震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能
－1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ－
Metamorphosis of Near-Field Strong Motions by Underground Structures and Their Destructiveness to Man-made Structures
- Learned from the Damage Belt Formation during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake of

川瀬　博[1)]
Hiroshi KAWASE

1) 清水建設和泉研究室　主任研究員　工博
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation, Japan; Senior Researcher, Dr. Eng.

要約

震源近傍の強震動は1秒を中心とするやや短周期の卓越周期を有する大速度パルスで特徴づけられる。この大速度パルスは対応する波長サイズの地下構造により変形させられ、異なるタイプの波動の相互干渉により大きく増幅される。これが兵庫県南部地震で神戸市域に顕著に生じた被害の帯状の分布、いわゆる震災帯の原因である。特に強調すべき点は、神戸側の被害は地表に断層が現れた淡路島側の断層活動の有無に関らず生じたと推定されることである。また、建物の非線形応答解析に基づき、この1秒を中心とするやや短周期の大速度パルスが一般構造物にとって最も警戒すべき地震動であることが示された。

SUMMARY

The near-filed strong motion is characterized as large velocity pulses with intermidiate predominant periods around 1 sec. These velocity pulses are amplified by an underground structure, whose characteristic size corresponds to their wavelengths, through complicated interference of different waves. This is the cause of the damage belt in Kobe during the Hyogo-ken Nanbu earthquake. The author emphasizes that the damage must be caused without any rupture in Awaji where surface breaks appeared and that the most dangerous input motion to ordinary man-made structures is this large velocity pluses with intermidiate period.

1. はじめに

本論文では、震源近傍の強震動の伝播と地下構造による増幅について特に重要なポイントをまとめる。また構造物の破壊力を塑性率応答スペクトルに基づき評価し、震源域の地震動の恐ろしさの根源を明らかにする。それはある意味では意外な素顔である。

震源近傍の強震動は1995年兵庫県南部地震を抜きにしては語れない。その際、神戸市須磨区から西宮市にかけて幅1km長さ20kmの震災帯が形成された。それは起震断層の地表面投影線(ほぼ大阪盆地端部に等しい)よりも盆地側に1km入ったところに形成されたが、当初よりその生成原因を解明することが重要課題であった。これに対して伏在断層説や表層地盤説、誘導ディレクティビティ説など様々な仮説が提案されたが、今日最も広く支持されているのは、盆地端部で発生したエッジ生成波と鉛直下方から上昇してくる直達S波の干渉現象によるとする「エッジ効果」説である[1)2)3)]。エッジ効果は盆地端部における特異な増幅効果であり、それは地下構造および入射波の周期特性に依存するが、入射波が鉛直下方からの実体S波である限り震源タイプの影響はほとんど受けない。ここではまず、二次元および三次元地下構造の強震動シミュレーション結果を基にエッジ効果の実態を理解し、強震動予測において地下構造の影響を定量的に評価することの重要性を再確認する。その過程で、本PDにおいて宮武氏が述べるであろう断層破壊過程のすべり速度の重要性も指摘される。またシミュレーション結果は神戸側の深部断層破壊だけで神戸側の震災帯が説明できることを示しているが、ここでその意味を考えたい。

さて、震災とはあらゆる人工構造物の被害とそれに伴い発生する人的および経済的被害のことである。従って震災を防ごうとするならば、強震動は構造物被害との関連抜きには論じられない。ここでは震源近傍の強震動の構造物破壊能を非線形1自由度系の塑性率応答スペクトルで把握する。これにより実被害との対応のもとで震源近傍の強震動の重要な性質について論じることができる。得られた教訓は「やや短周期域の大振幅速度パルス」が最も危険であるということである[4)]。これは震源近傍の強震動の予測に向けて我々の努力すべき方向を示している。

2. 震災の帯の生成メカニズム

震災帯の原因が何であったかについて、今日に至るまで様々な仮説が提唱されてきたが、このうち震災直後に広く流布された震災帯の直下に今回の地震の起震断層が隠されているという「伏

