

Ⅲ. 管理技術部門

Ⅲ－１．「管理技術部門」の研究内容と研究成果の概要

１．研究の目的と概要

「管理技術部門」では、長期利用する住宅スケルトンの健全性を効率的に確認するための診断技術と情報活用手法に関する研究開発を行う。新たな診断技術として構造ヘルスモニタリング（SHM：Structural Health Monitoring）に着目し、住宅における技術利用に向けて、技術システムの有効性に関する実験検証及び履歴情報として活用する手法等に関する研究開発を行う。

２．研究成果の概要

長期利用の住宅スケルトンに関しては住宅履歴情報の蓄積・管理と活用が図られることを前提とする。既に蓄積すべき住宅履歴情報項目に位置付けられている“技術者の目視等による劣化現象等”の「診断の記録」に加えて、“建築物の振動等の動的な特性”も経年による「状態変化の記録」として蓄積・管理・活用されるべきものとの立場から、構造ヘルスモニタリングに着目する。こうした観点から、長期の利用期間内における大規模な地震（極めて稀に発生する地震）の際に診断技術として利用するための技術的知見や、長期に渡って技術システムを運用し情報を蓄積・管理・活用するための知見を得ることを目的とし、下記の２つの視点から研究テーマを設定した。

- ①建築分野では、実際の建物で強振動時の有効性を示した例は未だ極めて少ないため、実大建物の加振実験を通じて技術の有効性を検証。
- ②長期の利用期間における管理・流通の場面を想定して、診断結果等の蓄積・管理や情報を活用する手法について研究。

研究成果を以下に取りまとめた。

１）構造ヘルスモニタリング技術の利用ガイドラインの提示

構造ヘルスモニタリング（SHM）は、情報通信技術および信号処理技術を利用することにより、構造物の損傷・劣化の状況を推定し健全性を診断する技術である。構造物の強振動（大規模地震・強風）や微小振動（風・中小地震・常時微動）の計測データから「振動特性」を推定し、その経時・経年変化等を踏まえ、構造物の損傷・劣化の有無・箇所・度合い等を把握するものである。部位に現れる現象（変形やひび割れ、中性化の進行等）を診断・把握し構造物全体への影響を推定する従来の手法とは逆のアプローチから、健全性の評価を効率化・高度化する診断技術として期待されている。

建築物への適用に関しては、基礎・応用研究から実用化・事業化の研究技術開発の段階にあり、建築会社や住宅メーカー等の一部において SHM システムの運用やサービス提供の事例がみられる。一方で、技術利用の目的、SHM システムにおけるセンサの種類・数、推定の精度、診断結果の表示方法など内容は様々であり、建築主が診断技術・情報提供サービスとして利用する手法が明確でない。

このため、長期利用の住宅スケルトンの健全性を効率的に確認する新たな診断技術として期待される構造ヘルスモニタリング技術の効果的な利用に向けて、関係主体の技術利用の効果等に関する共通

理解とシステム運用にあたっての留意点等の認識共有を目的として、「多世代利用住宅の管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン」を提示した。

ガイドラインの作成にあたっては、実大建物の加振実験を通じて確認された解析手法の有効性、センシング技術等の実用性、技術システムを実装した際の課題等を踏まえ、記述に反映した。

【研究成果】

「多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン」の提示

【成果の活用】

所有者・管理者の建物管理におけるスケルトンの状況把握

診断・情報提供サービス事業者のサービス内容説明

蓄積すべき住宅履歴情報項目への追記（技術の普及状況に応じて）

2) 一般向け技術解説資料の提示

建物管理への技術普及のために、建築の専門家でない一般の住宅所有者、建物管理者にも分かりやすく技術内容を伝える技術解説資料として、「Q&A形式」で、主要用語、SHM 技術の概要、SHM 技術の住宅所有者等への効果等に関する解説を作成する。

情報通信技術および信号処理技術に専門知識を持たない建築技術者を想定した「構造ヘルスマニタリング技術の用語集」を作成する（本報告書では掲載を省略）。

【成果】

「住宅における SHM 技術活用に関する一般向け Q & A 集」の公開

「構造ヘルスマニタリング技術の用語集」

【成果の活用】

一般の所有者・管理者への新たな診断技術に関する情報提供

診断・情報提供サービスを受用する際の「サービス内容」に関するリファレンス

蓄積すべき住宅履歴情報項目としての蓄積・活用の推奨

注)

ガイドラインの作成等にあたっては、次の先行研究、既往文献を参考にした。

○ヘルスマニタリング技術利用ガイドライン、日米共同構造実験研究、H15. 3

○コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術、土木学会、H19. 4

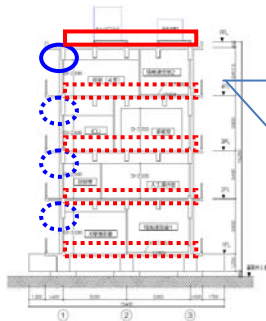
○モニタリングによる橋梁の性能評価指針（案）、土木学会、H18. 3

○橋梁振動モニタリングのガイドライン、土木学会、H12. 10

Ⅲ. 管理技術部門

■住宅の管理・流通における構造ヘルスマニタリング技術の利活用に関する検討

技術の実用化に向けた技術開発



<検討の視点>

- ・実構造物で技術の有効性を示した例が極めて少ないことに着目
- ・実大建物の加振実験データを用いて、加振前後の振動特性の変化や、損傷部位の推定に対する技術の有効性を検証。

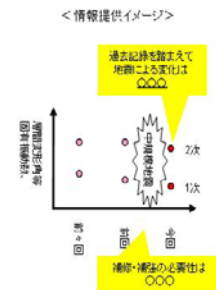
<検討内容>

- ・実大建物の加振実験における加振ケース（複数回の加振）を、建物の管理・流通段階における大小の地震を受けた場合と想定し、
 - ①実験実施機関（防災科研）が計測した加速度波形データを用いて、固有振動数の算定や損傷部位の推定について検討。
 - ②加速度波形データに加え、層間変位計のデータや構造設計の情報を含めた詳細な解析により、①で行った簡易な計測・解析の精度を検討。
- ・22年度は、同じ試験体の加振実験において、計測・解析システムを独自に設置し、技術の有効性を検証。

<ポイント>

- ・建物の完成後における、構造（スケルトン）の振動特性の経年変化と地震時や構造補強時の特性変化を把握する計測・解析技術の要件を検討。

管理段階における技術利活用



<検討の視点>

- ・経年における振動特性等の変化を、管理・流通時の情報活用に着目
- ・建物の所有者や利用者など、一般にも分かりやすい情報提供の方法と事業として成立しうるサービス提供の仕組みを検討。

<検討内容>

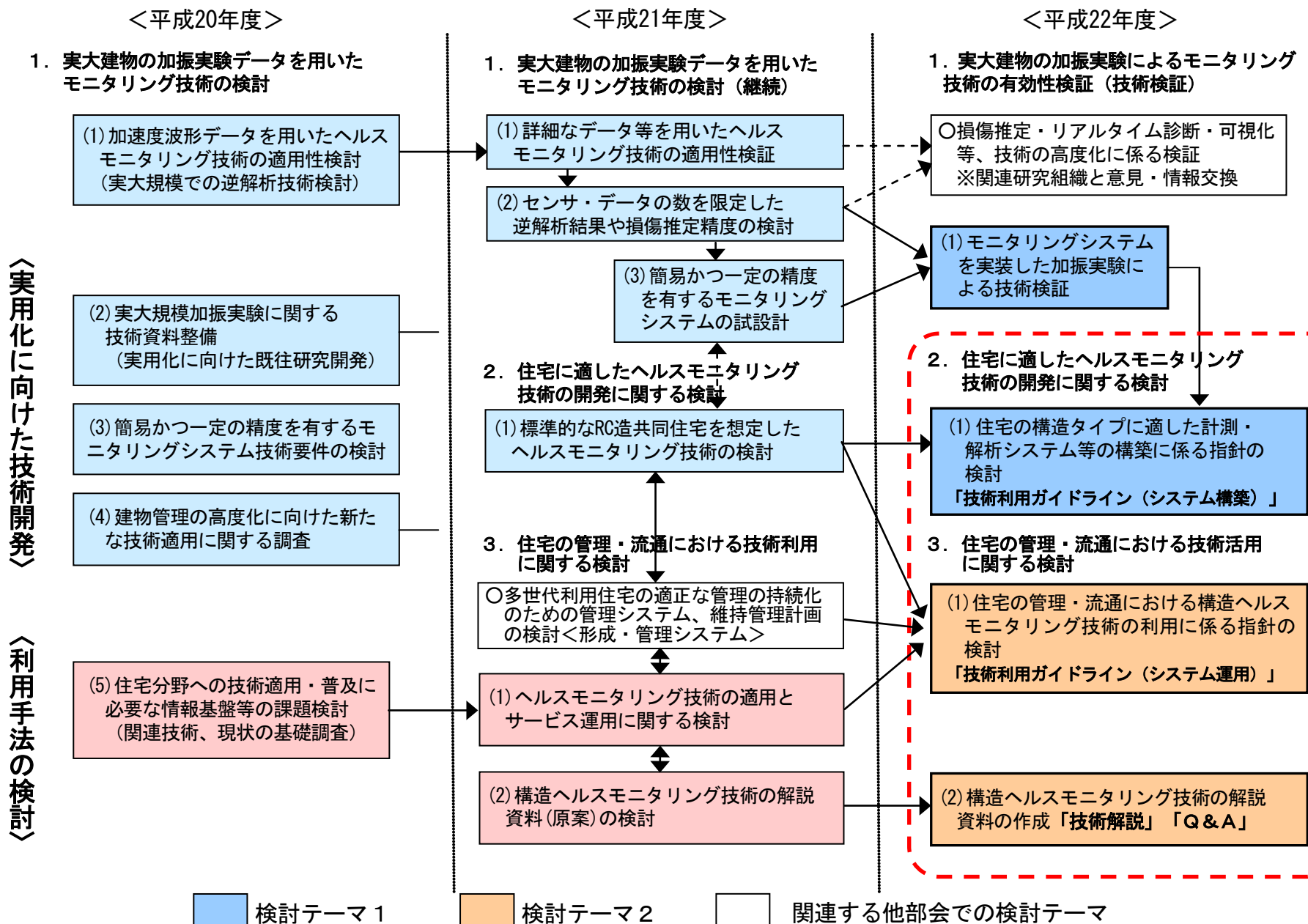
- ・住宅の管理・流通段階において、構造（スケルトン）の振動特性等の変化を定期的に診断・把握し、診断結果を建物管理や売買における履歴情報として利活用する手法を検討。
 - ①モニタリングの対象・目的と計測・解析システムの構成、情報提供の方法等について、適切な組合せを検討。
 - ②新たな技術である構造ヘルスマニタリングについて、一般にも分かりやすい技術資料を作成。

<ポイント>

- ・構造（スケルトン）の健全性把握と情報提供の高度化に向けて、定期的な計測・解析結果の情報利活用を検討。

○地震時を想定した実大建物の加振実験による技術検証を踏まえ、経年と地震による振動特性等の変化を把握し、分かりやすく情報提供する構造ヘルスマニタリング技術利活用に係る指針・基準、実現手法を示し、ガイドラインとして公表。

■「管理技術部門」の研究年次計画・研究テーマの関連



3. 主な研究成果

多世代利用住宅の管理・流通を支える構造ヘルスモニタリング技術の 利用ガイドライン目次構成

1) 目的

長期利用の住宅スケルトンの健全性を効率的に確認する新たな診断技術として期待される構造ヘルスモニタリング技術の効果的な利用に向けて、関係主体の技術利用の効果等に関する共通理解とシステム運用にあたっての留意点等の認識共有を目的として、「多世代利用住宅の管理・流通を支える構造ヘルスモニタリング技術の利用ガイドライン」を作成し、公表する。

○目的：

技術利用の効果等に関する共通理解とシステム運用にあたっての留意点等の認識共有

○対象：

建物の上部構造（基礎構造は対象外）。
主に RC 造共同住宅と木造戸建て住宅を想定

○利用者：

所有者・管理者（第1章、第2章）
建築技術者（3章全て）

2) 目次構成

第1章、第2章は、構造ヘルスモニタリング技術（以下、「SHM」という。）の共通理解のため、概要、基礎的事項を記述している。

第3章は、目的に即して具体的な技術システムを構築・運用するにあたっての機能要件、留意点等を記述している。主に、診断・情報提供サービスを担う主体を想定している。

多世代利用住宅の管理・流通を支える構造ヘルスモニタリング技術 の利用ガイドライン（目次）

第1章 総則	
1.1 本書の適用範囲	1
1.2 本書で取り扱う SHM の対象範囲	1
1.3 本書の構成	6
1.4 関連用語	7
第2章 構造ヘルスモニタリングに関する基礎的事項	
2.1 構造ヘルスモニタリング（SHM）の概要	13
2.2 SHM の特徴	
2.2.1 SHM のメリット	18
2.2.2 建物ライフサイクルにおける SHM 利用場面	19
2.3 SHM によるデータ計測と評価の考え方	
2.3.1 データ計測のタイミング	22
2.3.2 推定のレベル	23
2.3.3 損傷指標とセンサ計測量の関係	24
2.4 建物管理における SHM サービスの利用	
2.4.1 SHM サービスの形態の明確化	25
2.4.2 サービスの項目と内容	30
2.5 SHM の設計	39
第3章 SHMの構築・運用	
3.1 データの取得	
3.1.1 センサの種類の選定	45
3.1.2 センサの性能の設定	47
3.1.3 センサの設置箇所・数の決定	47
3.1.4 センサデータの伝送方法の決定	49
3.1.5 センサの実装	49
3.1.6 計測条件の設定	50
3.2 状態の推定	
3.2.1 データの前処理	51
3.2.2 推定手法の選定	51
3.2.3 モデル構造の選択	53
3.2.4 モデルパラメータの推定	54
3.2.5 モデルの妥当性検証	55
3.2.6 損傷指標の推定	55
3.3 診断	
3.3.1 診断の考え方の整理	57
3.3.2 管理指標の設定	58
3.4 診断情報の提供	61
3.5 SHM 情報の蓄積・管理	
3.5.1 システム概念図の整理	65
3.5.2 サーバ構成	66
3.5.3 データモデル	67
3.5.4 アクセス制御	72
3.5.5 セキュリティ対策	73
3.5.6 情報の保管・継承・削除等の基本ルール	73

3) ガイドラインのとりまとめにあたっての主な論点

(1) 対象範囲の設定について

①使用性（サビサビリティ）の評価

・ガイドラインでの記述

本書で取り扱う SHM は、建築分野の中でも特に住宅を対象とし、長期利用する住宅の維持管理・流通を支える技術として位置づけている。そのため、構造性能としては「安全性」「耐久性」に加え、「使用性（サビサビリティ）」の評価に資する技術として記述している。（1.2 本文）

・考え方

住宅の長期利用に伴い、災害発生の有無に関らず、建物のたわみ・傾斜・破損・床面の凹凸等が発生し、使用性（サビサビリティ）が低下する。こうした現象は、微小振動（風・中小地震・常時微動）に対する建物応答性状にも影響してくることが考えられる。形状等の静的な変化は、既存の検査技術によって捉えることができるが、振動特性の動的な変化については、SHMによって計測・評価が可能となる。（同、解説）

従来の診断では検知されにくい変化を、計測を続ける中で検知できることから、SHM の特徴として、「使用性（サビサビリティ）」の評価を扱うこととした。

②S 造・木造等、及び、基礎構造の扱い

・ガイドラインでの記述

一般に「構造」ヘルスマニタリングは、建築物の主要構造部を対象とした損傷・劣化の診断技術であり、建築設備の分野で行われているモニタリングとは区別される。適用対象とする構造種別（RC 造・S 造・木造等）やシステムの導入時期（新築・既存）は問わない。

本書で取り扱う SHM は、基礎杭等の下部構造ではなく、上部構造の損傷・劣化の評価を目的としている。また、戸建て木造住宅や RC 造共同住宅を主な適用対象として想定している。（1.2 本文）

・考え方

一般に、SHM は、構造物の計測データから「動的な変化」を捉え、その経時・経年変化から、構造物の損傷・劣化の有無、箇所、度合い等評価する技術であり、長期利用の中で、振動特性の動的な変化を計測・評価する。時間軸で初期状態からの特性変化を自己比較する観点では、構造種別や導入時期を問わず適用できる共通する技術とした。

基礎杭等の下部構造については、研究レベルでは有効性がいわれているものの、実際の建物ではシステムの運用が困難なため、本書の対象から除外している。

また、本書は、別途実施した中層 RC 造実大建物の加振実験を通じて得られた技術知見に即して記述しているが、戸建て木造住宅についても、実際に診断等のサービスを提供している事業者が存在すること、木造住宅を対象とする研究報告も多数発表されていることから、これらを調査・参照し、対象に含めている。

実大建物の加振実験を通じた技術の有効性検証

1) 研究の目的

新たな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、実際の建物で強振動時の有効性を示した例が極めて少ない。本研究では、実大建物の加振実験を通じて、多世代利用住宅がその長期の利用期間内において大規模な地震（極めて稀に発生する地震）に遭遇した際の、建物の強振動時（強い地震動等が入力された場合）における診断技術としての有効性を実験検証する。

実験検証を通じて得られた技術的知見に基づいて構造ヘルスマニタリング技術の利用に関するシステム構築、運用における機能要件、留意事項等を整理し、技術利用のためのガイドラインに反映する。

なお、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（防災科研）が、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）を締結し実施するものである。加振実験は、防災科研 兵庫耐震工学研究センター（E-ディフェンス）が実施した。

2) 研究内容と成果の概要

実大建物の加振実験は、中層 RC 造建物の実大規模構造物を用いた一連の加振実験のうち、平成 20 年度、平成 22 年度の耐震実験（基礎を震動台に固定した実験）における大規模地震波加振を対象とする。

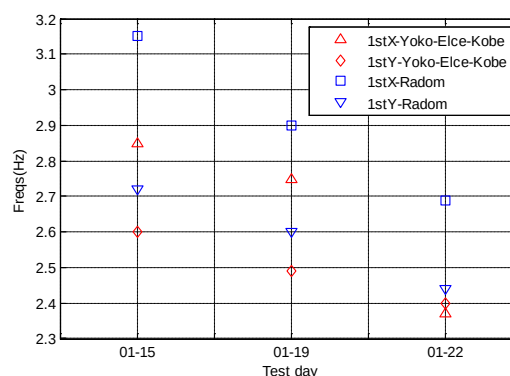
平成 20 年度は、構造ヘルスマニタリングのプロセスの内、データ取得は防災科研が設置したセンサの記録とし、損傷状態の推定と診断に関する逆解析手法の有効性の検証を行った（図 1.3）。平成 22 年度は、データ取得から逆解析、診断結果の提供、履歴管理にいたるプロセスの全てを通して行う、一連の技術システムの有効性・実用性を検証した（図 1.4）。

（1）平成 20 年実験を通じた技術検証

建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、3つの解析手法により振動特性を検討し、固有振動数の変化の状態が把握されることを確認した。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）を表 1.1 に示す。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。

表 1.1 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	国土技術政策総合研究所
ARX モデルに基づく固有振動数の推定	(株)三菱総合研究所
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



平成 20 年度、平成 22 年度の加振実験における SHM システムの枠組み

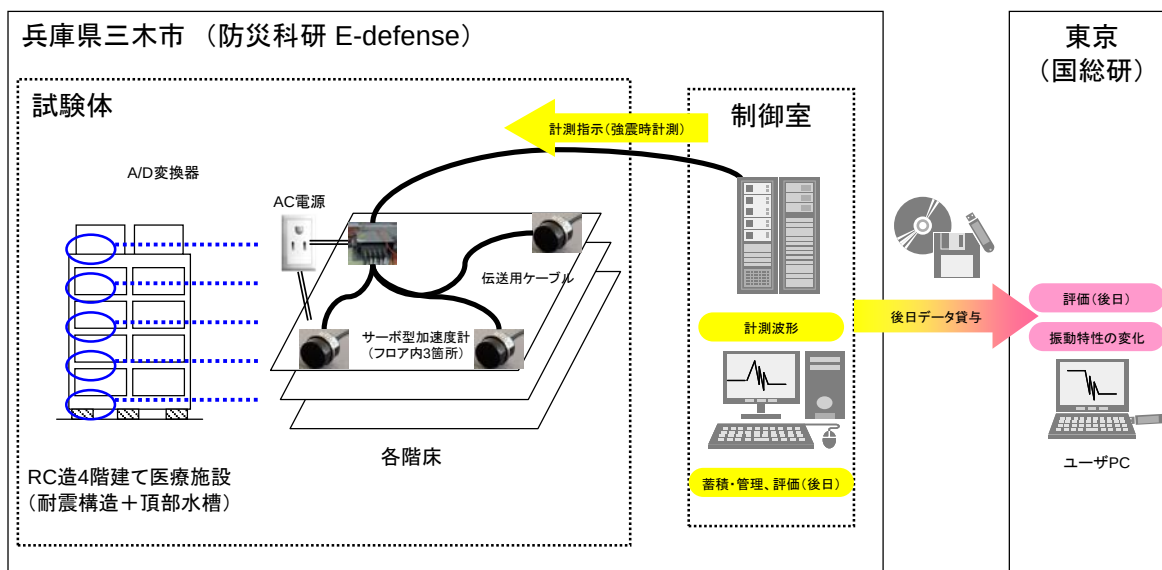


図 1.3 平成 20 年度に行われた防災科研 E-defense 実験における
国総研との共同研究に基づく検証の枠組み

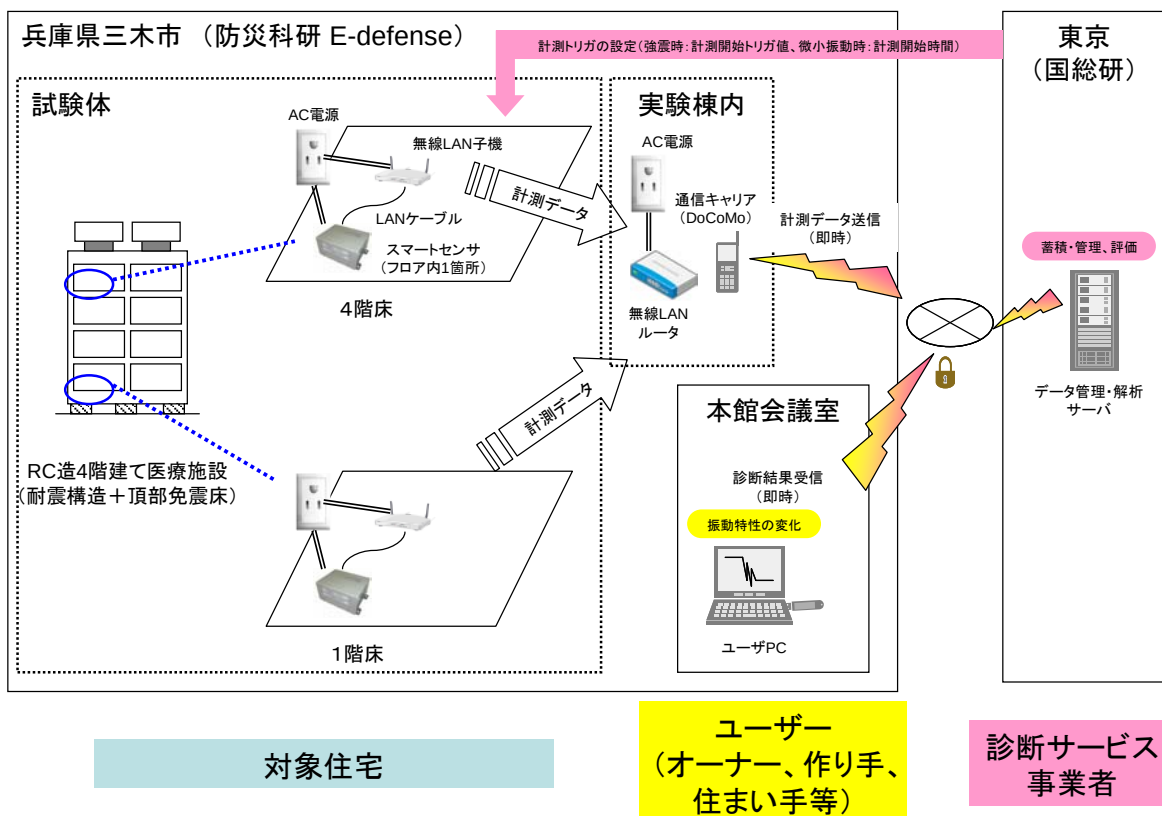


図 1.4 平成 22 年度に行われた防災科研 E-defense 実験における
国総研との共同研究に基づく検証の枠組み

（２）平成 22 年実験を通じた技術検証

平成 22 年度実験では、防災科研が加振実験のために設置したセンサによらず、国総研が仮想的な診断・情報提供サービスの提供者の立場で、一般にも利用可能なSHMシステムを実装し、技術システムとして実用性を検証した。

①仮想 SHM サービスの形態

「計測のタイミング」及び「推定のレベル」の 2 つの観点から、SHM サービスの形態を模擬し、検証を行った。サービスの項目と内容は、「多世代利用住宅の管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン（素案）」の、SHM サービスの項目・内容に基づく表現としている。今回の技術検証の位置づけを確認した（表 1.2）。

【強振動時】 強振動の把握 に基づき 全体レベル の評価を行う SHM サービス
 【平時】 微小振動の把握 に基づき 全体レベル の評価を行う SHM サービス

表 1.2 SHM サービスの項目・内容と本検証の位置づけ

サービスの項目		サービスの内容
A データの取得	データはいつ計測するのか？	☒ 被災時計測 ☒ 定期計測 ☒ 被災後計測
B 状態の推定	対象建物のモデル特性についてどのレベルまで推定できるのか？	☒ 全体 ☐ 層 ☐ 部材
C 診断	推定結果をどのような考え方にに基づき解釈するのか？	☒ 自己評価 ☐ 相対評価
D 診断結果の提供	ユーザに対してどのような情報を提供するのか？	☒ 基本情報 ☒ 被災直後の安全行動の支援情報 ☐ 被災後の安心情報 ☐ 判断・対応の支援情報 ☐ 使用性に係る情報 ☐ その他
E SHM 情報の蓄積・管理	記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限はどうなっているか？	

- A センサの計測開始条件をサーバ側で設定することにより、強振動及び微小振動の双方の計測を可能とするため「被災時計測」「定期計測」「被災後計測」を対象とした。
- B 推定のレベルとしては、必要最低限のセンサを用いて「全体系」を対象とした。
- C 診断の考え方は、強震・強風を受ける前後で推定結果を比較する「自己評価」を基本とした。

D 情報提供内容としては、スマートセンサによる計測データ、伝達関数等の「基本情報」に加え、被災直後に固有振動数等の指標の推定結果を迅速に情報提供可能であるかどうかを検証した。

実験を通じ、大きな地震入力を受けた建物の全体系の損傷評価、及び2地点間の迅速な情報提供が成立しうることが確認された。以下、実験結果の一部を示す。

②データ計測の検証

i) 強振動時におけるデータ計測の検証

強振動時（JMA 神戸波入力時）は、1 階床のスマートセンサで、X,Y,Z 方向のいずれかで 50gal を超えた場合に計測を開始し、その 10 秒前から 3 分間のデータをセンサゲートウェイへ伝送する仕組みとした。JMA 神戸波入力時、図 1.5 に示す通り、1 階 Y 方向でトリガ値を超えた 10 秒前からのデータが正常に計測・収録されており、4 階床のセンサも含め、センサゲートウェイに伝送されたことを確認した。

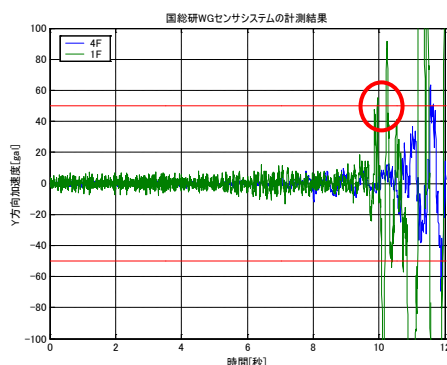


図 1.5 強振動時におけるデータ計測の検証結果

ii) 微小振動時におけるデータ計測の検証

微小振動時（JMA 神戸波入力の前後、E-defense 施設の油圧印加・非加振状態）については、時刻指定による計測開始トリガをかける仕組みとした。センサゲートウェイ側で NTP サーバとの時刻合わせを 10 分おきに行っており、この場合においても、指定日時に併せて正常に計測が行われることを確認した（図 1.6）。

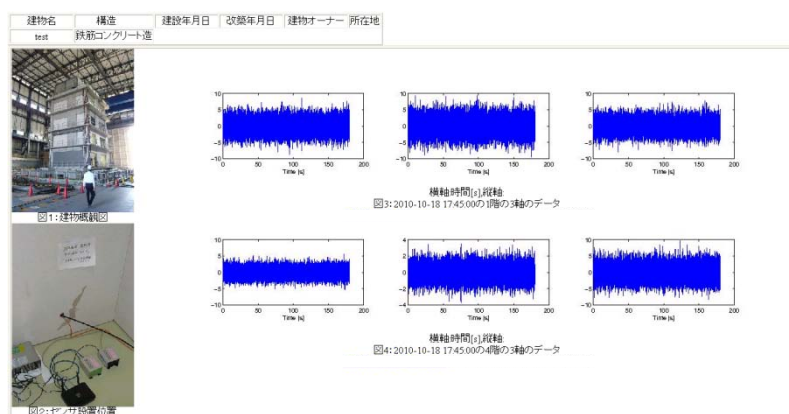


図 1.6 微小振動時におけるデータ計測の検証結果

③強振動時におけるデータ解析の検証

スマートセンサにより計測されたJMA 神戸波加振時の1階X方向（入力）・4階X方向（出力）加速度データに基づく、伝達関数の算出結果を示す。1.7Hz 付近に1次のピークが認められる。（図 1.7 は、10.805[s]～45.805[s]の主要動約 35 秒間のデータを全て使用したもの）

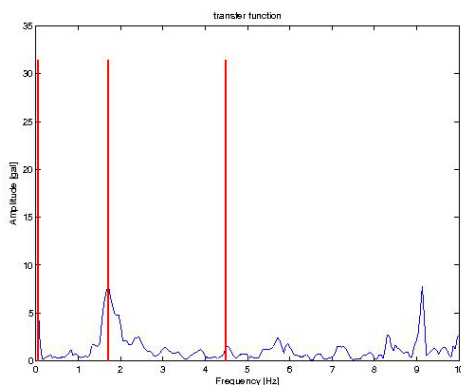


図 1.7 10/18 JMA 神戸波 100%入力時における X 方向伝達関数

部分空間法によるモーダルパラメータの推定結果を図 1.8 に示す。推定された極情報からモードを自動推定するシステムのため、表に掲載されたパラメータは必ずしも正しく抽出されていない。グラフ上は 1.7Hz 付近に 1 次のピークが認められる。

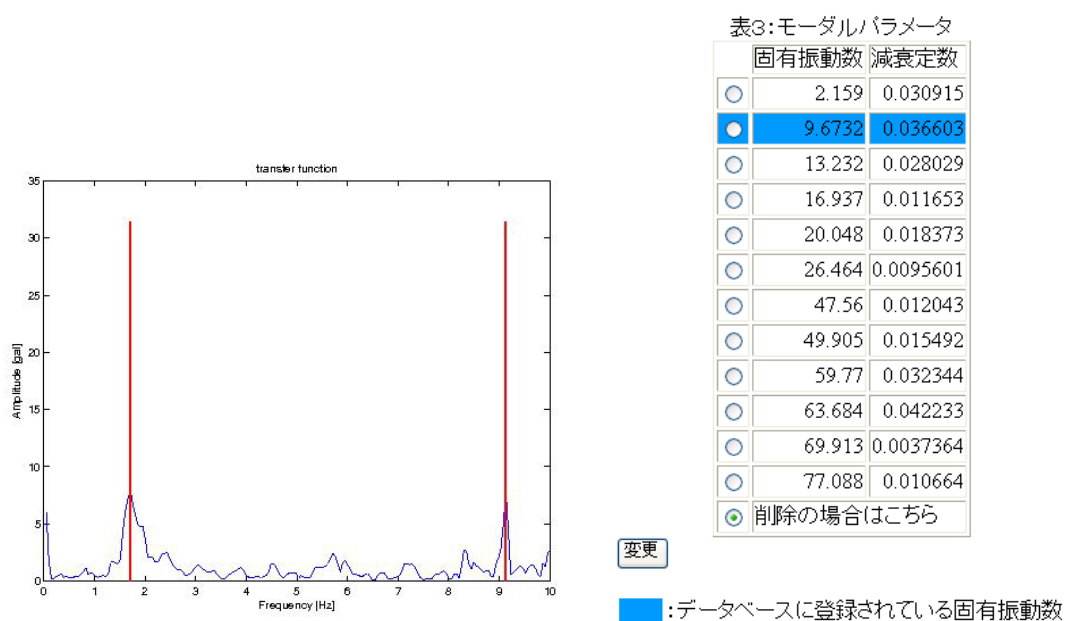


図 1.8 部分空間法によるモーダルパラメータの推定結果

3) 実大建物の加振実験を通じた SHM 技術の到達点と課題

構造ヘルスマニタリング技術の利用に関するシステム構築、運用における機能要件、留意事項等に関して、実験検証を通じて得られた知見を以下に示す。

凡例：SHM の技術的な到達点（●）と課題（▼）

（1）強振動時（大規模地震、強風等）

●応急危険度判定に代わるサービスとして提供できること

→実験において、遠隔地での診断、結果のフィードバックが実現可能なことを実証。また、診断技術者による被災度判定のためのひび割れ等の計測・診断との結果の整合性を確認。

▼確実な稼動を担保すること

→人命に係るサービスを提供することになるため、センサを多数設置して冗長性を確保すること、通信環境の確認、センサの稼動状況の確認、キャリブレーション等について定期的に行う仕組みが重要。

（2）微小振動時（中小規模地震、風、常時微動）

●動的な変化を捉えるパラメータを高い精度で推定できること

▼推定結果の解釈の仕方を明確にすること

→固有振動数等のモーダルパラメータがどの程度低下した場合に、補修・補強等を検討すべきかについて、実測データに基づく知見が不足している。

→SHM による記録は、センサデータだけでなく、技術者の目視による結果も併せて蓄積・管理し、実現象と照らし合わせて効果的な知見が蓄積されるような仕組みが必要。

→データは所有者のものであることが基本だが、情報を匿名化し、二次活用者も含めて限定的に閲覧できるような共通基盤の構築も検討を要する。

▼推定結果の位置づけを明確にすること

→自ら設計・施工した建物の確認を目的とした、微小振動時の SHM 利用のニーズがある。

→一般ユーザを含めて広く SHM が普及していくには、微小振動時の評価結果が建築構造物の要求性能の中でどのように位置づけられ、建物の管理・流通段階において自らの建物の状態を説明するパラメータとして活用できるか、明確にする必要がある。

（例）固有振動数等のモーダルパラメータと使用性（サービスバリティ）

（3）強振動時・微小振動時に拠らず共通

●小型で高精度なセンサ、高精度な推定手法、大容量のデータ管理等の技術は成熟しつつある

▼センサシステムの初期コスト・運用コスト

▼利用目的やニーズに即したサービスの項目・内容の考え方が曖昧

▼一般の利用者向けの分かりやすい情報提供

▼データベース構造の標準化、共通基盤の整備

Ⅲ－２． 住宅の管理流通における SHM 技術の利用等に関する検討

構造ヘルスマモニタリング（以下、「SHM」という。）技術を多世代利用住宅の維持管理・流通に有効利用していくうえで必要となる方策について、継続的なシステム運用、診断結果の表現・提供方法という２つの側面から検討した。

検討結果に基づいて、長期利用の住宅スケルトンの健全性を効率的に確認する新たな診断技術として期待される構造ヘルスマモニタリング技術の効果的な利用に向けて、関係主体の技術利用の効果等に関する共通理解とシステム運用にあたっての留意点等の認識共有を目的として、「多世代利用住宅の管理・流通を支える構造ヘルスマモニタリング技術の利用ガイドライン」（案）をとりまとめた。

１． 継続的な SHM システム運用に関する課題等の調査

長期に渡る住宅の管理・流通における技術利用に向けて、継続的な SHM システムの運用が成立するための要件・課題等を検討した。

手順としては、まず、多世代利用住宅の維持管理や流通における SHM 情報の利用場面を想定し（1. 1）、より具体化するために SHM サービスの考え方を整理した（1. 2）。

次に、SHM による計測の目的及び情報利活用のタイミングと関係が深いと考えられる既往管理システムについて分析し、その一部について、対象とする情報の項目及び管理方法、当該システムが成立している背景要件あるいは普及の阻害要因となっている事項を整理した（1. 3）。これらを援用する形で、継続的な SHM システムの運用が成立するための要件・課題等について検討した（1. 4）。

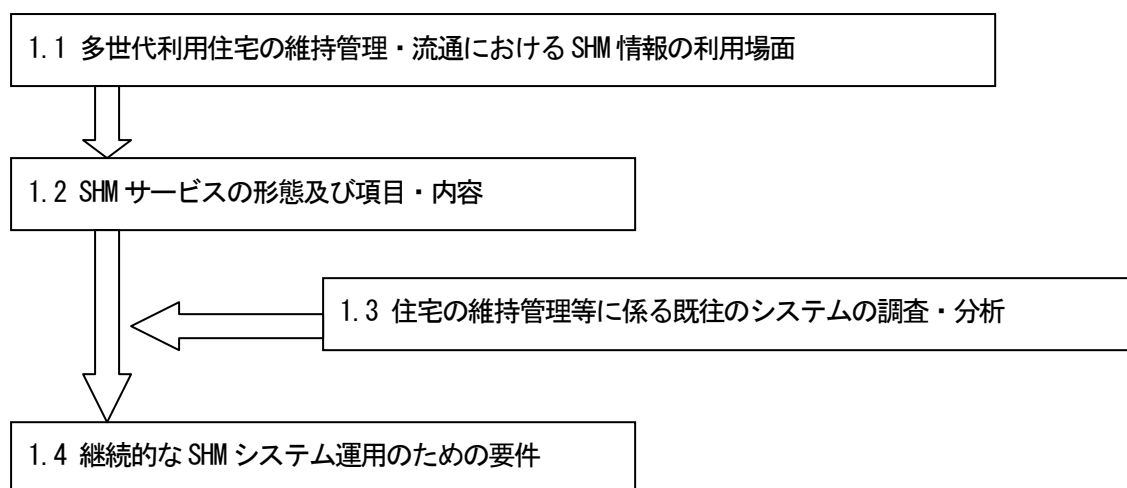


図 2.1 継続的な SHM システム運用に関する課題等の調査フロー

1.1 多世代利用住宅の維持管理・流通における SHM 情報の利用場面

本項では、1) 建物ライフサイクル、2) SHM のメリット、3) 関係主体の整理を踏まえて、4) 多世代利用住宅の維持管理や流通における SHM 情報の利用場面を検討した。

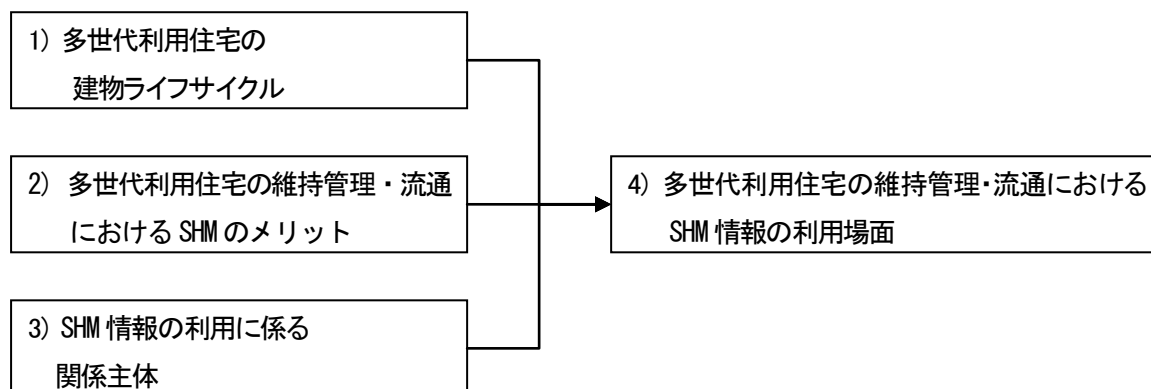


図 2.2 SHM 情報の利用場面に係る検討フロー

1) 多世代利用住宅の建物ライフサイクル

多世代利用住宅の建物ライフサイクルに関しては、過年度の管理技術 WG における検討経緯を踏まえ、表 2.1 の通り整理した。

住宅の利用期間が長くなることによる特徴的な部分としては、特に F 災害、G 売買、H 用途変更等といった場面が多く発生する点にある。

表 2.1 建物ライフサイクル

区分	説明
A 設計	住宅を企画し設計すること。
B 施工・引渡し	設計に基づき住宅を施工し、所有者に引き渡すこと。
C 販売	分譲住宅であればディベロッパーが区分所有者に販売すること。 賃貸人が賃借人に部屋を賃貸すること。
D 建物管理	住宅を所有者が維持管理・利用すること。 あるいは所有者からの委託を受けて管理会社が建物を維持管理すること。
E 修繕・補強	長期修繕計画に従って住宅を修繕する、または補強すること。
F 災害	住宅が強振動(大規模地震・強風等)を受け災害に遭うこと。 住宅を長期利用する中で、災害に遭遇する確率は中規模、大規模の2パターンが想定される。
G 売買	所有者が別の所有者に譲渡すること。 住宅を長期利用する中で、所有者が変わる場面が想定される。
H 用途変更等	住宅を長期利用する中で、変化するニーズに合わせて用途変更・増築等を行うこと。
I 使用中止・建替え	所有者が住宅の使用中止を決定し、建替えを行うこと。

2) 多世代利用住宅の維持管理・流通における SHM のメリット

まず、SHM 技術の普及・利用が進むことによって多世代利用住宅の維持管理・流通にどのようなメリットが考えられるか、平時（建物管理）、災害時、流通段階の3つに分けて、以下の通り整理した。

(1) 建物の維持管理の高度化・効率化

建物には、使用期間中において健康状態を把握し、適切な時期・方法により補修や補強を実施することが求められる。現状では、技術者による定期的な目視点検が行われているが、例えばひび割れや亀裂が被覆材等により視認できない場合等では評価が困難であり、自動化、高精度化、コスト削減等の要求が大きくなってきている。

SHM によって微小振動（風・中小地震・常時微動）のデータを計測・評価することで、ひび割れや亀裂が被覆材等により視認できない場合においても、建物内部に発生・進展している損傷を推定可能である。また、ひび割れや亀裂が外観から確認できる場合においても、それが構造上どの程度の影響を有しているかについて、評価することができる。

このように、SHM によって目視点検を代替あるいは併用することで、維持管理の高度化・効率化が図られるといった利点がある。

(2) 災害時における建物の継続使用可否の迅速な判断、安心情報の提供

所有者や居住者にとっては、大規模地震等の災害発生時において建物が継続して使用可能であるか、避難の必要性があるかどうかが関心事となる。技術者が被災後点検や応急危険度判定を行う現状の仕組みでは、大規模地震が発生した場合には、こうした技術者のリソースが不足し、情報が得られるまでに時間がかかる可能性がある。

災害時に加力状態にある建物の振動を計測・評価することで、技術者による応急危険度判定に代わり、迅速な情報提供が可能である。また、災害発生前後の微小振動（風・中小地震・常時微動）のデータを計測・評価することで、大きな変化がないことが分かれば、所有者にとって安心情報としての価値がある。

このように、SHM の利用によって、建物の継続使用可否の判断や情報提供が迅速に行われるといった利点がある。

(3) 建物の動的な性能の評価結果が蓄積・管理されることによる健全で合理的な流通への寄与

住宅を長期利用していく中で、所有者同士の取引が行われる機会が想定される。

実測データに基づく建物の性能（安全性、耐久性、使用性（サービサビリティ））の評価結果が継続的に蓄積・管理されていることは、流通の場面において、買い手にとっての判断材料となるとともに、データに基づく納得性の高い価格形成が可能となることや、売り手にとっては優位性につながるといったメリットがある。

例えば住宅履歴情報の項目の1つとして、SHM による動的な評価結果が継続的に蓄積・管理されるようになれば、健全で合理的な流通市場の形成に寄与すると考えられる。

3) SHM 情報の利用に係る関係主体

SHM 情報の利用に係る関係主体は、「SHM 情報は所有者のもの」という基本的な方針の下、複数の関係者層を意識しながら、表 2.2 の通り整理した。

所有者による SHM 情報の管理を支援する主体としては、SHM サービス事業者や管理会社が考えられる。また、SHM 情報の二次利活用者として、設計会社、施工会社、生活関連サービス事業者、公的機関等が考えられる。

表 2.2 SHM 情報の利用に係る関係主体

区分	説明
所有者 (オーナー)	住宅の所有権を有する者。分譲住宅であれば管理組合、持家であれば個人、賃貸住宅であれば賃貸人が該当する。引渡し前の段階におけるディベロッパー等もこれに該当することとした。
SHM サービス事業者	SHM システムの構築・運用を通じて、所有者による SHM 情報の管理を支援する事業者。一部の企業で既に SHM に係るサービスの提供が開始されているが、今後の可能性として、様々な関係者において新たにサービスを開始することが考えられる。例えばセンサ会社、建設会社、建物診断事業者、システムインテグレータ、Web サービス事業者等。
管理会社	所有者の資産管理を支援する者。今後の可能性として、対象建物内で SHM システムの運用を担う事業者として関係することも考えられる。 例えばアフターサポートを行う建物管理会社、不動産仲介事業者等。
設計者	住宅の設計業務に携わる者。 例えば設計会社、総合不動産会社の企画・開発部門等。
施工者	住宅の施工業務に携わる者。例えば工務店、建設会社等。
生活関連サービス事業者	居住者の安心・快適な生活環境を確保するためのサービスを提供する事業者。今後、SHM 情報の二次利活用者として関係する可能性が考えられる。 例えば家電機器メーカー、電力・ガス・水道等のライフライン事業者、警備会社、保険会社等。
公的機関	SHM 情報の利用に中立的な立場から関係する。 例えば官公庁、自治体、研究機関等。

4) 建物ライフサイクルにおける SHM 情報の利用場面

1) ～ 3) で整理した内容を援用し、建物ライフサイクル、関係主体、メリットのそれぞれの対応関係を明らかにするため、まず下図に示す通り、建物ライフサイクルの中で SHM 情報が利用される場면을、①新築フェーズ、②維持管理フェーズ、③災害フェーズ、④流通フェーズに区分した。

