

建物応答の観点による地震動の評価指標に関する研究

名古屋大学環境学研究科都市環境学専攻博士前期課程2年
飛田研究室 鎌田 文史

1. 序論

建物に与える地震動の影響の大きさを簡便な指標で適切に把握することができれば、地震動予測の第一義的な資料として大変有益な情報を与える。しかし、ある単一の量で全ての地震動の特性を代表させることは困難である。従来は、建物の被害に最も影響を与えると考えられる地震動強さが指標として多く用いられてきた。地震動強さの指標には地盤地表の最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)、計測震度、SI値などがある。一般にPGAは短周期の建物、PGVは長周期の建物の設計に際して参考にされている。また、計測震度とSI値はそれぞれ戸建住宅やライフラインの地震被害と対応がよいとされ、建物の種類によって地震被害と相関の高い指標が使分けられているのが現状である。この2つの指標はある程度、建物の周期特性も考慮されているが、建物応答は地震動強さだけでなく地震動の卓越振動数や継続時間による影響も大きく受けるため、それぞれの特性を適切に把握する必要がある。例えば、地震動の卓越振動数と建物の固有振動数とが近接した場合、建物の応答は増大する。また、高層鉄骨建築物などの減衰が小さい建物の場合、弱い振動でも継続した入力があれば、共振によって振幅は増大する。このため、地震動の卓越振動数と継続時間も重要な指標であると考えられる。

そこで、本論では、建物の応答に関連する地震動の3要素として、地震動の強さ、卓越振動数、継続時間の3つを取り上げ、これらを適切に評価しうる簡便な指標の検討を行う。そして、多点の強震記録に基づいて3要素の特性を明らかにした上で、それらが建物応答に及ぼす影響について検討を行う。

2. 強震観測記録

本論では、大都市圏強震動総合観測ネットワークシステム¹⁾、K-NET、KIK-netで得られた17地震($4.1 \leq M_j \leq 7.3$)の強震記録を用いて分析を行った。なお、表1に示す4つの地震の記録を用いた検討結果を中心に論じる。

3. 地震動の強さ

ここでは、地震動の強さ指標の相互関係を把握すると共に距離減衰特性について分析する。「強さ」の指標として、最大加速度、最大速度、計測震度、SI値を用いた。さらに、計測震度算出時において、加速度波形に振動数領域で施すフィルター $(1/f)^{1/2}$ により、加速度と速度の中間の振動数特性を持つことをふまえ、 $(PGA \times PGV)^{1/2}$ も指標として用いることにした。ここでは、表1に示す震源距離や深さの異なる4つの地震を対象とした。図1に地震動強さ指標の相互関係を回帰式とあわせて示す。最大加速度、最大速度は時刻歴3成分合成値、水平最大速度は時刻歴水平2成分の合成値である。

図1より、地震毎に見ればどの指標間の相関も比較的高いが、回帰式は地震毎に異なっている。また、最大加速度と計測震度の相関(図1.a)については遠方の地震で相関が低い。遠方の地震ほど、同じ最大加速度に対して計測震度は大きく評価されており(図1.a)、逆に、同じ最大速度に対しては計

表1 地震の諸元

日付	震源地	Mj	震央距離(km)	震源深さ(km)
1998.4.22	岐阜・三重県境	5.2	37	10
1999.11.29	愛知県西部	4.8	8	50
2000.10.6	鳥取県西部	7.3	330	11
2001.3.24	芸予	6.7	409	51

