

実大建物の加振データを用いたヘルスマonitoring技術の検討

【研究計画 1 に対応】

平成 21 年 1 月に(独)防災科研 兵庫耐震工学研究センター (E-defense) で実施された中層 RC 造構造物の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、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onitoring (以下「SHM」という) 技術の適用性を実験検証した (平成 20 年度より継続)。

今年度は、構造設計の詳細に関する情報や計測データ等が取得できるケースとして詳細な逆解析の検討、取得できるデータが限定された場合の簡易な逆解析の検討を行うとともに、それらの診断精度の検証を行った。

※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。

<報告書 第 2 章の目次構成>

※枠囲い部分のみ抜粋

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1.1 平成 20 年度の成果の概要 <ul style="list-style-type: none"> 1.1.1 試験体の概要 1.1.2 センサの概要 1.1.3 加振波の概要 1.1.4 逆解析の成果の概要 1.2 平成 21 年度の逆解析の実施方針 <ul style="list-style-type: none"> 1.2.1 新たに利用するデータ・情報の範囲 1.2.2 システム開発 SWG における逆解析の分担 |
|---|
- 1.3 詳細な逆解析の実施結果
 - 1.3.1 逆解析手法の概要
 - 1.3.1.1 DE 法の概要
 - 1.3.1.2 PS0 法の概要
 - 1.3.2 ランダム波加振データの逆解析
 - 1.3.2.1 PS0 法による同定結果
 - 1.3.2.2 DE 法による同定結果
 - 1.3.2.3 逆解析結果の検証
 - 1.3.2.4 まとめ
 - 1.3.3 DE 法に基づく地震波加振データの逆解析
 - 1.3.4 有限要素法による正解析
 - 1.3.4.1 動的弾塑性時間領域解析の概要
 - 1.3.4.2 弾塑性解析のための地震波
 - 1.3.4.3 解析結果の概要
 - 1.3.4.4 まとめ

1.3.5 詳細な逆解析に用いる設計情報

- 1.3.5.1 固有値解析結果
- 1.3.5.2 荷重増分解析結果
- 1.3.5.3 鉄筋歪みの解析結果

1.4 簡易な逆解析の実施結果

1.4.1 簡易な逆解析の実施計画

- 1.4.1.1 目的・方針
- 1.4.1.2 逆解析方針及び適用手法等

1.4.2 逆解析実施前の信号処理

- 1.4.2.1 信号処理の実施方針
- 1.4.2.2 信号処理の妥当性検証
- 1.4.2.3 実験的伝達関数によるノンパラメトリック情報の抽出
- 1.4.2.4 各次モード推定に適した参照センサ位置についての検討

1.4.3 ARX モデルに基づく簡易な逆解析

- 1.4.3.1 多項式モデルを用いたシステム同定理論
- 1.4.3.2 ランダム加振時のモーダルパラメータ
- 1.4.3.3 地震波加振時のモーダルパラメータ
- 1.4.3.4 まとめ

1.4.4 部分空間法に基づくランダム加振データの簡易な逆解析

- 1.4.4.1 部分空間法によるシステム同定理論
- 1.4.4.2 モード特性の推定手順
- 1.4.4.3 モード特性の一括推定の結果
- 1.4.4.4 モード情報に基づく層レベルの損傷推定
- 1.4.4.5 まとめ

1.4.5 部分空間法に基づく地震波加振データの簡易な逆解析

- 1.4.5.1 モード特性の区間推定
- 1.4.5.2 荷重変形関係に基づく層レベルの損傷推定
- 1.4.5.3 まとめ

1.5 成果の総括及び実用化に向けた課題

1.5.1 ランダム加振データの逆解析の成果と課題

- 1.5.1.1 簡易な逆解析
- 1.5.1.2 詳細な逆解析

1.5.2 地震波加振データの逆解析の成果と課題

- 1.5.2.1 簡易な逆解析
- 1.5.2.2 詳細な逆解析

1.6 簡易かつ一定の精度を有する SHM システムの試設計

- 1.6.1 常時微動測定に基づき層レベルの定期診断を行う SHM システム
- 1.6.2 地震時測定に基づき部材レベルの詳細診断を行う SHM システム
- 1.6.3 平成 22 年度の加振実験における技術検証テーマ

1.1 平成 20 年度の成果の概要

1.1.1 試験体の概要

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 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。

