

8. 2004年東海道沖地震における観測記録の概要

本章では、以下の論文を引用する。

- 2004年東海道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～
(日本建築学会：第4回強震データの活用に関するシンポジウム「最近の地震に建築物はどう応答したか」資料，2005.3)
- 地域における多期間の強震観測網のネットワーク化と地域防災への活用
(防災科学技術研究所研究資料，2005.3)

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

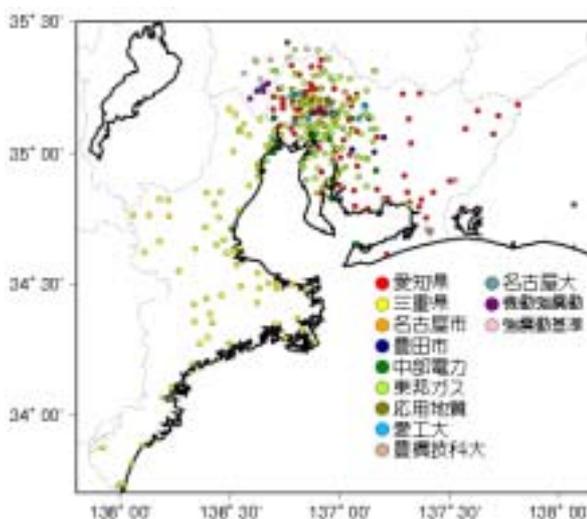


図1 東海版大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムの観測点

(部分は、濃尾平野の観測記録

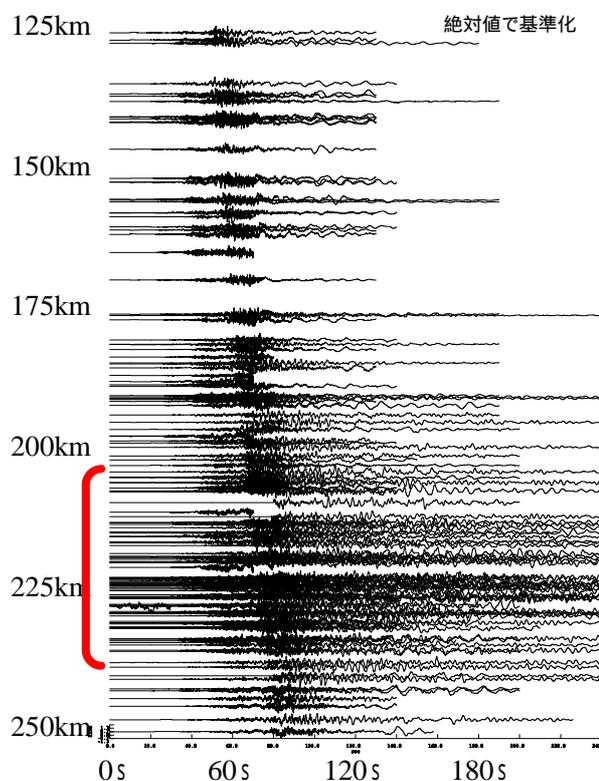


図2 2004年東海道沖地震での三重から愛知・岐阜に至るRadial方向速度波形

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

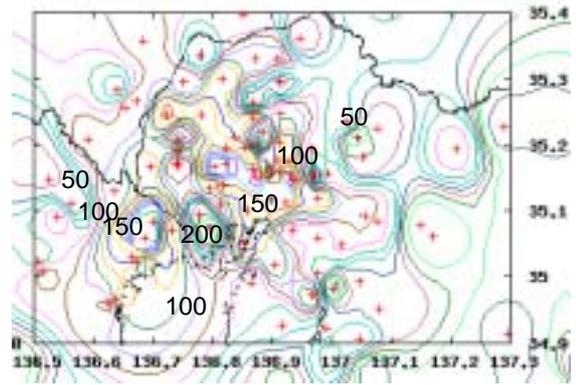


図 3 2004 年東海道沖地震での地震動継続時間 (最大速度の 50%の波形長さ)

