

研究発表会原稿

鳥取県西部地震の地震動特性と橋梁構造物への影響

平成 12 年鳥取県西部地震は、その地震の規模が $M_J = 7.3$ (M_J : 気象庁マグニチュード) と平成 7 年兵庫県南部地震の $M_J = 7.2$ よりも大きいにもかかわらず、何故、地震による被害が小さいかが議論的となっている。地震の規模を、断層を境にして岩盤をずり動かすために働いた力(地震モーメント M_0) をもとにして計算するモーメントマグニチュード $M_w (= (\log_{10} M_0 - 9.1)/1.5)$ の大きさを比較すると、兵庫県南部地震の $M_w = 6.9$ に対して、鳥取県西部地震のそれは $M_w = 6.6$ と小さいことが報告されている。このことは、断層を動かすために働いた力 M_0 が鳥取県西部地震では、兵庫県南部地震の約 45% と小さいことを表している。ここでは、鳥取県西部地震で観測された地震動の特性を、甚大な被害が生じた兵庫県南部地震や、0.94g という大きな加速度が観測されたにもかかわらず地震による被害が小さかった平成 5 年釧路沖地震と比較することにより、鳥取県西部地震で生じた地震動の橋梁構造物への影響を検討する。

断層直近で観測される地震動には、その最大加速度が大きかつゆっくりした波(パルス波)が存在することが報告されている¹⁾。パルス波は、最大加速度が大きく、その時間が長いことから非常に大きなエネルギー(破壊力)を持ち、構造物に与える影響が大きいことからキラーパルスとも呼ばれることがある。兵庫県南部地震やその前年に発生した 1994 年ノースリッジ地震では、このパルス波によって構造物に甚大な被害が生じたことが明らかにされている¹⁾。図-1 は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net の観測地点である江府(I 種地盤)と日野(II 種地盤)で観測された地震動²⁾、兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台記録(I 種地盤)と JR 鷹取駅記録(II 種地盤)、釧路沖地震で観測された釧路気象台記録(I 種地盤)のパルス波を比較したものである。図より、鳥取県西部地震のパルス波は、兵庫県南部地震のそれに比較して小さく、鳥取県西部地震と同様に、観測された最大加速度は大きかったが、地震による被害が小さかった釧路沖地震のパルス波とよく似ていることがわかる。これより、鳥取県西部地震が構造物に与える影響は、兵庫県南部地震よりも小さいことがわかる。

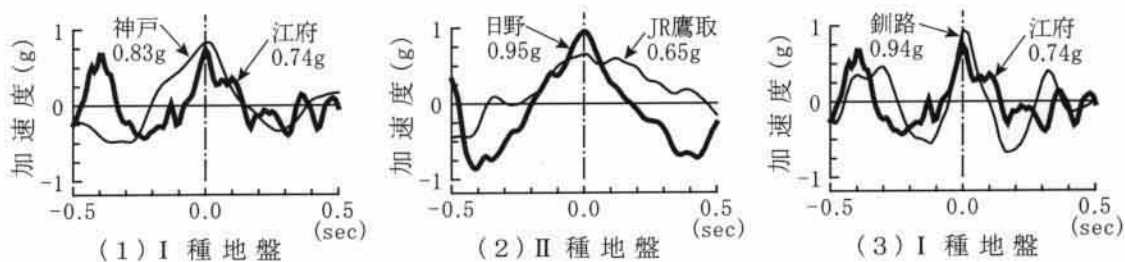


図-1 構造物に与える影響が大きいパルス波の大きさの比較

地震動が構造物に与える影響を評価するためには、地震動によって構造物に生じる加速度の最大値がどのくらいになるかを求める必要がある。これを、構造物の固有周期毎に求めたものが、耐震設計で用いられている加速度応答スペクトルである。図-2 は、図-1 に示した地震動に K-NET の米子観測地点(II 種地盤)で観測された地震動を加えた 6 波形に対する加速度応答スペクトルを比較したものである。釧路沖地震や鳥取県西部地震の加速度応答スペクトルは、固有周期 0.4 秒から 0.6 秒付近までの短い周期のところでは兵庫県南部地震と同程度もしくはそれよりも大きな値を示しているが、固有周期 0.8 秒付近から周期が長いところでは、その値は小さくなっていることがわかる。固有周期が短いところで振動している構造物に大きな地震力が作用し、構造物に何らかの損傷が生じると、構造物の剛性が小さくなるため構造物の固有周期は長くなる。構造物の固有周期が長くなったところでも大きな地震力が作用すると、構造物に大きな被害が生じるため、固有周期 0.8 秒から 2.0 秒付近のところでの加速度応答スペクトルの値が、構造物に与える影響を評価する上で重要である。図より、鳥取県西部地震や釧路沖地震の加速度応答スペクトルは、固有周期 0.8 秒から 2.0 秒付近では、兵

庫県南部地震よりも小さいことがわかる。このように、固有周期0.8秒から2.0秒付近で加速度応答スペクトルが小さいことが、鳥取県西部地震における構造物の被害を小さくしたと考えられる。

地震動によって構造物に大きな被害が生じないようにするためには、構造物には、ある程度大きな地震力に対しては無傷で耐えられるだけの耐力と、非常に大きな地震力に対してはしなやかさでそれをやり過ごすことができる変形能力を与える必要がある。図-3は、

鳥取県西部地震で観測された地震動に対して構造物に生じる損傷を無損傷（弾性応答）から軽微な損傷（応答塑性率で2程度）にとどめるために、構造物が保有していなければならない耐力と、鳥取県で管理する橋梁のRC橋脚の耐力を降伏水平震度の大きさで比較したものである。RC橋脚の耐力は、耐震補強前の耐力を●で、耐震補強後（計画を含む）の耐力を○で示している。図は、耐震設計上の地盤種別がI種地盤のものを示してある。江府で観測された地震動に対して構造物が健全な状態であるためには、固有周期0.5秒では降伏水平震度は1.68、1.0秒では0.22が必要となる。耐震設計上軽微な損傷が生じることを許すならば、固有周期0.5秒では降伏水平震度は0.59、1.0秒では0.08が必要となる。図に示したRC橋脚は、地震動の観測地点に建設されているわけではないので単純な比較はできないが、耐震補強前のRC橋脚は十分な変形能力を保有していない場合が多いので、損傷が生じることを許さない破線で示した降伏水平震度と比較し、耐震補強されたRC橋脚は十分な変形性能を保有しているので軽微な損傷を許す実線で示した降伏水平震度と比較すると、耐震補強されたRC橋脚の多くは鳥取県西部地震に余裕を持って耐えられることがわかる。補強されていないRC橋脚は、その固有周期が長いものは、鳥取県西部地震にも耐えることができるが、多くの橋脚で何らかの損傷が生じた可能性があったこともわかる。

注) 図-2において周期0.6秒付近で大きな加速度応答スペクトルが得られている日野の地震動は、その観測地点が鞆ノ池のほとりの堆積層のある場所に設置されているため、日野町全体に生じた地震動の特性を表しているとは限らない。

参考文献

- 1) 額田一 起：カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震, 科学, Vol.66, No.2, pp.93-97, 岩波書店, 1996.
- 2) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET), <http://www.k-net.bosai.go.jp/>, 基盤強震観測網(KiK-net), <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>

