

2004年東海道沖地震における名古屋での観測例 ～濃尾平野の地震動特性と中低層建物の応答～

福和伸夫¹

名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

本稿では、2004年9月5日の東海動沖地震（M7.4）の際に名古屋圏で観測された地盤と建物の記録を中心に、強震観測記録から明らかになった地盤や建物の地震時挙動について述べる。なお、建物に関しては、主として中低層建物を対象にすることとし、微動や強風時との記録との差異についても分析を加える。

2. 地盤の強震観測記録

東海地域では、複数の強震観測機関の記録をオンラインで収集する東海版大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムが稼働している¹⁾。東海道沖地震に関しても、本ネットワークにより貴重な記録が収集されている。ただし、19時と24時の2度にわたって極めて継続時間の長い地震動が生じたため、各観測システムではトラブルが続出し、記録を収集するのに1ヶ月以上の期間を要した。

(1) 濃尾平野の震動特性

まず、図1に、東海版の大都市圏強震動総合観測ネットワークの観測点分布を示す。濃尾平野を中心に多数の観測点が存在している。

図2は、Radial方向の速度波形を、震央からの距離順に並べて示したものである。図のように、濃尾平野を含む東海湖盆内の観測点では、地震動継続時間が、岩盤上観測点に比較して長く、長周期の揺れが卓越している。

図3は、濃尾平野を中心とした地域での、速度波形の継続時間の分布を示している。観測地点によっては、十分な長さの地震動波形が得られていないため、ここでは、便宜上、速度波形の最大値に対して、その50%の値となる波形長さを、継続時間として示している。濃尾平野西部で継続時間が長くなっているが、この地域は、濃尾傾動地塊の影響を受け、堆

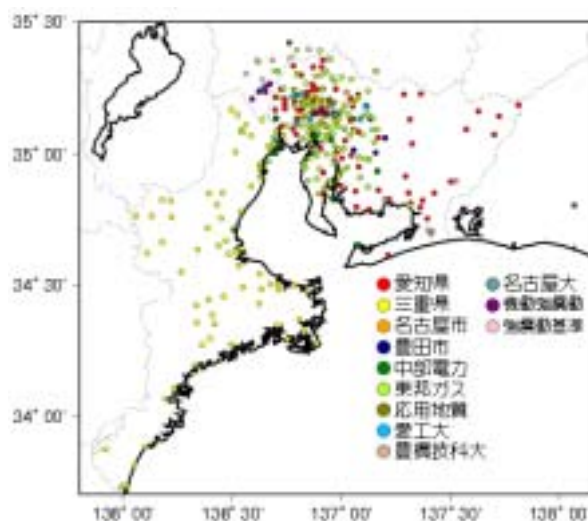


図1 東海版大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムの観測点

(部分は、濃尾平野の観測記録

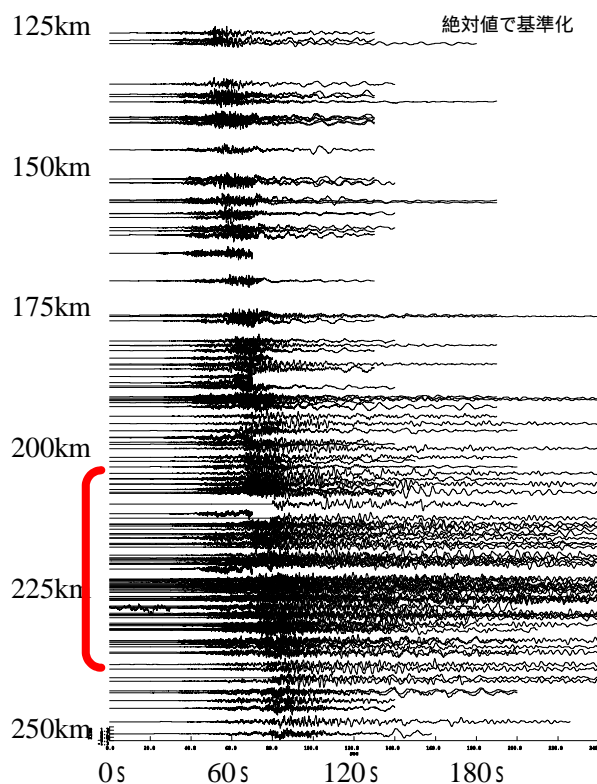


図2 2004年東海道沖地震での三重から愛知・岐阜に至るRadial方向速度波形

積地盤が厚く堆積する場所である。

図 4 は、強震記録の波形全体から求めた H/V スペクトルのやや長周期域における卓越周期分布である。図のように、濃尾平野西部が長周期になっている。

これらの結果は、既往の地震観測記録や、地下構造調査で得られている結果とよく対応しており²⁻³⁾、南海トラフでの巨大地震発生時の濃尾平野部での継続時間の長いやや長周期地震動発生懸念を裏付けるものである。

(2) 名古屋市内代表地点の地震動特性

名古屋市内の代表的な地盤 3 地点で収録した観測記録を図 5 に示す。中川区富田は名古屋市西部の沖積低地、中区三の丸は市中心部の熱田台地上の官庁街、守山区志段味は市東北部の丘陵地に位置する。富田の地盤応答は継続時間が長く、1~5 秒の幅広い周期域が優勢である。三の丸も同様に継続時間は長い、周期特性は主として 3 秒が卓越している。何れも地表では 4cm/s 程度であるが、5%速度応答は 10~20cm/s 程度の応答になっている。一方、志段味では、継続時間も短く、やや長周期域の卓越も無い。地表応答は 2cm/s、5%速

