

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。

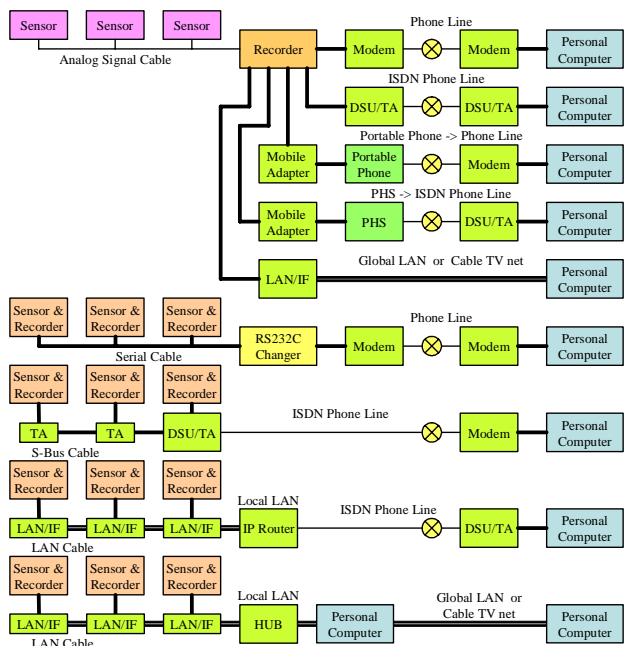
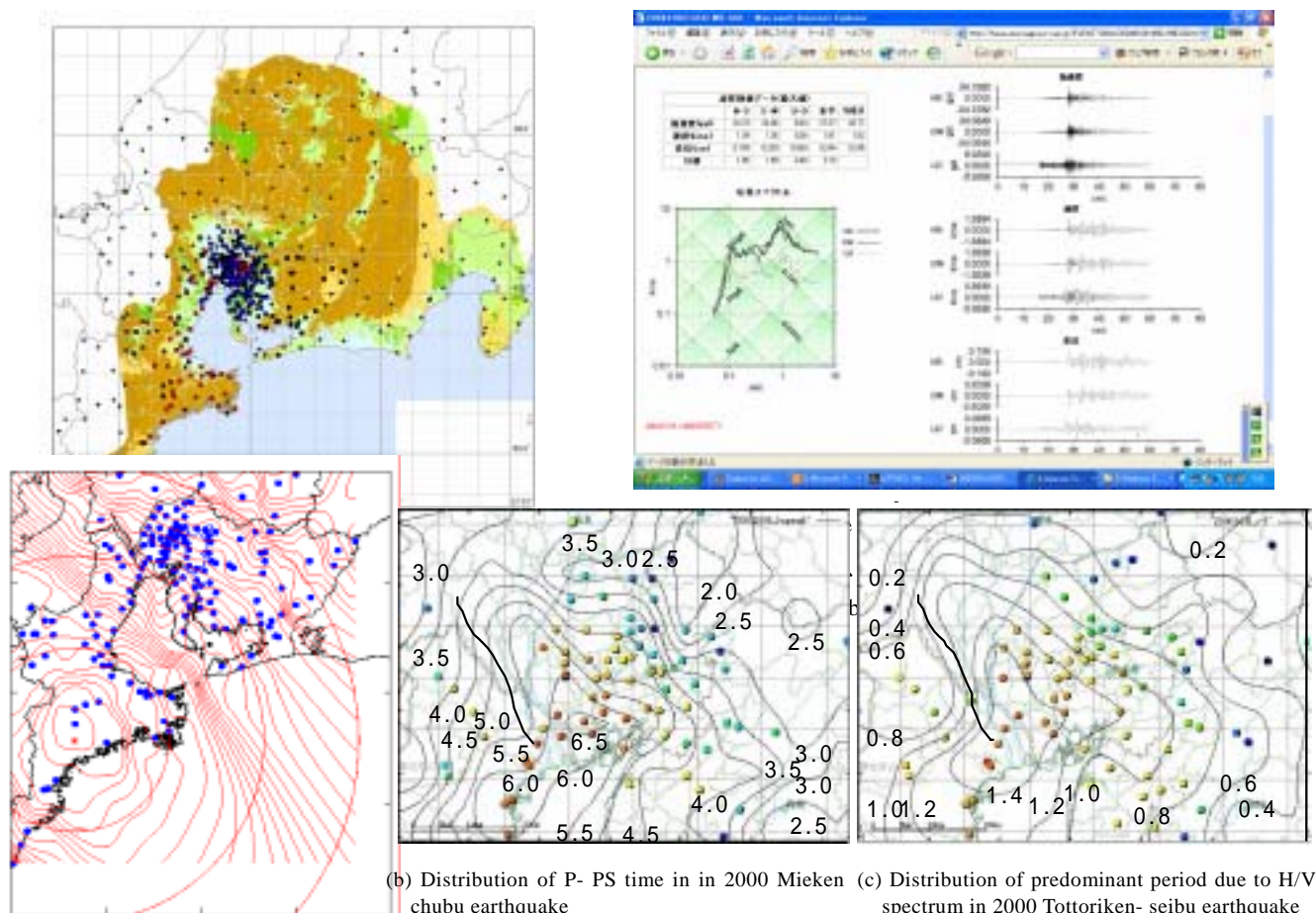


