オンライン強震観測・地震被害
想定・振動実験システムの構築ON-LINE SEISMOMETER ARRAY,
DAMAGE ESTIMATION AND
VIBRATION TEST SYSTEM

福和伸夫 —*1 石田栄介 —*3 辻本 誠 —*5
山田耕司 —*2 森 保宏 —*4 松井徹哉 —*6

Nobuo FUKUWA Eisuke ISHIDA Makoto TSUJIMOTO
Koji YAMADA Yasuhiro MORI Tetsuya MATSUI

キーワード：
LAN, 強震観測, 振動実験, 即時被害想定, 振動台, EWS

Keywords :
LAN, Strong motion observation, Vibration Test, Realtime damage estimation, Shaking table, EWS

1. はじめに

兵庫県南部地震は地震工学に関わる種々の課題を提示した。この中でも、いわゆる「震災の帯」での強震観測記録の欠如、地震直後の被害状況把握の遅れと危機管理体制の脆弱さ、予期せぬ構造物の崩壊挙動の現出、などは大きな課題となっており、各都市域での強震観測網の充実、早期被害推定システムによる危機管理体制の向上、構造物の崩壊挙動の解明、などの動きへとつながっている。著者らも、名古屋圏を対象として、1) 強震観測システム、2) 早期被害予測システム、3) 振動台実験システム、からなる統合システムの構築を行ったので、本論ではこの概要を示す。

本システムの最大の特徴は、近年急速に発達したインターネットとEWSを最大限活かして、強震観測～被害推定～振動実験などを統合化した点にある。その基本は、強震計をパソコン経由でインターネットに接続し、パソコンにTCP/IPを語らせることにより、エンジニアリングワークステーション (EWS) のハードディスクをマウントしたこと、振動台や計測機器をEWSから直接制御可能にするとともにリアルタイム計測・分析を実現したこと、にある。これにより、EWS上に構築されている各種の都市データベースと強震観測記録との融合をGIS上で容易に実現すると共に、これらのデータに基づいて即時震源決定～愛知県内の地震動予測～愛知県内の建物被害予測を地震後瞬時にオンラインで行うことを可能にしている。この早期被害予測システムをオフラインで事前シミュレーションに利用することにより耐震性に劣る地域の抽出などが容易となる。また、得られた観測記録を用いた振

動台実験もオンラインで極めて容易にでき、離れた場所においても実験状況をリアルタイムでモニタリングすることが可能となる。

早期地震被害予測などのリアルタイム地震工学への試みは、カリフォルニア工科大学¹⁾、J R²⁾、東京ガス³⁾、川崎⁴⁾、などで先進的に行われているが^{5~6)}、インターネットを利用した例はない。本システムではインターネットの利用を前提としているので、強震観測ネットのための通信設備費が不要であり、災害時にもロバスト性が高く高速に強震記録を転送することが可能である。また、将来は、インターネットを介した他の機関とのネットの拡大も容易である。さらに、EWS上のHomepageを介して、強震観測記録や被害予測結果を即時公開していくこともできる。

また、近年、大学では助手・技官定員の削減のため、人手のかかる振動実験が行われる機会が減りつつある。また、学生気質の変化のため、実験的研究が避けられがちとなっている。このような状況は、構造物の崩壊挙動の早期解明とは逆行するものであり、今後の地震工学・耐震工学研究の行方に不安を抱かせる。実験環境の抜本的改善により手軽に実験できることを可能にすることが必要である。すなわち、計測器の結線やデータ整理等の単純労働を軽減して実験作業の省力化を行い、分析ツールを完備して実験から結果の考察までの時間を短縮化することが必要である。著者らの試みは、現時点で利用可能な計算機環境を最大限組み込んだものであり、振動台の制御、計測器の増幅器の制御、計測記録の収録などを全てEWS上でオンライン処理することにより、実験に必要となる人手、実験準備・実験記録の1次的処理・分析時間の大幅削減を図っている。

*1 名古屋大学大学院工学研究科 助教授・工博
(〒464-01 名古屋市中千種区不老町)

*2 豊田工業高等専門学校建築学科 講師・博士 (工学)

*3 名古屋大学大学院工学研究科 助手・博士 (工学)

*4 名古屋大学大学院工学研究科 講師・Ph. D.

*5 名古屋大学大学院工学研究科 教授・工博

*6 名古屋大学大学院工学研究科 教授・工博

*1 Asso. Prof., Graduate school of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*2 Lecturer, Dept. of Architecture, Toyota National College of Technology, Dr. Eng.

*3 Reseach Assoc., Graduate school of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*4 Assoc. Prof., Graduate school of Engineering, Nagoya Univ., Ph. D.