そして、4つのフェーズごとに、関係主体の立場からみた SHM 情報の利用場면을整理した。

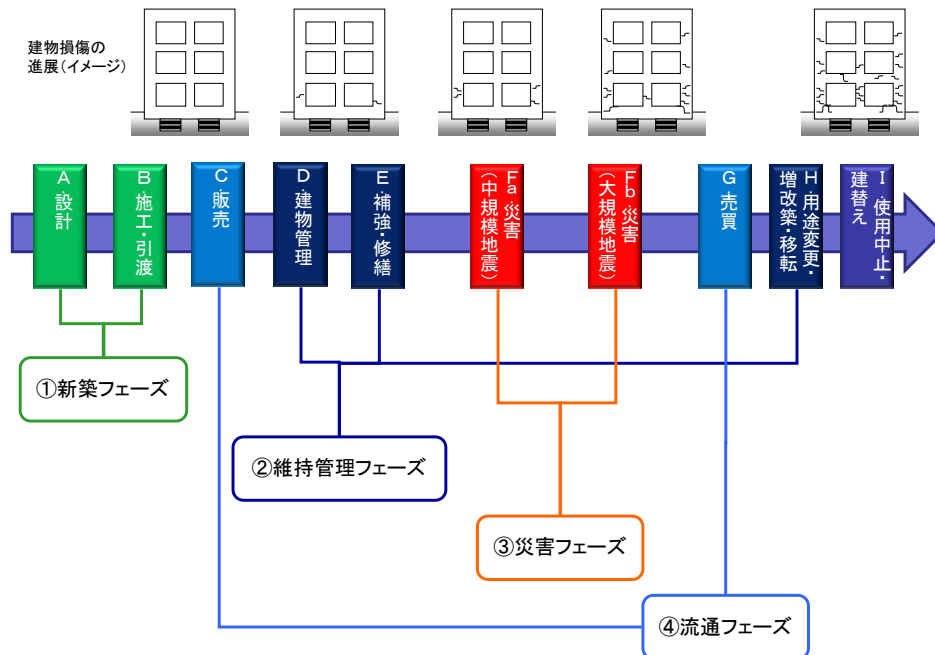


図 2.3 建物ライフサイクルにおける SHM 利用場面の区分

①新築フェーズ：A設計、B施工・引渡し

- 設計通りにできているかの確認に活用できる。
- 竣工後検査において、目視だけでなく実測データで大丈夫と言えれば価値になる。
- 実測データに基づく評価を示すことで、構造性能の説明において透明性が向上する。

②維持管理フェーズ：D建物管理、E補強・修繕、H用途変更

- 構造性能の経年変化を把握する新しい仕組みとしての普及が期待される。
- 修繕時期の予測、積立金の説明等への活用が期待される。
- 従来の目視情報を代替・補完し、維持管理の高度化・コスト削減が実現する。
- 図面情報等が存在しない建物モデルの構築が可能となる。
- 住戸内(専用部分)に立ち入ることなく劣化診断を行うことができる。
- 室内の環境振動の原因特定において活用が期待できる。
- 免振振デバイスの適切な時期による点検・交換が可能となる。
- 計測・評価データの共通的基盤があれば劣化メカニズムの解明に役立つ。
- 用途変更等の際にそれが構造上問題のない範囲であるかの確認に活用できる。

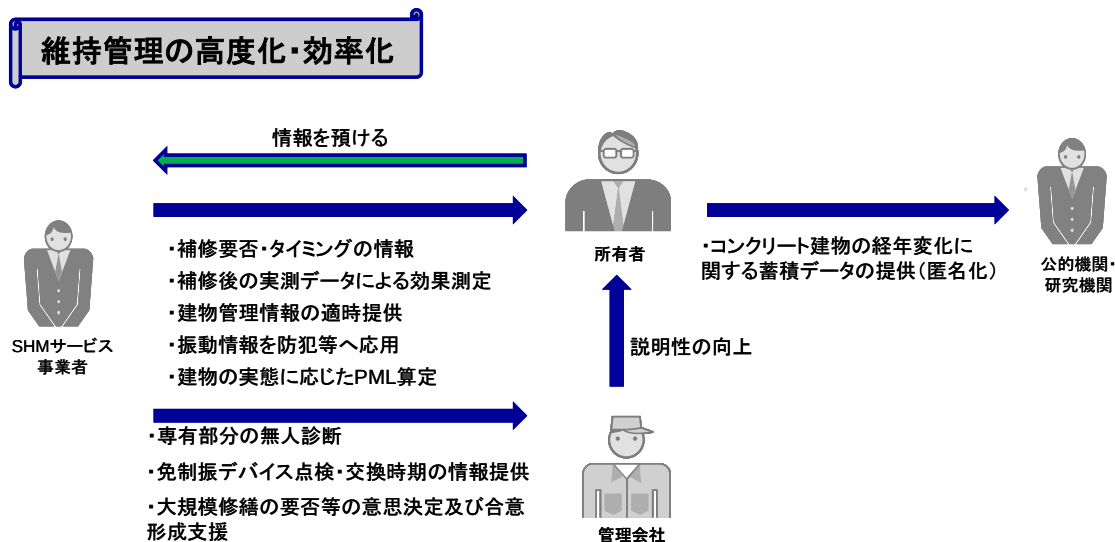


図 2.4 「維持管理フェーズ」における SHM 利用場面

③災害フェーズ：Fa 中規模地震、Fb 大規模地震

- 建物の継続使用可否について即時の情報提供が可能となる。
- 被災時または被災後の評価で構造上変化がないと分かれば、安心情報を提供できる。
- また、高層階居住者にとっては避難する手間が省ける。
- 一旦避難を行った後、建物内に戻ってよいかどうかの判断に役立つ。
- 被災後の補強・修繕の要否の説明や、その後の効果測定に活用できる。
- 応急危険度判定に係る人員不足の解消につながる情報を提供する。
- 災害時の面的な被害状況を迅速に把握でき、迅速な復旧支援につながる。
- 評価結果を踏まえ、被災影響を考慮した建物モデルの更新が可能となる。
- 災害時の実測データ及び評価結果を踏まえ、地震保険の料率算出の精度向上や見直しに役立てられる可能性がある。

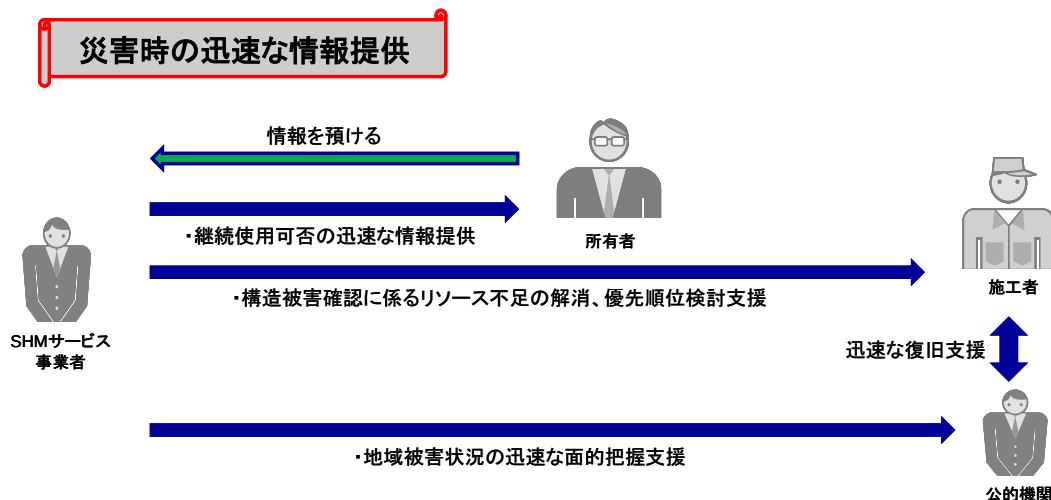


図 2.5 「災害フェーズ」における SHM 利用場面

④流通フェーズ：C販売、G売買

- 取引時の判断材料として、構造性能の経年変化が得られていることが価値になる。
- 安全性や耐久性だけではなく使用性（サービサビリティ）に関する情報提供を通じて、所有者にとっての情報価値を高めることができる。
- 防犯・省エネ等を目的としたセンシングや、そのデータを活用した様々な生活関連サービスと組み合わせることにより、建物の付加価値を高めることができる。
- 構造性能に関する情報の非対称性を解消し、建物価値を適正に評価する市場の形成に役立つ可能性がある。

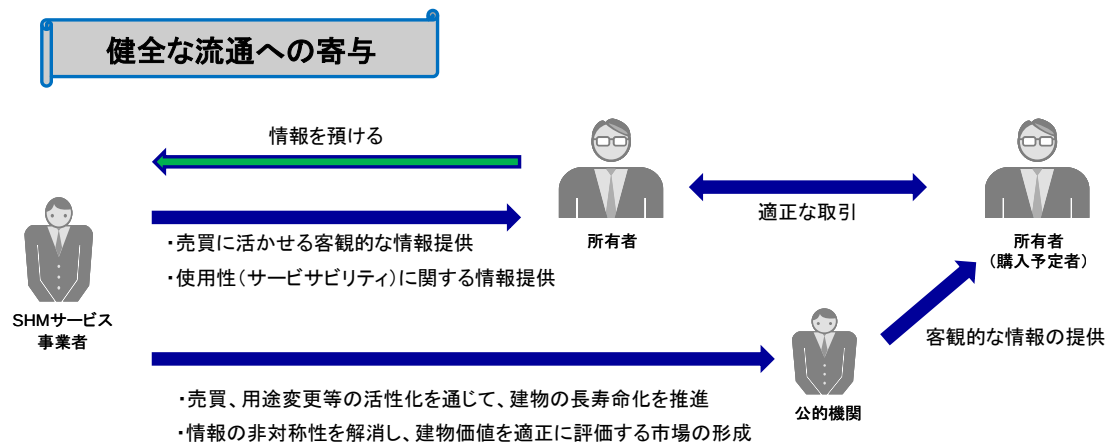


図 2.6 「流通フェーズ」における SHM 利用場面

⑤ その他：I 使用中止・建替

- 耐用年数が過ぎた建物も「まだ使える」ことが分かればそれが価値となる。

1.2 SHMサービスの形態及び項目・内容

前項では、多世代利用住宅の維持管理・流通における SHM 情報の利用場面を整理したが、ユーザに提供するサービスは、SHM の利用目的によって大きく異なるため、利用目的に即した SHM サービスの考え方をより具体化しておく必要がある。

そこで本項では、1) 2) で SHM による計測及び評価の基本的考え方を示した後、3) 利用目的に応える SHM サービスの形態、4) 当該サービスを構成する項目・内容について整理する。

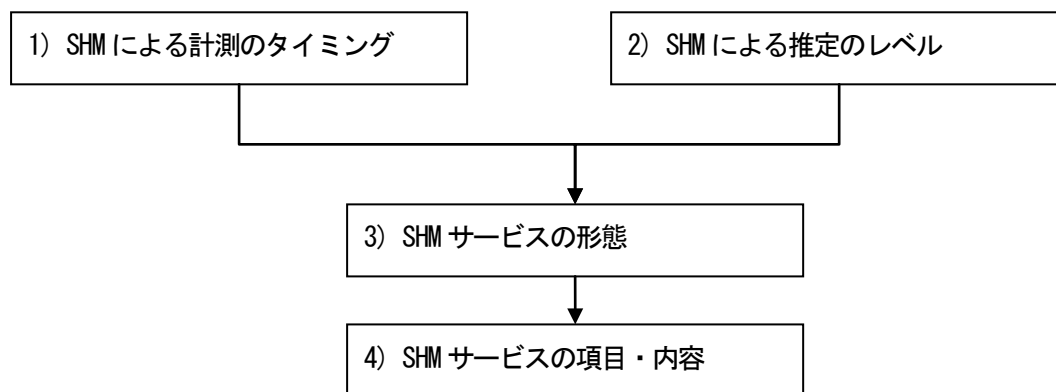


図 2.7 SHM サービスの形態及び項目・内容に係る検討フロー

1) SHM による計測のタイミング

SHM では、建物の性能を長期にわたり維持していくために、以下のような3つのうち何れかのタイミングにおける計測が行われる。

- 定期計測： 損傷・劣化の発生や進展状況を定期的に捉える
- 被災時計測： 災害時の損傷進行過程を追跡する
- 被災後計測： 災害直後に計測し損傷状況を捉える

竣工後の建物の安全性能や耐久性能は、経年劣化により徐々に低下すると考えられる。また、大規模地震を受けるとそれらが急激に低下するとともに、被災後は、経年劣化の進行速度が促進されることが考えられる。

建物の構造性能を長期にわたり維持していくためには、損傷・劣化の進行を定期的に追跡する「定期計測」、災害時の損傷進行過程における「被災時計測」、および災害発生後の「被災後計測」を適切に組み合わせ、建物の状態の推移を継続的にモニタリングすることが必要になる。その結果、もし許容性能レベルに近づくか下回るようなことがあれば、即座に補修や補強などを行い、要求性能を維持し続けるための対策を講じることが要求される。

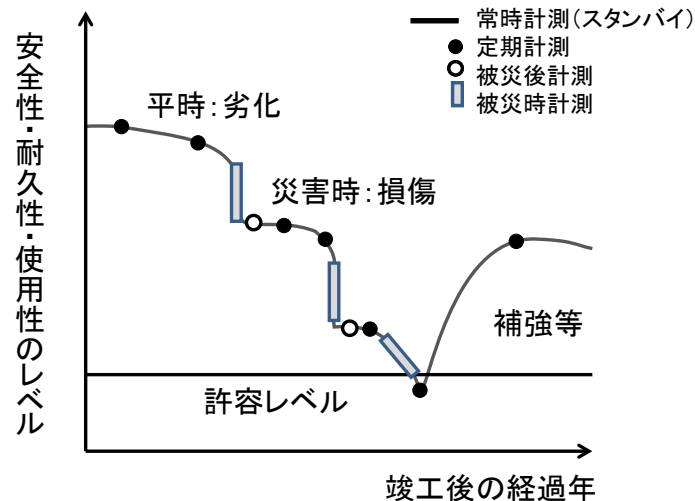


図 2.8 データ計測のタイミングに関する3つの考え方（イメージ）

※日米共同構造実験研究「ヘルスマニタリング技術利用ガイドライン」P41（H15.3）に基づき作成

定期計測と被災後計測は、微小振動（風・中小地震・常時微動）から、災害前後の変化を踏まえて間接的に災害による損傷を評価する。そのため、建物の定常的な線形振動を計測することになる。センサは常時設置しておく必要はなく、小型軽量のポータブルタイプの計測器を建物内に持ち込み、計測を行うことが可能である。

これに対し、被災時計測は、強振動（大規模地震・強風）という振幅レベルの大きな振動データから、災害時の損傷進行を直接計測することになる。センサを常時設置しておかなくてはならず、小型で、安価なセンサの開発が不可欠である。

表 2.3 定期計測・被災後計測、被災時計測の特徴

	定期計測、被災後計測	被災時計測
目的	前回結果との比較に基づく評価	災害時の損傷進行過程の追跡
データの振幅レベル	小(風・中小地震・常時微動等)	大(大規模地震・強風等)
建物の振動特性	線形領域	非線形領域
センサ設置	臨時設置も可能	常設が前提

このように、計測のタイミングには一長一短があり、いずれかの計測のみで損傷検出を行うことは得策ではない。計測を行う時期をユーザ側でその都度指定せずとも、センサを「常時計測スタンバイ」状態にして判断機能を持たせておくことによって、様々なタイミングにおける計測を可能とする仕組みも実用段階にある。それぞれの利点を生かし、かつ欠点を補う組み合わせを考えることが必要になる。

2) SHM による推定のレベル

SHM により建物の損傷推定を行うレベルとしては、「全体系」「層レベル」「部材レベル」といった複数の階層が存在する。

- 全体系： 建物全体の損傷・劣化の有無や程度について評価する
- 層レベル： 損傷・劣化が発生している層やその程度について評価する
- 部材レベル： 損傷・劣化が発生している部材やその程度について評価する

部材レベルなどローカル（局所的）な損傷を検出することを目的としたモニタリングは、建物の規模が大きく構造上複雑で損傷位置を絞り込むことが容易ではない場合や、仕上げ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、コスト・精度の面から限界がある。

これに対し、全体系や層レベルなどグローバル（広範囲）な損傷推定を目的としたモニタリングは、建物内に比較的少数の振動センサを設置し、その入出力関係等を説明するモデルを構築し「モデルに基づく損傷推定」を行う。構造物の被覆の有無に関わらず、労力をかけずに低コストで推定できる。

どちらが良いといった絶対的な基準は存在しないが、今後、グローバルな損傷推定により損傷の位置と程度を大まかに評価した上で、ローカルな損傷検出によって特定の損傷位置における詳細な調査を行うといった、総合的なSHM技術の開発が望まれる。

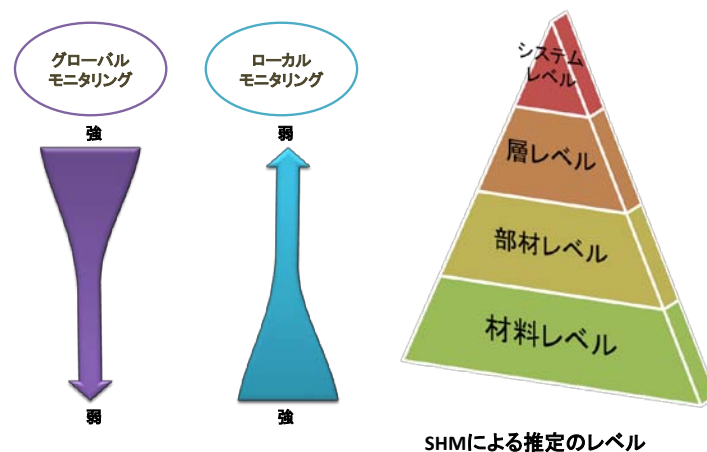


図 2.9 推定のレベルとグローバル／ローカルモニタリングの考え方

3) SHM サービスの形態

ユーザに提供するサービスは、SHM の利用目的によって大きく異なるため、利用目的に即した SHM サービスの形態について明確化する必要がある。

利用目的に応える SHM サービスには様々な形態が考えられるが、代表的な例としては、データ計測のタイミング 1) 及び推定のレベル 2) の組合せから、以下の3つが挙げられる。

- 【災害時】 強振動 に基づき 部材レベル の評価を行う SHM サービス
- 【平時①】 微小振動 に基づき 層レベル の評価を行う SHM サービス
- 【平時②】 微小振動 に基づき 全体レベル の評価を行う SHM サービス

【災害時】強振動に基づき部材レベルの評価を行う SHM サービス

被災時計測により、予め設定した閾値を強振動の最中（大規模地震・強風）に超過したか否かを捉え、避難の要否、建物の継続使用可否について迅速に情報提供するサービスである。さらに、一定時間経過後、損傷の発生箇所・度合い、技術者による詳細診断や補修・補強の要否について、部材レベルの詳細な情報提供を可能とする。

いつ起こるか分からない災害時の挙動を計測するため、センサは常設とし、かつ、グローバル・ローカル双方の推定を行うため、多くの種類・数のセンサが必要となる。

システムの設置・運用コストから、対象建物の規模によっては経済合理性に欠ける場合が考えられるため、本サービスに関しては、大規模な共同住宅が主な適用対象となる。

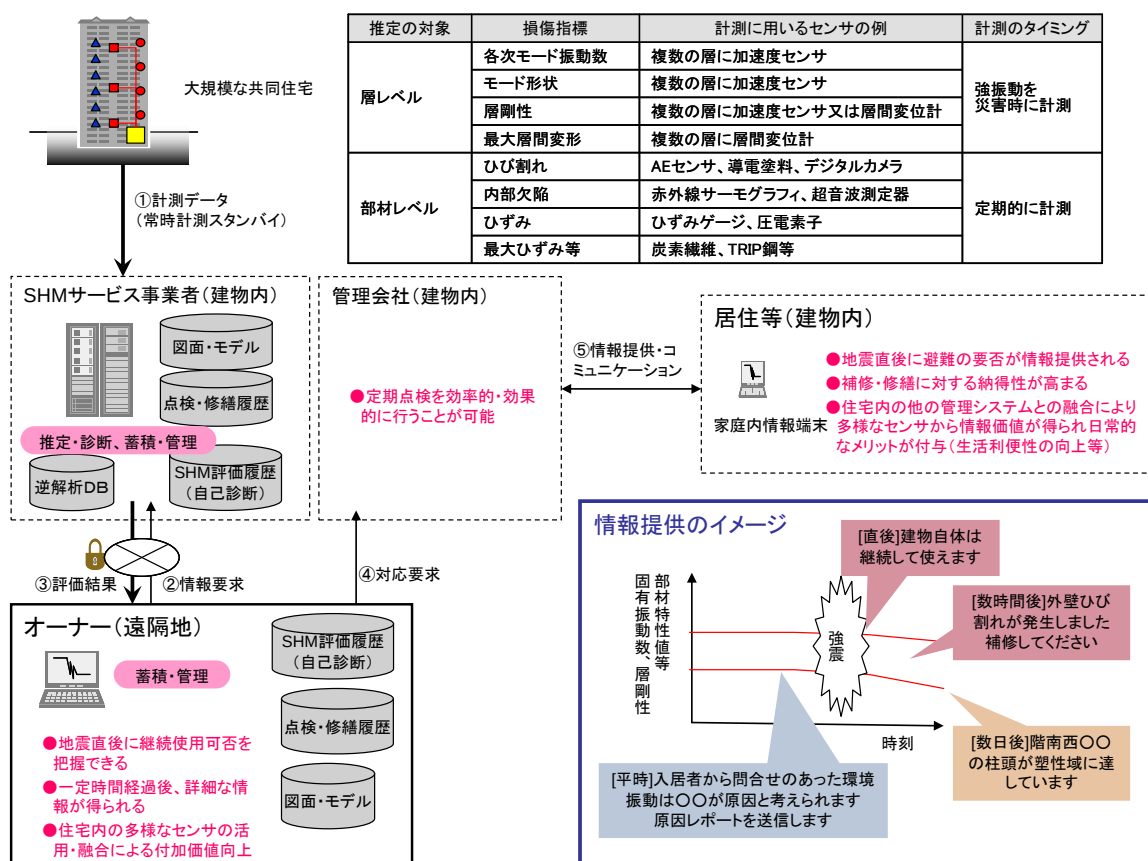


図 2.10 強振動に基づき部材レベルの評価を行う SHM サービスの利用イメージ

【平時①】微小振動に基づき層レベルの評価を行う SHM サービス

定期計測または被災後計測により微小振動（風・中小地震・常時微動）データを計測し、住宅の長期利用に伴う使用性（サービスビリティ）の変化、被災前後の安全性や耐久性に係る構造特性の変化について情報提供するサービスである。特に被災後計測の結果を踏まえ、一定時間経過後、損傷の発生箇所・度合い、技術者による詳細診断や補修・補強の要否について、層レベルの情報提供を行う。補修・補強の効果を測定するといった活用方法も考えられる。

センサは必ずしも常設とする必要はなく、計測時期に併せて臨時設置とすることも可能であり、基本的には各層に 1 個以上のセンサ配置が必要となる。

主な適用対象として、中層RC造共同住宅が考えられる。

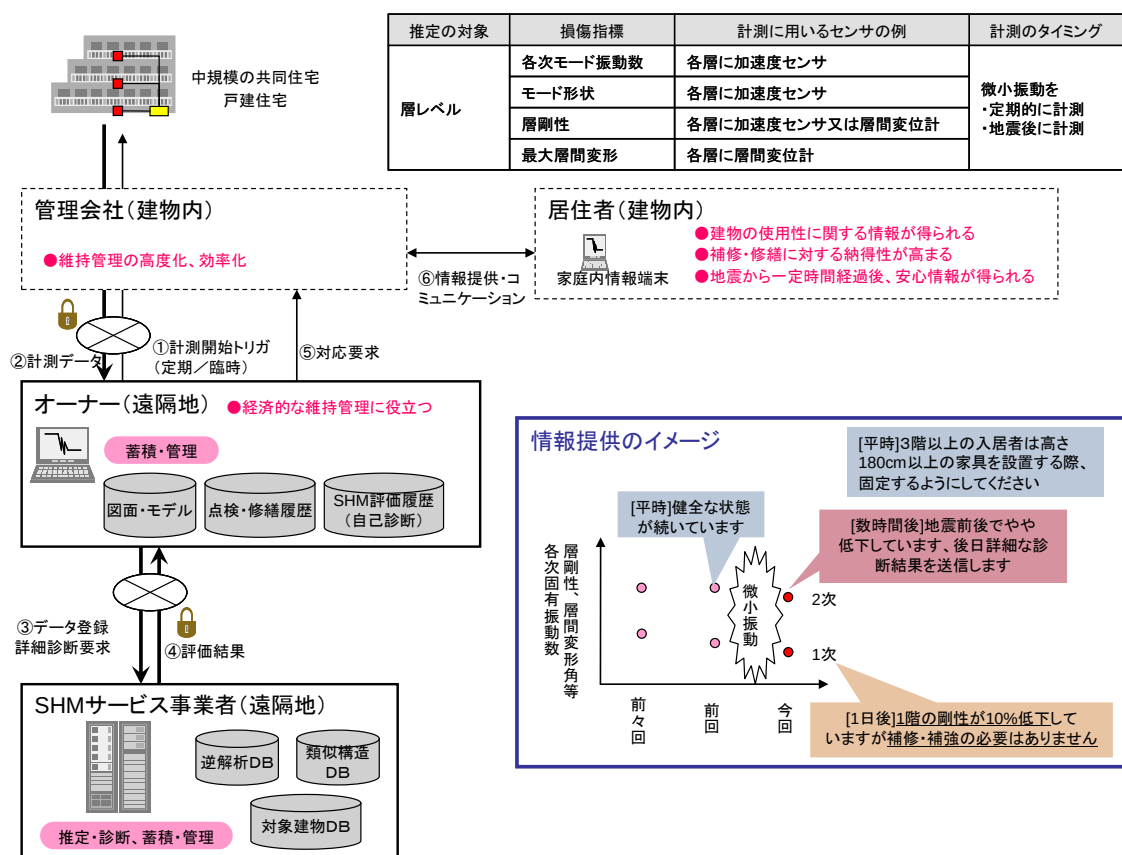


図 2.11 微小振動に基づき層レベルの評価を行う SHM サービスの利用イメージ

【平時②】微小振動に基づき全体レベルの評価を行う SHM サービス

平時①サービスと基本的に同じであるが、推定のレベルに違いがある。全体系の推定には、建物全体で最小限 1 個のセンサがあればよい。

主な適用対象として、戸建木造住宅が考えられる。

戸建木造住宅に関しては、非線形性や不整形、温湿度依存性等の理由から、加速度のみの計測では構造特性の詳細な推定そのものが困難であるため推定のレベルは全体系にとどまる。評価精度を補完する必要があることから、付加的に、類似構造物群のデータベースに基づくベンチマーク評価等を行うことも考えられる。

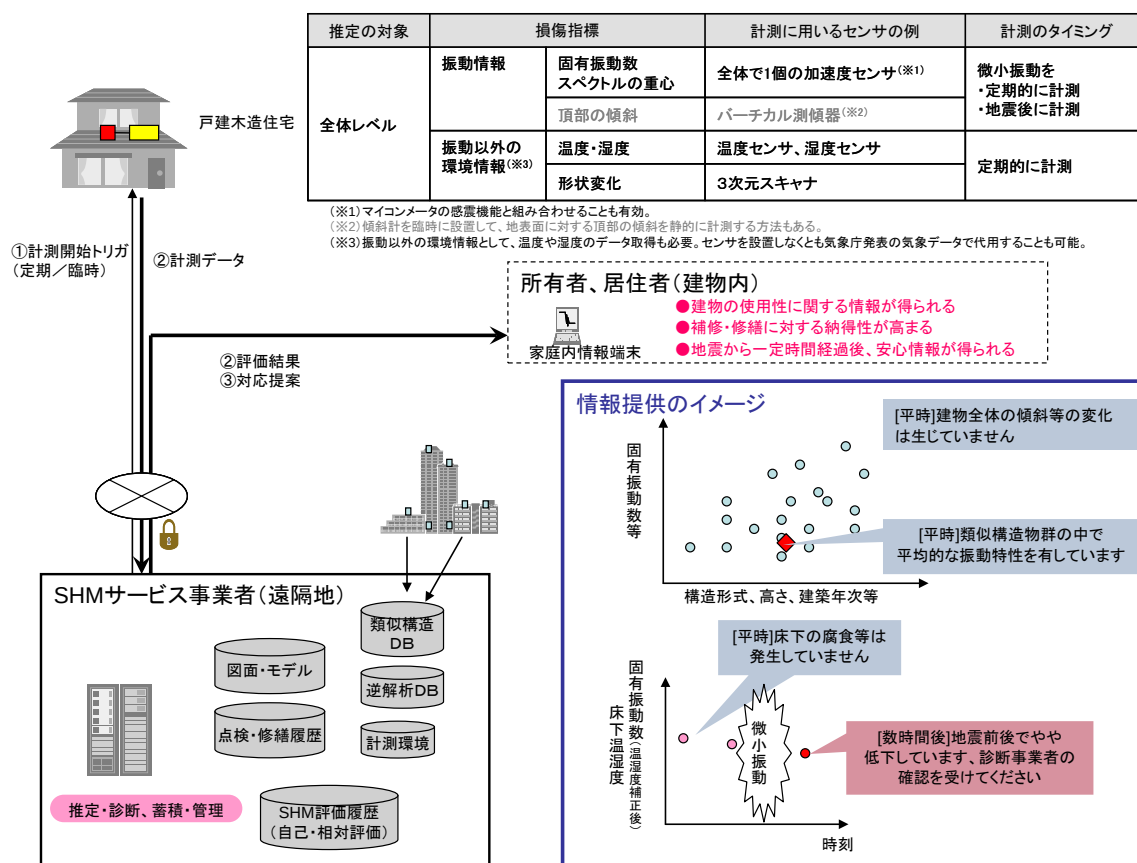


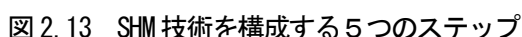
図 2.12 微小振動に基づき部材レベルの評価を行う SHM サービスの利用イメージ

(参考) 戸建木造住宅に SHM を適用する場合の留意点

戸建木造住宅に関しては、S 造・RC 造などの他の構造形式と比較して、以下の理由から、加速度のみの計測では構造特性の詳細な推定そのものが困難である。そのため、計測時の温度・湿度、建物全体の形状の変化等も組み合わせたサービスや、類似構造物群のデータベースに基づくベンチマーク評価等を付加的に行うサービス等について、検討する必要がある。

- 常時微動による揺れのレベルが比較的大きい。
- 非線形の影響が強い。
- 不整形であり、固有振動数は階段等の位置により大きく左右される。
- RC造等と異なり構造体として一体化されておらず、柱と梁を完全に剛に接合することは難しい。
小梁を除去した場合に固有振動数が逆に増加したという過去の実験研究もあり、質量減少による影響の可能性もあるが、実態は複雑である。
- 剛床の仮定が成り立たないことが多い。
- 湿度や温度に対する固有振動数の感度が高い。逆にいえば、外断熱や結露防止などによって使用環境を高めることが、構造上有利となる可能性も考えられる。

SHM 技術は、以下の通り 5 つの手順により構成される。



対象建物にセンサを設置して振動等の物理量を観測する。

様々な信号処理手法を駆使して、対象建物のモデル及び振動特性を推定する。

推定結果（過去の情報を含む）を踏まえ、対象建物に蓄積された損傷や劣化の発生箇所及び度合いが現在どのような状態にあるか、今後の進展予測を含めて診断する。

WEB等を通じて診断結果を提供し、ユーザが行う補修・補強等の意思決定を支援する。

推定・診断された結果を継続的に蓄積・管理する

III-28

をすることが必要である。

そこで以下、サービス項目ごとにその考え方を整理する中で、災害時／平時①／平時②という 3 つのサービス形態に係る分類フラグを立て、いずれの要件に適しているかの対応付けを枠囲いで示した。

表 2.4 SHM サービスの項目・内容

サービスの項目		サービスの内容
A データの取得	データはいつ計測するのか？	☐ 被災時計測 ☐ 定期計測 ☐ 被災後計測
B 状態の推定	対象建物のモデル特性についてどのレベルまで推定できるのか？	☐ 全体 ☐ 層 ☐ 部材
C 診断	推定結果をどのような考え方に基づき解釈するのか？	☐ 自己評価 ☐ 相対評価
D 診断結果の提供	ユーザに対してどのような情報を提供するのか？	☐ 基本情報 ☐ 被災直後の安全行動の支援情報 ☐ 被災後の安心情報 ☐ 判断・対応の支援情報 ☐ 使用性に係る情報 ☐ その他
E SHM 情報の蓄積・管理	記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限はどうなっているか？	※項目Eの説明文を参照

項目 A：データの取得

センサによって対象建物の実測データをいつ取得することができるかという項目。

サービスの内容としては、被災時計測、定期計測、被災後計測がある。

①被災時計測 災害時／平時①／平時②

強振動（大規模地震・強風）の発生時期を事前に予測することは困難であるため、センサは常設とし、一定以上の振動を検知した場合に計測を開始するトリガ機能が必要となる。

②定期計測 災害時／平時①／平時②

定期点検時と併せて、或いは 1 ヶ月に 1 回等の予め指定するタイミングにより、微小振動（風・中小地震・常時微動）データを計測する。センサは必ずしも常設とする必要はなく、臨時設置とすることも考えられる、

③被災後計測 災害時／平時①／平時②

被災後の臨時点検と併せて、微小振動（風・中小地震・常時微動）データを計測する。センサは必ずしも常設とする必要はなく、臨時設置とすることも考えられる。

表 2.5 項目 A「データの取得」に関するサービス内容

サービス内容	概要	サービス形態との対応	
		災害時	平時①②
被災時計測	構造物に予め判断機構を持つセンサを組み込む 不意に発生する災害時にもデータ計測が可能	●	
定期計測	定期点検時に微小振動データの計測が可能 センサを予め組み込むか臨機に設置するかは任意		●
被災後計測	被災後のデータ計測が可能 センサを予め組み込むか臨機に設置するかは任意		●

項目 B：状態の推定

建物の損傷や経年変化についてどのレベルまで推定できるかという項目。

サービスの内容としては、建物の全体、層、部材といった推定のレベルが考えられ、詳細な推定を行うシステムほどその分多くの種類・数のセンサを必要とする。

なお、本項目に係るサービス内容は、サービス形態の別に拠らない整理となる。

①全体系

建物全体系で損傷・劣化の有無や度合いを推定する場合、推定の対象範囲が広いいため、詳細な推定を行うことは難しい。しかしごく少数のセンサによって、コストや労力をかけずに行うことができる。

②層レベル

建物の層レベルで損傷・劣化の有無や度合いを推定する場合、全体レベルと部材レベルが持つ特徴の中間的な位置づけにある。

建物の構造や規模に応じて異なるが、基本的には、各階に 1 個の加速度センサが必要である。損傷が集中しやすい層が予め把握できる場合は、当該層の直上・直下にセンサが配置されていれば十分である。

③部材レベル

建物の部材レベルで損傷・劣化の有無や度合いを推定する場合、詳細な推定を行うことが可能である。しかし、センサを高密度に設置する必要があることに加え、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、損傷推定上の限界がある。そのため、部材レベルに特化することなく、全体→層→部材と段階的に推定できるトータルなシステムであることが望ましい。

また、例えばひび割れ等が視認できる場合においてそれが構造上どの程度の影響を及ぼすものなのかを把握するニーズが考えられるように、部材レベルの損傷が、層レベルや全体系にどの程度の影響があるかを把握できるシステムであることが望ましい。

表 2.6 項目 B「推定」に関するサービス内容

サービス内容	概要
全体	全体レベルの推定のみ可能 最小限の数のセンサでよく、経済的なシステムを構築できる
層	層レベルの推定が可能
部材	部材レベルの推定が可能 多数のセンサ配置が必要となりコスト面の考慮が必要

項目 C：診断方法

推定結果を踏まえ、どのような考え方にに基づき解釈（診断）するかという項目。

サービスの内容として自己評価、相対評価がある。

①自己評価 災害時／平時①／平時②

対象建物の状態の推定結果を蓄積・管理し、予め設定した閾値を超過したか否か、あるいは前回以前の診断結果からの経年変化に基づき、評価（自己評価）を行う。サービス形態の別に拠らず、SHM技術が基本としている評価の考え方である。

なお初回測定時には、直接的な比較対象が存在しないものの、初期値を獲得するという重要な位置づけがある。当初の設計上のパラメータと比較して、構造物が実物としてどの程度の性能を発揮しているかを確認するといった考え方で評価を行うことも可能である。なお現状では多くの場合、建物にセンサが設置される背景に、設計へのフィードバックという作り手側のニーズに基づく技術利用がある。

②相対評価 災害時／平時①／平時②

建物単体だけでなく、構造・高さ・規模・平面形状等の観点から類似する構造物群で蓄積・管理されたデータベースに基づき、当該建物の相対的な位置づけを捉えるためのベンチマーク評価（相対評価）を行う。

道路橋では桁間等の指標により構造物群で相対評価を行った先行研究が存在するが、建築分野では、実データの蓄積が不足していること、特に規模の大きな建物は類似建物群の生成が難しいこと等から、その有効性を含めまだ研究途上にある。

いずれにせよ、SHM システムは、対象建物の推定結果の時系列推移に基づく評価（自己評価）を行うことが基本であり、相対評価の結果は、追加的な参考値としてユーザへ提供されることが望ましい。

表 2.7 項目 C「診断」に関するサービス内容

サービス内容	概要	サービス形態との対応		
		災害時	平時①	平時②
自己評価	災害時の構造特性の時間変化または前回以前の結果との比較に基づく評価 初回測定時には初期値を得るか、設計との比較検証を行う	●	●	●
相対評価	類似構造物群のデータベースに基づく相対的な評価を行う 当該建物の相対的な参考値を把握できる			●

項目 D：診断情報の提供

ユーザに対してどのような診断情報を提供するかという項目。

基本情報（計測データやモード特性等）、被災直後の安全行動を支援するための情報（避難の可否、建物の継続使用可否等）、判断・対応を支援するための情報（損傷や劣化の発生箇所・度合い、補修・補強の可否等）といったサービスの内容が考えられる。

①基本情報 災害時 ／ 平時① ／ 平時②

加速度時刻歴波形や層間変位、モード特性（モード振動数、モード形状等）等、建物の揺れ等の計測データ及び簡易な評価結果をほぼそのまま提示する。

②被災直後の安全行動の支援情報 災害時 ／ 平時① ／ 平時②

被災時計測の結果を評価・分析し、ユーザに対して避難の可否、建物の継続使用可否等に関する情報を迅速に提供する。ユーザにとっては応急危険度判定に代わる情報価値がある。特に高層共同住宅において、高層階に居住する高齢者等は、災害直後に建物が安全であることが分かれば、避難する手間が省けることのメリットが大きい。

③被災前後の比較情報 災害時 ／ 平時① ／ 平時②

被災後の微小振動（風・中小地震・常時微動）データを評価・分析し、被災前の微小振動による評価結果と比較した結果を提示する。例えば大きな変化が生じていないことが分かれば、ユーザにとって安心情報としての情報価値がある。

④判断・対応に係る支援情報 災害時 ／ 平時① ／ 平時②

災害発生から一定期間が経過すると、損傷・劣化の発生箇所や度合い、構造技術者による詳細な診断の可否、補修・補強の可否等に関する情報ニーズが高まってくると考えられる。診断結果の提供には、迅速性よりも、多少時間を要しても高信頼性が要求される。

⑤使用性に係る情報 災害時 ／ 平時① ／ 平時②

微小振動（風・中小地震・常時微動）下での定期計測の結果から、振動特性の経年変化を捉え、使用性（サビサビリティ）の評価を行い、情報提供する。

表 2.8 項目 D「診断情報の提供」に関するサービス内容

サービス内容	概要	サービス形態との対応	
		災害時	平時①②
基本情報	建物の計測データやモード解析結果等を提示	●	●
被災直後の安全行動の支援情報	避難の可否、建物の継続使用可否等に関する情報を迅速に提供	●	
被災前後の比較情報	被災後の微小振動データを評価・分析し、被災前の微小振動による評価結果と比較して情報提供		●
判断・対応に係る支援情報	損傷・劣化の発生箇所や度合い、構造技術者による詳細な診断の可否、補修・補強の可否等に関して、多少時間を要しても高信頼な情報提供	●	●
使用性に係る情報	微小振動下での振動特性の経年変化を捉え、使用性（サビサビリティ）について情報提供		●

項目 E：SHM 情報の蓄積・管理

SHM による評価結果等を記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限に関する項目。なお、本項目に係るサービス内容は、サービス形態の別に拠らない整理となる。

①データ項目

記録として管理するためのデータ項目の一例を整理した。

サービスに応じて取捨選択するデータ項目が一部含まれるが、4つの区分（基本設定／計測情報／解析情報／共通基盤）によって整理することができる。

ここで「共通基盤」とは、SHM システムのユーザ及び管理者以外で、SHM 情報を活用しようとする者（設計者、施工者、公的機関、生活関連サービス事業者、研究者等）向けのデータ項目である。SHM 情報を匿名化し、SHM の技術的な改善や幅広い技術利用を促すために、設定しておくことが望ましい。

表 2.1 項目 E「SHM 情報の蓄積・管理」に関するデータ項目（例）

大分類	中分類	データ項目（例）
(1) 基本設定	①ユーザ情報	新規追加、権限変更、一覧、メール配信設定 等
	②建物情報	名称、建設年月日、オーナー、構造、所在地、階数 等
	③センサ情報	ID、計測物理量、メーカー、機種、サンプリング、設置箇所 等
	④サーバ情報	IPアドレス、OS、住所等
	⑤センサの計測トリガ	地震時（計測開始するトリガ値） 定期（計測の頻度、時間帯等） 臨時（計測開始する日時）
(2) 計測情報	①計測時のセンサ状態	状態：安定／通信異常／再起動中
	②計測時の環境条件	日時、温湿度、地震イベントとの対応 等
	③生データ（時刻歴波形）	加速度、速度、層間変形、AE 等
(3) 解析情報	①損傷・劣化の対象指標	固有振動数、モード形状、層剛性、層間変形、AE頻度 等
	②推定に用いる手法	ARXモデル、部分空間法、直接計測等
	③指標の推定結果	全体系（1次固有振動数 等） 層レベル（層剛性、層間変形 等） 部材レベル（AE頻度 等）
	④診断結果	被災直後の安全行動支援情報（継続使用可否、避難の要否 等） 被災前後の比較情報（被災前後の構造特性の変化 等） 判断・対応の支援情報（詳細診断や補修・補強の要否 等） 使用性に係る情報（微小振動下での振動特性の経年変化 等） その他（補修・補強後の効果、類似構造群との比較結果 等）
(4) 共通基盤	①匿名化した基本設定	築後経過年数、構造種別・規模、センサの種類・性能 等
	②計測関係情報	計測時の環境条件、生データ 等
	③解析関係情報	推定手法、推定結果 等

②アクセス権限

所有者による情報の管理を支援するために、SHM サービス事業者、管理会社、設計者、施工者等の関係主体がどこまでの閲覧・編集権限を有しているかといった点は、ユーザに提供するサービスの内容として重要な要素となる。

ここではシステムのユーザとして3つの区分（所有者／システム管理者／二次利活用者）を想定し、それぞれのアクセス権限の設定方法の一例を整理した。ただし、情報は基本的には所有者のものであり、権限の付与は所有者の了解の下に設定する必要がある。

表 2.2 項目 E「SHM 情報の蓄積・管理」に関するアクセス権限（例）

○：閲覧・編集ともに可
△：閲覧可、編集不可
×：閲覧・編集ともに不可

データ項目 (大分類)	データ項目 (中分類)	オーナー	システム管理者 (オーナーサポート、 SHM情報サービス等)	二次利活用者 (設計者、施工者、 公的機関等)
(1) 基本設定	①ユーザ情報	○	○	×
	②建物情報	○	○	×
	③センサ情報	○	○	×
	④サーバ情報	○	○	×
	⑤センサの計測トリガ	○	○	×
(2) 計測情報	①計測時のセンサ状態	○	○	×
	②計測時の環境条件	○	○	×
	③生データ(時刻歴波形)	○	○	×
(3) 解析情報	①損傷・劣化の対象指標	○	○	×
	②推定に用いる手法	○	○	×
	③指標の推定結果	○	○	×
	④診断結果	○	○	×
(4) 共通基盤	①匿名化した基本設定	○	○	△
	②計測関係情報	○	○	△
	③解析関係情報	○	○	△

オーナーの了解の下で設定

本項で整理したサービスの項目・内容について、3つのサービス形態（前項）との対応関係を表 2.11～表 2.13 に示す。

表 2.3 強振動に基づき部材レベルまでの評価を行う SHMサービスの項目・内容

サービスの項目		サービスの内容	サービスの内容の考え方
A データの取得	データはいつ計測するのか？	☒ 被災時計測 ☐ 定期計測 ☐ 被災後計測	いつ起こるか分からない地震時の挙動を計測するため、センサは常設が前提。
B 状態の推定	対象物の状態(モデル特性)についてどのレベルまで推定できるのか？	☒ 全体 ☒ 層 ☒ 部材	グローバル・ローカル双方の推定を行うため、多くの種類・数のセンサが必要。
C 診断	推定結果をどのような考え方に基づき解釈するのか？	☒ 自己評価 ☐ 相対評価	予め設定した最大層間変形角等の閾値を超過したか否かによる診断が基本となる。
D 診断結果の提供	ユーザに対しどのような情報を提供するのか？	☒ 基本情報 ☒ 被災直後の安全行動の支援情報 ☐ 被災前後の比較情報 ☒ 判断・対応の支援情報 ☐ 使用性に係る情報	被災直後に、避難の要否、建物の継続使用可否に関する迅速な情報提供を行う。 また、一定時間経過後に、損傷の発生箇所・度合い、技術者による詳細診断や補修・補強の要否についても情報提供を行う。
E SHM情報の蓄積・管理	記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限はどうなっているか？	※別紙「データモデルとアクセス権限(例)」参照	オーナーによる情報の管理を、SHMサービス事業者や管理会社等が建物内で支援する形が考えられる。

表 2.4 微小振動に基づき層レベルまでの評価を行う SHM サービスの項目・内容

サービスの項目		サービスの内容	サービスの内容の考え方
A データの取得	データはいつ計測するの？	☐ 被災時計測 ☒ 定期計測 ☒ 被災後計測	センサは必ずしも常設とする必要はなく、計測時期に併せて臨時設置とすることも可能。
B 状態の推定	対象物の状態(モデル特性)についてどのレベルまで推定できるの？	☒ 全体 ☒ 層 ☐ 部材	基本的には各層に1個以上のセンサ配置が必要。
C 診断	推定結果をどのような考え方にに基づき解釈するの？	☒ 自己評価 ☐ 相対評価	被災前後における固有振動数の評価結果等に基づき、その推移に基づく診断が基本となる。 初回計測時は初期値を取得することや、設計・施工の検証といった目的に用いることも可能。
D 診断結果の提供	ユーザに対しどのような情報を提供するの？	☒ 基本情報 ☐ 被災直後の安全行動の支援情報 ☒ 被災後の安心情報 ☒ 判断・対応の支援情報 ☒ 使用性に係る情報	被災後に、被災前後の構造特性の変化から情報提供を行う。 また、一定時間経過後に、損傷の発生箇所・度合い、技術者による詳細診断や補修・補強の可否についても情報提供を行う。 微小振動下での振動特性の経年変化を捉え、使用性(サービスビリティ)について情報提供する。 その他として、補修・補強の効果についての情報提供も考えられる。
E SHM情報の蓄積・管理	記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限はどうなっているの？	※別紙「データモデルとアクセス権限(例)」参照	オーナーによる情報の管理を、SHM情報サービス機関が遠隔地で、あるいはオーナーサポート等が建物内で支援する形が考えられる。