在断層説」は、その後の地震学的・測地学的検討により、現在ではほぼありえないということでコンセンサスが得られている。

著者らは丁度3年前の日本建築学会の第23回地盤震動シンポジウムにおいて、神戸海洋気象台のJMA87型強震計観測記録を用いて基盤波形を逆推定し、それを用いて二次元盆地端部構造による地盤応答特性の評価を行い、震災帯内の最大地動加速度PGAは1,200Gal、最大地動速度PGVは150～200cm/sという推定結果を得ていた[5]。このシミュレーションの結果は本震記録のある大阪ガス葺合観測点やポートアイランド観測点などで観測波形と照合されており、かなりよい一致が得られた[2)6)]。これら神戸市中央区の震災帯に対する解析では、盆地端部のローカルな構造に着目しており、入射波場は平面S波(主要動は盆地直交成分なので解析上はSV波に相当)、地盤は二次元と仮定されている。なお逆算された露頭基盤波はPGVで55cm/s、PGAで300Galに過ぎない。

その後著者らはこの盆地端部近傍での特異な増幅効果のメカニズムについて検討し、それが盆地端部で生成され水平に伝播する盆地生成回折波／表面波と鉛直下方から上がってくる直達S波の増幅的干渉によるものであることを明らかにし、これを「エッジ効果」と名付けた[7]。エッジ効果はエッジ近傍の微細な構造にはあまり影響されないが、入射波の周波数特性によってその出現位置が大きく変化する。これら以外にも震災帯の生成原因を深い盆地構造に求めた研究は既に多数あり[例えば1)3)]、その増幅特性が重要な役割を果たしたことは最早疑いようがない。当初震源と盆地構造を同時解析した結果からその相互作用の可能性が指摘されたが、三次元放射波動場に対する二次元盆地構造の応答解析結果から、エッジ効果は震源のタイプによらずほぼ同じであることが示され[8]、相互作用の可能性は否定された。またエッジ効果の生成には入射波と同位相で回折P波を主体とするエッジ生成波-Iと，逆位相で回折S波とRayleigh波を主体とするエッジ生成波-IIが寄与しており、そのうち断層近傍1km以内の特異な増幅にはエッジ生成波-IIによる寄与が大きいことが明らかにされた。これにより震災帯の生成メカニズムはほぼ完全に解明されたといえる。以下ではまずその結果を解説する。なお、震源とサイトのどちらが重要かという設問自体は意味がないと考える。どちらも重要としか言いようがないからである。

川瀬・他(1998)[8]はまずエッジ効果は震源のタイプによらないことを示した後、Fig.1に示すような地中に反射層を有する単純な矩形二次元盆地モデルを用いて直達S波とエッジ生成波の分離を試みた。盆地直下に反射層を置くと盆地側直達S波は地表に達せず岩盤側S波から変換されたエッジ生成波のみが抽出される。逆に岩盤側に反射層を置くと盆地側直達S波だけが抽出される。両者を合わせれば普通の一体解析の結果となる。比較のため、一体解析からどちらかを差し引いた場合も求め重ね書きした。Fig.2(a)には岩盤側に反射層を置いてエッジ生成波をなくし直達S波のみを取り出した結果(Rock-S-cutモデル)を示す。盆地側の波形はエッジから1kmも離れるとほとんど場所によらず同一となっていることがわかる。これが一次元的な堆積盆地の応答である。Fig.2(b)には盆地側に反射層を置いてエッジ生成波のみを取り出した結果を示す。岩盤側をヒットした直達S波が、速度の速い同位相成分と速度の遅い逆位相成分に分かれ、エッジから等速度で水平方向に伝播していることがわかる。その振幅を比較すると前者は後者の約半分で、後者はほぼ岩盤側の入射(露頭) S波振幅に匹敵することがわかる。川瀬・他(1998)[8]は前者をエッジ生成波-I、後者をエッジ生成波-IIと名付け、エッジ効果のメカニズムをFig.3に示すように模式的に表現した。またJMA神戸での観測記録から逆算した推定基盤波[2]が入射した場合のPGV分布をエッジからの距離の関数として求めた。その結果、一次元地盤の増幅倍率が約3倍あり、震災帯相当位置ではさらにエッジ効果による付加的増幅で約4倍に増幅されることを確認した。このように二次元盆地構造ではエッジ生成波による付加的増幅は一次元地盤増幅の高々30%、PGV実値にして50cm/sに過ぎない。

