

建物応答の観点から見た地震動指標に関する検討

～地震動強さ・周期・継続時間の3要素～

INDEXES OF SEISMIC GROUND MOTION FROM THE VIEW POINT OF STRUCTURAL RESPONSE:

Amplitude level, predominant period and duration

大河内靖雄*1 鎌田丈史*2 福和伸夫*3 中野 優*4 飛田 潤*5

Yasuo OKOCHI, Hirofumi KAMADA, Nobuo FUKUWA, Masaru NAKANO and Jun TOBITA

This paper discusses on the three elementary characteristics of seismic ground motion, namely the amplitude level, the predominant period and the duration, and shows influences of them on the structural response. We used the dense seismic observation records obtained in Tokai district. Spatial attenuation of maximum acceleration depends on the depth of hypocenter. Predominant period and duration depend on soil condition as well as magnitude and epicentral distance of earthquakes. The structural maximum response is mostly influenced by the amplitude level and the predominant period. The structural response of high-rise buildings is also strongly affected by the duration of ground motion.

Keywords: Amplitude level, Predominant Period, Duration, Dense seismic observation, Structural response

・ 地震動強さ、卓越周期、継続時間、高密度強震観測、建物応答

1. はじめに

地震動の特性を的確に把握することは、耐震設計や地震防災にとつて非常に重要である。しかし、複雑な地震動の特性を正確に把握し、簡便な指標で表現す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、構造物の種類によって地震被害と相関の高い指標が使い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、建物被害は地震動強さだけでなく地震動の卓越周期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、地震動の卓越周期と建物の固有周期とが近接した場合、構造物の地震応答は増大する。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、地震動の卓越周期と継続時間も重要な指標であると考えられる。

本論では、地震動が構造物の応答に及ぼす3要素として、地震動の強さ、卓越周期(振動数)、継続時間の3つを取り上げ、これらを簡便な指標で評価を試みる。その指標を用いて、東海3県下の高密度強震観測網で得られた多点の強震記録に基づいて3要素の特性を明らかにし、さらに実際の建物応答に及ぼす影響を検討した。ここでは、東海地域で整備された大都市圏強震動総合観測ネットワークシステム¹⁾で

収集された記録にK-NETの記録を加えて分析を行った。

2. 強震観測記録

東海版大都市圏強震動総合観測ネットワークシステム¹⁾では自治体・ライフライン企業・大学の既存の地震観測システムをネットワーク化して波形記録を収集・管理しており、東海3県に約200点、愛知・岐阜にまたがる濃尾平野で約80点、名古屋市内で約50点の観測点がある。このシステムで収集した記録に加え、システム稼動以前に当研究室で収集した記録も用いる。本論では、これら東海3県の記録の分析を軸に考察を進め、特に濃尾平野内の特性に着目する。ただし、K-NETの記録については東海3県以外の観測点も検討の対象とした。

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、計測震度算出時には加速度波形に振動数領域で $(1/f)^{1/2}$ で表されるフィルターをかけており、加速度と速度の中間の振動数特性を抽出していることになる。そのため、ここでは $(PGA \times PGV)^{1/2}$ 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。なお震源距離は名古屋大学を基準とした。図1に地震動の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。K-NETについては得られた記録全てを用いた。図1より、地震毎に見

*1 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻・大学院生

*2 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻・大学院生

*3 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博

*4 名古屋大学大学院環境学研究科・助手・博士(理学)

*5 名古屋大学工学部社会環境工学科・助教授・工博

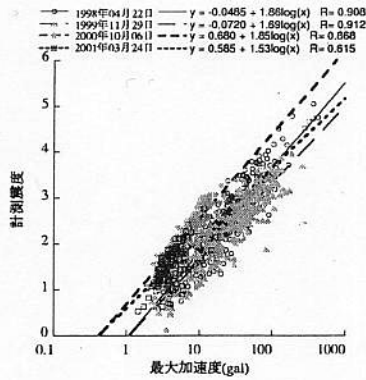
Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Nagoya Univ.

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

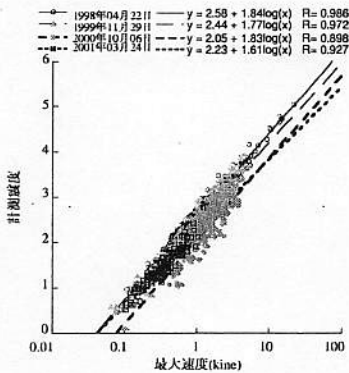
Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Assist. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Sci.

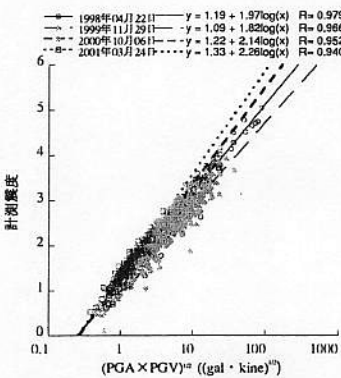
Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, School of Eng., Nagoya Univ., Dr. Eng.