図1 大都市圏強震動総合観測ネットにおける観測機関との接続インターフェース

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

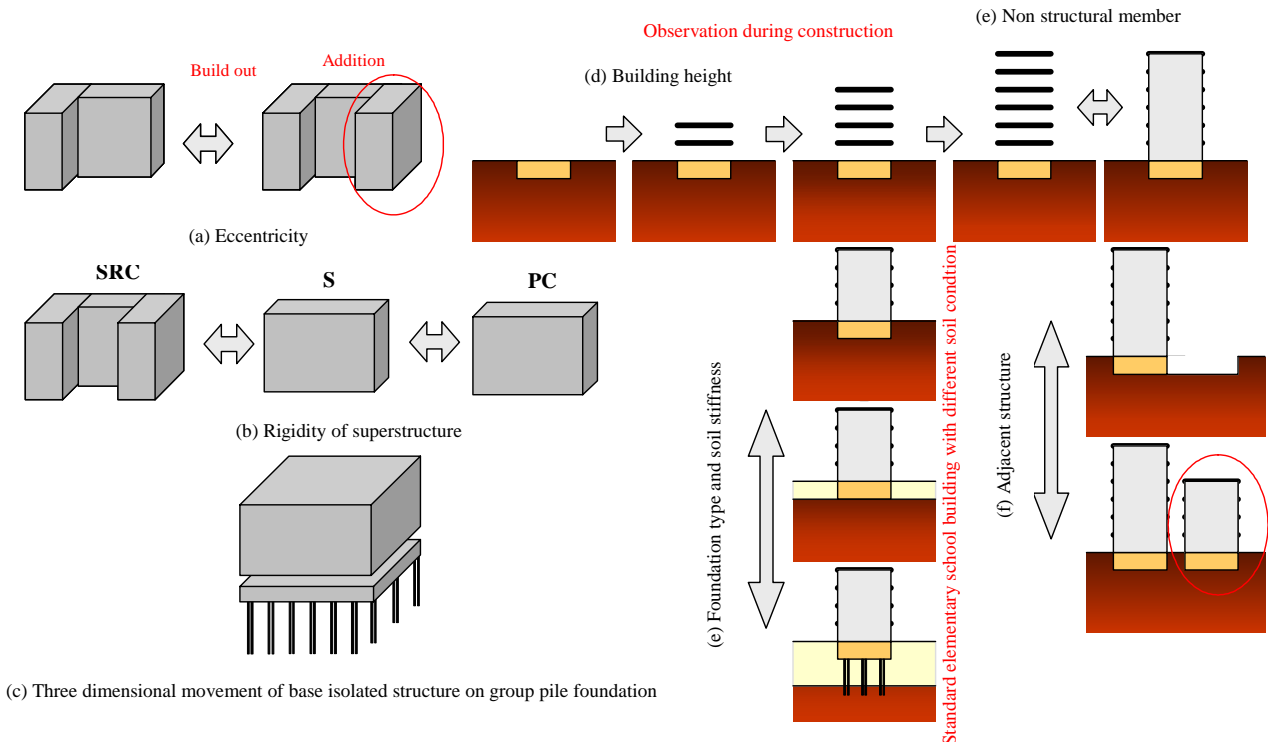


図4 名古屋大学で実施している建築物の地震時挙動を要因別に分析するための地震観測システム
 Fig.4 Earthquake observation items for analysis of factors contributing to the dynamic behavior of buildings