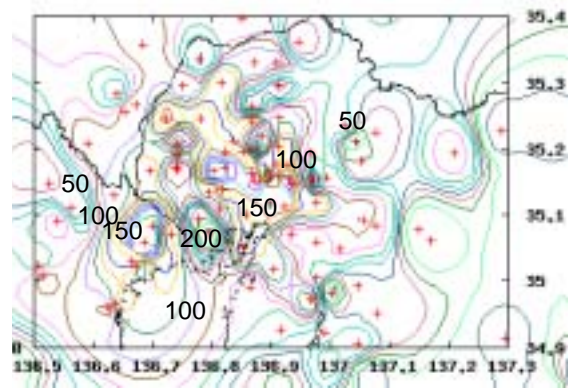


図 3 2004 年東海道沖地震での地震動継続時間 (最大速度の 50%の波形長さ)

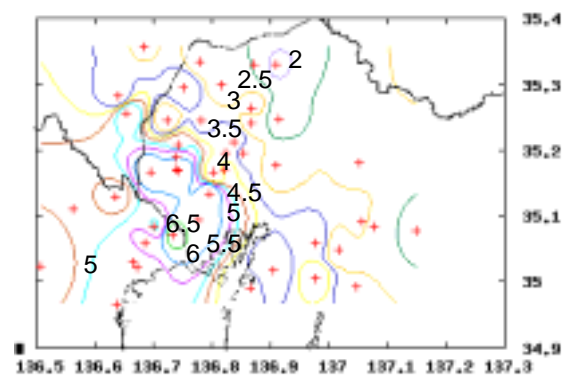


図 4 2004 年東海道沖地震の H/V スペクトルから求めたやや長周期域の卓越周期分布

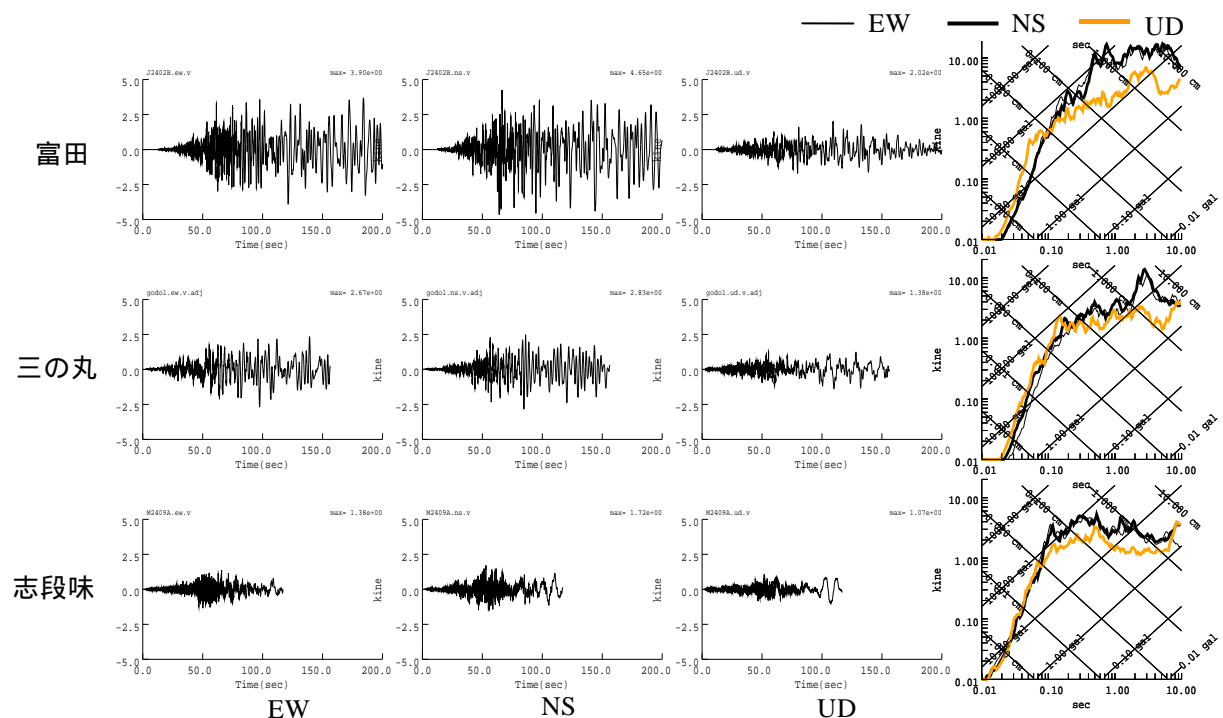


図 5 2004 年東海道沖地震での名古屋市内代表 3 地点での速度波形と速度応答スペクトル

度応答も 5cm/s 程度になっている。

3 地点での地震動の建物への影響を把握するために、図 6 に、3 地点での NS 方向の地盤記録を用いて減衰定数 1、5、20%、固有周期 1、3、5 秒の速度応答波形を求めた結果を示す。図から、建設地点による中層建物の応答 (RC は 1 秒 & 5%、S 造は 1 秒 & 1%)、高層建物の応答 (3 秒・5 秒 & 1%)、免震建物の応答 (3 秒・5 秒 & 20%) の違いを実感できる。