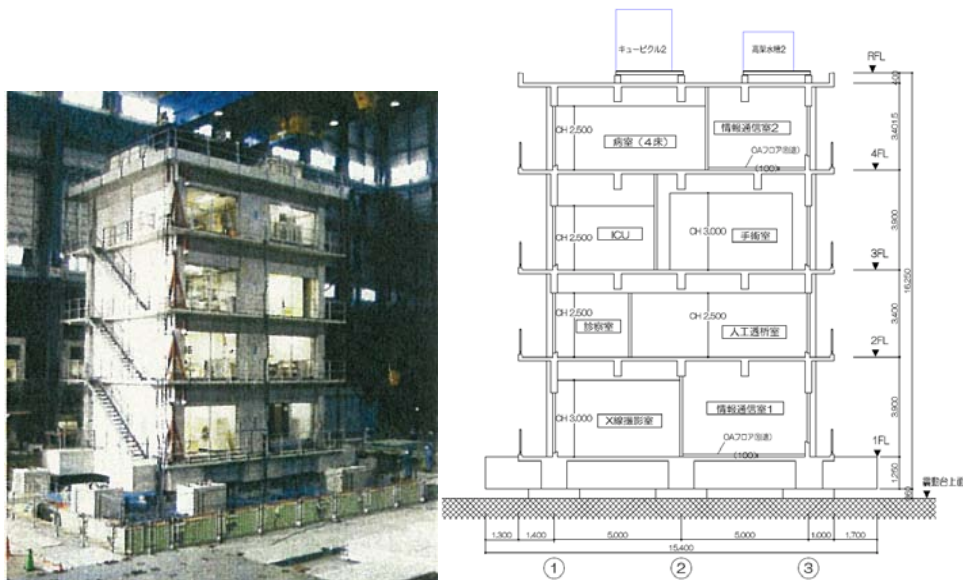


図 2-1 試験体の外観（左）と断面図（右）

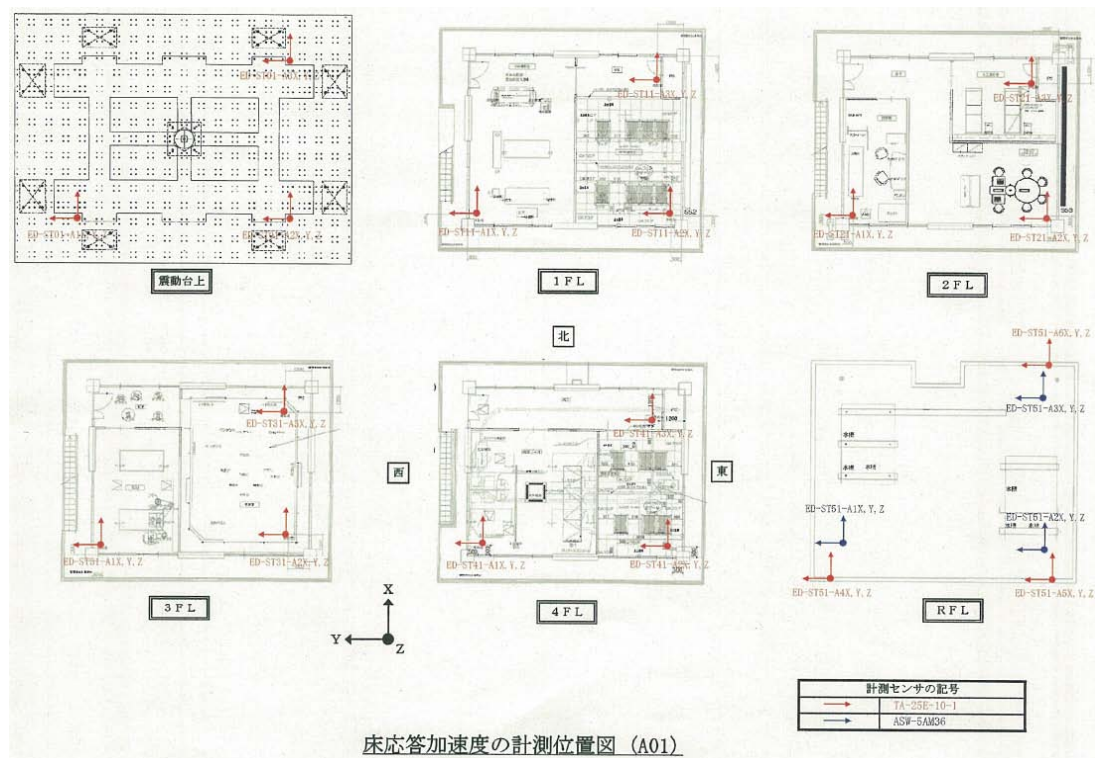


図 2-2 試験体の平面図

(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 2-1 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

1.1.2 センサの概要

試験体の各階床には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。

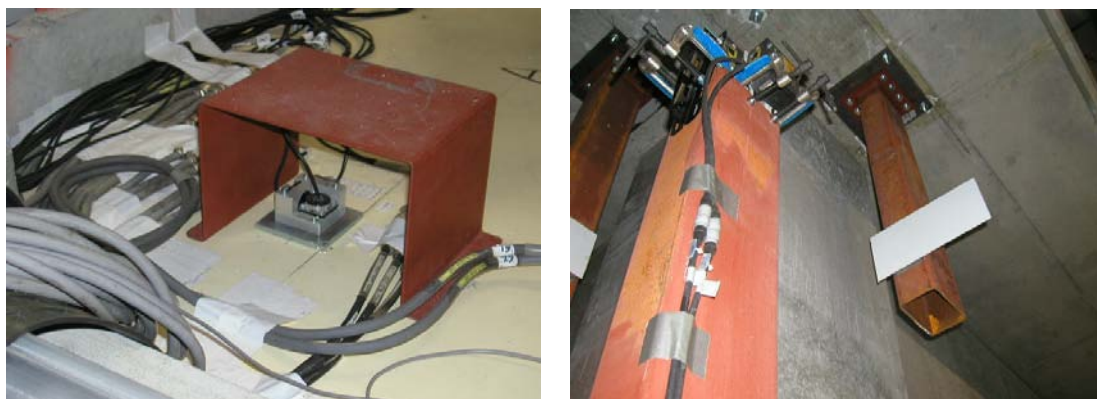


図 2-3 センサの外観（左：加速度計、右：層間変位計）

平成 20 年度管理技術部会においては、防災科研と国総研との間の共同研究契約により、実験データの一部として加速度データの提供を受け、逆解析手法の適用性の検証に用いた。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。

各階床に設置された加速度計は、トキメック社製のサーボ型加速度計 TA-25E を使用しており、その性能諸元を示す。

表 2-2 サーボ型加速度計の性能諸元

型式名	TA-25E-05-10
測定範囲	$\pm 39.24 \text{ m/s}^2 (\pm 4\text{G})$
分解能	$9.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 (\text{DC})$ 以下 (1 μGal)
直線性	$\pm 0.1\% \text{FS}$ 以下
出力感度	$0.194 \text{ V/(m/s}^2)$ [1.9V/G]
クロストーク	1%以下
周波数応答	200Hz ($\pm 3\text{dB}$)
ゼロ温度係数	$\pm 2.94 \times 10^{-3} (\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C})$
感度温度係数	200ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 以下
温度範囲	$-20 \sim +70^{\circ}\text{C}$ (保存温度 $-40 \sim +80^{\circ}\text{C}$)
振動	JIS A 8101準拠
衝撃	1000 m/s^2 5ms
電源	$\pm 12 \text{VDC} \sim \pm 13 \text{VDC}$
消費電流	$\pm 25 \text{mA}$ 以下
外形寸法	$\Phi 28.4 \times 24.5$
質量	46g (含むケーブル10g)

1.1.3 加振波の概要

試験体から免震装置を取り除いた状態で、耐震構造の医療施設として平成 20 年 1 月 15 日、19 日、22 日に加振が行われた。

表 2-3 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 ³
	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
一月二十二日	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

(1) ランダム波

0.1-35Hz までの振動数成分を有する、X,Y,Z 方向最大 100gal の 6 軸ランダム波である。上記の実験日程の各日において、地震波による加振を行う前に 40 秒間のランダム波加振がそれぞれ 3 回行われている。