表 2.5 微小振動に基づき全体レベルの評価を行う SHM サービスの項目・内容

サービスの項目		サービスの内容	サービスの内容の考え方
A データの取得	データはいつ計測するの？	☐ 被災時計測 ☒ 定期計測 ☒ 被災後計測	センサは必ずしも常設とする必要はなく、計測時期に併せて臨時設置とすることも可能。
B 状態の推定	対象物の状態(モデル特性)についてどのレベルまで推定できるの？	☐ 全体 ☐ 層 ☐ 部材	建物によっては、建物全体で最小限1個のセンサがあれば推定可能。
C 診断	推定結果をどのような考え方にに基づき解釈するの？	☒ 自己評価 ☒ 相対評価	前回以前の履歴の推移による診断が基本となる。 初回は初期値を取得することとなるが、設計の検証といった目的に用いることも可能。 付加的な診断として、類似構造物群との比較も考えられる。
D 診断結果の提供	ユーザに対しどのような情報を提供するの？	☒ 基本情報 ☐ 被災直後の安全行動の支援情報 ☒ 被災後の安心情報 ☐ 判断・対応の支援情報 ☒ 使用性に係る情報	被災後に、被災前後の構造特性の変化から情報提供を行う。 微小振動下での振動特性の経年変化を捉え、使用性(サービスビリティ)について情報提供する。 その他として、類似構造物群との比較結果についての情報提供も考えられる。
E SHM情報の蓄積・管理	記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限はどうなっているの？	※別紙「データモデルとアクセス権限(例)」参照	オーナーによる情報の管理を、SHM情報サービス機関が遠隔地で支援する形が考えられる。

1.3 住宅の維持管理等に係る既往のシステムの調査・分析

本項では、SHM による計測の目的及び情報利活用のタイミングと関係が深いと考えられる既往管理システムに着目した文献調査及びヒアリング調査を行い、対象とする情報の項目及び管理方法、当該システムが成立している背景要件或いは普及の阻害要因となっている事項を整理した。

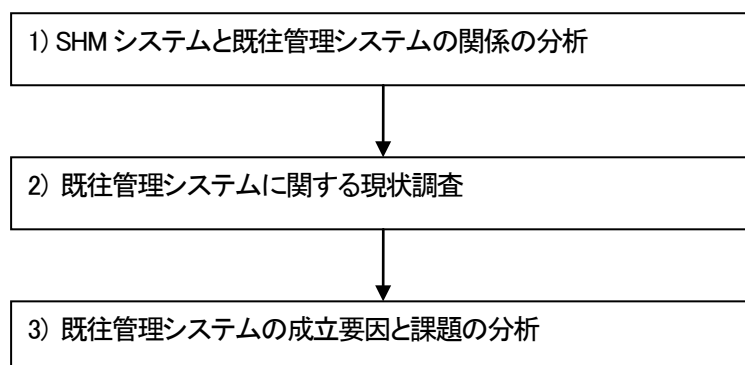


図 2.1 住宅の維持管理等に係る既往管理システムの調査・分析に係る検討フロー

1) SHM システムと既往管理システムの関係の分析

前項で整理した SHM サービスの項目のうち「項目 A データの取得」「項目 D 診断情報の提供」の2項目を抽出し、サービス形態【災害時】【平時①】【平時②】の対応関係を整理すると次の通り。

表 2.6 SHM のサービス形態とサービス項目 A・D の関係

		A データの取得	
		A-1 定期計測、A-2 被災後計測	A-3 被災時計測
D 診 断 情 報 の 提 供	D-1 基本情報	【平時①】【平時②】	【災害時】
	D-2 被災直後の 安全行動の支援情報		【災害時】
	D-3 被災前後の比較情報	【平時①】【平時②】	
	D-4 判断・対応に係る 支援情報	【平時①】	【災害時】
	D-5 使用性に係る情報	【平時①】【平時②】	

凡例：【災害時】強振動に基づき部材レベルの評価を行う SHM サービス（大規模共同住宅向け）

【平時①】微小振動に基づき層レベルの評価を行う SHM サービス（中層 RC 造共同住宅向け）

【平時②】微小振動に基づき全体レベルの評価を行う SHM サービス（戸建木造住宅向け）

SHM のサービス形態と既往管理システムの親和性を考察するため、このマトリクス上に、住宅の維持管理及び居住者生活支援に係る既往管理システムをマッピングする。マッピングの対象とする既往管理システムの分野・例、それぞれのデータ取得時期、情報提供内容／目的を併せて整理すると以下の通り。

表 2.7 マッピングの対象とする既往管理システムとその特徴

分野	既往管理システムの例	データ取得時期	情報提供内容／目的
住宅の維持管理	○住宅履歴情報管理	スポット的 (ユーザ任意)	基本情報
	○不動産情報管理		(ユーザ任意)
	○配管漏水検知	定期的	異常発生の原因特定
	○温湿度計測		日常利用
	○共用設備運転監視 (エレベータ、給水設備等)	常時スタンバイ	基本情報(状態監視)
防犯・防災	○防犯カメラ(タイマー記録)	定期的	異常発生の原因特定
	○防犯カメラ(常時記録)	常時スタンバイ	アラート情報
	○緊急地震速報		
	○火災警報器		人的支援(緊急時駆付)
	○ホームセキュリティ		
省エネ、 安定供給	○ライフライン検針	定期的	日常利用 業務効率化
	○建物エネルギー管理 (BEMS, HEMS)	定期的	故障診断・予測 建物付加価値の向上
	○スマートメータ	常時スタンバイ	最適制御
居住者生活支援 その他分野	○健康情報管理	スポット的 (ユーザ任意、 定点通過時等)	日常利用
	○子供・高齢者の見守り		ベンチマーク評価結果
	○ホームネットワーク (スマート家電、端末等)	常時スタンバイ	アラート情報
	○フライトレコーダ		日常利用 生活利便性向上 異常発生の原因特定

前表より、既往管理システムを SHM サービス項目 A・D のマトリクス上にマッピングする際、SHM のサービス内容を次のように一般化することが分かる。

表 2.8 項目 A「データの取得」に係るサービス内容の一般化

SHM	既往管理システム
A-1 定期計測、A-2 被災後計測	定期的、スポット的 (ユーザ任意)
A-3 被災時計測	常時スタンバイ

表 2.9 項目 D「診断情報の提供」に係るサービス内容の一般化

SHM	既往管理システム
D-1 基本情報	基本情報（ユーザ任意）
D-2 被災直後の安全行動の支援情報	アラート情報（迅速に発信）
D-3 被災前後の比較情報	原因特定情報
D-4 判断・対応に係る支援情報	故障診断・予測情報、付加サービス
D-5 使用性に係る情報	日常的な情報、ベンチマーク評価結果

SHM サービス項目 A・D の内容表現を、既往管理システムに即して一般化した上で、SHM サービスのマトリクス上にマッピングした結果を以下に示す。

表 2.10 住宅の維持管理等に係る既往管理システムと SHM サービスの対応

		A データの取得	
		A-1 定期計測、A-2 被災後計測 ⇔定期的、スポット的(ユーザ任意)	A-3 被災時計測 ⇔常時スタンバイ
D 診 断 情 報 の 提 供	D-1 基本情報 ⇔基本情報(ユーザ任意)	○住宅履歴情報管理 ○不動産情報管理	○共用設備運転監視(状態監視)
	D-2 被災直後の安全行動の支援情報 ⇔アラート情報(迅速に発信)	○子供・高齢者の見守り(駅等通過時に居場所を自動配信)	○緊急地震速報 ○火災警報器 ○マイコンメータ ○防犯カメラ(常時記録)
	D-3 被災前後の比較情報 ⇔原因特定情報	○防犯カメラ(タイマー記録) ○配管漏水検知	○フライトレコーダ
	D-4 判断・対応に係る支援情報 ⇔故障診断・予測情報、付加サービス	○BEMS, HEMS(故障診断・予測)	○スマートメータ(供給最適化) ○ホームセキュリティ(緊急時駆けつけ)
	D-5 使用性に係る情報 ⇔日常的な情報 ベンチマーク評価等	○健康情報管理 ○温湿度計測 ○ライフライン検針	○ホームネットワーク(スマート家電、スマート端末等)

前表より、SHM システムと既往管理システムの関係について、以下の考察が得られる。

＜SHM サービス【平時①】及び【平時②】と親和性のある既往管理システム＞

- 住宅履歴情報管理
- 不動産情報管理
- 防犯カメラ（タイマー記録）
- 配管漏水検知
- BEMS, HEMS（故障診断・予測）
- 健康情報管理
- 温湿度計測
- ライフライン検針 等

＜SHM サービス【災害時】と親和性のある既往管理システム＞

- 共用設備運転監視（状態監視）
- 緊急地震速報
- 火災警報器
- マイコンメータ
- 防犯カメラ（常時記録）
- スマートメータ（供給最適化）
- ホームセキュリティ（緊急時駆けつけ） 等

これらのシステムで用いられるセンサ及びサーバ等の情報機器を、SHM による計測・評価、情報の蓄積・管理、情報提供等の手段として相互に連携して活用できるようになると、経済合理性が高く、かつユーザにとっての情報価値がより高められると考えられる。

2) 既往管理システムに関する現状調査及び課題等の分析

前記(1)の分析結果から、SHM サービスと親和性があると考えられる既往管理システムについて、現状を把握するためヒアリング調査及び文献調査を行った。

調査対象とした既往管理システムは以下の通り。

表 2.11 調査対象とした既往管理システムと調査方法

調査対象システム	事業者	調査方法	
		ヒアリング	文献等調査
①住宅履歴管理システム 「SMILE ASP」	(株)構造計画研究所	22 年度に実施	補足的に実施
②総合不動産管理システム 「@プロパティ」	プロパティデータバンク(株)	21 年度に実施	補足的に実施
③公有資産の保全情報システム 「BIMMS」	(財)建築保全センター	22 年度に実施	補足的に実施
④ホームセキュリティシステム	セコム(株)	22 年度に実施	補足的に実施
⑤ビルエネルギー管理システム 「エコカルテ」	鹿島建設(株)	—	主として実施
⑥大規模無線自動検針システム	東京ガス(株)	—	主として実施
⑦日常行動解析サービス 「見守リゲイト」	三菱化学(株)	—	主として実施

主な調査項目は以下の通り。

- システム運用上の課題
- 情報の蓄積・管理におけるルール
- SHM システムに対する考え方・接点 等

ヒアリング調査の結果に基づき、既往管理システムの成立要因と課題を分析した。

■システムの成立要因

○ユーザ及び情報二次活用者の意識啓発

- ・ ユーザ側の意識が低く、データを蓄積・管理していくためにも費用がかかることの認識が低い。
- ・ サービス開始直後は認知度が低く、住宅所有者は「プロ（工務店）が情報を持っているから自分で持つ必要がない。」といった反応であった。
- ・ 工務店やハウスメーカーは「情報を所有者に渡すことはできない。」との反応であった。顧客を囲い込もうとする背景があると考えられる。

↓

「今後もずっと工務店がそのまま残っているとは限らない。」「人の健康管理については医療機関間でカルテの共有化が進んでおり、住宅についても同様。」というロジックでようやく理解促進が進みつつある。また、情報を活用した二次的なサービスについても理解が進みつつある。

○日常的なメリット

- ・ システムの利用頻度の低さを理由に短期間で退会するユーザもある。
- ・ 災害や犯罪が発生したときのみ役立つサービスでは、普及は困難と考えられる。



災害時だけでなく、平時のメリットが重要。例えば人感センサは省エネ、画像センサは人数把握等の実ニーズに即した活用も可能である。

【SHM との接点について寄せられた主な意見】

- ・ SHMが、住宅履歴情報管理のサービスにアドオンできる可能性は考えられる。
- ・ SHMで加速度を計測することが、日常的なメリットにどう結びつくかを検討するとよいのではないか。「地震が来ないとありがたみがない」のではなく、平常時のデータの蓄積によってメンテナンス計画に活かすことが考えられるのではないか。
- ・ ロボット技術と建築を融合させ、建物の高知能化を図ることで、さらに多くの価値を生み出すことができるのではないか。
- ・ 不要な資産の圧縮を行いたい所有者が多いので、SHMは使用期間を過ぎた建物の振り分けにおいて有効なのではないか。「まだ使えるのであれば売る」こともできる。
- ・ 当初は、設計と実測の差についての研究目的の利用となるのではないか。ある程度の余裕を見込んだ設計に対して、どのように価値を提供していくかが重要だろう。
- ・ 機械監視システムの履歴情報を防犯環境設計等に反映することがあり、BIM の世界でも行われている。SHM をコンサルティングに応用するというサービスも考えられる。
- ・ 一方で、SHMで対象としている主要構造部は保全計画において使用期間中は「保つ」ことを前提としているため、動的なデータを蓄積管理することの意味を説明できなければ普及は難しい。

○情報の蓄積・管理におけるルール

- ・ 住宅所有者自身によるデータの更新が基本。
- ・ 登録ユーザは契約 ID・ユーザ ID・パスワードの3点セットで管理している。
- ・ 個人情報の取扱いに細心の注意を払っている。
- ・ 契約先との間を結ぶ回線が断たれた場合、断線監視機能により検出可能。
- ・ 断線した場合に備え、無線通信（バックアップ回線）で冗長性を確保している。
- ・ 情報・データを蓄積・管理する際のルールやガイドラインがある（機械監視システム）。
- ・ 15 分間隔で全データをバックアップしている。テープによるバックアップも月に1回行っている。
- ・ 情報のバックアップを2 地点（関東と九州）で行っている。

■システム運用上の課題

○データの質・量の確保

- ・ データが十分に集まっていないこと、また、ユーザ側のミス・漏れ等により有意なデータ入力がないされていないことから、ユーザ間ベンチマーク評価を行うのが難しい状況。

○評価手法及び評価結果の位置づけ

- ・ 現在行われている建物診断の指標は定性的であり、ユーザ側の主観によるところが大きい。これは、診断において、オーソライズされた客観的かつ定量的な手法が存在しないことの裏返しともいえる。施設運営の最適化はユーザ側に任されているのが現状であり、マネジメントできているとは言い難い。

○サービスの提供体制

- システムの運用保守ならびにベンチマーク評価は2名体制で行っている。

○関係主体の利害関係

- ・ 建物の中には、省エネ、設備関連、防犯関連の情報など様々なサブシステムが存在する。お客様企業や設計事務所からは、BCMの観点からこうしたサブシステムを一元的に管理したいというニーズが強い。
- ・ センサフュージョンが進めば、より多くの情報価値を社会に提供できるはずであるが、業界の壁（各社がイニシアティブを取りたがる傾向）がそれを阻んでいる。

1.4 継続的なSHMシステム運用のための要件

これまでの検討結果を踏まえ「継続的な SHM システム運用のための 10 の要件」を、以下に整理する。
また、別途作成した「多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスモニタリング技術の利用ガイドライン（案）」（以下「SHM ガイドライン」とする。）において、これらの要件を踏まえどのような形で反映したかについても、併せて整理する。

1) ユーザへ提供される情報価値の位置づけが明確であること

SHM によって建物の動的な情報が蓄積・管理されることが、ユーザにとってどのような情報価値をもたらすのかを明確にしておく必要がある。

特に、微小振動時の計測・評価は、ユーザにとって補修・補強等の判断材料となることだけでなく、使用性（サービサビリティ）に係る情報として、流通段階で優位な条件となることについて法制度上で位置づける等、社会的な仕組みが必要となる。



【SHM ガイドラインへの反映】

「2.2.1 SHM のメリット」では、上記のような社会的仕組みの必要性に対する提言も込めて、SHM 技術の普及・利用が進むことによるユーザのメリットを示した。

2) SHM システムの利用目的に即したサービスが提供されること

SHM システムの構築・運用に関しては既に、大手建設会社をはじめ、一部の住宅メーカーやセンサ会社において、サービス提供が開始されている。しかし、センサの種類・数、推定の精度、ユーザへ提供する情報価値等は事業者によって様々である。

また今後、建物の設計・施工に携わる事業者が顧客サービスの一環として SHM を展開していく可能性や、情報サービス事業者が SHM に係るデータ管理を手がけていく可能性等、既に十分な技術的ノウハウが蓄積された事業者以外においても、SHM のサービスの担い手が多様化していくことが考えられる。

このような状況を踏まえると、多様なサービス提供方法が考えられる SHM システムの位置づけを明確にすることと、安易にセンサを設置して解析するようなサービスに対しては警鐘を鳴らすことの双方が必要となる。



【SHM ガイドラインへの反映】

「2.4 建物管理における SHM サービスの利用」では、システムの利用目的に即したサービスの形態、項目・内容について明記した。

3) SHM システムの設計において対象建物の規模・構造や経済合理性を踏まえること

SHM システムの設計は、前述したシステムの利用目的はもとより、対象建物、経済合理性等、様々な観点から適切な考え方にに基づき行う必要がある。

例えば、設置するセンサ数を増やすほど、より詳細な推定レベルが確保されるが、対象とする住宅の規模によっては、その運用コストを考慮すると適用困難な場合がある。また、住宅の構造に応じたセンサの種類・設置箇所等を選定する必要がある。

安価かつ高精度なセンサ等の流通も、普及に向けての大きな課題と考えられる。さらに SHM サービス事業者においては、センサシステムに関していわゆる「センサ部」と「スマート部」を切り分け、ユーザーニーズに合わせて SHM システムのグレードを選択できるような備えも今後必要と考えられる。



【SHM ガイドラインへの反映】

「2.5 SHM の設計」では、ユーザーニーズに即したサービスの設計の考え方を整理した。

また「3.1 データの取得」では、システムの利用目的に即した損傷指標とセンサの対応、対象建物の構造・規模に応じたセンサの設置箇所等を整理した。

4) 日常的な利用を促進する仕組みを備えていること

事業者ヒアリングを通じて「災害時だけでなく平時のメリット及びユーザー自らの利用を促進するような仕組みが重要」といった意見が多数挙げられた。

一部の住宅履歴情報サービス事業者では、住宅所有者自らによる平時のシステム利用を促進するための情報項目として、住宅内部の家具・家電の配置や日々のエネルギー消費量等を設けている。主要構造部の状態の計測・評価を目的とした SHM だけでは、ユーザー自らの平時の利用を促進するような仕組みとしてはやや弱い部分がある。そこで、住宅内の既往管理システムとの連携が有効と考えられる。



【SHM ガイドラインへの反映】

「1.2 本書で取り扱う SHM の対象範囲」では、SHM による実測データに基づく建物の動的な性能の評価結果が、住宅の長期利用において住宅履歴情報の項目の1つとして重要な位置づけとなること、また、省エネや防犯等を目的としたセンシングとの連携（センサフュージョン）が進んでくると、SHM の普及はより現実性を増すとともに、ユーザーに提供する情報価値はさらに幅広く展開していく可能性があることについて記述した。

※本報告書の中でも、SHM と親和性の高い既往管理システムの分析を行った。

5) データ計測・伝送において確実なセンサの稼働を担保すること

特に災害時に迅速な情報提供を行う SHM システムの提供事業者は、人命の安全に係るサービスを提供しているという認識が必要である。不意に発生する強振動（大規模地震・強風等）をデータ計測し、サーバへ伝送し、ユーザへ情報提供するという一連のサイクルにおいて、平時の SHM サービスよりも、より確実な稼働が求められる。



【SHM ガイドラインへの反映】

「3.1 データの取得」では、センサの停電対策、万一のデータ欠損に備えてセンサ自身に内部記憶機能を持たせておくこと、強振動時に計測トリガが確実に起動するようセンサの稼働状況を平時から定期的（1日1回等）に確認する仕組みが必要であること等について記述した。

6) 建物の構造・規模を踏まえて適切な手法により客観的かつ定量的な評価を行うこと

事業者ヒアリングを通じて「オーソライズされた客観的かつ定量的な手法が存在しない」との意見が多数挙げられた。SHM 技術のお墨付きを与えるような社会的仕組みも必要と考えられる。

現状の SHM サービスでは、層間変位が閾値を超えたかどうかの判定や、モード特性を推定する技術に関しては既に実用段階にある。一方で、建物の構造・規模に応じて決め手となるような損傷指標及び逆解析技術について、体系的な整理がなされていない。特に戸建木造住宅への適用に関しては、今後一層の知見を必要とする。



【SHM ガイドラインへの反映】

「2.1 SHM の概要」では、SHM を構成するステップの1つとして「状態の推定」に関して、現状の技術的な到達点と今後の課題について記述する中で、上記について触れた。

また「3.2 状態の推定」では代表的な逆解析手法を整理するとともに、「2.3.2 推定のレベル」では推定のレベルに応じた損傷指標を整理した。

7) 評価結果を分かりやすく提供すること

現状の SHM サービスでは、設計者や施工者向けに、WEB を通じて情報提供する仕組みは実用段階にある。一方で、所有者や居住者向けの分かりやすい情報提供方策についての知見が不足している。SHM による診断情報を分かりやすく提供するための内容・方法の検討とともに、住宅所有者に対する建物の動的な計測・評価の必要性についての普及啓発が必要と考えられる。



【SHM ガイドラインへの反映】

「2.1 SHM の概要」では、SHM を構成するステップの1つとして「診断情報の提供」に関して、現状の技術的な到達点と今後の課題について記述する中で、上記について触れた。

また「3.4 診断情報の提供」では、リスクコミュニケーションの考え方に基づく所有者や居住者向けの情報提供のイメージを整理した。

8) 共通的なデータモデルに基づきデータを蓄積・管理すること

推定結果をどのように解釈するかは、ユーザの判断に委ねられている場合が多い。未だ実建物への適用事例が少ないことから、推定結果が対象建物にとってどのような意味を持つかの診断・解釈に資する知見が不足している。推定結果を踏まえて補修・補強等の対策に活用していくためには、SHM 情報の記録を一定のデータベース構造の下に蓄積・管理していく仕組みが必要である。



【SHM ガイドラインへの反映】

「2.1 SHM の概要」では、SHM を構成するステップの1つとして「診断」に関して、現状の技術的な到達点と今後の課題について記述する中で、上記について触れた。

また「3.3 診断」では、SHM の実測データに基づく評価結果を外観目視情報との間でキャリブレーションしたり、住宅履歴情報や定期点検項目の1つとしての活用、一定の匿名化処理を行った共通基盤には情報の二次活用者が広くアクセスできる等、新しい社会的仕組みの検討も必要となることに言及した。さらに「3.5 SHM 情報の蓄積・管理」では、SHM 情報の活用者（設計者、施工者、公的機関、生活関連サービス事業者、研究者等）が、広くアクセスできるような共通基盤の情報項目についても示した。

9) 二次活用者に対するアクセス権限を設定していること

情報は基本的には所有者のものである。所有者による情報管理を支援するために、SHM サービス事業者、管理会社、設計・施工会社等の関係主体がどこまでの閲覧・編集権限を有しているか、アクセス制御について検討しておく必要がある。



【SHM ガイドラインへの反映】

「3.5 SHM 情報の蓄積・管理」では、システムのユーザとして3つの区分（所有者／システム管理者／二次利活用者）を想定し、それぞれのアクセス権限の設定方法の一例を整理した。また居住者の立場からは分譲・賃貸の別により、分譲住宅の場合は管理組合の合意が、賃貸住宅の場合は管理会社間での手続きが必要となることを触れた。

10) 情報やデータのバックアップシステムを備えていること

SHM 情報への不正アクセスの防止や個人情報保護の観点から、情報アクセス時の個人認証等を定めておくなど、一定のセキュリティ対策が求められる。特に多世代利用住宅においては、住宅の所有者、設計者、施工者、SHM サービス事業者のいずれかが変更になる可能性が高いことから、SHM 情報が失われたり漏洩しないよう情報の管理を適切に行う必要がある。



【SHM ガイドラインへの反映】

「3.5 SHM 情報の蓄積・管理」では、住宅履歴情報の蓄積・活用を支援する情報サービス提供機関向けに定められている基本ルールになぞらえて、SHM 情報のセキュリティ管理や所有者間の承継等について示した。

2. SHMによる診断結果の表現・提供方法等に係る課題

本節では、SHMによる診断結果について、情報の受け手のリテラシーに応じて分かりやすい表現や提供方法等について課題等を検討した。

既に一部の建設会社等でSHMサービスの提供を開始している事例を調査し、計測物理量、診断方法、診断結果の表現・提供方法等の現状を把握した。次に、SHMによる診断結果の提供先としてどのような関係主体が考えられるかを整理し、リスクコミュニケーションの観点から、情報の受け手の区分に応じた情報提供のあるべき考え方を示した。それらを踏まえて、診断結果の表現・提供方法の例を具体的に記述した。

2.1 SHMサービスの事例調査

SHMサービスの提供を開始している事例において、どのような形で診断結果の表現・提供が行われているかを把握する目的から、ヒアリング調査及び文献調査を行った。

表 2.12 調査対象とした SHM システムと調査方法

調査対象システム	事業者	調査方法	
		ヒアリング	文献等調査
①無線ネットワークによる SHM システム	(株)大林組	21 年度、22 年度	(補足)
②振動・変位モニタリングによる健全性診断	清水建設(株)	21 年度	(補足)
③IT 強震計を用いた常時監視システム	百年住宅(株)	—	実施
④漏水センサ等を活用した床下の点検・管理	東京家づくり工務店の会	—	実施
⑤ロボットやセンサを活用した点検・管理	三洋ホームズ(株)	—	実施

主な調査項目

- システム概要、機器構成
- 計測物理量、診断方法
- 診断結果の表現、情報提供の方法・タイミング
- SHM サービス事業者としての課題意識 等

このうち、①のヒアリング調査の内容と結果を以下に示す。

①無線ネットワークによる SHM システム (株大林組)

[調査日] 2010 年 12 月 8 日

■システムの概要

○目的・導入効果

- ・ 地震後の健全性確認が重要となる施設における、発災直後の迅速な被災度判定に焦点を絞っている。
長期的な劣化等については現時点では対象外。
- ・ 適用対象となる建物は、原子力分野（原子炉周辺建屋・補助建屋・事務本館等）、地震後の避難所になり得る建物（学校・病院・自治体等）、BCP が重要となる建物（工場・事務所ビル）等。住宅等への拡大については見通しは不明。
- ・ 適用対象となる構造種別はRC造。鉄骨造や木造等への適用については、現時点では対象外。

○主な機能

- ・ 建物ごとに予め設定した閾値に対し、地震時においてどの段階に該当したかを瞬時に判定し、PCの画面を通じてセンサユニットごとに3段階の判定結果を表示する。

○全体構成

- ・ センサユニット、無線ルータ、コーディネータ、モニタリング用 PC

■要素技術

○センサ技術

- ・ センサの種類：AEセンサ、廉価な加速度センサ
- ・ センサの設置箇所：
AE センサ：事前のFEM解析を通じて損傷が発生しうるRC躯体面に設置（柱・梁）。
加速度センサ：建屋内の代表的な階に設置（1階・最上階等）。
- ・ 設置センサ数：建物の規模によるが比較的多数を想定（1棟あたり数十個以上）。
例えば3階建RC造、長辺48m×短辺24mの規模の建物では、加速度センサを1階・3階にそれぞれ2個、AEセンサを1階に6個設置した研究論文を公表している。
- ・ センサにおける計測物理量の1次処理：
センサからのデータの通信負荷や電力消費の軽減を目的として、センサ内部のCPUで計測物理量の1次処理を行う点が、本システムの特徴の1つ。
AE センサ：閾値ごとのAE頻度
加速度センサ：単位時間当たりのゼロクロス数、加速度最大値、加速度絶対値和
- ・ センサの計測トリガ：一定の加速度を検知した場合に計測を開始する。
平常時においてセンサは休止状態。
無線ルータとコーディネータ間のネットワークは常時接続されている。
- ・ センサの生死判断：1日1回行っている。
地震時に一部のセンサが起動しない場合に備え、比較的多数のセンサを設置することで冗長性を持たせている。センサ間の主従関係等は特に存在しない。

○通信技術

- ・ 省電力無線ネットワーク（Zigbee）を用いている。
- ・ 通信速度やデータ伝送量に限りがある。これがセンサにおいて1次処理を行っている理由。
- ・ 電波強度やノイズ干渉の問題から、センサ及び中継器としての無線ルータをどこに設置すべきかの通信試験を行っている。 上述した3階建RC造の建物の場合、無線ルータは1階に5台、2階に2台、3階に2台設置した。

○推定技術

- ・ ローカルな損傷判定：AE頻度に基づきコンクリートのクラックを検知。
- ・ グローバルな損傷判定：加速度振幅の絶対値和とゼロクロス回数の関係に基づき判定。
- ・ 閾値の設定：事前のFEM解析を通じて複数の段階を設定する。
- ・ これらの損傷判定は、コーディネータ側で行う。
- ・ 評価結果を踏まえた補修の可否までは言及しない。それはユーザ側で判断すること。

■サービスの項目・水準

○提供するサービスの位置づけ

- ・ A 情報の取得：地震時
- ・ B 推定：部材・層（AEセンサデータから）、全体（加速度センサデータから）
- ・ C 診断：自己評価（測定結果に基づく絶対評価）
- ・ D 診断結果の提供：発災直後（センサユニットごとに赤・黄・青で色分け）
- ・ E 履歴情報の管理：原則として建物内。但しリモート管理も可能。

○全体的な考え方

- ・ サービスの項目・水準は、様々なSHMシステムの位置づけを明確にする意味で効果的。
- ・ しかしこの分類をもって絶対的な良否判定基準（水準）とするのはあまりよくない。SHMのようにシステムごとに対象とする現象、施設、ユーザの求めるサービスの内容が極めて広範に及ぶ可能性のあるものを、無理にランク付けする必要はあるのだろうか。
- ・ サービスの項目として、サービスの継続性、コスト等の観点も必要ではないか。
- ・ サービス項目Aで、例えば地震時被害の評価を目的としているシステムにおいて「常時微動」は意味を持たない。システムで取り扱おうとする事象に応じて、情報の取得タイミングは異なる。
- ・ サービス項目Cで、「相対評価」が望ましいような表現になっているが、個別の建物損傷を評価するシステムにおいては、類似建物群のデータベースは意味を持たない。ハウスメーカーの中で供給戸数の多い商品であれば考えられるが、そもそも個別の設計が原則である建築において、類似建物群のデータベースにどのような意味があるのか、別に議論が必要と思われる。
- ・ サービス項目Eで、「遠隔地」よりも「建物内」の方が、水準が低いとされている。地震直後の緊急判定に用いるシステムは「遠隔地」であることよりも、例え通信手段が途絶しても即座に判定できる方が高機能であることは確実。これも、システムが狙う事象に応じて水準が異なってくる。

■情報の蓄積・管理

- ・ 情報の蓄積・管理に関するルールやガイドラインは無い。
- ・ 本システムでは劣化を対象外としており、長期的に蓄積したデータに基づき何らかの評価を行うこと

を想定していない。

- ・ データや判定結果は、建物内で表示することを原則としており、ネットワーク等を通じて外部（ネットワークホルダー外）に情報を送ることは想定していない。

■診断結果の表現

- ・ 診断結果は、建物内に設置されたPCの画面を通じて、最終的な判定に用いたグラフ上で3段階の判定結果として示される。
- ・ ただし、現時点のシステムは外販を目的としたものではなく、診断結果の表示についてはプロトタイプとしての暫定版である。

■今後の課題等

○損傷指標の検証

- ・ 振動台試験や実建物における地震観測記録等を通じて、提案する損傷指標の効果について一定の知見は得られている。
- ・ これは全てのSHMシステムに共通と考えられるが、それでもまだ、システムをより確実に提供していくためには知見が十分とはいえない。

○コスト

- ・ 低コスト化を目指してシステムの開発を進めてきたが、ユーザが要望するコストは限りなく低いのが現状。
- ・ 普及が進んでいない現段階では、センサ等のデバイス単価に量産効果が期待できず、コストが下がらないために普及が進まないという悪循環を招いてしまう。
- ・ 普及に耐える製品・サービスを提供するためには、基盤の設計、製造ラインの検討、完成品の検査、商品機能の保証、販売とアフターケア等、膨大なコストがかかる。

○システムの物理的寿命と維持管理

- ・ 建物の寿命は短くても数十年であるが、SHMシステムに用いられる電子デバイスの寿命はせいぜい10年である。このギャップが、システムの長期的なランニングコストの増加と維持管理の難しさを生み出している。
- ・ SHMシステムは基本的に「安全」に係わる装置であるため、本来機能を発揮すべき状況下で万一動作しなかったり、誤動作することは避けなければならない。普及が進むにつれ、このあたりが大きな課題になると考えられる。

■その他の意見

- ・ 地震時の応急危険度判定の代わりに、スクリーニングを迅速に行い、詳細に調査すべき対象を割り出すことが重要と考えている。
- ・ 日常的なメリットの付与よりも、地震時のBCPの面から訴求していきたい。例えば、本震を受けて一旦避難した従業員に対し、責任者が業務再開を指示する際の判断材料の1つとして、SHMの活用が考えられる。
- ・ 原子力分野では、モニタリングしていること自体がPAに寄与すると考えられるが、やはり、技術利用の面からのメリットで訴求していく必要がある。

- ・ 土木分野では、建築分野と比較すると「維持管理」の面からのモニタリングの取組みが進んでいる。地震動による損傷よりは通常使用下における劣化を主なモニタリング対象としていることや、公共サービスでありひとたび損傷すると社会的影響が大きいこと等が要因として考えられる。

なお、平成 21 年度のヒアリング調査の概要は以下の通り。

《取組み内容》

- 電力会社や一般建物向けに、モニタリングサービスの提供を行っている。
- グローバルモニタリングを目的とした振動センサと、ローカルモニタリングを目的としたAEセンサを組み合わせたシステムを開発中である。

《技術的課題》

- 地震時の診断のみで劣化は対象としていない。固有振動数が急激に変化した場合は別だが、微妙な低下だけでは何とも結論付けられないため、劣化を対象外としている。
- 閾値の設定と、ユーザーにとって分かりやすい情報提供が課題。
- 常時計測しているとデータ量が膨大となるため、データの蓄積・管理が課題。
- 無線センサシステムを開発しているが、センサへの安定的な電力供給やセキュリティの確保が課題。

《社会的課題》

- 電力会社の担当者の間では、モニタリングの重要性は認識されているものの、必要不可欠とまでいくための切り札に欠けるため普及していない。システムを導入したからには社会的に説明責任が問われる可能性があることが障壁の1つとなっている。

《課題解決方策》

- データの最終的な活用方法を明確にし、かつ、それが社会的に認知されれば、建物の性能保証ツールとして、また、被災時の診断の優先順位設定に役立つ技術と考えている。
- 診断のためにわざわざ稼働停止すると経済的損害を被る原子炉等では、稼働中に診断するニーズがあり、本技術がマッチする。
- 配管減肉に対する適用ニーズは考えられる。
- CO2、温度などのセンシングとの組合せで普及させるのが現実的。
- 防犯分野において、警備会社が急激に業績を伸ばしてきた経緯などを参考にすると、普及の糸口が見えてくるかもしれない。
- 普及啓発、法制度化を含め、社会的に機運が高まってくれば追い風となる。

2.2 診断結果の提供先として考えられる関係主体

SHM システムの概念図を整理し、建物所有者、システム管理者、SHM 情報の二次利活用者という 3 者の位置づけを明確にする。

建物の設計図面等とともに定期的な点検・診断結果等の記録を残す取り組みとして、政策的には「住宅履歴情報」の整備・普及が進みつつある。こうした点検・診断の記録に、SHM による建物の動的な性能の評価結果を付加することで、住宅の維持管理・流通がより高度化していくことが期待される。そこで SHM システムの概念図は、住宅履歴情報になぞらえると、例えば次のような形で整理できる。

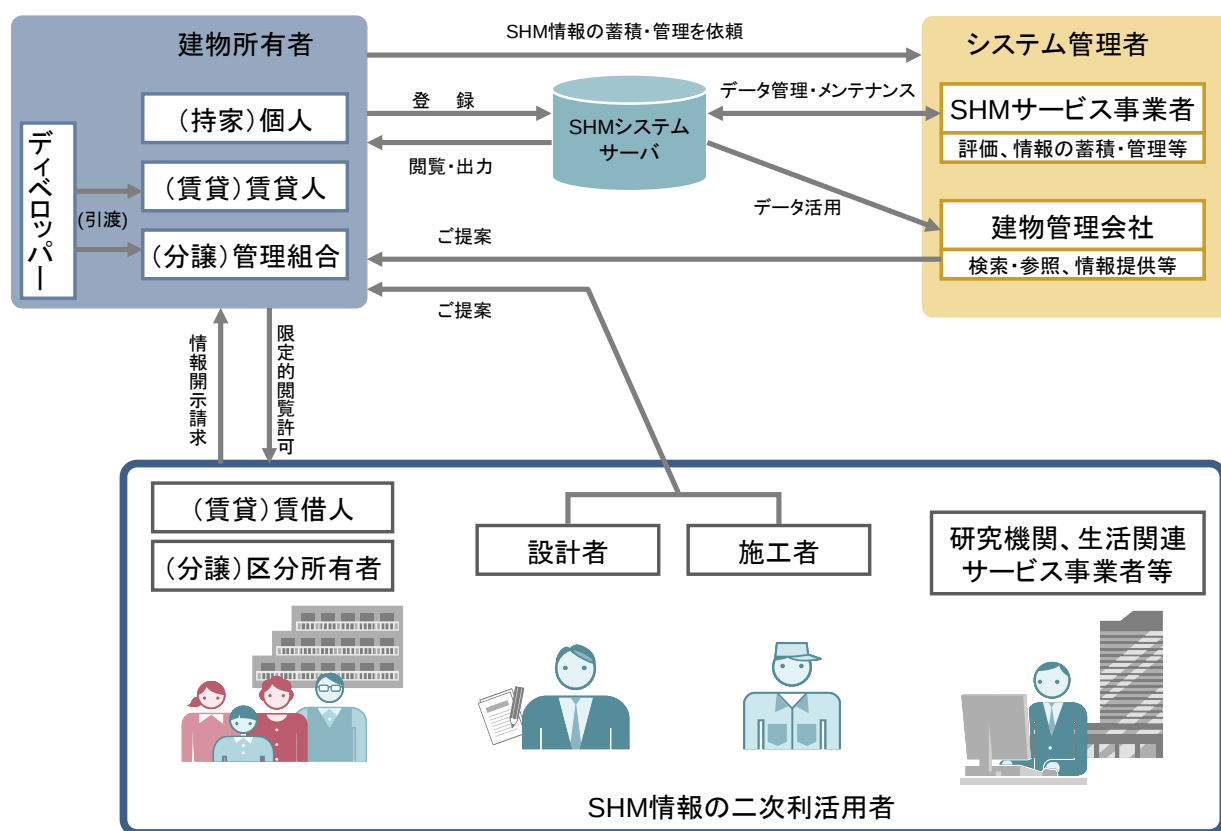


図 2.15 SHM システムの概念図

このように、SHMによる診断情報の提供先は、所有者や居住者（ノンプロフェッショナル）、設計者・施工者等（プロフェッショナル） という 2つの区分が存在することが分かる。

2.3 情報の受け手に応じた情報提供の考え方

SHMによる診断結果の提供に際しては、情報の受け手の特性に応じて、その内容・方法・タイミング等を検討する必要がある。

例えば所有者や居住者等の関係主体に対しては、対象者のリテラシーレベルに応じて診断結果を分かりやすく伝えることが必要となる。設計者・施工者等の関係主体に対しては、自ら解析・評価を行うニーズも考えられることから、情報やデータを適時かつ正確に提示することが必要となる。

1) プロフェッショナル向け情報提供

設計者・施工者等の関係主体にとっては、竣工後の一定期間、建物の実物性能を確認するニーズが考えられる。こうしたプロフェッショナル向け情報提供においては、高信頼なシステム運用とともに、ニーズを踏まえた内容・方法により適時に情報提供していくことで、基本的には要求が満たされる場合が多い。

また、ユーザ自身が自ら解析・評価を行う目的から、計測された生データをそのままダウンロード可能とするようなニーズにも応えていく必要がある。

2) ノンプロフェッショナル向け情報提供

所有者や居住者等の関係主体にとっては、診断結果を分かりやすく伝えることや、災害時に適切な対処行動を引き起こさせることが最終目標となる。

リスクコミュニケーションの過程を表すCAUSEモデル等の既往の研究を踏まえ、対象者の階層ごとに情報提供の方針（コミュニケーション目標）を立案する。CAUSEモデルとは、リスクコミュニケーションの過程を示す考え方であり、関係者間の信頼の確立（Credibility）、リスクに気付かせる（Awareness）、リスクの理解を深める（Understanding）、対処行動の理解を得る（Solution）、対処行動を引き起こす（Enactment）の各段階の頭文字である。

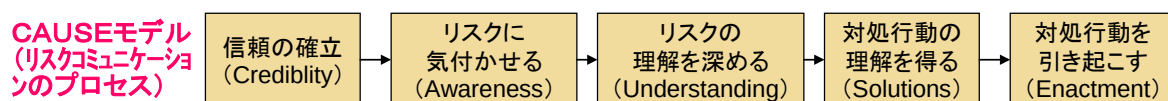


図 2.16 リスクコミュニケーションの過程を示すCAUSEモデル

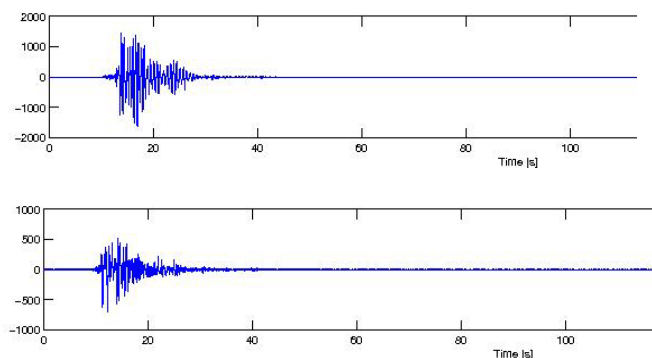
- ①簡単に説明しようとする则不信感を招き、詳細に説明するほど誘導している印象を持つ。そのため、受け手の理解度に応じて情報を階層化して提供することが望ましい。
- ②特に居住者に対しては、診断結果を分かりやすく情報提供する。確率などの連続値よりも、等級などの形でクラス分けして伝達することが望ましい。
- ③他の類似建築物との比較など、相対的な安全性のレベルを併せて示すとよい。
- ④診断結果の不確実性についても示すことが望ましい（データ量の問題、モデリングの問題、手法の問題等）。
- ⑤居住者向けの情報提供手段として、例えば共同住宅であれば、各戸に設置された情報端末等を活用することが有効である。

2.4 SHMによる診断結果の表現・提供方法の例

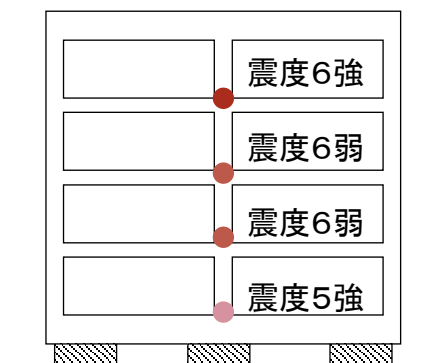
ユーザへ情報提供する内容の例を示す。

1) 基本情報 【サービス形態によらず共通】

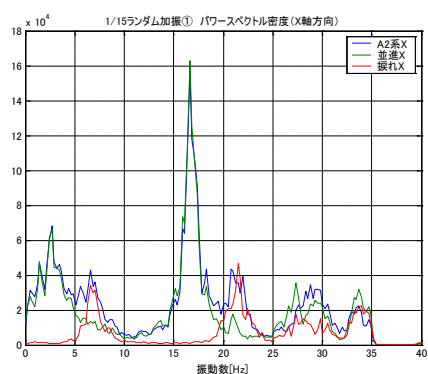
加速度や層間変位の時刻歴波形、モード振動数やモード形状等のモード特性等、計測された建物の計測・評価結果をそのまま提示する。



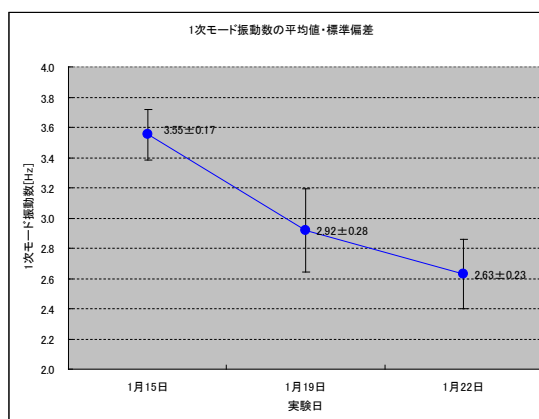
加速度時刻歴波形



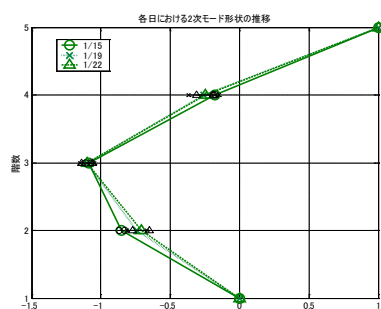
各階の震度情報



スペクトル情報



固有振動数の算出結果



モード形

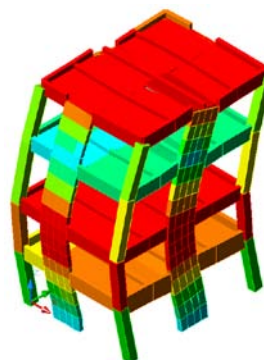


図 2.17 「基本情報」の提供イメージ

2) 被災直後の安全行動の支援情報【災害時システム】

被災時計測の結果を評価・分析し、ユーザに対して避難の要否、建物の継続使用可否等に関する情報を迅速に提供する。ユーザにとっては応急危険度判定に代わる情報価値がある。

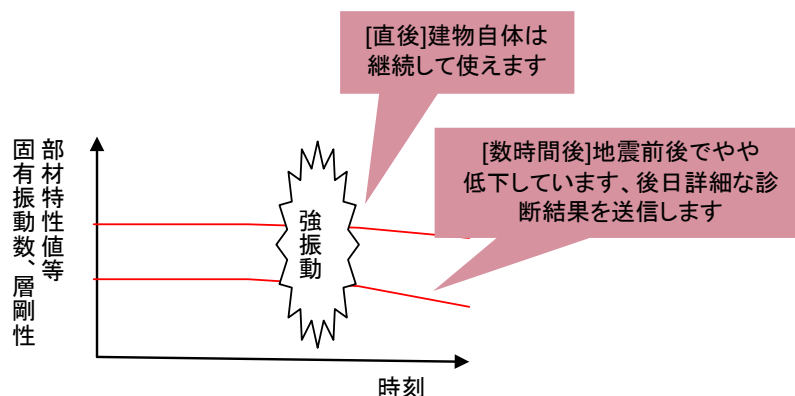


図 2.18 災害時システムによる「被災直後の安全行動の支援情報」の提供イメージ

3) 判断・対応に係る支援情報【サービス形態によらず共通】

災害発生から一定期間が経過すると、或いは平時において、損傷・劣化の発生箇所や度合い、構造技術者による詳細な診断の要否、補修・補強の要否等に関する情報ニーズが高まってくると考えられる。診断結果の提供には、迅速性よりも、多少時間を要しても高信頼性が要求される。