*5 Prof., Graduate school of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*6 Prof., Graduate school of Engineering, Nagoya Univ., Dr. Eng.

強震観測システムは、表1に示す14台の検出器・6台の強震計（アカシ製SMAC-MD）と6台のLANインターフェイス（IBM製ノート型パソコンThinkPad）、および3台の移動用強震計（アカシ製SMAC-MDII）から構成され、各LANインターフェイスはNICEを経由して、ホスト用EWSのハードディスク（HD）をLANインターフェイスのディスクドライブの1つとしてマウントしている。なお、マウントする際に使用したソフトウェアは、EWS側がSamba 1.9.15（フリーウェア）、LANインターフェイス側がMicrosoft LANMAN 2.2b（フリーウェア）である。また、強震観測システムに関するソフトウェアは、LANインターフェイスに強震計操作プログラムがあり、EWSには、図2に示されるEMAの「観測点DB操作機能」、「観測地震波DB操作機能」と「地震波解析機能」がある。

(2) 定点観測地点の位置と地質

定点観測地点は、図5および表1に示すように、相互に約4km離れた3つのキャンパス（東山、鶴舞・医学部、大幸・医療短大）の地表観測点（GL-1m）により中規模三角アレイを構成している。東山は前・中期更新世の洪積層である八事・唐山層に、鶴舞は後期更新世の洪積層である大曾根層に、大幸は矢田川流域の沖積層に位置する。また、東山キャンパス内では相互に約400m離れた3地表観測点（工学部4号館、9号館、新1号館）により小規模三角アレイを構成している。4号館は谷筋の盛土地盤、9号館は尾根筋の地山、新1号館は鏡池の埋立地盤である。新1号館地区では深さ10m及び57mにも地中地震計を設置している。観測井では、標準的な地盤調査試験に加え、板叩き法及びサスペンション法によるPS検層試験、振動三軸試験による液状化試験、ねじれ振動試験による動的変形試験を実施している。4号館、9号館での土質柱状図を図6、7に、新1号館でのPS検層結果を図8に示す。

一方、建物内の検出器は、工学部4号館、9号館、新1号館に設置している。各建物の特徴は表2に示す通りであり、建設年度や階数の異なる建物である。図9～11に示すように4号館及び9号館

表.1 強震観測点一覧

建物名称	地盤	建物
工学部4号館	GL-1m	1F床上, RF床下
工学部9号館	GL-1m	1F床上, RF床下
工学部新1号館	GL-1, -10, -57m	1F床上, 6F床下, RF床下
大幸キャンパス	GL-1m	
鶴舞キャンパス	GL-1m

図.5 強震観測点位置

には1階及び屋上階床位置に、新1号館には1階、6階及び屋上階床位置に検出器を設置している。

(3) データの流れ

各強震計は、「観測点DB操作機能」（図12）により、EWS側から「強震計のトリガーレベルの設定」が行われ、この設定情報は各LANインターフェイスがマウントしているHDにファイルとして記述される。LANインターフェイス側では、そのファイルを1分毎に確認、強震計の再設定を行い、その設定事項の変更報告をマウントしてあるHDに記述する。この報告ファイルをEWS側でユーザーが読むことにより、LANインターフェイスの正常動作が確認できる。

強震計により検出された地震動は、一旦、強震計のICカードに記録された後、自動的にRS232Cケーブルを介してLANインターフェイスのHDに転送される。その後、マウントしてあるEWSのHDにデータがコピーされ、EMAの「地震波DB操作機能」により、DBに自動的に登録される。登録された地震動は、「地震波解析機能」により、波形解析が可能である。

なお、停電時には、強震計およびLANインターフェイスは内蔵バッ

テリーで駆動され、建物倒壊等でLANインターフェイスが破壊された時には、ICカードを回収し、それから強震記録を採取する事が可

図.6 4号館土質柱状図

図.7 9号館土質柱状図

図.8 工学部新1号館地区の地盤調査結果

能である。また、本計測システムでは、計測開始時刻、計測時間を設定することにより、強震計同時計測が可能であり、常時微動レベルでの地盤の増幅特性や建物―地盤系の動的相互作用の研究にも応用可能である。

2. 3 被害推定システム

(1) システム構成

被害想定システムは、ソフトウェアのみで構成され、「オンライン被害想定機能」（震源決定後、数分で被害想定を行う）、「オフライン被害想定機能」（詳細な被害想定を行う）、「震源計算機能」、「震源DB操作機能」から成る。

(2) データの流れ

被害推定システムは次の様な流れで作動する。まず、EWSでは、常に「強震観測システム」から送られてくる波形ファイルの生成の有無を監視しており、ほぼ同時に3地点以上からの波形ファイルの生成が確認された場合には、「震源計算機能」（図13）を自動起動し、