例えば 1 月 15 日の 1 回目の 6 軸ランダム波加振における各層 Y 軸観測波形は次の通り。

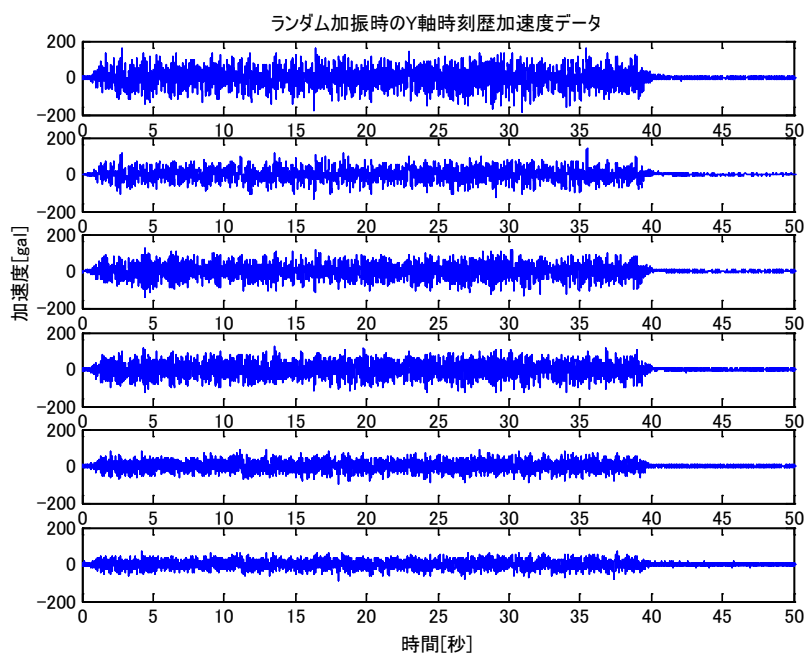


図 2-4 ランダム加振時の各層観測波形

(2) 地震波

各日においてランダム波加振終了後、1月15日は三の丸波及び横浜波、19日はエルセントロ波、22日はJMA神戸波による加振が行われた。

①三の丸波

東海・東南海地震を想定した名古屋市での長周期地震動（震度5強）で、水平方向成分のみの加振が行われた。

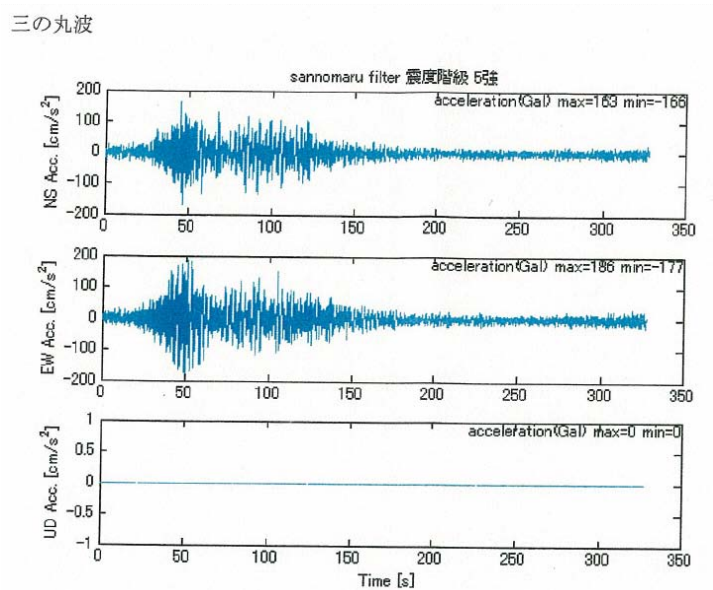


図 2-5 三の丸波加振（2008/1/15）の入力波形

②横浜波

首都直下地震を想定した横浜市湾岸地域での地震動（震度6弱）で、水平方向成分のみの加振が行われた。

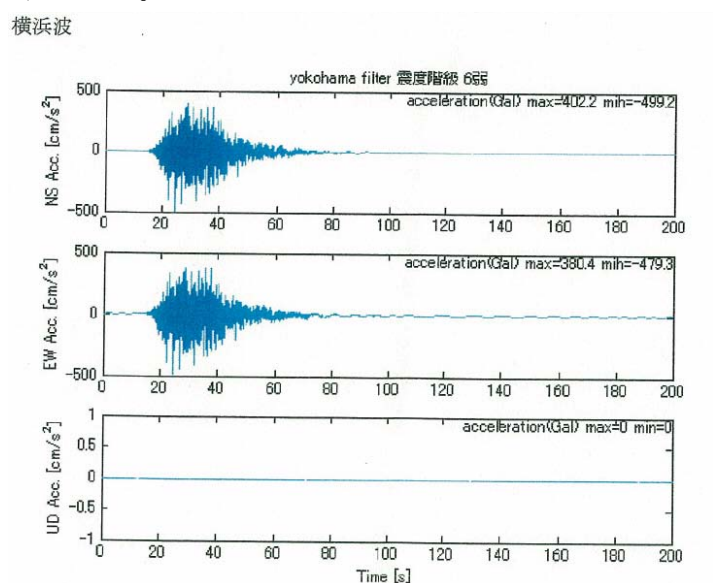


図 2-6 横浜波加振（2008/1/15）の入力波形

③エルセントロ波

1940 年 5 月 18 日にアメリカのエルセントロで記録されたインペリアル・バレー地震波（震度 6 弱）について、最大速度 50kine で基準化し、水平方向成分のみの加振が行われた。

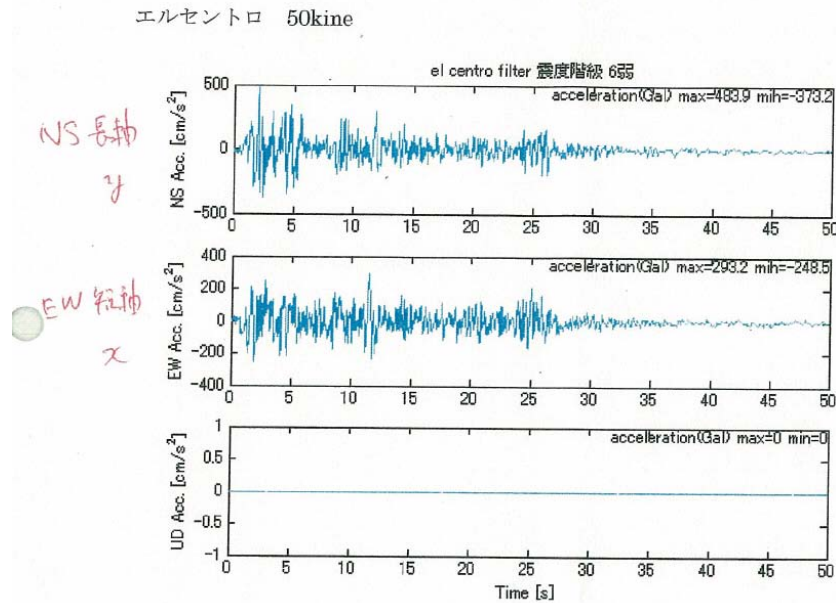


図 2-7 エルセントロ波加振（2008/1/19）の入力波形

④JMA 神戸波

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震における神戸海洋気象台波（震度 6 強）を振幅レベルで 80%に調整し、水平・上下方向の加振が行われた。

JMA 神戸 80%

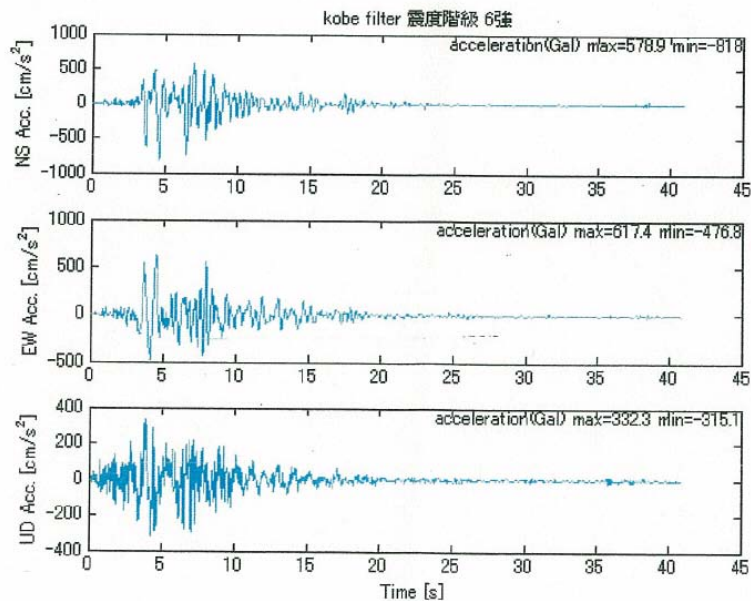


図 2-8 JMA 神戸波加振（2008/1/22）の入力波形

1.1.4 逆解析の成果の概要

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 2-4 複数の方法による平成 20 年度逆解析

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。

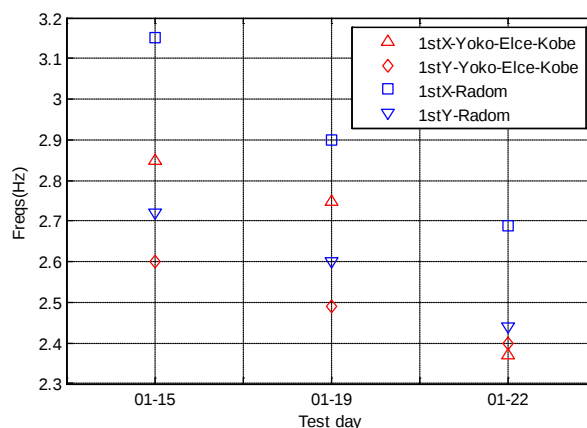


図 2-9 加振日別の 1 次固有振動数の推定結果

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。

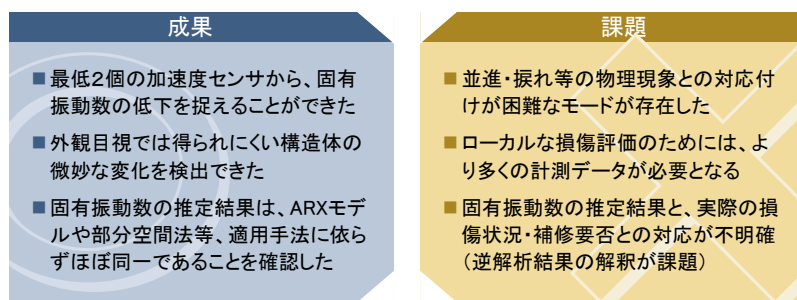


図 2-10 平成 20 年度逆解析の成果と課題

1.2 平成 21 年度の逆解析の実施方針

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、設計情報等のデータを広く活用して逆解析を行う（以下「詳細な逆解析」という）。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（以下「簡易な逆解析」という）。