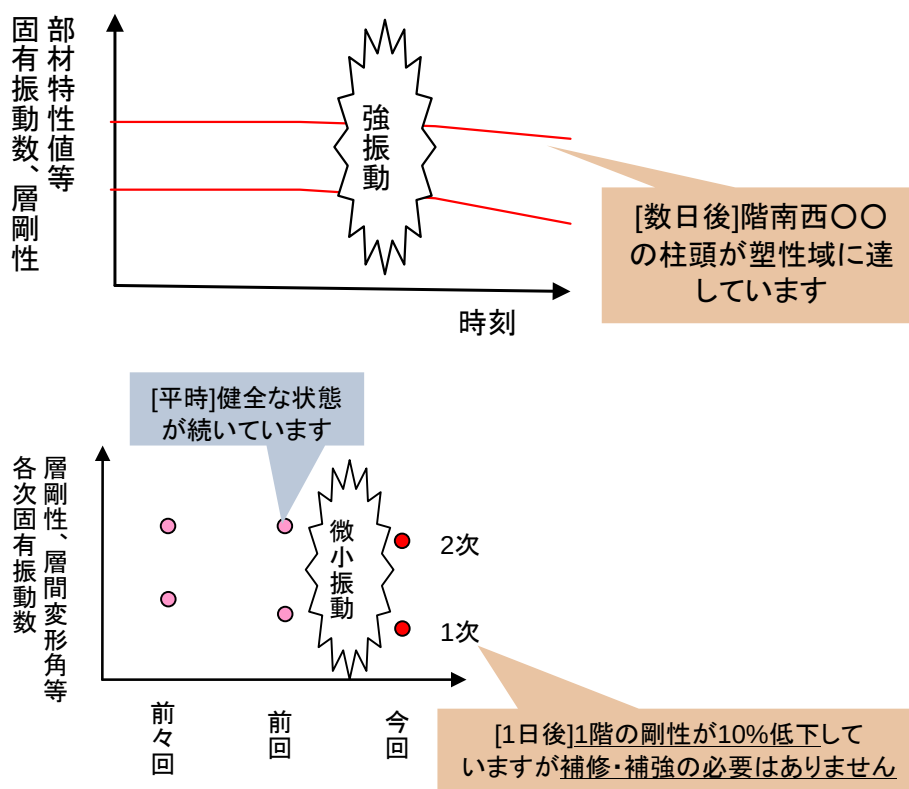


図 2.19 「判断・対応に係る支援情報」の提供イメージ

4) 被災前後の比較情報【平時①システム】【平時②システム】

被災後の微小振動（風・中小地震・常時微動）データを評価・分析し、被災前の微小振動による評価結果と比較することにより、大きな変化が生じていないという情報が判明・提供されれば、ユーザにとって安心情報としての価値がある。

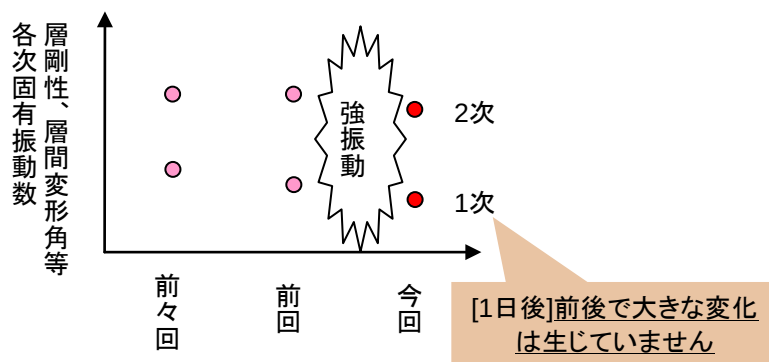


図 2.20 平時システムを通じた「被災前後の比較情報」の提供イメージ

5) 使用性に係る情報【平時①システム】【平時②システム】

微小振動（風・中小地震・常時微動）下での定期計測の結果から、振動特性の経年変化を捉え、使用性（サービスビリティ）の評価を行い、情報提供する。

[平時]
 ○建物全体の傾斜等の変化は生じていません
 ○床下の腐食等は発生していません
 ○3階以上の入居者は高さ180cm以上の家具を設置する際、固定するようにしてください
 ○904号室の環境振動は○○が原因と考えられます

図 2.21 平時システムを通じた「使用性に係る情報」の提供イメージ

6) その他の情報【サービス形態によらず共通】

上記1)～5)以外に、例えば、次のような情報提供も考えられる。

類似構造物群のデータベースに基づく建物性能の相対評価結果や、逆解析結果を正解析のための建物モデルに反映し、予測地震動による被害のシミュレーション結果を示すこと等が一例として考えられる。

[平時]類似構造物群の中で平均的な振動特性を有しています

[平時]先日の地震を受けて建物の特性が変化しました。今後仮に震度6強クラスの地震が到来した場合、数箇所が塑性降伏すると考えられます。

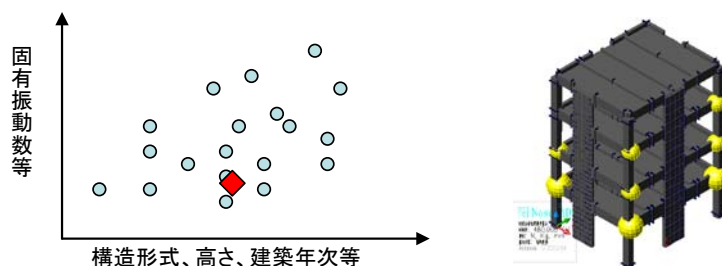


図 2.22 その他の情報の提供イメージ

3. SHM利活用に向けた論点整理

継続的なシステム運用のための要件（2.1）及びSHMによる診断結果の表現・提供方法（2.2）に係る検討結果を踏まえ、技術／制度／サービスという3つの側面から、SHMの利活用に向けた論点整理を行った。

1）技術の面から見た論点整理

SHM技術は、①データの取得、②状態の推定、③診断、④診断結果の提供、⑤SHM情報の蓄積・管理という5つの手順により構成される。①～⑤のそれぞれについて、現状の技術的な到達点と課題を整理する。

表 2.13 SHMの技術的な到達点と今後の課題

	現状の技術的な到達点	今後の課題
① データの取得	高精度な計測が可能なセンサが多数開発されている。	初期コストが高く普及が進みにくい状況。また電子デバイスの寿命が10年程度と短く、ランニングコストがかかる。 建物の規模によっては、センサの設置・運用が経済合理性に欠ける場合がある。
② 状態の推定	層間変位が閾値を超えたかどうかの判定や、モード特性を推定する技術に関しては、既に実用段階にある。	建物の構造・規模に応じて決め手となるような損傷指標及び逆解析技術について、体系的な整理がなされていない。 特に戸建木造住宅への適用に関しては、今後一層の知見を必要とする。
③ 診断	推定結果をどのように解釈するかは、ユーザの判断に委ねられている場合が多い。	未だ実建物への適用事例が少ないことから、推定結果が対象建物にとってどのような意味を持つかの診断・解釈に資する知見が不足している。
④ 診断結果の提供	設計者や施工者向けに、WEBを通じて情報提供する仕組みは実用段階にある。	所有者や居住者向けの分かりやすい情報提供方策についての知見が不足している。
⑤ SHM情報の蓄積・管理	大容量のデータを安定的に蓄積・管理するシステムは実用段階にある。	運用コストが高い、大電力を必要とする等の課題がある。 データベース構造の標準化が今後必要。

SHM は未だ確立された技術とはいえ課題が残されているが、今後、実測データの蓄積と共有が進むにつれて、解決が期待される部分が多い。

特に「診断」を行うための管理指標の設定については、標準的なデータベース構造の下で情報を管理・活用していく仕組みが不可欠である。情報は所有者のものであるという原則は存在する一方で、今後の技術的な改善や技術利用の促進のためには、SHM情報の二次利活用者（設計者、施工者、公的機関、生活関連サービス事業者、研究者等）が、広くアクセスできるような環境の整備も必要となる。そのため次のようなデータに関しては匿名化処理を行い、共通基盤として設定しておくことが望ましい。

- ①建物情報（建物規模、構造種別、築後経過年数、地盤条件）
- ②センサ情報（センサの種類、分解能等の性能）
- ③計測情報（計測データ、日時、温湿度、災害イベントとの対応等）
- ④解析情報（固有振動数等の指標の推定結果）

2) 制度の面から見た論点整理

SHMによって建物の動的な情報が蓄積・管理されることが、ユーザにとってどのような情報価値をもたらすのか、さらには、SHMによる動的データの計測評価を、既存の安全性能・耐久性能・使用性能の評価の枠組みの中でどう位置づけるのかを明確にしておく必要がある。

具体的には微小振動時の計測・評価は、ユーザにとって補修・補強等の判断材料となることだけでなく、使用性（サービサビリティ）に係る情報として流通段階で優位な条件となることについて法制度上で位置づける等が考えられる。また、SHMの実測データに基づく評価を定期点検項目の1つに位置づけることや、住宅履歴情報項目の1つとしての活用等が考えられる。

上記の対応が、SHM 技術に対するお墨付きを与え、センサ活用を政策的に後押しすることにつながる。センサの活用に対する住宅所有者の理解を得るための普及啓発も重要である。

3) サービスの面から見た論点整理

SHMシステムの設計は、システムの利用目的、対象建物、経済合理性等、様々な観点から適切な考え方にに基づき行う必要がある。例えば、設置するセンサ数を増やすほど、より詳細な推定レベルが確保されるが、対象とする住宅の規模によっては、その運用コストを考慮すると適用困難な場合がある。また、住宅の構造に応じたセンサの種類・設置箇所等を選定する必要がある。センサシステムを「センサ部」と「スマート部」を切り分け、ユーザニーズに合わせてSHMシステムのグレードを選択できるような備えも今後必要と考えられる。

また、SHMによる情報提供内容に応じて、親和性が高いと考えられる既往管理システムについては、次のような検討結果が得られた。どこまでの深さの情報提供を行うかに応じて、親和性のある既往管理システムとの間で、センサ及び情報提供ツール等の共有を図ることが有効と考えられる。

こうした省エネや防犯等を目的としたセンシングとの連携（センサフュージョン）が進んでくると、SHM の普及はより現実性を増すとともに、ユーザに提供する情報価値はさらに幅広く展開していく可能性が考えられる。

表 2.22 SHM サービス【平時①】【平時②】と親和性のある既往管理システム
(SHM 情報の提供内容別)

SHM システムによる情報提供内容	親和性のある既往管理システム
基本情報	○住宅履歴情報管理 ○不動産情報管理
被災前後の比較情報	○防犯カメラ(タイマー記録) ○配管漏水検知
判断・対応に係る支援情報	○BEMS(故障診断・予測)
使用性に係る情報	○健康情報管理 ○温湿度計測 ○ライフライン検針 等

表 2.23 SHM サービス【災害時】と親和性のある既往管理システム
(SHM 情報の提供内容別)

SHM システムによる情報提供内容	親和性のある既往管理システム
基本情報	○共用設備運転監視(状態監視)
被災直後の安全行動の支援情報	○緊急地震速報 ○火災警報器 ○マイコンメータ ○防犯カメラ(常時記録)
判断・対応に係る支援情報	○スマートメータ(供給最適化) ○ホームセキュリティ(緊急時駆けつけ)

Ⅲ－３． 実大建物の加振実験を通じた技術の有効性検証

本章では、防災科学技術研究所と国土技術政策総合研究所の共同研究の一環として防災科研 E-defense が実施した中層 RC 造の実大規模建築構造物の震動台加振実験において、多世代利用総プロ管理技術 WG として行った SHM システムの実装、実用性の検証について述べる。

※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」に基づいて実施した。

1. 平成 20、21 年度実験における逆解析等の結果の概要

管理技術 WG では、(独)防災科研 兵庫耐震工学研究センター（E-defense）で行われた中層 RC 造構造物の実大建物加振実験（平成 21 年 1 月実施）において計測・記録されたデータを用いて、平成 20、21 年度に、構造特性の変化や損傷の有無・箇所に関する構造ヘルスマニタリング（以下、「SHM」という。）技術の適用性を検証した。

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 80 m²（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。

各階高は 1 層から順に 3.9m、3.4m、3.9m、3.4m であり、振動台に設置した部分（基礎）の高さは 1.25m で、枠組みのコンクリート柱の規格は 600×600mm、柱間距離はそれぞれ 10m(短軸方向)と 12m(長軸方向)である。その枠柱の間に四枚の耐力壁があり、壁の厚さは 300mm、長さは 2000mm である。

試験体の写真及び断面図は図 3.1 のとおりである。また、試験体の平面図及び防災科研センサの設置箇所は図 3.2 のとおりである。

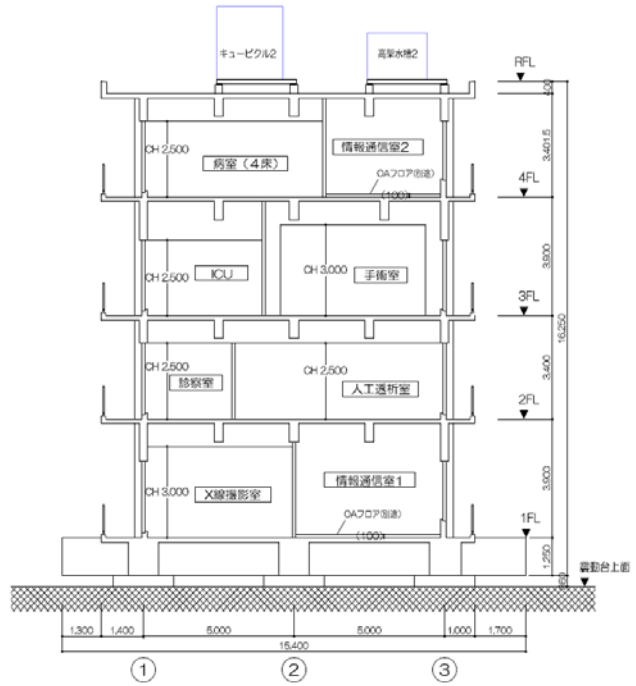


図 3.1 試験体の外観（左）と断面図（右）

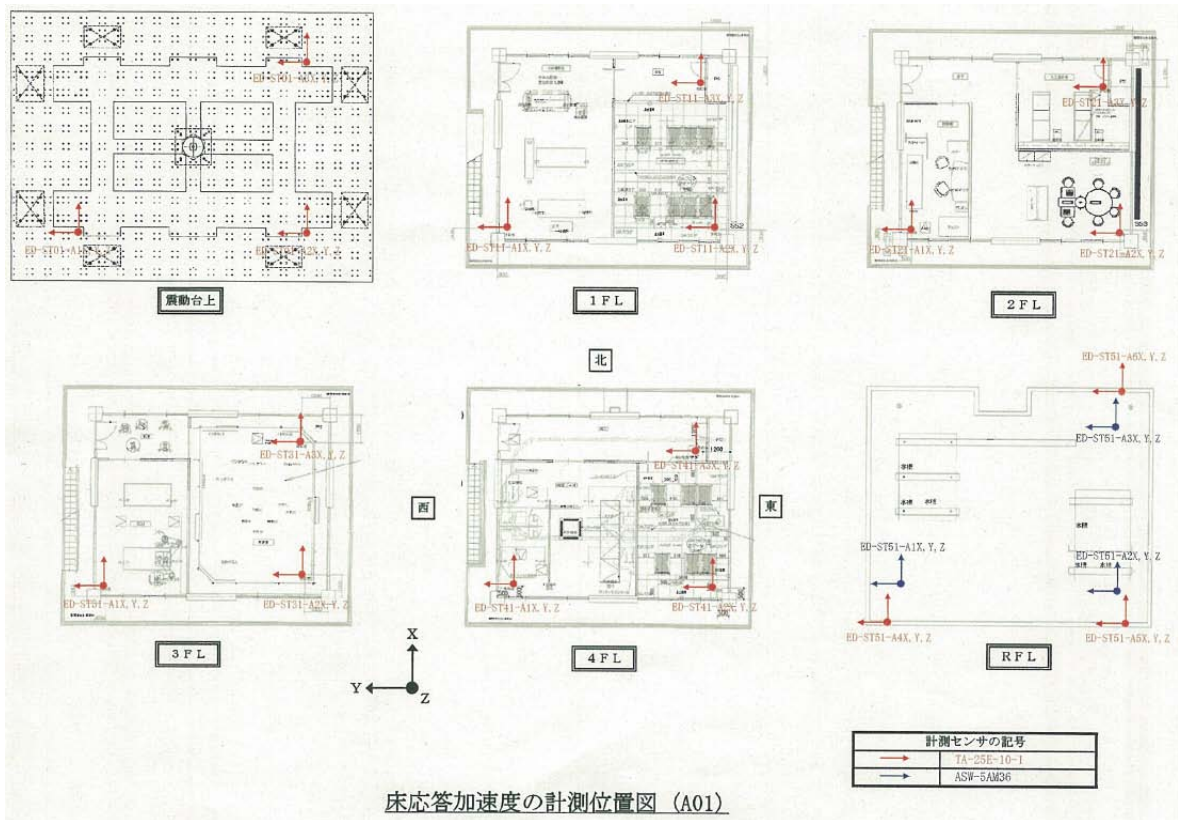


図 3.2 試験体の平面図及び防災科研センサの設置箇所

1) 各層質量、層せん断力

試験体の各層質量、層せん断力は以下のとおり。

表 3.1 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

耐震設計用モデルの固有値解析結果について、3 次までのモード情報は以下のとおり。

建物全体としてみれば、1 次が 3.802Hz（長軸Y方向）、2 次が 3.92Hz（短軸X方向）、3 次が 4.8Hz（ねじれ）である。

表 3.2 耐震設計用モデルの固有値解析結果

次数	固有周期(s)		
	X 方向	Y 方向	ねじれ
1 次	0.255	0.263	0.207

1.2 センサの概要

試験体の各階床には、防災科研 E-defense において、3 軸加速度計が 3 個、各階層に層間変位計が 2 個設置された。

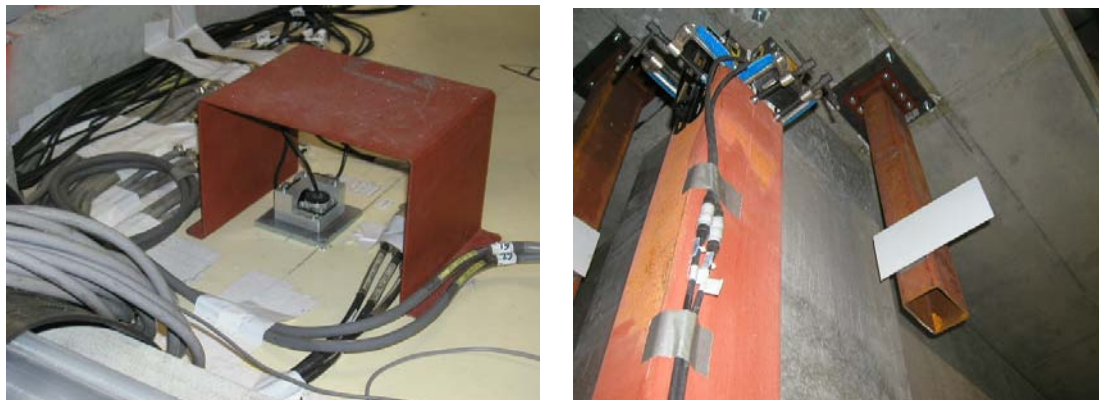


図 3.3 センサの外観（左：加速度計、右：層間変位計）

管理技術WG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、実建物への設置が大掛かりで困難となることが考えられるため、SHM技術の適用性を検証する目的からは対象外とし、加速度データを中心に用いることとした。

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 3.3 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	$\pm 0.1\% \text{ F.S}$ 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)

1.3 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 3.4 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 軸観測波形は次のとおり。

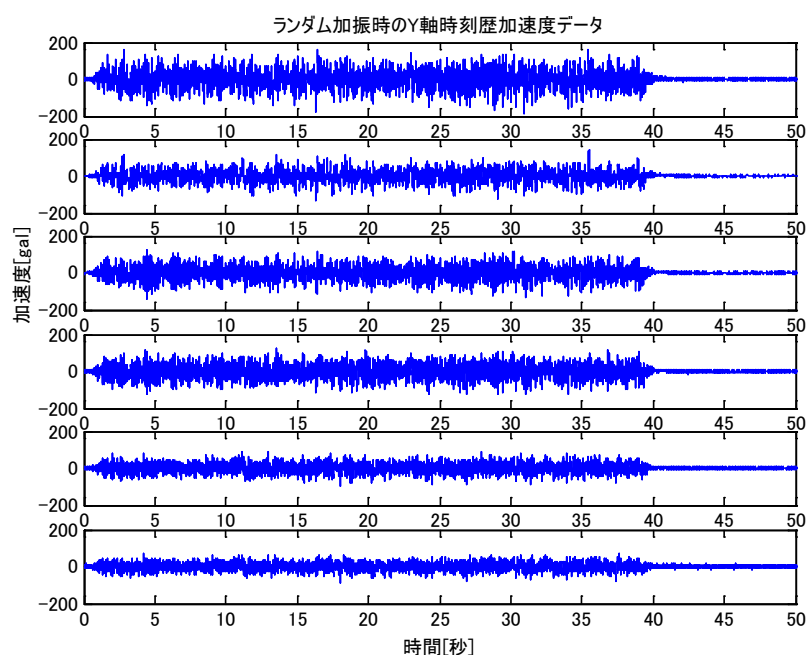


図 3.4 ランダム加振時の各層観測波形

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。

三の丸波

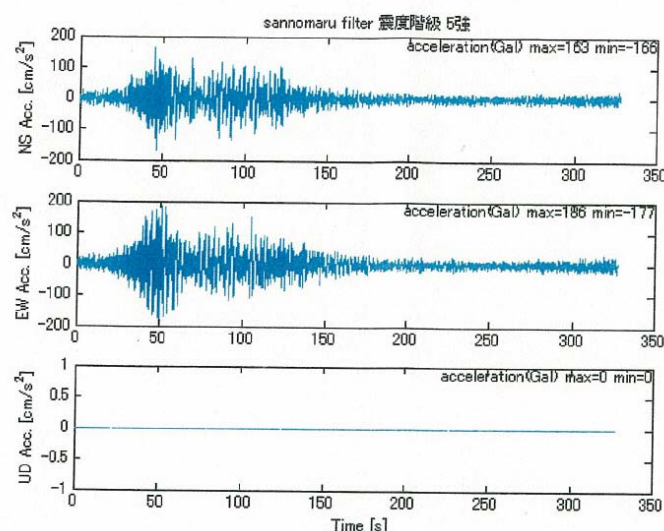


図 3.5 三の丸波加振（2008/1/15）の入力波形

(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。

横浜波

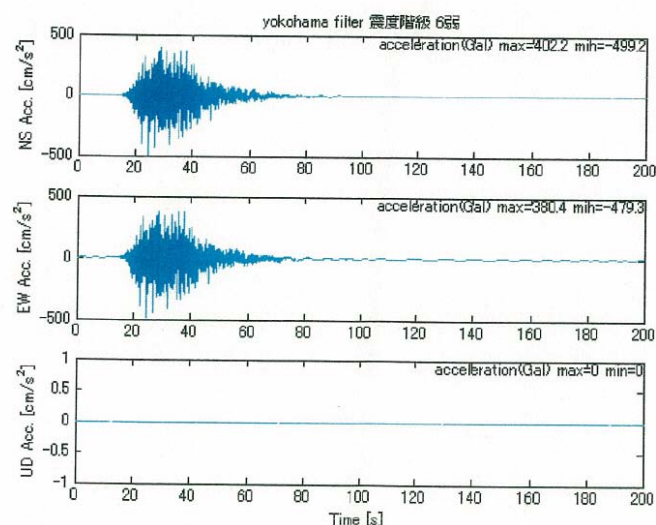


図 3.6 横浜波加振（2008/1/15）の入力波形

(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。

エルセントロ 50kine

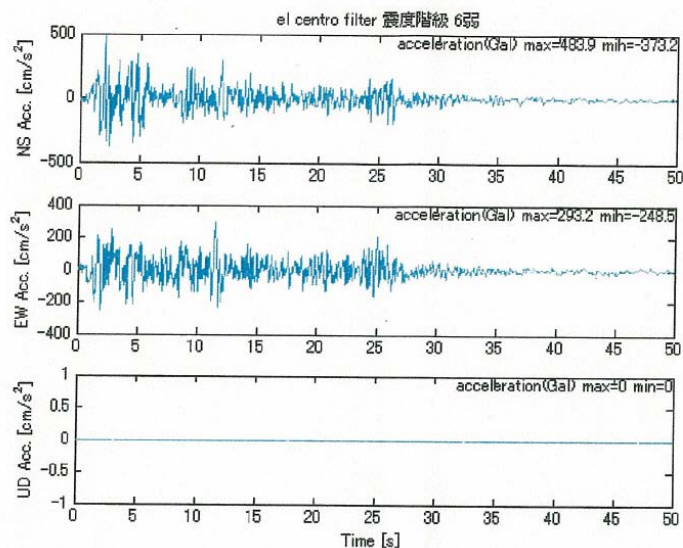


図 3.7 エルセントロ波加振（2008/1/19）の入力波形

(4) JMA 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%

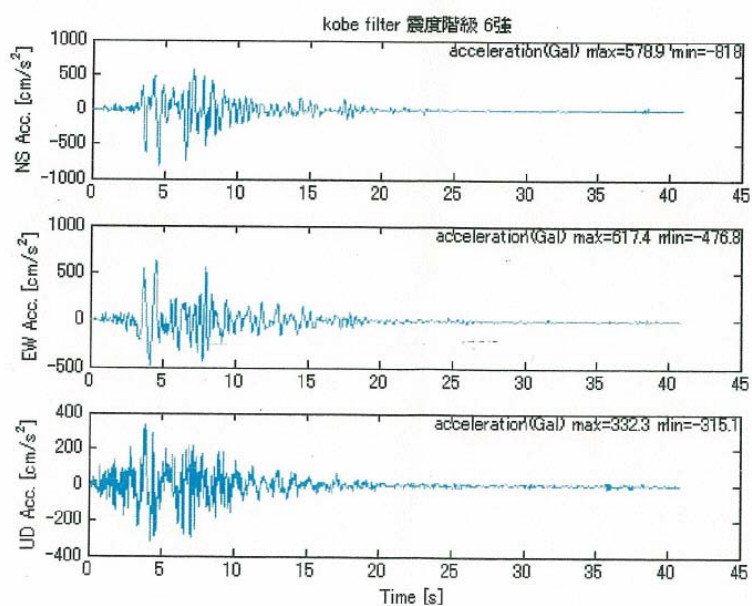


図 3.8 JMA 神戸波加振（2008/1/22）の入力波形

1.4 平成 20 年度逆解析の成果の概要

平成 20 年度は、建物全体のグローバルな損傷推定を目的として、建物の 1 階及び頂部の加速度データを基本として、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 3.5 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。

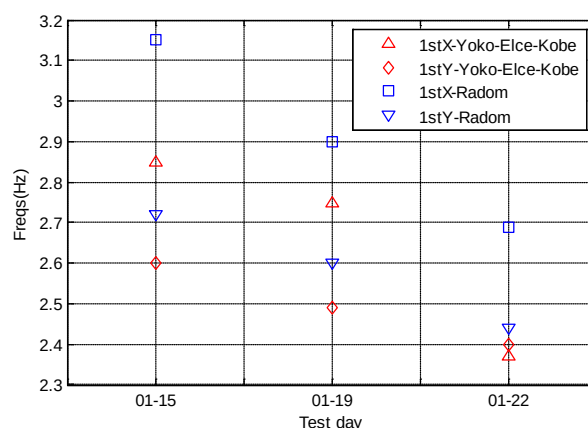


図 3.9 加振日別の 1 次固有振動数の推定結果

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。

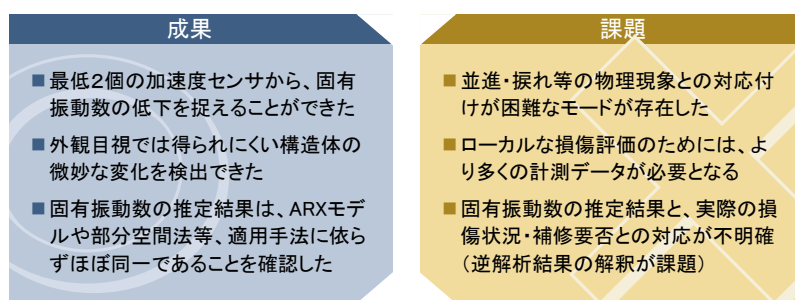


図 3.10 平成 20 年度逆解析の成果と課題

1.5 平成 21 年度逆解析の成果の概要

平成 21 年度は、建物の層レベルの損傷推定を行うことを目的とした。

管理技術 WG の下にシステム開発 SWG を設置し、平成 20 年度に取り扱った最低 2 個の加速度計のデータ以外に、各層に設置された計 18 台の加速度計、計 8 台の層間変位計、設計情報等、様々なデータや事前情報を広く活用して逆解析を行った。

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した。

検討結果は、平成 22 年度に行われる防災科研 E-defense 実験において、管理技術 WG として実装する SHM システムプロトタイプ的设计に反映する方針とした。

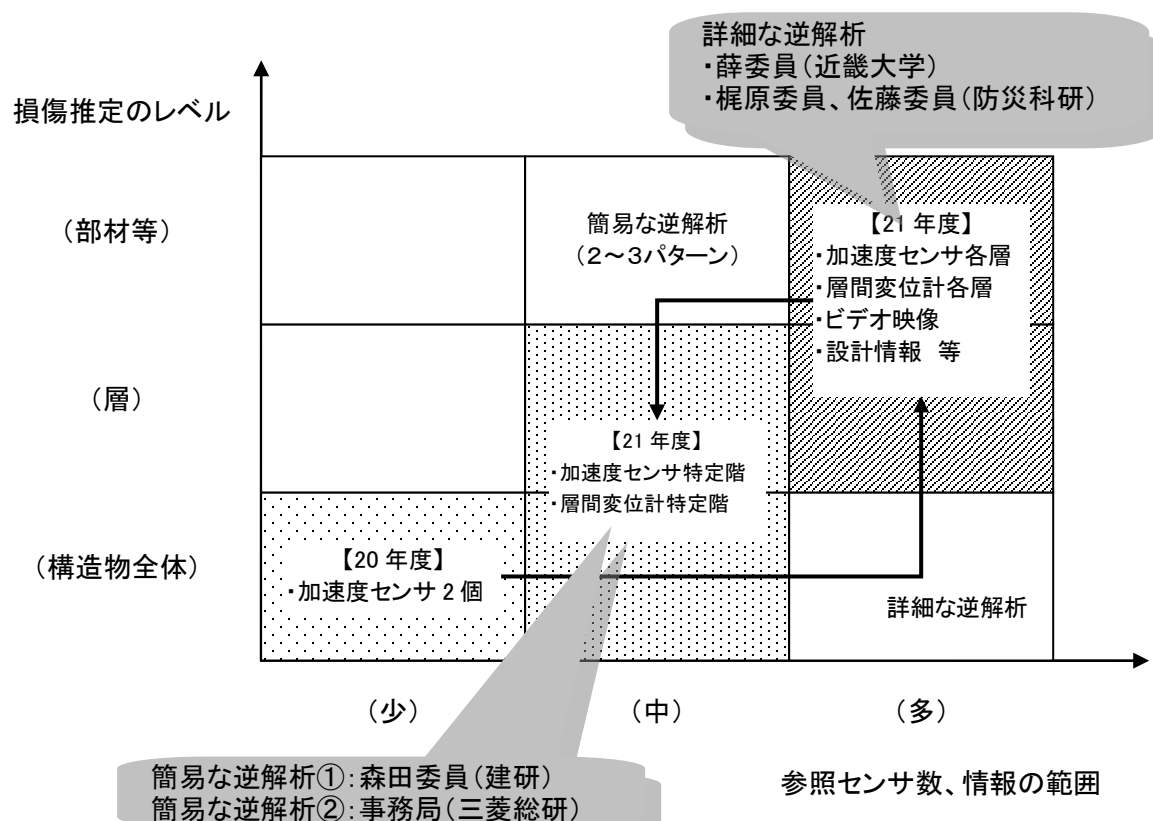


図 3.11 平成 21 年度の取り組みのイメージ

表 3.6 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	・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 薛委員 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)

1) ランダム波加振データの逆解析

ランダム加振データを用いた逆解析の結果は以下のとおり。

- 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。

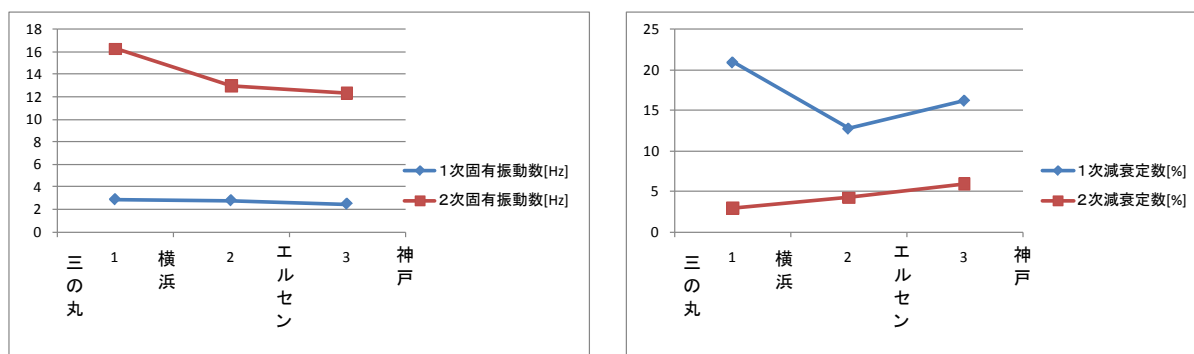


図 3.12 ARX モデルに基づくモード情報の推定結果（左：固有振動数、右：減衰定数）

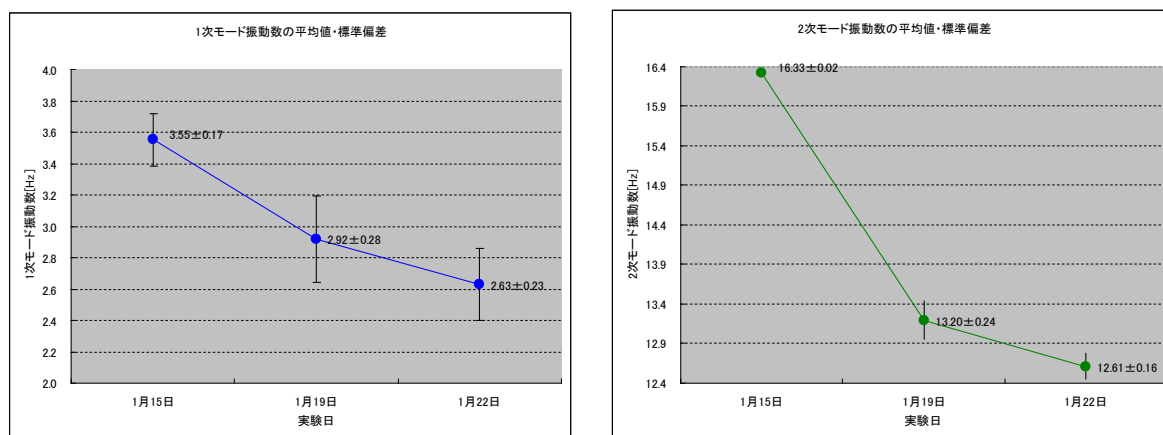


図 3.13 部分空間法に基づくモード振動数の推移（標準偏差付、並進 X 方向 1 次・2 次）

- 詳細な逆解析結果では、各層の剛性について、1/15 を基準とした場合に各日で 4 割程度の低下を捉えることに成功した。

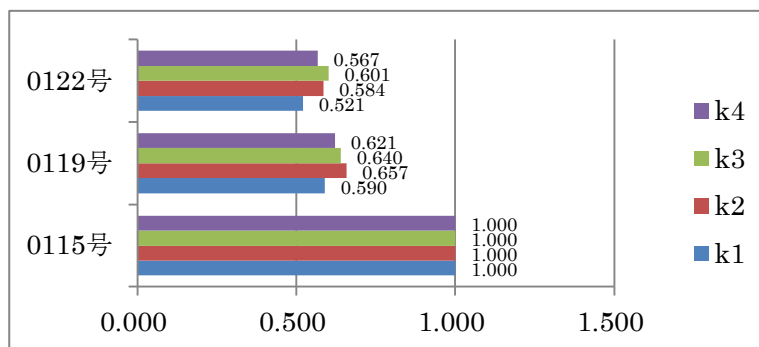
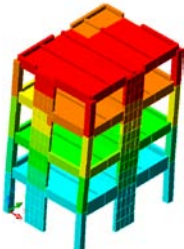
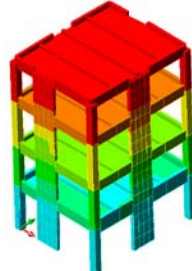
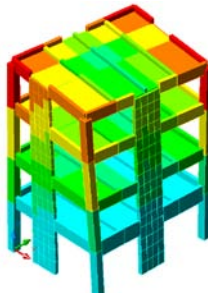
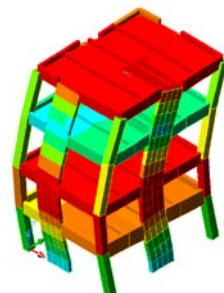
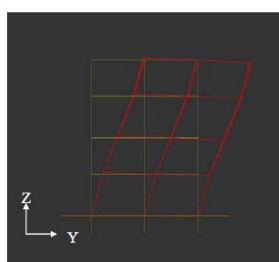


図 3.14 1 月 15 日を基準とした剛性推定値の比

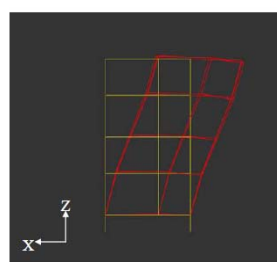
- さらに、詳細な逆解析では、推定された剛性等のパラメータを活用して、柱・主梁・スラブなどの材料特性の仮定に基づき、有限要素法による正解析モデルを構築したところ、モード特性は、設計上の解析モデルとほぼ整合した。これは研究段階ではあるが、将来的なSHMの技術的な到達点として、構造図面等の設計情報の履歴が残されていない既存住宅への適用の可能性を示すものと考えられる。

表 3.7 有限要素モデルのモード特性（第 4 モードまで）

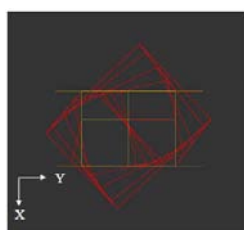
第 1 モード（y），振動数：3.91373	第 2 モード（x），振動数：3.92661
	
第 3 モード（ねじれ），振動数：5.62464	第 4 モード（y），振動数：13.5068
	



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 3.15 設計上の解析モデルのモード特性

2) 地震波加振データの逆解析

地震波加振データを用いた逆解析の結果については以下のとおり。

- 簡易な逆解析において、計測データを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。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。

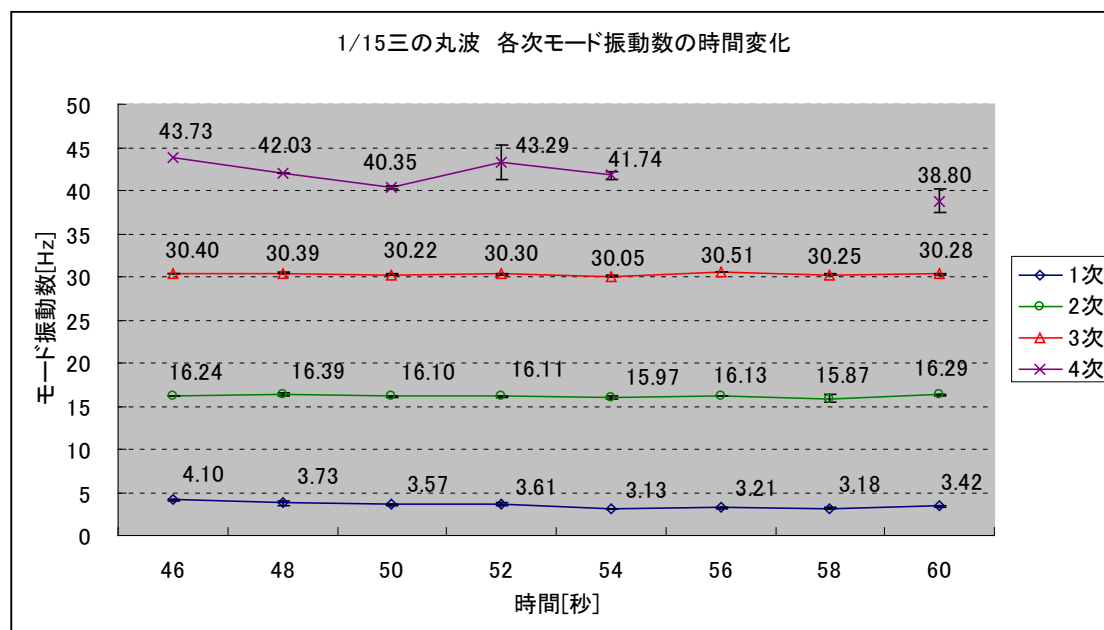


図 3.16 1/15 三の丸波加振時の各次モード振動数の時間変化

- 詳細な逆解析において、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 $3 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 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、ほぼ整合することが分かった。なお荷重増分解析における保有耐力は「層間変形角が $1/100 [\text{rad}]$ を超えた時点」としており、これに達するのは2階が最も早い。しかし今回の加振はいずれもこの範囲に収まるもので、JMA神戸波加振の場合でも $1/350$ 程度であった。

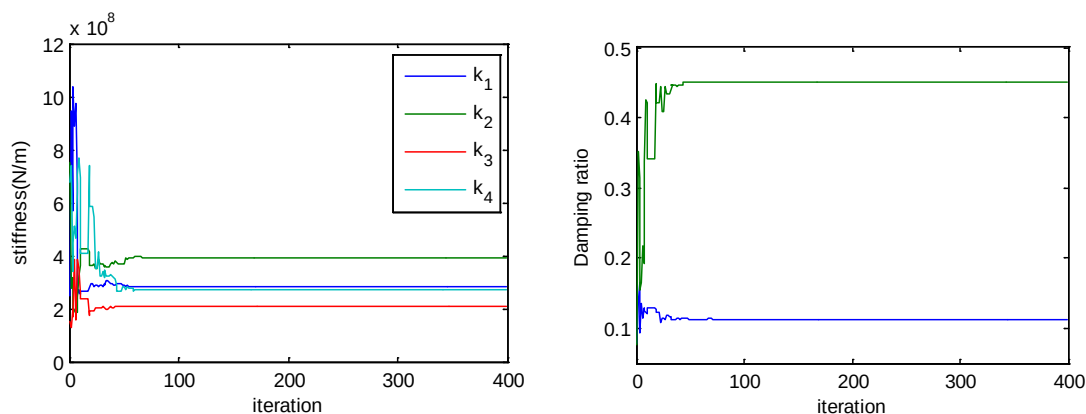


図 3.17 1/15 横浜波加振後のパラメータ推定結果（左：剛性、右：減衰比）

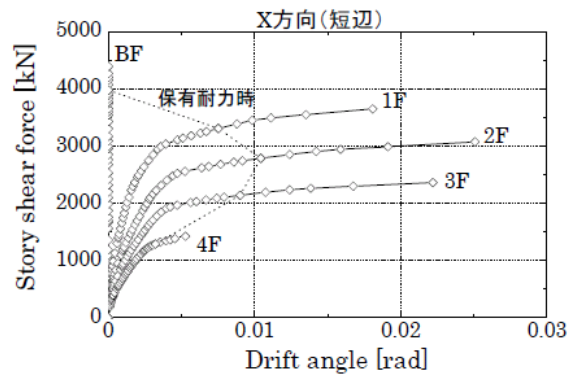


図 3.18 耐震設計用モデルの荷重増分解析結果（左：X 方向、右：Y 方向）

- さらに、詳細な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可視化した結果は以下のとおり。研究段階ではあるが、将来的なSHMの技術的な到達点として、大きな入力を受けた建物の設計モデルをアップデートすることや、予測地震動による高精度な建物被害想定の可能性が示された。

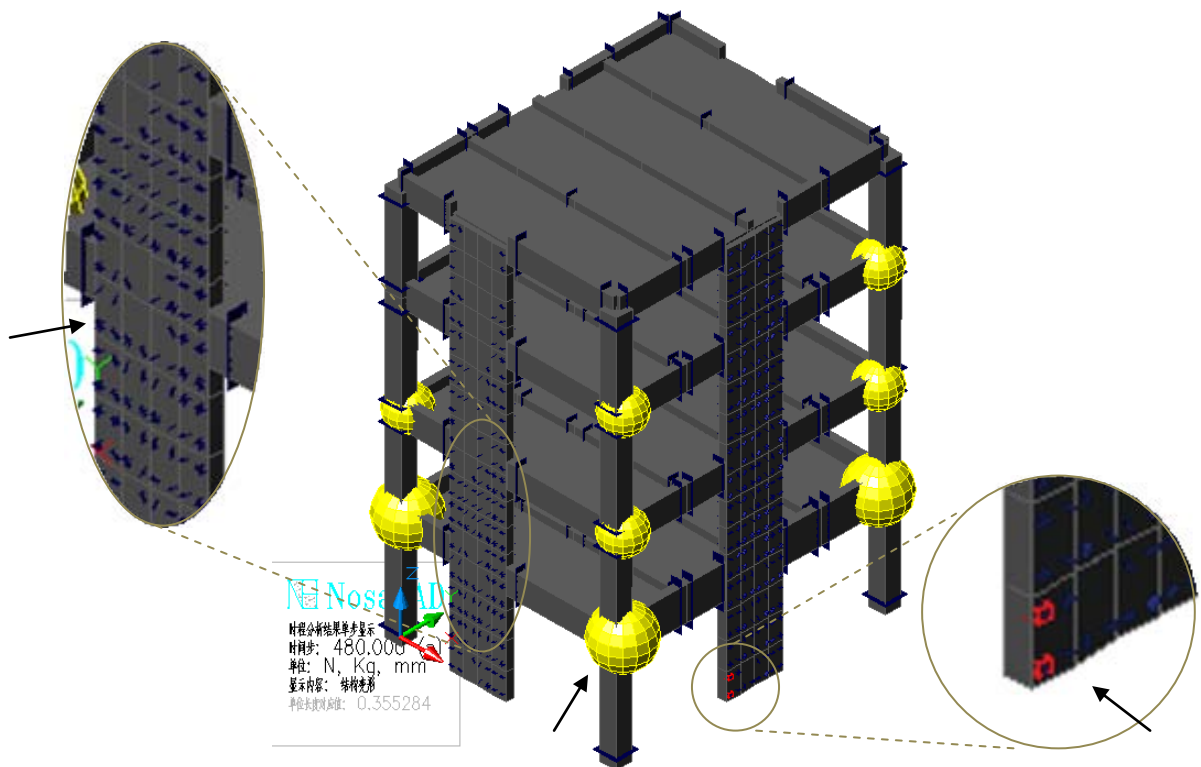


図 3.19 JMA 神戸波入力時の構造状態の予測

※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）。

2. 平成 22 年度実験及び SHM 技術検証の概要

平成 22 年 10 月、防災科研 E-defense において、中層 RC 造の実大規模建築構造物の震動台加振実験が実施された。実験の概要を以下に整理する。

1) 試験体の概要

平成 20 年度に実施された実験と同じく、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 80 m² (8m×10m)）が用いられた。