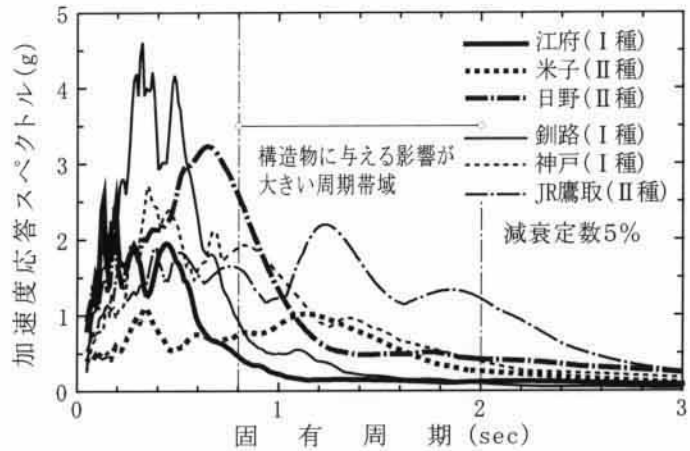


図-2 加速度応答スペクトルの比較（減衰定数5%）

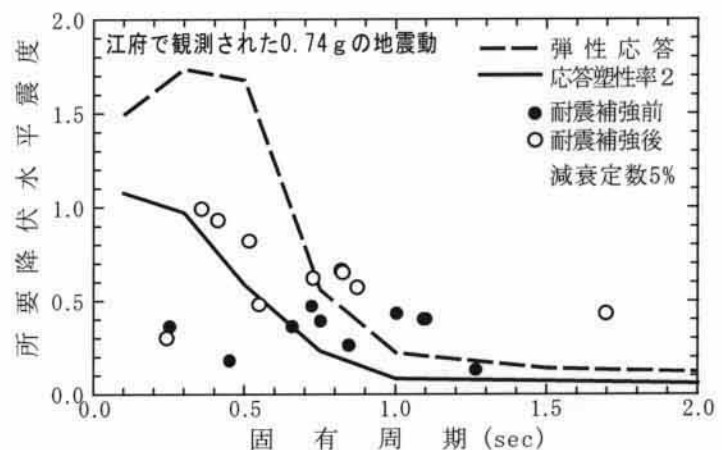


図-3 I種地盤上で観測された地震動(江府)に耐えるために構造物が保有しなければならない耐力(所要降伏水平震度)

鳥取県西部地震の地震動特性と橋梁構造物への影響

平成 12 年鳥取県西部地震は、その地震の規模が $M_J = 7.3$ (M_J : 気象庁マグニチュード) と平成 7 年兵庫県南部地震の $M_J = 7.2$ よりも大きいにもかかわらず、何故、地震による被害が小さいかが議論的となっている。地震の規模を M_J ではなく、“どのくらいの面積を持つ断層が、地震のときに何メートル滑ったかという量(地震モーメント M_0)” をもとにして計算するモーメントマグニチュード M_w ($= (\log_{10} M_0 - 9.1) / 1.5$) の大きさを比較すると、兵庫県南部地震の $M_w = 6.9$ に対して、鳥取県西部地震のそれは $M_w = 6.6$ と小さいことが報告されている。このことは、断層運動の大きさを表す指標 M_0 が鳥取県西部地震では、兵庫県南部地震の約 45% と小さいことを表している。ここでは、鳥取県西部地震で観測された地震動の特性を、甚大な被害が生じた兵庫県南部地震や、0.94g という大きな加速度が観測されたが地震による被害が小さかった平成 5 年釧路沖地震と比較することにより、鳥取県西部地震で生じた地震動の橋梁構造物への影響を検討する。

断層直近で観測される地震動には、その最大加速度が大きくかつゆっくりした波(パルス波)が存在することが報告されている。パルス波は、最大加速度が大きくその時間が長いことから非常に大きなエネルギー(破壊力)を持つため構造物に与える影響は大きく、キラーパルスとも呼ばれている。兵庫県南部地震やその前年に発生した 1994 年ノースリッジ地震では、このパルス波によって構造物に甚大な被害が生じたことが明らかになっている。図-1 は、科学技術庁防災科学技術研究所の K-Net と Kik-Net の観測地点の日野(II種地盤)と江府(I種地盤)で観測された地震動のパルス波を、兵庫県南部地震で観測された JR 鷹取駅記録(II種地盤)および神戸海洋気象台記録(I種地盤)のパルス波を比較したものである。図からわかるように、鳥取県西部地震のパルス波は、兵庫県南部地震のそれに比較して小さいことがわかる。

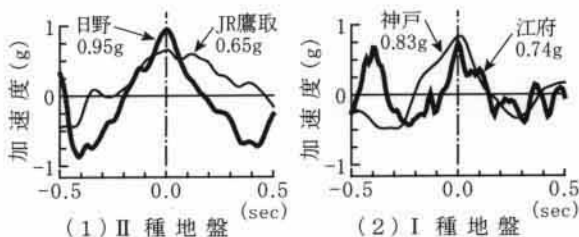


図-1 構造物に与える影響が大きいパルス波の大きさの比較

地震動が構造物に与える影響を評価するためには、地震動によって構造物に生じる加速度の最大値がどのくらいの大きさになるかを求める必要がある。これを、構造物の固有周期毎に求めたものが、耐震設計で用いられている加速度応答スペクトルである。図-2 は、図-1 に示した地震動に K-Net の米子観測地点(II種地盤)記録と、釧路沖地震での釧路気象台(I種地盤)記録を加えた 6 波形に対する加速度応答スペクトルを比較したものである。釧路沖地震や鳥取県西部地震の加速度応答スペクトルは、固有周期 0.2 秒から 0.6 秒付近までの短い周期のところでは兵庫県南部地震と同程度もしくは大きな値を示しているが、固有周期 0.7 秒よりも周期が長いところでは、その値は小さくなっていることがわかる。固有周期が短いところで振動している構造物に大きな地震力が作用し、構造物に何らかの損傷が

生じると、構造物の剛性が小さくなるため構造物の固有周期は長くなる。構造物の固有周期が長くなったところでも大きな地震力が作用すると、構造物に大きな被害が生じるため、固有周期 0.8 秒から 2.0 秒付近のところでの加速度応答スペクトルの値が、構造物に与える影響を評価する上で重要である。図より、加速度応答スペクトルは、固有周期 0.8 秒から 2.0 秒付近では、鳥取県西部地震や釧路沖地震は兵庫県南部地震よりも小さいことがわかる。

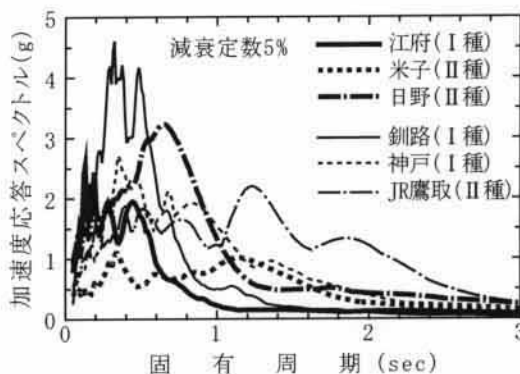


図-2 加速度応答スペクトルの比較(減衰定数 5%)