P, Sのオンセット自動決定を行い、即時に震源決定を行う。同時に、収録された波形及び震源情報はRDBMSを介して震源DB、地震波DBに自動登録される（震源DB操作機能）。

得られた地震の規模と震源の位置をもとに、愛知県の建築物被害がリアルタイムに推定され、その結果はEWS上に自動表示される（オンライン被害想定機能）。被害想定表示項目は、500mメッシュ毎の基盤入力最大加速度、地表面最大加速度、被害棟数（木造（全壊）、木造（半壊）、軽S造（全壊）、軽S造（半壊）、S造（全壊）、S造（半壊）、RC造（全壊）、RC（半壊））である。基盤入力最大加速度（図14）は、点震源距離減衰式⁹⁾（福島・田中式、Campbell式、大崎式の中から選択可能）に基づいて算定される。文献10)に示される地表面最大加速度と基盤最大加速度の比からメッシュ毎の加速度増幅度（図15）を事前に求めておき、上記基盤入力最大加速度との積から地表面最大加速度（図16）が算出される。メッシュ毎の被害棟数は、事前に準備した建物統計データ（メッシュ毎に積算した構造・年代・階数・用途別の建物棟数）と、構造種別毎の建築物の被害率曲線¹⁰⁾（図17）および地表面最大加速度より推定される。図18に図16に示した地表面最大加速度に対応した木造半壊棟数の表示例を示す。

なお、これらは地震発生後オンライン処理されるが、任意の想定地震に対しオフラインで実施することも可能である。また同じく、任意の想定地震に対しより精度の高い被害推定を詳細な解析手法を用いてオフラインで実施するソフトウェアも機能に加えている（オフライン被害想定機能）。

表.2 強震観測建物の特徴

建物名称	地盤	建設年	構造形式	階数	基礎
工学部4号館	盛土	1964	RC	4F	杭 6m
工学部9号館	地山	1983	SRC	6F	杭12m
工学部新1号館	埋立	1995	SRC	10F	杭48m

図.9 4号館平面図・断面図

図.10 9号館平面図・断面図

● 強震観測位置

図.11 新1号館平面図・断面図

図.12 観測点DB登録画面

図.13 震源計算機能 (WINの画面)

本画面はマニュアルで震源決定操作した場合である。

図.1.4 基盤入力最大加速度 (福島・田中式)

図.1.7 被害率曲線の例 (木造建物)

図.1.6 地表面最大加速度

図.1.5 想定東海地震における増幅度

図.1.8 木造半壊棟数

2. 4 振動実験システム

(1) システム構成

振動実験システムを構成するハードウェアは、動電型の鉛直・水平2軸振動台、実波形再現処理装置（システムデザインサービス社製SRTP）、64chのAD変換ボックス（システムデザインサービス社製DASBOX）、オートレンジ機能付チャージアンプ（日本電気三栄社製AH1100-1）、画像モニタリングシステムからなる。また、ソフトウェアは、EMAの「マトリックスボード操作機能」、「振動台制御機能」、「モニタリング機能」、「計測波DB操作機能」、「計測波解析機能」から構成される。（図1、図2参照）

(2) データの流れ

まず、振動実験に用いる加振用波形は、地震波DBの波形を「地震波解析機能」により適宜加工した上、実験波DBに登録作成する。

次に、振動台を図1.9に示される「振動台制御機能」を用いて、EWSからDMA経由でSRTPを介して駆動電源を制御する。この時、振動台に設置したサーボ型加速度計の波形はSRTPを介して振動台のフィードバック制御に利用され、加振波形を忠実に再現する（図2.0）。

振動台実験の計測結果は、「マトリックスボード操作機能」によりEWSからレンジ調整可能なチャージアンプを経由した後、DASBOXを介して、同じく「マトリックスボード操作機能」により設定された条件に基づいて物理量に変換され、EWSのHDに直接書き込まれる。設定された計測条件は自動的に実験条件DBに登録され、再利用が可能である。実験中の全振動波形は、図1.5に示される「モニタリング機能」により、EWS上でリアルタイムモニタリング可能である。得られた計測データは「計測波DB操作機能」により計測波形DBに登録され、「計測波解析機能」により、詳細分析される。

このシステムは振動実験室横の実験準備室に設置されるが、加振実験の詳細な様子は画像モニタリングシステムを用いて監視される。将来的にはこの画像をEWSに取り込むことにより、より計算機と融合した実験システムが作成できる。

図.1.9 振動台制御画面

3. 本システムの利点・問題点

本システムは、前節で示したように、強震観測システムと振動実験システムを同時にEWSで管理できる画期的なシステムである。既存のハードウェア及びソフトウェア技術を組み合わせ、使い勝手を良くしたものであり、他の機関でも同様なものは構築可能である。