平成 22 年度は、平成 20 年度試験体の屋上階に設置されていた 2 つの高架水槽が撤去され、新たにサーバルーム（免震床）が設置された。ただし試験体の総重量に対して非常に軽量であり、これに伴う各層重量の変化は生じないものとした。

2) センサの概要

平成 20 年度に実施された実験と同様、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 個設置された（防災科研センサ）。センサの性能諸元も同様である。

平成 22 年度は、多世代利用総プロ管理技術 WG としての SHM システムを実装しており、スマートセンサを 1 階床及び 4 階床にそれぞれ 1 箇所設置した（3.3 参照）。

3) 加振スケジュールの概要

平成 22 年 10 月 12 日、15 日、18 日、21 日の各日で、ランダム波及び地震波を用いた加振が行われた。以下、加振順序のイメージ及び詳細なスケジュールについて示す。

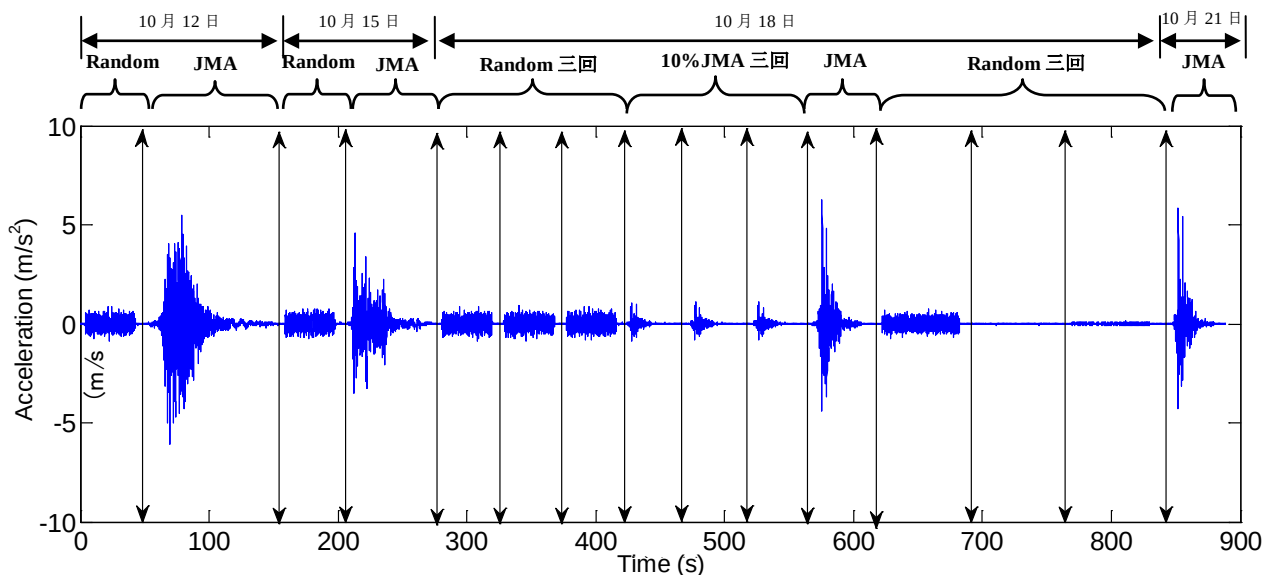


図 3.20 平成 22 年度実験における加振波とその順序（イメージ）

表 3.8 各日における加振スケジュール

日付	加振波	加振方向
10月12日	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
	三の丸	XY
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
	プロジェクト1の波形	?
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
	入力補償ランダム1	6軸
	入力補償ランダム2	6軸
	入力補償ランダム3	6軸
	補償作成(横浜波, X,Y) 1回目	XY
	補償作成(横浜波, X,Y) 2回目	XY
	補償作成(横浜波, X,Y) 3回目	XY
	補償作成(横浜波, X,Y) 4回目	XY
	横浜波100%	XY
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
10月15日	入力補償ランダム1	6軸
	入力補償ランダム2	6軸
	入力補償ランダム3	6軸
	補償作成(エルセントロ, X,Y) 1回目	XY
	補償作成(エルセントロ, X,Y) 2回目	XY
	補償作成(エルセントロ, X,Y) 3回目	XY
	補償作成(エルセントロ, X,Y) 4回目	XY
	エルセントロ50kine	XY
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
	入力補償ランダム1	6軸
	入力補償ランダム2	6軸
	入力補償ランダム3	6軸
	補償作成(エルセントロ, X,Y,Z) 1回目	XYZ
	補償作成(エルセントロ, X,Y,Z) 2回目	XYZ
	補償作成(エルセントロ, X,Y,Z) 3回目	XYZ
	補償作成(エルセントロ, X,Y,Z) 4回目	XYZ
	エルセントロ50kine	XYZ
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
10月18日	入力補償ランダム1	6軸
	入力補償ランダム2	6軸
	入力補償ランダム3	6軸
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 1回目	XYZ
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 2回目	XYZ
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 3回目	XYZ
	JMA神戸波100%	XYZ
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z
10月21日	入力補償ランダム1	6軸
	入力補償ランダム2	6軸
	入力補償ランダム3	6軸
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 1回目	XYZ
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 2回目	XYZ
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 3回目	XYZ
	補償作成(JMA, X,Y,Z) 4回目	XYZ
	JMA神戸波80%	XY
	ランダム波	X
	ランダム波	Y
	ランダム波	Z

注) 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」に基づき、防災科研よりデータを貸与頂いた実験ケースについて、黄色の網掛けで示した。

4) 検証事項

(1) 管理技術 WG センサシステムの実装

多世代利用総プロ管理技術 WG としての SHM システムを実装し、平成 22 年 10 月 18 日の JMA 神戸波入力時及びその前後の常時微動の計測・評価を通じて、技術の適用性、サービスの成立可能性を検証する (3.3 及び 3.4 参照)。

(2) 技術者の目視等に基づく調査結果との対応の確認

SHM による計測・評価結果と実際の損傷状態との対応を検証するための材料の 1 つとして、技術者の目視等によるのひび割れ等の比較データを整備する (3.5 参照)。

(3) 繰り返し入力を受けた建物の損傷推定

以下の日程及び防災科研センサを対象とした逆解析を行い、繰り返し地震動入力を受けた建物の全体系及び層レベルの損傷推定を行う。WG 事務局による簡易な逆解析 (3.6 参照) と薛委員による詳細な逆解析 (3.7 参照) を実施する。

○対象日：平成 22 年 10 月 12 日・15 日・18 日・21 日の 4 日程

○対象センサ：各層 3 箇所の加速度計

今回の検証について、仮想時間軸を用いて説明し直すと次のとおり。

2010 年 1 月（平成 20 年度実験）、2012 年（平成 22 年 10 月 12 日）、2015 年（同 15 日）、2018 年（同 18 日）、2021 年（同 21 日）と繰り返し地震動入力を受けた建物の全体系及び層レベルの損傷推定を行うという問題設定である。

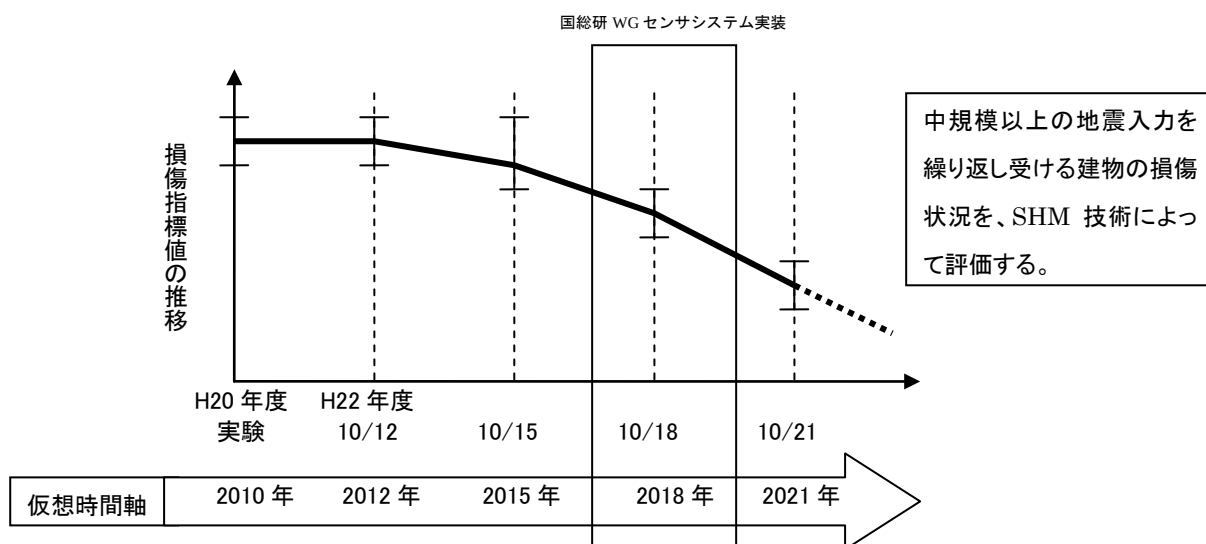


図 3.21 複数日程のデータに基づく逆解析の実施イメージ

3. 管理技術 WG センサシステムの実装

平成 22 年度は、防災科学技術研究所と国土技術政策総合研究所の共同研究の一環として、防災科研E-defenseが実施する中層RC造の実大規模建築構造物の震動台加振実験において、多世代利用総プロ管理技術WGとしてのSHMシステムを実装し実用性を検証するため、10 月 18 日（月）のJMA神戸波入力時、また、その前後の常時微動の計測を行った。

3.1 検証の目的・ねらい

管理技術 WG として実装する SHM システムの特徴及び検証の目的は、次のとおり。

1) 実装する SHM システムの特徴

- 国総研発注業務の受託者（三菱総合研究所：MRI）が、実用性の実証の具体例として既存センサ・解析システムを借用し、カスタマイズして構築。
- ベースシステムは、産学連携の K-SHM プロジェクト（慶應義塾大学、設計事務所や建設会社等の民間各社により構成）が、常時微動及び中小地震時の実建物の計測データに基づく構造特性の評価の目的で、プロトタイプシステムとして構築し試験運用しているもの。
- SHM システムの基本構成は、①スマートセンサと、2 台のサーバ（②センサゲートウェイ、③データ管理・解析サーバ）である。この他、設置環境に応じて①⇔②間のデータ通信に必要となる機器が存在する。
- 上記、SHM システムは、計測・通信・解析の情報インフラとして利用するものであり、計測されたデータ、解析結果等の情報コンテンツは、国総研（管理技術 WG）の検討の目的に限り、利用・管理する。

2) 検証のポイント

- 管理技術 WG として今回実装したセンサによる計測データに基づき、ほぼリアルタイムで逆解析を行い、大規模な地震入力を受けた建物の損傷評価を行えるかどうか
- 対象住宅、遠隔地 A（ユーザ）、遠隔地 B（診断サービス事業者）の異なる地点間で仮想 SHM サービスが成立するかどうか

【平成 20 年度・21 年度管理技術 WG の取組みとの相違点】

平成 20 年度には、防災科学技術研究所と国土技術政策総合研究所の共同研究の一環として防災科研 E-defense で実験が行われ、20 年度・21 年度と引き続き、防災科研のセンサデータに基づき、大規模な地震入力を受けた建物の損傷評価を行えるかどうかについて検証した。

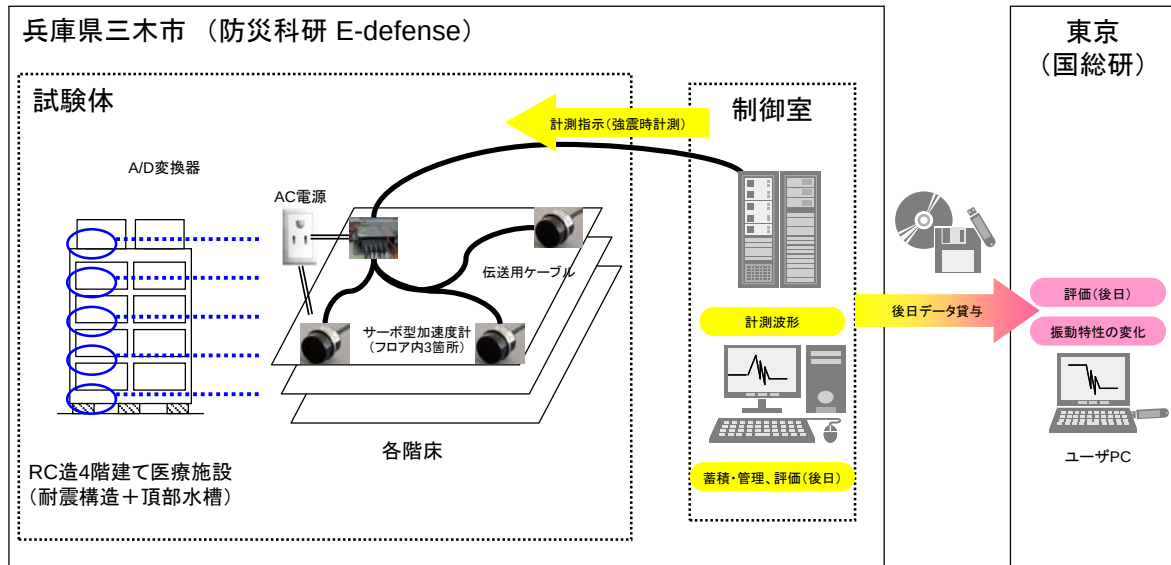


図 3.22 平成 20 年度における検証の枠組み

これに対して平成 22 年度は、多世代利用総プロ管理技術 WG の 3 ヶ年の技術的な検討の総まとめとして、SHM 技術の到達点と今後の課題を明らかにする目的から、独自の SHM システムを実装した点が、新しい取組みである。

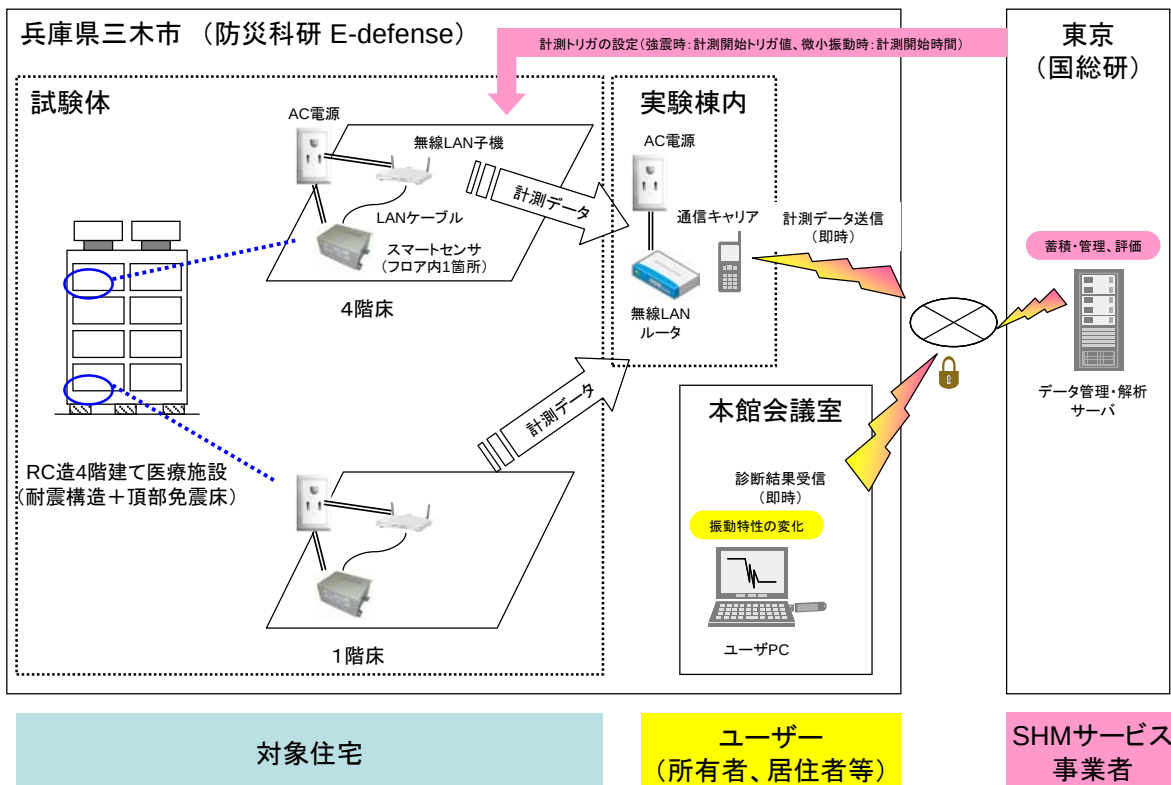


図 3.23 平成 22 年度における検証の枠組み

3.2 SHM システムの設計・構築

SHM システムの設計・構築の考え方を以下に示す。

1) 仮想 SHM サービスの形態

平成 22 年度 E-defense 実験では「計測のタイミング」及び「推定のレベル」の 2 つの観点から、次のような SHM サービスの形態を模擬し、検証することとした。

【強振動時】 強振動の把握 に基づき 全体レベル の評価を行う SHM サービス

【平時】 微小振動の把握 に基づき 全体レベル の評価を行う SHM サービス

3.1 で整理した SHM サービスの項目・内容に対して、本検証がどのような位置づけにあるかを示す。

表 3.9 SHM サービスの項目・内容と本検証の位置づけ

サービスの項目		サービスの内容
①データの取得	データはいつ計測するのか？	☒ 被災時計測 ☒ 定期計測 ☒ 被災後計測
②状態の推定	対象建物のモデル特性についてどのレベルまで推定できるのか？	☒ 全体 ☐ 層 ☐ 部材
③診断	推定結果をどのような考え方に基つき解釈するのか？	☒ 自己評価 ☐ 相対評価
④診断結果の提供	ユーザに対してどのような情報を提供するのか？	☒ 基本情報 ☒ 被災直後の安全行動の支援情報 ☐ 被災後の安心情報 ☐ 判断・対応の支援情報 ☐ 使用性に係る情報 ☐ その他
⑤SHM 情報の蓄積・管理	記録として管理するためのデータ項目やアクセス権限はどうなっているか？	※表 3.10 参照

- ① センサの計測開始条件をサーバ側で設定することにより、強振動及び微小振動の双方の計測を可能とするため「被災時計測」「定期計測」「被災後計測」を対象とした。
- ② 推定のレベルとしては、必要最低限のセンサを用いて「全体系」を対象とした。
- ③ 診断の考え方は、強震・強風を受ける前後で推定結果を比較する「自己評価」を基本とした。

- ④ 情報提供内容としては、スマートセンサによる計測データ、伝達関数等の「基本情報」に加え、被災直後に固有振動数等の指標の推定結果を迅速に情報提供可能であるかどうかを検証した。
- ⑤ SHM 情報の蓄積・管理に関しては、別表にデータ項目とアクセス権限を示す。

表 3.10 データ項目・アクセス権限

ユーザ権限					システム 管理者	建物 管理者	一般 ユーザ
ユーザ情報	ユーザ追加				○	×	×
	ユーザ権限変更				○	×	×
	ユーザー一覧				○	×	×
サーバ情報	サーバ情報閲覧				○	×	×
イベント情報	イベント情報閲覧	イベント追加			○	×	×
建物情報	建物情報閲覧	建物追加			○	○	×
		建物編集			○	○	×
センサ情報	センサ初回利用登録				○	○	×
	センサ情報閲覧	センサ情報編集			○	○	×
解析情報	建物選択	日時選択	解析結果閲覧		○	○	○
即時トリガ	建物選択	トリガ			○	○	○
一時利用	建物情報	建物情報閲覧	建物追加		○	○	×
			建物編集		○	○	×
	センサ情報	センサ初回利用登録			○	○	×
		センサ情報閲覧	センサ情報編集		○	○	×
	アップロード	建物選択	ファイルアップロード		○	○	○
	解析情報	建物選択	日時選択	解析結果閲覧	○	○	○
プロフィール					○	○	○

出典：「K-SHM プロジェクト 2009 年度報告書」、慶應義塾大学三田研究室

2) 機器構成

前1) に示したSHMサービスを実現するために必要な機器構成は、①スマートセンサと、2台のサーバ（②センサゲートウェイ、③データ管理・解析サーバ）である。この他、設置環境に応じて①⇔②間のデータ通信に必要となる機器が存在する。

①スマートセンサ

E-defense試験体内部に設置。寸法は84mm(W)*120mm(D)*56mm(H)。

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。

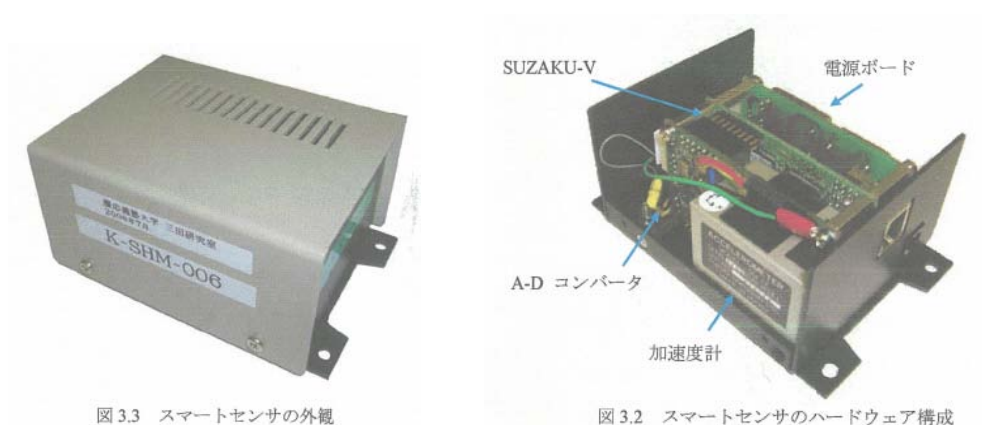


図 3.24 スマートセンサの外観（左）とハードウェア構成（右）

出典：「K-SHM プロジェクト 2009 年度報告書」、慶應義塾大学三田研究室

表 3.11 スマートセンサの仕様

表 3.1 スマートセンサの仕様

インターフェイス部	イーサネット	10Base-T/100Base-TX(RJ-45)
	プロトコル	TCP/IP(ポート 80 番使用)
	波形転送	計測データを 3 軸リアルタイム出力
センサ部	加速度計	小型サーボ型加速度計(SQ-32)
	成分数	3 軸(X 軸 Y 軸 Z 軸の 3 成分)
	測定範囲	±2000gal
	周波数特性	DC~100Hz
データ部	分解能	0.004gal 以下
	A/D 変換分解能	Σ/Δ , 24bit
	サンプリング周波数	200Hz
地震記録	記録容量	合計 7 時間(180 秒×3ch×50 波)
	トリガレベル	2000gal まで設定可能
	プレトリガ	10 秒
	ポストトリガ	30 秒
時刻部	内部時計	10ppm カレンダー時計
	時刻同期	センサゲートウェイから 10 分間隔で NTP 情報を取得
連動起動	マスタセンサとスレーブセンサは連動計測可	
電源部	DC6V~9V(専用 AC アダプタ付属)	
寸法	84mm(W)×120mm(D)×56mm(H)	
重量	約 750g	
データ転送容量	メタデータ	2,220~2,260byte(オフセット・最大加速度で変化)
	計測データ	324,000byte(3 分間)
	センサ情報	553byte

出典：「K-SHM プロジェクト 2009 年度報告書」、慶應義塾大学三田研究室

センサ設置数、設置場所等は以下のとおり。

設置数： 試験体全体で2箇所（1階床・4階床）

設置場所： フロア内の計測に適した位置（防災科研センサ A3 系近傍）※下図★印

固定方法： 試験体床⇄固定用板を接着剤、固定用板⇄センサ底板をビス留め

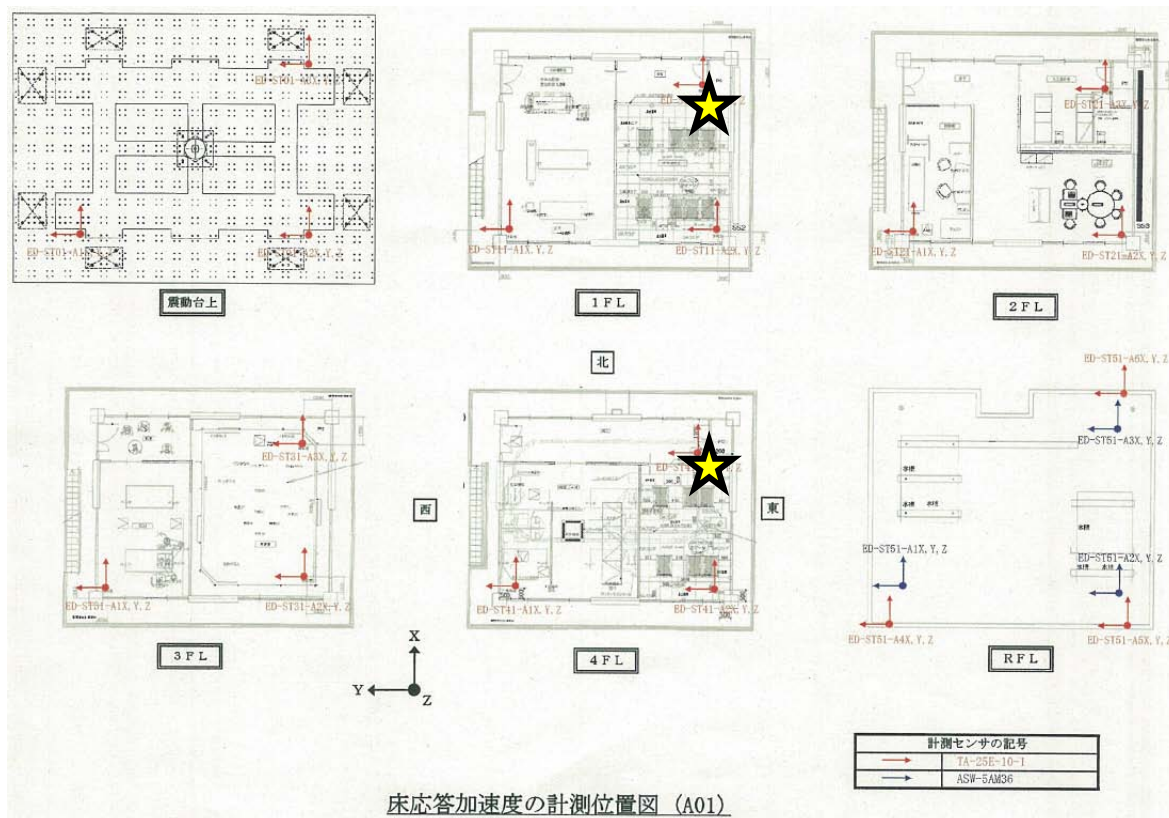


図 3.25 試験体の平面図及びスマートセンサの設置箇所

②センサゲートウェイ

設置場所は東京。

センサユニットから送信される計測データを受信し、データ管理サーバにあるデータベースに格納する。

③データ管理・解析サーバ

設置場所は東京。

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、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。

3) SHM システムの構築・実装

国総研WGとして SHM システムを実装する際は、E-defense の施設側の条件を踏まえ、防災科研のセンサに影響の無い範囲で構築する必要がある。

そこで次の 3 つのシステム案を検討し、実験前のプレテストの結果を踏まえて、どのシステム案で構成するかを検討することとした。

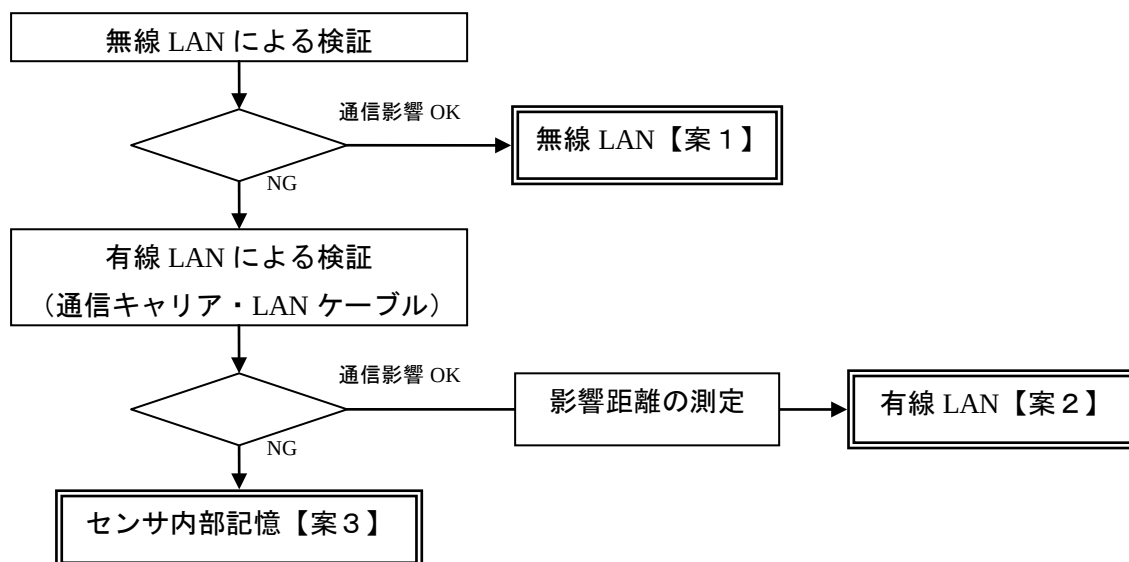


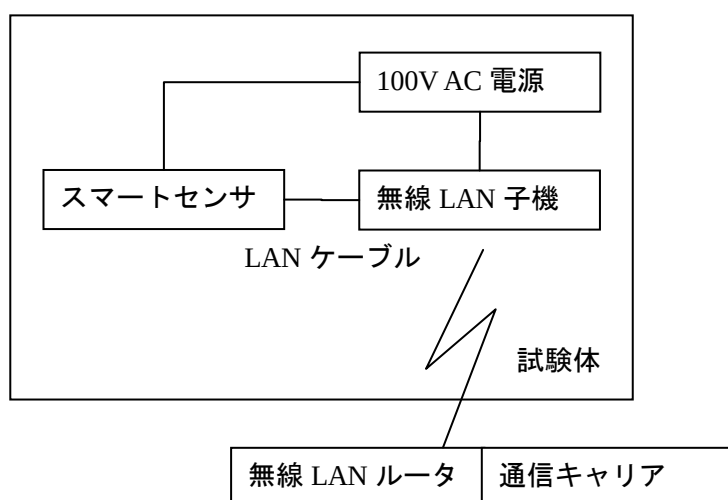
図 3.26 SHM システムの構成機器の決定のためのプレテスト手順

プレテストの結果、無線LANシステムを構築できることが判明したことから、案 1 の無線LANシステムを構築する方針とした。想定していた 3 つのシステムの概要は以下のとおり。

【案 1】無線 LAN システムによる即時評価サービスの検証

《試験体内部》スマートセンサ+LAN ケーブル+無線 LAN 子機を 2 式（1 階床・4 階床）

《試験体外部》無線 LAN ルータ+通信キャリア



試験体内及び実験棟内における無線通信の周波数帯について、防災科研のセンサへの影響の有無を確認する。

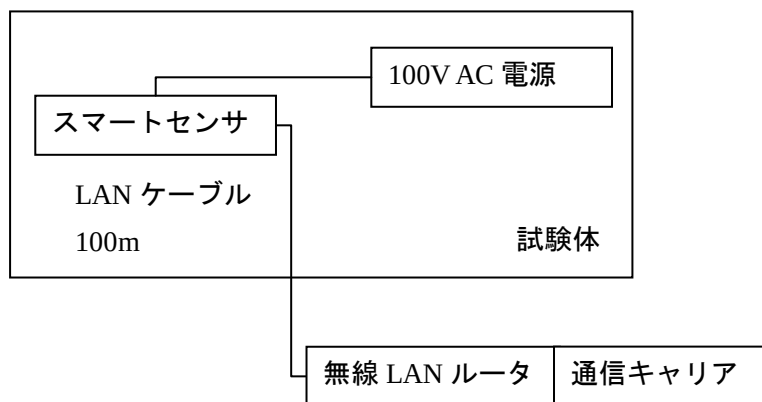
影響がある場合、案 2 を検討することとした。

図 3.27 【案 1】無線 LAN システムの構成

【案 2】 影響距離に配慮した有線 LAN システムによる即時評価サービスの検証

《試験体内部》 スマートセンサ+長距離 LAN ケーブルを 2 式（1 階床・4 階床）

《試験体外部》 無線 LAN ルータ+通信キャリア



試験体内の LAN ケーブルがノイズ源として作用するかどうか、また、実験棟内における無線通信の周波数帯が防災科研のセンサへの影響の有無を確認する。

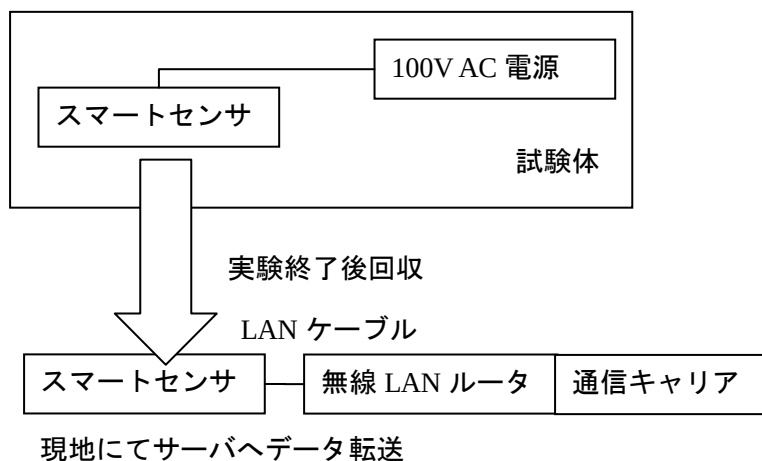
影響がある場合、できるだけ無線の発信元を離す方針とした。それでも NG であれば、案 3 を検討することとした。

図 3.28 【案 2】 有線 LAN システムの構成

【案 3】 センサの内部記憶装置を活用した事後評価サービスの検証

《試験体内部》 スマートセンサ 2 式（1 階床・4 階床）

《試験体外部》 スマートセンサ 2 式+無線 LAN ルータ+通信キャリア

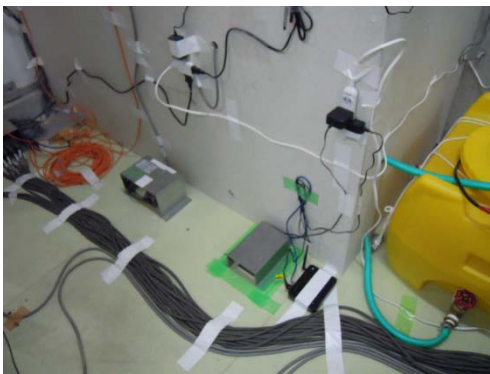
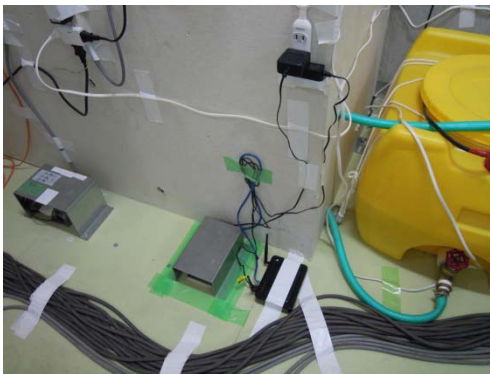


案 1・案 2 のいずれも採用困難な場合は、内部記憶装置を活用して後日の評価を行うこととした。

図 3.29 【案 3】 センサ内部記憶システムの構成

3.3 SHM システムによる計測・評価の実施

防災科研E-defenseが10月18日（月）に実施した中層RC造の実大規模建築構造物の震動台加振実験における、多世代利用総プロ管理技術WGとしてのSHMシステムの検証実験の状況を以下に示す。

	試験体の全景 制御室から見て右側（西側）から撮影
  	1 階床のスマートセンサ 【加振前】（上 2 枚） スマートセンサと無線 LAN 子機を、制御室から見て左側の部屋の左手前スペース（防災科研センサの隣）に設置。 センサと子機は LAN ケーブルで接続し、それぞれ AC 電源から電力供給。 フロア上にベースを両面テープと接着剤で固定し、センサを載せ、保護カバーを被せている。 【加振後】（下） 正常にデータを計測することができた。 加振前に固定した位置から、特にずれ等は発生していない。

	4 階床のスマートセンサ 【加振前】（上） 1 階床でトリガ値 50gal を超えた場合あるいは時刻指定があった場合に、4 階床でも自動的に計測を開始する仕組みとした。 【加振後】（下） <u>補償波加振の際、ここ4 階の無線LAN子機から1 階の親機に向けての通信に障害が生じ、一部でデータ欠落が生じた。</u> 加振前に固定した位置から、特にずれ等は発生していない。
	実験棟内の無線 LAN ルータ 【加振前】 実験棟内の窓際の一角を間借りし、無線 LAN ルータを設置。1 階・4 階における計測データは、ここから東京にある SHM サーバへと送信される仕組み。
	本館会議室内のユーザPC 【加振前】（上） 東京にある SHM サーバで解析された結果が、遠隔地の会議室にあるユーザPCから閲覧可能。 【加振後】（下） <u>JMA神戸波本加振後のARX同定結果。この画面が出てくるまでに加振後、数分を要した。</u> <u>以下の実験ケースにおいて、東京との間でのデータの計測・評価に成功した。</u> ・ JMA 神戸本加振 ・ JMA 神戸本加振前後の常時微動（油圧印加状態）

4. 管理技術 WG センサシステムによる計測データ及び評価結果の検証

国総研WGセンサシステムによって計測された平成 22 年 10 月 18 日のデータより、大きな地震入力を受けた建物の全体系の損傷評価ならびに2 地点間の迅速な情報提供が成立するかを検証した。

4.1 データ取得に係る検証

1) 強振動時のデータ取得

強振動時（JMA 神戸波入力時）は、1 階床のスマートセンサで、X, Y, Z 方向のいずれかで 50gal を超えた場合に計測を開始し、その 10 秒前から 3 分間のデータをセンサゲートウェイへ伝送する仕組みとした。

JMA 神戸波入力時、下図に示すとおり、1 階 Y 方向でトリガ値を超えた 10 秒前からのデータが正常に計測・収録されており、4 階床のセンサも含め、センサゲートウェイに伝送されたことを確認した。

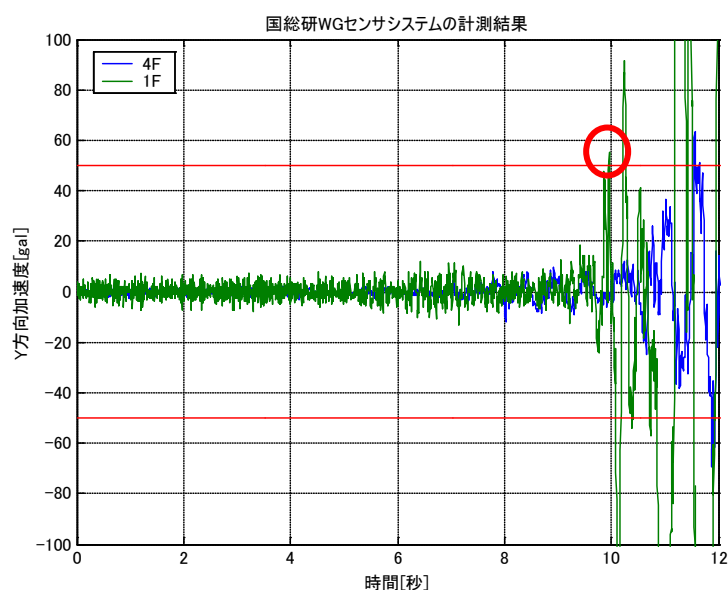


図 3.30 スマートセンサによる強振動時のデータ計測の検証結果

2) 微小振動時のデータ取得

微小振動時（JMA 神戸波入力の前後、E-defense 施設の油圧印加・非加振状態）については、時刻指定による計測開始トリガをかける仕組みとした。センサゲートウェイ側で NTP サーバとの時刻合わせを 10 分おきに行っており、この場合においても、指定日時に併せて正常に計測が行われることを確認した。

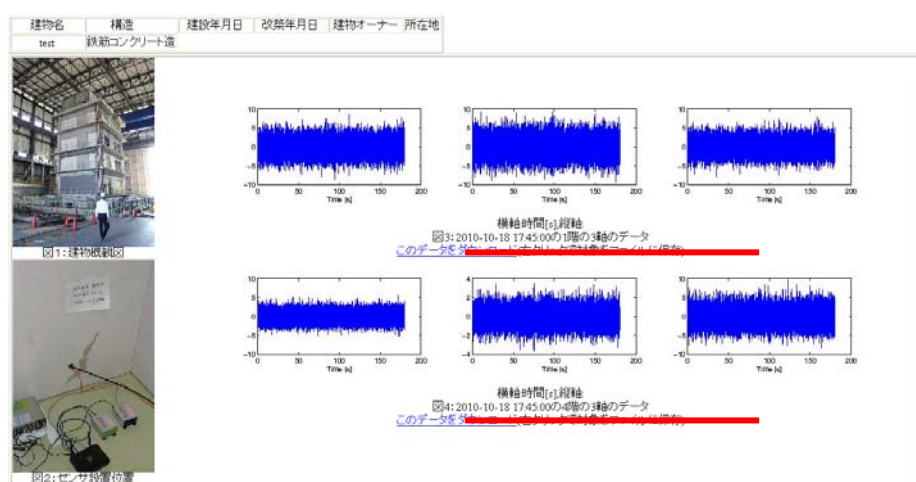


図 3.31 スマートセンサによる微小振動時のデータ計測の検証結果

4.2 逆解析に係る検証

データ管理・解析サーバにおけるデータの逆解析が正常に行われたかどうかについて、強震時・微小振動時の双方について検証する。

なお、実装した SHM システムは、ユーザ側で適用する逆解析手法を選択するとともに、推定した指標の経年変化についても参照できる仕組みとなっている。

2010-10-18 16:07:00	1,4	振動	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:02:01	1,4	振動	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:11:00	1	即時トリガ	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:28:00	4	振動	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:33:40	1	即時トリガ	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:34:00	4	即時トリガ	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:39:00	1,4	即時トリガ	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:45:00	1,4	即時トリガ	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス
2010-10-18 17:56:00	1,4	振動	波形表示	ARX同定	RD+Wavelet	部分空間法	伝達関数	パワースペクトル	コヒーレンス

2010-09

図 3.32 国総研 WG センサシステムによる解析手法の選択画面

1) 強振動時の逆解析

スマートセンサにより計測された JMA 神戸波加振時の 1 階 X 方向（入力）・4 階 X 方向（出力）加速度データに基づく、伝達関数の算出結果を示す。

1.7Hz 付近に 1 次のピークが認められる。ただし本来は、強震時の計測結果は短い区間長のデータに区切って推定を行う必要があるが、ここでは 10.805[s]～45.805[s]の主要動約 35 秒間のデータを全て使用している。

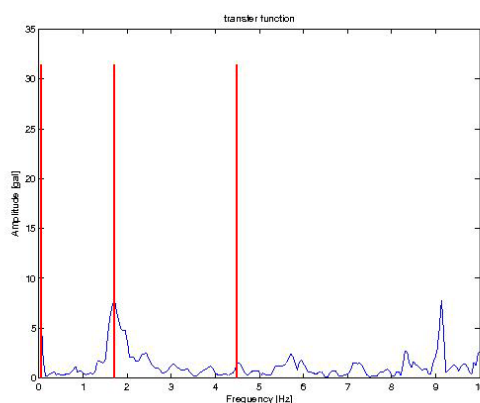


図 3.33 10/18 JMA 神戸波加振時の X 方向伝達関数

部分空間法によるモーダルパラメータの推定結果は以下のとおり。

推定された極情報からモードを自動推定している関係上、表に掲載されたパラメータは必ずしも正しく抽出されていないが、グラフ上は 1.7Hz 付近に 1 次のピークが認められる。

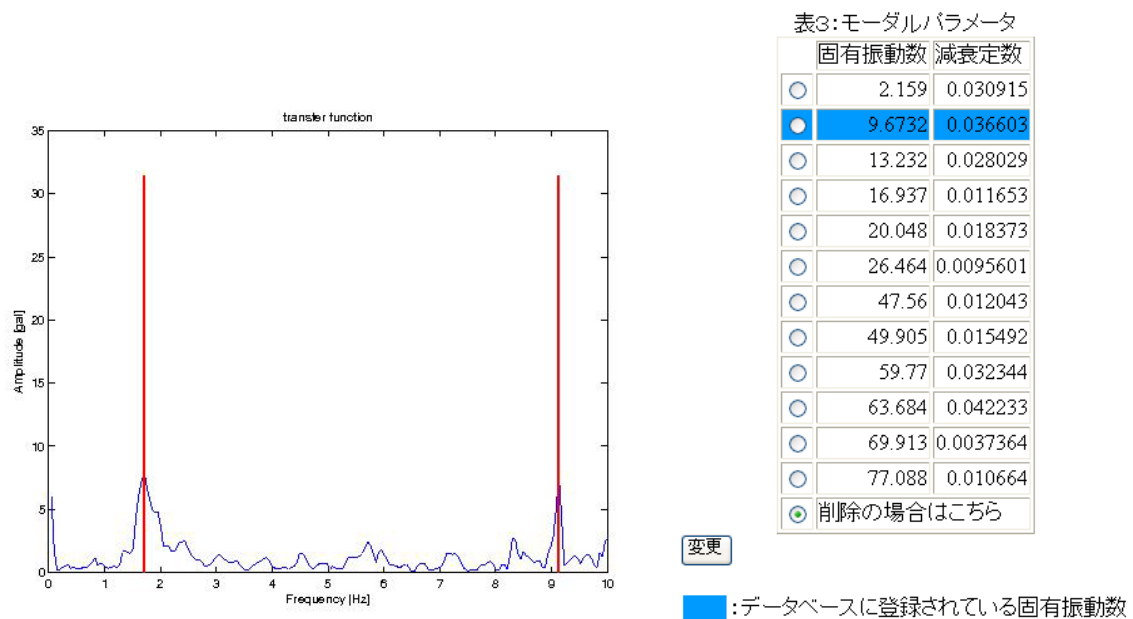


図 3.34 10/18 JMA 神戸波加振時の X 方向のモーダルパラメータ推定結果
(伝達関数、固有振動数、減衰定数、モード安定性)

2) 微小振動時の逆解析

スマートセンサにより計測された JMA 神戸波加振後の微小振動時 (E-defense 施設の油圧印加・非加振状態) の 1 階 X 方向 (入力)・4 階 X 方向 (出力) 加速度データに基づく、伝達関数の算出結果を示す。