管理技術WGの下に技術的検討を行うために設置したシステム開発SWGを中心に、構造物の層レベルの損傷推定を行うとともに耐震性能評価に結び付けることを目標として取り組んだ。

検証によって得られた成果は、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の検討に活用する。

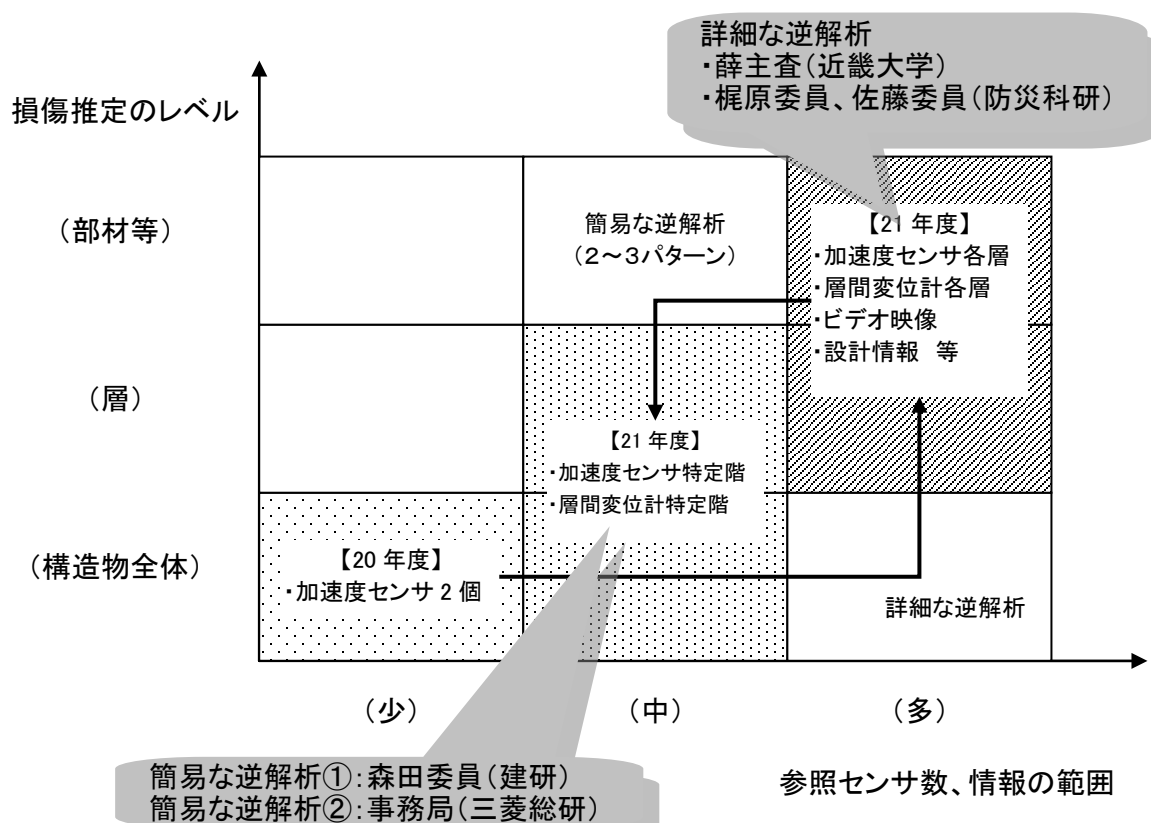


図 2-11 平成 21 年度の取り組みのイメージ

1.2.1 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。

- 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
- 建物設計に係る解析モデル

(1) 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。

(2) より多種類のセンサデータの活用

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。

また、今年度新たに層間変位計のデータを活用すると、層せん断力と層間変形角の関係を推定することも可能となる。これを設計情報と比較することにより、層レベルの耐震性能評価に結びつける。

1.2.2 システム開発 SWG における逆解析の分担

昨年度の成果等を踏まえ、構造物の層レベルの損傷推定を行うとともに耐震性能評価に結び付けることを目標として、3 者の立場からそれぞれ検討を行った。

表 2-5 複数の方法による平成 21 年度逆解析

狙い	手法概要	検討主体
詳細な逆解析	下記アプローチにより詳細な解析を行う。 ・PSO 法による層レベルの損傷推定 ・設計情報等との比較検証による耐震性評価	近畿大学 薛主査 防災科研 梶原委員、佐藤委員
簡易な逆解析①	ARX モデルに基づく層レベルの損傷推定	建研 森田委員
簡易な逆解析②	部分空間法等による層レベルの損傷推定	事務局(三菱総研)

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し、「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」を示す。