(3) 設計用地震動と観測地震動

近年、高層建物や免震建物のように、動的解析に基づく耐震設計が多く行われるようになったが、工学的基盤で全国一律に定められた地震動では、やや長周期域の震動性状の地域特性を考慮できない。このため、建設地点のやや長周期域の周期特性を適切に考慮した

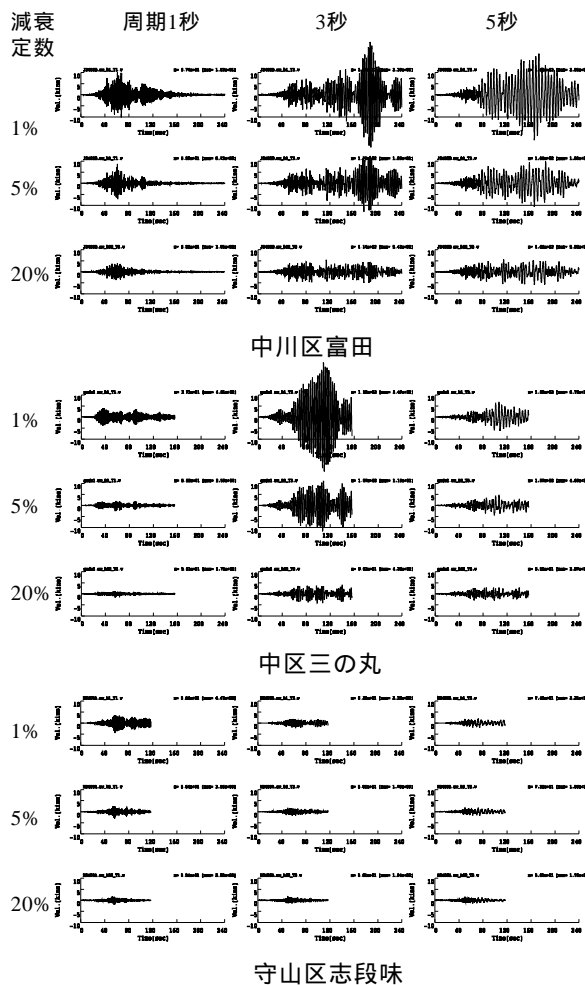


図6 2004年東海動沖地震での名古屋市代表3地点の地表NS応答に対する異なる周期・減衰定数を有する1自由度系の速度

設計用入力地震動の利用が望まれている。

この種の地震動の一つとして、官庁建物の免震改修設計用に評価された三の丸地点での想定東海・東南海地震連動時の地震動⁴⁾を、同地点での観測地震動と比較してみる。図7にNS方向の加速度波形と速度応答スペクトルを比較する。本設計用地震動は経験的グリーン関数法により算定されているので、当該地盤の周期特性が反映されており、観測地震動の周期特性や経時特性とよく対応している。

(4) 微地形が地震動に与える影響

次に、浅層地盤の違いが地震動特性に与える影響を観察するために、名古屋大学東山キャンパス内で観測された地表地震動を一覧して示す。東山キャンパスは名古屋市東部丘陵地に位置し、谷と尾根が交錯している。キャ

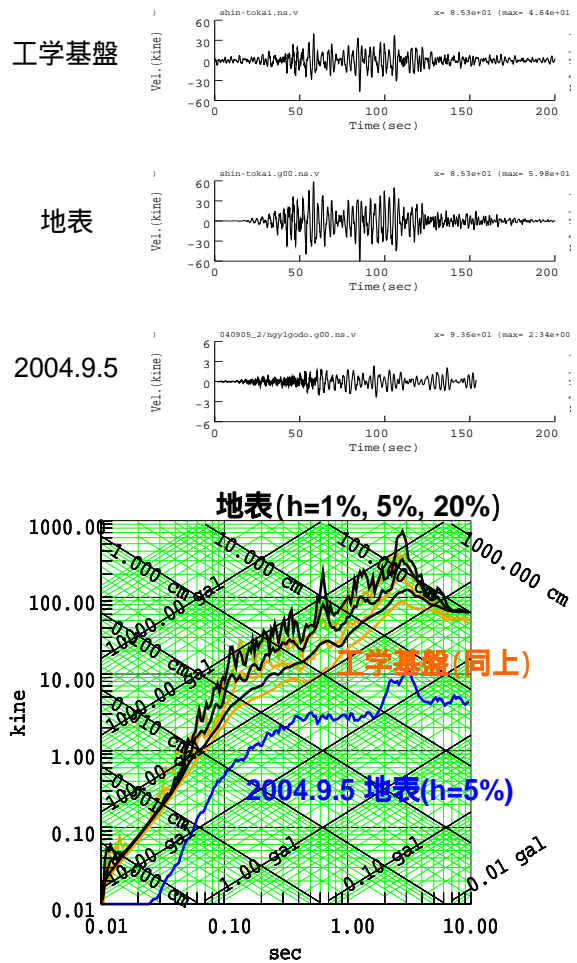


図7 名古屋市三の丸地区の設計用地震動と2004年東海道沖地震での観測記録の比較 (上: NS方向の速度波形、下: 速度応答スペクトル)

ンパス整地のため、谷を埋め尾根を削る形で、大規模な地形改変が行われてきた。

図 8 に 2004 年東海道沖地震の際に観測された大学内各地点の加速度波形と速度応答スペクトルを示す。最大加速度は倍半分程度にばらついており、1Hz 以上の高振動数で差異が認められ、盛土部で応答が大きく切土部での応答が小さい。この振動数域は、中低層建物の振動数に対応するため、微地形の差が、近接する建物での地震被害の違いを生む原因になったりする。