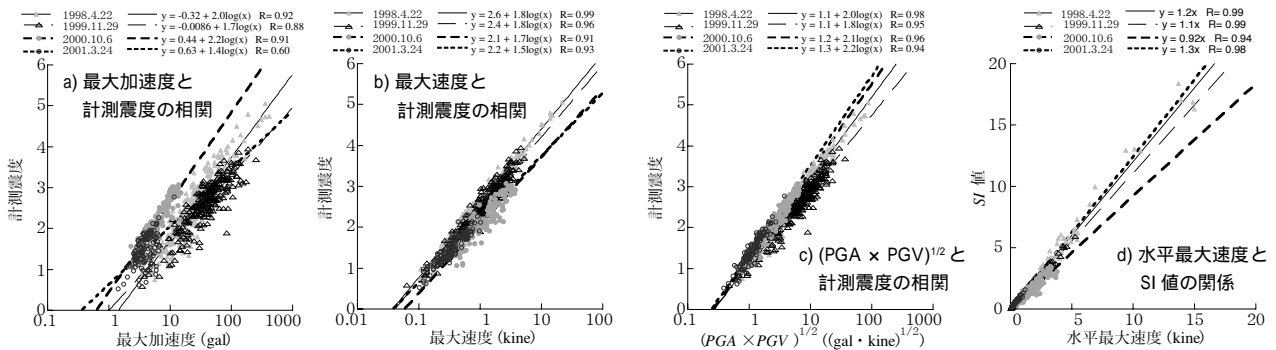


図1 地震動強さ指標の相互関係

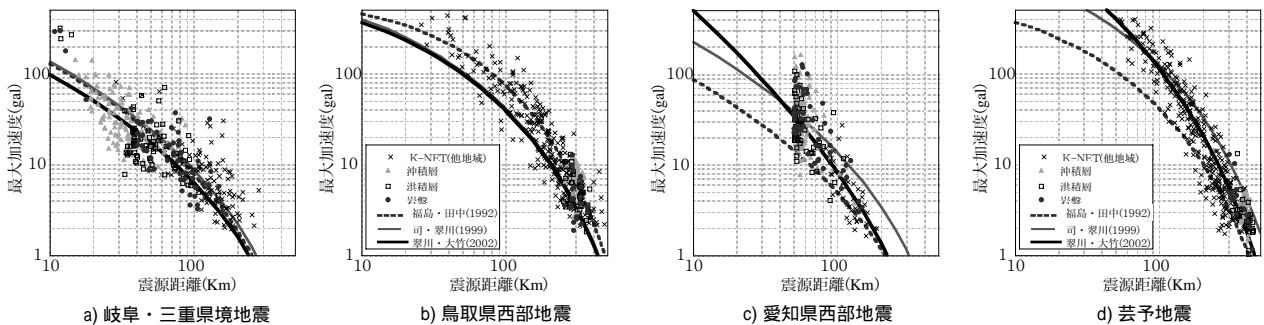


図2 最大加速度と震源距離の関係

測震度は小さく評価されている(図1.b)。これは地震動の振動数成分の影響と考えられる。これに対し、 $(PGA \times PGV)^{1/2}$ と計測震度の相関(図1.c)は地震による差はほとんどない。これらの結果と、計測震度が一般戸建て住宅の地震被害と相関が高いことを考慮すると、最大加速度、最大速度に比べ $(PGA \times PGV)^{1/2}$ のほうが、戸建て住宅の地震被害に対する地震動評価指標として適切であると言える。 SI 値と水平最大速度の相関(図1.d)は地震毎に見れば相関は高く、鳥取県西部地震を除けば両者はほぼ等しい指標と言える。しかし、鳥取県西部地震が他の地震に比べて、回帰式の傾きが小さくなっている。これは、 SI 値の積分区間(0.1~2.5秒)よりも長周期側のパワーが卓越するためと考えられる。したがって、 SI 値がライフラインの地震被害と相関が高いことを考慮すると、最大速度で被害を推定した場合、長周期が卓越するような地震では被害を過大評価する可能性があるといえる。

次に、従来よく用いられている距離減衰式と実測値との対応について検討を行う。観測記録の最大加速度と震源距離の関係性を福島・田中式²⁾、司・翠川式³⁾、翠川・大竹式⁴⁾とあわせて図2に示す。なお、最大加速度は水平2成分の相加平均であり、司・翠川式、翠川・大竹式において鳥取県西部地震、岐阜・三重県境地震を地殻内地震、芸予地震、愛知県西部地震をプレート内地震として式を適用した。