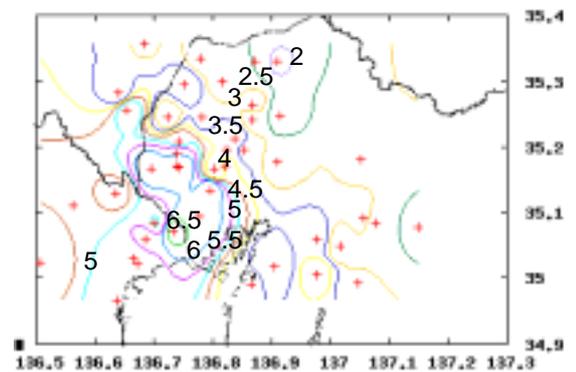


図 4 2004 年東海道沖地震の H/V スペクトルから求めたやや長周期域の卓越周期分布

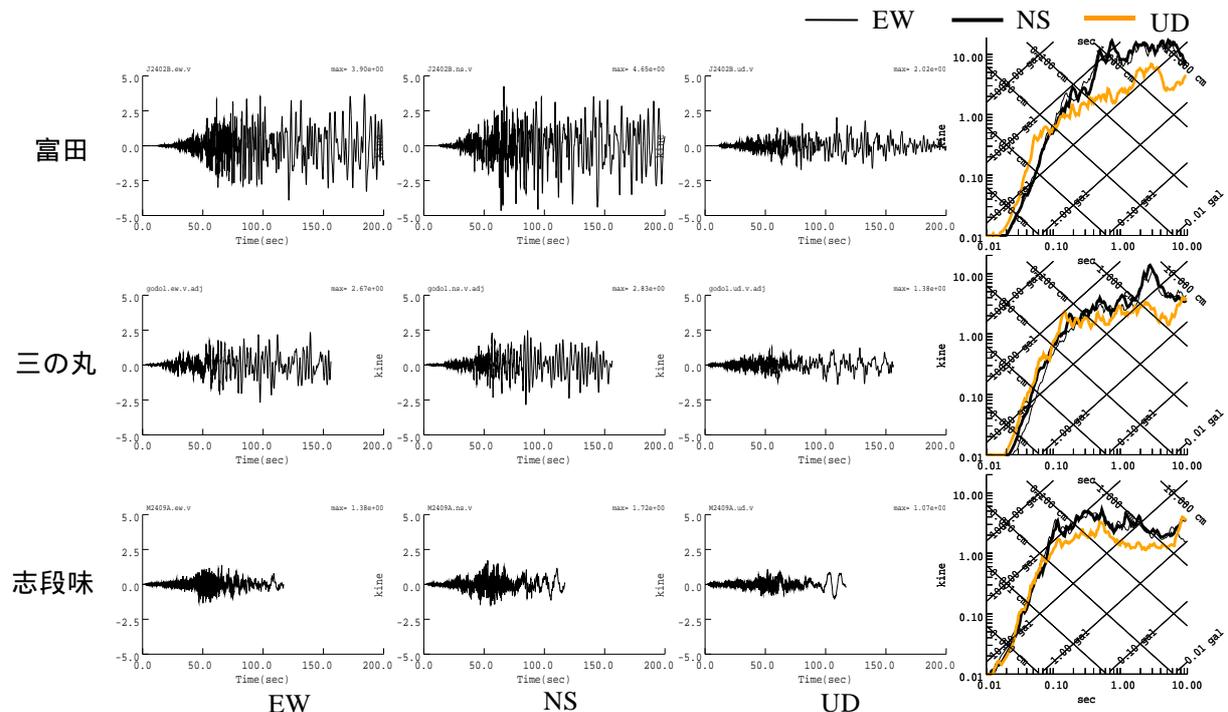


図 5 2004 年東海道沖地震での名古屋市内代表 3 地点での速度波形と速度応答スペクトル

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

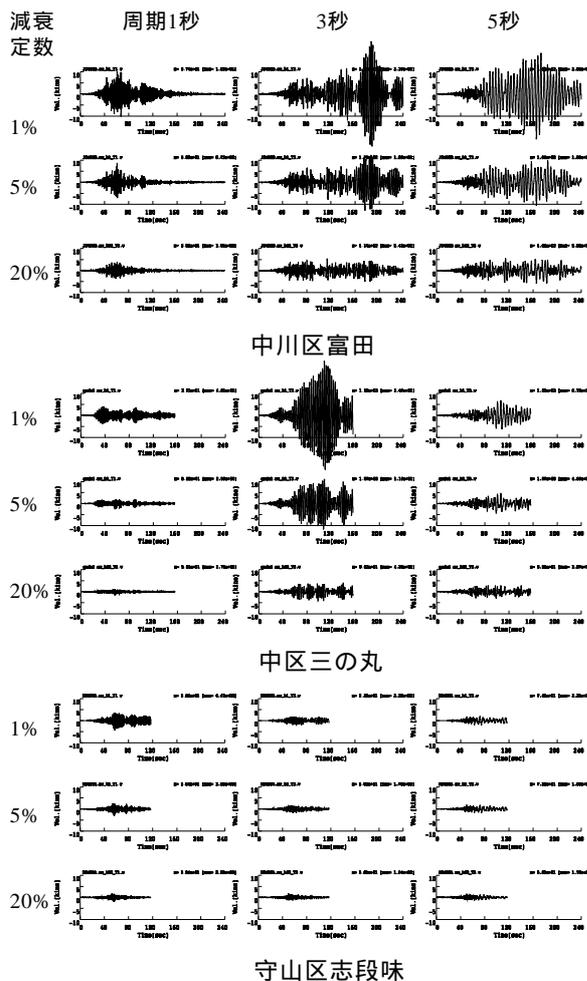


図6 2004年東海動沖地震での名古屋市代表3地点の地表NS応答に対する異なる周期・減衰定数を有する1自由度系の速度

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

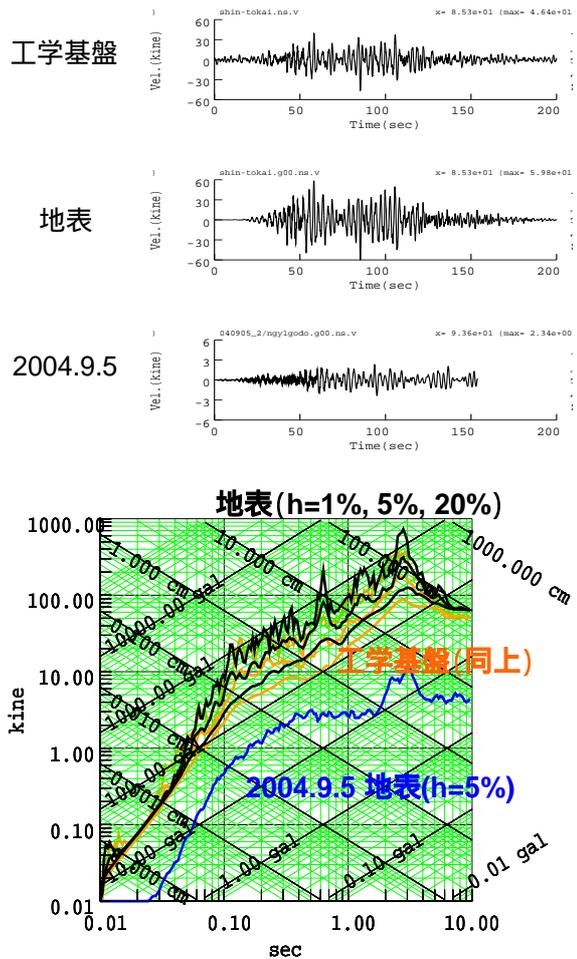


図7 名古屋市三の丸地区の設計用地震動と2004年東海道沖地震での観測記録の比較 (上: NS方向の速度波形、下: 速度応答スペクトル)

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⁾。

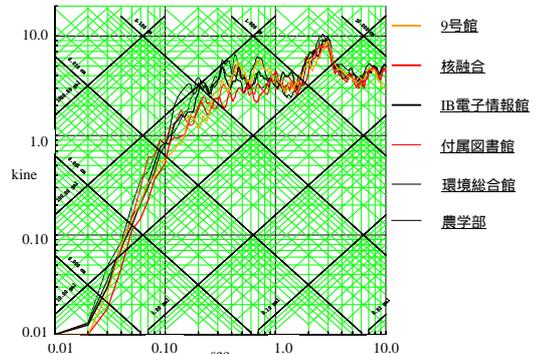
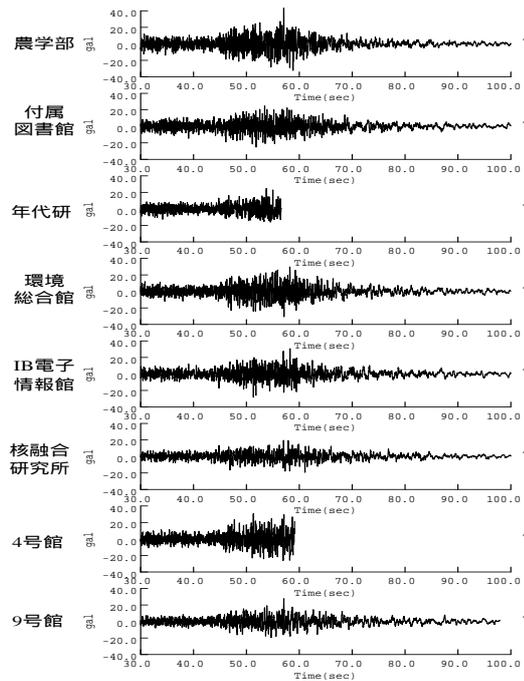


図 8 2004 年東海道沖地震での名古屋大学内の観測記録 (上: NS 方向の加速度波形、下: 5%速度応答スペクトル)