1.5 成果の総括及び実用化に向けた課題

1.5.1 ランダム加振データの逆解析の成果と課題

ランダム加振データを用いた逆解析の結果について、第3章で後述するSHMパッケージ「竹」として実構造物に適用した場合を想定しながら、以下にまとめる。

1.5.1.1 簡易な逆解析

- 簡易な逆解析によるモード情報は、ARXモデルに基づく場合と、部分空間法に基づく場合を比較すると、ほぼ同様の推定結果が得られた。

→ モード情報は、フーリエ解析などの汎用的な手法を用いてもほぼ同様の推定結果が得られる。適用手法に応じた推定精度の差異は小さい。

→ ただし、極情報の中からどのモードを選定するか、いかに安定したモードを抽出するかにおいて、エキスパートジャッジを要する部分がある。

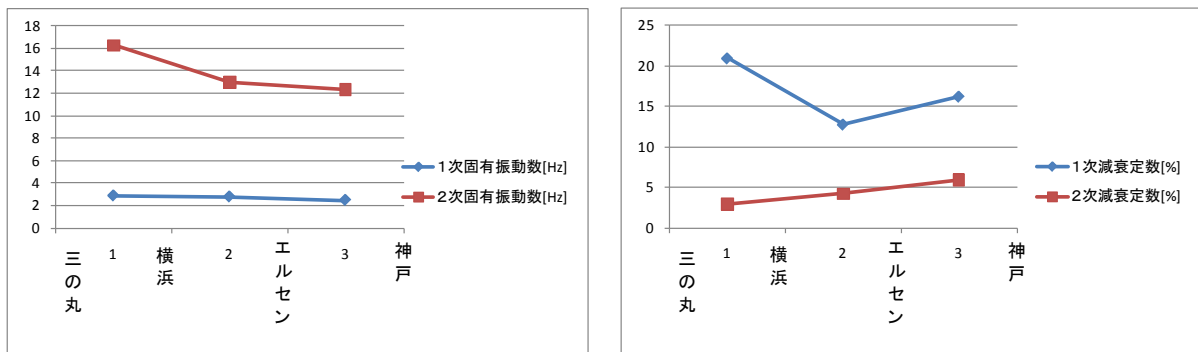


図 2-12 ARX モデルに基づくモード情報の推定結果（左：固有振動数、右：減衰定数）

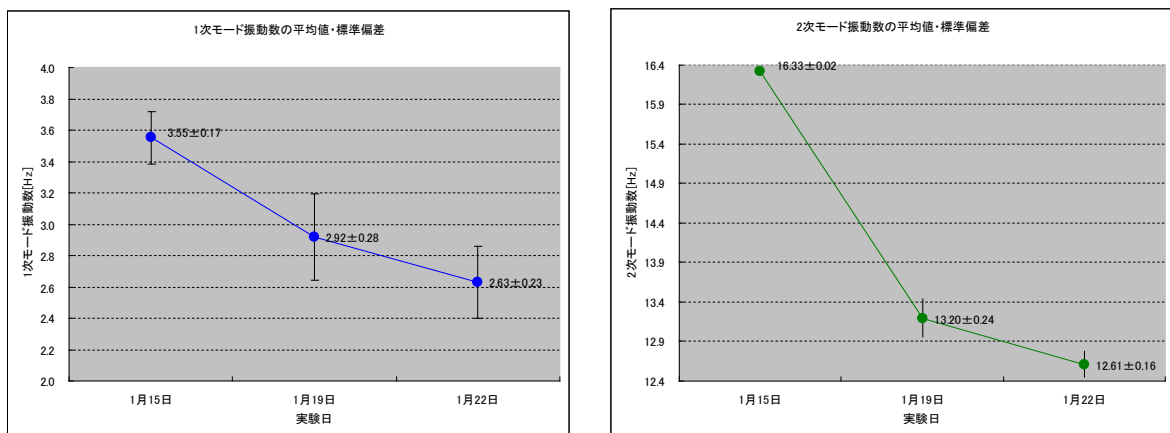


図 2-13 部分空間法に基づくモード振動数の推移（標準偏差付、並進X方向1次・2次）

- 部分空間法に基づきモード振動数、減衰定数、モード形状を算出する際、9通りの解析結果 (モデル次数3パターン×加振回数3回) の平均及び標準偏差を算出し、パラメータの推定結果の幅を考慮した。

→ パラメータを推定する際は、幅をもたせた推定を行う。今回実施したように、常時微動測定を1回だけでなく複数回繰り返す、複数パターンのモデル次数を採用してみる等により、推定結果の信頼性を高めることが実際には必要となる。

- モード振動数を損傷指標とした場合、全体系で約2割の固有振動数の低下を伴う損傷の存在を、確認することができた。特に1/15に行われた地震波加振 (三の丸波、横浜波) によって損傷が発生し、その後も徐々に損傷が進行したと考えられる。

→ モード振動数のようにある程度安定した推定が行えるパラメータを代表値とし、構造性能の推移に関して定量的な連続データとして蓄積していくことが現実的と考えられる。(加速度などの生データをそのまま蓄積するのではなく)

→ 推定されたパラメータをどう解釈し、「維持管理」「補強」「限界」などの建物管理者の対応に結び付けていくか、考え方を整理する必要がある。今後、実構造物の計測データの蓄積に拠るところが大きい。

→ 多数の実構造物のデータを広く収集・蓄積・共有する上では、最低限、加速度センサが建物頂部に1個あれば十分である。今回実施した層レベルの逆解析では各層センサを用いたが、モード振動数の変化のみで全体レベルの損傷推定を行うのであれば、センサ1個で十分である。

1.5.1.2 詳細な逆解析

- モード情報は、PSO法・DE法に基づく場合と、FEMモデルによる正解析に基づく場合を比較すると、ほぼ同様の推定結果が得られた。

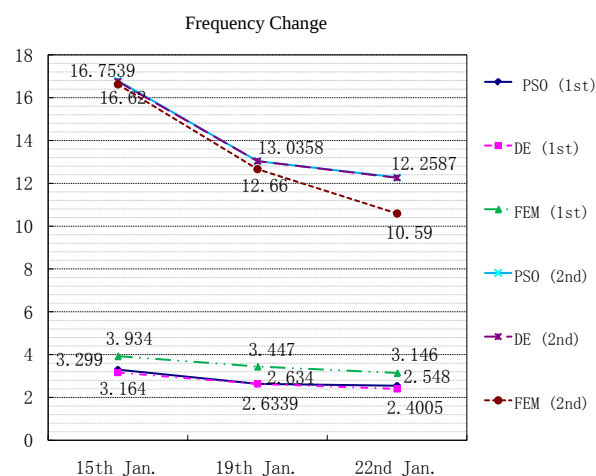


図 2-14 逆解析及び正解析に基づく1次・2次モード振動数の変化

- 各層の剛性は、1/15 を基準とした場合に、各日で4割程度の低下が見られた。

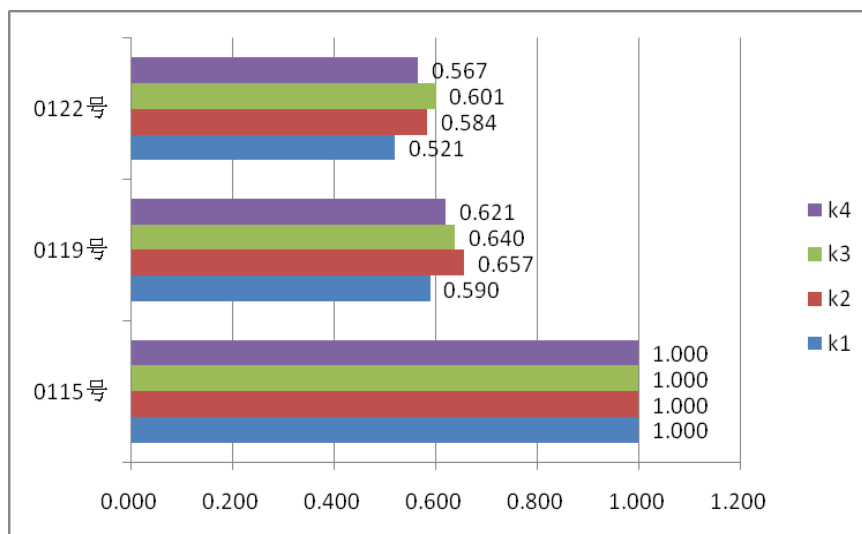


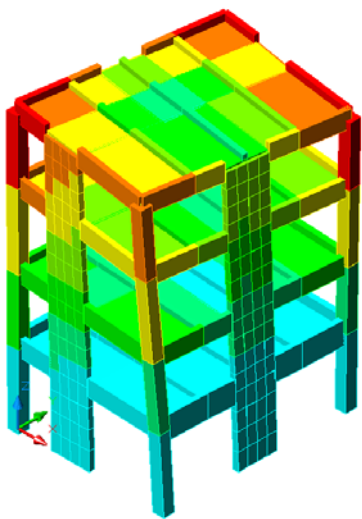
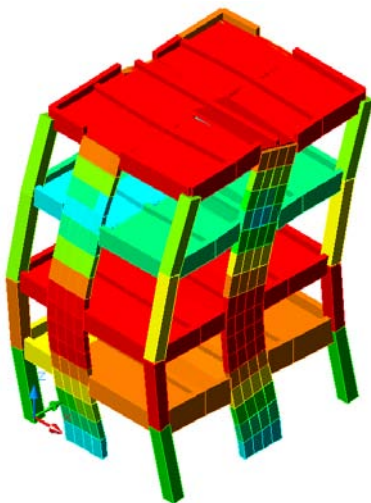
図 2-15 1月15日を基準とした剛性推定値の比

