活断層に囲まれた地域に発達しており, いつ地震が近くに起こっても不思議ではない地震危険度の高いところにある。実際にどの都市も有史以来多くの地震で大きな被害を経験している。近畿地域を例にとると, 主な活断層だけでも Fig. 1に示されるように数多くあり私達はまさに活断層と共に生きていることがわかる。歴史的にも多くの大地震が引き起こされ, たとえば豊臣秀吉の居城である伏見城が大被害を受けたことでも有名な1596年の慶長地震(伏見桃山地震)など, 京都, 大阪, 神戸地域はたびたび大きな震災を経験している。このような内陸の地震活動は南海沖の巨大地震の活動に連動していることが知られている¹⁾。巨大地震発生後数年の余効活動の後静穏期に入るが, 次の大地震が近付くと内陸部の近畿一円で再び活動が活発化し, これまでにも大きなものでマグニチュード 7クラスの地震が起こっている。従って兵庫県南部地震は特異な性格を持つ地震ではなく, 起こり得る可能性の高い地震の1つと考えておくべきものであった。

近年幸いにも都市を直撃する大地震を起さなかったため, 高度に発達した近代都市が地震に果たして強いのかどうか日本では未だ試されていなかった。アメリカのカリフォルニアでは, 昨年1月17日に大都市ロサンゼルス市から約30km北西に離れたノースリッジという住宅地の直下にマグニチュード 6.7の地震が起き, 高速道路の倒壊, スーパーマーケットなど中層建物の崩壊, ガス管の破裂による火災の発生などの大被害をうけた。この時, 日本も同様の危険性があると考えられることから, 建築・土木関係者のみならず, 国・地方レベルの行政の防災担当者など数多くの調査団が現地に派遣され, 種々の角度から日本の構造物や防災システムとの比較がなされた。残念ながらその時点では日本においても緊急の地震防災対策をすべきで

あるというような結論にならず、丁度一年後の1995年1月17日阪神・淡路大震災を受けることになった。

これまでも地震防災の重要性は繰り返し指摘されてきたが、多くは地震予知の重要性とそのための観測体制の充実が強調されてきた。兵庫県南部地震は予知のみに頼る地震防災対策では大震災は防ぐことはできないことを教えている。地震災害軽減のためには地震動がどのように生成、伝播し、さらに増幅され、構造物に破壊的打撃を与えたかを知る必要がある。死者5500人以上、負傷者2万7000人以上、損壊家屋10万棟以上という大災害がどうして起きたのか。ここでは兵庫県南部地震の強震動とその被害の特徴を検討し、このような大災害を繰り返さないための方策を考えてみたい。

2. どの断層が動いたのか —余震分布からみた活断層の動き—

気象庁によると、この地震はマグニチュード7.2で、明石海峡付近深さ20kmに発生した。しかしながら被害はその震央付近ではなく淡路島の北淡町から神戸、芦屋、西宮市にいたる広い範囲に広がっている。これは震源が単に点ではなく広がりのある領域であること意味している。余震は一般に本震の震源域およびその延長域に沿って発生する。従って本震の時どの断層が動いたかは余震分布から知ることができる。余震の3次元的分布、平面図と断面図、がFig. 2に示される²⁾。平面図から余震がほぼ北東—南西方向に直線上に分布していることがわかる。この方向は既にこれまで知られていた六甲断層系に沿っている。断面図は断層系に平行する面とそれに直交する面に余震分布を投影したもので、図から、震源域は深さ数kmから約20kmにわたるほぼ垂直な面であると推定される。一方で被害の集中した震度7の領域と余震分布の関係は気象庁によるとFig. 3のようになる³⁾。余震は既存の活断層に沿って広がっているが、震度7の領域は断層域よりやや南に離れている。このことは地震の被害は必ずしも震源直上に起こるのではなく、地盤条件などで地震動が大きくなった地域に集中することを意味している。この余震域のどの領域が本震のときに動いたのか余震分布だけでは知ることはできず震源近傍での強震動記録の解析が重要となる。

3. 強震動はどこで生成されたのか

本震の時の断層破壊過程の詳細は、強震動記録を用いて波形逆解法 (waveform inversion) により推定される。震源となった断層面は、余震分布およびGPSや水準測量による地震前後の地殻の水平および垂直の動きなどを参考にして、ここではFig. 4に示されるような2つの面からなると仮定される。淡路側の面はストライク N45° E、面積18x15km²、一方神戸側はストライク N50° E、面積30x15km²で、傾きはともに90°としている。それぞれの断層面はグリッド化 (Fig. 4下図の例では17x6個のグリッド) して表され、各グリッドでの地震モーメントの解放量のストライク成分、ディップ成分および各グリッド毎の時間窓 (ここでは10個に区切る) の重みが逆問題として求めるモデル・パラメータとなる。与えられるデータは各観測点の変位波形である。逆問題を解くことによって求められた断層面内でのモーメント解放量 (ベクトル表現) の分布がFig. 5に示される。主要な破壊は発震点 (図の白丸) 付近、淡路側の浅いところ、および神戸側 (図で発震点

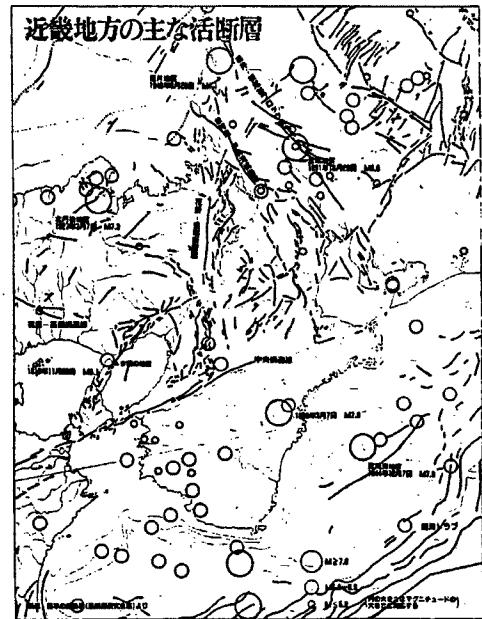


Fig. 1 Active faults and the epicenters of historical earthquakes in the Kinki region. (After "ASAHI GRAPH: KANSAI-DAI-JISHIN")

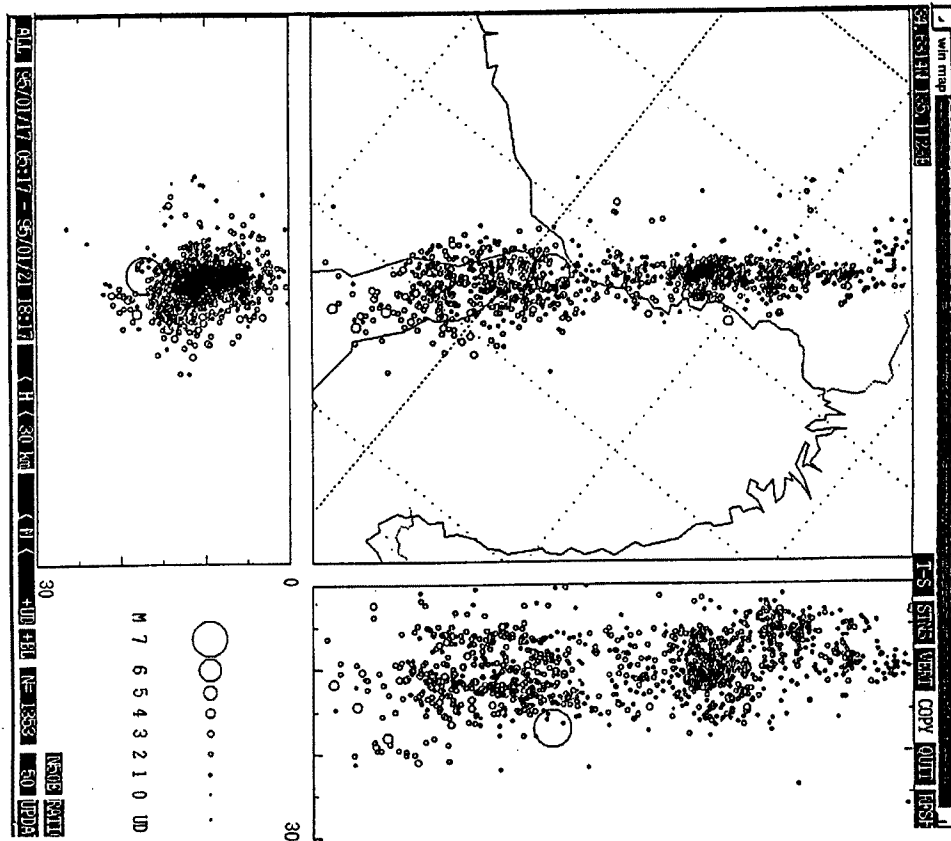


Fig. 2 Map view (left upper) and cross sections parallel (right upper) and perpendicular (left lower) to the strike direction, N50E, of the earthquake fault. The largest open-circle indicates the hypocenter of the mainshock.