図2より、4地震とも地盤種別による距離減衰特性に明確な違いは見られない。また、岐阜・三重県境地震、鳥取県西部地震のような震源が浅い地震では、 M_j の大小にかかわらず福島・田中式と良い対応を示している。これに対し、愛知県西部地震、芸予地震のような震源が深い地震では観測値は福島・田中式よりも大きくなった。地震によるこのような違い

は他の地震でも共通して現れており、西村・堀家⁵⁾によっても指摘されている。一方、司・翠川式や翠川・大竹式との対応は良い。これは、司・翠川式と翠川・大竹式が震源深さや地震タイプによる影響を考慮しているためだと考えられる。

4. 地震動の卓越振動数

大量の地震動記録の卓越振動数をフーリエスペクトル等により評価することは多大な労力がかかり煩雑である。そこで、本論では簡易的に地震動の卓越振動数を評価するために等価卓越振動数を用いた。等価卓越振動数は最大加速度(PGA)と最大速度(PGV)の比($PGA/PGV/2$)より求めた。但し、 PGV は PGA 発生時刻の前後2秒間以内での値を用いた。

地盤種別毎の等価卓越振動数の頻度分布を図3に示す。図3では比較条件を統一するために東海3県と長野県、滋賀県、静岡県で得られた記録のみを用いた。

図3より、鳥取県西部地震や芸予地震のように M_j が大きく、震源距離が大きい地震ほど、低振動数成分が相対的に多く含まれていることが分かる。しかし、震源位置が濃尾平野からほぼ等距離にある鳥取県西部地震と芸予地震においても差があり、 M_j の他に伝播経路、断層破壊過程が関係していると考えられる。また、沖積層の占める割合が低振動数になるほど増え、沖積層のような地質年代が新しい地盤ほど長周期成分を増幅する傾向が明確に見られた。そこで、図3の頻度分布で同様の傾向を示す岐阜・三重県境地震と愛知県西部地震の等価卓越振動数の分布を図4に、濃尾平野周辺の表層地質の分布を図5に示す。図4では両地震の振動数分布は概ね対応している。地質年代が古い地域では卓越振動数は高く、沖積平野部に対応する地域では低くなっており、地震動の卓越振動数には表層地質が大きく影響していると考えられる。