このようなインターネットを活用した強震観測ネットは筆者の知る限り初めての試みであり、通信設備費の安さ、通信速度の高速性、災害時のロバスト性を活かすことができ、将来的にはWWW等を活用した情報公開につなげることができる。また、「地震波解析機能」「被害想定機能」は、インターネットを経由して、遠隔地で、操作することができ、実験システム全体として非常に即時性の高い、便利なものになっている。

1996年6月現在、本システムは、未だ稼働して間もなく、新設ソフトウェアのデバッグ中である。しかし、操作機能上目立った問題は少ない。ただ、今後類似のシステムを構築する際の、参考となる様に、本システムの欠点を述べる。まず、強震計とLANインターフェイスの間がRS232Cで結束されているため、この間でのデータ転送がLANインターフェイスとEWS間の転送速度に比べ、非常に遅いことが挙げられる。これは、既存の強震計がRS232Cポートしか持っていないためであるが、今後、改善が期待されるものである。また、本システムでは1台のEWSが全ての処理を行っているため、計算負荷が大きい「オフライン被害想定機能」と強震観測、振動実験を並列で行う場合、EWSの処理能力を超えることが予想され、今後はシステムの

ソフトウェアの分散処理を考える必要がある。次に、現状の観測点は震源決定のためには近接しすぎているため、計算される震源精度に問題がある。今後、強震観測点を広域に広げていく必要がある。

4. おわりに

本報告では、EWSを核としたオンライン強震観測および振動実験システムについて事例紹介をした。本構築方法は、LANを利用した強震観測およびデータベース化システムとして、推奨できるものと思われる。また、このようにネットワーク（特にインターネット）に接続されたデータ収録システムは、データの収集・分析作業の効率化に非常に有効と考えられ、遠隔地との共同研究時等にも有効活用が期待できる。また、ネットワークに接続されたEWSを介して、システムの稼働状況をチェックできるため、強震計メーカー、ソフトウェアハウスが、遠隔地よりメンテナンスが可能である。今後は、計算機能の並列処理、WWWによる強震観測結果の公開、GISと連動した被害推定システムの構築、パソコンのXクライアント機能を用いた画像モニタリング、波形モニタリングを行う遠隔実験監視システムなど考えていきたい。

なお、現在、強震計を豊田工業高等専門学校に設置し、多機関での強震観測ネットワークの構築、本システムの強震観測システム、被害推定システムの強化を模索している。また、本システムの応用として、交通環境振動問題対策のための名古屋大学学内振動モニタリングシステム（観測点：26地点）を6月から運用している。

5. 謝辞

本システムの構築にあたり、ご協力を頂きました株式会社アカシ、株式会社三菱総合研究所、エムケイシステムのみみなさまに深く感謝いたします。また、本システムに快く地震波形検測支援プログラム（WIN）を提供下さった東京大学地震研究所のト部助教教授に併せてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kanamori, H. : Real-time network for research and hazard mitigation-TERRAscope and CUBE, Proc. IDNDR Intl. Symp. on Earthq. Disaster Reduction Technol., 30th Anniv. of IISSE, Tsukuba, 1992, 183-197
- 2) 中村豊：リアルタイム地震防災システム：「ユレダス」・「ヘラス」、第22回地盤震動シンポジウム, 1994, pp.73-84
- 3) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田茂, 吉川洋一, 大谷泰昭：都市ガス導管網の地震時警報システムSIGNALの開発, 1994, pp.85-94
- 4) 太田裕, 塩野計司：震害の即時推定にもとづく対策支援情報システム, 総合都市研究, 44号, 1991, pp.107-126
- 5) 太田裕：強震動情報と地震防災, 地震, 第2輯, 第47巻, 1994, pp.113-136
- 6) 野田茂, 目黒公郎：リアルタイム地震工学を目指して, 第22回地盤震動シンポジウム, 1994, pp.95-112
- 7) Oracle Corp. : Oracle7 Server SQL言語リファレンス・マニュアル, 1995
- 8) Visual Numerics, Inc. : PV-WAVE Advantage Reference, 1993
- 9) 福島美光：地震動強さの距離減衰式（経験式）に関する最近の研究動向, 地震, 第2輯, 第46巻, 1993, pp.315-328
- 10) 愛知県防災会議：愛知県地域防災計画—地震災害対策計画—（平成6年度修正）, pp.399-400, 1994
- 11) Hirata, N. and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet. Inter., 47, 50-61, 1987.

注1) 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センターのト部助教教授作成の地震波形検測支援プログラム¹⁾（WIN）を用いている。

[1996年6月27日原稿受理 1996年9月10日採用決定]

図.20 振動台フィードバック制御監視画面

図.21 モニタリング画面