地震動によって構造物に大きな被害が生じないようにするためには、構造物には、ある程度大きな地震力に対しては無傷で耐えられる力(降伏水平震度)と、非常に大きな地震力に対してはしなやかさでそれをやり過ごすことができる変形能力(塑性率)が必要である。図-3 は、鳥取県西部地震で観測された地震動に対して構造物に生じる損傷を無損傷から軽微な損傷(応答塑性率で 2)にとどめるために、構造物に与えなければならない降伏水平震度と、鳥取県で管理する橋梁の RC 橋脚の耐震補強前●・後○(計画も含む)のそれを比較したものである。地震動の観測地点に架橋されていると仮定して図を眺めると、江府と米子で観測された程度の地震動であれば、耐震補強された RC 橋脚は地震によく耐えていることがわかる。また、補強されていない RC 橋脚ではかなり大きな損傷が生じる可能性があったこともわかる。なお、日野の観測地点は鶴ノ池のほとりの堆積層のある場所に設置されていること、周辺の被災状況から日野町全体に生じた地震動とは異なると考えられている。

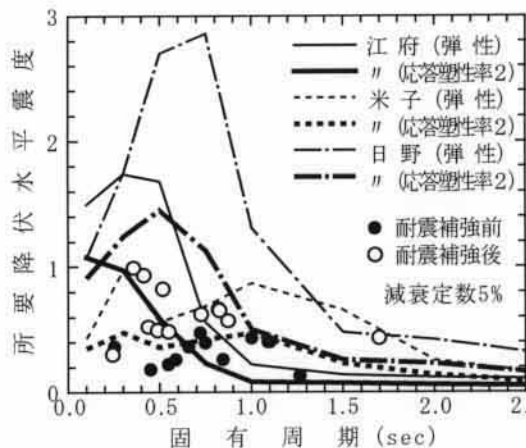


図-3 構造物に与える必要がある降伏水平震度(減衰定数 5%)

鳥取県西部地震の地震動特性と橋梁構造物への影響

1. 鳥取県西部地震の大きさ (図-1参照)

地震の大きさを表す量として震度やマグニチュードが良く用いられる。震度とマグニチュードは、照明器具の照度と光度に相当する。照度は、光があたる面での明るさを表す量である。これを震度に置き換えると、震度は、地震動が観測される点での地震動の強さを表す量であるといえる。光度は、光源である照明器具が有するエネルギー量の大小を表す量である。これをマグニチュードに置き換えると、マグニチュードは、震源が有するエネルギー量の大小を表す量であるといえる。すなわち、震源の大きさ(地震の規模)をマグニチュードで、震源から生じる地震の波(地震動)の強さを観測地点ごとに表したものを震度という。

ある地震が起きたときに、その震央からちょうど△キロメートル離れたところに地震計があったとする。その地震計で観測される地震動の最大震幅Aは、地震の規模が大きければ大きな値が、地震の規模が小さければ小さな値が観測されるであろうという考えにもとづいて定義されたのがマグニチュードである。しかし、地震計にはいろいろな特性を有する地震計があり、用いる地震計によって観測される地震動の最大震幅も異なるため、現在、世界中で数種類のマグニチュードが使用されている。日本で用いられているのは、気象庁マグニチュードである。

地震は断層が動くことによって起こるため、地震の大小は、地震をおこした断層の面積の大小によって決まるといえる。マグニチュードは、震央からの距離とそこで観測される地震動の最大震幅で定義されると述べたが、マグニチュードを決める地震動の震幅は、断層面の大きさがある程度大きくなると、たとえ断層面の大きさに大差があっても、それほど差が現れない。このため、大きな地震では、地震動の震幅の大きさだけでは、地震を引き起こすもととなった断層の大きさを表すことができない。そこで、図-1(1)に示すように、地震波の震幅の大小よりもその断層を境にして岩盤をずり動かすために働いた力(地震モーメント)の大小で地震の大きさの大小を表すことが地震学の分野では行われている。これをモーメントマグニチュードという。

地震を起こす断層面の形は不規則であるが、断層面を長方形と仮定し、鳥取県西部地震の前後に観測された地表面の動いた量(地殻変動データ)に基づいて、建設省国土地理院によって推定された鳥取県西部地震の断層を図-1(2)に示す。図より鳥取県西部地震のモーメントマグニチュード M_w を求めると、約6.6となる。これは平成7年兵庫県南部地震の6.9よりも小さく、地震モーメント M_0 の大きさでは、平成7年兵庫県南部地震の約40%となる。このように、鳥取県西部地震は、気象庁マグニチュード7.3と平成7年兵庫県南部地震の7.2よりも大きかったが、地震の際に断層を動かした力(地震モーメント)は、平成7年兵庫県南部地震の約40%と小さかったことがわかる。

2. 鳥取県西部地震で観測された地震動が構造物に与える影響

2-1 パルス波の比較（図-2参照）

震源の断層付近における地震動は、大きな破壊力をもつことが、平成7年兵庫県南部地震で観測された地震動とそれが構造物に与える影響に関する研究から明らかにされている。震源の断層付近における地震動が構造物に大きな損傷を生じさせるのは、設計地震動よりも大きな加速度を有することと、地震動波形の中に含まれている1~2秒程度の周期が長いパルス的な波形が大きなエネルギーを有していることが指摘されている。この長周期パルス波形は、構造物に与える影響が大きいことから、キラーパルスと呼ばれることがある。

鳥取県西部地震においても、震源の断層付近における地震動が、防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測地点で観測されている。図-2は、鳥取県西部地震と平成7年兵庫県南部地震および平成5年釧路沖地震の地震動波形中に含まれるパルス波の大きさを比較したものである。各観測地点で観測された地震動波形の中から最大値が生じている波を取り出し、その波と零基線で囲まれる範囲を、ここではパルスと定義している。図-2(1)は、平成7年兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台記録NS成分と鳥取県西部地震で観測された江府記録NS成分のパルス波の大きさを比較したものである。神戸海洋気象台、江府とも、耐震設計上の地盤種別は、I種地盤である。神戸海洋気象台記録NS成分のパルス波は、継続時間が0.36秒、震幅の大きさが0.83gである。同じパルス波が正負1回生じるためにかかる時間（パルス波の周期）は、0.72秒となる。江府記録NS成分のパルス波は、継続時間0.23秒、震幅の大きさが0.74g、パルス波の周期は0.46秒である。図-2(2)は、平成7年兵庫県南部地震で観測されたJR鷹取駅記録NS成分と鳥取県西部地震で観測された日野記録NS成分のパルス波の大きさを比較したものである。JR鷹取駅、日野とも、耐震設計上の地盤種別は、II種地盤である。JR鷹取駅記録NS成分のパルス波は、継続時間が0.7秒、震幅の大きさが0.65g、パルス波の周期は1.4秒である。日野記録NS成分のパルス波は、継続時間0.375秒、震幅の大きさが0.95g、パルス波の周期は0.75秒である。日野の記録は震幅の大きさだけならば、JR鷹取駅の記録よりも大きいですが、その周期は短いのでパルス波の面積としてはJR鷹取駅の記録よりも小さいことがわかる。以上より、各種の構造物に甚大な被害を生じさせた平成7年兵庫県南部地震で観測された地震動に含まれるパルス波の方が、鳥取県西部地震で観測された地震動に含まれるパルス波よりも周期が長く、パルス波の面積も大きいことから構造物に与える影響は、平成7年兵庫県南部地震において生じた地震動の方が大きいことがわかる。

