

モニタリングシステムの技術検証

平成 20、21 年度においては、独立行政法人防災科学技術研究所（防災科研）が、平成 21 年 1 月に兵庫耐震工学研究センター（E-defense）で実施した中層 RC 造建造物の実大建物加振実験において計測・記録したデータを用いて、構造特性の変化や損傷の有無・箇所の推定に関する構造ヘルスマニタリング（以下「SHM」という）技術の適用性を実験検証した。

平成 22 年度は、同じ試験体と実験施設（E-defense）を用い、平成 22 年 10 月に実施を予定している加振実験において、防災科研の計測・記録システムから独立したモニタリングシステムを本総プロ独自に実装し、建物の完成後（管理段階）に大小の地震を受けた場合に、構造（スケルトン）の振動特性等の変化を把握し、診断結果について情報を提供する技術システムとしての有効性を検証する。

※本研究は、国土技術政策総合研究所と独立行政法人防災科学技術研究所との共同研究「建築物スケルトンの健全性評価へのモニタリング技術適用に関する共同研究」に基づいて実施するものである。

試験体の概要（平成 20 年度 実験時）

文部科学省「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」において、病院を模擬した RC 造 4 階建ての実大試験体（高さ約 18m、各階床面積 80m²（8m×10m））を用いて、機能保持性能を評価するための E-defense による振動台実験が行われた。

試験体は、内部に撮影室、診察室、人工透析室、スタッフステーション、手術室、ICU 室、病室、情報通信室があり、それぞれの室内に撮影装置、手術室内精密機器、人工透析装置、医療棚、情報通信機器等が設置されている。また屋上階には高架水槽及び室内に給水配管、スプリンクラー等の設備があり、本格的な医療施設を再現している。

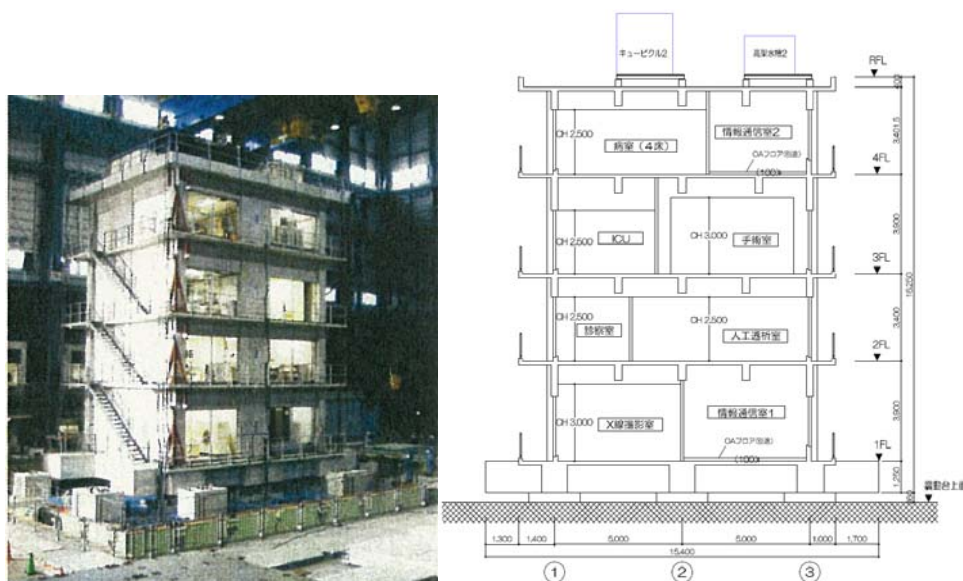
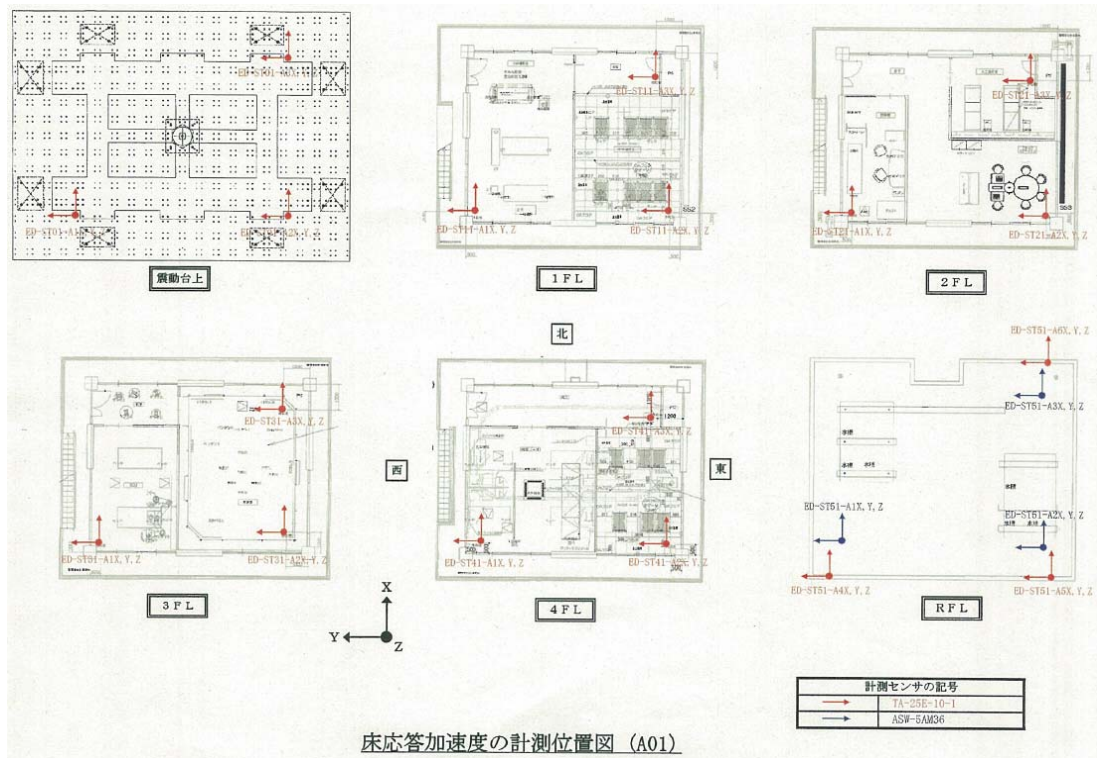