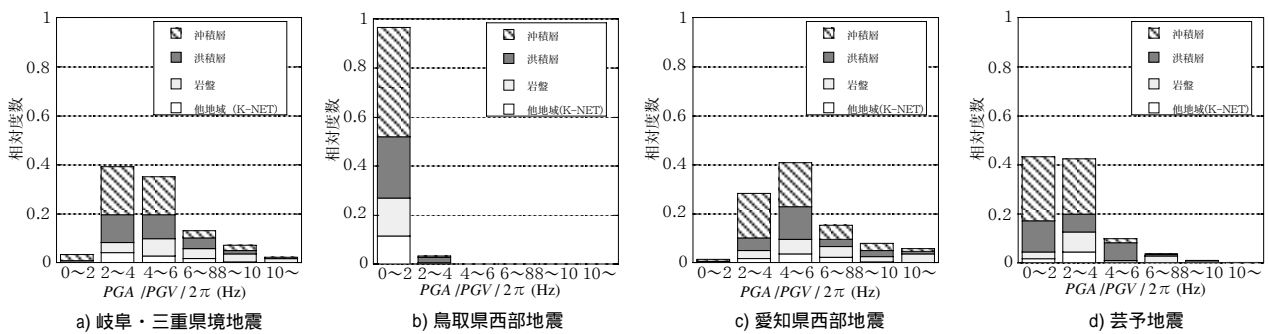


図3 等価卓越振動数の地盤種別毎の分布

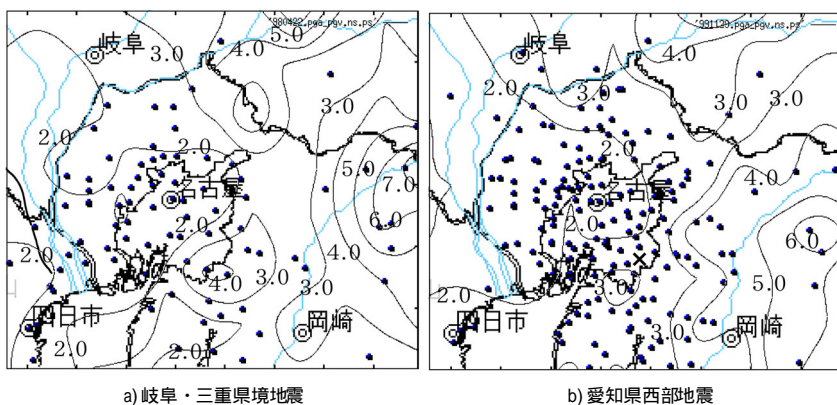


図4 等価卓越振動数(Hz)の分布(黒丸は観測点、×は震央)

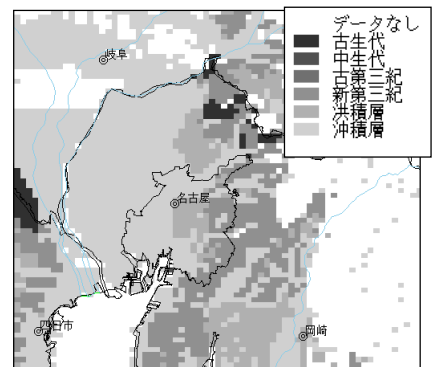


図5 濃尾平野周辺の表層地質

4. 地震動の継続時間

a) 振幅に着目した継続時間

ここでは、強震記録の包絡波形の最大振幅を基準とし、その % の振幅が最初に生じる時刻を t_1 (秒)、最後に生じる時刻を t_2 (秒) として、継続時間を $t_2 - t_1$ (秒) と定義した。ここでは、様々な機関の記録を用いているため観測条件 (ポストトリガー時間) が十分でなく、強震記録の記録長が不十分なケースが多いため、 $n=50$ を採用した。

鳥取県西部地震について、速度波形に基づく継続時間の分布を図6に、これと比較するために基盤深さを図7に示す。図より、愛知・三重県境～名古屋市西部～名古屋市南部にかけての堆積平野が厚く堆積した場所で継続時間が長くなっていることが分かる。

b) 経時特性に着目した継続時間

上述のことから、堆積平野が継続時間に大きく影響を与える可能性があることが分かった。しかし、堆積平野による継続時間の伸張効果は、表面波の生成等により主要動に比べて後続波に大きく影響すると予想される。そこで、ここでは波形の経時特性をJennings型包絡形⁶⁾でモデル化し、継続時間を立ち上がり部、振幅一定部、減衰部の3種類で定義し、それぞれの継続時間をJennings型包絡形と観測波の包絡形がフィッティングするように同定する。そして、同定したそれぞれの継続時間とパラメータとの関係について検討を行う。なお、ここで着目したパラメータは、堆積平野の特性に加えて、継続時間に影響すると考えられる M_j と震源距離である。

Jennings型包絡形を式(1)に示す。

$$E(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_a \\ A(t-t_a)^2 / (t_b-t_a)^2 & t_a \leq t \leq t_b \\ A & t_b \leq t \leq t_c \\ A \exp\{-B(t-t_c)\} & t_c \leq t \leq t_d \end{cases} \quad (1)$$

$t_b - t_a$ 、 $t_c - t_b$ 、 $t_d - t_c$ をそれぞれ立ち上がり部、振幅一定部、減衰部の継続時間と呼ぶ。まず、佐藤ら⁷⁾を参考にして、最大値で基準化した観測包絡形を作成する。そして、図8に示す条件を満足する全ての未知パラメータ t_a 、 t_b 、 t_c 、 B に対して、観測包絡形とJennings型包絡形との残差を求め、最小となるパラメータをモンテカルロ的に探す。なお、 B は観測包絡形の t_c から終了時刻までの記録に対して非線形最小2乗法を用いて求めている。