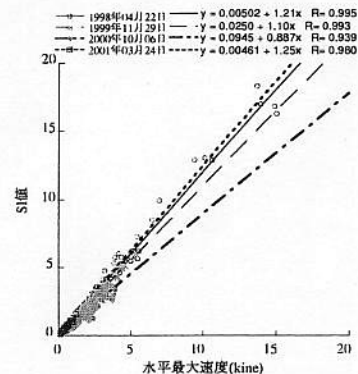
a) 最大加速度と計測震度の相関



b) 最大速度と計測震度の相関



c) $(PGA \times PGV)^{1/2}$ と計測震度の相関



d) 水平最大速度とSI値の相関

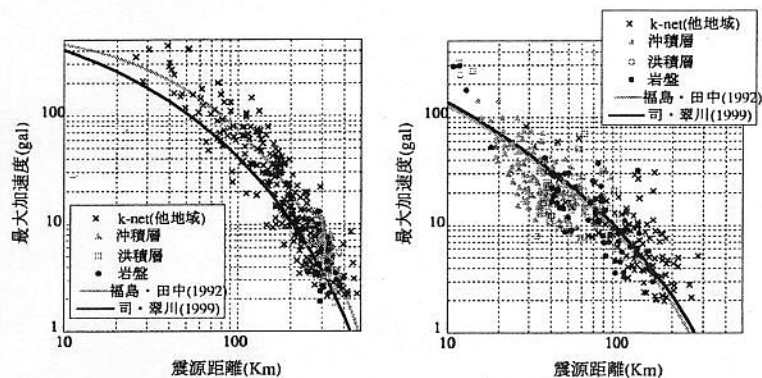
図1 地震動強さの相互関係

れほどの指標間の相関も比較的高いが、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。また遠方の地震ほど、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く、計測震度計算時の振動数フィルターの特性によって、計測震度に対する加速度と速度の両者の性質をうち消し合ったことが要因と考えられる。これらのことと、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 $(PGA \times PGV)^{1/2}$ のほうが地震動を評価する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いえる。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おり、これは、SI値の積分区間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を福島・田中式²⁾および司・翠川式³⁾とあわせて図2に、最大速度と震源距離の関係を司・翠川式³⁾とあわせて図3に示す。図2、図3において最大加速度、最大速度は水平2成分の相加平均であり、司・翠川式³⁾において鳥取

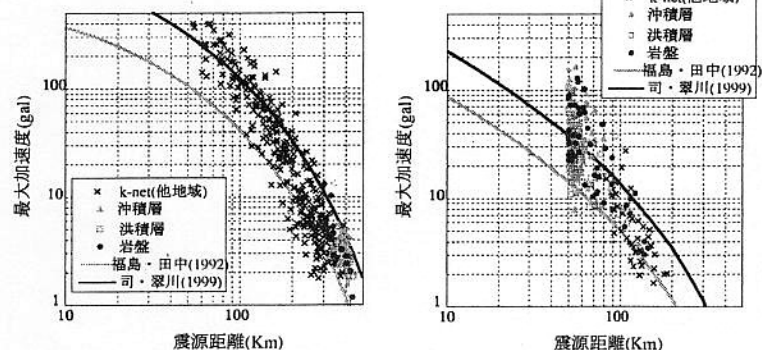
表1 地震の諸元

日付	地震名	Mj	震源距離(km)	震源深さ(km)
1998年4月22日	岐阜・三重県境地震	5.2	38	10
1999年11月29日	愛知県西部地震	4.8	52	50
2000年10月6日	鳥取県西部地震	7.3	330	11
2001年3月24日	芸予地震	6.7	413	51



a) 鳥取県西部地震

b) 岐阜・三重県境地震



c) 芸予地震

d) 愛知県西部地震

図2 最大加速度と震源距離の関係

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。図2では岐阜・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マグニチュード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⁹⁾によっても指摘されている。一方、司・翠川式との対応は良い。これは、司・翠川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。最大速度の距離減衰に関しても司・翠川式に比較的良好に対応する(図3)。しかし、傾きについては十分に再現できていないと言え難い⁹⁾。

4. 地震動の卓越周期(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($PGA/PGV/2\pi$)より求めた。但し、PGVはPGA発生時刻の前後2秒間以内の値を用いた。

等価卓越振動数(NS方向)と震源距離の関係を図4に、地盤種別毎の等価卓越振動数(NS方向)の頻度分布を図5に示す。図4においてK-NETの記録は、得られた記録全てを用いているが、図5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4より、どの地震でも濃尾平野内に対応する沖積層では卓越振動数が低くなる傾向がある。また、これらの地域を除くと震源が浅い鳥取県西部地震や岐阜・三重県境地震では、震源からの距離とともに卓越振動数が低下していることが分かる。しかし、震源が深い芸予地震や愛知県西部地震ではその傾向は非常に弱い。これは震源の浅い地震に比べ、深い地震の地震波は減衰の小さい層を多く伝播してくることや、震源の応力降下量が大きくももとの震源スペクトルに高振動数成分が多く含まれていたことなどが要因となった可能性がある。

図5より、鳥取県西部地震や芸予地震のようにマグニチュードが大きく、震源距離が大きい地震ほど、低振動数の成分が相対的に多く含まれているが、震源位置が濃尾平野からほぼ同じ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、マグニチュードの大きさや伝播経路、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ており、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5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6に、濃尾平野域の表層地質の分布を図7に示す。図6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と地盤との間に何らかの関係があると考えられる。そこで、図8に名古屋市における微動H/Vスペクトルの短周期卓越振動数⁹⁾を示す。H/Vスペクトルの卓越振動数は海部・弥富類層($V_s=400\sim 500\text{m/s}$ 程度の工学

