

# 実大建物の加振実験データを用いたヘルスマニタリング技術の検討

## 1. 検討の目的・内容

### 1) 検討の目的

新たな建物診断技術として期待されるヘルスマニタリング技術については、実大建物での有効性を示した例が極めて少ない。本検討では、住宅スケルトンの構造特性の変化（建物全体系・層レベル・部材レベル）について、実大建物加振実験において計測・記録されたデータを用いて、現象の把握と損傷の有無・箇所の推定に関する構造ヘルスマニタリング技術の適用性を実験検証する。

実験検証には、(独)防災科研 兵庫耐震工学研究センター（E-ディフェンス）で実施された中層 RC 造建造物の加振実験において計測・記録された波形データ等を利用し、逆解析手法の検討、診断精度の検証を行う。

※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」（平成 20～22 年度）に基づいて実施するものである。

### 2) 検討の内容

調査検討の内容は次のとおりである。

#### (1) 詳細なデータ等を用いたヘルスマニタリング技術の適用性検証

構造設計等の先見情報や、変位計やビデオ映像等、加速度センサ等による継続的なデータ計測・診断を行う場合、どこまでの状態把握と損傷推定ができるかについて技術資料を得ることを目的として、平成 20 年度に検討対象とした加振実験について、構造設計の詳細に関する情報や、加速度センサ以外の計測データを用いて、逆解析手法（フルスペックの逆解析）の検討、診断精度の検証を行う。

#### (2) センサ・データの数を限定した逆解析結果や損傷推定精度等の検討

詳細な加振実験データを用いた検討を踏まえ、センサ・データの数を限定した逆解析結果や損傷推定精度等に関する技術検討を行い、簡易ながら一定の精度を有するシステムの開発を行う。今年度は、許容誤差の範囲内で損傷を正しく推定するために必要なセンサ個数や、限られた数のセンサで推定精度が最も向上するセンサ設置位置等について検討する。

#### (3) 簡易かつ一定の精度を有するモニタリングシステムの試設計

住戸に適したヘルスマニタリングシステムを想定しつつ、状態把握の対象（建物全体系・層レベル・部材レベル）と目的（損傷の有無・箇所の推定など）に対応するヘルスマニタリングシステムを複数タイプ試設計する。ここで試設計したシステムを、平成 22 年度に実施予定の実大建物加振実験（平成 20 年度に行われた実験と同じ試験体を用いる加振実験）において、試験体の実装し、状態把握、診断に係る技術適用の実証実験を行う。

## 2. 検討の状況

### 1) 詳細なデータ等を用いたヘルスマonitoring技術の適用性検証

#### ① 実験検討の進め方

今年度は、まず、平成 20 年度に検討対象とした加速度データ以外に、変位データ、ビデオ映像、設計情報等のデータを広く活用して逆解析を行う（フルスペックの逆解析）。次に、実構造物への SHM 技術の適用を睨み、広範囲にわたる情報の入手や膨大な数のセンサを設置・運用することが困難な場合に備えて、限定されたデータからどこまでの損傷推定が行えるかを検証する（簡易な逆解析 2～3 パターン）。