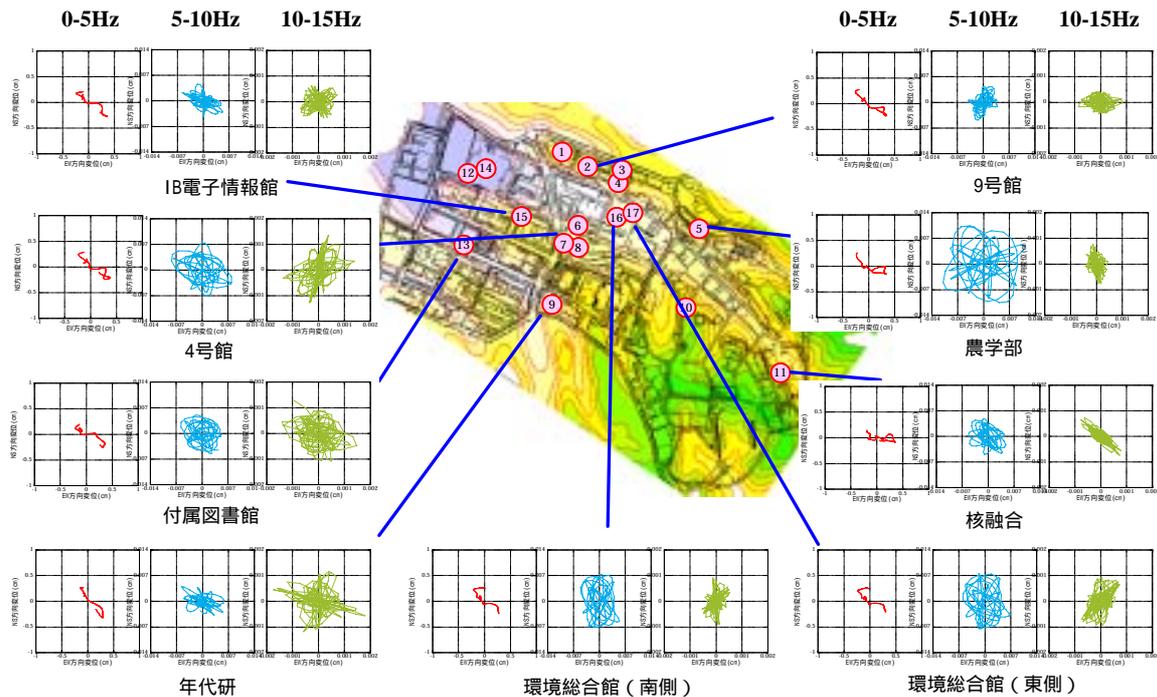


図 9 2004 年東海道沖地震での名古屋大学における振動数帯域毎の水平面内変位軌跡

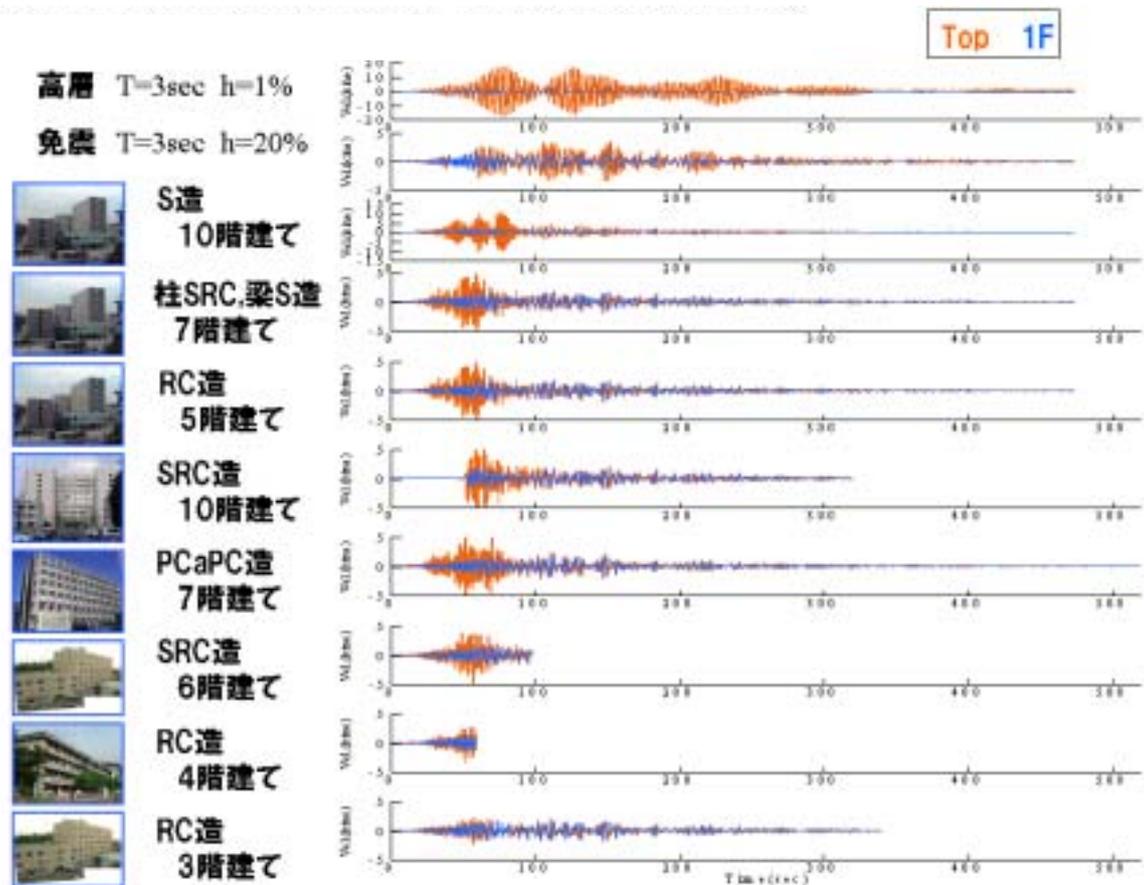


図 10 2004 年東海道沖地震における異なる高さ・構造の建物の張間方向速度波形

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

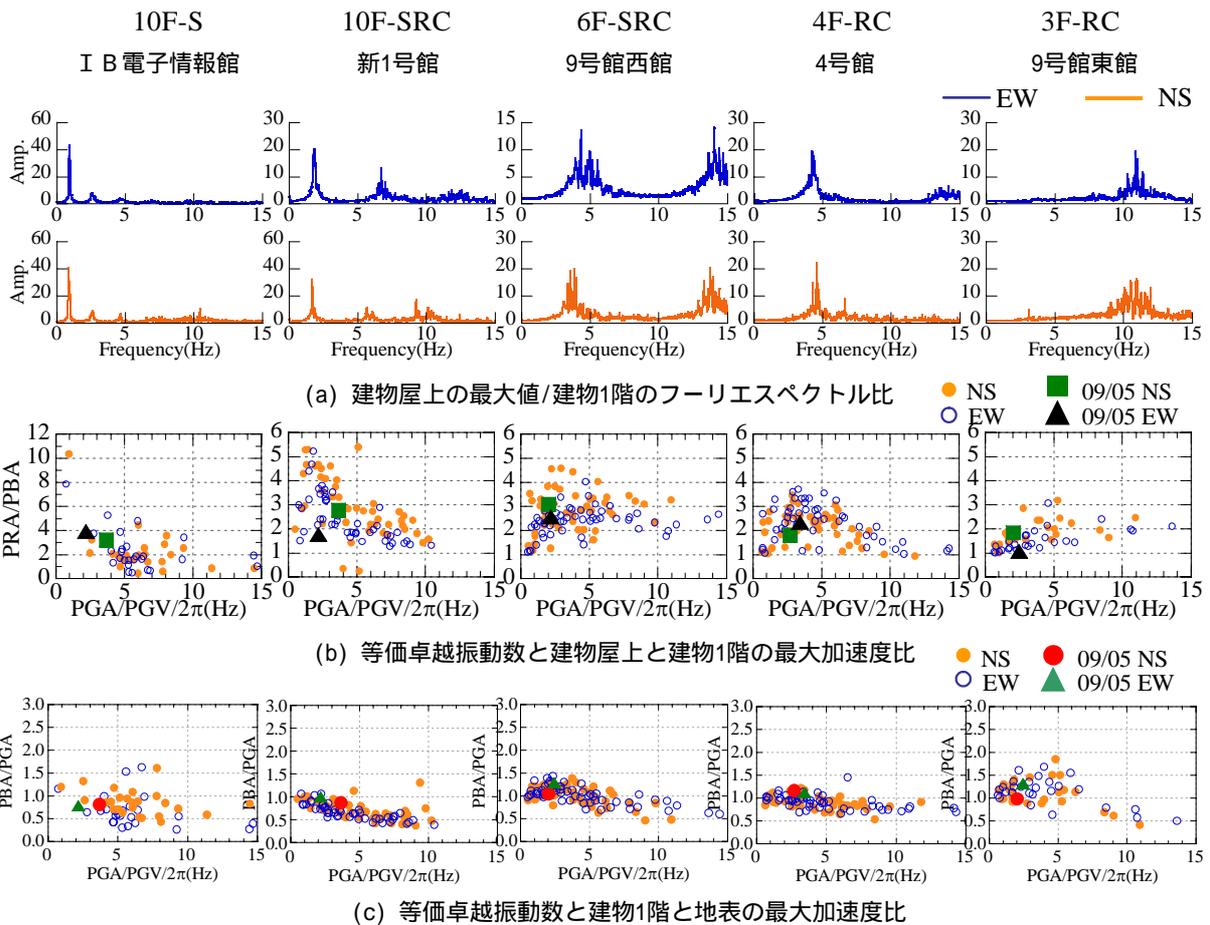


図 11 2004 年東海道沖地震におけるフーリエスペクトル比と、既往の地震での建物応答増幅比・有効入力増幅比の地震動卓越振動数依存性

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、

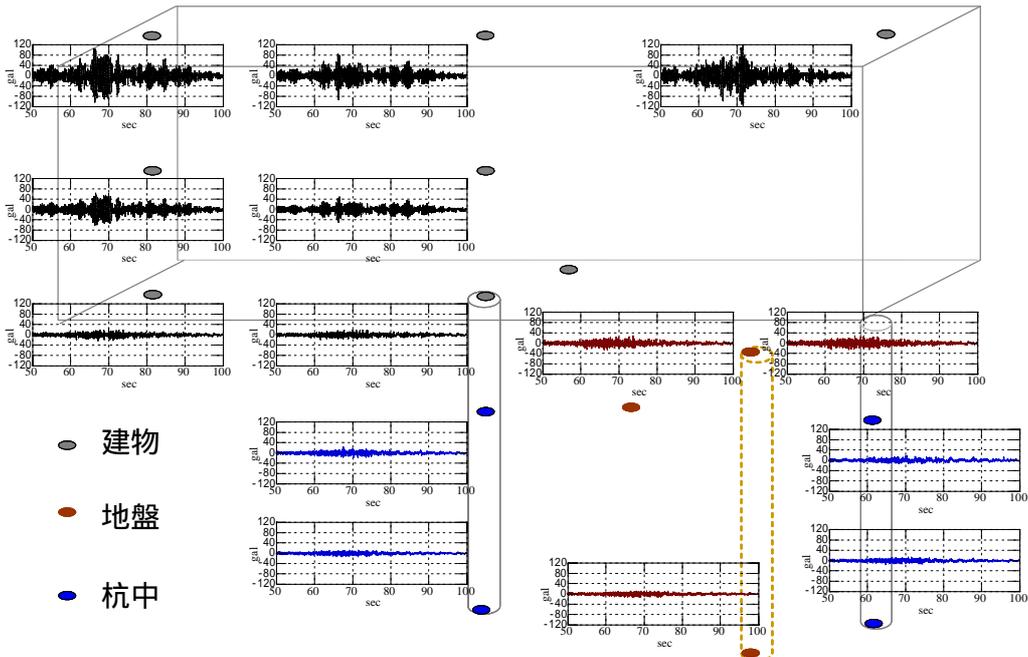


図 12 2004 年東海道沖地震における 7 階建プレキャスト・プレストレス建物の地盤 - 杭 - 建物の張間方向応答加速度

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

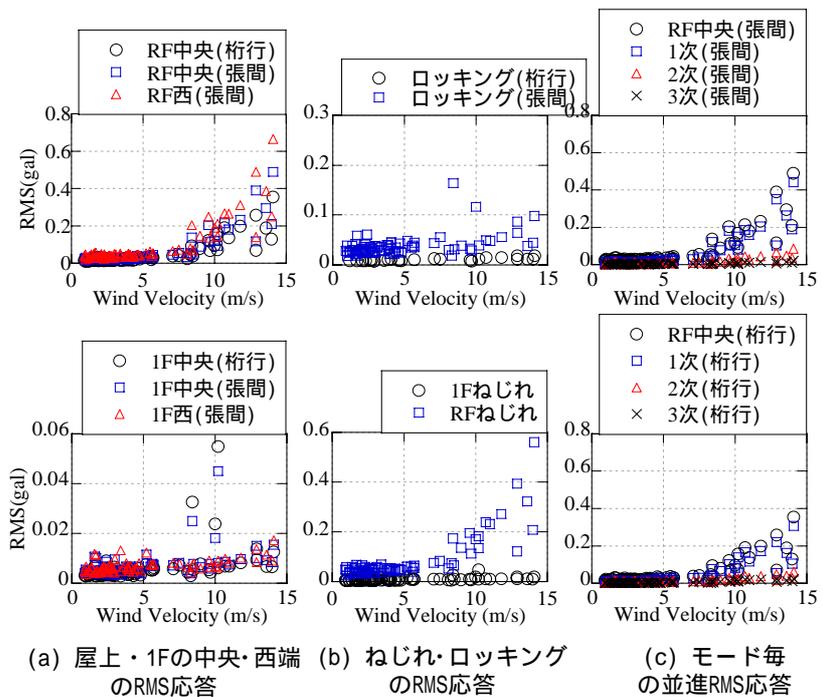


図 13 名古屋地方気象台の 10 分間平均風速と建物 RMS 応答加速度との関係

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

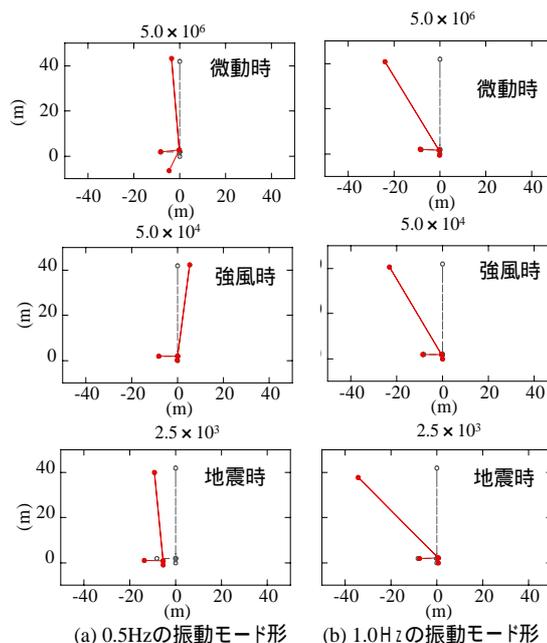


図 14 微動時・強風時・地震時の振動モードの違い

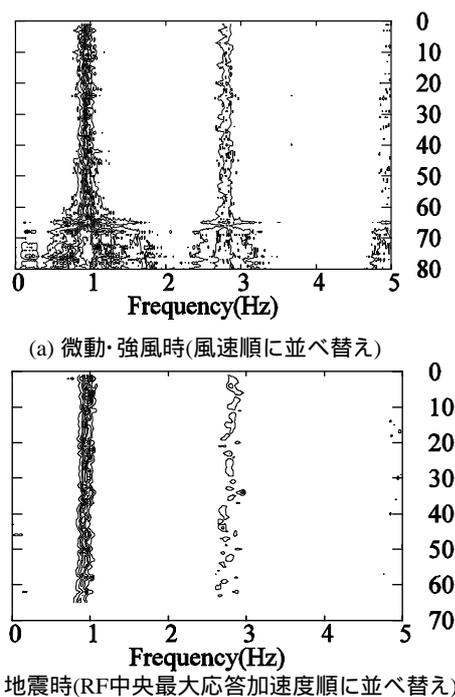


図 15 強風時・地震時のフーリエスペクトル比の風速・地動強さ依存性

- 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

地域における多機関の強震観測網のネットワーク化と地域防災への活用

福和伸夫* 飛田潤*

Networking of Existing Seismic Observation Systems and Application to Regional Disaster Mitigation

Nobuo FUKUWA* and Jun TOBITA*

*Department of Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan
fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp, tobita@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

Abstract

This paper reports the current situation of the seismic monitoring program conducted by Nagoya University. First, the system for observing seismic ground motion in the Tokai Region is described. This is a super-network combining existing seismic ground motion observation networks deployed by multiple institutions and connected by the Internet. The network was established with the purpose of obtaining the characteristics of seismic ground motions over a wide area. Next, the network for observing the earthquake response of the structure-soil system is described. Buildings on the Nagoya University campus were chosen with the objective of clarifying their dynamic response characteristics to seismic excitation, and the observation results are published on a web page. A newly proposed seismic observation system is then discussed. An inexpensive seismic observation system based on acceleration sensors used at present for automotive air-bag systems has been built. Sensors have also been combined with warning light towers and PCs and connected to the Internet to create a system capable of transmitting raw, real-time seismic data for recording as well as signals for emergency alarm systems. The design also allows expansion of the system to allow for multiple uses. Other components could be meteorological sensors, live cameras, etc., for disaster prevention, ordinary crime prevention, environmental monitoring, education, or other purposes.