図 1 試験体の外観（左）と断面図（右）



床応答加速度の計測位置図 (A01)

図 1 試験体の平面図

(1) 各層質量、層せん断力

下記とは別に、屋上階に設置された 2 つの高架水槽の質量として、0.6G タイプが 7.5[ton]、2.0G タイプが 6.0[ton]がある。

表 1 試験体の質量及び層せん断力の分布

	質量[ton]	層せん断力[kN]
RF	109	344
4F	124	598
3F	124	795
2F	128	947
1F	307	1248

(2) モード特性

①解析モデルによる固有振動数

4 質点系モデル (1 階床を入力、頂部床を出力とした場合) の固有振動数を解析的に求めた結果は以下の通り。

【短軸 X 方向】1 次 : 3.76Hz、2 次 : 9.6Hz 【長軸 Y 方向】1 次 : 3.92Hz、2 次 : 9.95Hz

②ランダム加振実験による固有振動数

本部会の検討対象である耐震構造実験の前に実施された免震構造実験において、最終加振となる三の丸波での加振を実施する直前に、ランダム加振が行われた。このときの 4 質点系 (1 階床を入力、頂部床を出力とした場合) の固有振動数を実験的に求めた結果は以下の通り。

【短軸 X 方向】1 次 : 4.10Hz 【長軸 Y 方向】1 次 : 4.20Hz

モニタリングシステムの実装による技術検証テーマ

平成 21 年度の住宅へのヘルスマニタリング技術適用の検討において、今年度のモニタリングシステムの実装による技術検証テーマとして、以下を検討した。これらのテーマについて、加振実験の実施機関である防災科研と協議し、本総プロで実装するモニタリングシステムの構成や実施計画の検討を進めているところである。

(1) 入力波の加振レベルの設定

逆解析の技術的な信頼性をより明確に示すため、試験体の損傷状況を捉えられるよう、加振レベルをより大きくする。

→ 防災科研の研究方針により今回は対象外

(2) 一定の精度を確保するための計測時間の検討

十分に長い計測時間を取り、一定の精度を確保できる計測時間について検証する。

→ 実験の実施工程により対応を検討

(3) ローカルなセンサ情報の活用

歪みゲージ等の比較的安価なローカルセンサの情報を逆解析に活用し、より詳細な部材レベルの推定を行う。加速度センサ等のグローバルセンサと組合せることにより、どこまで詳細な逆解析が可能かを検証する。

→ 共同研究の枠組みの中で、防災科研の分析結果との比較を検討

(4) 診断・評価におけるセンサ性能の影響

用いるセンサの測定周波数・感度・分解能等の性能が、逆解析にどのような影響を及ぼすかを検証する。信号処理で模擬できる部分と、比較ケースとした取り組み（家庭用ゲーム機や携帯電話等に採用されているセンサを用いた計測等）を考慮する。

→ モニタリングシステムの構成として検討中

(5) 地震時のデータ欠損への対応

地震時においてデータが欠損した場合の対応方法として、冗長性を確保するためのセンサ配置、センサデータのバックアップ等の有効性を検証する。信号処理で模擬できる部分と、実装により検証する部分（センサの固定をあえて不十分な状態とする等）を考慮する。