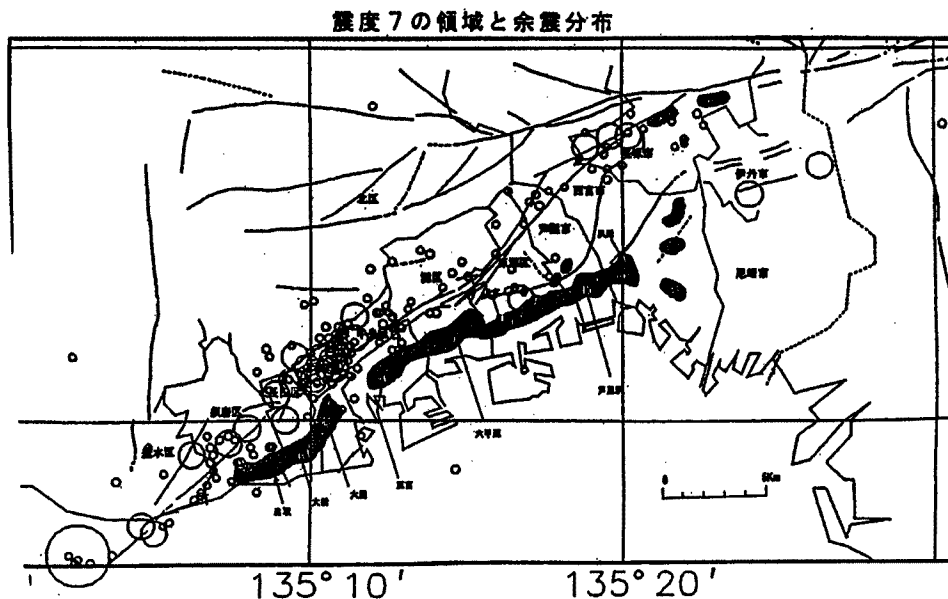


Fig. 3 Location of zone of the JMA intensity 7 (the maximum intensity) in the Kobe area, and its relationship to the location of active faults and the aftershock distribution. (After Department of Earthquake and Volcano, Japan Meteorological Agency) .

から16~26km付近)のやや深いところ(深さ約15km)の3つの領域で生じている。最も大きなモーメント解放は淡路側の浅いところで、これは野島断層での地表の右横ずれに対応している。

上記の波形インバージョンでは数秒よりも長周期の変位記録を用いている。地震時の被害に直接的に影響するのはより短周期の地震動である。断層面のどこで短周期の地震動が生成されたかを知るには上記の波形インバージョンでは地下構造推定の信頼性や理論計算の精度から困難である。そこで私達は震源近傍で得られる加速度波形の包絡波形を用いた震源インバージョン、包絡波形逆解法(envelope inversion),を開発した。

この方法は、本震の震源域内で生じた余震を経験的グリーン関数としてIrikura (1986)⁴⁾に従って重ね合わせることで本震の波形を合成し、合成波形と観測波形の包絡形状の差が最小になるように断層面の地震動の放射強度を求めるものである。得られた結果はFig. 6に示される。強震動を構成する短周期地震動の生成域はストライク方向約45km、深さ方向1~19kmの範囲となっている。主な短周期生成域は発震点から淡路側の浅いところにかけた領域に加えて神戸側の浅いところにもある。この神戸直下の浅いところで短周期の地震動の生成が阪神地域の大被害の源となったと考えられる。

Aftershock Distribution

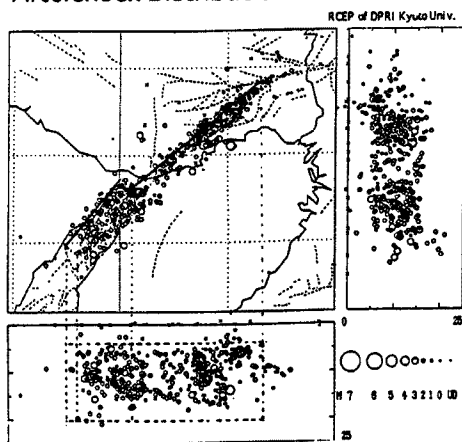


Fig. 4 Fault plane model used for the source inversion analysis. The fault consists of two segments having strikes of N45° E and N50° E, and along-strike fault lengths of 18km and 36km, respectively. The dip of both segments is 90°. The depth to the top of the assumed fault is 4.2km and the bottom fault depth is 20.2km.

-18.00 15.00 12.00 9.00 6.00 3.00 0 3.00 6.00 9.00 12.00 15.00 18.00 21.00 24.00 27.00 30.00 33.00 36.00

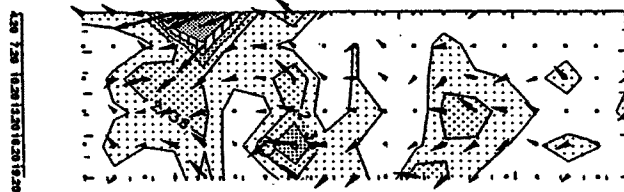


Fig 5 Cross section of the slip distribution in the fault plane. The two segments are connected in the figure. The left 18km fault length is for the Awaji segment and the rest (right 36 km length) is for the Kobe segment. Arrows indicate slip vector directions and relative amplitudes for each subfault.