Key words : Seismic observation, Super-network, Soil-structure system, Inexpensive sensor, Disaster prevention, Data publication

1. はじめに

地域の地震防災を推進するには、地域の地震時の揺れの性質を適切に把握する必要がある。また、建物の合理的な耐震設計を行うには、建物に作用する地震動の性質や建築物と地盤との動的相互作用効果を強震観測記録に基づいて明らかにすることが必要となる。しかし、現状は、観測記録の数や質が不十分であり、観測点数の増加、観測の質の改善、既にある観測記録の公開・普及が望まれる。兵庫県南部地震以降、複数の機関で、地盤の強震

観測網が整備されてきたが、建物の強震観測は未整備のままである。そこで、本論では、筆者らが開発してきた、地域の強震観測機関を相互接続したスーパーネットワークや、建物 - 地盤系の強震観測とデータ公開のためのシステムについて紹介する。また、観測点数を抜本的に増やしたり、観測記録を地震工学以外に広く利用するために開発しているシステムについても紹介する。

筆者らが開発してきた観測記録の収集・公開システムには、地盤震動を対象とした東海地域大都市圏強震動総

*名古屋大学大学院環境学研究科

合観測ネットワークシステムと、建築物 - 地盤系を対象とした名古屋大学建物・地盤強震観測システムがある。東海地域大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムは、名古屋を中心とする東海地域を対象とした広域の地盤震動観測システムであり、この地域で強震観測を行っている複数の機関の強震観測ネットを接続したスーパーネットである。各観測機関の地盤地表及び地中での強震観測波形をオンラインで収集し、一元的なデータベースとした上で、ウェブを介して公開している。

名古屋大学建物・地盤強震観測システムは、名古屋大学内の複数の建物と地盤で高密度の強震観測をオンラインで行っているもので、大学内 LAN を介して強震観測記録を収集している。このシステムでは、観測された波形記録に加え、建物の構造図面などの詳細データや地盤データをウェブ公開している。観測対象建物の選定に当たっては、建築物の地震時の挙動に与える影響因子の分析を可能にするために、戦略的な観測計画を立てている。

観測数を抜本的に増やす工夫としては、エアバッグ作動用のセンサーを地震計に改造することにより開発した安価なセンサー、携帯電話や LAN を利用したネットワークの構築などの試みを行った。さらに、地震工学以外に広く利用するシステムとして、環境振動モニタリングシステムや、インターネットカメラや気象センサーと組み合わせることにより小学校などでの教材や防災拠点化の道具として利用できるシステム (AnSHIn Station: Anti Seismic Hazard Information Station) などの開発を行っている。

2. 東海地域大都市圏強震動総合観測ネットワークシステム (TAS-net)

建物の耐震設計を合理的にするには、強震観測に基づいて、地域ごとに、強震動の特性を把握しておくことが重要となる。日本第3の都市圏である東海地域には、濃尾平野、伊勢平野、岡崎平野、豊橋平野が広がっており、1000万人を超える人が居住している。この地域では、気象庁や防災科学技術研究所の K-net・KiKnet、愛知県、岐阜県、三重県などの計測震度ネットに加え、名古屋市、豊田市などの市町村、中部電力、東邦ガス、名古屋高速道路公社などのライフライン企業、名古屋大学、豊橋技術科学大学、愛知工業大学などの大学機関が強震観測を実施している。

各機関の強震観測ネットを相互接続し、観測データを一元的に利用できる環境を整えることができれば、観測記録をより有効に活用できる。しかし、各機関は独自の目的で観測を行っているため、本来の観測目的を阻害されることを嫌う。また、各機関の強震観測システムの通信システムや収集サーバーは、各々独自に開発されたものであり、容易に一元化できない。そこで、本システムでは、地震発生後半日程度以上経過した深夜に各観測機関の波形を収集することにより各機関の業務への影響を最低限にとどめた。また、図1に示すような様々なインターフェースを機関毎に用意することにより、各機関の

システムの独自性を保持した形での接続を可能にした (飛田他, 2001)。ここでは、直接、各地震計と接続するもの、複数の地震計を接続した収録機と接続するもの、地震計のシステムサーバーと接続するものなどが有り、接続の方法には、通常電話、ISDN、携帯電話、PHS、インターネットなど様々な形態が準備されている。

現在、接続しているのは、3県、2市、3会社、3大学の強震観測ネットであり、観測点は図2(a)に示すように東海3県に広がっている。合計すると約400の観測点が存在する。なお、岐阜県の計測震度ネットは波形を回収できないシステムのため、濃尾平野内の岐阜県観測点に隣接して、名古屋大学の強震計を設置している。これらに、Knet、KiKnetを加えれば、約600の観測点になる。この強震観測スーパーネットは2000年より稼働しており、収集した観測記録は、図2(b)に示すように、ウェブを介して公開している。ここでは、観測点毎に地震動強さ、波形と応答スペクトルの形で整理して表示すると共に、観測点の地震計の設置条件、地盤データ、地震計の特性もまとめて示してある。

広域での膨大な記録を総合的に分析することにより、地域全体の地盤震動特性を把握することができる。図3には、(a)に2000年三重県中部地震でのS波到達時刻のコンター図を、(b)にレシーバー関数から求めたPS-P時間の分布を、(c)に2000年鳥取県西部地震での強震記録のH/Vスペクトルから求めたやや長周期の周期分布を示す。これらの結果は、既往の重力異常分布や、堆積平野の地下構造調査の結果とも良く対応しており、超高層建物や免震建物の設計にとって貴重な知見となっている。