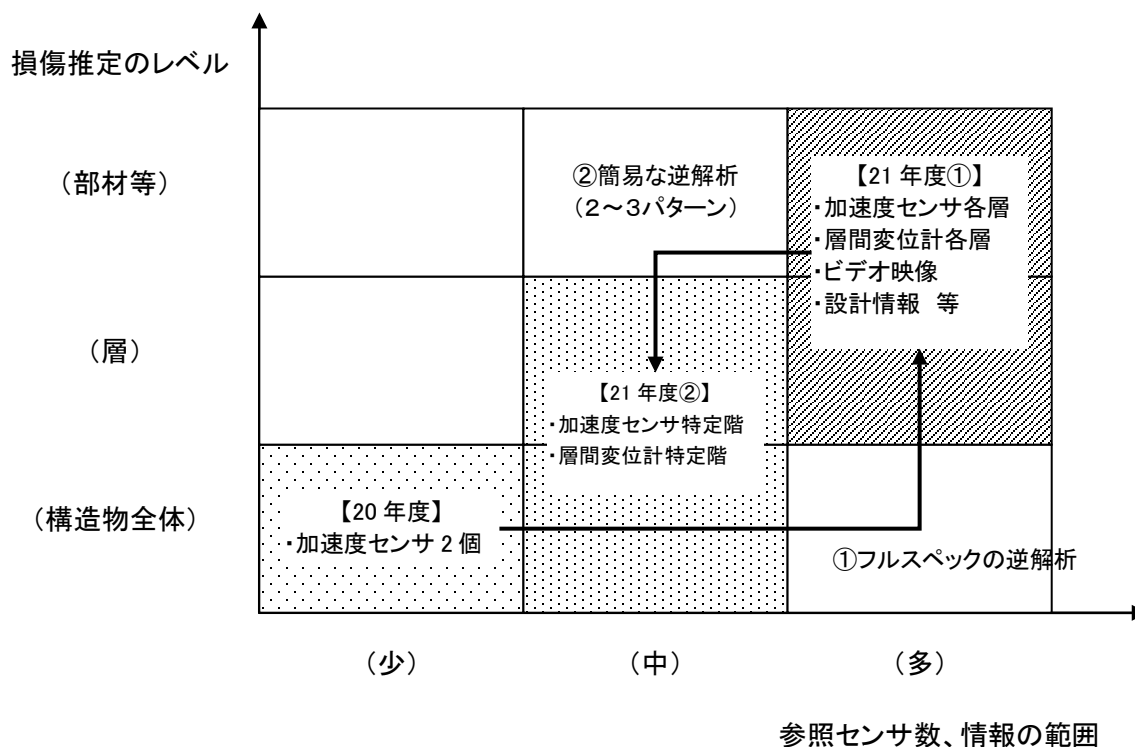


図 今年度の取り組みのイメージ

本成果は、平成 22 年度に実施予定の E-defense 実験において、SHM システムプロトタイプとして適用を図るものである。

## ② 平成 20 年度の検討成果

### a) 試験体概要

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 80m<sup>2</sup>（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 試験体の外観



図 センサの外観  
（左：加速度計、右：層間変位計）

### b) センサ配置

国総研と防災科研との共同研究協定に基づいて、加振実験データの一部の提供を受け、逆解析手法の適用性の検証に用いた。各階床には 3 軸加速度計が 3 個、各階層に層間変位計が 2 個設置されている。平成 20 年度においては、変位データについては対象外とし、基礎部と頂部の加速度データを中心に用いた。

### c) 加振波

平成 21 年 1 月 15 日、19 日、22 日におけるランダム加振及び地震波加振の際に計測されたデータを逆解析の対象とした。

表 各日における加振スケジュール

	加振波	加振方向	振動数	継続時間	加振レベル			備考
					X	Y	Z	
一月十五日	ランダム波①	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	回転 5deg/s <sup>3</sup>
	ランダム波②	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	ランダム波③	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	三の丸波	2	—	328 秒	186gal	166gal	—	X:EW, Y:NS
	横浜波	2	—	164 秒	479gal	499gal	—	X:EW, Y:NS
一月十九日	ランダム波①	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	ランダム波②	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	ランダム波③	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	エルセントロ波	2	—		293gal	483gal	—	最大 50kine で基準化
一月二十一日	ランダム波①	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	ランダム波②	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	ランダム波③	3	0.1-35Hz	40 秒	100gal	100gal	100gal	
	JMA 神戸波	3	—		617gal	578gal	332gal	80%で調整

#### d) 逆解析結果

構造物全体のグローバルな損傷推定を目的として、計測データから固有振動数を推定する逆解析について、以下3者の立場からそれぞれ検討を行った。

表 複数の方法による逆解析検討の概要

手法概要	検討主体
フーリエ進行スペクトルに基づく卓越周期の算定	国総研
ARXモデルに基づく固有振動数の推定	三菱総研
部分空間法に基づく固有振動数の推定	近畿大学 薛准教授