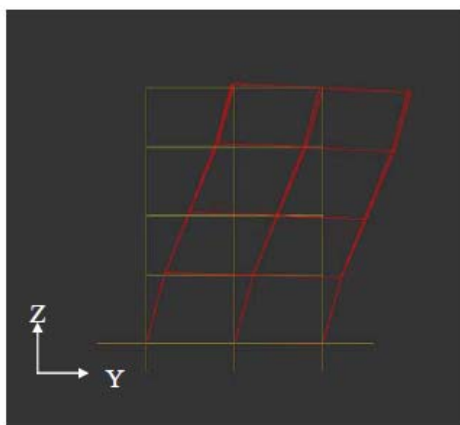
- 逆解析によって推定したパラメータを活用して、柱・主梁・スラブなどの材料特性の仮定に基づき、有限要素法による正解析モデルを構築したところ、モード特性は、設計上の解析モデルとほぼ整合した。

→ 研究段階ではあるが、逆解析結果を活用して設計モデルを構築することについて、一定の効果が得られた。将来的なSHMの利活用方法として、構造図面等の設計情報の履歴が残されていない既存住宅への適用の可能性を示すものと考えられる。

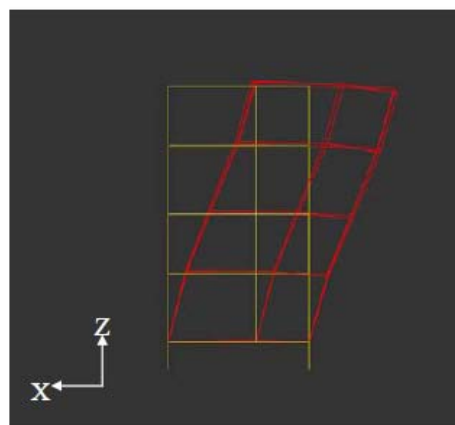
表 2-6 有限要素モデルのモード特性（第4モードまで）

第1モード（y），振動数：3.91373	第2モード（x），振動数：3.92661

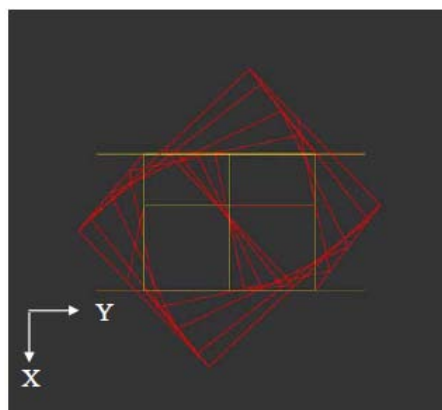
第3モード (捩れ), 振動数: 5.62464	第4モード (y), 振動数: 13.5068
	



第1モード: Y 方向、3.802Hz



第2モード: X 方向、3.92Hz



第3モード: ねじれ、4.8Hz

図 2-16 設計上の解析モデルのモード特性

1.5.2 地震波加振データの逆解析の成果と課題

地震波加振データを用いた逆解析の結果について、第3章で後述するSHMパッケージ「松」として実構造物に適用した場合を想定しながら、以下にまとめる。

1.5.2.1 簡易な逆解析

- 計測された加速度データを2秒ごとに区切り、モード情報の区間推定を行った結果、三の丸波（1次モード振動数が17%低下）、横浜波（1次モード振動数が25%、2次モード振動数が18%）ともに加振中の構造特性の変化が見られた。

→ センサを予め構造物に組み込んでおくことで、地震波による加振中の構造特性の時間変化を捉えることができ、SHM適用のメリットを最大限活かせる。

→ ただし、常時計測しているとデータ量が膨大となる。そこで、一定以上の加速度を検知した場合に計測を開始することや、計測機能だけでなく処理機能を有するスマートセンサを活用して転送・蓄積するデータ量を低減する仕組みも併せて必要である。

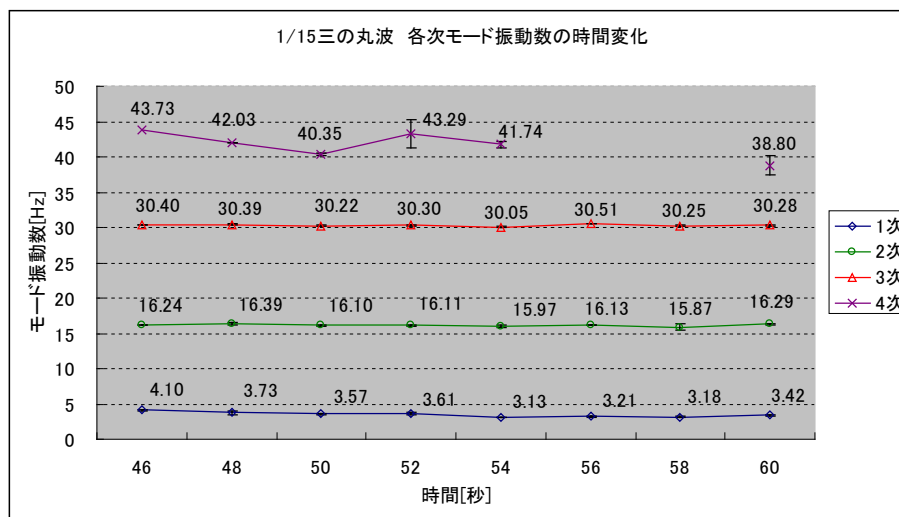


図 2-17 1/15 三の丸波加振時の各次モード振動数の時間変化

- 地震波の入力振幅が大きくなるほど固有振動数が低下する傾向が見られた。

→ モード振動数には、地震波の入力レベルに対して振幅依存特性がある。

→ 地震波加振中、加振前後の常時微動、それぞれにおいて生ずる微妙な変化を、どのように解釈し、補修・補強等の対策判断に役立てるかが課題である。維持管理指標を確立するには、実構造物への適用と長期にわたるデータの計測、構造形式・規模・高さ等の類型ごとのデータベースが必要である。

- 各層で計測された層間変位データを用いて荷重変形関係を算出した。今回の実験では、設計上の荷重増分解析結果における保有耐力、二次設計や応急危険度判定に定められている基準の範囲内に収まっていることを確認した。

- 層間変位データを活用すれば、モデルを介することなく、四則演算による簡易な手法により、荷重変形を把握できた。
- ただし、設置が大がかりとなる層間変位計を住宅に適用し、データを動的に計測し続けることは考えにくい。 今回のような手法を適用するには、最大値記憶型の変位センサを活用することが現実的である。
- 最大層間変形角や最大層せん断力は、設計情報や既存の法令に定める基準との照らし合わせが容易であり、耐震診断や応急危険度判定を迅速に行う（代用する）技術としてのSHMの有効性が示された。

1.5.2.2 詳細な逆解析

- 各層の剛性値及び減衰比を算出した。例えば 1/15 の横浜波においては各層剛性が約 $3 \times 10^8 \text{ kN/m}$ となった。これは、前述の荷重増分解析結果のグラフを比較して、ほぼ整合している。