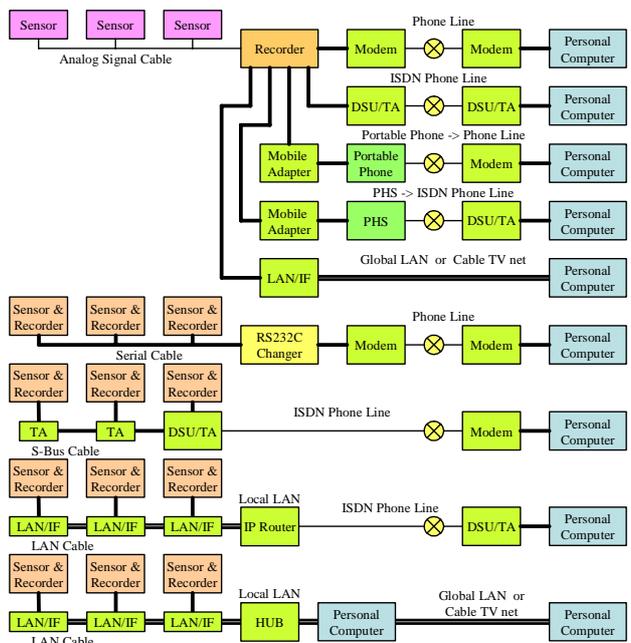
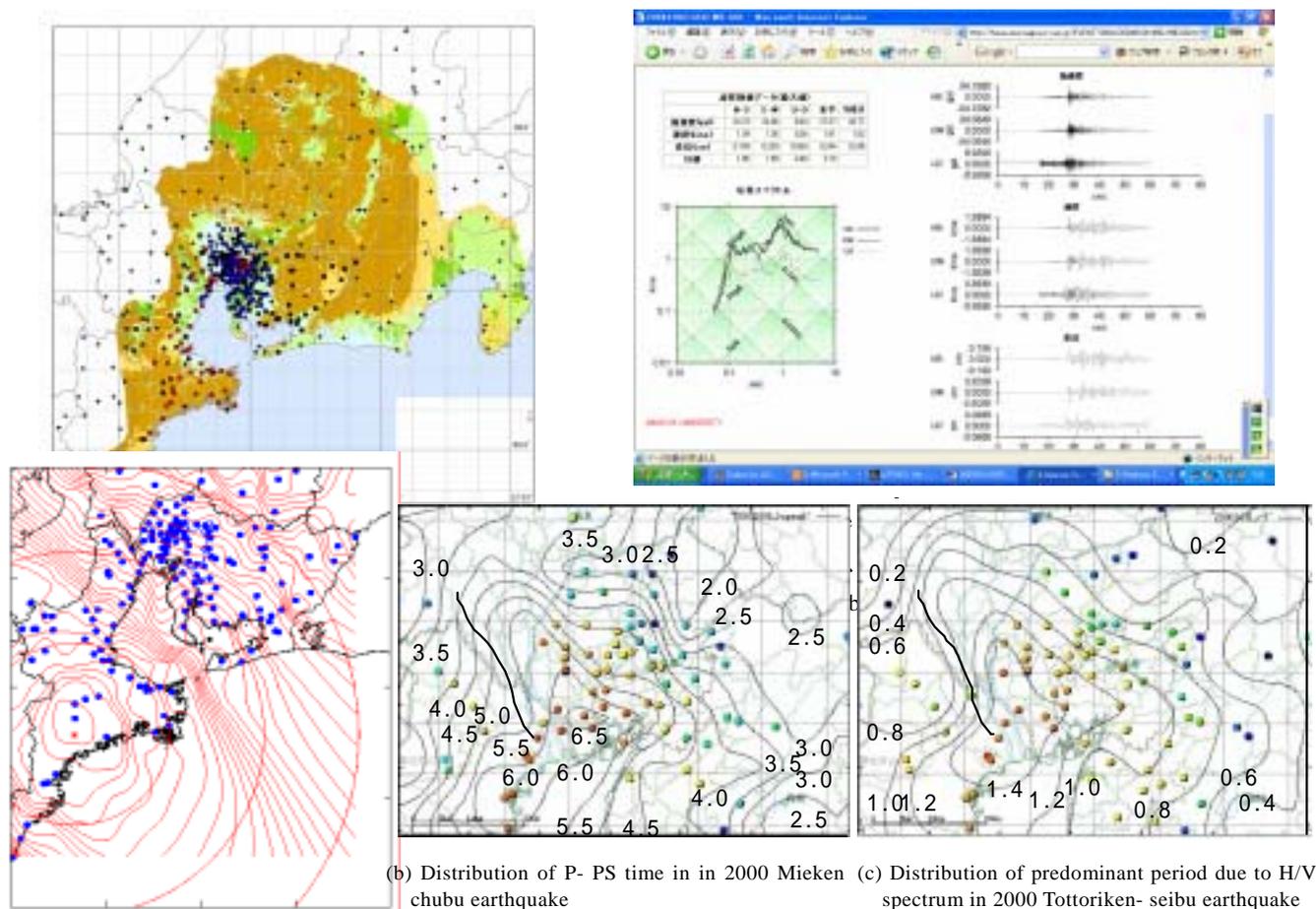


図1 大都市圏強震動総合観測ネットにおける観測機関との接続インターフェース

Fig.1 Interface for connections between institutions in the strong ground motion observation network



(a) Distribution of S wave arrival time in 2000 Mieken chubu earthquake

図3 多点の観測記録を用いた広域の地震動特性の分析例

Fig.3 Examples of analysis of extensive strong ground motion records

3. 名古屋大学における建築物 地盤強震観測システム

3.1 戦略的な強震観測の必要性

一般建築物の地震時挙動に及ぼす構造物と地盤との動的相互作用の重要性を指摘する理論的検討は従来から多数なされてきた。しかし、系統的な実証データが不十分であったため、一般の構造技術者はその重要性を十分に認識するに至っていない。また、兵庫県南部地震において、設計時想定以上の強さの地震動を受けたにもかかわらず、その被害が微少に留まった一般RC建築物が多いが、建築物の強震記録が十分に無いためにその原因を十分に把握できないでいる。

このような状況を改善するには、動的相互作用の支配的要因の影響度を個別に分析できる強震観測体制を整える必要がある。すなわち、1)動的相互作用による長周期化と減衰増大効果の分析、2)基礎入力動と有効入力動の差の分析、3)同一建物での地盤条件の差による動的相互作用効果の分析、4)同一地盤・基礎条件での建物階数による動的相互作用効果の違いの分析、5)同一地盤条件、同一建物階数での上部構造・基礎構造の構造形式による動的相互作用効果の違いの分析、6)上部構造の偏心の有無による立体振動挙動の分析、7)隣接して存在する建物による構造物-地盤-構造物相互作用効果の分析、8)2

次部材の存在による動特性の振幅依存性の分析、などを可能とする観測メニューを揃える必要がある。

動的相互作用効果の有無を把握するには、最低限、自由地盤地表、建物基礎中央、建物屋階中央における3方向成分の応答、建物基礎のロッキング応答を検討するための基礎端部の上下方向成分の応答を計測できる観測体制を整える必要がある。さらに、建物の立体振動挙動を把握するには、ねじれ応答や床の面内・面外変形を把握するために、床端部の応答の計測も必要となる。

地盤条件の差を検討するには、小学校建物の様に共通仕様の建物を対象にして、地盤条件が異なる建物の観測をすれば良い。

建物階数の差を検討するには、建物建設時に、建物階数の変化に合わせて観測する方法が考えられる。これは、有効入力動と基礎入力動の違いを把握するのに利用できる。また、杭の観測を継続的に実施すれば、上部構造からの慣性力による影響と地盤変形による影響を分離して分析することも可能になる。

建物の構造形式による差を把握するには、同一敷地内での同一高さの建物の同時観測をすれば良い。あるいは、耐震改修による耐震壁増設前後に継続して観測する方法も考えられる。

さらに、隣接建物の影響を把握するには、隣接して建物が建設される予定のある建物を対象として、隣接建物の建設前後に継続して観測をすれば良い。また、偏心の影響を把握するには、平面的な増築をする予定のある建物を対象として増築前後に継続して観測すればよい。

幸い、筆者らが勤務する名古屋大学には、数十の建物が存在し、建設途中や増築途中、耐震改修途中の建物も多い。また、丘陵地に位置するため、谷と尾根が交錯し、切り盛りなどの地盤条件もバラエティに富んでいる。結果として、図4に示すような観測メニューを整えることができた。以下にその概要を示す(福和, 2000)。

3.2 建物・地盤強震観測システムの概要

名古屋大学の東山キャンパス及び鶴舞キャンパスにおいて、13の建物で強震観測を実施中(一部実施予定)である。また、大学外では、現在、3軒の戸建住宅、3棟の免震建物、3棟の庁舎(免震改修予定の建物)で観測をしている。また、建設が始まりつつある超高層建物2棟で建設時の強震観測を準備中である。