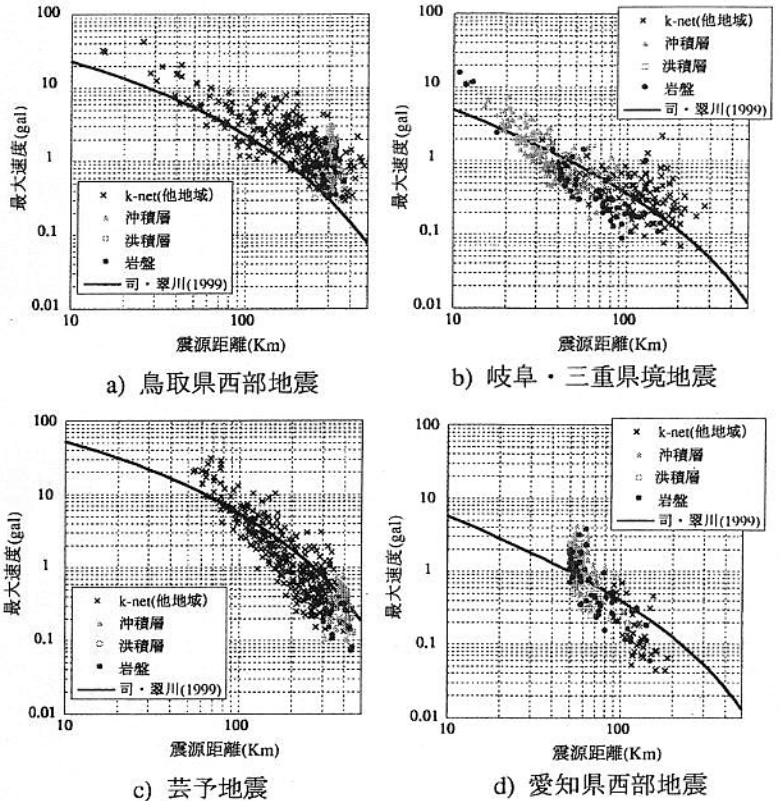


図3 最大速度と震源距離の関係

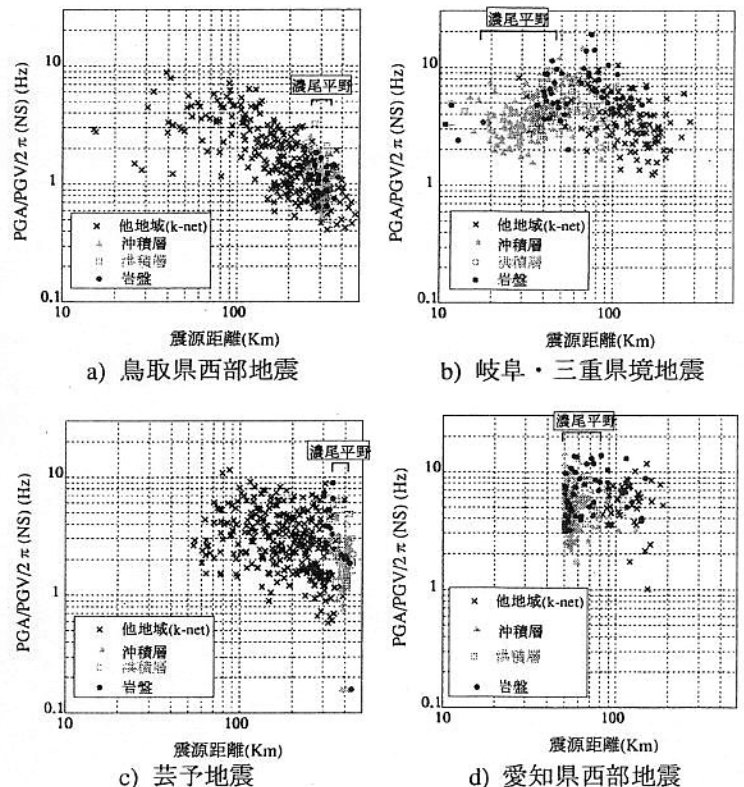


図4 等価卓越振動数と震源距離の関係

的基盤とみなせる層)に対応している。図8では西部に比べ東部のほうが高振動数が卓越しており、この傾向は図6の等価卓越振動数分布にも同様に見られる。しかし、振動数の値そのものには違いがあるため、影響を受けている層の特定には検討の余地がある。

5. 地震動の継続時間

ここでは、加速度または速度の包絡波形の最大振幅を基準とし、その α %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、 $\alpha=50$ を採用した。

マグニチュードの異なる10地震について、加速度波形から求めた継続時間とマグニチュードの関係を図9に示す。また、図10には加速度・速度波形の継続時間と震源距離の関係を地震毎に示す。NS方向、EW方向共に同様の傾向を示すため、ここではNS方向の図を示す。K-NETの記録は、図9では得られた記録全てを用いたが、図10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、静岡県の記録のみを用いた。図9よりマグニチュードが大きく震源距離が大きい地震では継続時間が長くなる記録が増加する傾向がある。これはマグニチュードが大きいと断層破壊時間が長く、減衰しにくい長周期成分を多く含んでいること、震源距離