3. 三次元盆地構造によるシミュレーション

以上でエッジ効果の基本メカニズムが理解できたので、次に不均質な震源からの基盤波が現実的な三次元盆地構造に入射した場合の理論地震動を求め、観測結果と比較する[9)10)]。ここで用いた震源はWald (1996)[11]の震源過程である。これは周期2秒までの速度強震記録および遠地実体波記録・地殻変動データから逆算されたものである。この震源過程と三次元盆地構造から理論波形を計算した。得られた波形の地表面上のPGV分布をFig.4に、代表的な観測点での理論波形(点線)を観測波形(実線)とともにFig.5に示す。観測波形は0.333Hz～1.25Hzでフィルターした。Waldモデルをそのまま用いたのでは2秒以上の長周期成分しか生成できず、観測結果の1秒を中心とする大速度パルスを説明できないことがわかる。PGV分布から、大振幅領域は概ね60cm/s以上の領域として抽出されるが、その幅は3km以上にもなり、現実の震災帯の幅とは対応しない。これは入射S波の卓越周期が長すぎるため、落差の小さいエッジではエッジ生成波が効率的に生成されないためと考えられる。このPGV分布は事実上直達S波のみで規定されている。

そこで再びJMA神戸における逆算基盤波を用いてコンボリューションにより理論波形を補正し、より現実的な入力が入った場合の三次元地盤の応答を求めた。これはJMA神戸における基盤応答に対する各地点の相対的な増幅特性を三次元地盤モデルから求め、逆算基盤波にその増幅特性を掛け合わせた(=合積した)と考えてもよいが、すべての要素断層において長周期域のすべり時間関数から短周期のすべり時間関数にマッピングする同一の関数を求めたと考えてもよい。コンボリューション解析によって得られた合成波形(点線)を0.333Hz～1.5Hzでバンドパスフィルターした観測波形(実線)と比較してFig.6に示す。JMA神戸で一致するのは当然だとしても、それ以外にも多くの地点で観測記録を良く説明できていることがわかる。得られたPGV分布はFig.7となり、大振幅領域は150cm/sec以上の領域として抽出されるが、その幅は約1km、その位置も盆地エッジから約1km離れており、かつ盆地エッジに沿ってほぼ平行に東西に伸びていて、実際の兵庫県南部地震時の震災帯の幅とよく対応する。これは二次元地盤モデルで示したエッジ効果の三次元的出現にほかならない。さらに三次元地盤の影響が盆地境界に沿う方向での振幅の変動となって明瞭に現われている。特に注目すべきは三宮付近の島状に孤立した大振幅領域である。JR三宮駅の周辺では多数の中層ビルが崩壊

したのに対し、隣の神戸駅周辺ではそれほどの被害は生じなかったのが謎とされてきたが、Fig.7はそれが三次元盆地構造の波動干渉による結果であることを示している。一般的な傾向として、エッジ形状が岩盤側にくぼんだ形で折れ曲がっている地点(凹部)の前面では大きく、逆に盆地に突き出る形で折れ曲がっている地点(凸部)の前面では小さくなっている。これは水平面内でのエッジ生成波の焦点効果(あるいは拡散効果)による。

ここで、この三次元シミュレーションから重要な指摘を2点しておきたい。まず1点は、震源近傍の大振幅速度パルスを生成するのに、震源のすべり速度関数が極めて重要であるということである。つまり最終すべり量分布の異なる震源モデルを用いてもすべり速度関数が適切ならば大振幅速度パルスを同程度に再現できる[10]。もう1点は神戸側の震災を説明するのに神戸側の、それも主として深部の断層破壊だけで十分なことである。即ち野島断層に地表トレースが現れたことと神戸側の大振幅速度パルス=震災の間には直接的な関係はない。これは今後活断層情報に基づき強震動を予測する際に十分考慮すべきことと思われる。

4. 震源近傍の強震動の構造物破壊能

強震動レベルと構造物被害の対応を論じるとき、どのような波動がどのような構造物を破壊させ得るのかを理解する必要がある。ここでは強震動の建物側から見た強さ、すなわち構造物破壊能を一質点系の非線形応答スペクトルを用いて検討する。

ここで用いた既往の地震の大加速度観測記録は以下の日本の3記録で、水平2成分の内大きい方(ただし兵庫県南部地震では最大主軸成分)各1波である。

1) 1995年兵庫県南部地震のJMA神戸海洋気象台
2) 1995年兵庫県南部地震のポートアイランド地表
3) 1993年釧路沖地震のJMA釧路気象台

これら3波の擬似速度応答スペクトルをFig.8に示す。これから明らかなように、JMA釧路の記録は0.5秒に卓越がある。これに対して兵庫県南部地震の両記録は従来より指摘されているとおり1～1.5秒に顕著な卓越があり、またそのレベルも釧路の記録に比べてかなり大きいことがわかる。しかし速度応答スペクトルは弾性時の一自由度系の応答を表わしたものであり、従って崩壊や大破を含む被害の実態を捉えられない。許容限度を越えた変形を余儀なくされた場合には当然構造物は非線形化している。故に強震動特性と被害の対応を論じるためには、非線形一自由度系の応答、すなわち塑性率応答スペクトルを考える必要がある。