ARX モデル、部分空間法の双方とも、2.2Hz 付近に 1 次のピークが認められる。

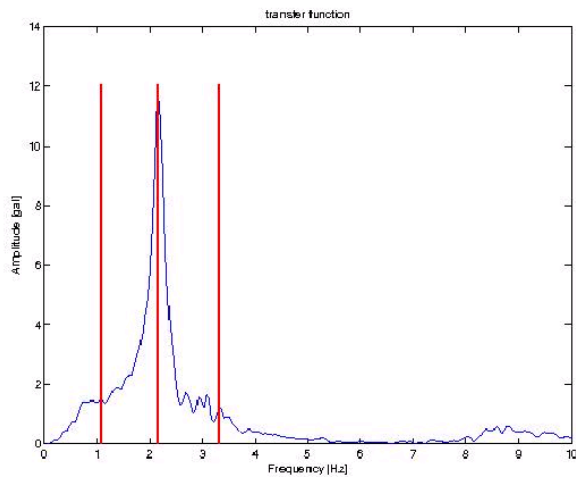


図4:伝達関数

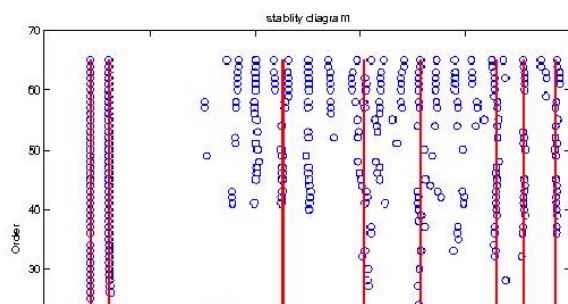


表2:モーダルパラメータ

固有振動数	減衰定数
☒ 2.1731	0.024708
☐ 3.0491	0.036715
☐ 8.6456	0.049601
☐ 9.2219	0.036018
☐ 10.041	0.029192
☐ 10.9	0.0372
☐ 11.564	0.031704
☐ 12.512	0.024337
☐ 13.486	0.037853
☐ 14.845	0.035465
☐ 15.508	0.035309
☐ 16.125	0.033318
☐ 17.056	0.028475
☐ 17.839	0.019121
☐ 18.607	0.019865
☐ 19.479	0.018658
☐ 20.277	0.022247
☐ 21.233	0.020238
☐ 21.797	0.021362
☐ 22.733	0.01653
☐ 23.557	0.027528
☐ 24.35	0.019131
☒ 削除の場合はこちら	

変更

☒ :データベースに登録されている固有振動数

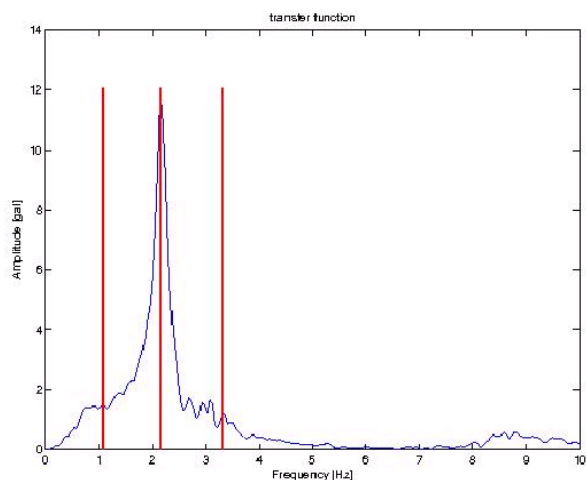


図4:伝達関数

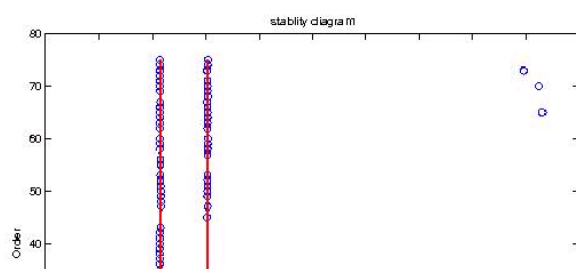


表3:モーダルパラメータ

固有振動数	減衰定数
☐ 2.1463	0.031689
☒ 3.0328	0.033144
☐ 15.258	0.038228
☐ 17.735	0.035003
☐ 26.503	0.022245
☐ 34.063	0.030462
☐ 43.205	0.026415
☐ 47.368	0.021767
☐ 52.155	0.021133
☐ 52.946	0.015635
☐ 55.422	0.0091895
☐ 58.125	0.013645
☐ 61.14	0.015954
☐ 63.183	0.013982
☐ 64.566	0.0043855
☐ 66.093	0.024328
☐ 70.407	0.0049754
☐ 72.193	0.0019859
☐ 76.906	0.0093442
☐ 78.915	0.0035515
☐ 83.068	0.01203
☐ 83.544	0.022117
☐ 86.964	0.020677

図 3.35 10/18 微小振動時（E-defense 施設の油圧印加・非加振状態）の X 方向のモーダルパラメータ推定結果（上から ARX モデル、部分空間法）

4.3 管理技術WGセンサシステムの検証結果の総括

管理技術 WG センサシステムによる検証結果を、以下にまとめる。

●異なる地点間で、計測データや評価結果のやりとりが正常に行われた。

当初の検証目的にあった「仮想 SHM サービス」が成立し得ることを確認した。

人がセンサ・PCを持ち込みその場で計測し、後日報告書を送付するといったサービスは一部の事業者が既に提供しているが、それよりも高いサービス水準に該当すると考えられる。

●強振動時・微小振動時の双方でデータ計測を行うことができた。

遠隔地からスマートセンサの計測トリガを設定することによって、いつ起こるか分からない強振動時の計測が可能であること、ユーザの任意のタイミングで微小振動時の計測が可能であることを、確認した。

●無線 LAN による実用性の高いセンサシステムの実用可能性が示された。

無線 LAN を構築し、従来多く用いられてきた有線によるデータ伝送に伴うケーブルリングの手間やコストを抑えるとともに、実建物で配線困難な状況にも対応できる可能性の高いセンサシステムを構築した。

●少数のセンサから汎用的な手法を用いて建物全体系の評価を行えることが示された。

センサ 2 個の計測データから建物全体の固有振動数を評価することができ、その結果から、損傷を受けた建物の固有振動数が低下している傾向を捉えることができた。

また、複数の逆解析手法を適用したところ、手法による違いは殆ど見られず、比較的安定した推定結果が得られることが分かった。

▼一部で運用上の課題が見られた。

計測・評価を行う場合において、次のような運用上の課題が確認された。ただしこれらは SHM サービス事業者側で十分な開発・テストの期間をとれば改善が見込まれる課題でもあり、当初の検証目的からはやや外れる。

- ・計測開始トリガが正常に作動しない場合があった
→センサの稼動状況を定期的に確認する仕組みが必要であった。
- ・無線通信が不安定となる場合があった
→多段型中継器等、対象建物の通信環境に即した機器を準備する必要がある。
- ・モード情報の自動抽出が困難であった
→専門家が評価結果を検証する体制、自動推定ロジックの見直し等が必要であった。

5. 防災科研センサデータに基づく簡易な逆解析

繰り返し地震動入力を受けた建物の振動特性等の変化を捉え、主要構造部の健全性評価に SHM 技術を活用するための実験データを整備するために、一連の加振実験（10 月 12 日、15 日、18 日、21 日）において防災科研センサによって計測されたデータに基づき、管理技術 WG 事務局（三菱総研）が、簡易な逆解析を行った。

5.1 簡易な逆解析の実施手順

ここでは逆解析の代表的な手順（SHM ガイドライン 3.2 で整理）に沿った「簡易な逆解析」の進め方について、ランダム波に基づく解析例を含めた形で示す。

1) データの前処理

以下 3 つの方法による前処理を行った。

①計測データのリサンプリング

1000Hz でサンプリングされた計測データを 100Hz にリサンプリングした。

②データの切り出し及びトレンドの除去

振幅レベルの大きな時間帯の切り出し、低振動数領域の外乱（トレンド）の除去を行った。

③並進 XY 及びねじれ成分の加速度データセットの生成

各階床に配置された加速度計の水平方向成分のデータを用いて、建物の並進成分とねじれ成分の同定用データセットを生成した。並進成分に注目する場合はなるべくねじれの影響をキャンセルするよう、2 箇所のセンサ情報の平均化処理を行う。逆にねじれ成分に注目する場合は、対角上に配置された 2 箇所のセンサ情報の差分をとることにより対応した。

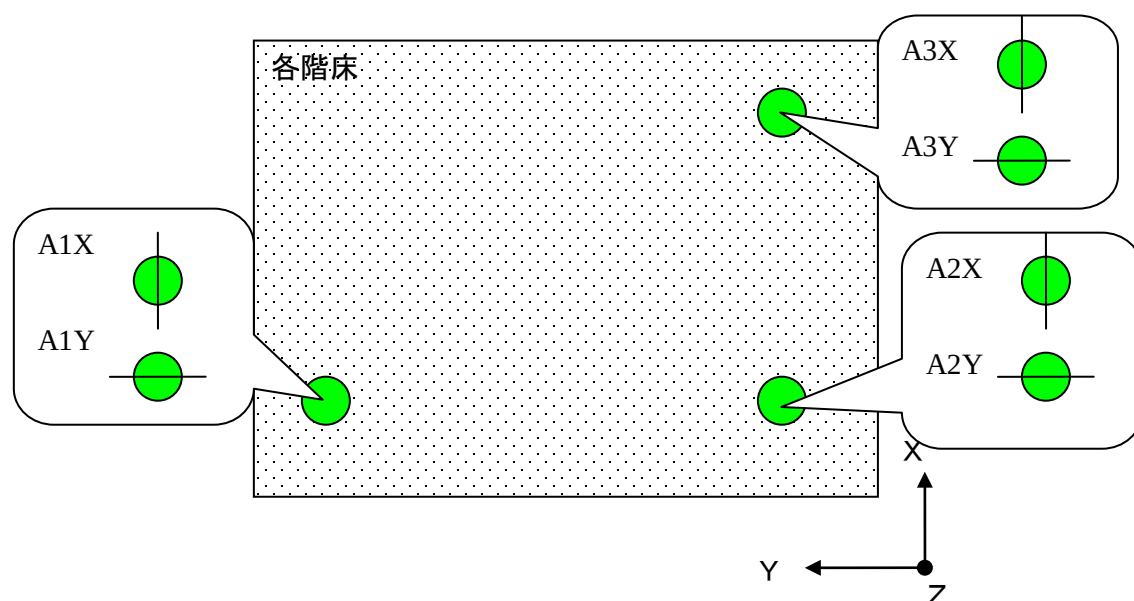


図 3.36 各階床の水平方向成分の加速度計の設置状況

表 3.12 逆解析に用いる並進及びねじれ成分のデータセットの定義

	入力データ	出力データ
並進X成分 (短軸)	1 階床 $1F - Trans.X : \frac{[A1X] + [A2X]}{2}$	R 階(2階～4 階までも同様): $RF - Trans.X : \frac{[A1X] + [A2X]}{2}$
並進Y成分 (長軸)	1 階床: $1F - Trans.Y : \frac{[A2Y] + [A3Y]}{2}$	R 階(2階～4 階までも同様): $RF - Trans.Y : \frac{[A2Y] + [A3Y]}{2}$
ねじれ成分	1 階床: $1F - Tors.: \frac{[A3X] - [A1X]}{2}$	R 階(2階～4 階までも同様): $RF - Tors.: \frac{[A3X] - [A1X]}{2}$

R 階床応答加速度を出力、1 階床応答加速度を入力として、並進 X 成分（短軸）、並進 Y 成分（長軸）、ねじれ成分のそれぞれについて伝達関数の振幅及び位相を算出した結果を示す。上記のデータセットを生成したことにより、3つの方向成分が程良く分離されていることが確認できる。

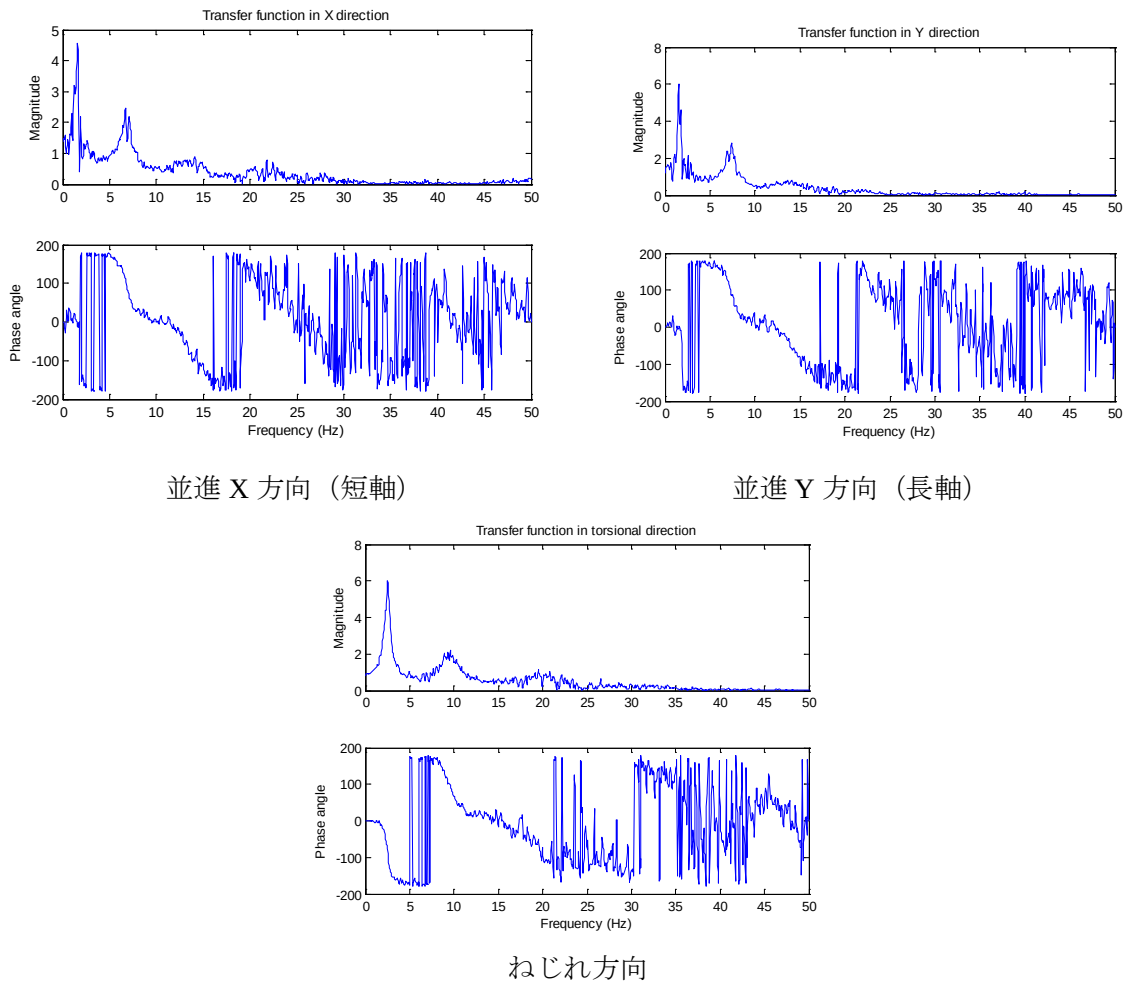


図 3.37 ランダム波加振時の R 階/1 階の伝達関数の振幅及び位相

2) 推定手法の選定

建物の各階で観測されているデータを活用して逆解析を行うため、参照する入出力データを単純にベクトル表記することにより多入力多出力（MIMO）モデルへ容易に拡張可能であり、技術者による設定を必要とするパラメータ数が少なく、数値的に安定なアルゴリズムを採用している、部分空間法を用いる方針とした。部分空間法は、計測されたデータを信号部分空間と雑音部分空間に分解する手法で、通信・制御など多くの分野で用いられている。

各日におけるランダム加振あるいは地震波加振の際に各階で観測された短軸 X 方向加速度データから、部分空間法を用いてモデルパラメータを推定した後、固有振動数、減衰定数、モード形状を求めることとした。

3) モデル構造の選択

部分空間法を用いる場合は、対象建物の振動特性を状態空間モデルに置き換えて、同定問題を解く。システムの次数が n_{states} である n_{in} 入力 n_{out} 出力モデルの離散時間システムの状態空間表現は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k\end{aligned}$$

但し、 $\mathbf{x}_k \in \mathcal{R}^{n_{states}}$ は状態ベクトル、 $\mathbf{u}_k \in \mathcal{R}^{n_{in}}$ 及び $\mathbf{y}_k \in \mathcal{R}^{n_{out}}$ は入出力ベクトル、

$\mathbf{A} \in \mathcal{R}^{n_{states} \times n_{states}}$ 、 $\mathbf{B} \in \mathcal{R}^{n_{states} \times n_{in}}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathcal{R}^{n_{out} \times n_{states}}$ 、 $\mathbf{D} \in \mathcal{R}^{n_{out} \times n_{in}}$ は定数行列。

入出力データから構成されるハンケル行列の特異値分解を行い、モデル次数が増えるにつれて特異値の減少傾向が著しいと考えられる次数を、状態空間モデルのモデル次数として選択する。これは、構造特性を表現する有意な信号成分と雑音成分が張る部分空間を分離し、低次元化を行うプロセスである。

例えば 10/18 のランダム加振データの並進 X 方向加速度を対象として、計測データ 1000 個を 200 行 800 列のサイズのハンケル行列（100Hz でリサンプルしているため 10 秒分のデータにあたる）に格納し、特異値分解を行った結果は次のとおり。

建物は 4 自由度系としているため最低 8 以上のモデル次数が必要となるが、通常、その 2 倍以上の次数が選択されることが多いことから次数を 16 と設定した。ここではさらに、モデル切り詰めによる推定結果の変動があることを考慮し、もう 1 つのケースとして、モデル次数 20 を選択しておく。

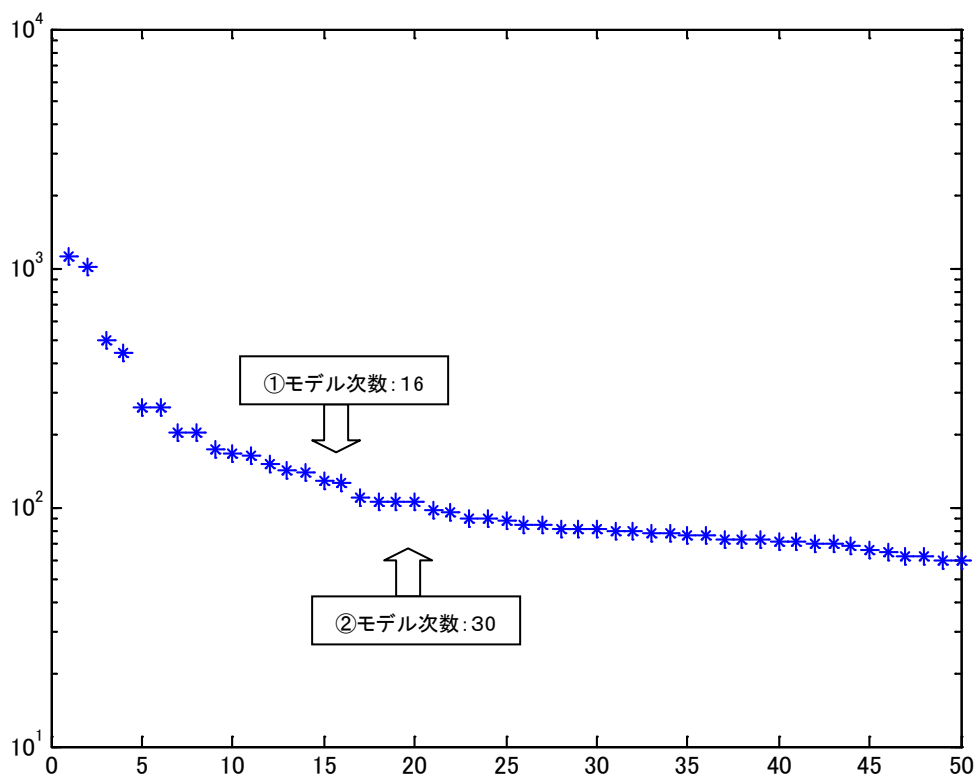


図 3.38 特異値分解のプロットとモデル次数の選択

4) モデルパラメータの推定

状態空間モデルのパラメータ推定問題は、「入力信号 u_k 及び出力信号 y_k からシステム特性行列 A, B, C, D を推定する」こととして定義され、部分空間法が適用できる。

部分空間法は、自由振動などの出力データのみからパラメータを推定する手法と、入出力データを参照してパラメータ推定する手法に分かれ、提案されているアルゴリズム也多岐にわたるが、今回は MOESP アルゴリズムを用いることとした。

例えば 10/18 のランダム加振データの並進 X 方向加速度を対象として、前項でモデル次数 16 を選択した場合の行列 A の推定結果は以下のとおり。なお、前項で決定したモデル次数 16 は、この特性行列 A のサイズに影響するもので、未知パラメータの数に相当する。

行列 $A =$

0.9909	0.1109	0.0009	0.0099	0.0006	-0.0005	-0.0009	0.0002	-0.0001	0.002	0.0013	-0.0022	0	-0.0012	-0.0006	0
-0.1116	0.9811	0.0053	0.0186	0.0011	-0.0009	-0.001	-0.0002	0.0002	-0.0033	-0.0053	-0.0007	0.0007	-0.0038	-0.0003	0.0002
-0.012	-0.034	0.8905	0.4043	0.0118	-0.0074	-0.0097	0.0034	0.0014	-0.0005	0.0009	-0.0282	-0.0016	-0.0161	-0.0059	0.0021
-0.0123	-0.0312	-0.4115	0.8721	-0.0247	0.0044	0.0109	-0.0136	-0.0014	-0.0007	0.0024	-0.0039	0.0155	-0.0234	0.0182	-0.0109
0	0	-0.0082	0.011	0.8987	0.436	0.006	0.006	-0.0023	-0.0028	0.002	0.0131	0.0055	-0.0002	0.0114	0.001
0.0016	0.0042	0.0142	0.0056	-0.4341	0.8991	-0.0057	0.0068	-0.0014	0.0014	-0.0014	0.0051	-0.0045	0.0106	-0.0054	0.0051
0.0026	0.0068	0.0127	0.0163	-0.0079	-0.0051	0.8843	0.4615	-0.0049	-0.005	0.0033	0.0214	-0.0019	0.0318	-0.0069	0.0024
-0.0014	-0.003	-0.0099	-0.005	-0.0027	-0.0054	-0.4569	0.8855	0.0162	-0.0105	0.0078	-0.0173	0.0165	-0.0291	0.0177	-0.0016
0.0136	0.0354	0.0508	0.103	0.0002	-0.0221	-0.0523	0.0075	0.6478	0.0248	-0.0495	0.5091	-0.0198	0.3468	-0.0309	0.0214
-0.0032	-0.0086	-0.0112	-0.0255	0.0047	0.0068	0.0183	0.0069	0.2002	0.9525	-0.112	-0.1544	0.0074	-0.0751	0.0037	-0.0126
0.0007	0.0041	0.0042	0.0096	-0.0016	-0.0026	-0.008	-0.0043	-0.0582	0.1459	0.9812	0.0939	-0.0109	0.0269	0.0028	0.0086
0.0049	0.0123	0.0219	0.0364	-0.0019	-0.0108	-0.0303	0.0159	-0.5847	0.2329	-0.1454	0.6839	-0.09	-0.1049	0.0026	0.0121
-0.0029	-0.0083	-0.0073	-0.0291	-0.0055	0.0058	0.022	-0.0135	0.1163	-0.0338	0.0158	0.2366	0.8823	-0.3473	-0.0096	0.0306
0.0027	0.0074	0.0081	0.0308	0.0028	-0.0085	-0.0327	-0.0003	-0.2988	0.0964	-0.0339	-0.2491	0.4513	0.7474	0.0729	-0.0085
0.0006	0.0013	0.0051	-0.0027	-0.0067	-0.0009	0.0103	-0.0054	0.035	-0.0047	-0.0048	0.0273	-0.0353	-0.0343	0.8948	0.4513
0.0008	0.0011	-0.0007	0.0102	0.0072	-0.0022	-0.0079	0.0054	-0.0325	0.0158	-0.0065	-0.0687	0.0073	-0.0117	-0.4353	0.889

5) モデルの妥当性検証

モデル構造、モデル次数、モデルパラメータの推定結果が妥当であるかどうかを検証し、必要に応じてこれまでのステップを繰り返す。例えば実際の出力（計測データ）と、前項で推定したモデルに基づくシミュレーション応答との差異を検証したり、同定残差の白色性を確認したりすること等の方法がある。

6) 損傷指標の推定

部分空間法により得られる状態空間モデルのモード情報は、状態遷移行列Aに格納されている。そこで行列Aの固有値問題を解くことにより、モデル次数分の極 p_i を得ることができる。しかしこの中には不安定な極も含まれているため、数ある極の中から、以下の考え方に基づいて対象建物の振動モードに該当する極を選定する。

- 複素共役として現れる極を選定する。
- 減衰定数の小さい極を選定する。
- 実験的に求めた伝達関数、設計固有周期などの先験情報が得られている場合は、それらと照らし合わせながら選定する。
- 極ごとのモード形状を算出し、正負の符号の反転回数などから、妥当なモードであるかどうかを判断する。

伝達関数の極 p_i の中からモードに該当する極を抽出した後は、次式により、対象建物の i 次の固有振動数 ω_i 及び減衰定数 h_i を推定する。

$$\omega_i = \frac{|\log p_i|}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(\log |p_i|)^2 + (\arg p_i)^2}}{\Delta t}$$

$$h_i = -\frac{\log |p_i|}{\omega_i \Delta t}$$

以下に、10/18 のランダム加振データの並進 X 方向加速度を対象として、モデル次数 16 の場合の算出結果を示す。ここでは 1・2 番目の極が 1 次モード、7・8 番目の極が 2 次モード、15・16 番目の極が 3 次モードに相当すると考えられる。

表 3.13 部分空間法の適用によって得られる極情報とモード選定（モデル次数 16 の場合）

極No.	固有振動数[Hz]	減衰定数	モード形状				
			RF	4F	3F	2F	1F
1	1.7893	0.0673	1	0.8169	0.5488	0.2658	0
2	1.7893	0.0673	1	0.8169	0.5488	0.2658	0
3	2.1082	-0.0075	1	0.9594	0.5449	0.2846	0
4	2.1082	-0.0075	1	0.9594	0.5449	0.2846	0
5	6.4214	0.0216	1	-0.3755	-0.7257	-0.9976	0
6	6.4214	0.0216	1	-0.3755	-0.7257	-0.9976	0
7	6.8508	0.0495	1	-0.0961	-1.1762	-1.2178	0
8	6.8508	0.0495	1	-0.0961	-1.1762	-1.2178	0
9	7.1204	0.0063	1	-0.0542	-1.2479	-1.305	0
10	7.1204	0.0063	1	-0.0542	-1.2479	-1.305	0
11	7.5275	0.0043	1	-0.1633	-1.1167	-1.1717	0
12	7.5275	0.0043	1	-0.1633	-1.1167	-1.1717	0
13	7.9347	0.0017	1	-0.0537	-1.3109	-1.385	0
14	7.9347	0.0017	1	-0.0537	-1.3109	-1.385	0
15	14.6659	0.1211	1	-1.4698	-0.5666	1.4489	0
16	14.6659	0.1211	1	-1.4698	-0.5666	1.4489	0

並進 X 方向の 1 次～3 次モード形状を図示すると以下のとおり。

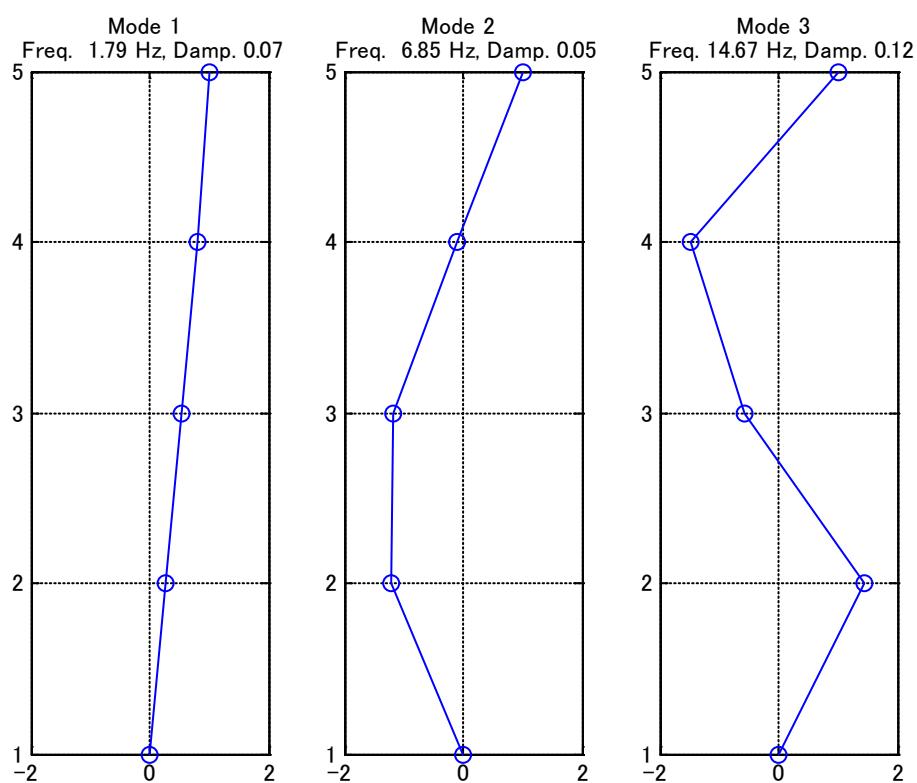


図 3.39 並進 X 方向 1 次～3 次モード（モデル次数 16 の場合）

モデル次数 20 の場合の極情報とモード形状は次のとおり。モデル次数 16 では抽出できなかった 4 次モードの抽出に成功している。ただしモデル次数を増やすほど、より多くの極の中から該当するモードを見分ける必要性が生じることに留意する。

表 3.14 部分空間法の適用によって得られる極情報とモード選定（モデル次数 20 の場合）

極No.	固有振動数[Hz]	減衰定数	モード形状				
			RF	4F	3F	2F	1F
1	1.7937	0.0669	1	0.8216	0.5448	0.2642	0
2	1.7937	0.0669	1	0.8216	0.5448	0.2642	0
3	2.1039	-0.0088	1	0.86	0.5315	0.2507	0
4	2.1039	-0.0088	1	0.86	0.5315	0.2507	0
5	6.2776	0.002	1	-0.0883	-0.9178	-1.146	0
6	6.2776	0.002	1	-0.0883	-0.9178	-1.146	0
7	6.8169	0.0522	1	-0.0617	-1.1878	-1.2885	0
8	6.8169	0.0522	1	-0.0617	-1.1878	-1.2885	0
9	7.1955	-0.0155	1	-0.0759	-1.0936	-1.0512	0
10	7.1955	-0.0155	1	-0.0759	-1.0936	-1.0512	0
11	7.3894	0.0275	1	-0.138	-1.1611	-1.0885	0
12	7.3894	0.0275	1	-0.138	-1.1611	-1.0885	0
13	7.8743	-0.0022	1	-0.1629	-1.1307	-0.9306	0
14	7.8743	-0.0022	1	-0.1629	-1.1307	-0.9306	0
15	8.4509	0.0039	1	-0.2797	-0.9396	-0.8964	0
16	8.4509	0.0039	1	-0.2797	-0.9396	-0.8964	0
17	13.9498	0.083	1	-1.3805	-0.9228	1.8017	0
18	13.9498	0.083	1	-1.3805	-0.9228	1.8017	0
19	20.1144	0.0422	1	-1.8485	1.8903	-1.1341	0
20	20.1144	0.0422	1	-1.8485	1.8903	-1.1341	0

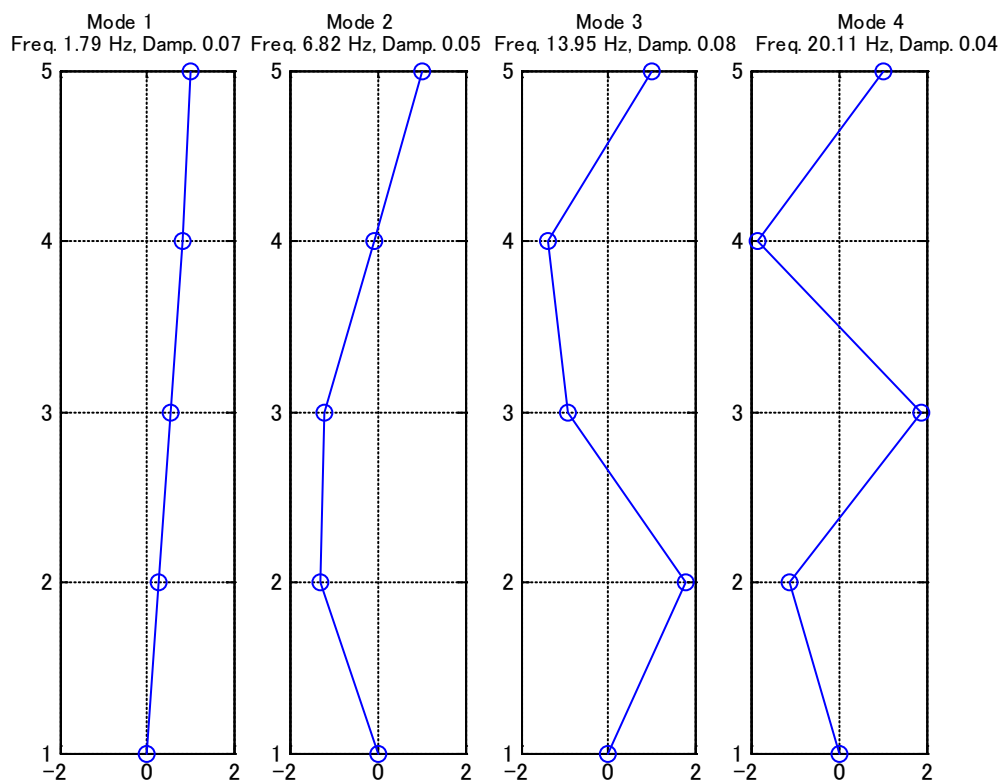


図 3.40 並進 X 方向 1 次～3 次モード（モデル次数 20 の場合）

次に、選定したモードが妥当かどうかを複数の手法により確認する。

1 階床加速度を入力、各階床加速度を出力とし、実験的な伝達関数を 1 フレームのデータ数 2048、1/4 オーバーラップにより算出すると以下のとおり。

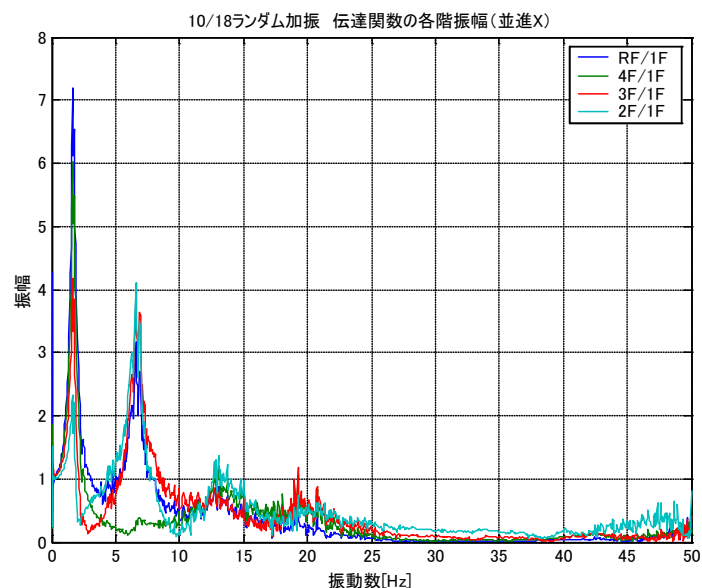


図 3.41 並進 X 方向の伝達関数

次に、モデル次数を 1～50 と変化させた場合に得られる極をプロットする。モデル次数を増減させても安定的に出現するかどうか判断材料の 1 つとなる。

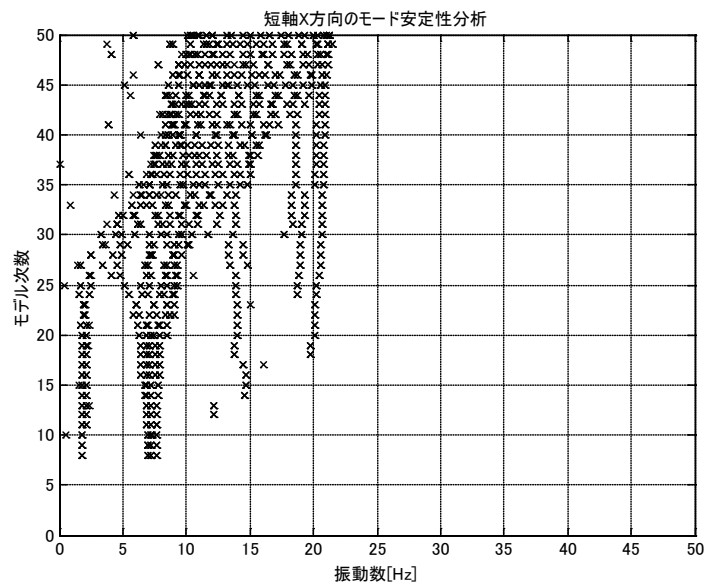


図 3.42 並進 X 方向のモード安定性分析

上記を照らし合わせると、並進 X 方向のモードは、1 次が 2Hz 周辺、2 次が 7Hz 周辺、3 次が 14Hz 周辺、4 次が 20Hz 周辺に存在することが分かり、先ほどのモードの推定結果と整合する。

5.2 ランダム加振データに基づく振動特性の変化

前項の手順にしたがって、平成 20 年度に実施された実験を含め、平成 22 年度の実験各日で行われたランダム加振の並進 X 方向の各階加速度データに基づき、1 次～4 次のモード情報を推定した結果を以下に示す。

過年度の実験検証でも明らかになったとおり、加振を繰り返すにつれて、各次モード振動数が低下している。特に平成 22 年度は 10/18①（JMA 神戸波加振前）から 10/18②（JMA 神戸波加振後）にかけての 1 次モード振動数の低下が顕著であった。

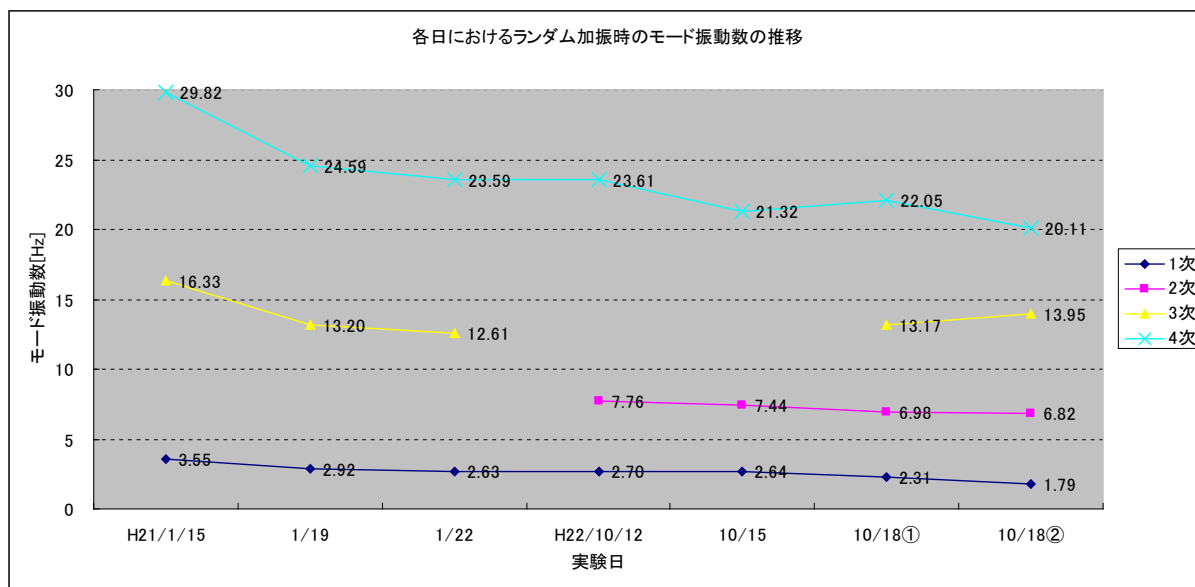


図 3.43 並進 X 方向のモード振動数の経年変化

(注) H22/10/18①は JMA 神戸波加振前、同②は JMA 神戸波加振後を意味する。

(注) 1 次及び 4 次に関しては全日程で推定結果が得られているが、2 次モードに関しては平成 20 年度の初期値が、3 次モードに関しては平成 22 年度の実験の一部が欠落している。これはランダム加振で各次モードが励起される度合いが異なるためと考えられる。

各次モード振動数の低下率は以下のとおりである。1 次モードの低下が相対的に顕著であることから損傷が 1 層に集中したと考えられ、これは技術者の目視等による調査結果（1 階において外壁のひび割れや剥落等の被害が顕著）と整合する。

- 1 次モード：50%（H22/10/18②時点の H21/1/15 時点に対する割合）
- 2 次モード：12%（H22/10/18②時点の H22/10/12 時点に対する割合）
- 3 次モード：15%（H22/10/18②時点の H21/1/15 時点に対する割合）
- 4 次モード：23%（H22/10/18②時点の H21/1/15 時点に対する割合）

微小振動下における固有振動数に関しては、どの程度の変化をもって補修・補強等の判断基準とするかの知見が不足している。しかし上記の推定結果と、例えば被災度判定区分判定に基づく耐震性能残存率 R（約 2 割低下）とを併せて蓄積・管理していくことで、今後、従来手法を代替・補完する技術としての位置づけと、平時における技術利用の可能性が見えてくる。

5.3 地震波加振データに基づく健全性判定

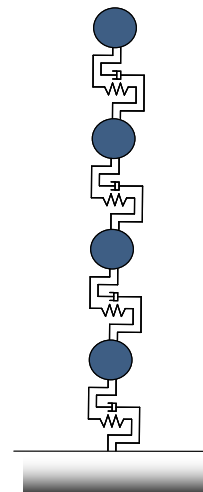
平成 22 年度の実験各日で行われた地震波加振の並進 X 方向の各階加速度データに基づき、層せん断力と最大層間変形量の関係から、層レベルの損傷推定を行った。考え方は以下のとおりである。

ある階層床に作用する慣性力 (A) 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 (B) と力学的に釣り合う。

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

(A)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。

(B)は、ここでは剛性と比較して減衰が十分に小さいものと仮定して無視すると、各階加速度の 2 回積分により得られる層間変位データで除することによって、各層剛性 k を簡易に算出することができる。



なお、ここで推定された層せん断力—層間変位の関係は、防災科研による荷重増分解析の結果 (平成 21 年度時点の情報) と比較することができる。

下記グラフによると、荷重増分解析における保有耐力は、層間変形角が 0.01 [rad] すなわち層間変形量で言えば 4cm 程度を超えた時点である。

解析モデル上、これに達するのは 2 階が最も早いとされている。

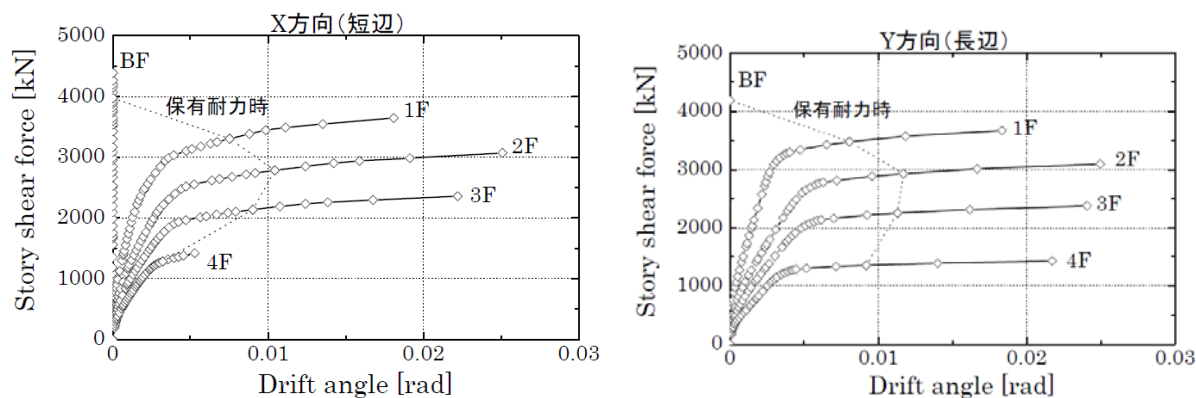


図 3.44 防災科研による荷重増分解析の結果

1) 地震波の概要

まず、各地震波の時刻歴波形を示す。

次に、時刻歴波形から入力レベルの大きな時間帯を切り出して伝達関数を算出する。

(1) 10/12 横浜波（加振方向 XY）

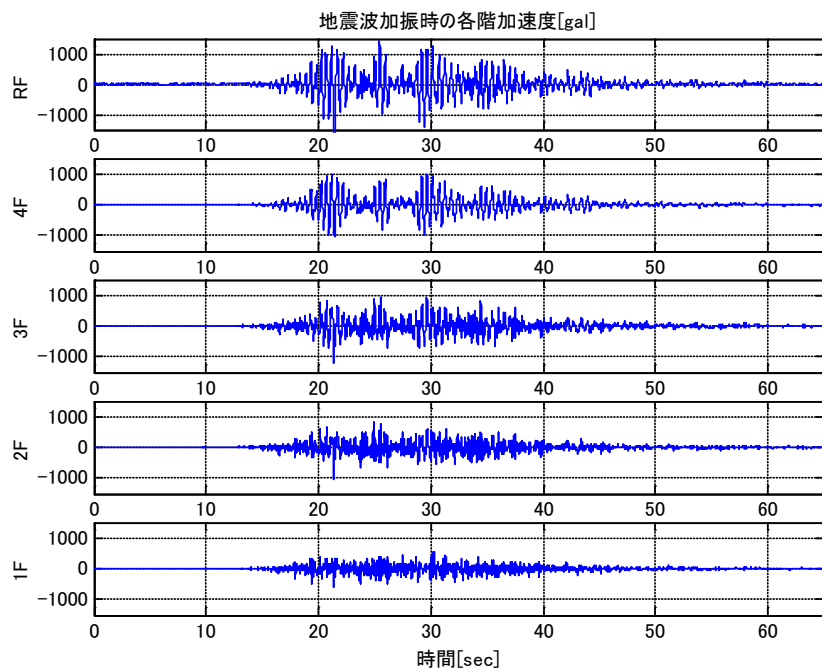


図 3.45 10/12 横浜波加振時の並進 X 方向の各階加速度

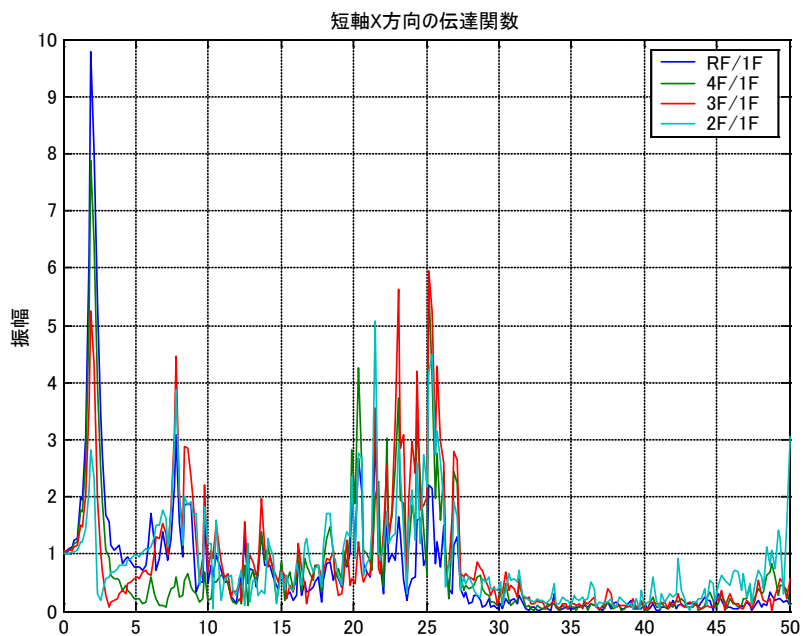


図 3.46 10/12 横浜波加振時の並進 X 方向の各階伝達関数（20-40 秒区間）

(2) 10/15 エルセントロ波 (50kine で基準化)