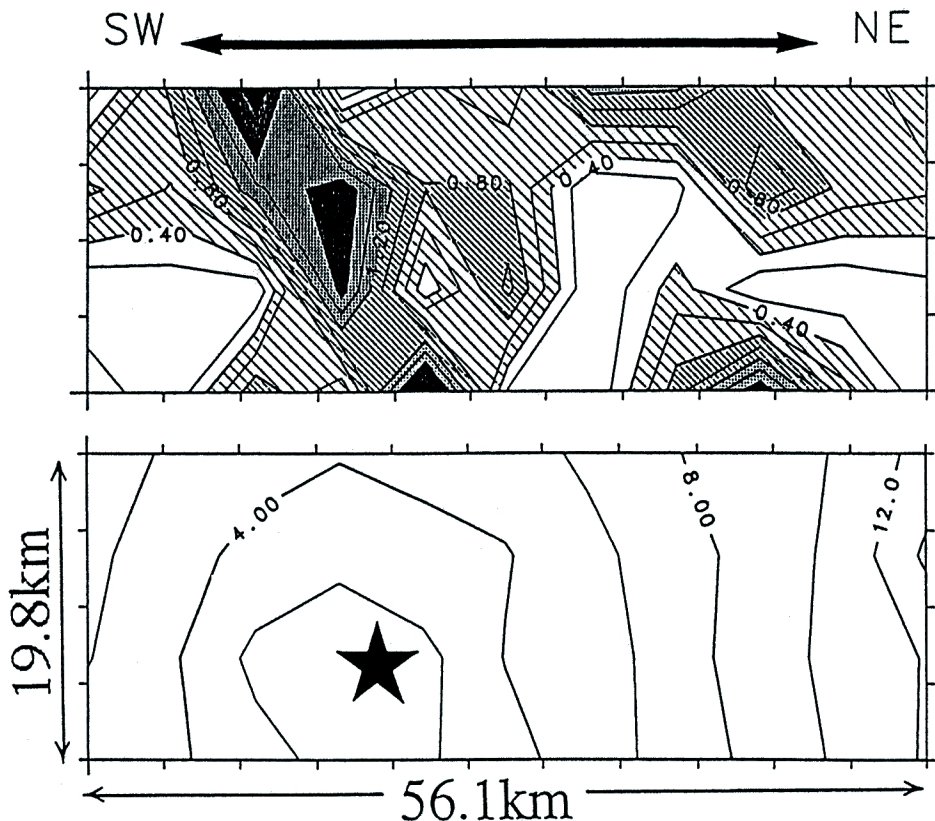
4. 異常に大きな強震動が生成されたのか：

この地震による強震動がこれまでの同様の規模の地震に比べて異常に大きなものであったのかどうかを調べるために、最大加速度や最大速度の距離減衰関係について吟味する。

本震時に観測された各地の最大加速度と最大速度が本震の断層域からの距離の関数としてFig. 7に示される(図中口印)。この地震のマグニチュードは、気象庁によるもの(M_{JMA})が7.2、モーメント・マグニチュード(M_w)は6.9、表面波マグニチュード(M_s)が6.8と求められている。マグニチュードの決定自体にも0.2程度の誤差は含まれるので、ここでは $M_w=7.0$ に対する経験式と比較を行っている。最大加速度についてはFukushima and Tanaka (1991)⁵⁾による最大加速度の距離減衰式との比較がなされ、最大速度については福島(1994)⁶⁾による式との比較がなされる。震源近傍域の20km以内で観測された最大加速度は経験式の標準偏差の範囲にほぼ含まれる。最大速度も種々の異なる地盤条件の経験式の範囲に入っている。 $M_w=6.9$ に対する経験式と比較しても結果は殆ど変わらない。これらの関係からはこの地震による揺れは特に大きいものではなくこれまでの経験的關係から予測可能な範囲に入ることがわかる。

5. 震度7の帯はどうしてできたのか：

本震時の断層破壊域は余震分布からこれまでの調査によりすでに活断層として知られていた帯状域に一致することはすでに述べた通りであるが、顕著な被害の集中は断層帯ではなく、断層から1~2km南側に巾1~1.5km程度の細長い帯状の地域で既存断層に並行して拡がっているように見える。このような被害の集中



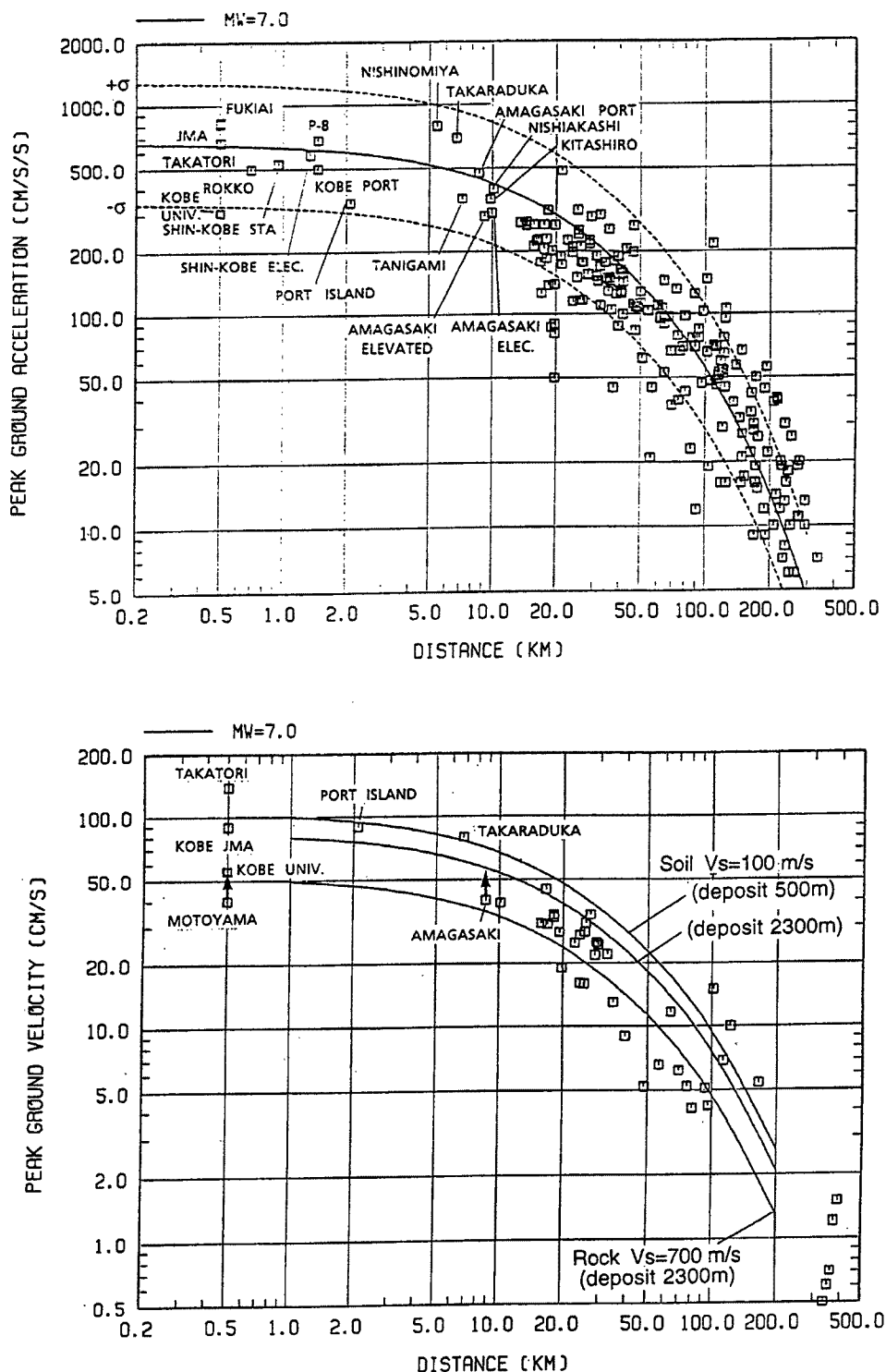


Fig 7 Attenuation relation for peak horizontal accelerations and velocities from the 1995 Hyogoken-nambu earthquake. Squares : observed peak amplitudes. Solid and broken lines in the upper panel are the attenuation relations for acceleration and the error of estimation based on standard deviation($\sigma=0.21$) by Fukushima and Tanaka(1992). The attenuation relations for velocity in the lower panel are estimated by Fukushima(1994) classified soil and rock sites.