名古屋大学内の建物に関しては、大学内のLANに地震計をLAN-Interfaceを介して接続することにより、ネットワーク化している。大学外については、ケーブルテレビネット、ISDN回線、PHSなどを利用して接続している。公開可能な観測記録については、図5に示すようにWebを介して公開している(小島他, 2002)。Webには、観測対象建物の意匠図や構造図、地盤データ、観測点配置、センサーの仕様、観測された地震のリストと強震観測波

形、常時微動記録などを図化して示している。既に観測記録の検証が十分にされたデータについては、デジタル記録もダウンロード可能にしている。また、Webを構築したHTMLプログラムも合わせて公開することにより、同様の強震観測記録公開システムが広く普及することを促進している。

以下に、幾つかの観測結果を例として示す。図6は、名古屋大学内にある5つの学校校舎建物の強震観測記録である。図には、建物基礎と建物屋上の記録を重ね書いている。左側の図は、震源が離れた位置での継続時間の長い地震動に対する地震応答、右側は敷地直下での継続時間の短い地震動に対する地震応答結果を示している。図より、建物階数の違いによる応答特性の差、耐震壁付きフレーム構造のRC造建物と純フレームのS造建物の応答特性の差、継続時間の違いによる共振応答の育ち方の差を明確に読みとることが出来る。これらの結果を相互に比較することにより、建物の応答性状に及ぼす要因別の分析が可能になる。

図7には、18階建て高層建物の建設時に地震観測を行った例を示す。建物建設時に、建物階数の変化に応じて強震計を上階に移設して観測を行うことによって、同一地盤・基礎条件下で、建物階数のみが変化した場合の応答性状を検討している。これは、建物と地盤との動的相互作用効果を実証する上では、極めて有用な観測である。

一般に、建設現場での強震観測には、様々な障害があり、現場サイドの協力が不可欠である。幸い、当現場では、IT化が進んでおり、タワークレーン上にライブカ

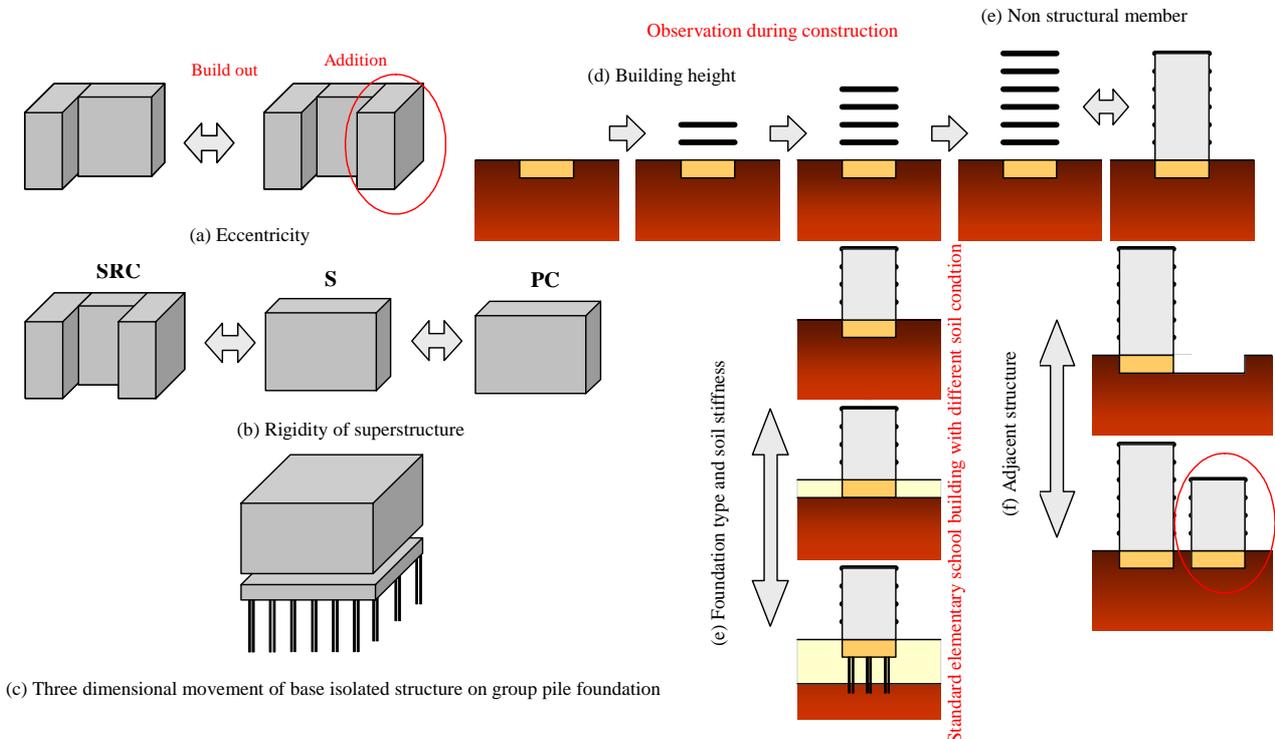


図4 名古屋大学で実施している建築物の地震時挙動を要因別に分析するための地震観測システム
 Fig.4 Earthquake observation items for analysis of factors contributing to the dynamic behavior of buildings

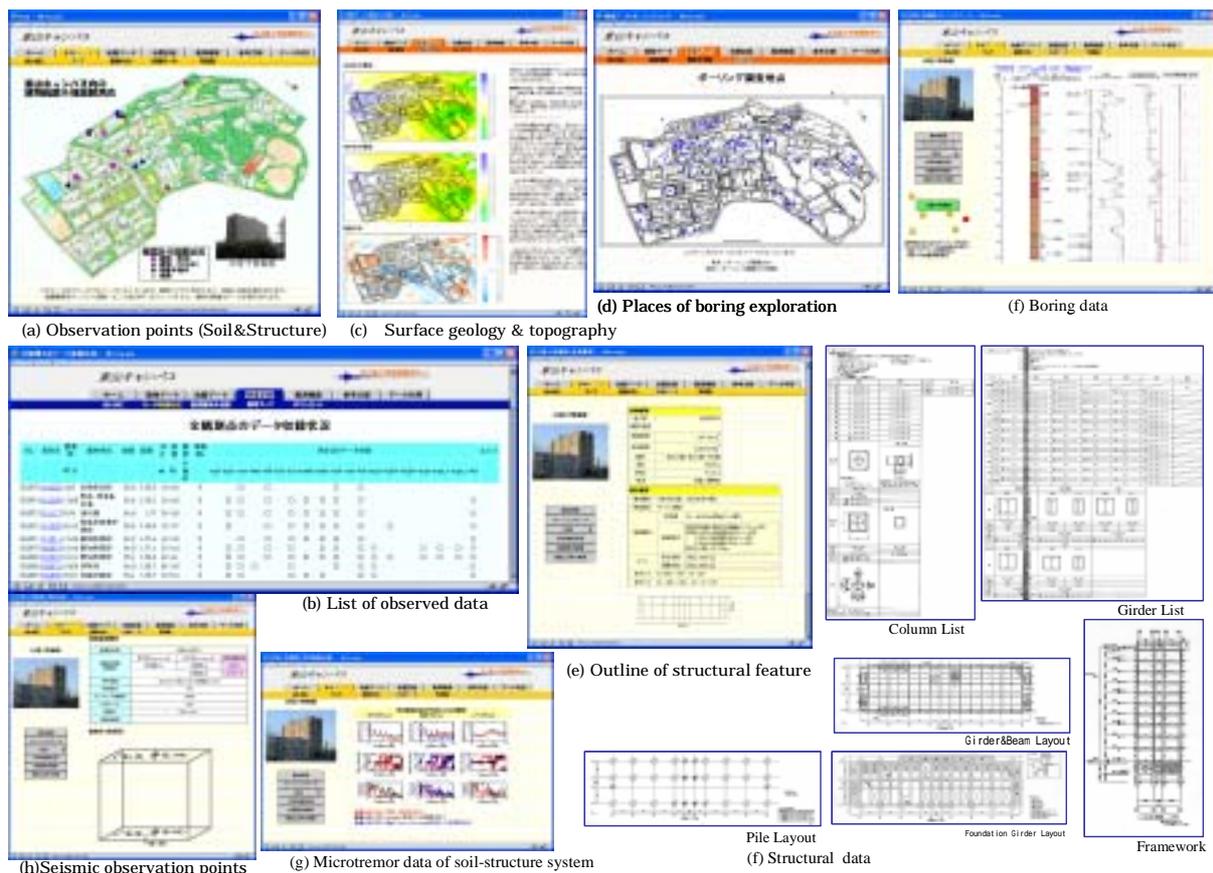


図 5 建物 地盤強震観測データのウェブ公開

Fig. 5 Web system for publishing structure-soil seismic response observation data