→ モニタリングシステムの構成として検討中

(6) データ伝送における即時性

オンラインの仕組みを想定した SHM システムの場合、データセンター等において診断結果を管理し、状況に応じて警報を発信する上で、データの伝送における即時性が要求される。センサデータの伝送に要する時間を検証する。

→ モニタリングシステムの構成として検討中

(7) データを蓄積・管理する仕組み

オフラインの仕組みを想定した SHM システムの場合、建物内(スタンドアローン形式)で診断結果を管理することになる。“フライトレコーダ”のような利活用を想定し、センサデータを蓄積管理する仕組みについて検証する。

→ モニタリングシステムの構成として検討中

1.1.3 実装するモニタリングシステム案

実大加振実験において実装を検討中のモニタリングシステムの基本構成は、以下のとおり。

(1) システムの概要

スマートセンサを LAN に接続し電源を入れるとセンサ登録がスムーズに行われ、計測を開始する環境が整う。計測データの収録、逆解析から情報提供までの一連の流れを迅速に行うことができる点が主な特徴。

SHM システムは、①スマートセンサと 3 台のサーバ (②センサゲートウェイ、③解析サーバ、④データサーバ) から構成される。

①スマートセンサ

サーボ型加速度計、AD コンバータ、プロセッサボードの 3 つの要素から構成される。

②センサゲートウェイ

センサユニットから送信される計測データを受信し、データサーバにある DB に格納する。

③データサーバ

DB を管理しており、権限付与されたユーザに対してインターネットで情報を公開している。ユーザがインターネットを通じて解析要求を行った場合、データサーバは解析サーバにその情報を伝達し、解析を行わせる。

④解析サーバ

データサーバから伝達された情報を受け、センサゲートウェイと同期しているフォルダ内にある計測データを使用し、逆解析を行う。そして、解析結果はデータサーバ内にある DB に格納される。

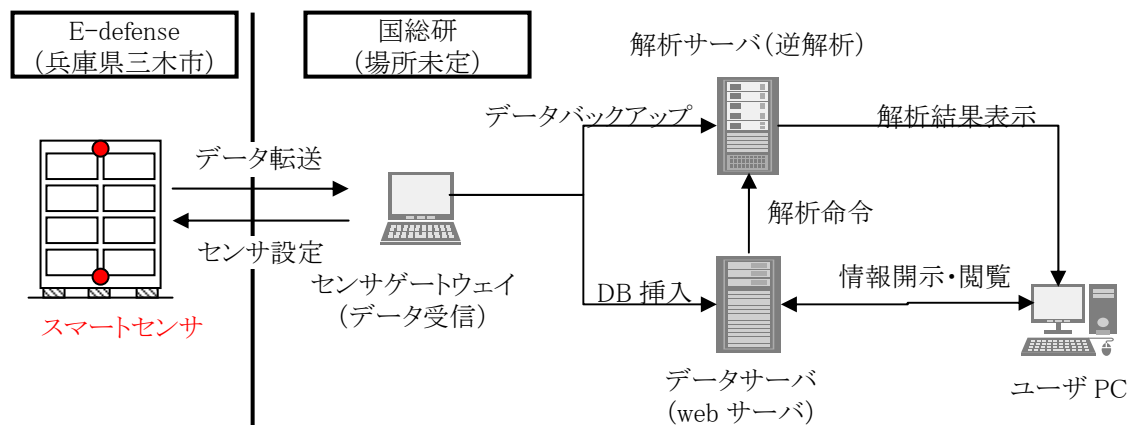
(2) E-defense 実験への実装計画

前述(1)で示したプロトタイプシステムを、E-defense 実験に実装する際の考え方 (①システム構成、②センサの設置箇所・数、③通信方法、④トリガ設定) は、以下を検討中。

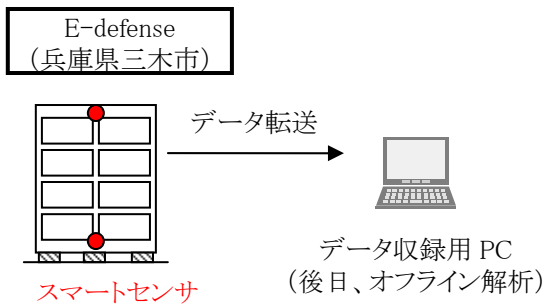
①システム構成についての検討 (案)

次の 2 つの案について、実施を検討中。両者の大きな違いは、SHM のサービス運用形態 (複数の建物の遠隔監視とユーザへの迅速な情報提供) を想定した検証を行えるか否かにある。