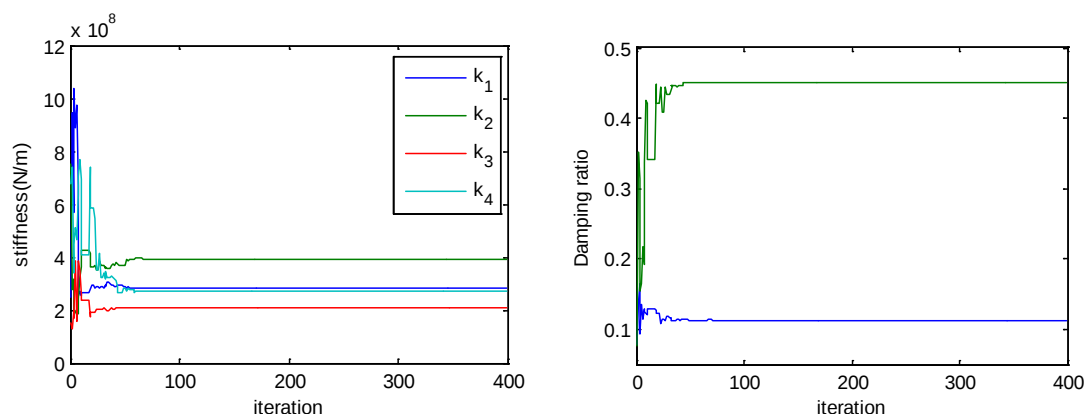


図 2-18 1/15 横浜波加振後のパラメータ推定結果（左：剛性、右：減衰比）

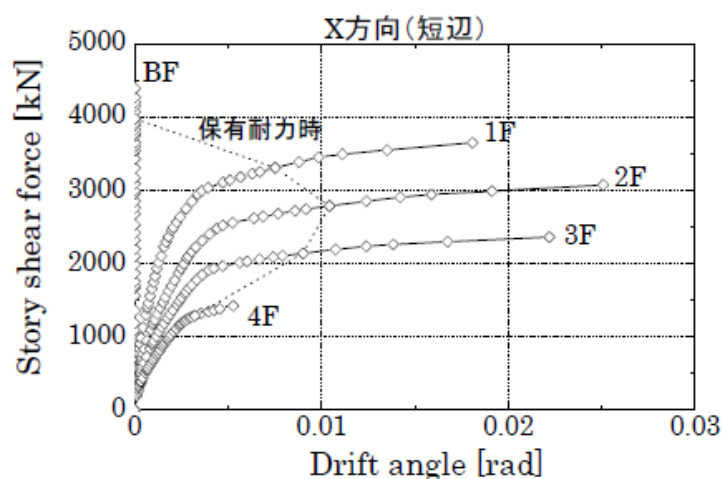


図 2-19 耐震設計用モデルの荷重増分解析結果（左：X方向、右：Y方向）

- 逆解析によって推定したパラメータを活用して、柱・主梁・スラブなどの材料特性の仮定に基づき、有限要素法による正解析モデルを構築し、地震波加振時におけるひび割れや鉄筋の塑性降伏状況等についての可視化を試みた。

→ 研究段階ではあるが、逆解析結果を活用して設計モデルをアップデートすることについて、一定の効果が得られた。将来的なSHMの利活用方法として有力であり、予測地震動を受けた場合の構造物の挙動について、より高精度な被害想定の可能性が示された。

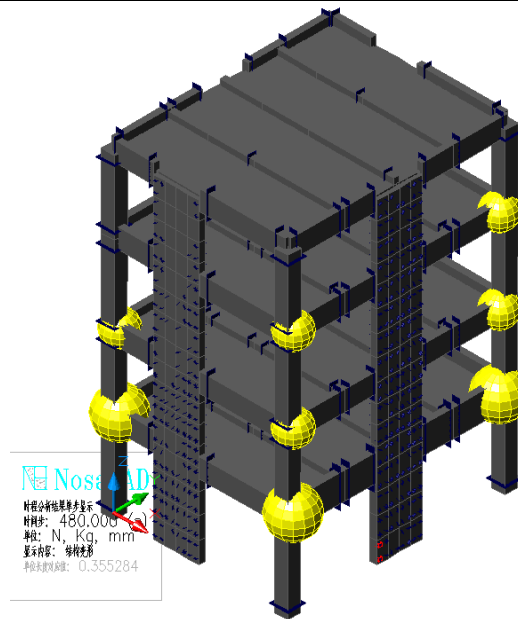


図 2-20 JMA 神戸波入力時の構造状態

※1/22 の JMA 神戸波加振を FEM モデルに入力した結果の構造状態を示している。
亀裂が増え（青）、一階のコンクリートが極限に達した（赤）。更に、1,2,3 層の梁、柱の接点に塑性ヒンジが発生した（黄）。

1.6 簡易かつ一定の精度を有するSHMシステムの試設計

ここでは、住宅への適用場面を想定しつつ、損傷推定の対象（建物全体レベル／層レベル／部材レベル）に対応する SHM システムを複数タイプ試設計する。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、ここで試設計したシステムに準じた SHM システムを試験体の実装し、状態把握・診断に係る技術適用の実証実験を行う。

1.6.1 常時微動測定に基づき層レベルの定期診断を行う SHM システム

常時微動データに基づき定期的に診断を行う SHM システムに関して、センサ配置の考え方を整理する。なお本検討は、第 3 章で後述する SHM パッケージ「竹」に該当する。

（１）常時微動データから評価を行う上での留意点の整理

ランダム加振時のデータ逆解析において困難であった点を以下の通り整理し、センサ計画の検討に反映する。

- 曲げの影響が大きい場合、せん断を仮定したモデルに基づく逆解析は困難である。
- 多くの極情報の中から、対応する安定したモードの判断・判定に際して、解析側のエキスパートジャッジを要する。
- パラメータの幅を考慮した推定が必要である。 推定誤差は、複数回の加振結果の平均・標準偏差をとって評価することが望ましい。一方、モデル化に伴う誤差の取り扱いをどのように評価するかが課題である。

（２）損傷指標及びセンサの選定

全体レベル・層レベルという推定の対象ごとに何を損傷指標とし、損傷指標の評価のためにどのような種類のセンサが必要となるか、次の通り検討した。

表 2-7 本 SHM システムにおける損傷指標とセンサ

推定の対象	損傷指標	計測に用いるセンサ
全体レベル	1 次モード振動数	全体で 1 個または 2 個の加速度センサ (※1)
	頂部の傾斜	傾斜計 (※2)
層レベル	各次モード振動数	各層に加速度センサ
	モード形状	各層に加速度センサ
	層剛性	各層に加速度センサ及び層間変位計 (※3)
	層間変位	各層に加速度センサ及び層間変位計 (※3)

(※1) 1 次モード振動数を推定するための加速度センサは、固有値のみ評価する場合は頂部に 1 個、伝達関数を評価する場合は頂部及び 1 階にそれぞれ 1 個あれば十分である。

(※2) 傾斜計を臨時に設置して、地表面に対する頂部の傾斜を静的に計測する方法もある。

(※3) 層間変位計は設置が大がかりになることから、最大値記憶センサや傾斜計の活用も考えられる。

(3) センサ配置計画

層間変位計の設置箇所は、高さ方向で2つのフロアにわたって設置する。

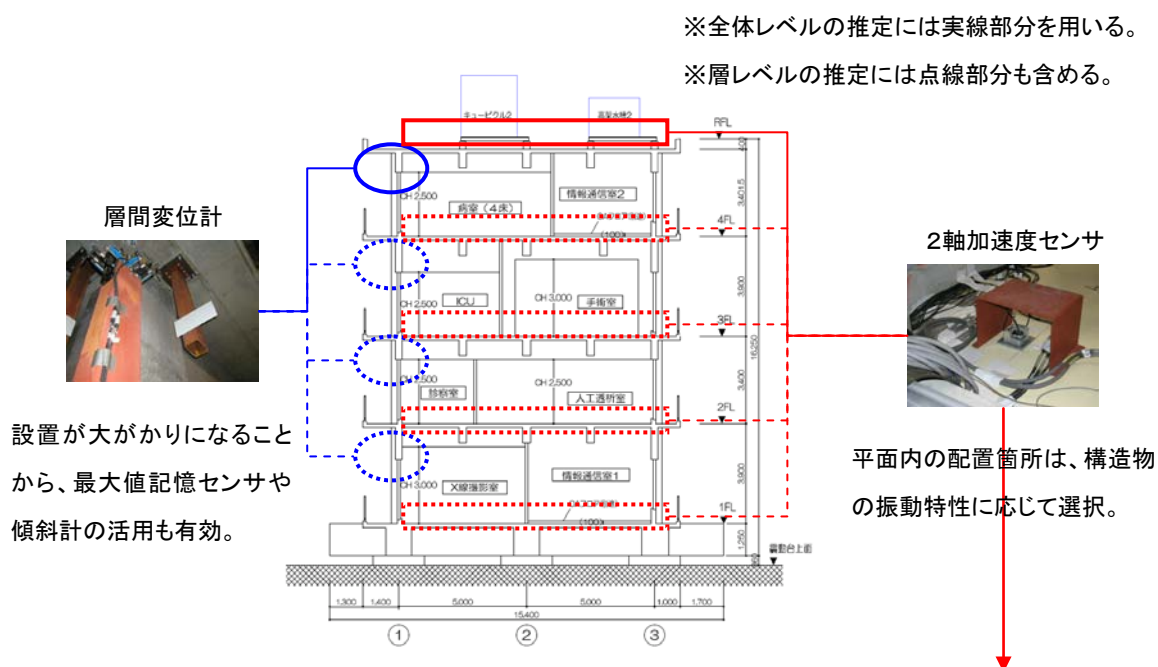
加速度センサの計測方向成分については、水平・上下3方向の計測が可能なものを用いることに越したことはない。しかし中層建築物は高層建築と比較して上下動の影響が小さいことから、水平2方向の計測でも十分である。