部分空間法に基づく加振日別の1次固有振動数（薛委員による推定結果）を示す。

並進 X・Y の両方向とも実験日程の経過に伴い固有振動数が低下したのは、地震動入力を受け、建物内部の損傷が進行したことを示している。

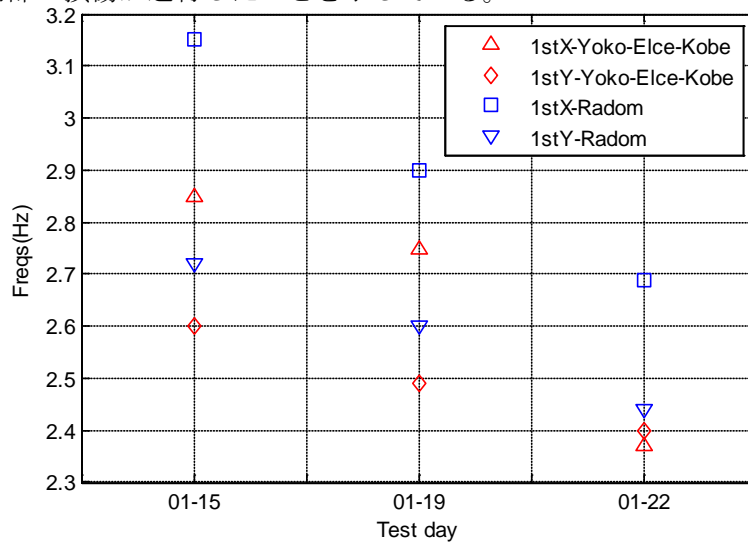


図 加振日別の1次固有振動数の推定結果

平成20年度における逆解析の成果と課題は、次のとおり整理できる。

構造物全体のグローバルな損傷推定を目的とした場合は、最低2個の加速度センサに基づき評価可能である一方、層や部材単位のローカルな損傷推定のためには、より多くのセンサ等情報が必要となる。また、推定結果をどのように解釈するかにおいて、先験情報の活用、長期のデータ収集が不可欠であることが示された。

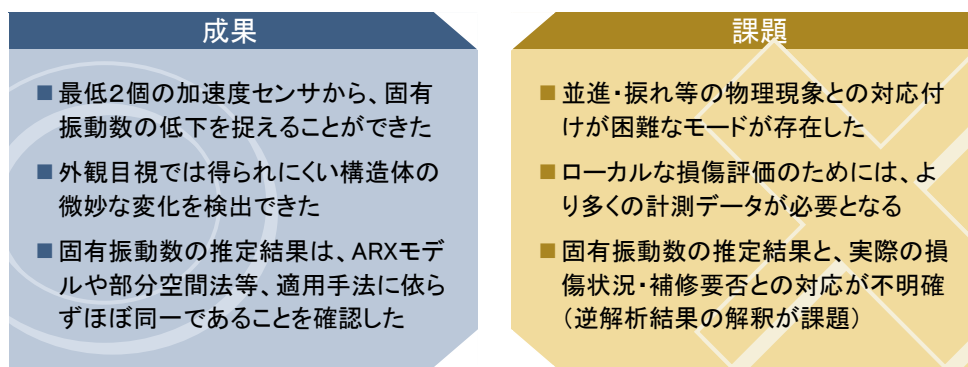


図 平成20年度逆解析の成果と課題

### ③ 平成 21 年度に実施する逆解析

昨年度と同じ実大建物の加振実験データを用い、以下の検討を行う。

#### a) 新たに利用するデータ・情報の範囲

今年度新たに利用するデータ・情報の範囲は以下の通りである。

- 振動台及び各層に設置された計 18 台の加速度計の波形データ
- 各階計 8 箇所の層間変位計のデータ
- 室内 8 方向と建物全体 4 方向のビデオ映像
- 建物設計に係る平面詳細、断面詳細、構造設計概要
- ひび割れの計測記録（ひび割れ写真とひび割れ図）

#### b) フルスペックの逆解析

管理技術検討 WG の下に設置する SHM 技術検討 SWG において、上に示した各種データ・情報を広く活用し、逆解析を行う。逆解析の検討にあたっては、下記の観点を考慮する。

##### ○設計情報の活用

モード特性（固有振動数、モード形状等）、保有水平耐力、偏心率等のデータを先験情報として入手できれば、モデリングの精度を向上させることができる。また、設計上の建物モデルと実測に基づく建物モデルを比較対照する等、逆解析結果の検証にも役立つ。

##### ○計測データの活用

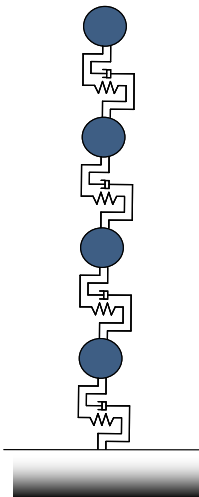
各層に設置された加速度センサのデータを活用すると、各層の剛性や最大層間変形角等のパラメータを推定することができ、層レベルの損傷推定が可能になる。鉛直方向での損傷位置（層）が限定された後、各フロア内に 3 箇所設置された加速度センサ情報を活用し、水平方向に損傷位置を探索することも、方向性の 1 つとして考えられる。