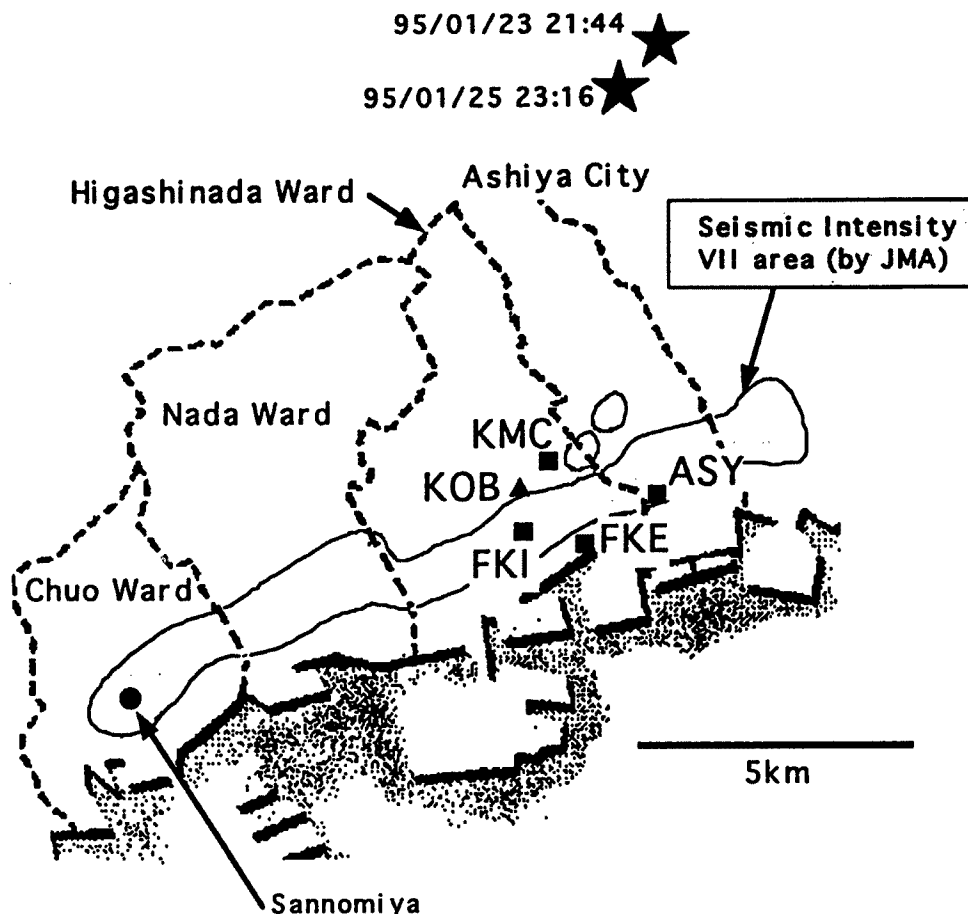


Fig 8 Location of array observation stations in Higashinada Ward, Kobe city. Gray zones were severely damaged. Solid triangle indicates strong observation station and solid square does temporal station for aftershock observation.

がなぜ生じたのかを解明するため、私達は本震直後から東灘区付近で断層に近い丘陵部から被害集中地域を横断する南北方向のアレー状の強震動観測 (Fig. 8) を行った。このネットからみて震央が北側約7~8kmにあるM4.7とM4.3の地震 (図中, ★は震央位置) による地震動の空間的变化がFig. 9に示される。両余震とも断層域の北側の岩盤地域 (KMC) および南側でも岩盤の極近傍域 (KOB) では地震動は相対的に小さく、さらに南側の被害集中域 (FKI) では地震動が大きく増巾されることがわかる。種々の到来方向の余震にたいして岩盤の観測点 (KMC) に対する地盤上の観測点 (KOB,FKI,ASY,FKE) の地震動のスペクトル比が Fig. 10に示される。これらの地震動スペクトル比は表層地盤構造による地震動の増幅特性に相当するものである。ここでのスペクトル比の振幅は大きくばらついて見える。これは地震の到来方向に依存しており、表層地盤の2次元的な変化に対応している。スペクトル比のピークの周波数、すなわち卓越周期、はどの方向からの地震に対してもほぼ同じ周波数 0.5秒となり、比較的安定している。この地震動の卓越周期は木造住宅や中低層の鉄筋コンクリート建物のそれに一致しているのが被害集中の一因と考えられる。

この付近の被害集中域を横断する方向 (北北西-南南東) での地下構造の変化を明らかにするため反射法探査がFig. 11に示される2つの測線で作された (関西地震観測研究協議会)。得られた反射波断面がFig. 12①, ②に示される。基盤が典型的な逆断層の形状を有しており南側 (図の右側) では急激に深くなっていることがわかる。これらの反射波断面を参考にしてこの付近の地下構造をFig. 13のようにモデル化し地

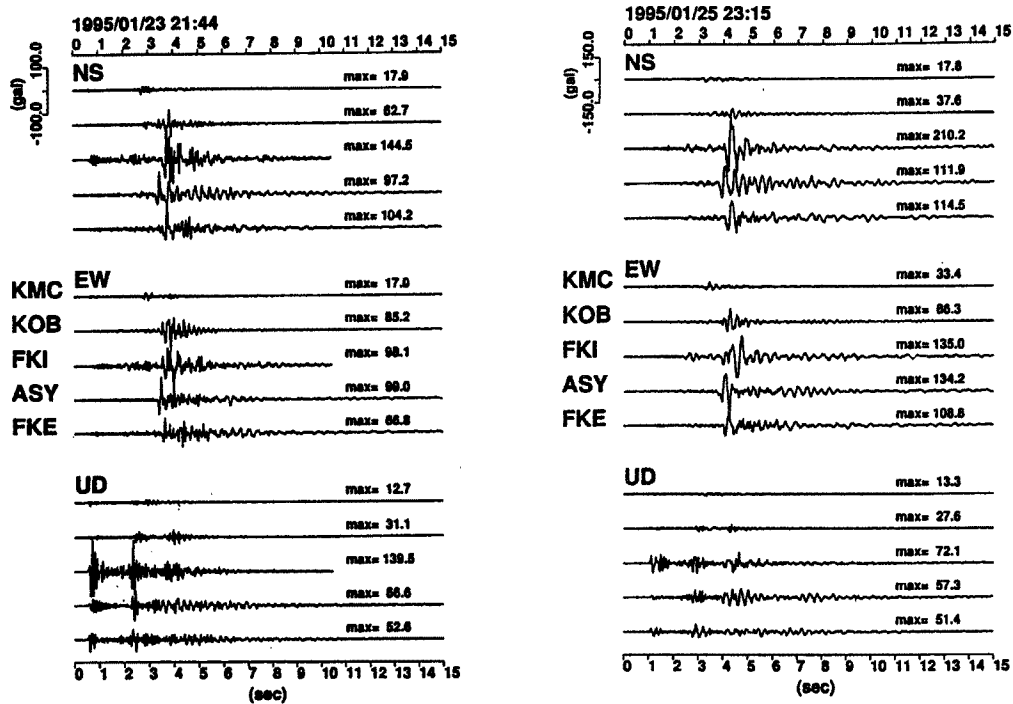


Fig. 9 Observed ground accelerations at array stations from the M 4.7 aftershock whose epicenter is indicated by a star mark in Fig.8.