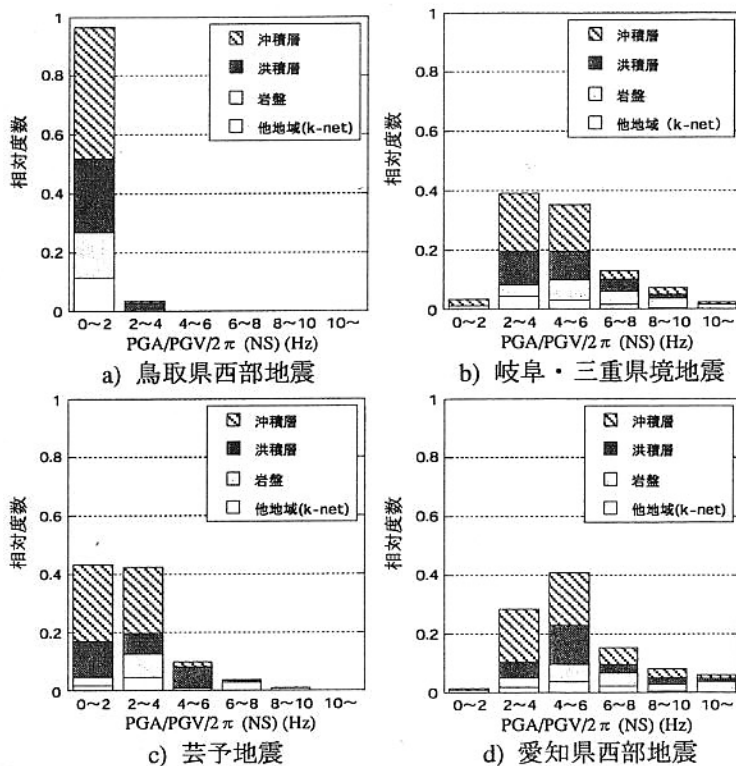


図5 等価卓越振動数の地盤種別毎の分布

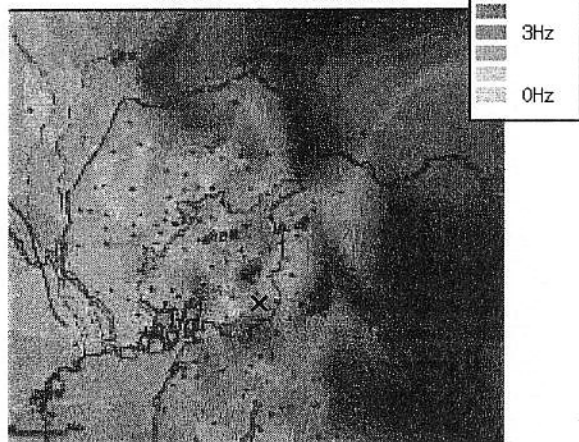
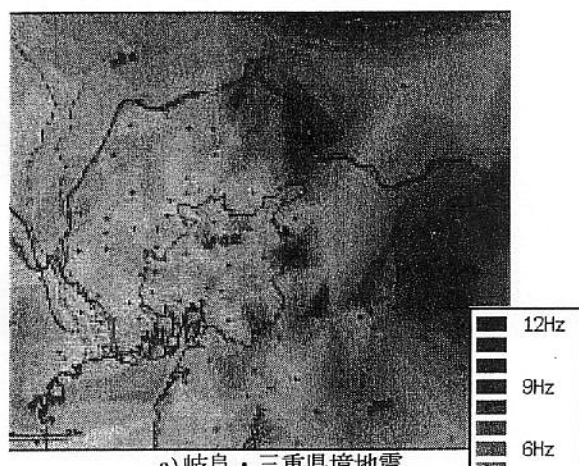


図6 等価卓越振動数(NS方向)の分布
(黒丸は観測点、×は震央)

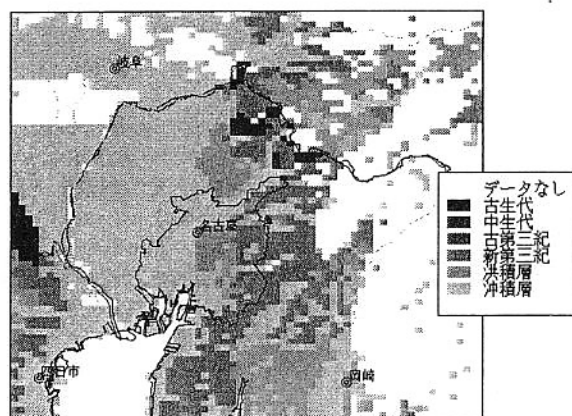


図7 国土数値情報に基づく濃尾平野域の地質

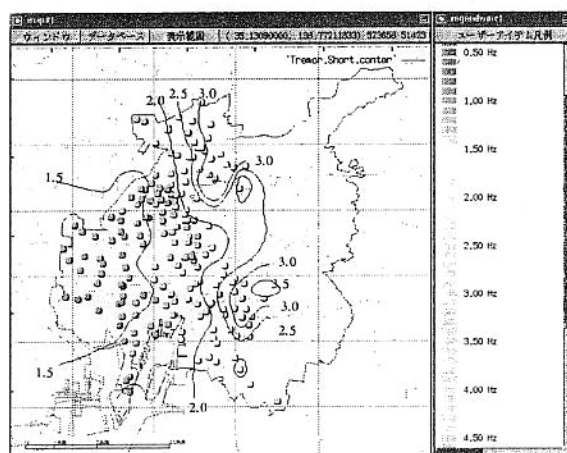


図8 H/Vスペクトルの短周期卓越振動数

が大きいために励起された表面波の分散性や様々な経路を通して到達した波により継続時間がのびていると考えられる。但し、 $M_j=6.7$ の芸予地震に関しては後続波にパルス状の波を含んだ記録があるため継続時間を過大評価している可能性がある。また、岩盤で継続時間が短く、沖積層や洪積層のような地質年代が新しい地点ほど継続時間は長い。図10においても沖積層や洪積層上の観測点では継続時間が長くなる傾向がある。これは、沖積層や洪積層は大規模な堆積平野に位置し、平野内に地震動のエネルギーがトラップされるためと考えられる。

図10では、鳥取県西部地震や岐阜・三重県境地震のような震源の浅い地震で、濃尾平野内に対応する観測点の継続時間が長くなっており、速度になると継続時間の伸びはより顕著に現れている。これは震源位置が浅いことにより、表面波が卓越したためと考えられる。そこで、継続時間が濃尾平野内で長くなっている鳥取県西部地震と岐阜・三重県境地震について、NS方向の速度波形に基づく継続時間の分布を図11に、これと比較するために基盤深さを図12に示す。両地震共に、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。