ここで塑性率スペクトルD(f)とは弾性時固有振動数fの一自由度系の最大変位応答D_{max}(f)を弾性限変位D_0(f)で割ったものである。履歴特性は最も単純なバイリニア型を仮定した。注意すべき点は、降伏震度k=降伏耐力F_y／建物重量M gをパラメターとしているので、弾性限変位D_0(f)はfの関数となることである。当然弾性時剛性×弾性限変位$K_0 \times D_0$(f)は降伏耐力F_yに等しい。また弾性時固有振動数fは弾性時剛性K_0と質量Mできまる。これらの関係から弾性限変位D_0(f)は降伏震度に比例し、固有振動数の二乗に反比例することが導かれる。この場合もしも応答変位が同じなら、塑性率応答は固有振動数が高いほど大きくなる。

Fig.9に3波の塑性率スペクトルを示す。横軸は弾性時固有周期、縦軸は塑性率スペクトルである。降伏震度kは0.4, 0.6, 1.0の3種類について計算した。この中ではJMA神戸の記録が最も破壊力が大きい。塑性率応答スペクトルで見ると短周期ほど塑性率が大きくなる傾向にある。特に降伏震度が小さい(k=0.4)場合には1秒以下の短周期構造物の塑性率応答は10を越え、崩壊することを示している。またこの図は降伏震度が大きい(k=1.0)場合には弾性時固有周期にかかわらず、被害は軽微なものにとどまることを示しており、新耐震以前のものであっても低層の壁式RC構造物などには大きな被害がでなかったことと対応している。ここで最も重要なことは、兵庫県南部地震のようなやや短周期の大速度パルスによって構造物が塑性化すれば、その弾性時固有振動数はもはや意味を持たなくなり、共振現象による累積塑性変形で崩壊に至るのではなく、「1波の(正確には半波の)パルスに対する塑性流動によって崩壊する」ことであり、このため塑性域に入るのが早い短周期構造物ほど塑性率応答は大きくなるということである。これは塑性率応答が、半サイクル当たりの入力エネルギー、すなわちエネルギー率(あるいは瞬間エネルギー)によって規定されることから考えると当然のことである。

ポートアイランドの場合は格段に破壊力が小さく、降伏震度が小さくても最大応答塑性率は4程度にとどまっている。この記録のPGVは100cm/secを越えており、それだけみると神戸気象台と遜色ないが、PGAレベルは液状化のおかげで400Gal台にとどまっており、これが小さな応答となった主な理由と考えられる。この塑性率スペクトルのJMA神戸とポートアイランドの差もまた現実に神戸市域に見られた被害の実態とよく対応している。

これら周期1秒付近の大速度パルスを特徴とする震源域の地震動に対し、釧路沖地震の記録では、傾きがほぼ一定で長周期ほど応答が著しく減少する特性を示している。この場合降伏震度がある程度あれば極く短周期の構造物を除き塑性率応答は5以下となる。この図はポートアイランドの場合とは逆に「PGAが大きくともPGVのレベルが低いと構造物を崩壊させることは難しい」ことを示している。またこれら3つの塑性率スペクトルの特性を比較すると「PGAが大きい限り速度パルスはその卓越周期より短周期の構造物に対してのみ大きなインパクトを持つ」ことがわかる。

以上の結果から、木造家屋の卓越周期が短周期だからといって、震源近傍の強震動の短周期の特性に着目する必要は全くないことがわかる。つまり、震源域での固有周期0.5秒以下の一般構造物への大被害を防止するためには、強震動評価は1秒を中心とする「やや短周期域」さえ的確に評価できればよいことを意味している。ではこの「やや短周期域」とは実際にはどの範囲なのであろうか。これは厳密には建物の周期分布と耐力分布がわかっていないと導くことは難しい。しかし、現象論的にはPGAもPGVも大きい地震動となる周期範囲として同定される。Fig.10にはPGA－PGVダイアグラムを示す[4]。縦軸はPGAで横軸はPGA/PGVをさらに2πで割った等価卓越振動数である。この図で太破線は大被害(～震度VII)が生じる下限レベルで、兵庫県南部地震の被害と観測および再現地震動のレベルからPGA800Gal以上でかつPGV100cm/sec以上とする。このライン以上のレベルを実現するための卓越振動数には制限はない。しかし物理的に実現可能な地動最大値には限界がある。ここでPGAとPGVの上限をそれぞ