図-2(3)は、平成5年釧路沖地震で観測された釧路気象台記録EW成分と鳥取県西部地震で観測された江府記録NS成分のパルス波の大きさを比較したものである。釧路気象台、江府とも、耐震設計上の地盤種別は、I種地盤である。釧路気象台記録EW成分のパルス波は、継続時間が0.14秒、震幅の大きさが0.94g、パルス波の周期は0.28秒である。江府記録NS成分のパルス波は、継続時間0.23秒、震幅の大きさが0.74g、パルス波の周期は0.46秒である。鳥取県西部地震で観測された地震動に含まれるパルス

ス波は、0.94g という大きな最大加速度が観測されたにもかかわらず、地震による被害が小さかった平成5年釧路沖地震のパルス波よりも、周期は長いが、震幅は小さく、パルス波の面積は若干大きいことがわかる。

以上より、震源の断層付近で観測される地震動に含まれているキラールパルスは、平成7年兵庫県南部地震の方が鳥取県西部地震よりも大きく、このことが、鳥取県西部地震における被害が平成7年兵庫県南部地震に比較して圧倒的に小さかった理由の1つであるといえる。

2-2 鳥取県西部地震が橋梁構造物に与える影響（図-3，図-4参照）

地震動が構造物に与える影響を直接確認する方法に震動実験がある。これは、加振台の上に対象となる橋梁もしくはその模型を置き、その加振台を鳥取県西部地震で観測された地震動で震動させるというものである。現実には、震動実験は非常に高価であり、対象とする橋梁毎にこのような実験を行うことは不可能である。このため、多数の橋梁の性質を固有周期と減衰定数で代表させ、コンピュータの中で震動実験を行うのが、図-3の上部に示す応答スペクトルである。図に示すように、いろいろな固有周期 T と減衰定数 h を有する柱を加振台の上に置き、加振台を地震動で震動させ、各柱の頭部に設置された加速度計で加振台が震動することによって生じる柱頭部の加速度応答波形を計測する。そして、各柱の加速度応答の最大値を縦軸に、柱の固有周期を横軸にとりその交点を一つの線で結んだものが加速度応答スペクトルである。これを、橋梁の減衰定数毎に作成すれば、ある地震動がいろいろな橋梁に与える影響を加速度応答の大小で比較することができる。さらに、ある橋梁に対して、いろいろな地震動から得られた加速度応答スペクトルを比較すれば着目している橋梁がどの地震動の影響を最も強く受けるかを知ることができる。なお、加速度応答に着目するのは、得られた最大加速度を重力加速度で除した震度は、橋梁の耐震設計に用いる設計水平震度に相当するからである。震度は、橋梁の自重の何割に相当する水平力が地震時に作用するかを表した無次元量であり、対象とする地震動によって橋梁に生じる震度と橋梁の耐震設計で考慮した設計水平震度の大小関係や、対象とする地震動が、性質が異なる橋梁に与える影響の大小を容易に比較できるという利点を有している。

図-3の下には、鳥取県西部地震で観測された地震動の中から、構造物に与える影響が大きいと考えられるものを、耐震設計上の地盤種別がⅠ種地盤とⅡ種地盤に関してそれぞれ2つずつ示している。(1)は江府，(2)は新見であり、観測地点の地盤種別は、Ⅰ種地盤である。(3)は米子，(4)は日野であり、観測地点の地盤種別は、Ⅱ種地盤である。ここでは、減衰定数5%、固有周期が0.1~4.0秒という性質を有する橋梁に、地震動が与える影響の大小を、鳥取県西部地震、平成5年釧路沖地震、1994年ノースリッジ地震、平成7年兵庫県南部地震で比較する。図-4(1)は、耐震設計上の地盤種別がⅠ種地盤となる鳥取県西部地震の新見記録EW成分と江府記録NS成分の弾性加速度応答スペクトルと、既往の強震記録に対する弾性加速度応答スペクトルを比較したものである。鳥取県西部地震の弾性加速度応答スペクトルに着目すると、新見記録EW成分は、固有周期0.2秒で約4g、江府記録NS成分は、固有周期0.5秒で約2gもの加速度応答を生じさせることがわかる。しかし、固有周期が0.8秒よりも長周期となる領域では加速度応答は、0.2g以下と小さい。図-3の上部に示す弾性加速度応答スペクトルは、加振台の上に置いた柱に全く損傷が生じないように大きな水平耐力を柱に与えているが、実際に建設される橋梁の水平耐力には限界がある。一般的な橋梁に大きな損傷が生じないときの固有周期は、0.5秒付近にあるが、橋梁に大きな地震動が作用し、ひびわれ等の何らかの損傷が生じると、橋梁の剛性が軟らかくなるため、その固有周期は0.5秒よりも長くなることが知られている。固有周期が長周期化した領域でも、弾性加速度応答スペクトルが大きいということは、橋梁の剛性が変化したこと

による長周期化にともなう作用地震力の低減効果が十分見込めないことを表している。このように橋梁に何らかの損傷が生じて、固有周期が長周期化することを予め考慮すると、橋梁の損傷に大きな影響を及ぼす固有周期帯は、0.8秒から2.0秒付近になると想定される。このような観点から、図を眺めると、過去に橋梁に甚大な被害を与えた1994年ノースリッジ地震の Sylmar 駐車場記録 EW 成分や平成7年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録 NS 成分の、弾性加速度応答スペクトルは、構造物の損傷に大きな影響を及ぼす固有周期帯において、固有周期の長周期化にともなう加速度応答の低減が小さいことがわかる。また、大きな加速度が観測されたにもかかわらず被害が少なかった平成5年釧路沖地震の釧路気象台記録 EW 成分の加速度応答スペクトルと、鳥取県西部地震の新見記録 EW 成分や江府記録 NS 成分のそれを比較すると、橋梁の損傷に大きな影響を及ぼす固有周期帯において、鳥取県西部地震の方が加速度応答が小さいことがわかる。図-4(2)は、II種地盤の弾性加速度応答スペクトルであり、鳥取県西部地震の米子記録 EW 成分と日野記録 NS 成分、1994年ノースリッジ地震 Sylmar 駐車場記録 EW 成分と平成7年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅 NS 記録を比較したものである。米子記録 EW 成分では、固有周期1.2秒の比較的周期の長い構造物にも1g近くの加速度応答を生じさせることがわかる。また、平成7年兵庫県南部地震の JR 鷹取駅記録 NS 成分よりは小さいものの、1.0秒から1.2秒の固有周期の構造物に与える影響は、1994年ノースリッジ地震の Sylmar 駐車場記録と同等となっていることがわかる。日野記録 NS 成分では、固有周期が0.65秒付近の構造物をピークに3g以上の加速度応答を生じさせ、既往の強震記録よりもはるかに大きい応答を生じさせることがわかる。しかし、その値は固有周期が長くなるにともなって急激に弱まり、固有周期が1.2秒以上の構造物に与える影響は、既往の強震記録よりも小さくなっている。

以上より、鳥取県西部地震が橋梁に与える影響は、過去の強震記録と比較して小さいことがわかる。

2-3 耐震補強された RC 橋脚の耐震性 (図-5 参照)