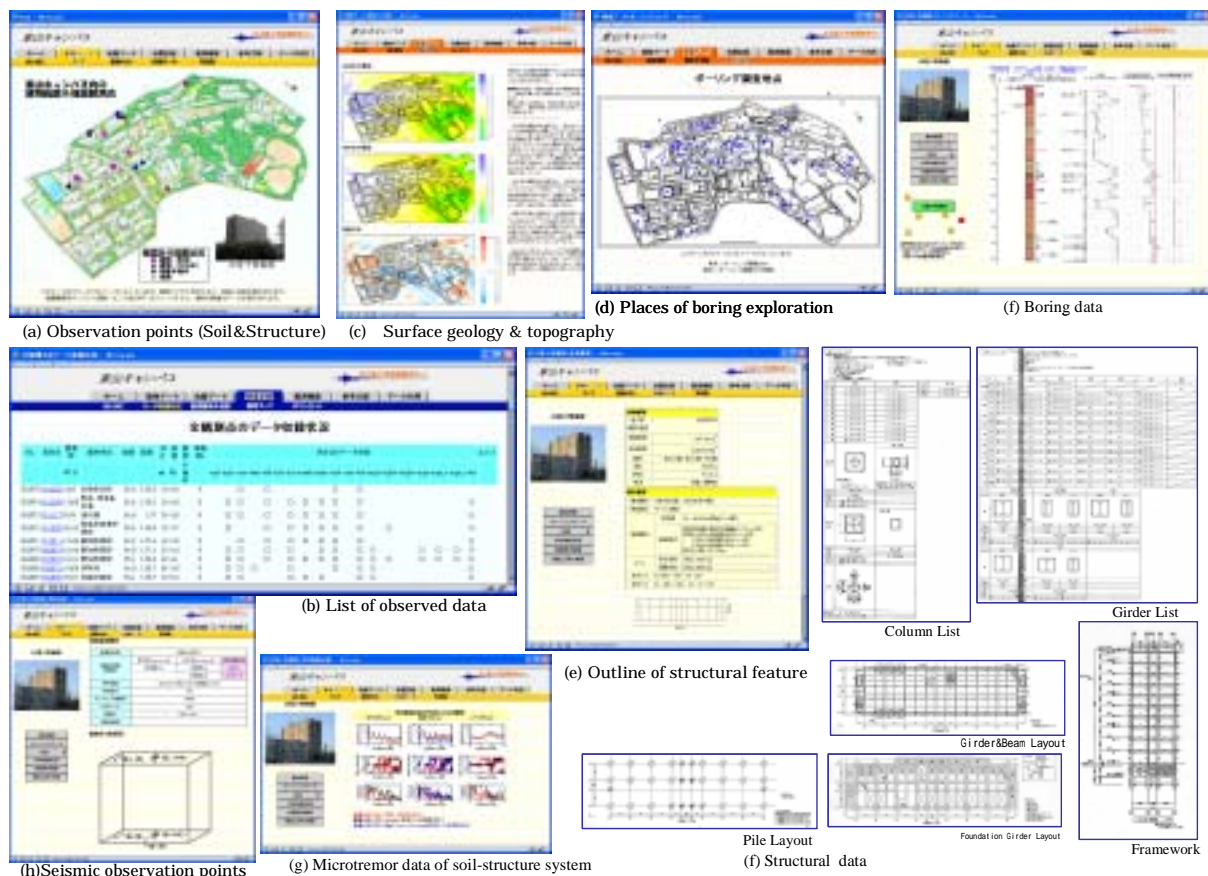


図5 建物 地盤強震観測データのウェブ公開

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

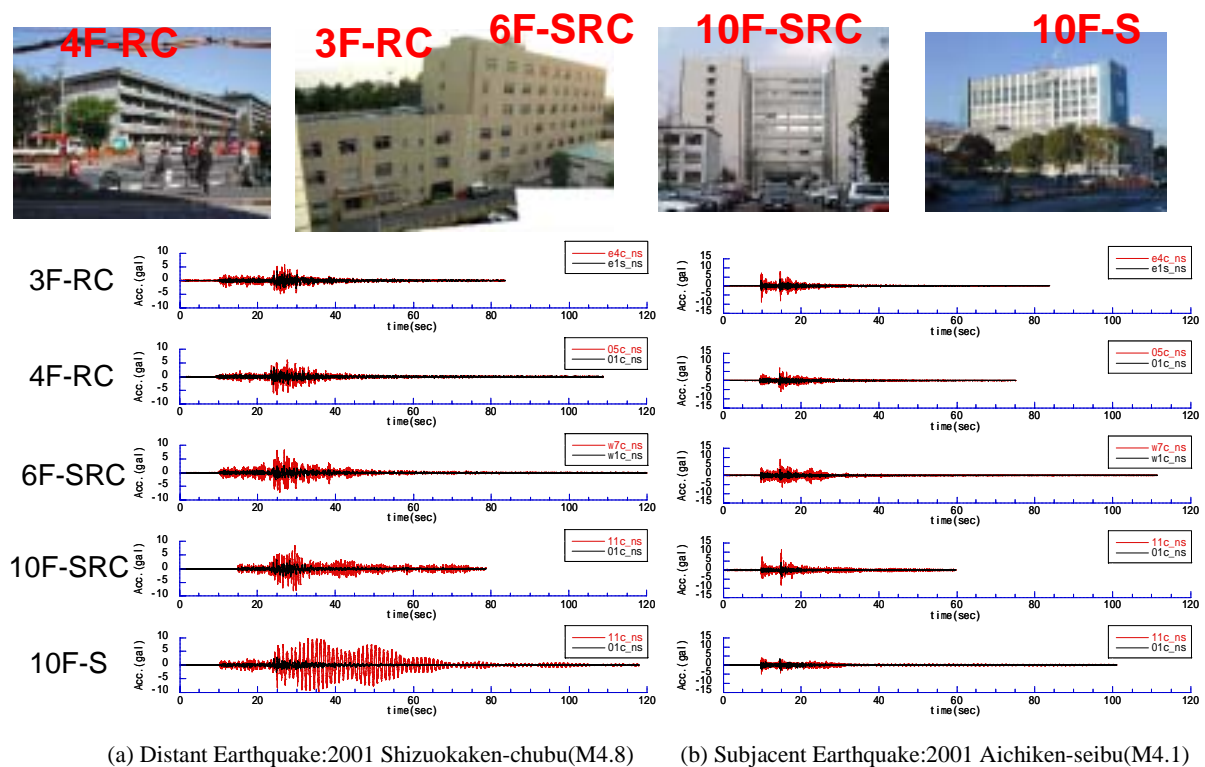


図6 入力地震動の継続時間の違いによる高さと構造の異なる5つの建物の地震応答