図 9 は、キャンパス内の地形と、振動数帯域毎の水平面内の変位軌跡を示している。図のように、5Hz 以下の振動数域では、地点によらず同様の軌跡を描いているが、高振動数では地点による差が顕著になっている。特に、10Hz 以上の振動数域では、尾根筋では尾根直交方向の揺れが、埋土した谷筋では谷筋方向の揺れが卓越しており、表層の不整形性による 3 次元的地形効果が顕著に認められる。

3. 建物の強震観測記録

(1) 高さ・構造の異なる建物の地震応答波形

次に、名古屋大学東山キャンパス内の建物で得られた強震観測記録について紹介する⁵⁾。

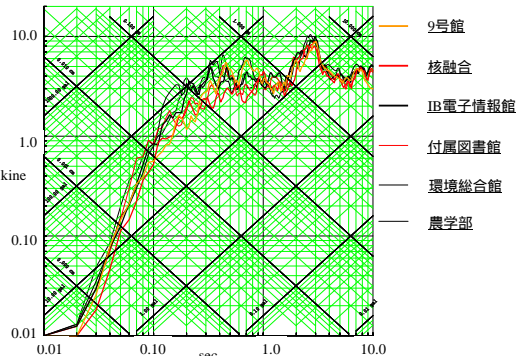
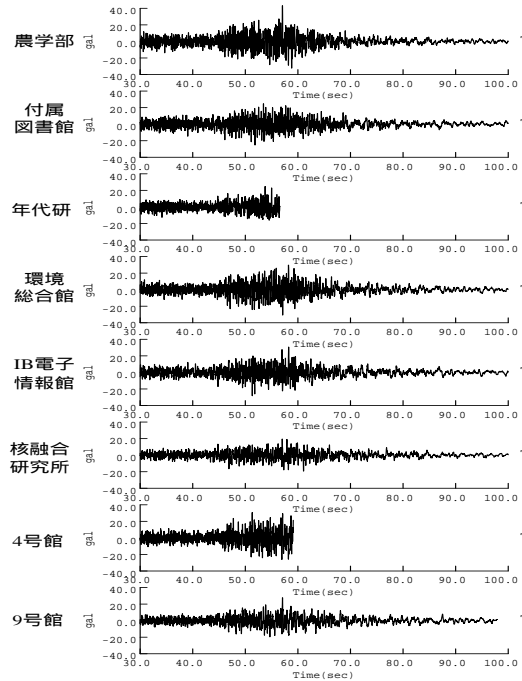


図 8 2004 年東海道沖地震での名古屋大学内の観測記録 (上: NS 方向の加速度波形、下: 5%速度応答スペクトル)