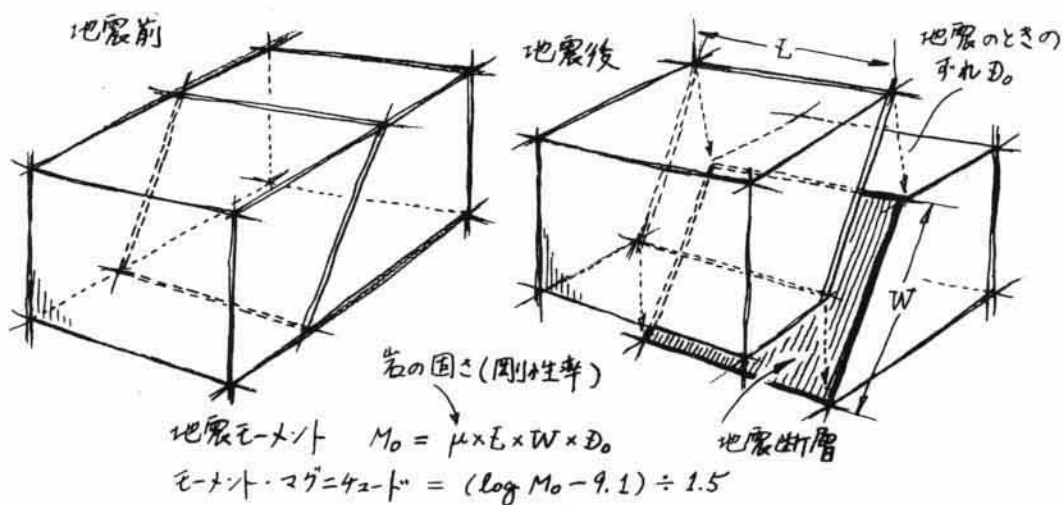
平成7年兵庫県南部地震がおきるまでは、我が国の橋梁の耐震設計は、震度法が耐震設計の基本であった。震度法は、「設計水平震度 0.2~0.3 程度の水平力、すなわち自重の約 20~30%に相当する水平力を作用させたときに生じる応力度を許容応力度以下にとどめれば、耐震設計で考慮した設計水平震度よりも大きな地震動が作用しても、降伏後の塑性変形能力で地震動をやり過ごすことができるはずだ」というものである。しかし、平成7年兵庫県南部地震は、橋梁に甚大な被害を生じさせ、震度法で弾性設計しておけば降伏後も塑性変形能力で大きな地震動に耐えられるはずだという耐震設計では不十分であることを知らしめた。その結果、平成7年兵庫県南部地震以後の耐震補強や耐震設計は、想定される大きな地震動を橋梁に作用させ、それによって橋梁に生じる塑性変形をもとめ、その塑性変形を許容される変形量以下にとどめるためには、橋梁にどれだけの降伏水平耐力を与える必要があるかを求める塑性変形を考慮した地震時保有水平耐力法へと耐震設計の基本が移行して行った。

図-5(1)は、加速度応答スペクトルと同様にコンピュータの中で震動実験を行ったものである。加速度応答スペクトルと異なるのは、加振台には固有周期だけでなく、固有周期は同じであっても降伏水平耐力が異なる柱を多数載せていることと、加速度ではなく変位を計測する点である。そのため、同じ固有周期を有する柱であっても、降伏水平耐力が小さい柱には大きな塑性変形が生じ、降伏水平耐力が大きい柱には小さな塑性変形が生じることになる。その塑性変形を降伏水平変位で除して応答塑性率をもとめ、同じ応答塑性率毎に、柱の固有周期を横軸に、降伏水平耐力を自重で除した降伏水平震度を縦軸にとり、その交点を線で結んだものが所要降伏水平震度スペクトルである。応答塑性率は、構造物の損傷の度合いを示す指標としてよく用いられている。このように、所要降伏水平震度スペクトルは、橋梁に生じる変位を、耐震設計で許すことができる塑性変形以下にとどめるために橋梁に与えなければならない降伏水平耐力の下限値を、水平震度の形で示したものである。所要降伏水平震度スペクトルを用いて、対象とする地震動によって実在する構造物に生じる損傷が、許容できる損傷レベルにあるかどうかを判定することを試みる。許容できる損傷のレベルが応答塑性率4であれば、応答塑性率4の所要降伏水平震度スペクトル上に、実際の構造物の固有周期と降伏水平震度をプロットする。このプロットした位置が、所要降伏水平震度スペクトルよりも下側にあれば、その構造物の耐力が足りないため応答塑性率が4よりも大きな損傷が生じることになる。逆にプロットされた位置が所要降伏水平震度スペクトルよりも上側にあれば、その構造物の耐力は十分であり、生じる損傷レベルは応答塑性率4よりも小さくなる。

鳥取県西部地震のI種地盤上での代表的な記録である新見記録EW成分と江府記録NS成分と、平成5年釧路沖地震の釧路気象台記録EW成分と平成7年兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS成分の所要降伏水平震度スペクトルを作成し、鳥取県内に存在するI種地盤上の橋梁の降伏水平耐力と比較した。図には、鳥取県西部地震の震源付近に建設されている橋梁も含まれている。図-5(2)は、橋梁が損傷を受けずに弾性応答(=応答塑性率1)に留まるために必要な所要降伏水平震度スペクトルである。こ

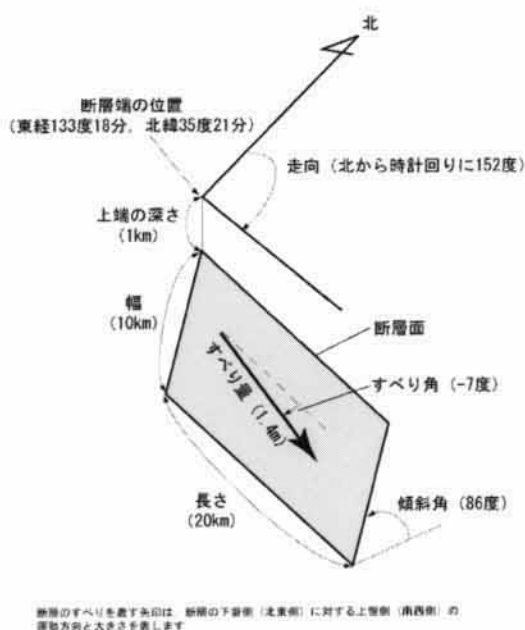
の図には、鳥取県の橋脚の耐震補強前の固有周期と降伏水平耐力をあわせてプロットしてある。耐震補強前の橋脚は上述した震度法で耐震設計されているため、塑性変形が生じることは、設計上は許されない。耐震補強する前の橋脚では、新見記録EW成分が作用すると、2基の橋脚の所要降伏水平耐力が所要降伏水平震度スペクトルよりも小さく、損傷を受けることがわかる。江府記録NS成分が作用した場合にはさらに損傷を受ける橋脚が増えることがわかる。また、平成5年釧路沖地震の釧路気象台記録EW成分や平成7年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録NS成分の所要降伏水平震度スペクトルは、ほとんどの固有周期帯で鳥取県西部地震の所要降伏水平震度スペクトルよりも大きくなっており、これらの地震によって生じる地震動が鳥取県内に存在する耐震補強前の橋梁に作用すると、何らかの損傷が生じる可能性が高いと予想される。