また、各層で同定された剛性や最大層間変形角等は、層間変位計のデータを活用すると、別の角度から検証することが可能である。

次式の通り、ある階層床に作用する慣性力 (①) は、上階からの質量と加速度の線形結合から算出することができ、それは当該層におけるばね力・ダンパ力 (②) と力学的に釣り合う。

$$f_j = -\sum_{k=j}^N m_k \cdot \ddot{x}_k = c_j (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) + k_j (x_j - x_{j-1})$$

①は、各層質量と、各層で計測された加速度データから算出可能である。  
②は、層間変位がデータとして得られているため、その時間微分を導入すれば層間速度も得られる。このようにして、各層で計測された加速度データ及び層間変位データに基づき、連立方程式を解くことによって、未知数である剛性  $k$ 、減衰係数  $c$  を簡易に算出できる。



## ○映像等の記録情報の活用

上記のような数値データに基づく逆解析に加え、ひび割れ図やビデオ映像といった外見情報を組合せることで、より詳細な逆解析を行える可能性が考えられる。

## 2) センサ・データの数を限定した逆解析結果や損傷推定精度等の検討

膨大な数のセンサ情報を参照するようなモニタリングは、住宅向けのヘルスマニタリングシステムの適用において、現実的とは言えない場合がある。そこで、下記方針を共有した上で、簡易な逆解析の手法を設定する。SWG 各委員の専門的な知見に基づき、扱うデータ・情報の範囲等に応じて2～3タイプの手法を設定する。

	昨年度	今年度
損傷推定のレベル	グローバル(全体系)	ローカル(層レベル等)
	加速度(最低2箇所)	加速度(各層)、層間変位等
損傷指標	固有振動数	剛性、層間変形等
モデリング	線形、並進成分	非線形性や振れ成分の考慮
	物理的、数学的	ソフトコンピューティング (ニューラルネット、SVM等)
推定手法	汎用性が高い	汎用性が高い(維持)
	線形、並進成分	非線形性や振れ成分の考慮
結果の解釈	困難	容易

図 逆解析手法の設定方針(案)

逆解析結果を踏まえ、センサの種類・数や適用手法等に応じた損傷推定のレベルを検証し、それらの対応付けを体系的に整理する。ここで「どのような技術要件を満たせばどの程度の損傷推定が可能となるか」を整理することが、別途行うヘルスマニタリングシステムのサービスレベルの検討に資する。

## 3) 簡易かつ一定の精度を有するモニタリングシステムの試設計

住戸に適したヘルスマニタリングシステムを想定しつつ、状態把握の対象(建物全体系・層レベル・部材レベル)と目的(損傷の有無・箇所の推定など)に対応するヘルスマニタリングシステムを複数タイプ試設計する。ここで試設計したシステムを、平成22年度に実施予定の実大建物加振実験(平成20年度に行われた実験と同じ試験体を用いる加振実験)において、試験体の実装し、状態把握、診断に係る技術適用の実証実験を行う。

# 住宅に適したヘルスマニタリング技術の検討

## 1. 検討の目的・内容

### 1) 検討の目的

標準的な RC 共同住宅を想定した場合のケーススタディを行い、ヘルスマニタリング技術による診断・情報提供のサービレベルを設定し、それを実現するために必要なセンサの種類・数・設置箇所や逆解析手法等に係る適切な考え方を整理する。

住宅に適したヘルスマニタリングシステムの検討にあたっては、平成 20 年度に調査・作成した「実大規模加振実験に関する技術資料」から、構造・規模など要素技術の適用に関する既往研究の成果を活用し、実大建物の加振実験との関係を補間する。

### 2) 検討の内容




調査検討の内容は次のとおりである。

#### (1) 標準的な RC 造共同住宅のモデル設定

標準的な RC 造共同住宅モデルとして、現段階では、A：高層塔状、B:高層板状、C:中層板状の3つの実在建物を予定している。各モデルの設計図等の情報を参照し、延床面積、階数、高さ、構造設計形式等の基本情報に加え、固有周期等のパラメータを設定する。

また、この段階で、各モデルの振動特性を踏まえたセンサ計測上の留意事項等についても整理する。

表 標準的な RC 造共同住宅のモデル（イメージ）

	A 高層塔状	B 高層板状	C 中層板状
外観			
延床面積	...	...	...
階数	...	...	...
高さ	...	...	...
構造設計形式	...	...	...
固有周期	...	...	...
振動特性	...	...	...