以上の方法で同定したパラメータで定まるモデル包絡形において、 $t_c - t_a$ を主要動部 (立ち上がり部 + 振幅一定部)、 A の1/10となる時刻を t_d としたときの $t_d - t_c$ を減衰部の継続時間と定義して検討を行う。

KIK-netの観測点は硬質岩盤を選んでいる上に、深さ100m以上の観測井の井戸底 (以下、地中) にも強震計を設置している。そのため、地中の

記録は堆積層の影響、つまり、堆積平野による継続時間の伸張効果を比較的受けていないと考えられる。そこで、ここではまず、KIK-netの地中の記録を用いて継続時間を求め、 M_j と震源距離が継続時間に及ぼす影響について検討を行った。なお、用いた記録は加速度波形と速度波形の水平2成分であり、それぞれ独立に扱った。用いた強震記録の M_j と震源距離の関係を図9に、加速度波形の継続時間と M_j 、及び震源距離の関係をそれぞれ図10、図11に示す。なお、図10は、図9より、 M_j と震源距離の間に正の相関があるため、 M_j の大小に関わらず記録が得られている震源距離50km以上200km以内の観測点の記録のみ用いて図示してある。図10より、 M_j が大きくなるほど継続時間が長くなる傾向が主要動部、減衰部ともあることが分かる。また図11より、主要動部、減衰部とも継続時間に震源距離依存性があり、減衰部のほうがその傾向が強いことが分かる。以上の傾向は速度波形の継続時間についても同様に見られた。

次に、鳥取県西部地震について、堆積平野内の地表と、KIK-netの地中で得られた加速度及び速度波形の継続時間と震源距離の関係を図12に示す。地中に比べ平野内の地表の継続時間はある程度伸張しており、主要動部よりも減衰部のほうが、加速度波形よりも速度波形のほうがその傾向が強いことが分かる。この傾向は他の地震でも同様に見られた。したがって、堆積平野による継続時間の伸張効果は減衰部の継続時間に大きく影響を与え、特に速度波形で著しいため、卓越周期の長い表面波の影響を大きく受ける超高層建物にとっては、その影響を無視できないと考えられる。

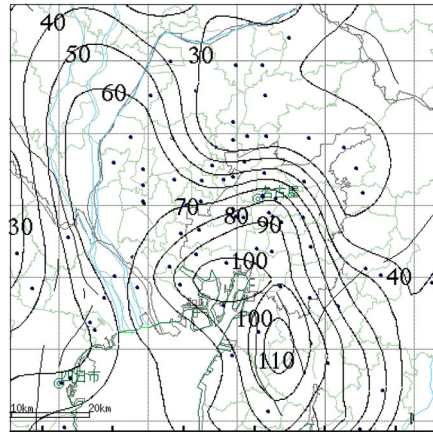


図6 濃尾平野の継続時間分布

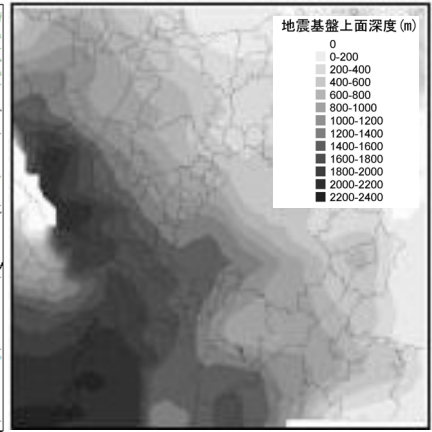


図7 重力解析に基づく基盤深度

条件

1. 最大値は振幅一定部で生じる。
2. $t_b - t_a$ は $t_c - t_b$ の1/3倍
立ち上がり部は概して感度が小さいため、佐藤ら⁷⁾と同じ条件を付与した。
3. $0.7 \leq A \leq 1.0$
振幅一定部と減衰部の切り分けを行い、主要動部のパルス性を過小評価しないために最大値 A に関して条件を付与した。なお、 A は同定の際、0.05 づつ変化させている。