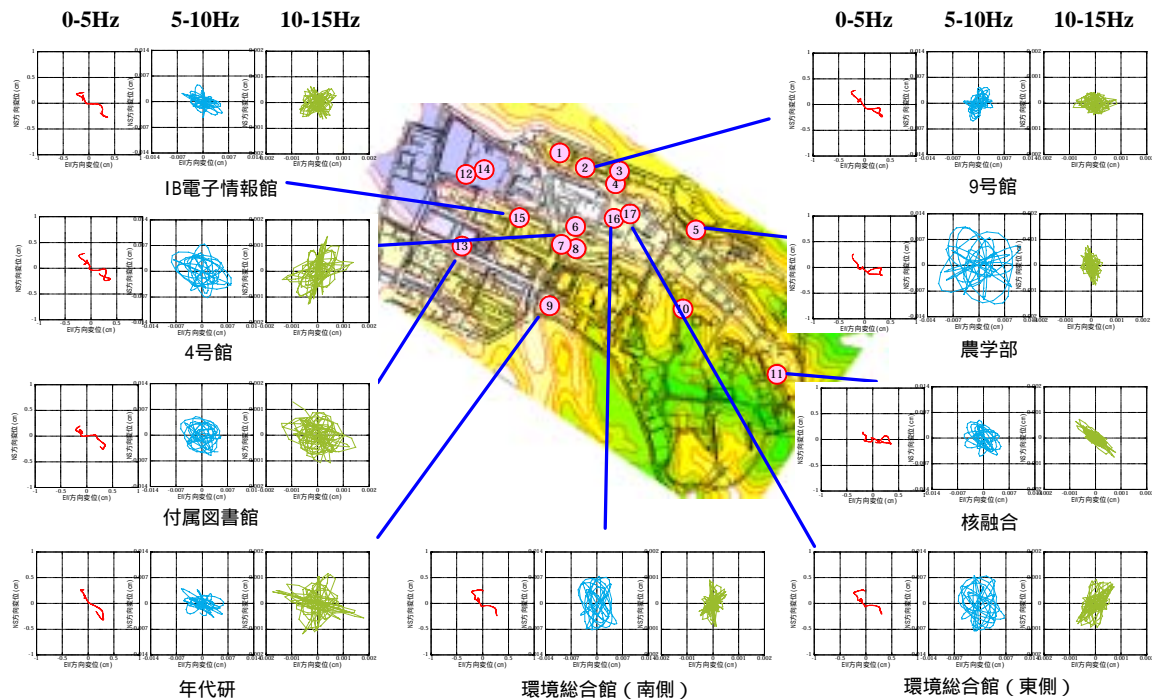


図 9 2004 年東海道沖地震での名古屋大学における振動数帯域毎の水平面内変位軌跡

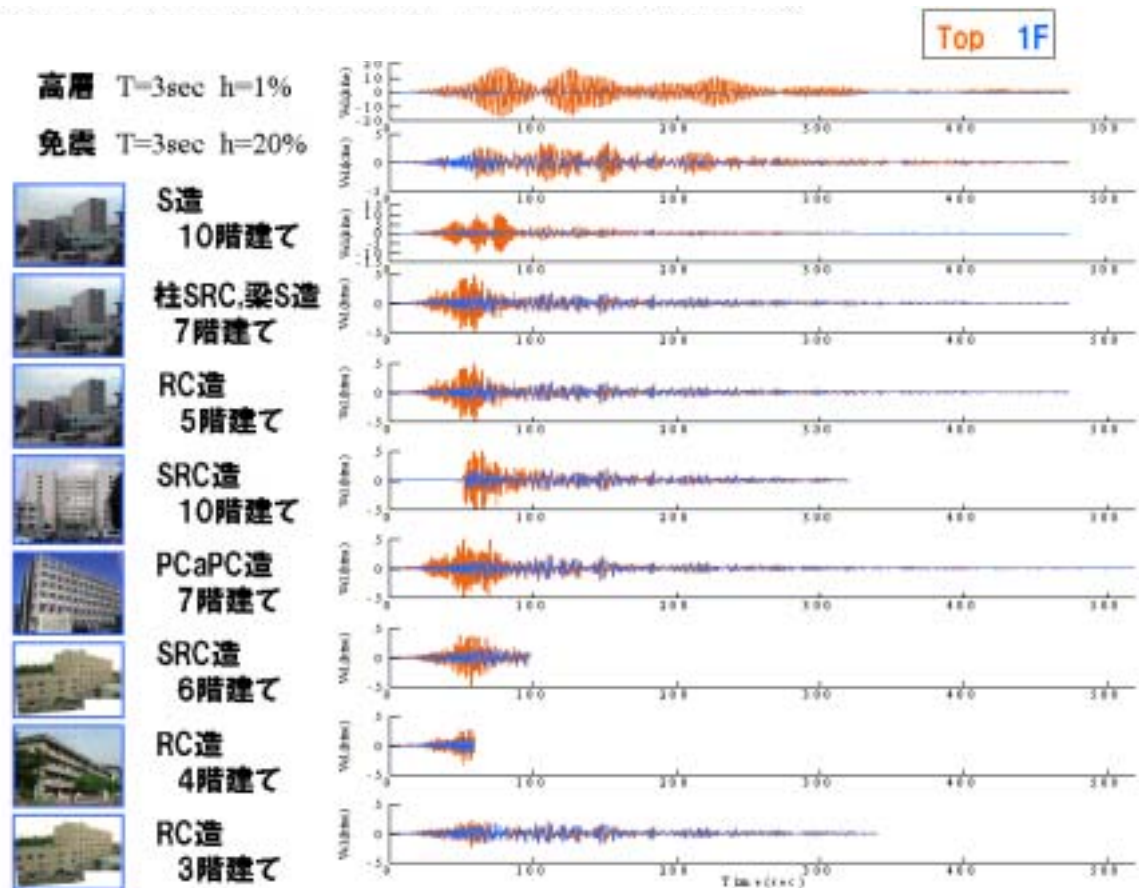


図 10 2004 年東海道沖地震における異なる高さ・構造の建物の張間方向速度波形

図 10 は、2004 年東海道沖地震において、異なる高さ・構造形式の建物で観測された強震観測記録である。各図には、1 階床と建物屋上の速度波形を重ね書いてある。また、参考のために、高層建物と免震建物を想定して、固有周期 3 秒、減衰定数 1% と 20% の 1 自由度系の応答を示す。

高層建物と S 造 10 階建て建物の縦軸が異なっていることに注意して、建物応答振幅の違いを観察すると、低層の建物では、建物が剛体的に移動し、弾性変形が小さいのに対し、高層になるに従って、弾性変形が増大し、応答が増幅している。これは、この地震動が 1 秒以上の長周期成分が卓越していたためと考えられる。特に、減衰の小さい鉄骨造の建物でその傾向は顕著になっており、同じ 10 階建ての建物でも純ラーメン S 造の応答は、耐震壁付ラーメン SRC 造の応答の 3 倍程度の応答振幅を示し、応答継続時間も長くなっている。

この地点は、図 8 に示したように、3 秒と 1

秒に卓越周期を有するため、継続時間の長い波に対して、1 秒で揺れやすい低減衰の S 造建物が共振応答を示したと考えられる。また、1 自由度系の応答から、当該地盤のやや長周期域の卓越周期に一致する周期 3 秒の低減衰構造物の場合には、極めて継続時間の長い大きな応答を示している。一方、免震建物のように減衰の大きい建物の場合には、減衰による応答抑制効果が認められる。

このように、継続時間の極めて長い地震動に対しては、地震動の卓越周期と建物の固有周期が近接した場合に、減衰の大小が応答値を左右することが分かる。逆に言えば、低減衰建築物の設計では、減衰の値と、地震動の継続時間の設定が、極めて重要となる。