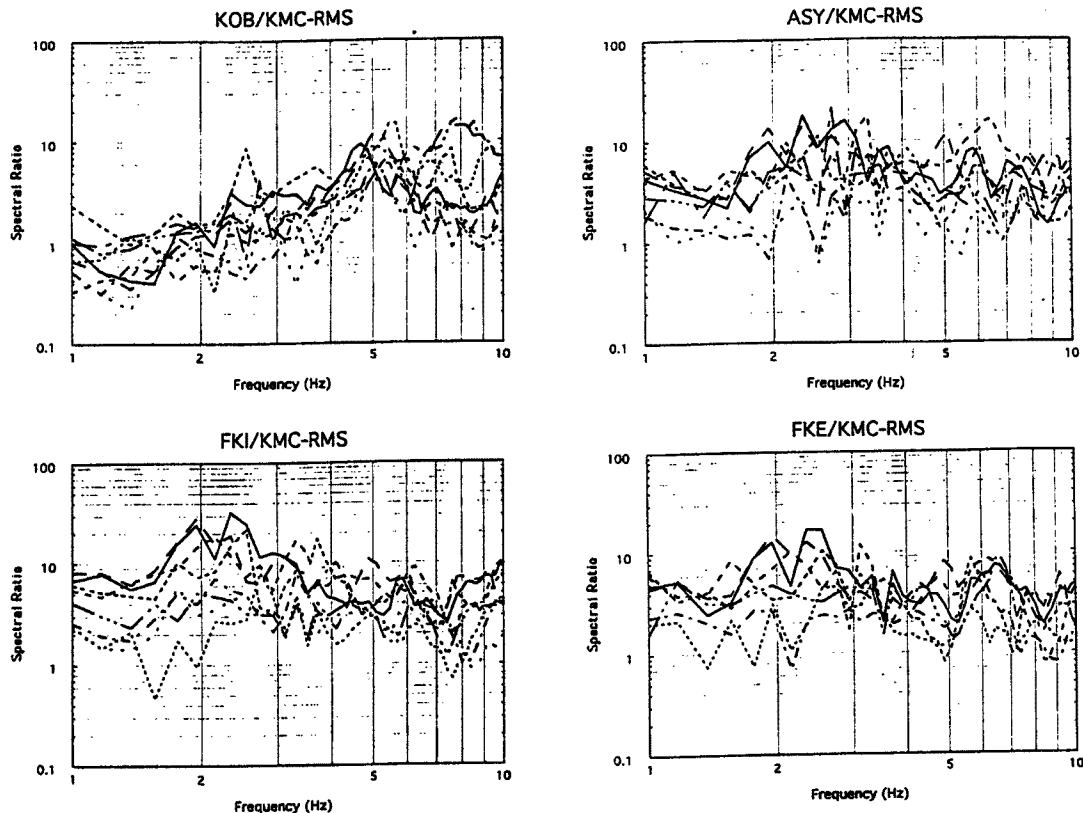


Fig 10 S-wave amplitude spectral ratios of the vectorial summation of the two horizontal components of soil sites (KOB, FKI, FKE, ASY) to rock site (KMC) .

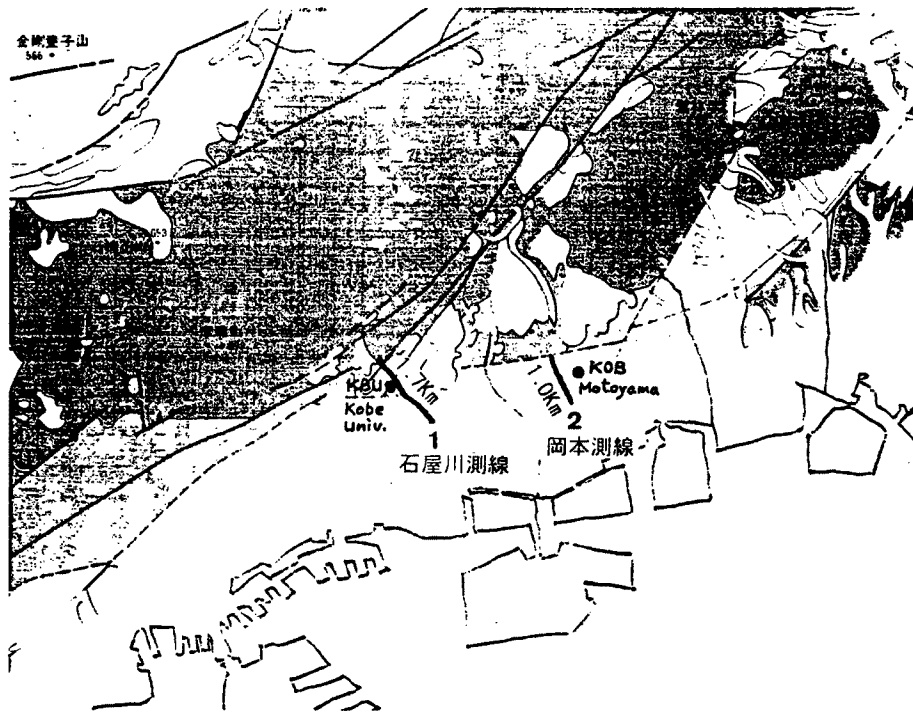


Fig. 11 Map showing surface geology in Kobe and locations of 2 lines for seismic profiling, 1: Ishiyagawa line and 2: Okamoto line, shown by solid line. Dark and light colors indicate rock and sediments, respectively.

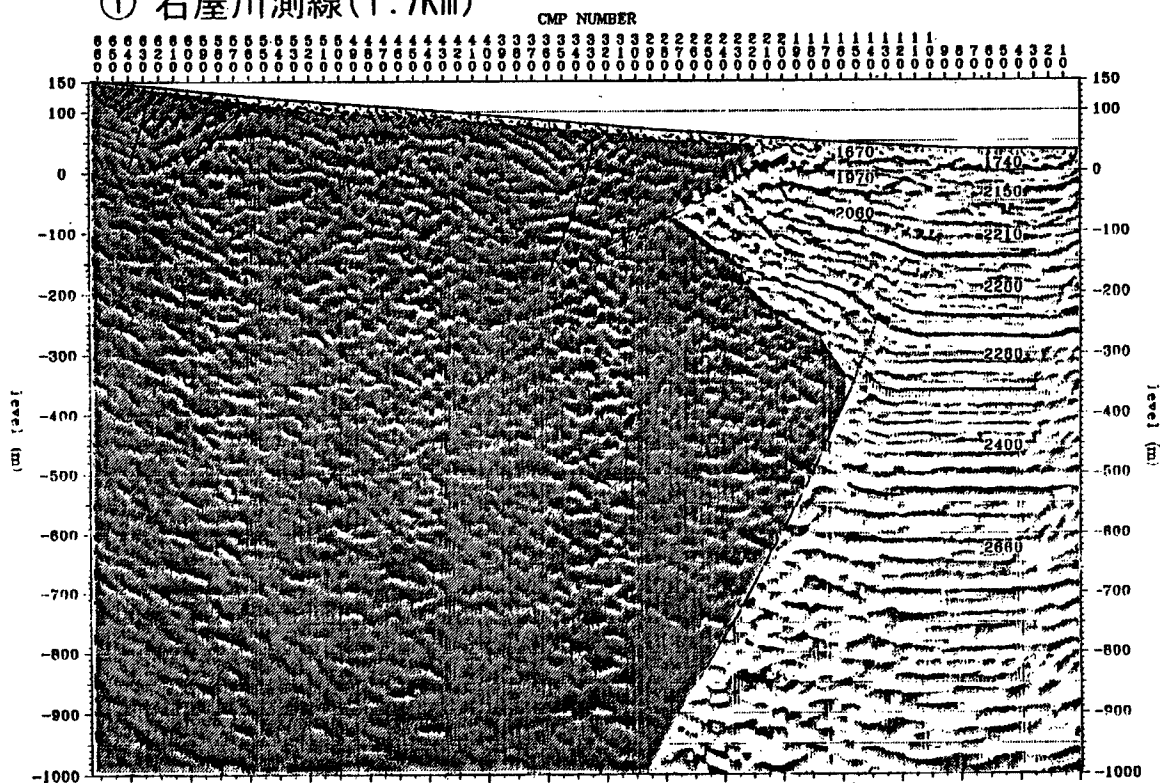
震動の数値シミュレーション（2.5次元の差分法）を試みてみた。このような地盤構造地域に地震波が入射した場合の合成された地震動の水平変化がFig. 14に示される。ここでは基盤側のKMCから北方約7km深さ15kmにある横ずれ地震（1995年1月25日のM4.7地震に対応）を想定している。基盤が急激に深くなる地域で地震動のフォーカシングのような現象により地震動振幅が大きく増幅されている。Fig. 15に示されるように合成波形の形状は観測波形によく一致するが、震災の帯の中にあるFKIやFKEでは振巾は若干過小評価となっている。さらに表面付近にS波速度100m/s程度の軟らかい層を10m程度考えると振巾も一致する合成波形が得られる。

従って震度7の帯は基盤の形状と軟らかい表層地盤の両方を考慮した地震動の増巾効果により形成されたと考えられる。より南側の沖積層の厚い地域でなぜ被害がむしろ縮小しているように見えるかは次に述べる軟弱地盤の非線形性を考える必要がある。