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

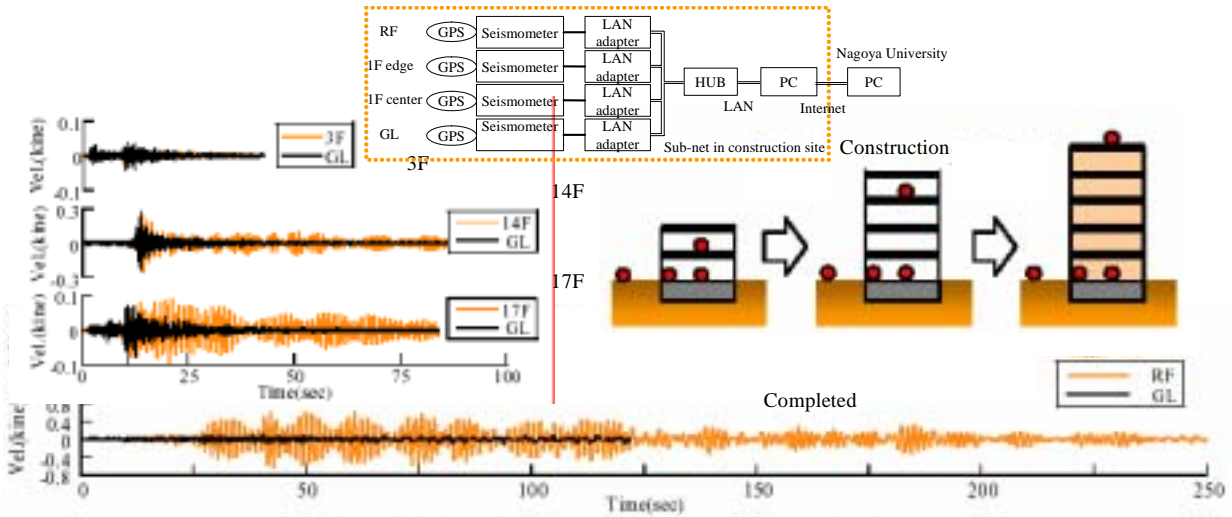


図 7 18 階建て建物の建設時の強震観測

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 $\pm 1500\text{gal}$ (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