図8 同定時の条件

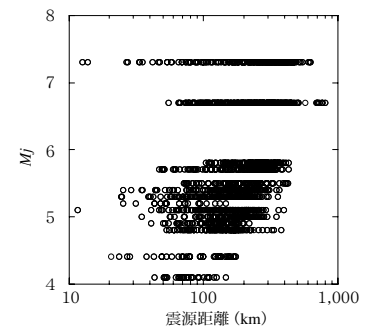


図9 マグニチュードと震源距離の関係

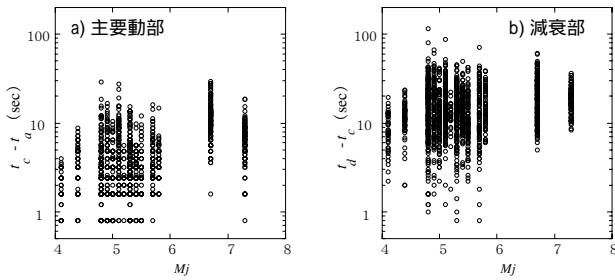


図10 継続時間とマグニチュードの関係

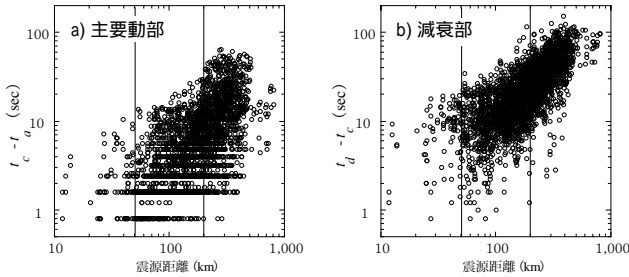


図11 継続時間と震源距離の関係
(縦線は震源距離50kmと200kmを表す)

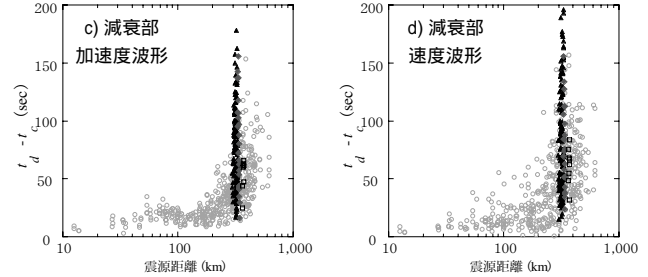
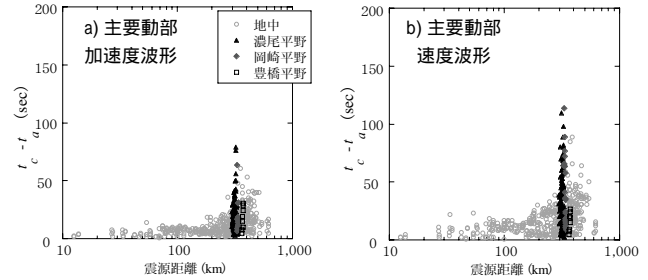


図12 堆積平野による継続時間の伸張効果の影響

5. 建物応答に及ぼす影響

上述してきた地震動の特性が建物応答に与える影響について検討を行う。ここでは名古屋大学内に立地するS造10階建を検討対象建物とし、地表で観測された波形に伝達関数を乗じて建物の応答を推定した。図13に強震記録から求めたS造10階建の伝達関数を示す。