《案 1》



《案2》

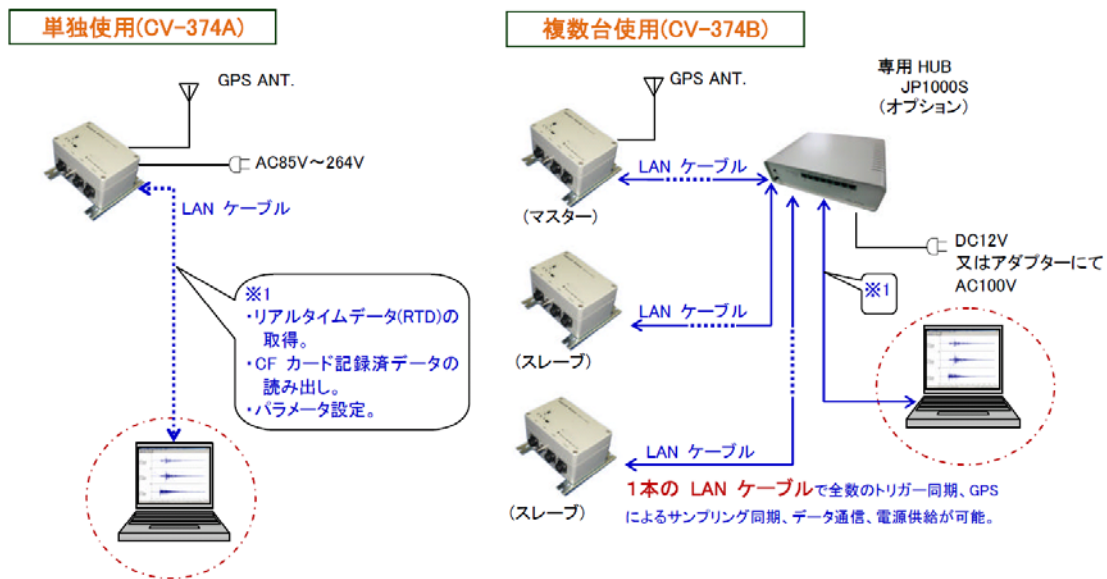


②センサの設置箇所・数

実装するモニタリングシステムの「建物全体系の振動を定期的に計測して振動特性への変化を捉える」目的を踏まえ、センサユニットを 2箇所（建物1階・頂部）～5箇所（各階重心位置に1個） 設置することを基本とする。

③センサーセンサゲートウェイ間の通信方法

スマートセンサによる計測データをセンサゲートウェイ（又はデータ収録用 PC）に伝送する際の通信方法としては、安定性を重視し、有線を基本として想定している。以下は、LANケーブルを使用した例（開発メーカーのパフレットの掲載より）。



出典：「加速度計内蔵ネットワークセンサ CV-374」パンフレット、株式会社東京測振

④計測時のトリガ設定

実験で用いられる加振波として、ランダム加振と地震波加振の2種類を想定する。

ランダム加振は常時微動計測とみなし、指定時間帯以外にも計測のタイミングを臨機に設定するニーズが考えられるため、センサゲートウェイからの即時トリガによって計測を開始する。一方、地震波加振に対しては、地震が発生するタイミングを前もって把握することは困難であることから、5gal等の一定レベル以上の加速度を検知した場合に計測開始といった事前のトリガ設定を行う。

(3) 加速度波形データの簡易な計測

E-defense 実験では、実装するモニタリングシステムの他に、比較ケースとして、簡易な計測システムを実装し、計測された波形データを用いた検討する。比較ケースを選定する際の考え方について、以下に示す。

① センサの性能

実装するモニタリングシステムで使用する加速度計は、サーボ型加速度センサ（3軸成分）である。ここでは実用化検討の観点から、センサの測定周波数・感度・分解能等の性能が逆解析にどのような影響を及ぼすかを検証するため、より低品質なセンサ（MEMS 加速度センサ等）をプロトタイプของセンサユニットとほぼ同じ位置に設置し、実験を行う。

② センサの設置箇所・数

実装するモニタリングシステムで使用するセンサユニットは、数十万／台で市販されており、経済合理性の観点から、住宅内に設置・運用できる数には限りがある。本実験では、センサユニットを2箇所（建物1階・頂部）～5箇所（各階重心位置に1個）設置する。

上記①と関連するが、個々のデータ品質は劣っても高密度に配置することで SHM の目的を達成する可能性について検証するため、低価格なセンサを数多く設置することを検討する。また、その際、建設後の建物において一時的に、計測システムを設置する場合を想定すると、重心位置に設置できない、外乱による影響が大きいなど、様々な制約条件が存在すると考えられるため、様々な設置箇所の実験を行うことを検討する。

③ センサの固定方法

通常、センサの設置は、接着剤やボルト等を用いて、センサ本体を構造物に固定する。

設置不良の場合、大規模な地震動等によってズレ・傾き等が生じ、データが欠損する場合が考えられるため、敢えて設置不良の状況を作り出して実験を行い、SHM システムに与える影響を確認する。