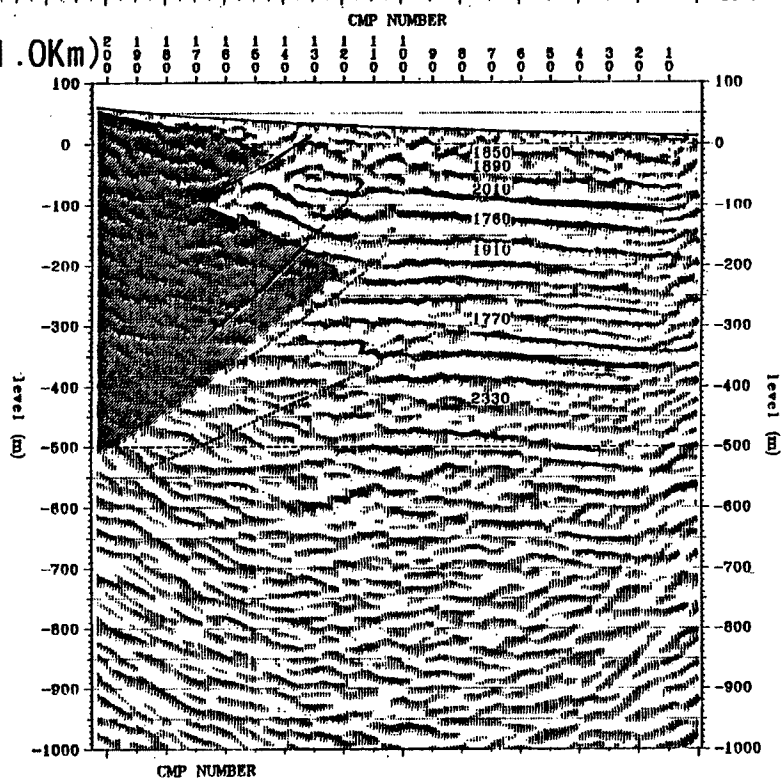
6. 軟弱地盤ではなぜ強震動による被害が小さかったのか：

今回の地震の被害の集中域は、沖積層があまり厚くない比較的地盤のよいとされてきたところである。海岸近くの埋立地盤や沖積層の厚い地域でむしろ構造物の倒壊は少なかった。この問題を考えるための貴重な記録が神戸市開発局によってポートアイランドで得られている。ここでは深さ83m, 32m, 16mの3つのボーリング孔および地表からなる鉛直アレー観測網（Fig. 16）で本震および余震の地震動が記録された。ポートアイランドは海を埋め立て人工的に作られた島で、ボーリング資料によると地表面近くは埋立土砂（約19m）、その下に粘土や砂からなる沖積層（深さ約37mまで）、さらに砂礫の洪積層と続く地盤構造となっている。地震動は一般に地表面近くの軟らかい表層で増幅されるが、ここでの本震の記録を見るとFig. 17に示されるように地表面近くの水平成分の地震動が地中よりも逆に小さくなっている。上下成分は地中

① 石屋川測線 (1.7Km)



② 岡本測線 (1.0Km)



 : 基盤岩と推定される範囲
 図中の数字 : 推定P波速度

Fig. 12 Seismic profiles at the Ishiyagawa and Okamoto lines. Dark color shows rock.

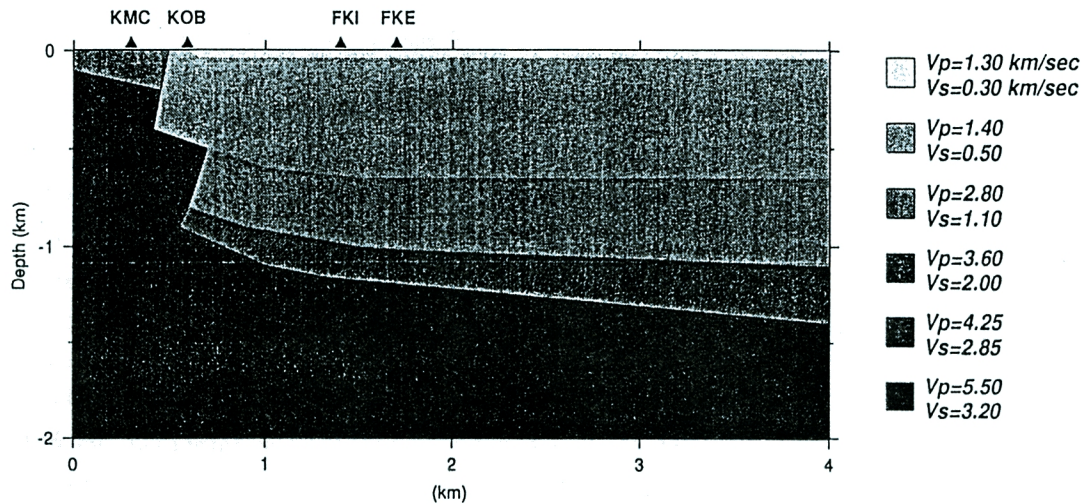


Fig. 13 Velocity structure model based on the seismic profile at the Okamoto line.

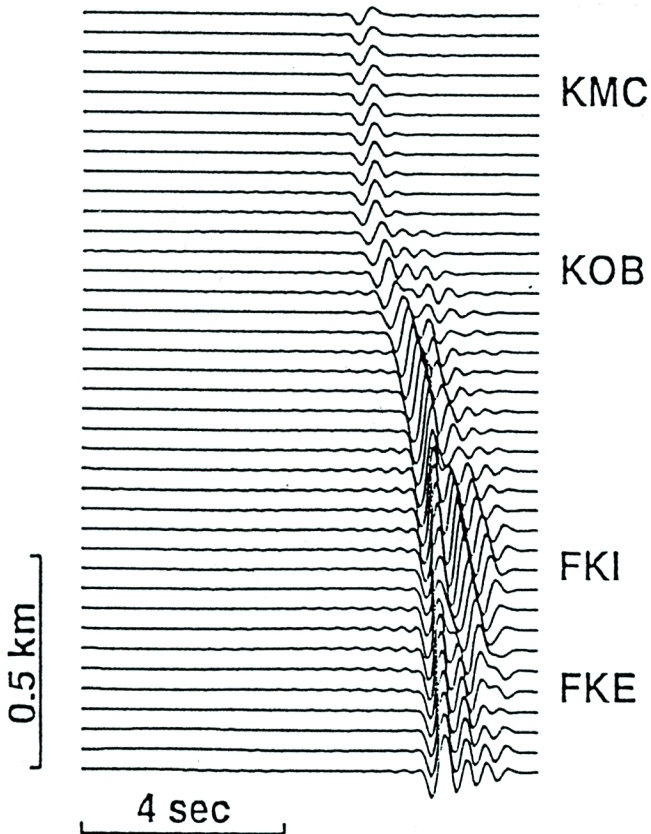


Fig. 14 Synthetic SH velocity seismograms calculated at stations on free surface underlain by Model shown in Fig.13. The source assumed here corresponds to the M 4.7 event(21:44, 23 Jan.,1995)with right lateral, located at a horizontal distance of 7km north (left)of KMC and a depth of 14km. The calculation was done by the 2.5-D finite difference method.

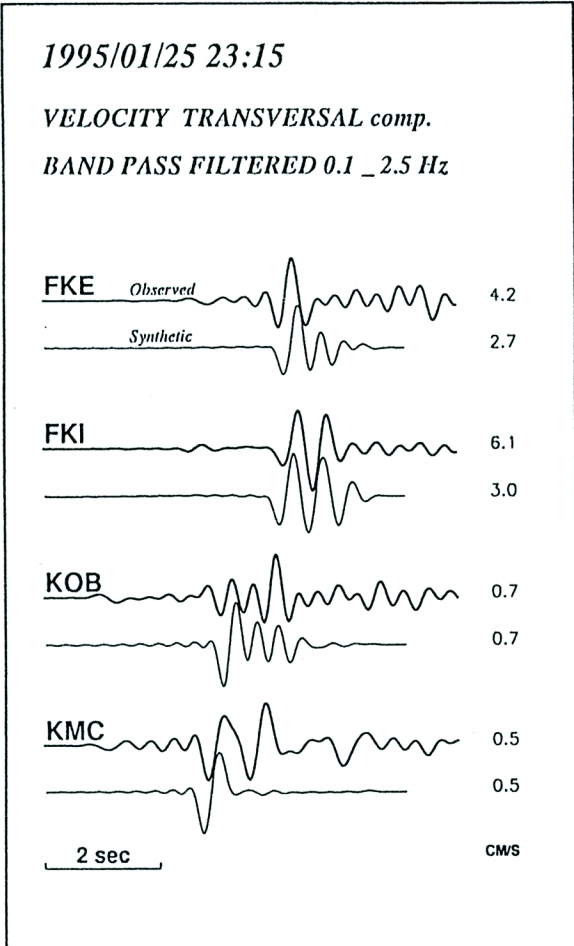


Fig. 15 Comparison between the synthetic and the observed velocity seismograms (tangential component at KMC, KOB, FKI, and FKE for the M 4.7 event. The seismograms are band-pass-filtered between 0.1 and 2.5Hz.