【振れの影響を無視してよい場合】

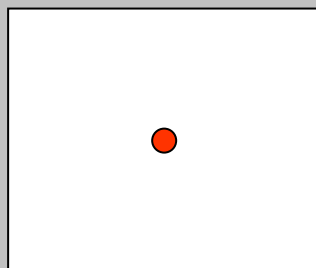
加速度センサの設置箇所は、各階の重心位置が妥当である。しかし、平面形状が非対称の中層建築物は振れの影響を受けやすいことに留意する必要がある。

【振れの影響を考慮する場合】

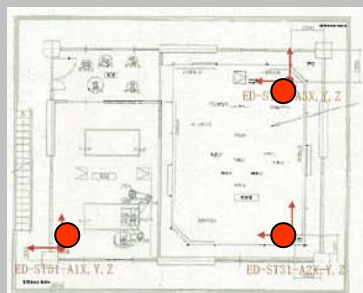
加速度センサは理想的には4隅及び重心位置に設置する。しかし剛床が仮定できる場合は各階の3隅に設置すればよい。



振れを無視してよい場合



振れを考慮する場合①



振れを考慮する場合②

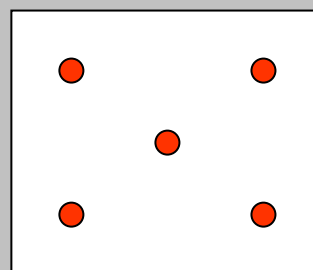


図 2-21 本 SHM システムにおけるセンサ配置計画

1.6.2 地震時測定に基づき部材レベルの詳細診断を行う SHM システム

常設センサから得られる地震時データに基づき構造物の損傷・劣化の詳細な診断を行う SHM システムに関して、センサ配置の考え方を整理する。なお本検討は、第 3 章で後述する SHM パッケージ「特松」に該当する。

(1) 地震波加振データから評価を行う上での留意点の整理

地震波加振時のデータ逆解析において困難であった点を以下の通り整理し、センサ計画の検討に反映する。

- 地震時には特に非線形領域への対応が課題であり、非線形性を含めた逆解析手法の適用が必要となる。
- 時々刻々と変化する構造特性を線形手法で推定するためには、短い区間長のデータで解析する必要がある。しかしこれが、推定誤差が大きくなる原因にもなる。
- 地震時のモード振動数は、入力レベルの振幅依存性によって変化する。
- 地震時には高次モードの検出が困難であることから、1 次・2 次などの限定されたモード情報に基づく損傷推定に課題がある。
- (ランダム加振時と同様に) 多くの極情報の中から、対応する安定したモードの判断・判定に際して、解析側のエキスパートジャッジを要する。
- (ランダム加振時と同様に) パラメータの幅を考慮した推定が必要である。推定誤差は、複数回の加振結果の平均・標準偏差をとって評価することが望ましい。一方、モデル化に伴う誤差の取り扱いをどのように評価するかが課題である。

(2) 損傷指標及びセンサの選定

全体レベル・層レベル・部材レベルという推定の対象ごとに何を損傷指標とし、損傷指標の評価のためにどのような種類のセンサが必要となるか、次の通り検討した。

表 2-8 本 SHM システムにおける損傷指標とセンサ

推定の対象	損傷指標	計測に用いるセンサ等
全体レベル	1 次モード振動数	全体で 1 個または 2 個の加速度センサ (※1)
層レベル	各次モード振動数	各層に加速度センサ
	モード形状	各層に加速度センサ
	層剛性	各層に加速度センサ及び層間変位計 (※2)
	層間変位	各層に加速度センサ及び層間変位計 (※2)
部材レベル (※3)	ひび割れ	AE センサ、導電塗料、デジタルカメラ
	内部欠陥	赤外線サーモグラフィ、超音波測定器
	歪み	歪みゲージ、圧電素子
	最大歪み等	炭素繊維、グラスファイバー、TRIP 鋼

(※1) 1 次モード振動数を推定するための加速度センサは、固有値のみ評価する場合は頂部に 1 個、伝達関数を評価する場合は頂部及び 1 階にそれぞれ 1 個あれば十分である。

(※2) 層間変位計は設置が大がかりになることから、最大値記憶センサの活用も考えられる。

(※3) SHM パッケージ「特松」の適用を見据えて、部材レベルの損傷推定に用いるローカルセンサの一例を併せて整理した。

(3) センサ配置計画

地震の揺れによってセンサやケーブルの断線、センサ自体の回転・ずれ等が発生し、データが欠損する可能性も懸念される。そのような場合に備えてセンサ配置において冗長性を確保する必要があるが、そこはコストとの兼ね合いで困難な場合が多い。

「部材」レベルの損傷推定に必要となるローカルセンサは、ひび割れ等の現象に基づく損傷検知がメインであり、対象範囲が特定箇所に限定されるため、予め損傷の集中が想定される箇所に設置する必要がある。例えば免震のように予め損傷が蓄積する箇所が特定できる損傷制御設計の構造物であれば、免震デバイスの最大変位を集中的に観測しておくシンプルなシステムによって、ローカルな損傷推定の目的が達成される。

しかし、建物の規模が大きく複雑で損傷位置を特定することが容易ではない場合や、仕上材や防火材により被覆され直に計測（視認）できない場合には限界がある。そこで、加速度センサ等の振動センサとの組合せで用いることが現実的と考えられる。

1.6.3 平成 22 年度の加振実験における技術検証テーマ

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、実験検証ポイントとして考えられる 7 つの事項を以下に挙げる。これらの実験テーマのうち、住宅へのヘルスマニタリング技術適用の観点と既往研究や他の実験研究等の実施状況等を考慮し、加振実験において実装するシステムを設定する。

(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ことが方向性の 1 つとして考えられる。

(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ことも有効である。

(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。そして、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ことが考えられる。

(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。

ただし信号処理で模擬できる部分と、デモンストレーションを目的とした取り組み（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。

（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。

ただし信号処理で模擬できる部分と、デモンストレーションで検証する部分（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。

（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。そこで、センサデータの伝送に要する時間を検証する。

ただしシミュレーションで模擬できる部分と、デモンストレーションを目的とした取り組み（実験における伝送時間計測等）を考慮する。

（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。必要に応じて原因を特定するフライトレコーダのような利活用を想定すると、データの蓄積管理を明確なルールに則って行う必要がある。

そこで、センサデータを蓄積管理する仕組みについて検証する。