図-5(3)は、橋脚の応答塑性率が2に留まるために必要な所要降伏水平震度スペクトルを作成し、鳥取県内に存在する橋脚の耐震補強後の降伏水平耐力をあわせて示したものである。1基の橋脚を除いて、新見記録EW成分と江府記録NS成分よりも上側に橋脚の耐力があるため、これらの橋脚の損傷は応答塑性率で2以下となる。しかし、仮にこれらの橋脚に平成5年釧路沖地震の釧路気象台記録EW成分が作用した場合には、半分の橋脚に応答塑性率2よりも大きな損傷が生じ、さらに平成7年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録NS成分が作用した場合には、1基を除く全ての橋脚に応答塑性率2よりも大きな損傷が生じることになる。実際には、平成7年兵庫県南部地震以降出された復旧仕様や平成8年道路橋示方書で耐震設計された橋脚は、応答塑性率で3~6程度が許容できる損傷レベルとなることが多い。図-5(3)には、平成7年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録NS成分の応答塑性率が6となるための所要降伏水平震度スペクトルもあわせて示した。耐震補強された橋脚は、1基を除き、この応答塑性率が6となる所要降伏水平震度スペクトルより、大きな耐力を有しており、十分な補強効果が得られているといえる。



- (1) 断層の大きさを表すマグニチュード(モーメント・マグニチュード)の概念
 (島村英紀著, 地震はどこに起こるのか, 講談社, 図II-2を抜粋)

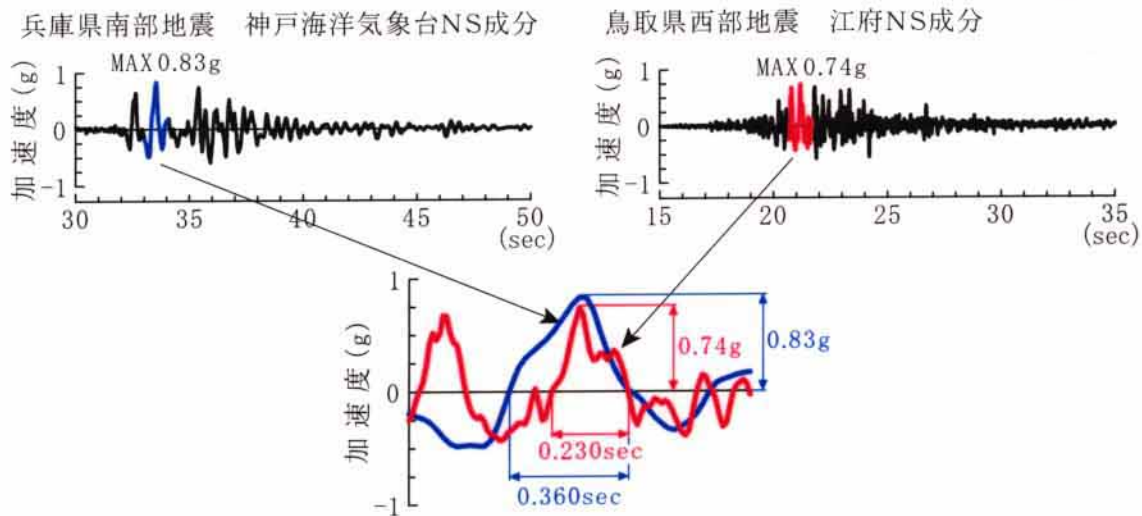
断層モデルの概念図



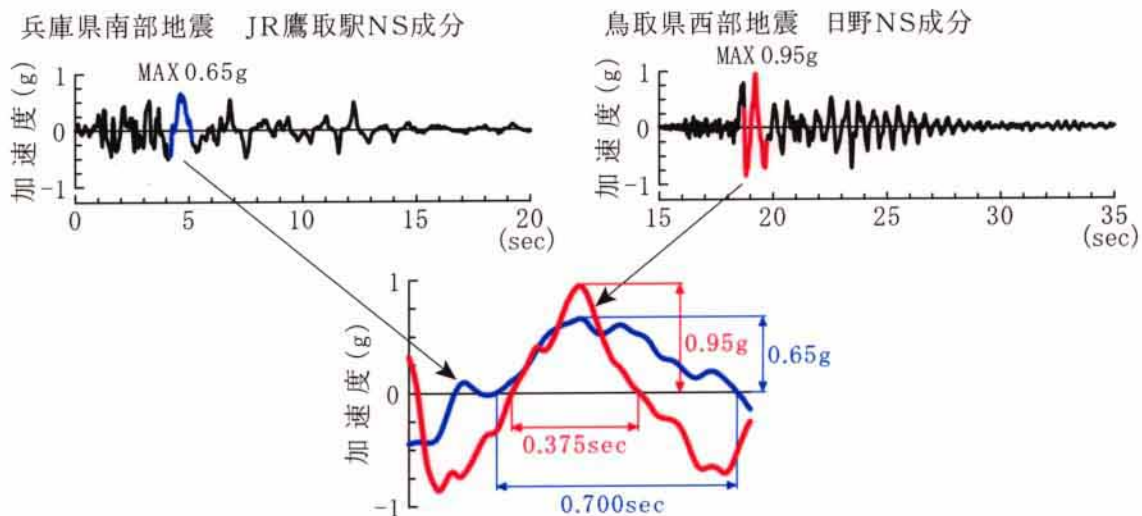
断層の形状：長方形と仮定
 断層の向き：ほぼ北北西-南南東方向
 断層の大きさ：水平方向約 20km, 上下方向約 10km
 傾斜角：86° (北東から南西の方向に傾き下がるほぼ垂直な断層)
 断層上端深さ：約 1 km (断層の北端は、米子市の南西約 10km に位置する。)
 断層運動：ほぼ純粋な左横ずれ(すべり角 7°)で、すべり量は約 1.4m
 モーメントマグニチュード M_w ：約 6.6

- (2) 建設省国土地理院によって観測された平成 12 年鳥取県西部地震の断層モデル概念図 (熊木, 鷺谷:平成 12 年 10 月 6 日鳥取県西部地震の断層運動を解明, <http://www.gsi-mc.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2000/1007-2.htm>, 建設省国土地理院, 2000.10.7 より抜粋)