(2) 既往の観測結果との建物増幅効果と入力損失効果の対比

つぎに、2004 年東海道沖地震の応答性状が、従来の観測記録と比較して、どのような位置

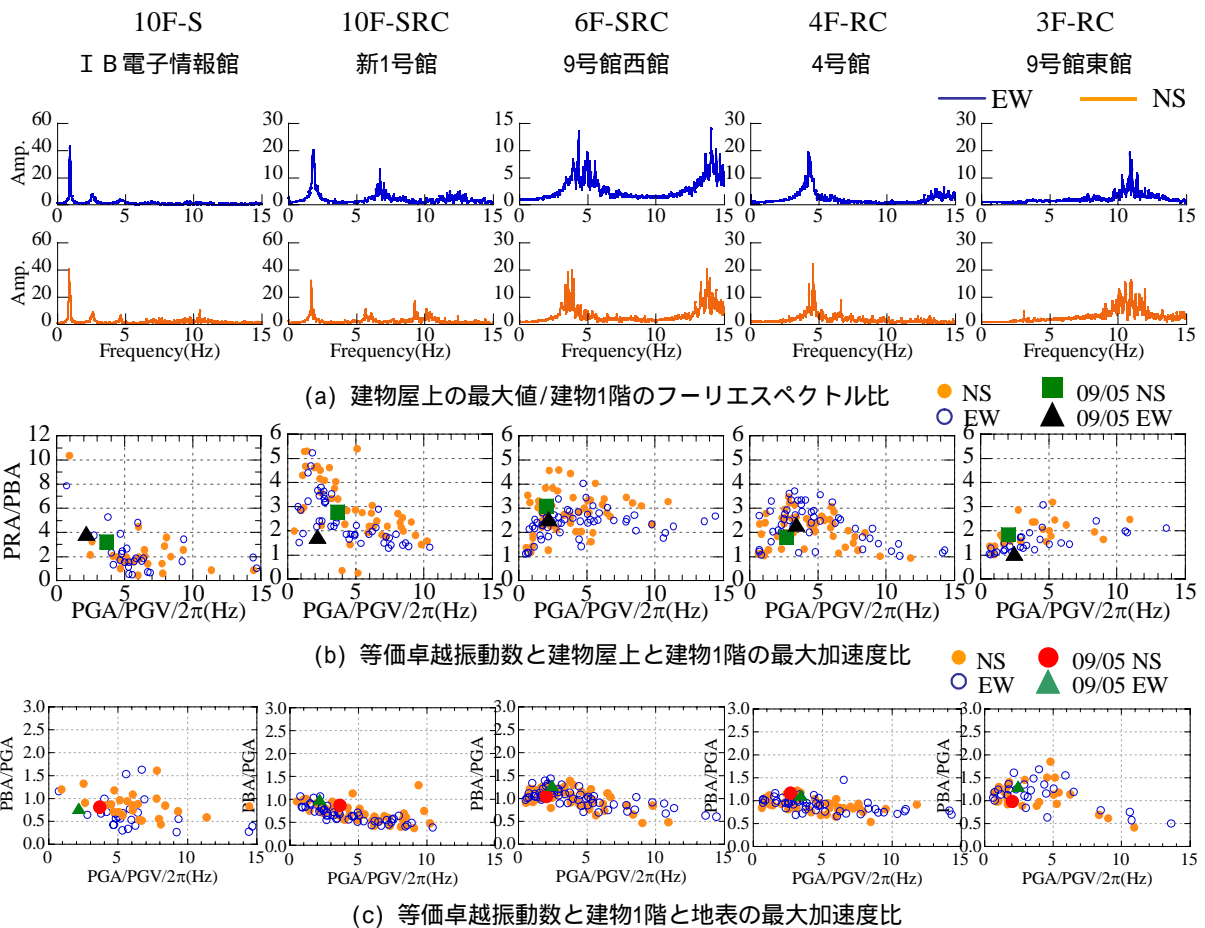


図 11 2004 年東海道沖地震におけるフーリエスペクトル比と、既往の地震での建物応答増幅比・有効入力増幅比の地震動卓越振動数依存性

づけにあるのかを検討してみる。図 11 には、建物屋階と 1 階のフーリエスペクトル比に加え、既往の観測地震動を用いて求めた、建物屋階と 1 階の最大加速度比と地震動卓越振動数（最大加速度と最大速度の比から簡易的に推定）との関係、建物 1 階と地盤地表の最大加速度比と地震動卓越振動数の関係を図示する。2004 年東海道沖地震の結果は、大きなドットでプロットしてある。

図から 2004 年東海道沖地震の記録は、既往の観測記録で得られている特性の範囲内にあることが分かる。地震動の卓越振動数が比較的低振動数であるため、低層の建物では、応答が殆ど増幅していないのに対して、より高層の建物では、卓越振動数が建物の固有振動数に近づき応答が大きくなっている。

入力損失効果については、地震動の卓越振動数が低振動数になっているため殆ど認められず、地盤の応答がそのまま入力されている。

長周期の地震動が卓越する海溝型の巨大地震では、入力損失効果を余り期待できない。

(3) 地盤 - 杭 - 建物系の応答

地盤、杭も含めた建物の地震時挙動を概観するために、高密度観測をしている 7 階建てプレストレス・プレキャスト構造建物の 2004 年東海道沖地震での地盤 - 杭 - 建物系の観測波形を図 12 に示す。この建物では、建物内の高さ方向の増幅特性、ロッキング応答やねじれ応答増幅特性、群杭 - 地盤系の応答挙動、位相差を有する入力地震動特性などを分析できるよう、観測点を多点に配置してある。