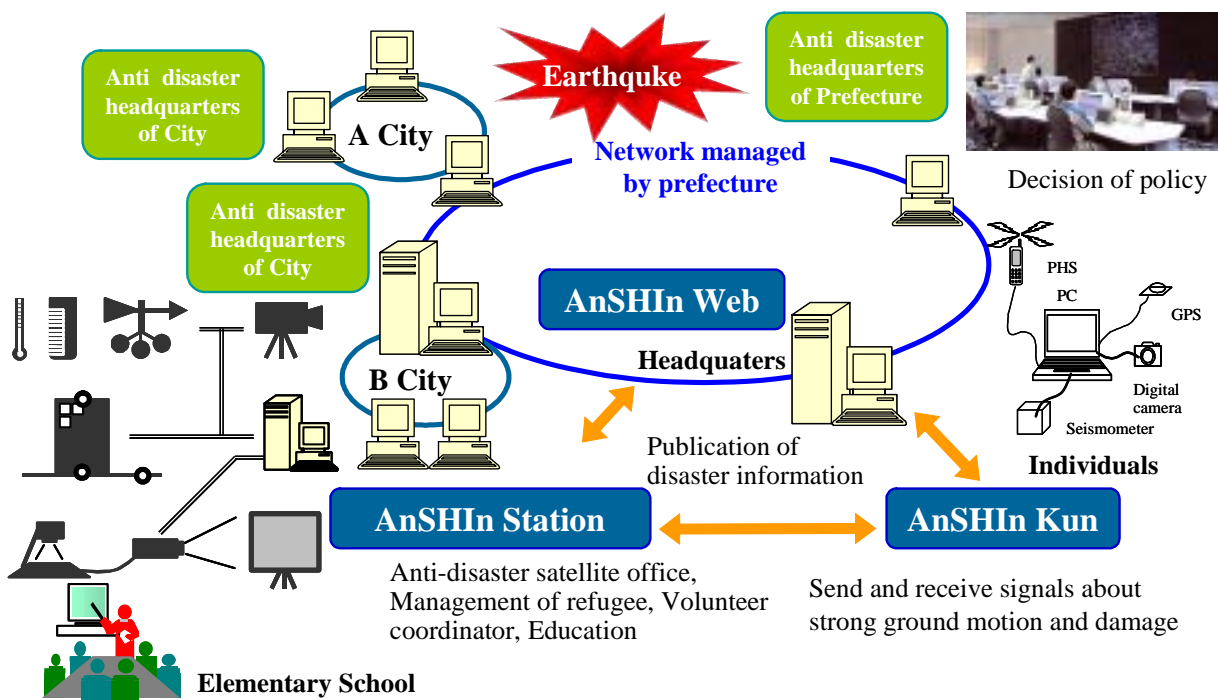
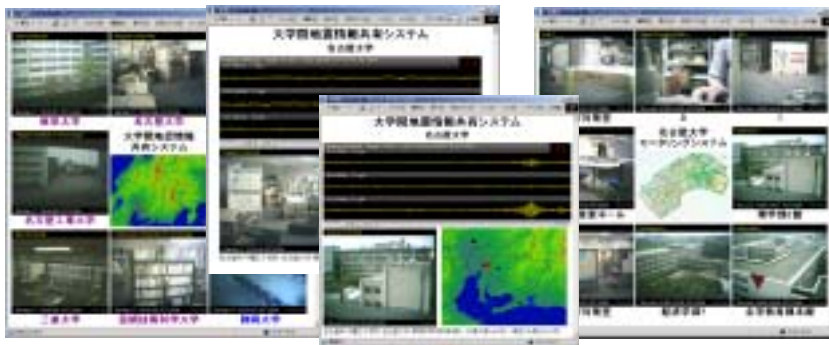


図9 双方向災害情報システム「安震システム」の概要
Fig.9 Overview and components of AnSHIn System

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

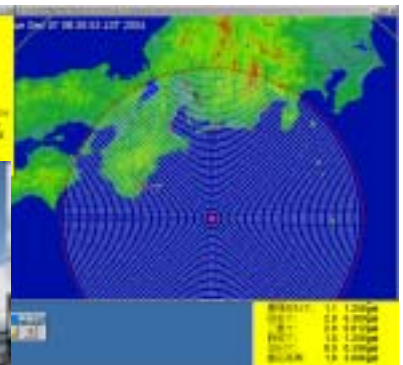


図 10 リアルタイム地震情報の様々な利用

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