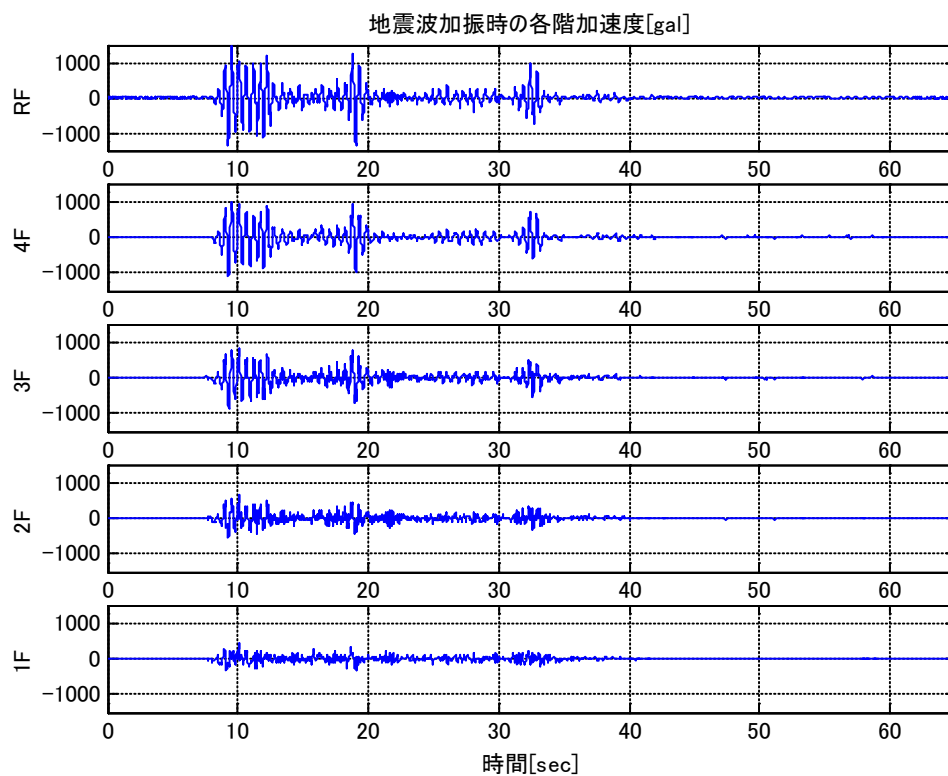


図 3.47 10/15 エルセントロ波加振時の並進 X 方向の各階加速度

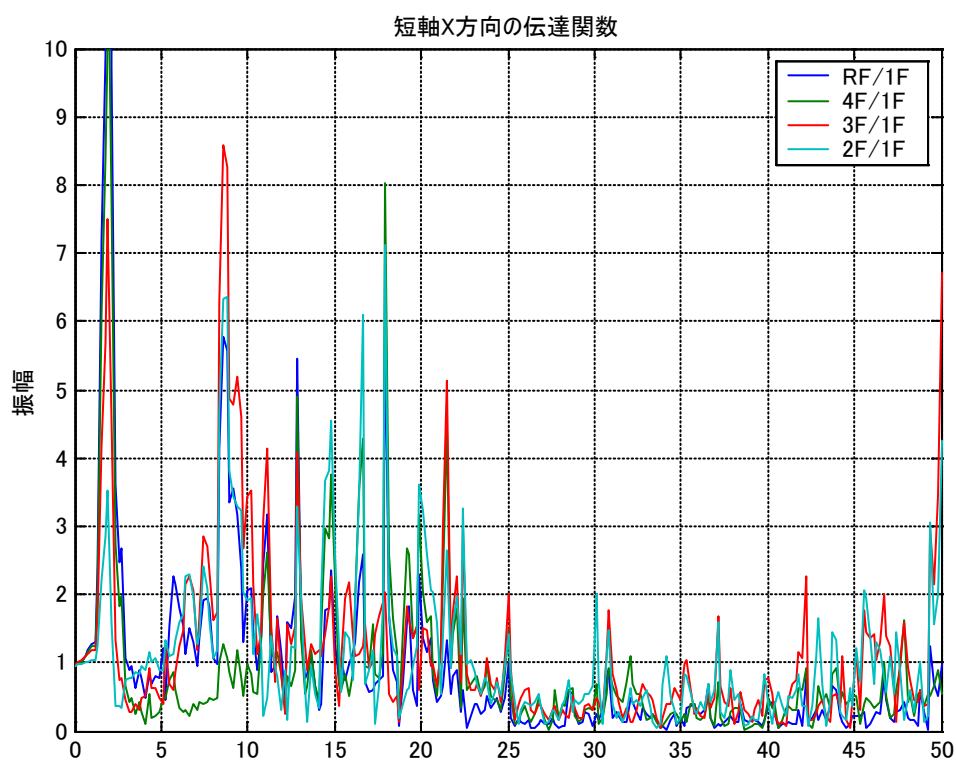


図 3.48 10/15 エルセントロ波加振時の並進 X 方向の各階伝達関数 (10-20 秒区間)

(3) 10/18 JMA 神戸波 (100%)

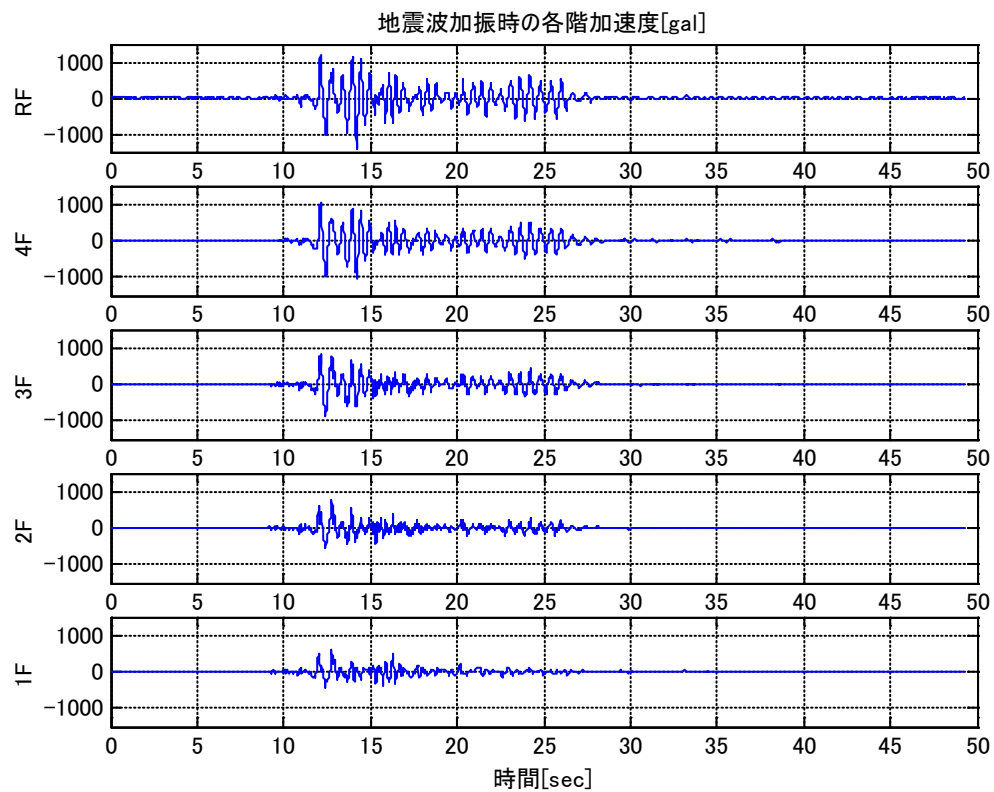


図 3.49 10/18JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各階加速度

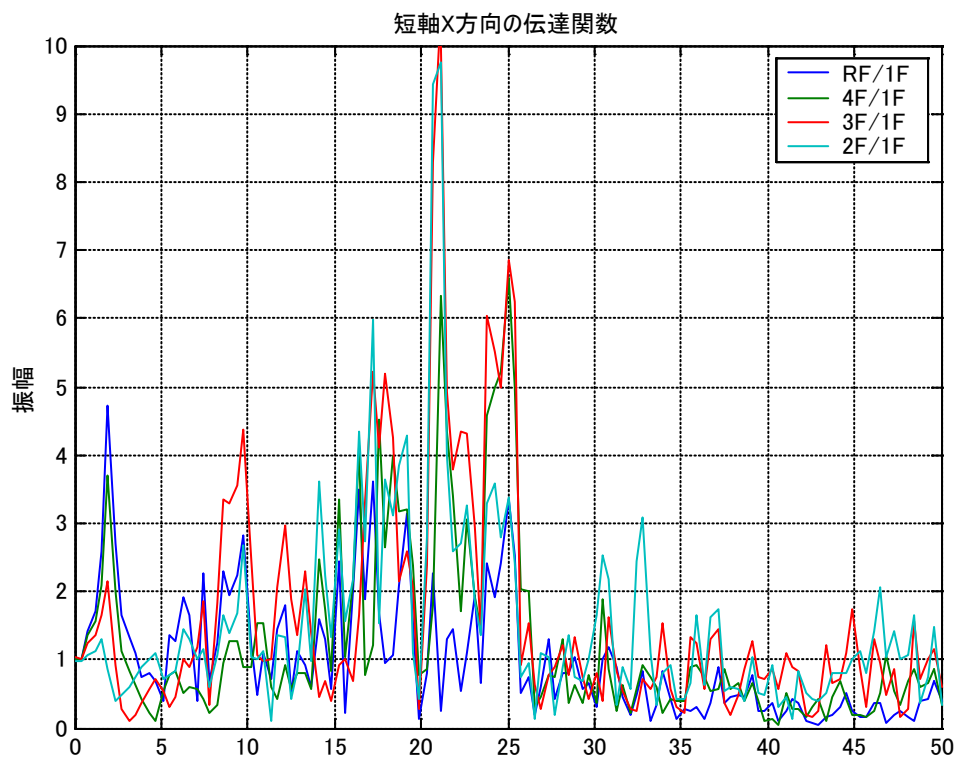


図 3.50 10/18JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各階伝達関数 (13-25 秒区間)

(4) 10/21 JMA 神戸波 (80%、加振方向 XY)

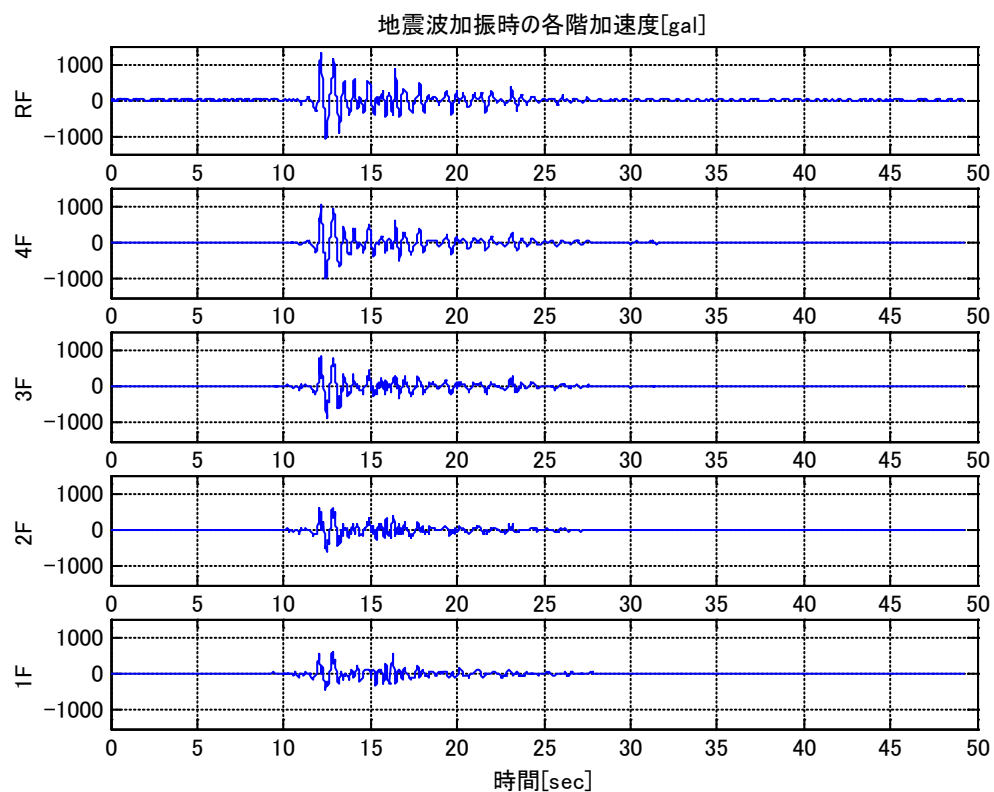


図 3.51 10/21JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各階加速度

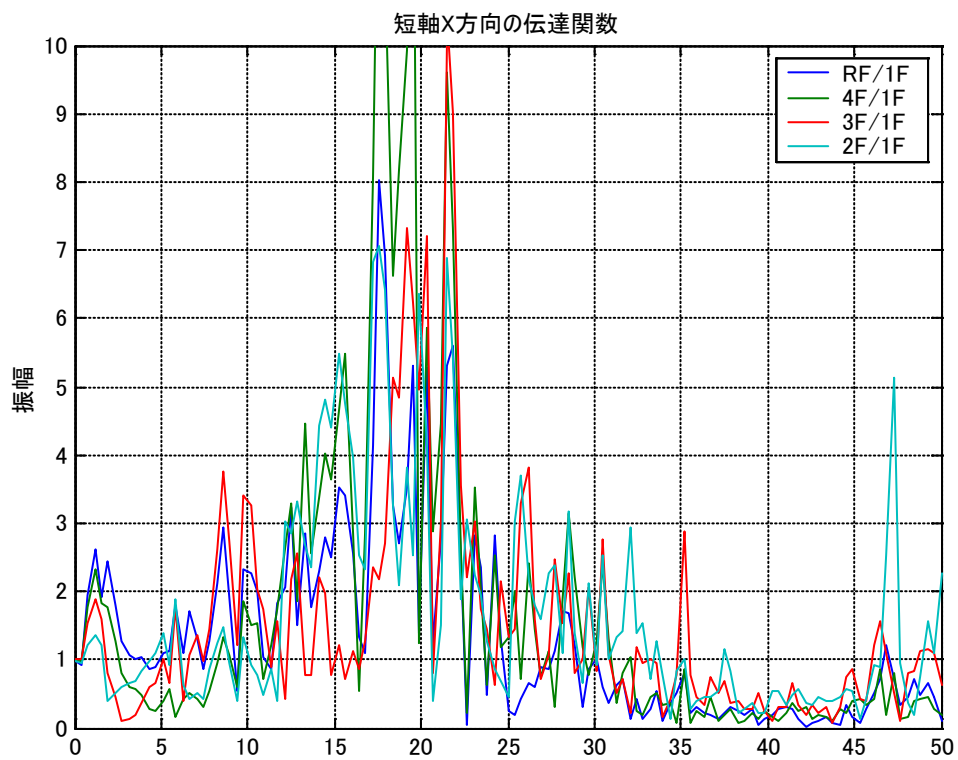


図 3.52 10/21JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各階伝達関数 (13-25 秒区間)

2) 各階加速度の2回積分による層間変形量の算出

各階で計測された加速度データから、2回積分することにより各層の層間変形量を求めた。
層間変形量を算出する手順は以下のとおり。

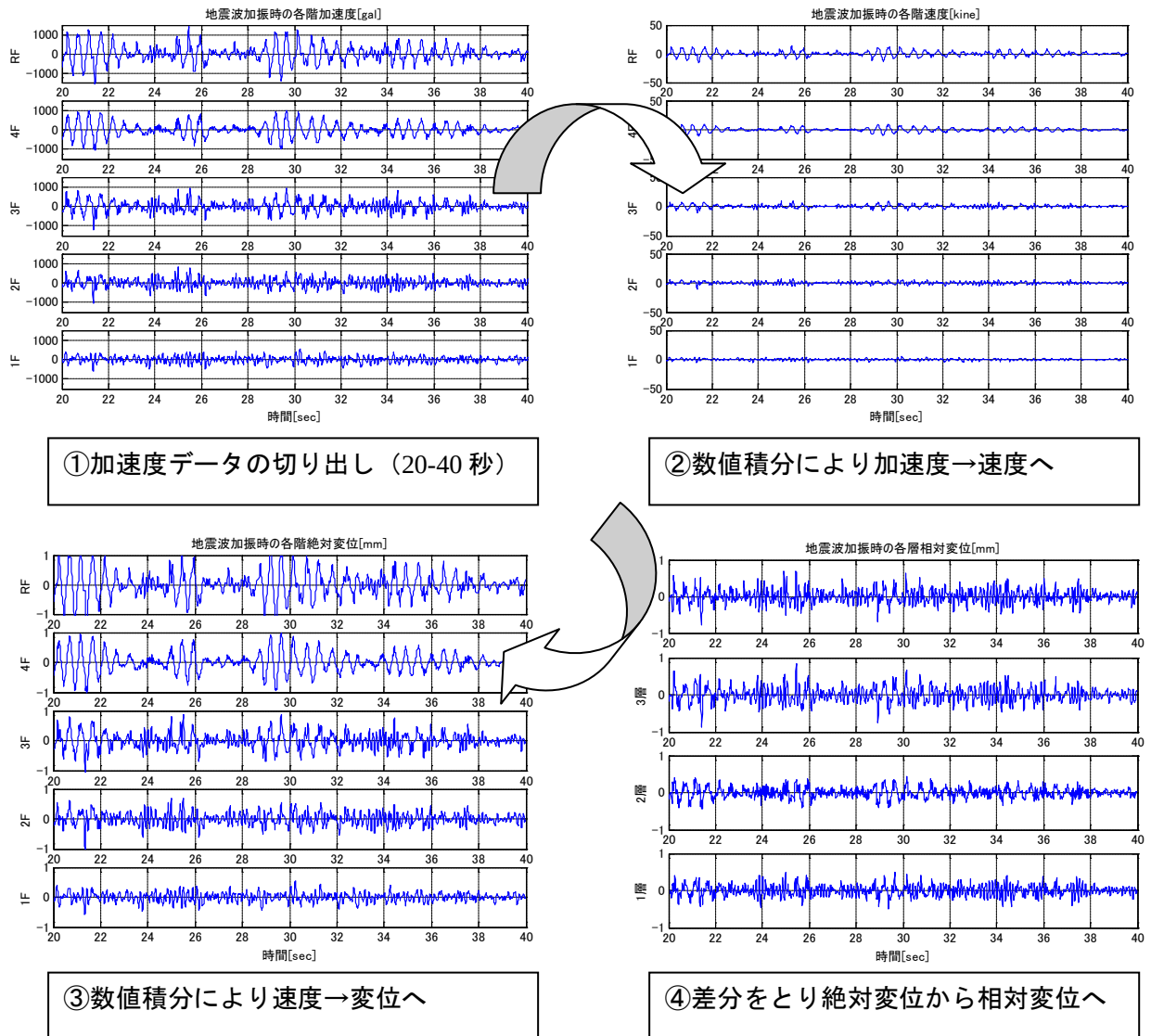


図 3.53 層間変形量の算出手順 (10/12 横浜波加振時の例)

3) 層せん断力と層間変形量の関係の分析

前(2)から各層の最大層間変形量とその記録時間をピックアップする。

次に、当該時刻における各階の質量及び加速度データの線形結合により層せん断力を算出し、その釣合いの関係から、模擬的に各層剛性を算出することが可能である。

荷重変形関係を描いてみると、その傾きが概ね各層剛性を現している。

(1) 10/12 横浜波 (加振方向 XY)

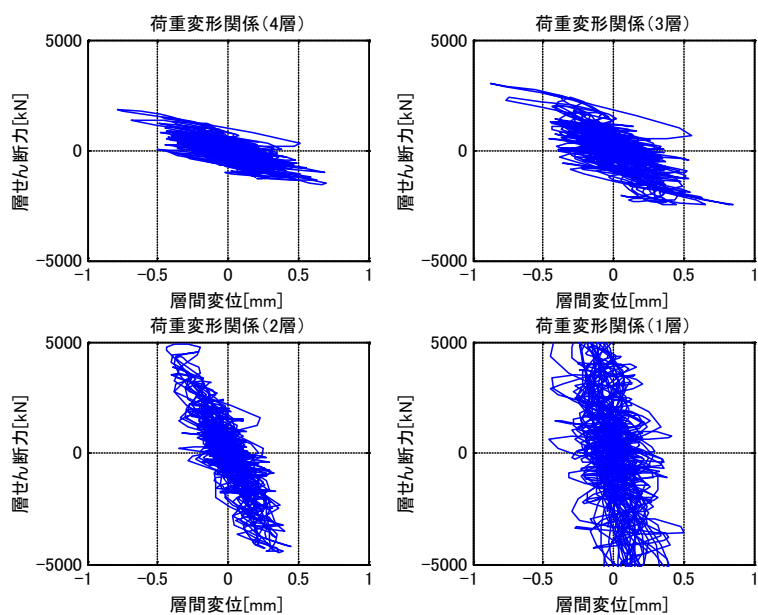


図 3.54 10/12 横浜波加振時の並進 X 方向の各層の荷重変形関係

表 3.15 10/12 横浜波加振時の並進 X 方向の各層剛性等の推定結果

	階高[mm]	最大層間変形の計測時				
		時間[秒]	変位[mm]	変形角[rad]	層せん断力[kN]	剛性[kN/mm]
4層	3401.5	21.40	0.78	2.30E-04	1.77E+03	2.27E+03
3層	3900.0	21.41	0.87	2.24E-04	2.91E+03	3.33E+03
2層	3400.0	30.15	0.44	1.30E-04	3.95E+03	8.92E+03
1層	3900.0	24.98	0.50	1.29E-04	3.63E+03	7.23E+03

(2) 10/15 エルセントロ波 (50kine で基準化)

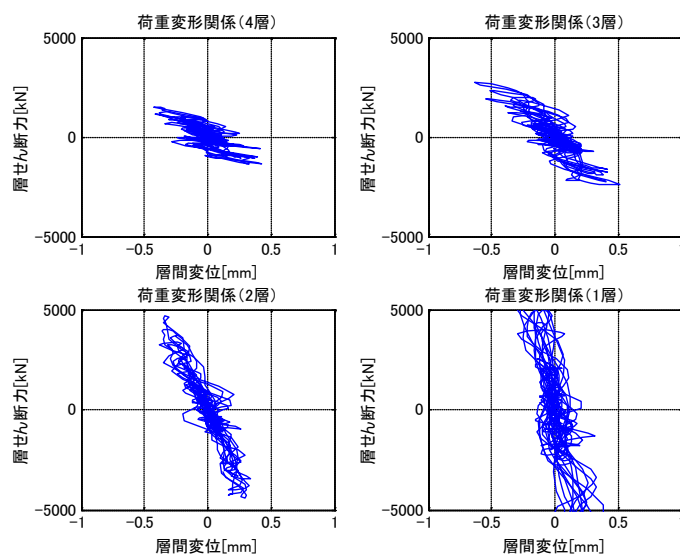


図 3.55 10/15 エルセントロ波加振時の並進 X 方向の各層の荷重変形関係

表 3.16 10/15 エルセントロ波加振時の並進 X 方向の各層剛性等の推定結果

	階高[mm]	最大層間変形の計測時				
		時間[秒]	変位[mm]	変形角[rad]	層せん断力[kN]	剛性[kN/mm]
4層	3401.5	12.23	0.42	1.25E-04	1.28E+03	3.01E+03
3層	3900.0	19.03	0.63	1.62E-04	2.64E+03	4.16E+03
2層	3400.0	10.32	0.39	1.14E-04	2.98E+03	7.70E+03
1層	3900.0	12.17	0.39	9.92E-05	3.96E+03	1.02E+04

(3) 10/18 JMA 神戸波 (100%)

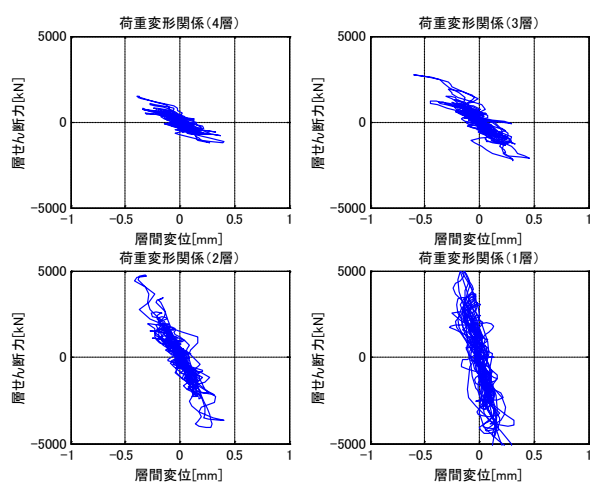


図 3.56 10/18JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各層の荷重変形関係

表 3.17 10/18JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各層剛性等の推定結果

	階高[mm]	最大層間変形の計測時				
		時間[秒]	変位[mm]	変形角[rad]	層せん断力[kN]	剛性[kN/mm]
4層	3401.5	14.47	0.402	1.18E-04	1.19E+03	2.96E+03
3層	3900.0	14.19	0.5961	1.53E-04	2.58E+03	4.33E+03
2層	3400.0	14.17	0.4105	1.21E-04	4.08E+03	9.94E+03
1層	3900.0	14.41	0.4405	1.13E-04	5.61E+03	1.27E+04

(4) 10/21 JMA 神戸波 (80%、加振方向 XY)

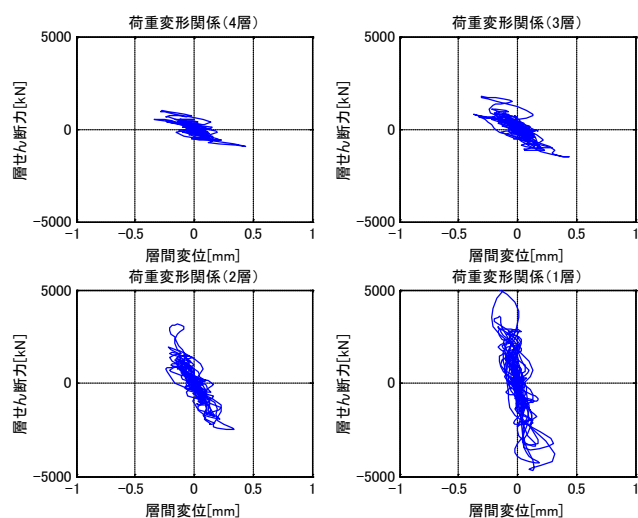


図 3.57 10/21JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各層の荷重変形関係

表 3.18 10/21JMA 神戸波加振時の並進 X 方向の各層剛性等の推定結果

	階高[mm]	最大層間変形の計測時				
		時間[秒]	変位[mm]	変形角[rad]	層せん断力[kN]	剛性[kN/mm]
4層	3401.5	16.41	0.44	1.29E-04	8.14E+02	1.86E+03
3層	3900.0	16.43	0.43	1.11E-04	1.47E+03	3.38E+03
2層	3400.0	16.44	0.34	1.01E-04	2.48E+03	7.20E+03
1層	3900.0	16.47	0.31	8.04E-05	4.19E+03	1.34E+04

各パラメータの最大値を整理すると以下のとおり。

- 相対変位：10/12 の横浜波加振における 3 層（0.87[mm]）
- 層間変形角：10/12 の横浜波加振における 4 層（0.00023[rad]）
- 層せん断力：10/18 JMA 波加振における 1 層（5610[kN]）
- 剛性：10/18 JMA 波加振における 1 層（13400[kN/mm]）

強振動下ではその入力レベルによって建物のパラメータが変化するため（入力依存性）、微小振動下のようにその推移に基づく判定が困難であることから、予め定められた基準値との比較によって層レベルの損傷推定を行うことが基本となる。

建物の静的な状態における損傷状況の判定基準としては、応急危険度判定における残留傾斜角（1/30 以上で全壊、1/60 未満で問題無し）、被災度区分判定における残留傾斜角の基準（1/75 以上で大破、1/100 以上で中破、1/200 以上で小破）が存在する。技術者の目視等による調査でもこれらを 1 つの基準として「上部構造は小破」といったような判定が行われた。

これに対して、動的な状態における判定基準としては、建築基準法施行令第 82 条の 2 に定められる二次設計における層間変形角（1/200 以下）があるが、建物固有のパラメータとして存在する。今回の実験では先験情報として試験体の荷重増分解析結果が得られており、保有耐力は、層間変形角が 0.01 [rad]すなわち層間変形量で言えば 4cm程度を超えた時点である。これらに照らしても、躯体の被害は問題のない範囲であったと考えられる。

SHM 技術を建物に適用すると、このように、応急危険度判定等を迅速に行うことができるため、住宅所有者や居住者にとっては災害時における大きなメリットとなる。

静的な状態で基準をクリアしていても、動的に見れば設計上の想定値を超えている場合は、災害後に振動特性が大きく変化し、再び大きな地震等に見舞われた際に被害を受ける可能性も考えられる。SHM技術は、詳細な調査を要する建物を早期に見分け、早期の補修・補強等の対策につなげていくことに適用上のメリットがある。また、その判定結果の説得性を高めるツールとして、普及することが期待される。

6. 防災科研センサデータに基づく詳細な逆解析

管理技術 WG 事務局（(株)三菱総合研究所）による逆解析結果をチェックするとともに、より高精度な推定を行うことを目的として、薛委員（東北工業大学）が詳細な逆解析を行った。

なお逆解析用のデータとしては 3.6.1 で示した手順で前処理を実施しており、事務局と同一のデータセットを用いた。

6.1 簡易な逆解析結果の検証

近年、雑音に埋もれた正弦波を検出する際に、観測データを信号部分空間と雑音部分空間に分解して解析する部分空間法(Subspace method)が、信号処理及びシステム同定の分野で注目されている。

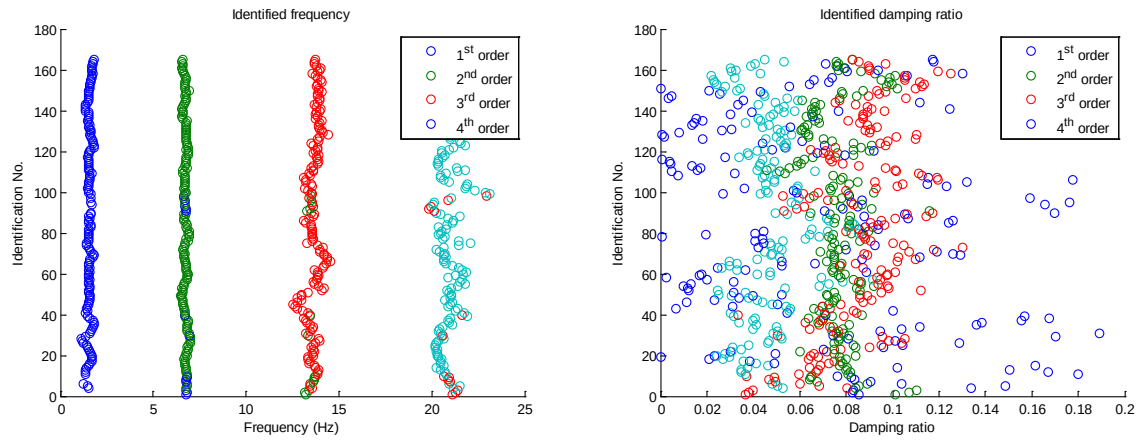
部分空間法とは、インパルス応答や差分方程式などの入出力表現を介さずに、入出力データから直接に状態空間モデルの特性行列を同定する手法である。伝達関数などの外部記述表現とは異なり、内部記述である状態空間表現をシステム同定モデルとして利用する。通常の入出力データから、QR 分解や特異値分解を用いて、状態空間モデルを同定する。

部分空間法の特徴は以下のとおりである。

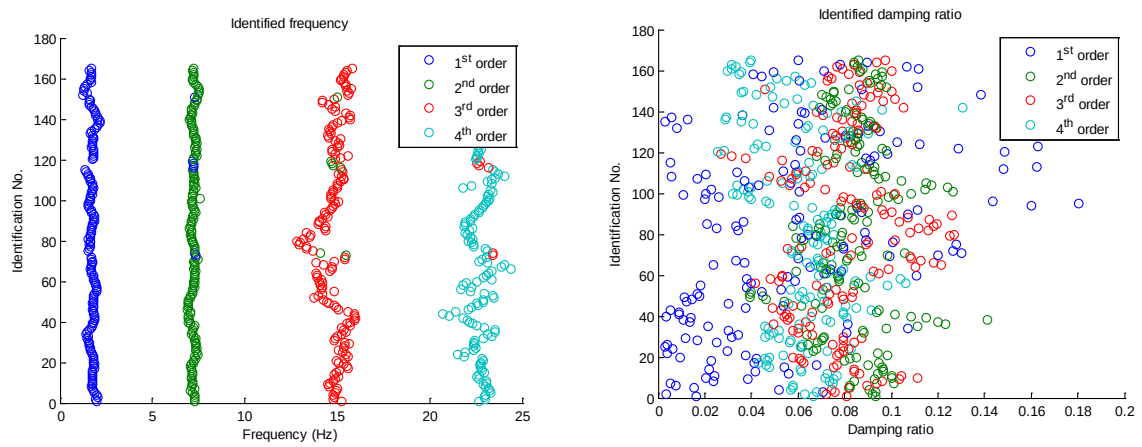
- MIMO モデルへの拡張容易性：部分空間法では状態空間表現を基にしているため、様々な次元に対応するモデル化が可能である。
- パラメトリゼーション：通常のシステム同定問題のような、パラメータ設定問題が少ない。部分空間法で設定するパラメータは主に、ハンケル行列サイズ、モデル次数のみである。
- 収束性：予測誤差法のような従来の古典的なシステム同定手法に比べ、反復計算を行わないため、非常に高速なアルゴリズムである。また、QR 分解や特異値分解といった数値的に安定なアルゴリズムを採用しているため、計算精度、安定性が高い。

10/18 のランダム加振時のデータを用いて、部分空間法に基づき固有振動数と減衰比を同定した結果を次頁に示す。

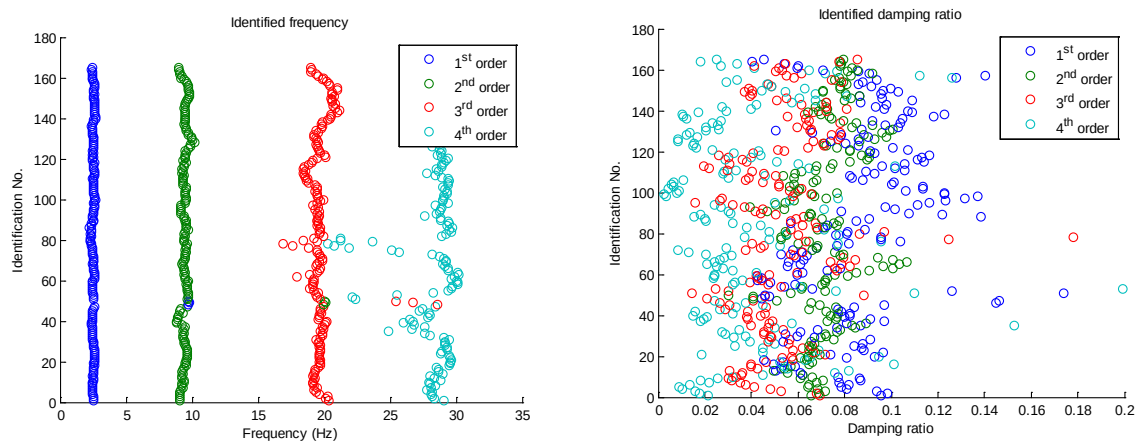
部分空間法はモード振動数の推定において安定した結果が得られるが、減衰定数の推定結果は非常に不安定になるため、減衰定数を損傷指標として用いるような場合は、他の手法を適用する必要があることが分かる。



並進 X 方向



並進 Y 方向



ねじれ方向

図 3.58 10/18 ランダム加振時の固有振動数及び減衰定数

同様の手順により、各日のランダム加振及び地震波入力時の固有振動数及び減衰定数を推定した結果を時系列で比較する。

1-3 次モード振動数は時間が経過するごとに低下している傾向が伺える。しかし加振の回数が増えると、徐々に構造物の非線形が現われ、パラメータの不確実性が高くなり、安定的な結果が得られにくくなる傾向がある。解析結果は事務局の簡易な逆解析結果とほぼ整合する。

表 3.19 各日における固有振動数及び減衰定数（並進 X 方向）

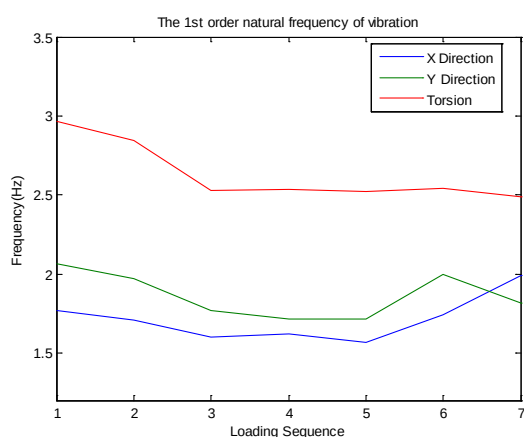
加振ケース	固有振動数			減衰比		
	1 次	2 次	3 次	1 次	2 次	3 次
10/12 ランダム 6 軸	1.771045	7.71338	15.97643	0.067287	0.079916	0.096975
10/12 横浜	2.019603	8.025524	12.20032	0.055434	0.060614	0.050186
10/15 ランダム 6 軸	1.569825	6.730673	13.87752	0.073209	0.069724	0.055089
10/15 エルセントロ	1.75675	6.713821	10.61589	0.088597	0.081853	0.050537
10/18 ランダム 6 軸①	1.5974	6.792112	13.78728	0.07529	0.087841	0.076815
10/18 ランダム 6 軸②	1.61705	6.746406	13.93364	0.060348	0.082469	0.086639
10/18 ランダム 6 軸③	1.569825	6.730673	13.87752	0.070295	0.076867	0.08586
10/18 JMA 神戸(補償)	1.917543	7.180318	13.52383	0.074355	0.055127	0.054072
10/18 JMA 神戸(補償)	1.792583	6.879444	13.99711	0.07506	0.052804	0.04776
10/18 JMA 神戸(100%)	1.806793	6.866046	13.51363	0.070574	0.057271	0.053805
10/18 ランダム X	1.724786	6.235268	11.08711	0.088597	0.081853	0.050537
10/18 ランダム Y	1.740219	6.713898	13.21374	0.084541	0.068027	0.092129
10/18 ランダム Z	1.987443	7.182291	14.66406	0.060007	0.055383	0.037554
10/21 JMA 神戸(80%)	1.609156	6.013596	10.43484	0.088896	0.070883	0.051713

表 3.20 各日における固有振動数及び減衰定数（並進 Y 方向）

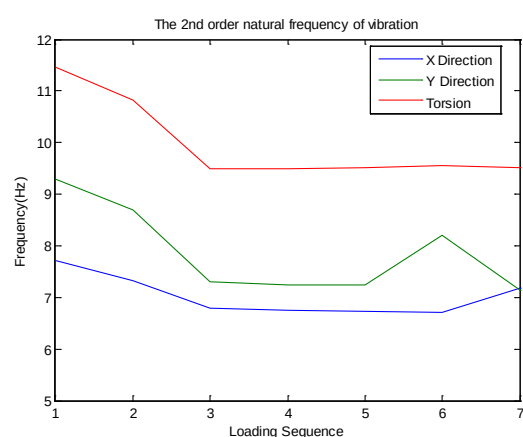
加振ケース	固有振動数			減衰比		
	1 次	2 次	3 次	1 次	2 次	3 次
10/12 横浜	2.135191	8.446419	12.97841	0.068703	0.060382	0.061319
10/15 ランダム 6 軸	1.970765	8.696974	17.16913	0.057035	0.07867	0.094541
10/15 エルセントロ	1.852887	6.945236	10.35754	0.076391	0.065668	0.048789
10/18 ランダム 6 軸①	1.76668	7.295169	15.09382	0.060871	0.081848	0.076877
10/18 ランダム 6 軸②	1.714367	7.237285	15.16928	0.059855	0.086721	0.076551
10/18 ランダム 6 軸③	1.715455	7.235889	14.62933	0.062593	0.084619	0.080297
10/18 JMA 神戸(補償)	1.974356	7.201967	13.17098	0.052858	0.070618	0.051449
10/18 JMA 神戸(補償)	1.887226	6.796533	11.16354	0.064731	0.067282	0.047574
10/18 JMA 神戸(100%)	1.859816	6.657519	10.10375	0.060246	0.067467	0.05077
10/18 ランダム X	1.734173	6.038434	9.901087	0.070176	0.069232	0.045291
10/18 ランダム Y	1.99442	8.196687	16.50457	0.054788	0.054584	0.075838
10/18 ランダム Z	1.81584	7.14191	14.52436	0.075959	0.076735	0.111389
10/21 JMA 神戸(80%)	1.639213	5.781242	9.122563	0.070244	0.065141	0.058202

表 3.21 各日における固有振動数及び減衰定数（ねじれ方向）

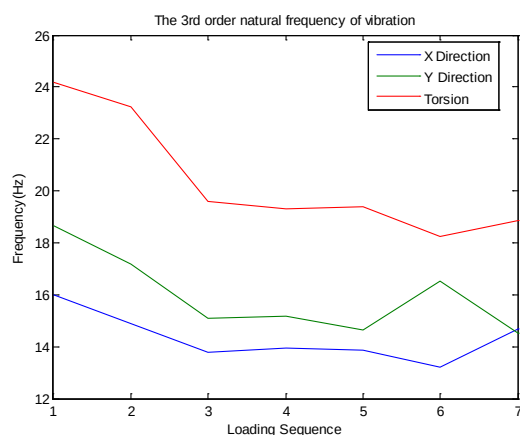
加振ケース	固有振動数			減衰比		
	1 次	2 次	3 次	1 次	2 次	3 次
10/12 横浜	2.966701	11.4612	24.16435	0.055294	0.06841	0.032623
10/15 ランダム 6 軸	2.779603	9.497085	12.98252	0.05287	0.044996	0.031164
10/15 エルセントロ	2.842426	10.81632	23.22541	0.072544	0.068858	0.052152
10/18 ランダム 6 軸①	2.405266	7.679761	11.66493	0.051283	0.055191	0.029169
10/18 ランダム 6 軸②	2.527837	9.48397	19.61054	0.096268	0.072376	0.051781
10/18 ランダム 6 軸③	2.531625	9.492525	19.30884	0.084785	0.073453	0.051668
10/18 JMA 神戸(補償)	2.519481	9.516405	19.40159	0.085775	0.071945	0.053334
10/18 JMA 神戸(補償)	2.684452	9.048534	14.6362	0.03745	0.045426	0.044868
10/18 JMA 神戸(100%)	2.490662	8.72512	13.53287	0.048168	0.053217	0.041072
10/18 ランダム X	2.429274	7.934358	12.17687	0.051588	0.049448	0.038638
10/18 ランダム Y	2.334607	8.574503	12.39092	0.067405	0.060097	0.041182
10/18 ランダム Z	2.542958	9.558129	18.25696	0.035812	0.066396	0.031463
10/21 JMA 神戸(80%)	2.489476	9.513854	18.86421	0.073879	0.042038	0.04184



並進 X 方向（短軸）



並進 Y 方向（長軸）



ねじれ方向

図 3.59 1 次～3 次モード振動数の推移

6.2 詳細な逆解析の実施手順

1) パラメータ同定の基本的な考え方

構造物の応答(振動数、モード、変位、加速度、速度および変化など)は、構造パラメータ(質量、減衰比、剛性)及び入力関数の関数である。構造パラメータの変化は構造物の応答の変化によって現れ、逆に、応答(変化)を用いて構造パラメータを推定することは逆解析の過程であり、同定問題として考えられる。一般的には同定問題は最適化問題と考えられ、応答から構造パラメータを分析し、さらに、構造パラメータの変化によって構造物の損傷を推定する。したがって、構造物の健康状態を評価することができる。簡単にいえば、パラメータの同定とは入力及び出力の観測の上で、実際にシステムと同等のシステムを確立することである。

この基本的な概念は以下の図のとおり。実構造物のモデルは図 3.1(a)で表し、解析モデルは 3.1(b)で表す。 $u(t)$ 、 $e(t)$ はそれぞれ入力、出力であり、 n は雑音、 $y(t)$ は雑音を含む出力である。

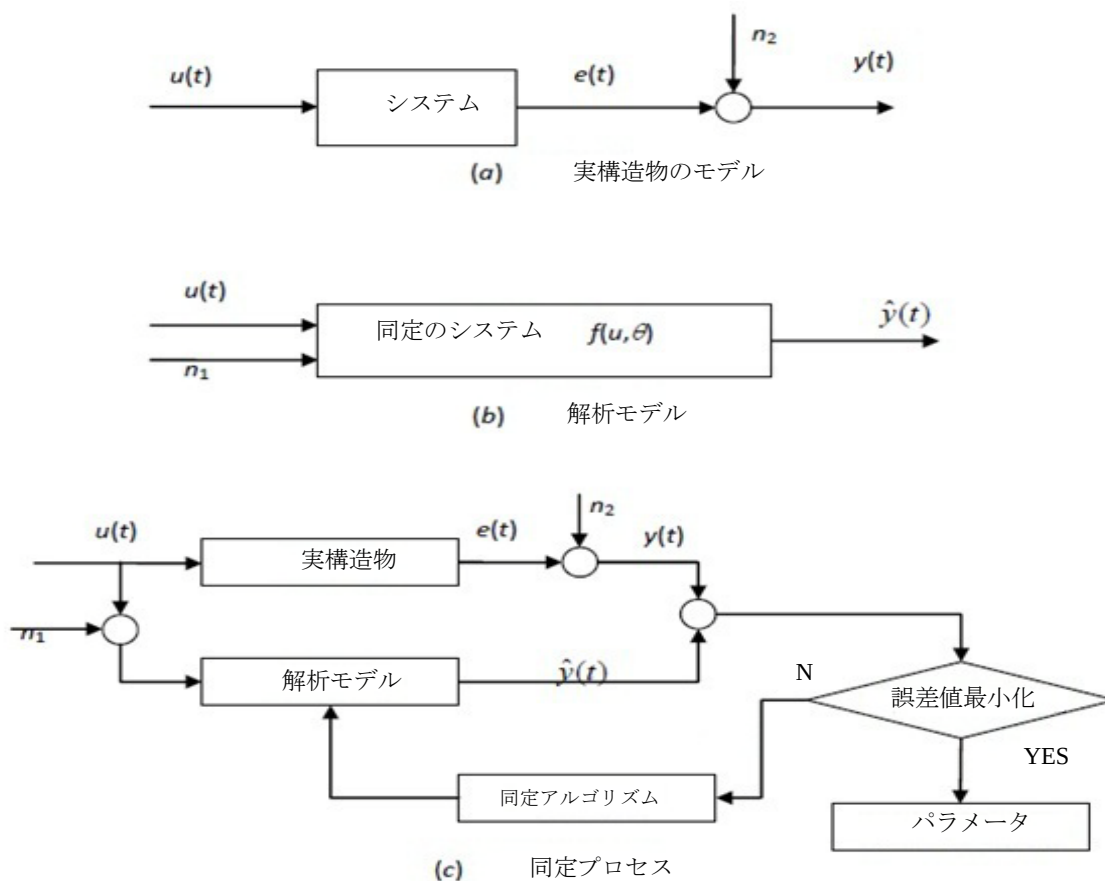


図 3.60 パラメータ同定のプロセス

2) 問題設定

1) に示したパラメータ同定の基本原理を基にすると、構造パラメータ同定問題は最適化問題と考えられ、即ち、実構造物の実測応答データと予測構造シミュレーション値の応答データとの誤差値を最小化することである。