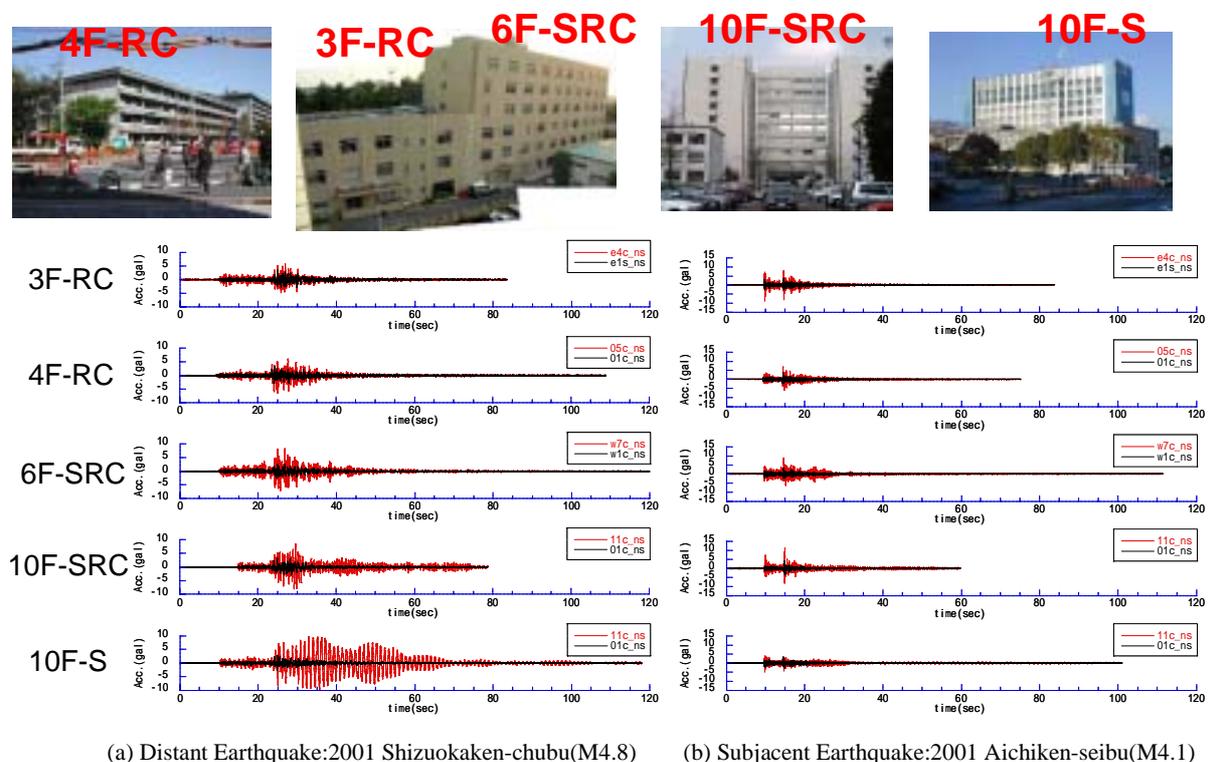


図 6 入力地震動の継続時間の違いによる高さと構造の異なる 5 つの建物の地震応答

Fig. 6 Records of observations of five buildings during an earthquake (left, distant focus; right, nearby focus)

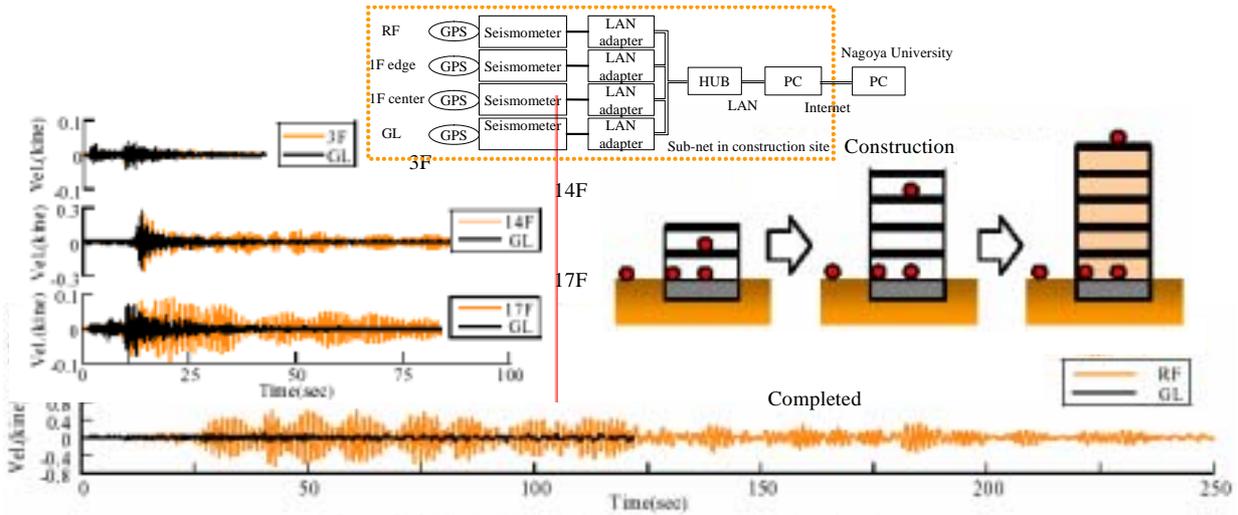


図 7 18 階建て建物の建設時の強震観測

Fig.7 Record of 18-story steel building under construction during earthquake

メラを設置されており、現場内に LAN が敷設されていた。そこで、図 7 に示すように、現場内で、強震観測アレイ用のサブネットを展開して、各強震計を LAN アダプター経由で LAN 接続し、現場内の PC、インターネット経由で、名大内の PC と相互接続した。これにより、データ回収の手間を省くと共に、現場作業への影響を極力減らすことができた。大学から PC 経由で強震計を起動することができるので、建設の進捗に応じて、常時微動を計測することも可能となった。図 7 には、建設中に得られた強震観測記録の一例を示す。建物が高層化すると、長周期化すると共に、逸散減衰が減少し、共振しやすくなっている様子が分る。

4. 強震観測の量と質を改善する新たな試み

4.1 廉価型地震計の開発による観測建物数の改善

建物の地震観測の数が増えない原因の一つに、地震計の価格の問題がある。一般に普及している強震計の価格は 100 万円程度である。建物を対象とした強震観測では、前述したように、地盤・基礎・建物屋上での観測が必要であり、ロッキング動の計測も行うと、設置費用や通信設備も含めれば、最低でも 500 万円以上の出費になる。このため、地震観測が行われている建物は、一部の超高層建物や免震建物に限られがちであり、一般の中低層建物の観測例は極めて少ない。

この状況を改善するために、筆者らは、自動車部品メーカーと協力して低価格の地震計の開発を行った(福和他, 2003)。ここで利用したのは、自動車のエアバッグを作動させるために量産化されている半導体加速度センサーであり、演算処理により、最大加速度、SI (Spectrum Intensity)、震度 (Seismic Intensity) の出力が可能ないようにした。分解能は 1 Gal、AD 変換は 16Bit、インターネット接続とパソコン接続が可能で、160 秒の記録を 10 波記録できるものである。その後、センサー部を 3ch(水平 2、上下 1 成分) 計測可能のものに変更した。

現在の仕様は、計測範囲は ±1500gal (上下動は 500gal)、分解能は 0.6gal (ピーク値)、インターフェースは LAN と RS232C を標準装備し、LAN、ISDN、携帯電話、PHS などに接続できる。表示器には震度を表示する。複数の地震計のトリガーで連動させることができ、無電圧接点を 3 ポート有し、時刻校正はサーバとの通信で自動的に行う。プレトリガは 15 秒、データ収録は 70 分間分収録可能である。様々な E (Earthquake など) を獲得できるという意味で、E-Catcher と名付けた。図 8 に地震計の外観と、新潟県中越地震の際に埼玉で計測した記録を、普及型強震計と重ねがいて示す。建築物にとって重要となる振動数の範囲では十分な精度を有しており、強震を対象とした観測では有効に利用できていることが確認できている。このような廉価型の地震計が普及すれば、全ての建物に地震計を設置することも夢では無くなり、性能保証型の設計の推進にも繋がる。



図 8 廉価地震計の外観と普及型強震計との波形比較

Fig.8 Overview of inexpensive seismometer, Comparison of recorded wave form with standard servo-type seismometer

4.2 気象センサーやライブカメラとの融合による用途の拡大

地震計を単独で用いるのではなく、気象センサーやライブカメラと一緒にパソコン経由でインターネットに接続することにより、地震計の用途を広く拡大することができる。

例えば、日常時には、工事振動や交通振動を監視する環境振動モニタリングシステムとして利用することが

きる。大地震発生時には、揺れや被害状況を双方向で送受信し、Web-GISと組み合わせることにより、簡易な防災システムとしての利用も可能となる。また、気象センサーと組み合わせれば、小・中学校での理科教育に用いることができる。気象センサーは、地域の高密度環境モニタリングシステムとしても利用できる。ライブカメラは、日常は防犯用のカメラとして利用し、地震発生時には地震計をトリガーとしてパソコンのハードディスクに映像を蓄えることにより、被災発生時の映像を収録できる。さらに、地震計をネットワーク化して、パトライトなどの警報装置を組み合わせれば、早期警戒システムとしての活用もできる。このように、用途を拡大することにより、地震計の設置数を抜本的に増加させることが可能となる。