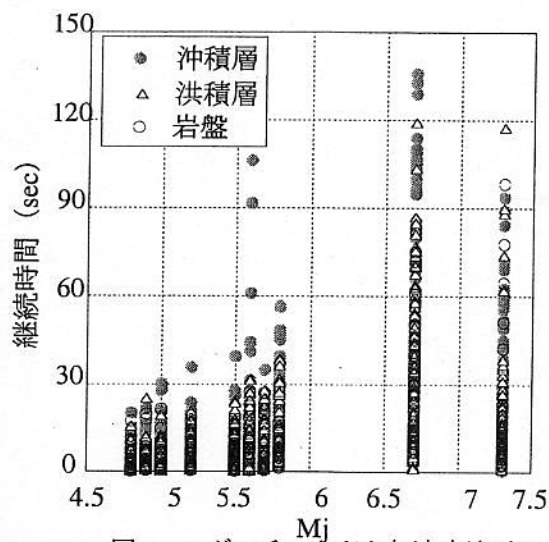
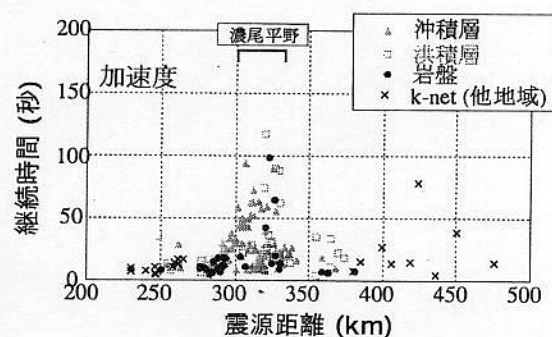
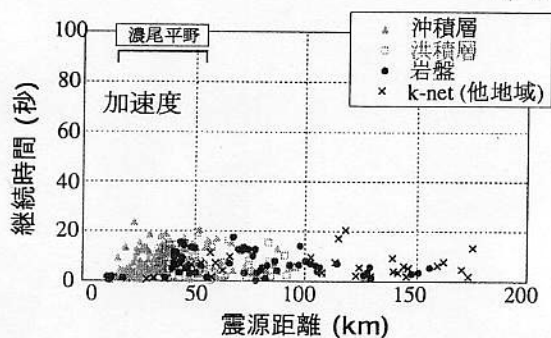


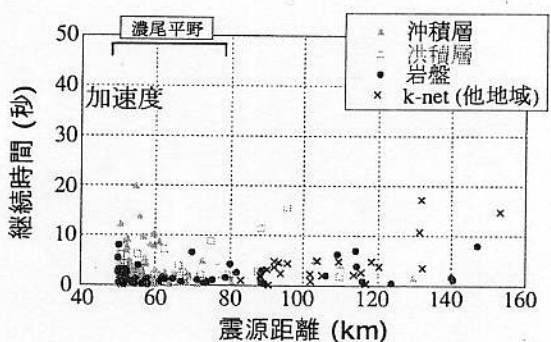
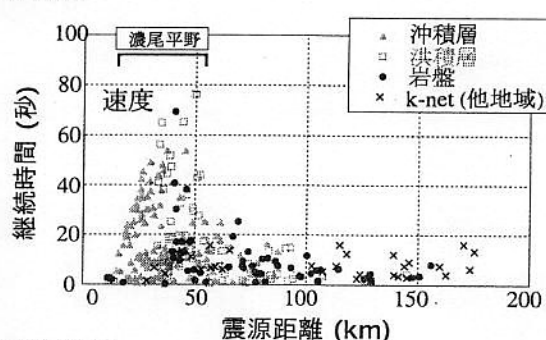
図9 マグニチュードと加速度波形の継続時間(NS方向)の関係



a) 鳥取県西部地震



b) 岐阜・三重県境地震



c) 愛知県西部地震

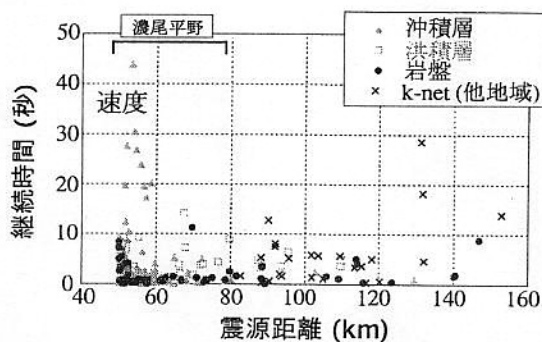
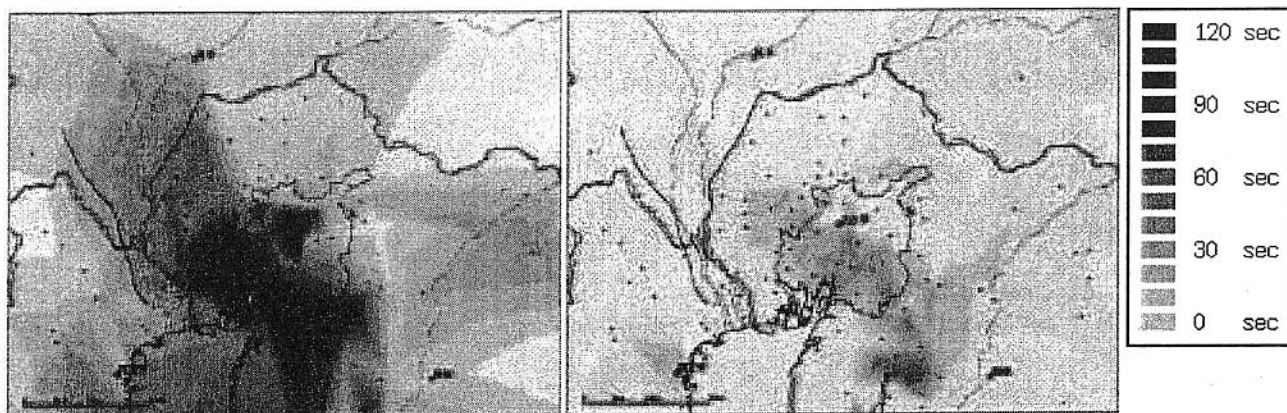