れの観測最大値に基づきPGAで2,000Gal、PGVで200cm/secと仮定する(太実線)。このPGAとPGVの上限のため、被害に直結する地震動特性の卓越すべき周波数帯域は1秒を中心とする狭い範囲(概ね2秒～2Hz)に限定されることがわかる。これが震源域の地震動で最も警戒すべき「やや短周期域」の範囲である。

5. まとめ

兵庫県南部地震の震災帯の成因として深い地盤構造による「エッジ効果」の寄与の定量的評価の事例を示し、さらに塑性率応答スペクトルに基づき被害につながる強震動として「やや短周期域」の大速度パルスが最も恐ろしいものであるという考え方を提示した。以上のことから「震源近傍の強震動＝大被害＝大加速度＝ごく短周期＝予測不能(あるいは不能同然なほどばらつきが多い)」のではないということはご理解いただけたものと思う。しかし、この「やや短周期域」の予測では震源の評価とサイトの評価ともに重要であり、チャレンジングな課題であることは間違いない。

参考文献

1) 入倉孝次郎, 1995, 1995年兵庫県南部地震による強震動, 月刊地球号外, No.13, 54-62.
2) 川瀬博・林康裕, 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 480, 67-76, 1996.
3) 源栄正人・永野正行, 1996, 深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析－兵庫県南部地震における「震災の帯」の解釈－, 日本建築学会構造系論文集, 488, 38-48.
4) 川瀬博, 1998, 地盤震動と構造物の応答, 1998年日本建築学会大会応力PD資料, 日本建築学会, 5-10.
5) 川瀬博, 1995, 堆積盆地が強震動に与えた影響－メキシコシティの場合と神戸市の場合－, 第23回地盤振動シンポジウム, 日本建築学会, 83-91.
6) 林康裕・川瀬博, 1996, 1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 481, 37-46.
7) Kawase, H., The cause of the damage belt in Kobe: "The Basin-edge effect", constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, Seismo. Res. Lett., 67, No.5, 25-34, 1996.
8) 川瀬博・松島信一・R.W. Gravès・P.G. Somerville, 1998, 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析－兵庫県南部地震の際の震災帯の成因－, 地震, 第2輯, 第50巻, 第4号, 431-450.
9) 川瀬博・松島信一, 1998, 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 514(印刷中).
10) 川瀬博, 松島信一, R.W. Graves, P.G. Somerville, 1998, 1995年兵庫県南部地震での震災帯の生成に着目した神戸地域における強震動シミュレーション, 第10回日本地震工学シンポジウム, 日本建築学会(印刷中).
11) Wald, D.J., 1996, Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, J. Phys. Earth, 44, 489-503.

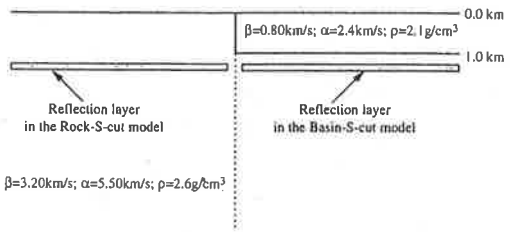

Fig. 1 A simple 2-D basin model used to understand the amplification mechanism of the edge effect[8].