#### (2) サービスレベルの検討

住宅の構造特性の診断・情報提供サービスを構成する項目ごとに、ヘルスマニタリングシステムにより（今後の可能性も含めて）実現が見込まれるサービスレベルについて、検討・整理する。

- サービスの目的（地震時性能確認／竣工時性能確認／平時維持管理／資産価値評価 等）
- センサ計測のタイミング（常時／地震時／ワンショット 等）
- 損傷推定のレベル（グローバル／ローカル 等）
- 対象構造物の管理対象範囲（複数建物／単体建物）
- サービスの導入時期（新築／既存） 等

### （3）ヘルスマニタリングシステムの検討

#### ①検討ケースの設定

設定したA～Cのモデルごとに、検討したサービスレベルの中で技術的適用性・実現可能性、経済性等を踏まえて、検討対象とするケースを設定する。

例えば検討対象C：中層板状の場合、構造物全体の損傷有無のみを検知する必要最低限のC-1システム、層レベルの損傷程度を把握するC-2システムなど、サービスレベルに応じた複数のパターンを検討する。

#### ②技術的要件の検討

①で設定した検討ケースに、サービスレベルを実現するための技術的要件を検討する。検討項目として、センサの種類・数・配置箇所、データの蓄積・管理・提供方法、逆解析手法等を想定する。

なお、検討対象C：中層板状に適用するヘルスマニタリングシステムの技術要件に関しては、課題3の検討結果を反映する。

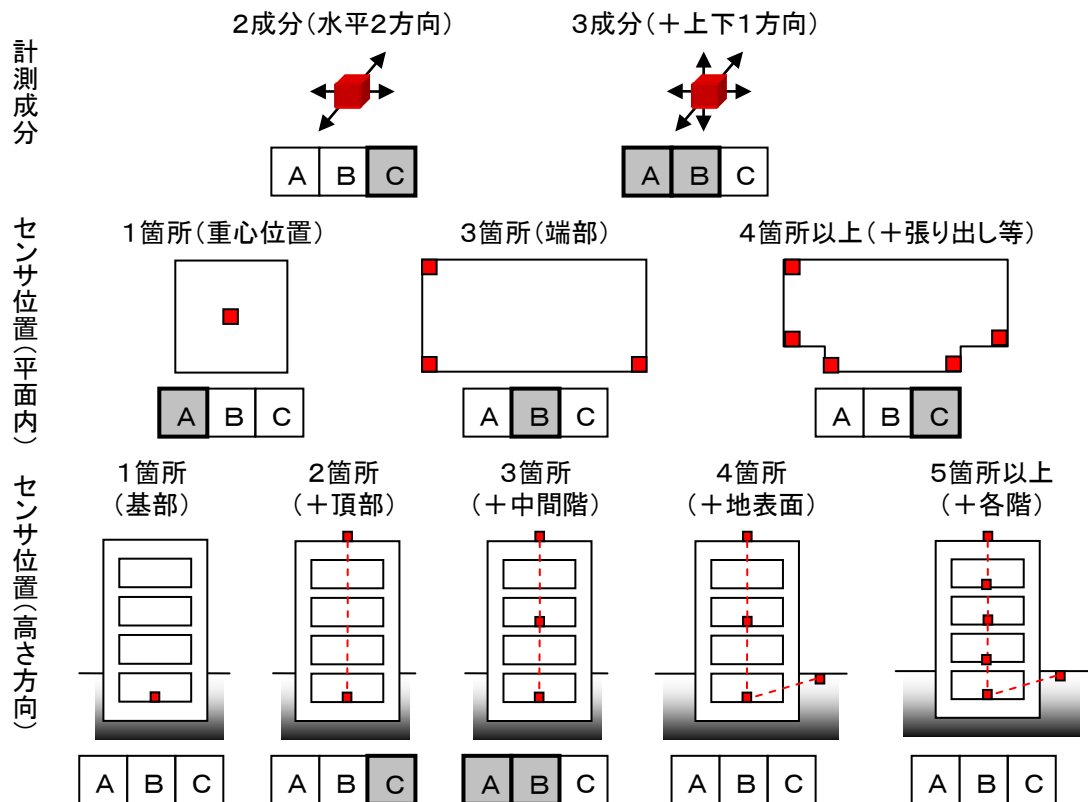


図 加速度センサ設置の考え方（イメージ）