図9に筆者らが試作したシステムを示す(福和他, 2001)。このシステムは、自治体の災害対策拠点などが運用するWeb-GIS(安震ウェブ: AnSHIn Web)、小学校などの地域の拠点に設置する安震ステーション(AnSHIn Station)、町の役員や行政の防災担当者などに配備する安震君(AnSHIn-Kun: Anti-Seismic Hazard Information Keeping Unit)から構成することを想定している。安震君はGPS、PHS、モバイルパソコン、デジタルカメラ、廉価地震計から構成した端末である。安震ステーションは、安震君の機能に、気象センサー、ライブカメラ、パトライト、液晶プロジェクターなどを加え、インターネットに常時接続することを想定している(飛田他, 2002)。

図10は、強震観測をリアルタイムに日常及び発災時の活動に活かそうとしたシステムである(飛田他, 2004)。図中には、名古屋大学内の8点及び中部地区の国立大

学・高専8校を相互に接続した、リアルタイム画像・波形モニタリングシステム、名古屋大学内の環境総合館の環境情報・エネルギー使用状況・建物応答状況をリアルタイムに表示するシステム(じしんモニ太)ウェブを介してナウキャスト地震情報を提供するシステム、さらにこれらの情報を自治体衛星通信網で送信したり、マルチスクリーンに表示することにより災害対応を行うシステムなどが示されている。このようなリアルタイムシステムは、地震計の有力な活用対象の場であると思われる。

5. 結論

本論では、建物及び地盤の地震観測の質と数の改善と、地震観測記録の有効活用を目的として、筆者らが取り組んできた下記のシステム開発事例を紹介した。

1) 中京圏を対象に、複数の機関の地震観測ネットをオンラインで接続したスーパーネットを構築し、地震観測データを一元的に収集・公開するシステムを作った。広域での膨大な記録を総合的に活用することにより、地域全体の地盤震動特性を分析することが可能となった。

2) 建築物の地震時挙動を明らかにするために、影響要因を個別に分析可能な地震観測態勢を提案し、それを、名古屋大学のキャンパス内での地震観測において実現した。さらに、地震観測結果の利用を促すため、観測記録を地盤・建物情報と一緒に公開するウェブを構築した。

3) 地震観測数を増加させるために、エアバッグ作動のセンサーを活用することにより、新たに廉価型地震計を開発した。また、地震観測の成果がより広く社会に活用されるようにするため、気象センサーやライブカメラなどと組み合わせた新しいシステムや、リアルタイム性

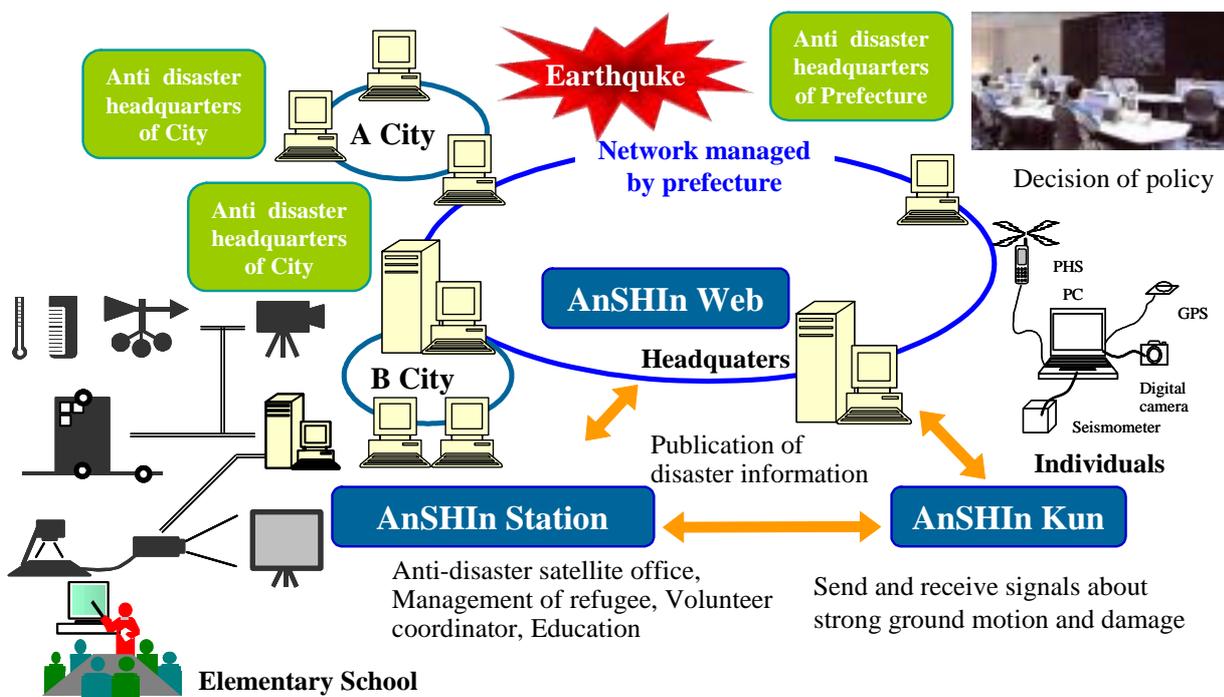
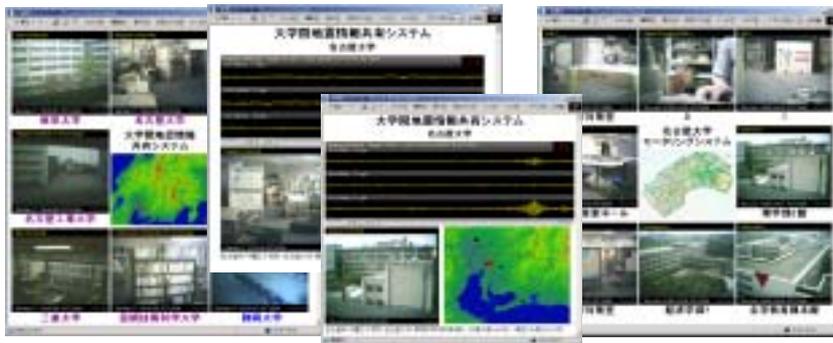


図9 双方向災害情報システム「安震システム」の概要
Fig.9 Overview and components of AnSHIn System

を活かしたシステムを提案した。これにより、地震観測が、防災、環境、防犯、教育、などにも利用可能になる。

6. 参考文献

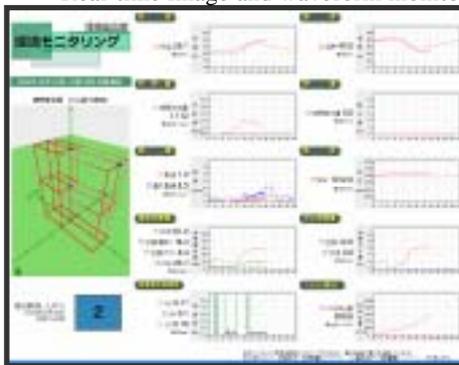
- 1) 福和 (2000): 建物 - 地盤の動的相互作用から見た強震観測, 第 2 回強震データの利用に関するシンポジウム, 日本建築学会, 57-68.
- 2) 福和・高井・飛田 (2001): 双方向災害情報システム「安震システム」と携帯型災害情報端末「安震君」, 日本建築学会技術報告集, 第 12 号, 227-232.
- 3) 福和・小出・糸魚川 (2003): 建物観測用の普及型低コスト地震計の試作, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, 871-872.
- 4) 小島・福和 (2002): 建物強震観測 DB 公開用 web システムの構築, 日本建築学会技術報告集, 第 17 号, 553-558.
- 5) 飛田・福和 (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, 日本建築学会技術報告集, 第 13 号, 49-52.
- 6) 飛田・福和 (2002): 双方向災害情報伝達に基づく地域防災拠点支援システム, 第 11 回日本地震工学シンポジウム.
- 7) 飛田・福和・中野 (2004): 地域防災協働態勢を支援するシステムと防災拠点の構築, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号.



Real-time image and waveform monitoring system



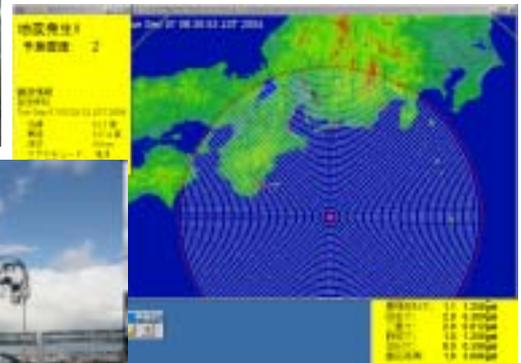
Multi-viewer system for disaster mitigation management



Real-time building environment and seismic response monitoring system



Communication system using VSAT



Now-cast and its alarm system

図 10 リアルタイム地震情報の様々な利用

Fig.10 Various usage of real-time earthquake information

要 旨

本論では、建物及び地盤の地震観測の有効活用と、質と数の改善を目的として、中京圏の複数の機関の地震観測ネットをオンラインで接続したスーパーネットの開発事例、建築物の地震時挙動に及ぼす影響要因を個別に分析すると共にデータをウェブ公開する建物 地盤強震観測システムの開発事例、強震観測の数と質を抜本的に改善するための廉価型地震計と、気象センサーやインターネットを利用した双方向総合モニタリング・災害対応リアルタイムシステムの開発事例を紹介した。

キーワード：強震観測、スーパーネット、建物 地盤系、廉価地震計、防災、データ公開、リアルタイム