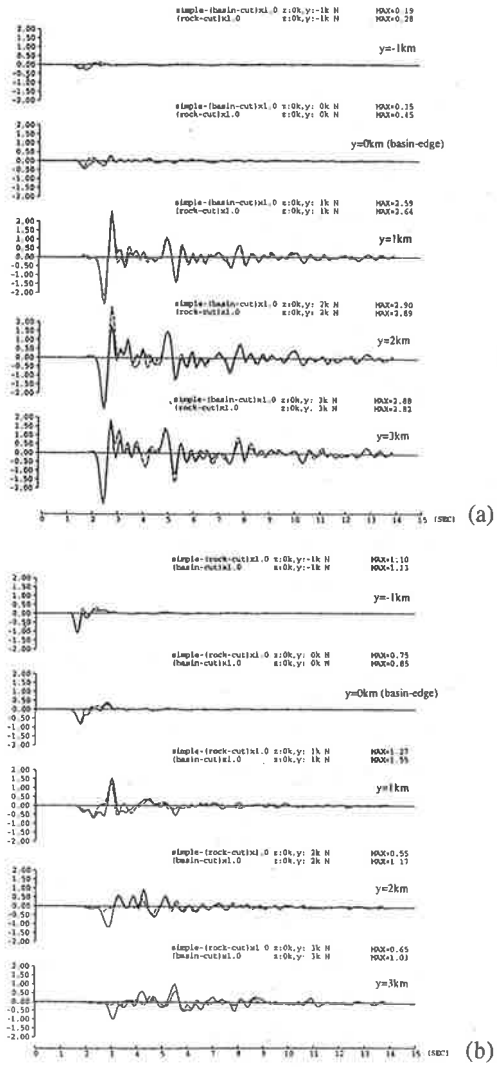

Fig. 2 Synthetic waveforms of (a) S-waves inside the basin and (b) the edge-induced waves.

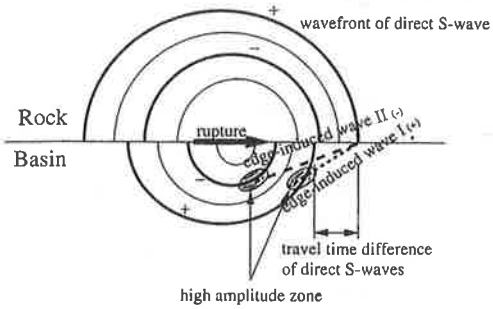

Fig. 3 Interpretation of the edge effect.

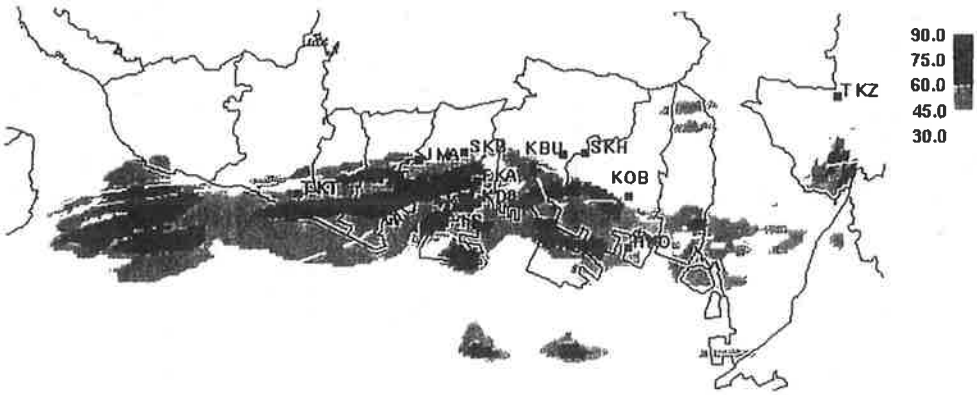

Fig. 4 PGV distribution of the synthetics by Wald's source model and a realistic 3-D basin structure [9].

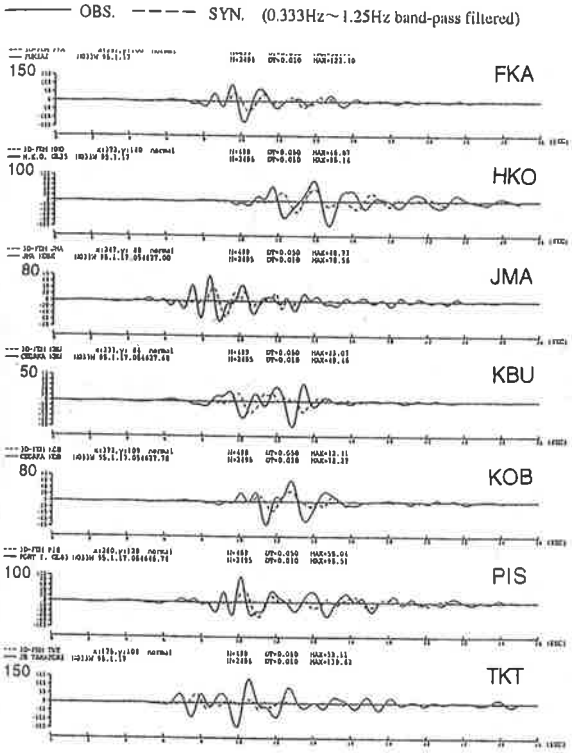

Fig. 5 Synthetics (N33°W component) by Wald's source model and the corresponding observed records [9].