図10 継続時間と震源距離の関係



a) 鳥取県西部地震

b) 岐阜・三重県境地震

図11 速度波形に基づく継続時間の分布 (黒丸は観測点)

6. 建物応答に及ぼす影響

ここまで述べてきた地震動の特性が建物に与える影響を見るため、都市内に多く存在する中低層建物および高層建物の応答挙動への影響を検討する。ここでは、SRC造6階建、SRC造10階建、S造10階建、RC造31階建の建物を対象とし、平野内の地表で観測された波形から建物の応答を推定した。伝達関数は、SRC造6階建、SRC造10階建、S造10階建については名古屋大学内の3建物の強震記録から求め、RC造31階建は弾塑性地震応答解析によって伝達関数を評価した。名古屋大学内の3建物の概要を表2に示し、RC造31階建の応答解析の解析条件を表3に示す。得られた各建物の伝達関数(屋上/地盤)を図12に示す。ただし、S造10階建に関しては地盤の記録がなく、相互作用効果が小さいと考えられるので、屋上/1階の伝達関数を用いている。これらの伝達関数を東海地域で観測された各地点の加速度波形に乗じて各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。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。

鳥取県西部地震と岐阜・三重県境地震を対象に、NS方向の地震動記録と伝達関数を用いた。図14に名古屋大学の地表における2地震の加速度フーリエスペクトルを示す。図14より鳥取県西部地震は1Hz以下の低振動数側が卓越しており、逆に岐阜・三重県境地震では2Hz以上の振動数が卓越している。図15に上述の方法で求めた各建物の増幅度の分布を示す。

地震によって建物ごとの応答の様子は異なる。鳥取県西部地震の場合

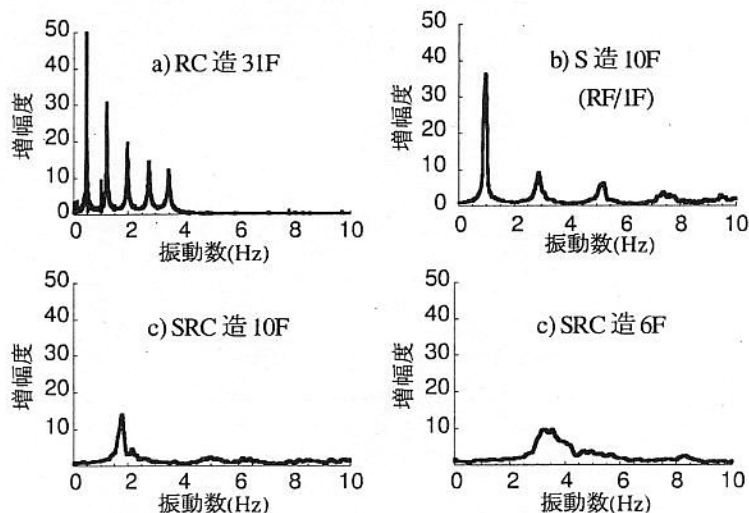


図13 各建物の伝達関数 (RF/GL)

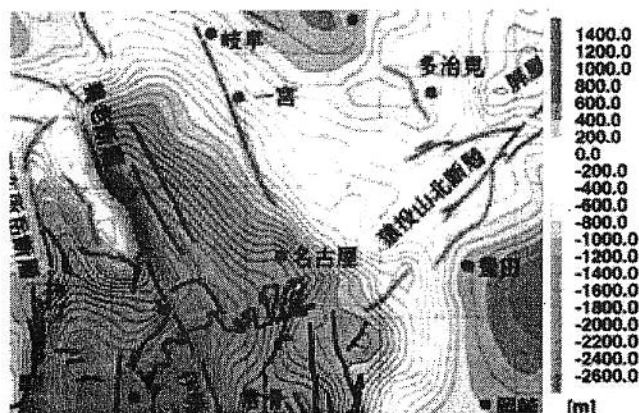


図12 基底深さ⁷⁾

表2 建物概要

建物種別	基礎形式	高さ(m)	建築面積(m ²)
S造10階建	杭基礎	41.1	987.3
SRC造10階建	杭基礎	39.3	1502.0
SRC造6階建	杭基礎	22.3	603.9

表3 解析条件

対象建物	RC造31階建
解析モデル	等価曲げせん断型モデル
固有周期(sec)	1次:2.18, 2次:0.83, 3次:0.51
減衰	歪みエネルギー比例型減衰 1%
入力地震波	BCJ-L1