図 12 から、支持基盤位置では、地盤と杭の応答はほぼ一致しているが、地盤浅部では、建物周辺杭と建物中心杭との応答挙動が異なっており、群杭内部地盤の応答抑制効果が見られる。

また、地表観測点では若干の位相差が有り、

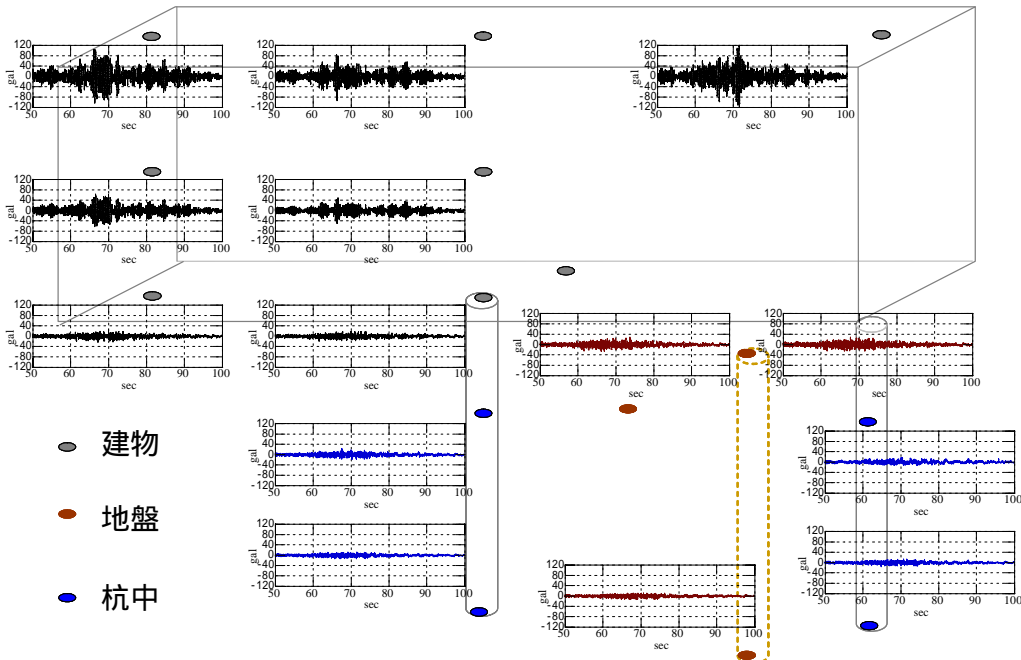


図 12 2004 年東海道沖地震における 7 階建プレキャスト・プレストレス建物の地盤 - 杭 - 建物の張間方向応答加速度

これが、ロッキング入力やねじれ動入力を励起している。基礎の動きは地盤地表の動きに比べ、短周期成分が減じられ、応答も抑制されており、入力損失効果が多少見られる。

建物内部では、高さと共に応答が増幅している。桁行方向に比べ張間方向でロッキング応答が卓越し、また、屋上階では、建物のねじれ応答により同一床面でも応答が異なっている。この建物の場合、並進とねじれの固有振動数が近接しているために、ねじれ応答が励起されやすくなっている。

他の構造の建物の観測記録と比較すると、振動数・減衰定数・応答モードなどは、純ラーメン構造 S 造建物と、耐震壁付きラーメン構造 SRC 建物との中間的な挙動を示している。

(4) 微動・強風時・地震時の応答性状の違い

2004 年は、東海道沖地震などの地震記録に加え、度

重なる台風の来襲で、強風時の記録を多数得ることができた。そこで、ここでは、微動時、強風時、地震時の観測記録を比較することにより、固有振動性状の推定を行う場合の注意点などを検討してみる⁶⁾。対象建物は、純ラーメン構造 S 造 10 階建て建物であり、建物屋上の並進とねじれ動、建物 1 階の並進とロ