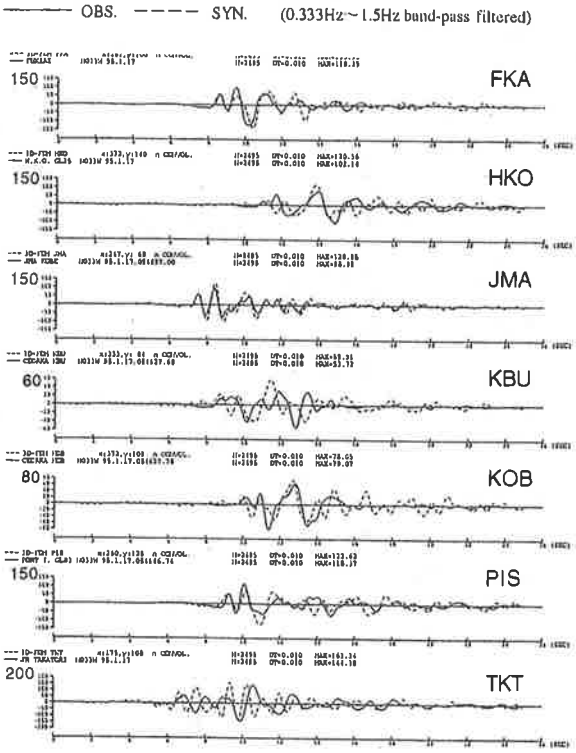

Fig. 6 Theoretical ground motions convolved with the bedrock motion at JMA and the observed records [9].

Fig. 7 PGV distribution of the theoretical ground motions convolved with the bedrock motion at JMA [9].

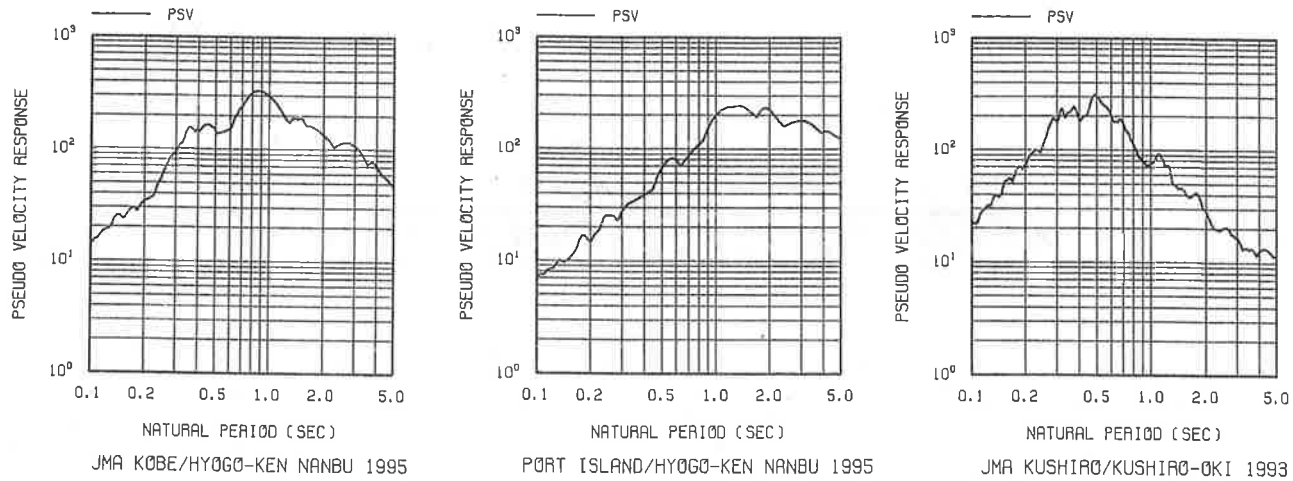

Fig. 8 Pseudo-velocity response spectra with 5% damping for strong motion records during the Hyogo-ken Nanbu and Kushiro-Oki earthquakes.