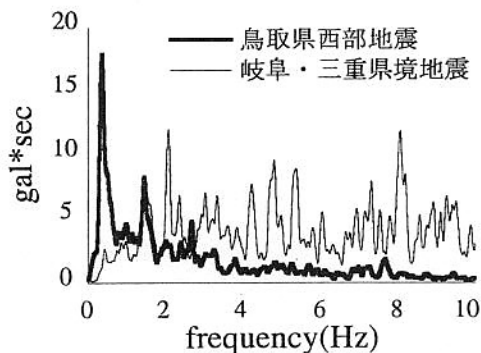
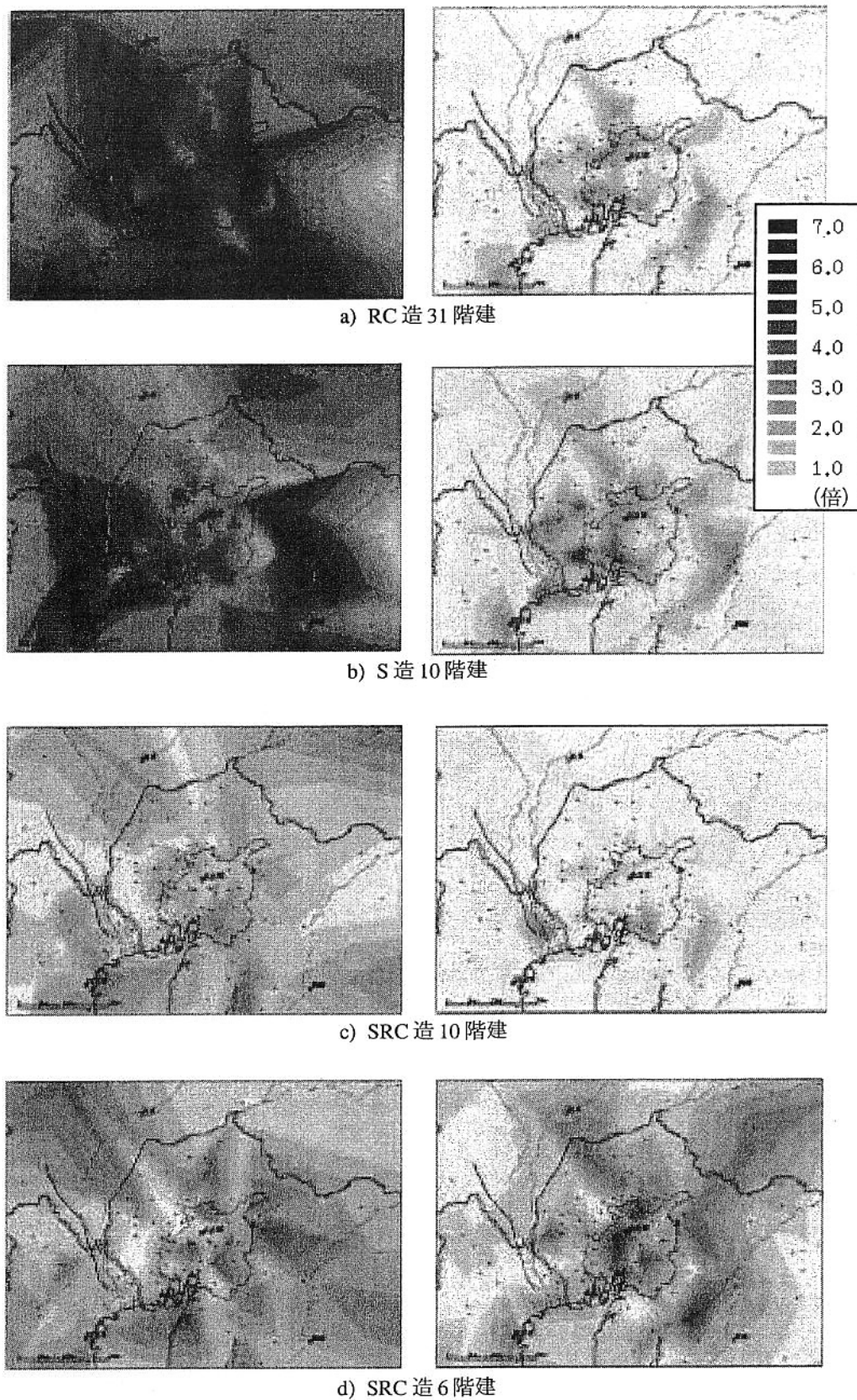


図14 2つの地震のフーリエスペクトル

合、RC造31階建とS造10階建の増幅度が非常に大きくなっていることが分かる。これは、鳥取県西部地震では0～2Hzの低振動数が卓越しており、RC造31階建・S造10階建の固有振動数と地震動の卓越振動数とが近接するためである。逆に、岐阜・三重県境地震ではRC造31階建・S造10階建の増幅度は鳥取県西部地震に比べて非常に小さくなっている。これは、岐阜・三重県境地震では長周期成分より2～6Hzが卓越しているためである。RC造6階建の増幅度は両地震であまり差が認められない。また、建物によって揺れやすい地域は異なっており、地震動そのものの卓越振動数だけでなく、地盤の卓越振動数も建物の応答に影響していることが分かる。図16に濃尾平野の東に位置する岩盤上の観測点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RC造31階建の応答波形を示す。ただし、岩盤上の観測記録は振幅が小さかったために、P波初動は記録されていない。また、図17に同観測地点における観測波形のランニングスペクトルを示す。ただし、図16に示すようにS波初動から20秒毎に岩盤上では4区間、沖積層上では8区間のランニングスペクトルを求めている。図13aより、RC造31階建の1次固有振動数は約0.5Hzであるが、図17において、0.5Hz付近が卓越する区間は岩盤上の観測記録よりも沖積層上の観測記録のほうが明らかに長いことが分かる。また、図16より、岩盤上の応答波形に比べ沖積層上の応答波形は大きく増幅しており、後続で最大値を生じている。さらに、沖積層上の応答波形は一度増幅（①、②区間）したのち減衰（③区間）し、後続部でさらに増幅（④、⑤、⑥区間）し、その後、また減衰（⑦、⑧区間）している。これは、①、②、④、⑤、⑥区間は0.5Hz