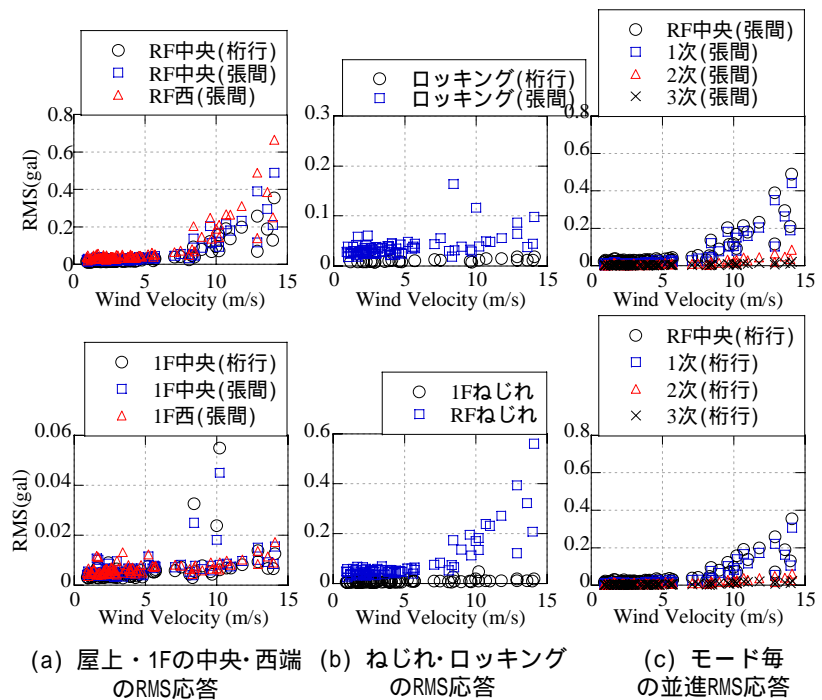


図 13 名古屋地方気象台の 10 分間平均風速と建物 RMS 応答加速度との関係

ッキング動の記録を中心に分析する。

図 13 は、微動及び強風時の建物各部の応答の風速依存性を示したものである。応答は RMS 加速度として求め、風速は名古屋大学から 1km 程度離れた名古屋地方気象台の 10 分間平均風速を採用している。図より、微動時には並進応答に比べロッキング・ねじれ応答が卓越し、風速の増大と共に、上部構造の弾性応答とねじれ応答が増幅され、その結果、張間方向のロッキング応答が励起されている。また、風の影響は 1 次モードに顕著に表れ、2 次以上の高次モードへの影響は小さい。

図 14 は、微動時、強風時、地震時の、固有振動数付近の振動モードと、より低振動数域の振動モードを示している。図のように、固有振動数付近では共通して弾性変形が卓越するが、低振動数域では、微動時にはロッキングが、強風時には上部構造の弾性変形が、地震時には剛体的な並進動が卓越している。

この振動モードの差異は、観測記録から推定される振動システムにも影響を与える。図 15 は、微動・強風時及び地震時の屋上階と 1 階とのフーリエスペクトル比を、風速順、地震動強さ順に並べ、コンター図の形で表示したものである。図のように、風速の増大と共に、フーリエスペクトル比のピークの裾野が広がっている。一方、地震時には固有振動数の振幅依存性が認められる。

以上のことから、微動時には水平・ねじれ・回転地動同時入力を、強風時には上部入力を前提にしたシステム推定が必要である。

4. まとめ

名古屋地域における 2004 年東海道沖地震の地盤・建物観測記録を基に、堆積平野の地震動特性に及ぼす深部・浅部地盤の影響や、中低層建物の地震時挙動について概説した。今後、より詳細な分析を進める予定である。

参考文献

- 1) 飛田・福和他 (2001): 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, 技術報告集, 13 号, 49-52.
- 2) 福和・佐藤・早川他 (2002): 濃尾平野の地盤調

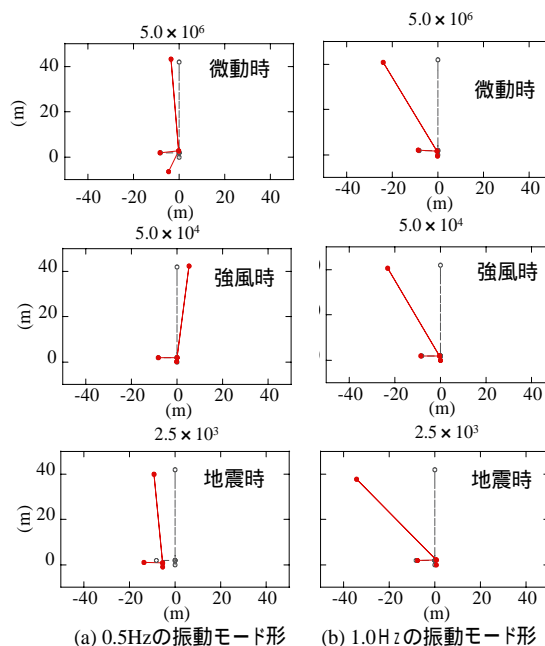


図 14 微動時・強風時・地震時の振動モードの違い

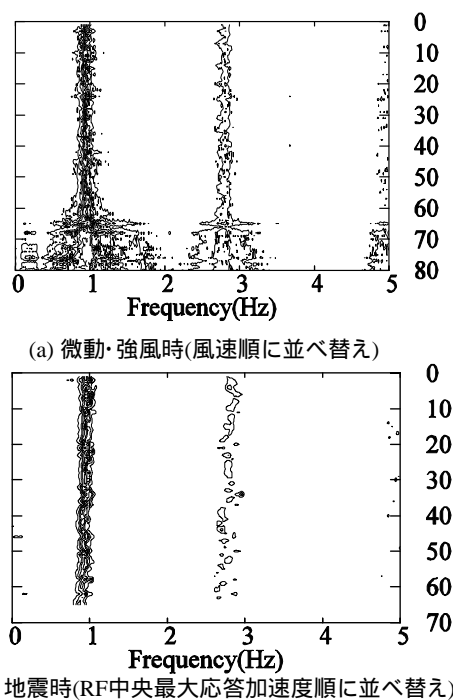


図 15 強風時・地震時のフーリエスペクトル比の風速・地動強さ依存性

- 3) 大河内他 (2002): 地震応答の観点から見た地震動指標に関する検討, 構造工学論文集, 48B, 429-436.
- 4) 宮腰・中田他 (2005): 名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基盤地震動の作成, 地震工学会
- 5) 小島・福和他 (2002): 建物強震観測 DB 公開用 web システムの構築, 技術報告集, 17 号, 553-558.
- 6) 山崎他 (2005): 微動・強風・地震時の建築構造物の振動性状に関する研究, 東海支部研究報告集