東海地域で観測された各地点の加速度波形に、図13で示した伝達関数を乗じて建物の応答波形を求め、その最大値と地盤の加速度波形の最大値の比（以下、増幅度）を求める。なお、ここでは地盤の硬軟による相互作用効果の変動は無視した。鳥取県西部地震の観測記録から求めたS造10階建の増幅度分布を図14に示す。鳥取県西部地震は、図3.bより2Hz以下の低振動数成分が卓越した地震動であり、S造10階建の固有振動数（図13）と近接するため、増幅度が非常に大きくなっていることが分かる。しかし、地域によって値そのものにはばらつきがある。そこで、図15に濃尾平野の東に位置する岩盤上、及び名古屋市南部に位置する沖積層上における観測波形と応答波形を示す。なお、波形は観測記録の最大値で基準化しており、応答波形の最大値は増幅度を表す。図より、岩盤上に比べ沖積層上の応答波形は大きく増幅しており、後続波で最大値が生じていることが分かる。これは、対象建物の減衰が小さく、定常状態に達するためには長い継続時間を必要とすることが要因と考えられる。したがって、低減衰建物の共振時過渡応答の最大値を考える際には、入力地震動の継続時間が非常に重要な要素となると言える。

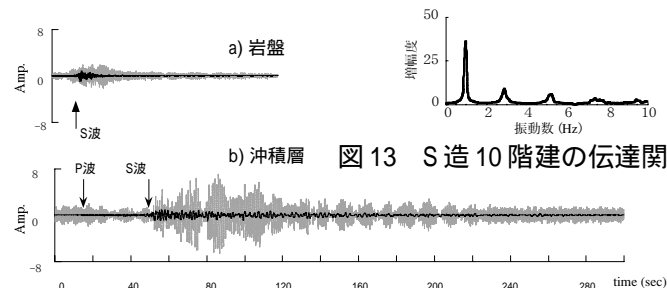


図15 岩盤及び沖積層上の観測波形と応答波形

4. 結論

本論では、多点の強震観測記録に基づき、地震動の特性を表す3要素の傾向を明らかにした。また、3要素が建物の応答挙動に与える影響について検討を行った。その結果、以下のような知見が得られた。①震源の深い地震と浅い地震で距離減衰の傾きが異なる傾向が認められる。②卓越振動数は地震の規模が大きく、震源距離が大きいにほど低振動数が卓越し、さらに、平野内では堆積層の影響で低振動数化する傾向がある。③主要動部、減衰部の継続時間もMj、及び震源距離依存性がある。また、堆積平野の影響も受け、特に減衰部の伸長効果が大きい。④建物の応答は、地震動の卓越振動数の影響を強く受けており、低減衰建物では、継続時間の影響が大きい。

また、この他にも地震動特性が応答スペクトルの減衰補正係数に及ぼす影響についても検討しており、④と同様の結果が得られていることを追記しておく。

建物の耐震設計や地震防災においては、これらの指標を総合的に用いた検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 飛田 潤・福和伸夫・中野 優・山岡耕春：オンライン強震波形データ収集システムの構築と既存強震計・震度計のネットワーク化、日本建築学会技術報告集、第13号、pp.49-52、2001
- 2) 福島美光・田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂、地震学会講演予稿集、No.2、p116、1992
- 3) 司 宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第523号、pp.63-67、1999.9
- 4) 翠川三郎・大竹 雄：震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.609-614、2002.
- 5) 西村利光・堀家正則：深い地震の距離減衰式、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.57-58、2001
- 6) Jennings P. C., Housner, G. W. and Tsai, N. C. : Simulated earthquake motions, E. E. R. L., Pasadena, 1968.
- 7) 佐藤智美・片岡正次郎・奥村俊彦：K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.615-620、2002.

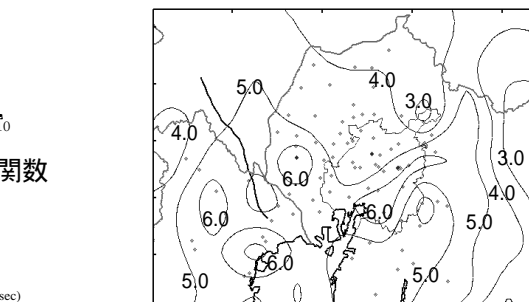


図14 鳥取県西部地震時のS造10階建の増幅度分布