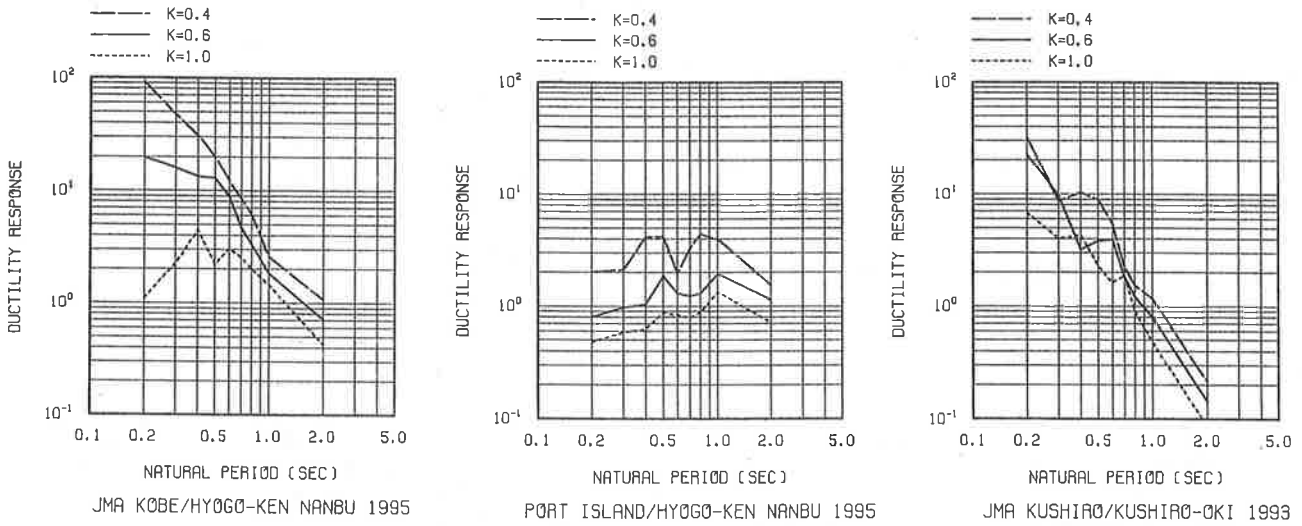

Fig. 9 Ductility response spectra of a bilinear 1-DOF system for strong motion records during the Hyogo-ken Nanbu and Kushiro-Oki earthquakes.

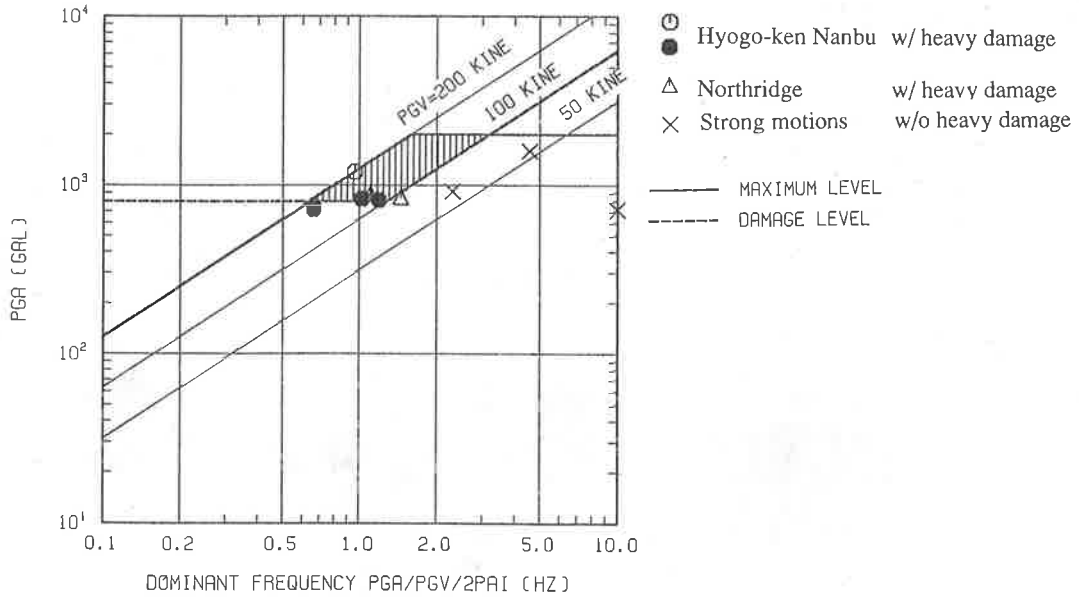

Fig. 10 Relationship between PGA and equivalent pre- dominant frequency = PGA/2πPGV. A shaded area is the most dangerous zone. Actual strong motion data in heavily damaged zones (○●△) and those in less damaged zones (×) are shown.