鳥取県西部地震

岐阜・三重県境地震

図15 建物形状の違いによる増幅度の分布の違い

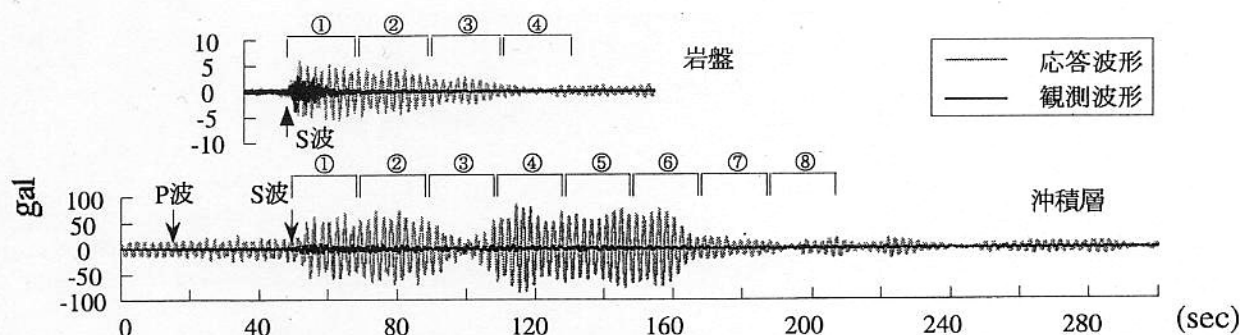


図16 鳥取県西部地震時の濃尾平野内の岩盤および沖積層上の観測波形とRC造31階建の応答波形

付近に鋭いスペクトルのピークがあるが、③区間では0.5Hz付近が谷となっており、また⑦、⑧区間で0.5Hz付近のパワーが小さくなっていることが要因と考えられる。これらのことは、減衰の小さい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無視できないことを示唆している。このことを面的に見ると、図15のRC造31階建の増幅度は図11の継続時間の長い地域で大きくなっており、建物応答においては継続時間が非常に重要な要素となるといえる。

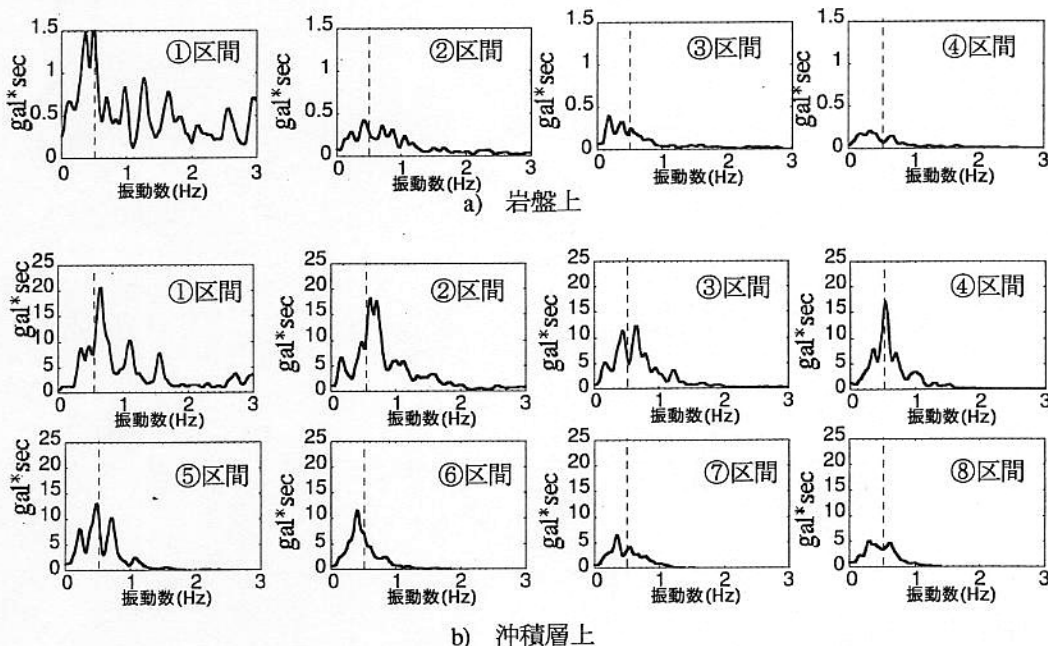


図17 岩盤上および沖積層上の観測波形のランニングスペクトル

7. まとめ

本論では、東海地域において観測された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（強さ、周期、継続時間）の傾向を明らかにした。また、2つの地震を対象に、3要素が構造種別、階数の異なる建物の応答挙動に与える影響について検討した。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、深い地震の距離減衰は福島・田中式との対応が悪い。震源深さや断層タイプを考慮した司・翠川式は、深い地震とも比較的良好に対応するが、傾きについては十分再現できていない。②卓越周期は地震の規模が大きく、震源距離が大きいほど長周期が卓越する傾向にある。また、平野内では堆積層の影響で卓越周期は周囲に比べて長くなる傾向がある。③継続時間は、規模が大きく震源距離が大きい地震で長くなる。また、岩盤上の観測点では継続時間は短くなる傾向にある。震源深さが浅い地震では、表面波の影響などにより加速度に対して速度の継続時間が著しく長くなる。④建物の応答は、地震動強さ、周期の影響を強く受けている。減衰の小さい高層建物については、継続時間の影響も顕著に見られた。

構造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である。

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) 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
 - 5) 翠川三郎：強震観測ネットワークによる最新の強震記録を利用した地震動強さの距離減衰特性の検討、強震観測ネットワークに関するシンポジウム資料、日本地震学会、pp.1-4、2001.9
 - 6) 中村 仁、福和伸夫、高橋広人、飛田 潤、堀 啓輔：常時微動計測に基づく名古屋市の地盤振動特性と基礎深さの推定に関する研究、構造工学論文集、pp.413-421、2000.3
 - 7) 馬場千児、松沢 宏、野崎京三、林 宏一、安江勝夫：地震防災のための重力データに基づく堆積平野の三次元多層深部地盤構造の把握—濃尾平野への適用—、応用地質技術年報、20、pp.1-41、2000
- 謝辞：本研究では科学技術庁防災科学研究強震ネット（K-NET）の記録を使用させていただきました。関係各位に感謝いたします。