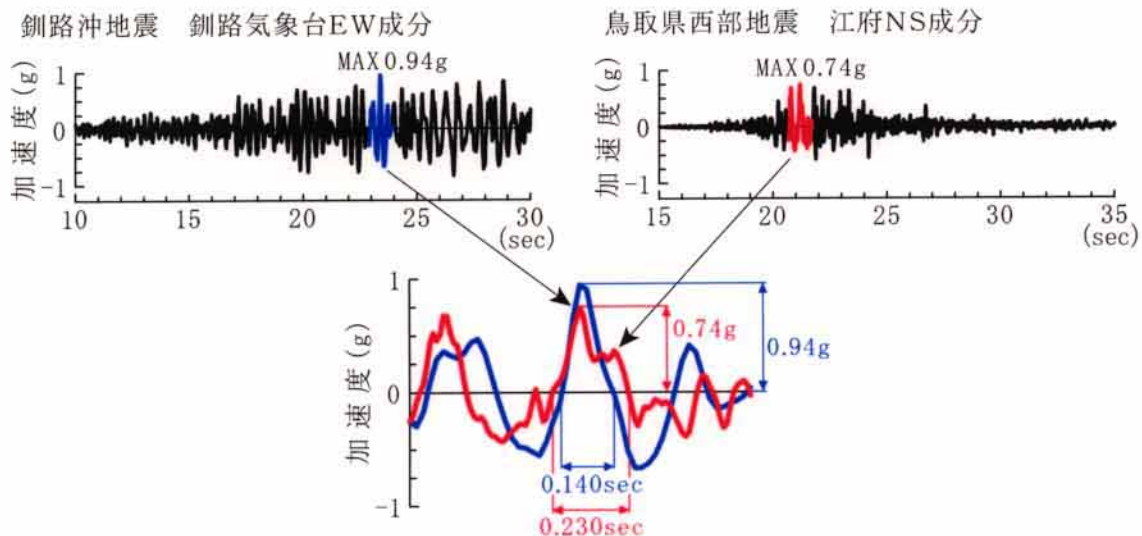
図-1 鳥取県西部地震における断層の大きさ



(1) 兵庫県南部地震と鳥取県西部地震の比較 I種地盤

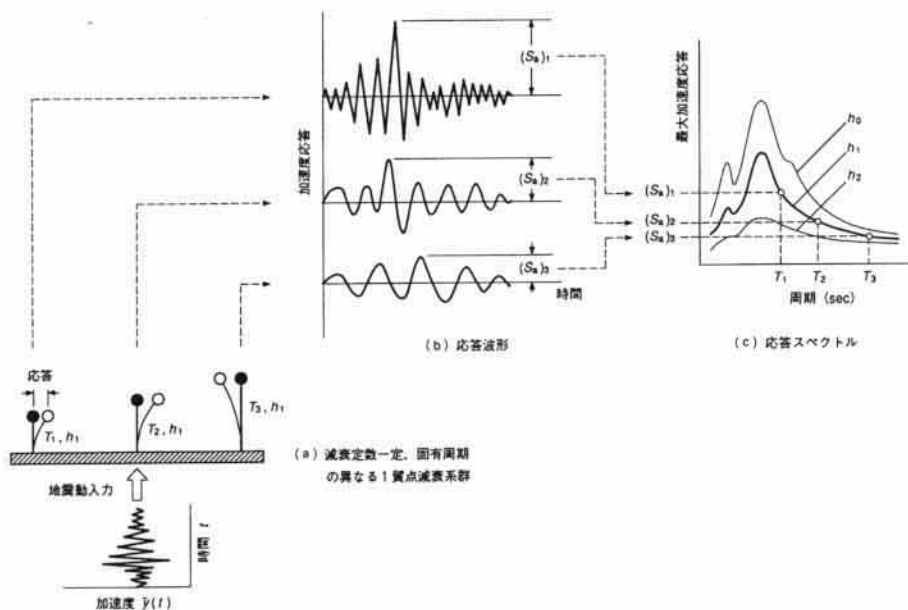


(2) 兵庫県南部地震と鳥取県西部地震の比較 II種地盤



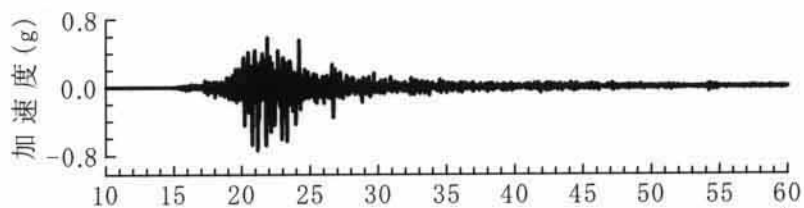
(3) 釧路沖地震と鳥取県西部地震の比較 I種地盤

図-2 構造物に与える影響が大きいパルス波の大きさの比較

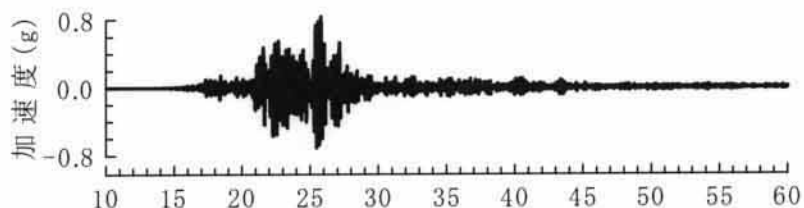


弾性加速度応答スペクトルの概念

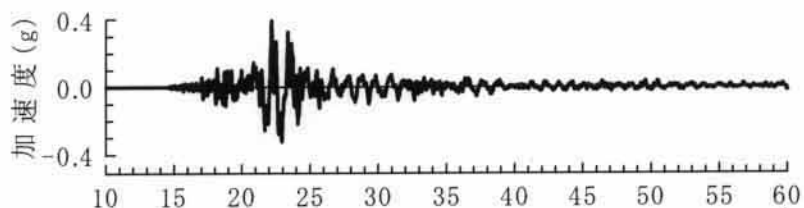
(大崎順彦著 震・地震動のスペクトル解析入力, 鹿島出版会, 図7-11を抜粋)



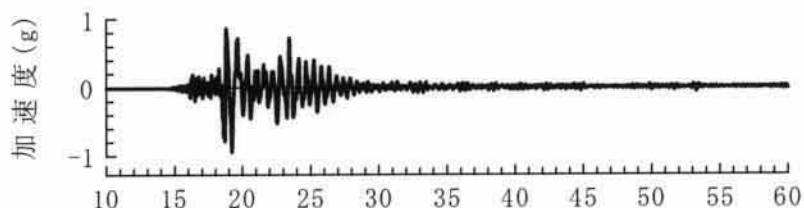
(1) 江府 NS成分 最大加速度-0.74g 《I種地盤》(sec)



(2) 新見 EW成分 最大加速度0.83g 《I種地盤》(sec)

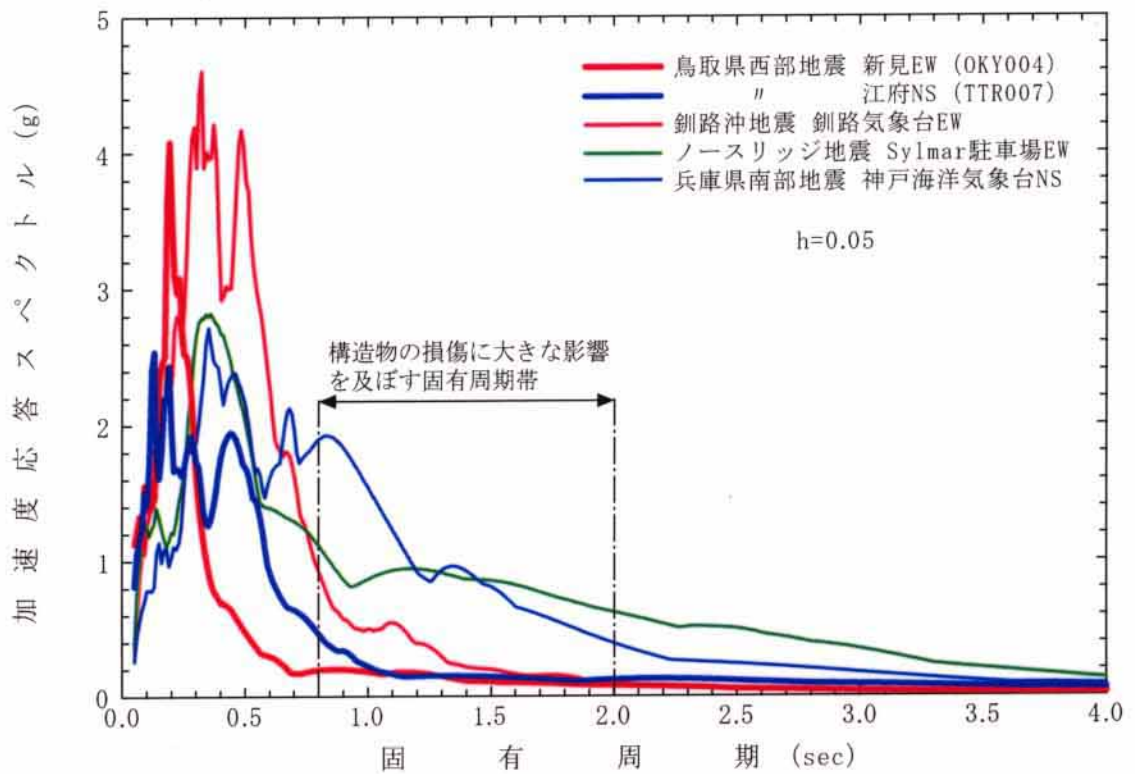


(3) 米子 EW成分 最大加速度0.39g 《II種地盤》(sec)