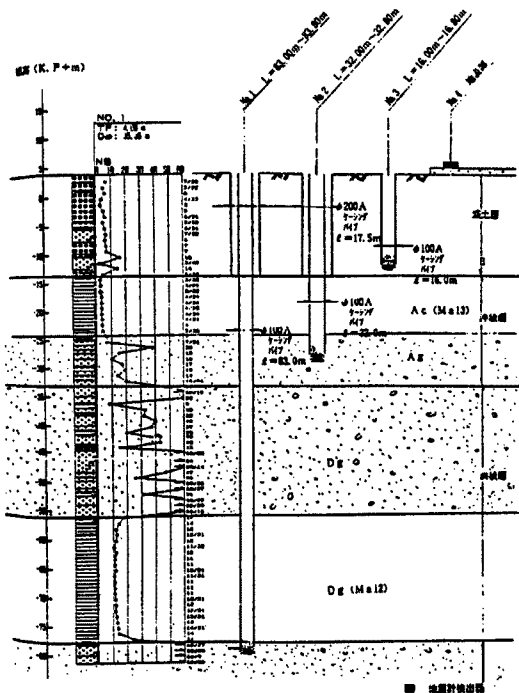


Fig. 16 Borehole accelerometer array in the Port island by the Development Bureau, Kobe city. Three-component accelerometers were deployed at 83m depth, 32m depth, 16m depth and the surface.

で小さく地表近くで急に大きくなっている。図では鉛直アレーの本震観測記録が1次元線形地下構造モデルを仮定して計算された合成波形と比較される。水平方向成分のシミュレーションはSH波の鉛直入射に対して、および垂直方向はP波の鉛直入射に対して、最も深い-83mの地点で入射波と反射波の足し合わせで表せる合成波形が観測に等しいとし、-32m、-16mおよび地表での地震動が求められる。地盤が線形的に振る舞うとすると水平成分については明らかに地表のみならず-16mや-32mでも観測より大きな振幅の合成波形が得られる。とくに地表のNS成分の合成波形は1300galを超える大振幅となり観測の3倍以上にもなる。一方余震に対する同様の計算では合成波形の振幅はほぼ観測と一致している。これは本震の強震動に対して表層地盤が強い非線形性を示したことを意味している。

7. 被害地での強震動のシミュレーションー安全な建物の設計のためにー

今回のような大災害がなぜ起こったのかを解明するには実際に構造物の倒壊などの被害が起こったところでの強震動を押さえる必要がある。残念ながら本震の時に震度7の帯の中では強震記録は殆ど得られていない。私達は被害地での強震動の信頼性の高い再現を行うために先

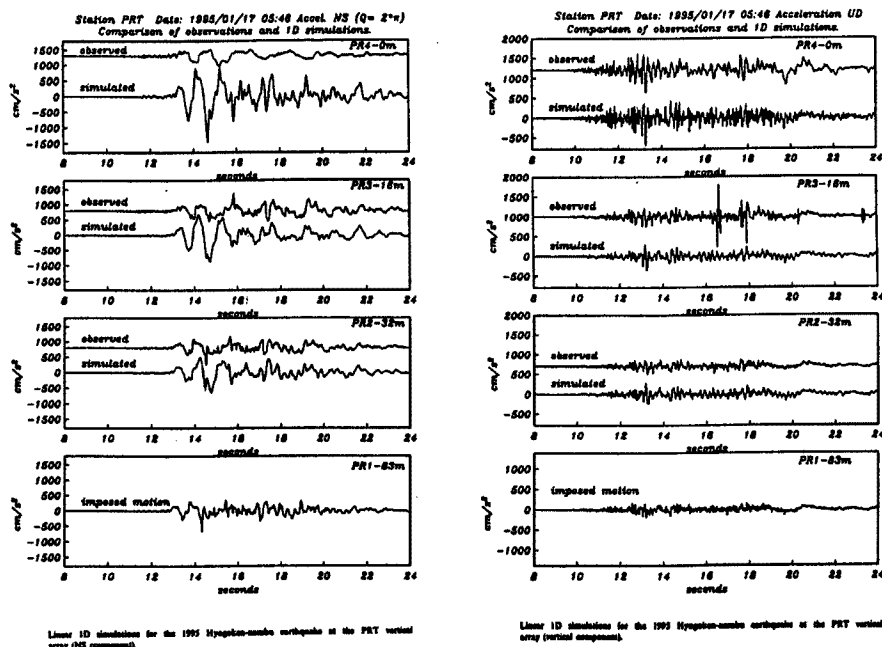


Fig. 17 Comparison between synthetic accelerograms by linear 1-D simulation and the observed ones for the 1995 Hyogoken-nambu earthquake at the borehole array. Left: horizontal NS component and right: vertical component.

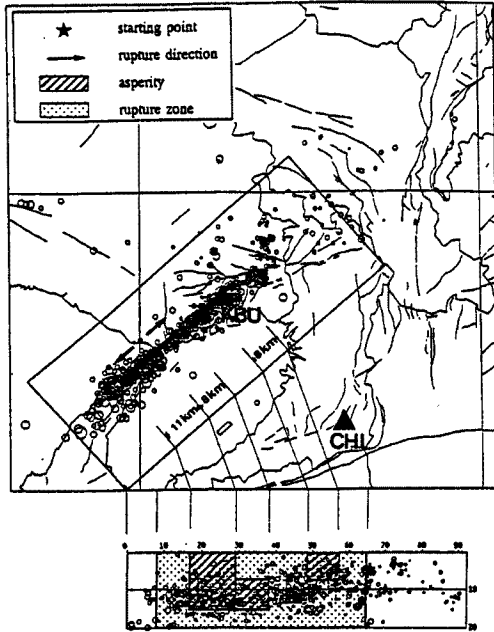


Fig. 18 Map showing the locations of observed stations used here and the hypocenters of the mainshock and aftershocks and the fault rupture model for simulating the mainshock motion.

に述べたような余震観測をおこなった。本震の断層域に生じる余震からの地震動は本震の時と同様の伝播媒質の影響を受けている。そこで本震の適切な震源モデルが与えられれば、余震記録を経験的グリーン関数として本震記録の再現が可能となる。ここでは先に述べた加速度波形の包絡波形のインバージョンにより求められた短周期地震波生成の震源モデル (Fig. 6参照) を参考にして Fig. 18に示されるような3つの主要な破壊域からなる震源モデルを仮定し、震源直上の神戸大学 (KBU) と約50km東方の岩盤上の千早 (CHI) での観測点について余震記録を用いて本震記録の合成を行った。これらの地点では本震記録も得られているのでこの方法の有効性を確かめることができる。

再現された本震の合成地震動と観測記録がFig. 19で比較される。神戸大学に関しては速度と変位の合成波形は観測とよく一致するが、加速度はやや過大評価されている。一方千早に関しては加速度を含めて合成と観測波形はよく一致している。神戸大学の観測点はトンネルの中 (深さ約9.5m地点) に設置されているが、深さ約13m程度までは埋め戻しの土砂が堆積し、それより深いところは風化花こう岩となっている。本震の強震動の時埋