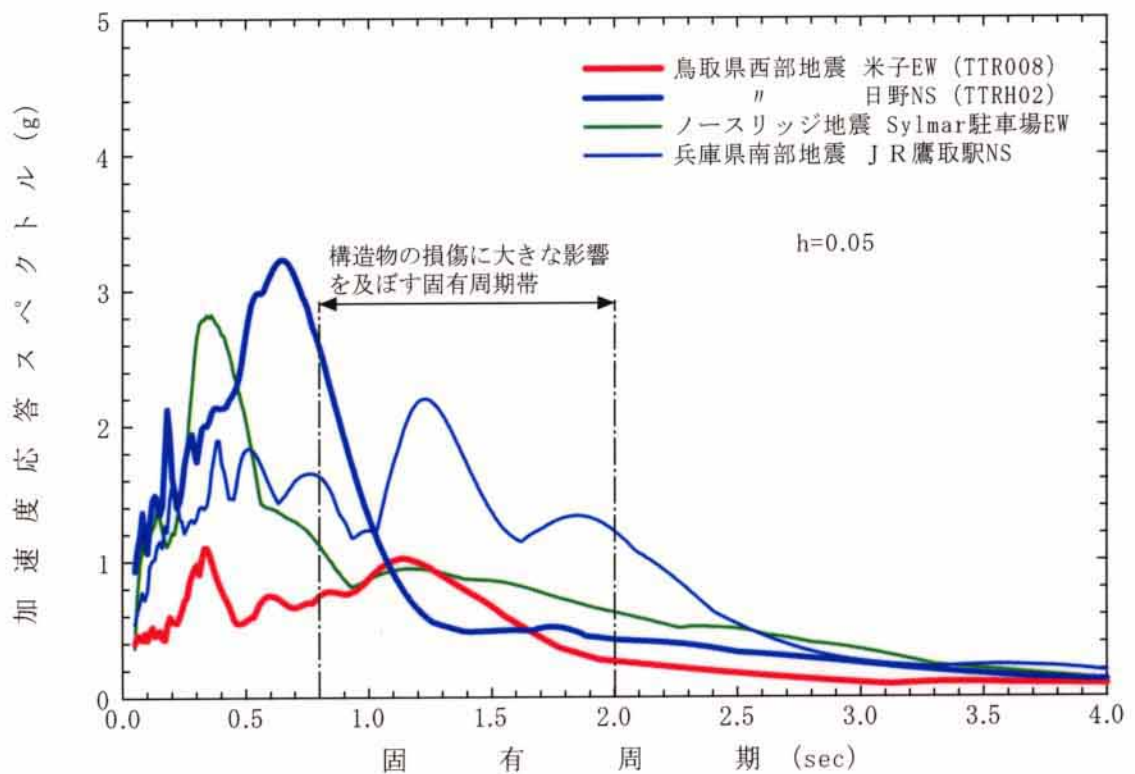


(4) 日野 NS成分 最大加速度-0.95g 《II種地盤》(sec)

図-3 弾性加速度応答スペクトルの概念と観測地震動

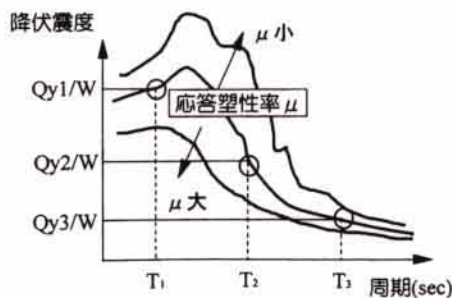
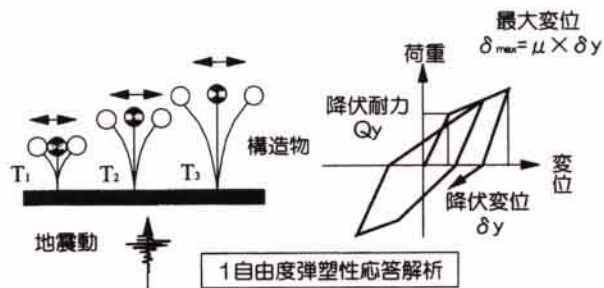


(1) I 種 地 盤



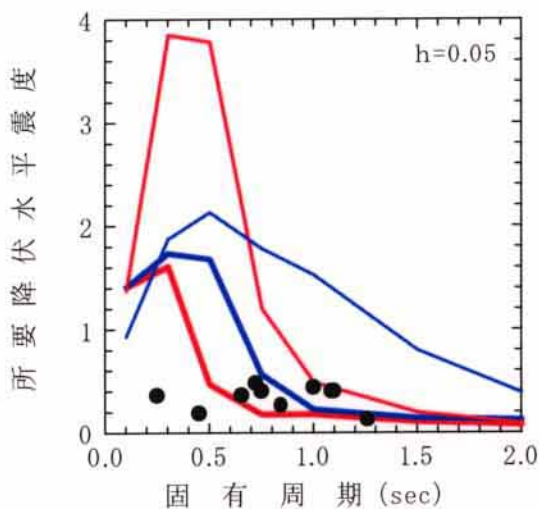
(2) II 種 地 盤

図-4 弾性加速度応答スペクトルの比較

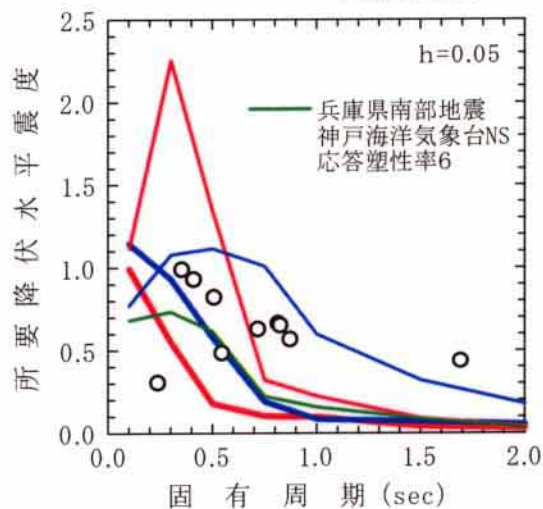


(1) 所要降伏水平震度スペクトルの概念
(鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計, 付属図 6.1.1 を抜粋)

- 鳥取県西部地震 新見EW (OKY004)
- " 江府NS (TTR007)
- 釧路沖地震 釧路気象台EW
- 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台NS
- 耐震補強前
- 耐震補強後



(2) 橋脚が弾性応答に留まるために必要な橋脚の降伏水平耐力



(3) 橋脚の応答塑性率が2に留まるために必要な橋脚の降伏水平耐力

図-5 所要降伏水平震度スペクトルの比較