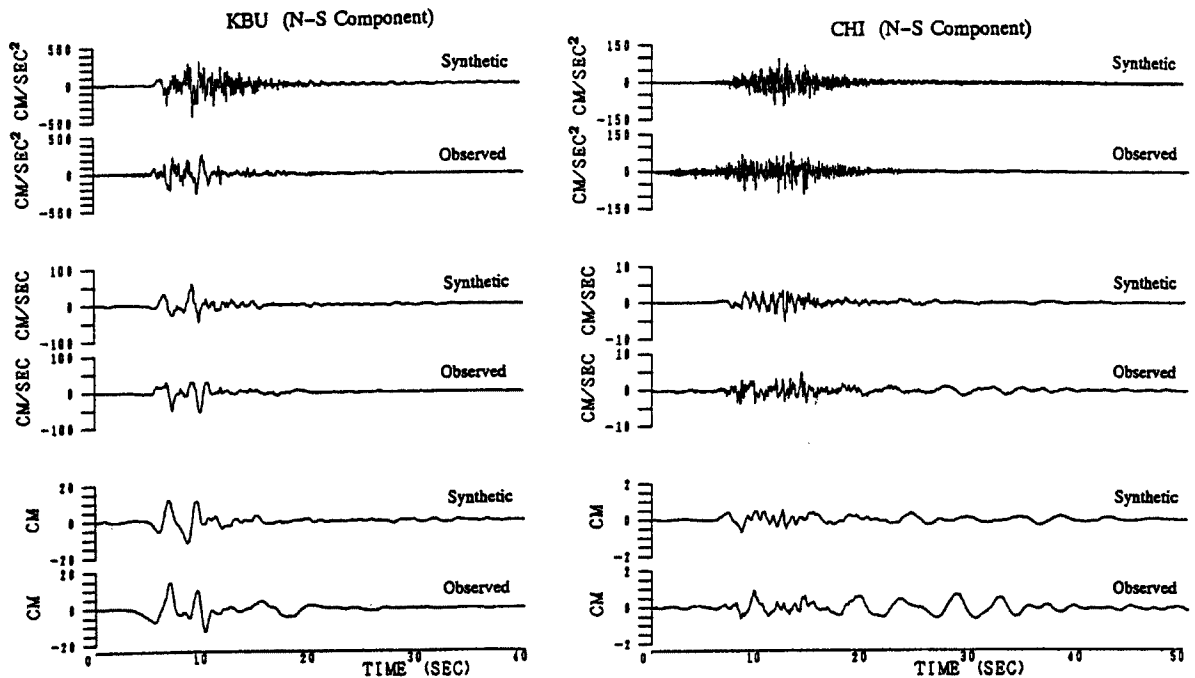


Fig. 19 Comparison between the synthetics and observed seismograms (acceleration, velocity, and displacement) at KBU (left) and at CHI (right) .

め戻しの土砂が非線形化したため観測記録の高周波成分が小さくなったと考えられる。この方法での地震動合成は地盤の線形性の仮定に基づいているため、軟らかい地盤での強震動を合成するためには地盤の非線形性を考慮した合成方法を考える必要がある。合成地震動と観測記録のレスポンス・スペクトルはFig. 20に示されるようによく一致しているように見える。

8. おわりに

日本では、1948年に死者3895名にもおよぶ大被害を受けた福井地震以後兵庫県南部地震まで、都市を直撃する大地震は起こっていなかった。その間新潟、日本海中部、北海道南西沖地震などの大地震は起こっているが、これらはいずれも震源は海にあるため、津波による被害はあったが地震動による被害は極めて少なかった。見かけ上の被害の少なさは日本が防災先進国になったという錯覚を抱かせたように思える。

事実として今回の地震による強震動の大きさはこれまでのマグニチュード7クラスの地震に対する経験式によく一致している。歴史的には近畿の内陸部では四国沖に繰り返し発生する巨大地震に連動して活動期にはマグニチュード7クラスの地震が発生している。これらのことは今回のような強震動は近畿における地震防災を考えるとき当然予想しておくべきものであった。

本震及び余震の強震動記録を用いて波形逆解法などの解析により推定された本震の断層破壊域は必ずしも地震動被害の集中したところとは一致していない。余震の地震動観測から被害地と地震動が大きく増幅される地域とはよく一致しており、地震防災対策において地盤条件の調査は最重要課題といえる。もう1つの問題は今回の地震の被害の集中域が、沖積層があまり厚くない比較的地盤のよいとされてきたところで、海岸近くの埋立地盤や沖積層の厚い地域でむしろ構造物の倒壊が少なかったことである。表層地盤の強震動に対する非線形性が地震動災害の観点からは構造物にむしろ有利に働くことは防災対策を考える上で興味深い。

近代都市の地震に対する脆弱性は1989年のロブリエタ地震や1994年のノースリッジ地震の災害で日本でもよく知られていた。阪神・淡路大震災は日本の都市はアメリカよりも耐震性能が優れているというような考えは誤りであることを明らかにした。このような大震災の起こる可能性は当然日本のどの主要都市でも極めて高いと考えられる。このような大災害をを繰り返さないために強震動予測に基づいた都市の耐震安全性の点検は急務であろう。

謝 辞

本論のなかで、種々の機関の不断の努力で得られた兵庫県南部地震の震源域近傍の記録をつかわせていただいた。とくに神戸市開発局、関西地震観測研究協議会、気象庁からデジタル記録をいち早く提供して

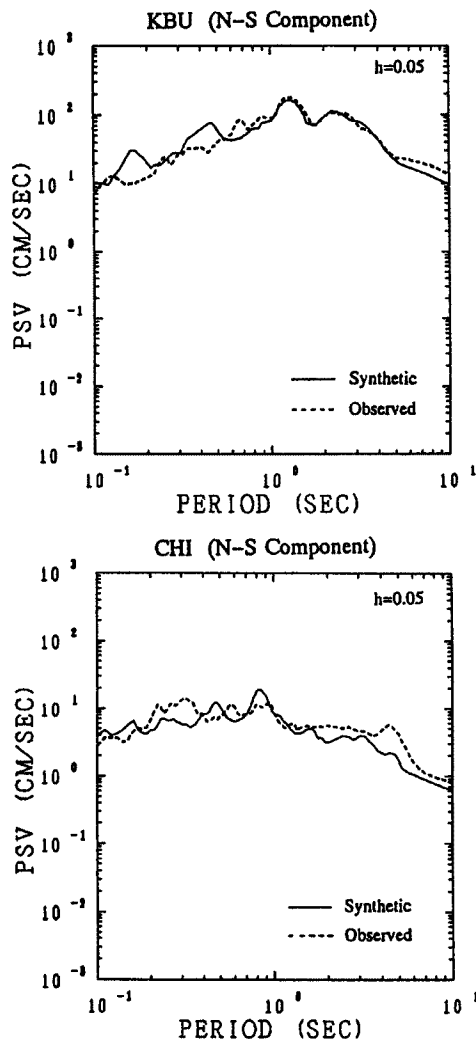


Fig. 20 Comparison of the pseudo velocity response spectra(PVRS) of the synthetics and of the observed seismograms at KBU(left) and CHI(right).

いただいたことに記して感謝の意を表します。京都大学防災研究所地震予知研究センターからは余震分布など多くの資料を提供していただき、清水建設株式会社和泉研究室からは東灘区での貴重な余震記録を解析に使わせて頂きました。京都大学防災研究所地震動部門の皆様には多大の協力を得て本稿をまとめることができたことを感謝します。

参考文献

- 1) 茂木清夫：「地震—その本性を探る—」，東京大学出版会，1981.
- 2) 気象庁地震火山部：兵庫県南部地震の震度7の領域と余震分布，地震火山概況平成7年1月，1995.
- 3) 京都大学防災研究所地震予知研究センター：第112回地震予知連絡会資料1994年1月27日，1995.
- 4) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Symp., 1986, pp. 151-156.
- 5) Fukushima, Y. and T. Tanaka : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 80, 1990, pp. 757-783.
- 6) 福島美光：地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測，O R I 研究報告93-7, 1994, 144pp.