構造システムを一般化すると下式で表現される。

$$\mathbf{y}(\boldsymbol{\theta}) = f(\mathbf{u}(k), \boldsymbol{\theta}) \quad (3.7.1)$$

$\mathbf{y} \in R^q$ はシステム出力、 $\mathbf{u} \in R^p$ はシステム入力、 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ は推定のシステムパラメータ、 k はシステム離散時間点、 $k = 0, 1, 2, \dots, T$ 。 T はサンプリング時間終点である。

正確なシステムパラメータを得るために、同定モデルシステム(3.7.1)は任意の入力に正確に出力データを生成することができる。従って、実測実構造物の出力と同定モデル出力との誤差ノルムの最小化問題に纏めている。

$$F(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \|\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)\|^2 \quad (3.7.2)$$

$\hat{\mathbf{y}}(\boldsymbol{\theta}) = f(\mathbf{u}(k), \boldsymbol{\theta})$ は同定モデルの出力、 $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムである。

形式的には、ある基準を満たし、誤差ノルム $F(\boldsymbol{\theta})$ を最小化するために、ベクトル $\boldsymbol{\theta} \in R^n$ を見つける必要がある。 $F(\boldsymbol{\theta})$ は目的関数または評価関数と称されている。最適化アルゴリズム (PSO 及び DE) のうちに、普通は結果の良し悪しは適切関数で反映される。そして、同定問題を(3.7.3)で示されたような非線形多自由度最適問題となり。

$$\begin{aligned} \min F(\boldsymbol{\theta}), \quad \boldsymbol{\theta} &= (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ \text{s.t. } \boldsymbol{\theta} \in R^n \quad & \theta_{\min,i} \leq \theta_i \leq \theta_{\max,i} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.7.3)$$

$\theta_{\max}$ 、 $\theta_{\min}$ はそれぞれ n 個のパラメータ値の上限と下限である。 PSO 及び DE という二つの最適化アルゴリズムは最適化モデルを解き、構造パラメータ同定目的を達成する。

① DE 法

上記の振動方程式より、物理用同定は、構造力学の逆問題として取り扱う。適切なモデルを作成して、実測と解析の最小化で実物のパラメータを推定するという最適問題となる。そこで微分法の (DE) の最適性について相当有利であると考えられる。 DE 法に関する説明はここで省略するが、次のような式だけ並べる。尚、今までに使ってきた PSO については、これから応用する予定である。

$$\mathbf{v}_i^{(G+1)} = \mathbf{x}_i^{(G)} + F_1 \left(\mathbf{x}_{\text{best}}^{(G)} - \mathbf{x}_i^{(G)} \right) + F \left(\mathbf{x}_{r1}^{(G)} - \mathbf{x}_{r2}^{(G)} \right) \quad (3.7.4)$$

$$\mathbf{u}_{ij}^{(G+1)} = \begin{cases} \mathbf{v}_{ij}^{(G+1)} & \text{if } (\text{rand}(j) \leq CR) \text{ or } (j = \text{randn}(i)) \\ \mathbf{x}_{ij}^{(G+1)} & \text{if } (\text{rand}(j) > CR) \text{ or } (j \neq \text{randn}(i)) \end{cases} \quad (3.7.5)$$

$$\mathbf{x}_i^{(G+1)} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{(G+1)} & \text{if } (f(\mathbf{u}_i^{(G+1)}) < f(\mathbf{x}_i^{(G)})) \\ \mathbf{x}_i^{(G+1)} & \text{if } (f(\mathbf{u}_i^{(G+1)}) \geq f(\mathbf{x}_i^{(G)})) \end{cases} \quad (3.7.6)$$

② PSO 法

PSO 法は、粒子群を操作し、最適問題を解決しようとするものである。群の中の各粒子は最適問題の潜在解答とし、 S はその群の大きさ(規模、粒子群の中の粒子数)を表している。各粒子は自身の自由度及び属性を持っているとし、次の記号を用いて表せる。

$\mathbf{x}_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D)$: 第 i 個粒子の現在位置を表す。

$\mathbf{v}_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^D)$: 第 i 個粒子の現在速度を表す。

$\mathbf{p}_i = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^D)$: 第 i 個粒子の現在までに経験した最適位置を表す。

粒子 i は「飛翔」過程に経験した最適位置、あるいは粒子 i が自身の経歴でその位置で最適な値を有することで、その位置を粒子最適位置と称し、個体自身の最適経験も含め称する。最小化問題として、目標関数値が小さければ対応する値も最適である。便宜を図るため、 $f(\mathbf{x})$ を用いて最小化問題の目標関数値とする。そこで、粒子 i 、の現在の最適位置は次の式で更新されるのは分かる。

$$\mathbf{p}_i(t+1) = \begin{cases} \mathbf{p}_i(t) & \text{if } f(\mathbf{x}_i(t+1)) \geq f(\mathbf{p}_i(t)) \\ \mathbf{x}_i(t+1) & \text{if } f(\mathbf{x}_i(t+1)) < f(\mathbf{p}_i(t)) \end{cases} \quad (3.7.7)$$

式の中の t は、繰り返しの長さとする。粒子群の中のすべての粒子が経験した最適位置を、グループ最適位置と称し、群の最適経験も含む。次式のような $\mathbf{p}_g(t)$ を持つて表す。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_g(t) &\in \{\mathbf{p}_1(t), \mathbf{p}_2(t), \dots, \mathbf{p}_s(t)\} \Big| f(\mathbf{p}_g(t)) \\ &= \min \{f(\mathbf{p}_1(t)), f(\mathbf{p}_2(t)), \dots, f(\mathbf{p}_n(t))\} \end{aligned} \quad (3.7.8)$$

以上のような粒子最適位置及びグループ最適位置を見つけ、各粒子は次の式で自分自身の最適速度及び最適位置を更新することができる。

$$\mathbf{v}_i^d(t+1) = \mathbf{v}_i^d(t) + c_1 r_1^d(t) (\mathbf{p}_i^d(t) - \mathbf{x}_i^d(t)) + c_2 r_2^d(t) (\mathbf{p}_g^d(t) - \mathbf{x}_i^d(t)) \quad (3.7.9)$$

$$\mathbf{x}_i^d(t+1) = \mathbf{x}_i^d(t) + \mathbf{v}_i^d(t+1) \quad (3.7.10)$$

その内、上付きの d は粒子の第 d 次元を表し、今回の設問を D 元最小化問題とすると、 $d \in 1, 2, \dots, D$ となる。“ i ” は第 i 個粒子を表し、 $i \in 1, 2, \dots, S$ なる。 t は、繰り返しの長さである。式の中には、お互い独立しているランダム変数列、 $r_1 \square U(0,1)$ および $r_2 \square U(0,1)$ を採用し、両方とも $U(0,1)=[0,1]$ で均等分布のランダム変数を取る。 c_1 、 c_2 は学習要素(加速要素、加速常数)と称し、 $0 \sim 2$ の間に値をとる。式(3.7.9)から分かるように、 c_1 は粒子自身の最適位置へ飛翔する歩調(長さ)を調整し、 c_2 はグループ最適位置へ飛翔する歩調(長さ)を調整する役割である。最適位置捜査範囲から飛ばないようにしたいので、速度 $\mathbf{v}_i^d$ の値はよくある空間 $[\mathbf{v}_{\min}^d, \mathbf{v}_{\max}^d]$ の中に制限されている。もし、捜査空間を $[\mathbf{x}_{\min}^d, \mathbf{x}_{\max}^d]$ 内に制限するなら、よく、 $\mathbf{v}_{\max}^d = k \times (\mathbf{x}_{\max}^d - \mathbf{x}_{\min}^d)$ と設定する。その内 $0.1 \leq k \leq 1.0$ である。

式(3.7.9)を常に更新捜査し、粒子が最適解を見つけることができ、問題解決につながる。

3) モデリング

構造物の振動方程式は次となる：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{u}(t) \quad (3.7.11)$$

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} ; \zeta_r = \frac{\alpha}{2\omega_r} + \frac{\beta\omega_r}{2} \quad (3.7.12)$$

その内の $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ は、質量、減衰そして剛性マトリックスであり、 $\mathbf{x}$ は変位ベクトル、 $\mathbf{u}(t)$ は入力ベクトルである。質量マトリックスは先験情報（4 階から 1 階までの質量をそれぞれ 109, 124, 124, 128 トン）に基づき形成される。減衰マトリックスは Rayleigh 減衰と仮定し、 α と β は Rayleigh 減衰の質量及び剛性マトリックスの比例係数である。 ζ_r は第 r 階モードの減衰比であり、 ω_r は構造物の第 r 回固有振動数である。よって、同定する予定のパラメータは下記になる。

$$\theta = (m_1, m_2, m_3, m_4; k_1, k_2, k_3, k_4; \zeta_1, \zeta_2) \quad (3.7.13)$$

6.3 層レベルの損傷推定結果

1) DE 法及び PSO 法に基づくパラメータ同定結果

モデルパラメータの同定結果を示す。DE 及び PSO という二つ異なるアルゴリズムの同定結果を比較すると、双方とも各階剛性値を安定的な結果に収斂させることができた。

表 3. 22 10/12 横浜波加振時の DE 法及び PSO 法に基づく各層剛性

2010 年 10 月 12 日 横浜波		データ区間(s)	データ名称	4 階剛性 K4(N・m)	3 階剛性 K3(N・m)	2 階剛性 K2(N・m)	1 階剛性 K1(N・m)	α	β
X 方向	DE	24-26	2010-1012-026	6.58E+08	2.59E+08	7.73E+07	2.82E+08	0.82	0.0026
		26-28	2010-1012-026	5.95E+08	2.32E+08	8.12E+07	2.40E+08	0.53	0.0051
		28-30	2010-1012-026	5.31E+08	1.98E+08	7.57E+07	2.43E+08	0.49	0.0055
	PSO	24-26	2010-1012-026	6.53E+08	2.63E+08	7.89E+07	2.85E+08	0.66	0.0100
		26-28	2010-1012-026	5.98E+08	2.28E+08	8.15E+07	2.81E+08	0.53	0.0100
		28-30	2010-1012-026	5.43E+08	2.06E+08	7.66E+07	2.20E+08	0.19	0.0100
Y 方向	DE	24-26	2010-1012-026	7.25E+08	2.86E+08	8.04E+07	3.05E+08	0.95	0.0031
		26-28	2010-1012-026	5.38E+08	2.82E+08	8.29E+07	2.63E+08	0.98	0.0058
		28-30	2010-1012-026	7.37E+08	2.59E+08	7.60E+07	2.60E+08	1.17	0.0047
	PSO	24-26	2010-1012-026	6.35E+08	2.60E+08	9.32E+07	3.16E+08	0.67	0.0070
		26-28	2010-1012-026	5.35E+08	2.76E+08	8.17E+07	2.69E+08	0.18	0.0083
		28-30	2010-1012-026	7.39E+08	2.54E+08	7.36E+07	2.69E+08	0.58	0.0045
ねじれ	DE	24-26	2010-1012-026	4.14E+08	2.64E+08	2.63E+08	2.57E+09	0.93	0.0013
		26-28	2010-1012-026	4.65E+08	1.61E+08	6.02E+08	6.63E+08	3.65	0.0024
		28-30	2010-1012-026	4.67E+08	8.82E+08	3.02E+08	2.37E+08	0.76	0.0007
	PSO	24-26	2010-1012-026	4.29E+08	2.74E+08	2.61E+08	2.66E+09	0.39	0.0011
		26-28	2010-1012-026	4.58E+08	1.70E+08	5.85E+08	6.48E+08	3.65	0.0002
		28-30	2010-1012-026	4.78E+08	8.80E+08	2.85E+08	2.28E+08	3.65	0.0002

表 3. 23 10/15 エルセントロ波加振時の DE 法及び PSO 法に基づく各層剛性

2010 年 10 月 15 日 エルセントロ波		データ区間(s)	データ名称	4 階剛性 K4(N・m)	3 階剛性 K3(N・m)	2 階剛性 K2(N・m)	1 階剛性 K1(N・m)	α	β
X 方向	DE	29-31	2010-1015-012	4.69E+08	1.78E+08	6.14E+07	1.93E+08	1.50	0.0033
		31-33	2010-1015-012	4.45E+08	1.59E+08	1.00E+08	1.80E+08	3.10	0.0024
		33-35	2010-1015-012	3.09E+08	1.15E+08	5.68E+07	3.26E+08	0.67	0.0095
	PSO	29-31	2010-1015-012	4.58E+08	1.82E+08	5.90E+07	1.98E+08	0.73	0.0100
		31-33	2010-1015-012	4.24E+08	1.61E+08	9.53E+07	2.01E+08	0.45	0.0100
		33-35	2010-1015-012	3.05E+08	1.16E+08	7.28E+07	3.16E+08	0.73	0.0000
Y 方向	DE	29-31	2010-1015-012	4.38E+08	1.73E+08	6.74E+07	2.01E+08	1.14	0.0055
		31-33	2010-1015-012	5.51E+08	2.23E+08	7.80E+07	2.18E+08	1.47	0.0030
		33-35	2010-1015-012	3.94E+08	1.48E+08	7.09E+07	1.99E+08	1.15	0.0055
	PSO	29-31	2010-1015-012	3.88E+08	1.60E+08	6.78E+07	2.18E+08	1.04	0.0035
		31-33	2010-1015-012	5.56E+08	2.32E+08	7.74E+07	2.14E+08	1.36	0.0060
		33-35	2010-1015-012	4.00E+08	1.52E+08	6.80E+07	2.00E+08	0.69	0.0051
ねじれ	DE	29-31	2010-1015-012	5.13E+08	3.12E+08	1.27E+08	2.89E+08	0.27	0.0035
		31-33	2010-1015-012	1.34E+08	1.46E+08	9.88E+07	3.74E+08	0.34	0.0047
		33-35	2010-1015-012	6.34E+08	2.01E+08	1.66E+08	3.00E+08	2.54	0.0021
	PSO	29-31	2010-1015-012	5.33E+08	3.31E+08	1.25E+08	3.01E+08	1.43	0.0009
		31-33	2010-1015-012	1.31E+08	1.44E+08	9.43E+07	3.66E+08	3.56	0.0016
		33-35	2010-1015-012	6.31E+08	1.94E+08	1.64E+08	3.16E+08	3.56	0.0016

表 3.24 10/18 JMA 神戸波加振時の DE 法及び PSO 法に基づく各層剛性

2010 年 10 月 18 日 JMA 神戸波		データ区間(s)	データ名称	4 階剛性 K4(N・m)	3 階剛性 K3(N・m)	2 階剛性 K2(N・m)	1 階剛性 K1(N・m)	α	β
X 方向	DE	19-21	2010-1018-009	2.29E+08	1.10E+08	7.03E+07	1.43E+08	0.21	0.0153
			2010-1018-010	4.65E+08	1.64E+08	5.66E+07	1.83E+08	1.39	0.0038
			2010-1018-012	1.65E+08	9.42E+07	7.26E+07	1.56E+08	0.30	0.0130
		21-23	2010-1018-009	1.31E+08	1.08E+08	8.93E+07	1.51E+08	0.94	0.0130
			2010-1018-010	5.31E+07	1.19E+08	9.12E+07	1.31E+08	1.01	0.0087
			2010-1018-012	5.32E+07	1.30E+08	8.52E+07	1.38E+08	1.25	0.0046
		23-25	2010-1018-009	1.53E+08	1.02E+08	9.23E+07	1.51E+08	0.63	0.0130
			2010-1018-010	1.15E+08	8.58E+07	8.46E+07	1.39E+08	0.54	0.0130
			2010-1018-012	8.36E+07	8.90E+07	8.94E+07	1.36E+08	0.42	0.0116
	PSO	19-21	2010-1018-009	2.21E+08	1.07E+08	6.62E+07	1.38E+08	1.39	0.0038
			2010-1018-010	4.77E+08	1.63E+08	5.66E+07	1.84E+08	1.39	0.0038
			2010-1018-012	1.60E+08	9.69E+07	6.95E+07	1.54E+08	2.47	0.0389
		21-23	2010-1018-009	8.67E+07	1.34E+08	8.47E+07	1.52E+08	1.27	0.0104
			2010-1018-010	8.04E+07	8.31E+07	1.00E+08	1.32E+08	0.08	0.0166
			2010-1018-012	5.27E+07	1.27E+08	8.66E+07	1.38E+08	1.13	0.0054

		23-25	2010-1018-009	1.57E+08	1.04E+08	9.11E+07	1.56E+08	1.08	0.0095
			2010-1018-010	1.08E+08	9.09E+07	7.90E+07	1.38E+08	0.73	0.0119
			2010-1018-012	8.78E+07	9.26E+07	8.81E+07	1.37E+08	1.07	0.0058
Y 方向	DE	19-21	2010-1018-009	7.42E+07	1.47E+08	8.92E+07	1.45E+08	0.42	0.0101
			2010-1018-010	8.98E+07	1.14E+08	9.44E+07	1.48E+08	0.42	0.0073
			2010-1018-012	7.24E+07	1.42E+08	8.34E+07	1.68E+08	0.42	0.0067
		21-23	2010-1018-009	7.74E+07	1.36E+08	9.03E+07	1.46E+08	0.21	0.0115
			2010-1018-010	1.11E+08	1.35E+08	9.33E+07	1.41E+08	0.42	0.0089
			2010-1018-012	1.84E+08	1.03E+08	9.62E+07	1.45E+08	0.65	0.0065
		23-25	2010-1018-009	6.79E+07	1.54E+08	1.11E+08	1.50E+08	0.42	0.0074
			2010-1018-010	7.72E+07	9.30E+07	1.18E+08	1.44E+08	0.42	0.0090
			2010-1018-012	9.10E+07	8.96E+07	1.11E+08	1.51E+08	0.42	0.0079
	PSO	19-21	2010-1018-009	7.44E+07	1.44E+08	8.39E+07	1.40E+08	0.51	0.0087
			2010-1018-010	8.80E+07	1.20E+08	9.90E+07	1.56E+08	-1.94	0.0265
			2010-1018-012	7.61E+07	1.46E+08	8.00E+07	1.75E+08	0.71	0.0043
		21-23	2010-1018-009	7.97E+07	1.42E+08	9.17E+07	1.50E+08	1.79	0.0028
			2010-1018-010	1.07E+08	1.43E+08	9.38E+08	1.44E+08	0.43	0.0090
			2010-1018-012	1.71E+08	1.09E+08	9.53E+07	1.43E+08	0.89	0.0046
		23-25	2010-1018-009	6.57E+07	1.75E+08	1.06E+08	1.52E+08	0.61	0.0060
			2010-1018-010	6.42E+07	1.05E+08	1.14E+08	1.43E+08	0.50	0.0085
			2010-1018-012	8.13E+07	8.24E+07	1.22E+08	1.49E+08	-0.78	0.0173
ねじれ	DE	19-21	2010-1018-009	7.82E+08	3.62E+08	1.13E+08	3.56E+08	0.53	0.0022
			2010-1018-010	7.65E+08	1.81E+08	5.23E+08	7.62E+08	0.53	0.0022
			2010-1018-012	1.12E+09	6.60E+08	2.13E+08	1.58E+08	0.53	0.0022
		21-23	2010-1018-009	9.07E+08	4.15E+08	1.38E+08	3.95E+08	0.53	0.0022
			2010-1018-010	1.20E+09	3.69E+08	7.94E+07	3.79E+08	1.47	0.0039
			2010-1018-012	2.46E+08	7.36E+07	7.82E+08	9.56E+08	0.53	0.0022
		23-25	2010-1018-009	1.11E+09	4.00E+08	1.53E+08	3.79E+08	1.55	0.0022
			2010-1018-010	9.85E+08	3.80E+08	1.53E+08	3.59E+08	1.03	0.0022
			2010-1018-012	2.51E+08	6.64E+07	7.93E+08	1.32E+09	0.53	0.0057
	PSO	19-21	2010-1018-009	6.95E+08	3.62E+08	1.12E+08	3.63E+08	0.56	0.0017
			2010-1018-010	7.46E+08	1.84E+08	5.04E+08	7.50E+08	1.39	0.0004
			2010-1018-012	1.15E+08	5.62E+08	2.07E+08	1.47E+08	0.08	0.0011
		21-23	2010-1018-009	9.20E+08	4.03E+08	1.38E+08	3.95E+08	0.14	0.0021
			2010-1018-010	1.14E+09	3.65E+08	8.54E+07	3.69E+08	0.92	0.0044
			2010-1018-012	4.02E+08	7.22E+07	7.90E+08	9.23E+08	0.07	0.0026
		23-25	2010-1018-009	1.14E+09	3.84E+08	1.53E+08	3.93E+08	1.86	0.0011
			2010-1018-010	9.80E+08	3.66E+08	1.59E+08	3.56E+08	0.26	0.0066
			2010-1018-012	2.84E+08	6.66E+07	8.39E+08	1.26E+09	0.26	0.0066

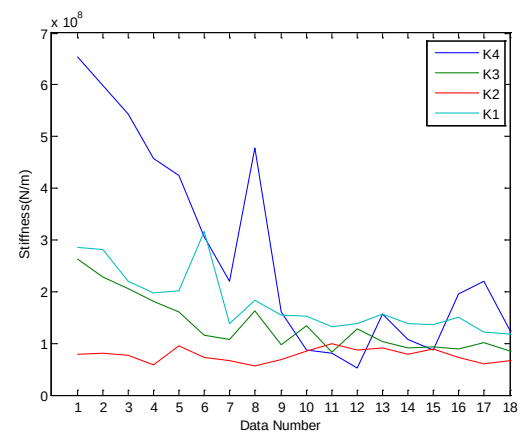
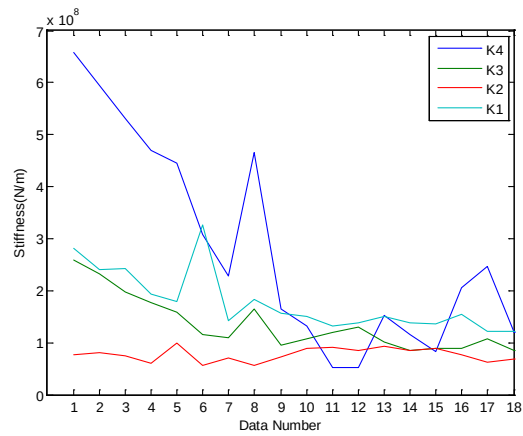
表 3. 25 10/21 JMA 神戸波加振時の DE 法及び PSO 法に基づく各層剛性

2010 年 10 月 21 日 JMA 神戸波		データ区間(s)	データ名称	4 階剛性 K4(N・m)	3 階剛性 K3(N・m)	2 階剛性 K2(N・m)	1 階剛性 K1(N・m)	α	β
X 方向	DE	19-21	2010-1021-009	2.06E+08	8.83E+07	7.70E+07	1.55E+08	0.27	0.0083
		21-23	2010-1021-009	2.46E+08	1.07E+08	6.18E+07	1.22E+08	1.26	0.0092
		23-25	2010-1021-009	1.19E+08	8.50E+07	6.77E+07	1.21E+08	0.20	0.0137
	PSO	19-21	2010-1021-009	1.96E+08	8.86E+07	7.34E+07	1.51E+08	0.74	0.0046
		21-23	2010-1021-009	2.21E+08	1.01E+08	6.08E+07	1.21E+08	0.15	0.0199
		23-25	2010-1021-009	1.23E+08	8.47E+07	6.70E+07	1.18E+08	0.05	0.0163
Y 方向	DE	19-21	2010-1021-009	1.48E+08	8.85E+07	7.15E+07	1.35E+08	1.03	0.0011
		21-23	2010-1021-009	2.49E+08	1.17E+08	6.22E+07	1.27E+08	0.27	0.0095
		23-25	2010-1021-009	1.21E+08	9.05E+07	7.52E+07	1.33E+08	0.99	0.0013
	PSO	19-21	2010-1021-009	1.41E+08	9.46E+07	7.21E+07	1.43E+08	0.61	0.0058
		21-23	2010-1021-009	2.28E+08	1.21E+08	5.89E+07	1.34E+08	0.95	0.0045
		23-25	2010-1021-009	1.28E+08	8.61E+07	7.68E+07	1.33E+08	0.76	0.0034
ねじれ	DE	19-21	2010-1021-009	1.84E+08	8.23E+08	6.78E+07	2.59E+08	0.54	0.0008
		21-23	2010-1021-009	7.21E+08	2.76E+08	6.38E+07	1.42E+09	0.84	0.0005
		23-25	2010-1021-009	2.44E+08	7.17E+07	1.93E+09	7.13E+08	0.47	0.0008
	PSO	19-21	2010-1021-009	1.90E+08	8.33E+08	6.79E+07	2.44E+08	0.58	0.0008
		21-23	2010-1021-009	7.38E+08	2.89E+08	6.46E+07	1.37E+09	0.86	0.0015
		23-25	2010-1021-009	2.54E+08	7.12E+07	2.00E+09	7.11E+08	0.06	0.0011

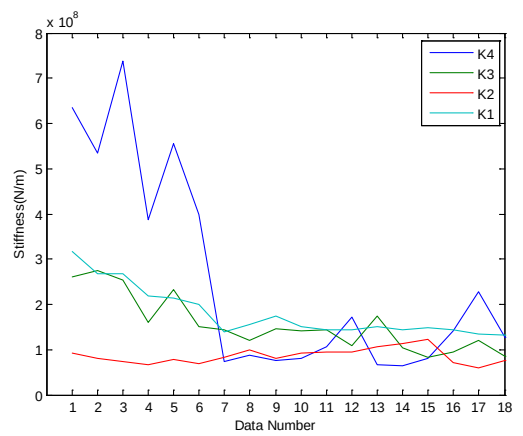
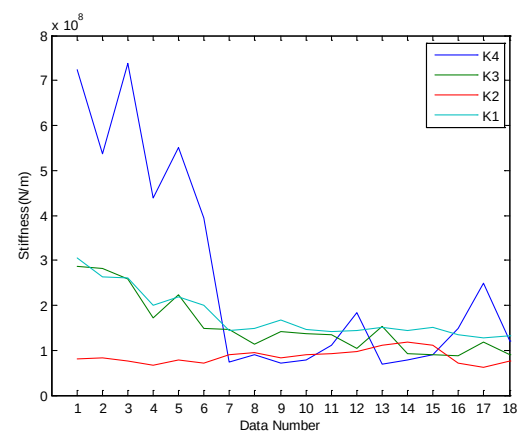
各層剛性の同定結果の推移をグラフ化したものを次頁に示す。

実験の進行に従って、構造物の各階の剛性が落ちて来ることが分かった。特にそのうちの 4 階、3 階と 1 階のほう割とはっきりとしているが、2 階の剛性は明らかな変化が見当たらない結果となった。

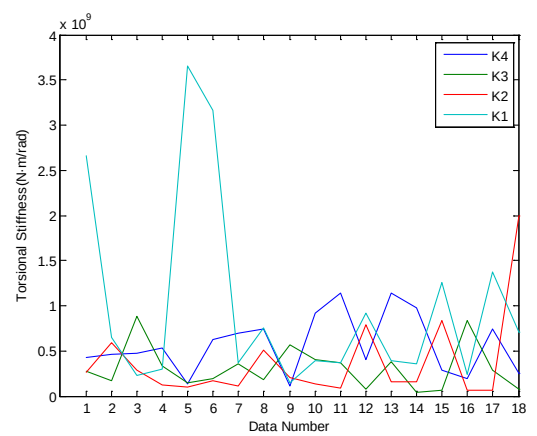
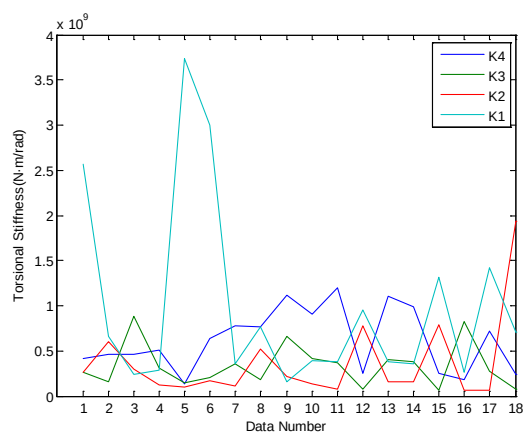
また、最初の加振時の剛性の減少は割とわかりやすく、その後だんだん緩やかになる。これは地震波の入力によって、構造物は徐々に線形領域から非線形領域に進行し、線形の計算モデルの適用上の限界と考えられる。元の構造物は RC 構造のフレームと耐震壁の組み合わせを使用し、簡略化モデルは剛性の梁と弾性の柱で構成された構造であるため、同定結果は実構造物応答と完全に合致することが現時点では難しい。しかし、構造物の剛性変化の傾向を大まかに把握できたといえる。



並進 X 方向



並進 Y 方向



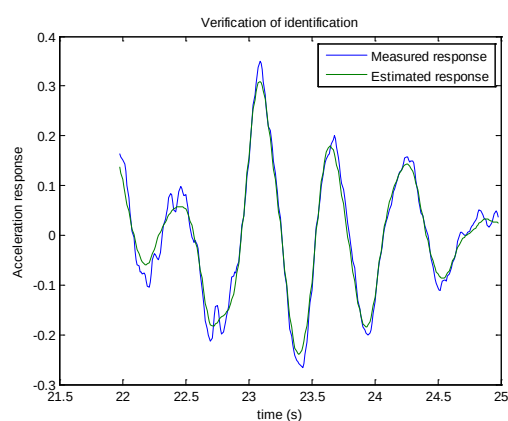
ねじれ方向

図 3. 61 各日の DE 法及び PSO 法に基づく各層剛性の推移

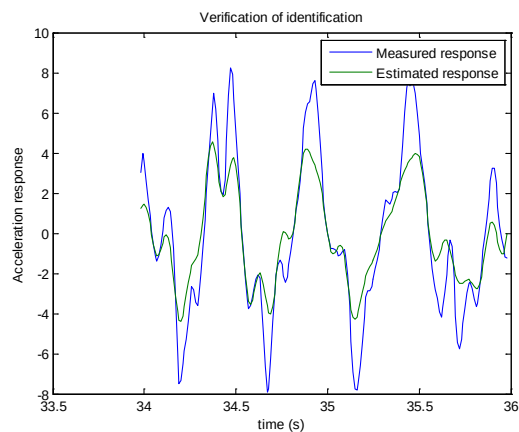
2) パラメータ同定結果の妥当性検証

10/18 に行われた JMA 神戸波加振時（補償波/100%加振）の実測応答と、逆解析の結果として得られたモデルの出力を比較した結果を以下に示す。

補償波の際は構造物が線形領域に留まり、同定結果と実測結果とのかなり一致しており優れた方法だと考えられる。しかし、100%加振時には入力振幅レベルが大きくなるにつれて、同定結果と実測結果との間に違いが生じた。



補償波入力時



100%入力時

図 3.62 10/18 JMA 神戸波補償波の際の実測応答とモデル出力の比較

3) 詳細な逆解析のまとめ

DE 法及び PSO 法を用いて、構造物の各層剛性と減衰定数を同定し、その変化を踏まえて層レベルの損傷推定を行うことができた。

今回の実構造は RC 造のフレームと耐震壁との組み合わせであるため、構造物を剛性の梁と弾性の柱で構成された構造に簡略化するモデリングの過程が、同定結果に差異が生じる要因となることが分かった。

7. SHM システムの技術的な到達点と課題

管理技術 WG として 3 ヶ年行ってきた実験的検証を通じて、SHM システムの技術的な到達点(●)と課題(▼)を、以下に整理する。

1) 災害時・平時に抛らず共通

- 小型で高精度なセンサ、高精度な推定手法、大容量のデータ管理技術
- ▼ センサシステムの初期コスト・運用コスト
- ▼ 利用目的やニーズに即したサービスの項目・内容の考え方が曖昧
- ▼ 一般ユーザ向けの分かりやすい情報提供
- ▼ データベース構造の標準化、共通基盤の整備

2) 災害時の SHM システム（大規模地震、強風等）

- 応急危険度判定に代わるサービスとして提供できること

技術者による応急危険度判定及び被災度区分判定は延べ 45 時間（9 名×5 時間）要したのに対し、管理技術 WG システムは加振終了から 5 分後に推定結果が現地へ送られてきた。後日の逆解析も同様に、解析プログラム作成を除けば、演算及び推定結果の収斂は 5 分～10 分程度で迅速に完了する。

大規模地震発生時には、SHM システムを予め備えておくことにより、継続使用可否について居住者等へ迅速に情報提供できる。また、応急危険度判定等の要員が不足することが想定されるが、要員派遣先の優先順位や詳細調査の要否を判断することが可能である。

- ▼ 確実な稼動を担保すること

人命に係るサービスを提供することになるため、センサを多数設置して冗長性を確保すること、通信環境の確認、センサの稼動状況の確認、キャリブレーション等について定期的に行う仕組みが重要である。

3) 平時の SHM システム（中小規模地震、風、常時微動等）

- 動的な変化を捉えるパラメータを高い精度で推定できること
- ▼ 推定結果の解釈の仕方を明確にすること

固有振動数等のモーダルパラメータがどの程度低下した場合に、補修・補強等を検討すべきかについて、実測データに基づく知見が不足している。センサデータだけでなく、技術者の目視による結果も併せて蓄積・管理し、実現象と照らし合わせて効果的な知見が蓄積されるような仕組みが必要と考えられる。

情報は所有者のものであることが基本だが、情報を匿名化し、二次利活用者も含めて限定的に閲覧できるような共通基盤の構築も検討を要する。

- ▼ 推定結果の位置づけを明確にすること

現状では、設計者・施工者の間で、自ら設計・施工した建物の確認を目的とした、微小振動時の SHM 利用のニーズがある。

しかし一般ユーザを含めて広く SHM が普及していくには、微小振動時の評価結果が建築物の要求性能の中でどのように位置づけられ、建物の維持管理・流通段階において自らの建物の状態を説明するパラメータとして活用できるか、明確にする必要がある。

（例）固有振動数等のモーダルパラメータと使用性（サービサビリティ）

8. 一般向けQ&A集の作成

平成 21 年度に作成した SHM 技術に関する関連用語の整理・解説資料に基づいて、建築の専門家でない一般にも分かりやすく技術内容を伝える技術解説書の取り纏めに向けて、主要用語、SHM 技術の概要、SHM 技術のユーザへの効果等に関する解説文案・図案等の作成を行う。

別途作成した SHM ガイドラインは、SHM サービス事業者等を対象としているのに対し、ここでは住宅の所有者や居住者等を対象として想定している。

Q 1 SHM（構造ヘルスモニタリング）とは何ですか？

A 1 :

センサから揺れの状況を計測し、建物の健康診断を行う技術です。

【解説】

大きな地震が発生したときの建物の揺れの状況を計測し、建物の損傷や劣化の位置や度合いを評価します。ユーザにとっては、災害発生直後の対応（安全な避難、事業継続等）や、建物の維持管理や流通の段階で、役立つ情報となります。

センサで計測するタイミングは、必ずしも、不意に発生する地震時だけとは限りません。私たちは普段、建物の中で過ごしているときに揺れを感じることはありませんが、ごく小さな地震、風、また自動車や鉄道等の影響によって、建物は常にわずかに揺れているのです。SHM では、こうした小さな揺れを捉えて、建物の健康状態を評価することもできます。

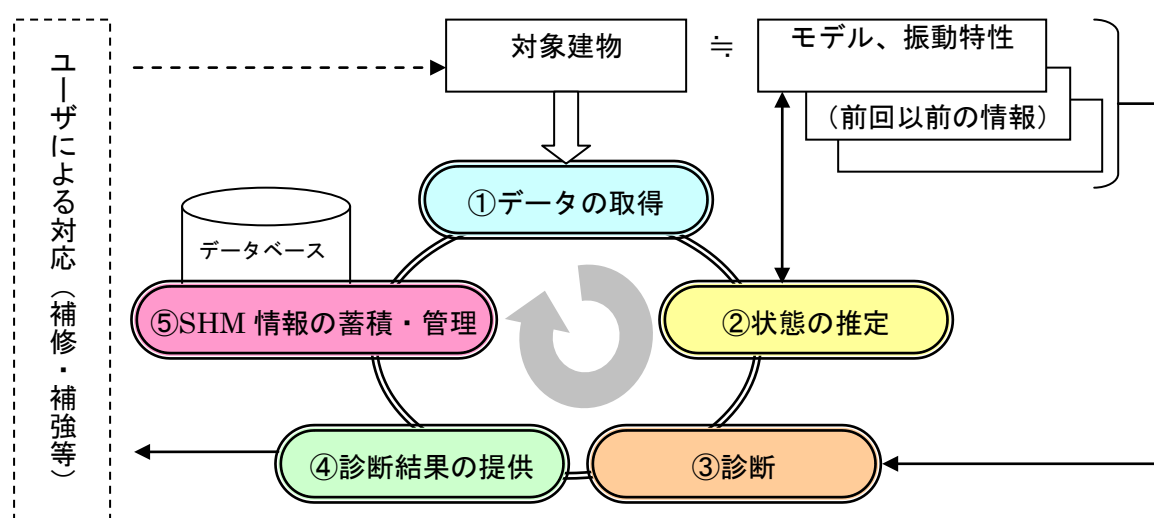


図 3.63 SHM 技術を構成する 5 つのステップ

Q 2 建物の健康診断はなぜ必要なのですか？

A 2 :

私たちが毎年受診する健康診断や定期的に行う車検制度等と同様に、人間が一生の中で多くの時間を過ごす建物に関しても、建物の使用期間を通じて目標とする性能が確保されているかどうかを確認する仕組みが必要です。SHM は、それを実現するための技術の1つです。

【解説】

建物は、地震や風を受けると力が加わり、建設された直後の状態から、時間が経つにつれて徐々に変化してきます。またこうした力を受けなくとも、変形・ひび割れ等の現象として現れてきたり、リフォーム・増改築等によって建物に変化が現れてきたりといったことが考えられます。

多世代利用住宅は、多世代に住み継がれていく住宅であり、そのためには、建物に生ずる変化（機能・性能）が適切に把握でき、維持されていく仕組みが必要です。それが、中古住宅の流通の場面において、判断材料や優位な条件となります。

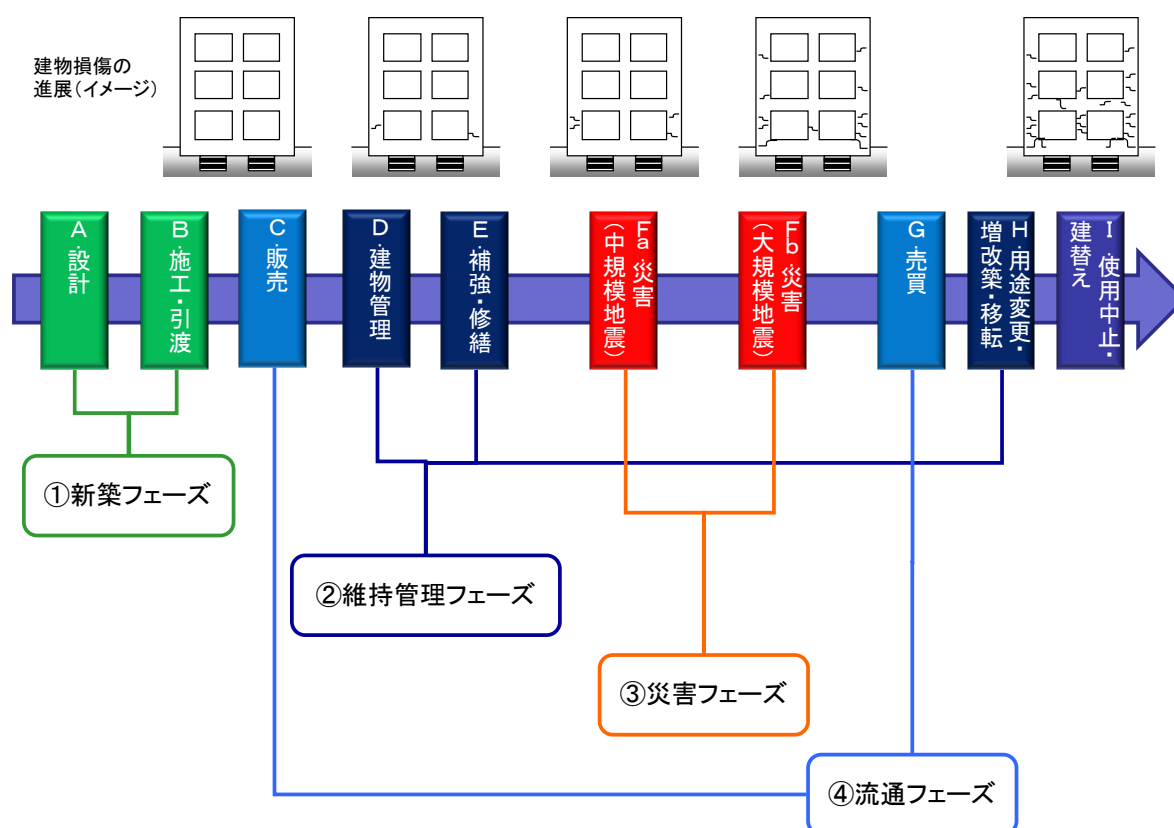


図 3.64 建物ライフサイクルにおける SHM 利用場面の区分

Q 3 技術者による定期点検と比べて、どのような点で異なるのですか。

A 3 :

両者とも、建物の健康状態を評価する仕組みである点で共通しています。

定期点検が、建物の変形・ひび割れ等の現象として現れる「静的な変化」を捉えるのに対して、SHM は、振動特性（揺れ方）として現れる「動的な変化」を捉えることができます。

【解説】

定期点検では、建物が建設されてから 5 年後、10 年後等のタイミングで、主に技術者の目視により、ひび割れの有無等の調査が行われます。しかし、点検時期の間に一定の空白期間があることに加え、ひび割れや亀裂が被覆材等で覆われている場合には検知が難しいこと、ひび割れが建物全体にどのような影響を及ぼすのか（言い換えると、建物全体で見た場合にそのひび割れは補修するに値するかどうか）の評価が難しいとされています。

これに対して SHM は、建物の健康状態を「動的な変化」から捉えます。例えば、揺れ方の違いから、建物内部に発生・進展している損傷を推定し、何階のどの辺りに損傷が発生しているかを評価できます。また、コンクリートがひび割れを起こすときに発生する音をセンサで捉えて、深刻な状態になる前の段階で補修等の対策をとることができます。このように SHM は、技術者による目視点検を代替あるいは補完しあう新しい診断技術として期待されています。

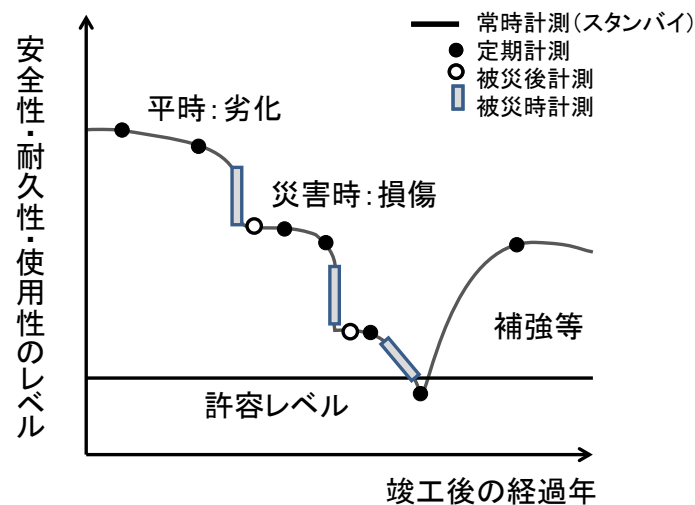


図 3.65 データ計測のタイミングに関する3つの考え方（イメージ）

Q 4 SHM を導入すると、どのようなメリットがありますか？

A 4 :

- ①効果的・経済的な維持管理につながる
- ②地震直後に建物内に居続けてよいか、避難すべきかを把握できる
- ③取引の際には重要な判断材料の1つとして活用できる

【解説】

1点目は、建物の維持管理におけるメリットです。SHM によって目視点検を代替あるいは併用することで、維持管理のための評価の精度が向上すること、時間や手間がかからず効率的に行えることといった利点があります。

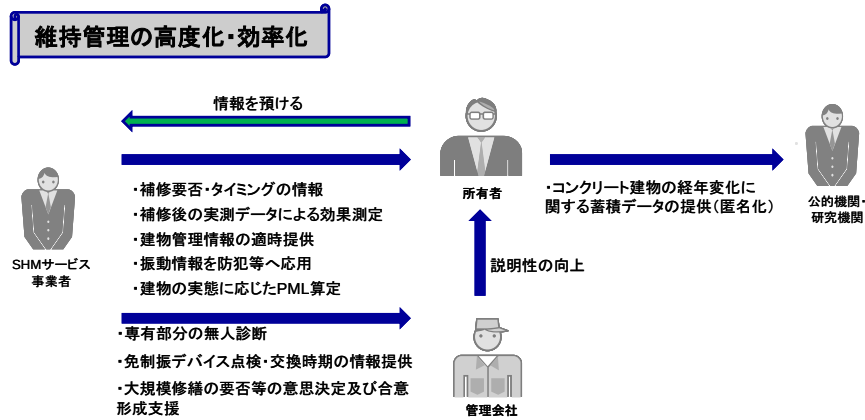


図 3.66 「維持管理フェーズ」における SHM 利用場面

2点目は、災害時のメリットです。大きな地震が発生した場合には、応急危険度判定や被災度判定のための人員が不足し、情報が得られるまでに時間がかかる可能性があります。SHM を導入すれば、建物をそのまま継続して使用可能であるかどうか、迅速な情報提供が可能です。大きな変化がないことがすぐに分かれば、オーナーや入居者は安心できますし、特に高層階に住んでいるお年寄りにとっては避難の手間が省けます。

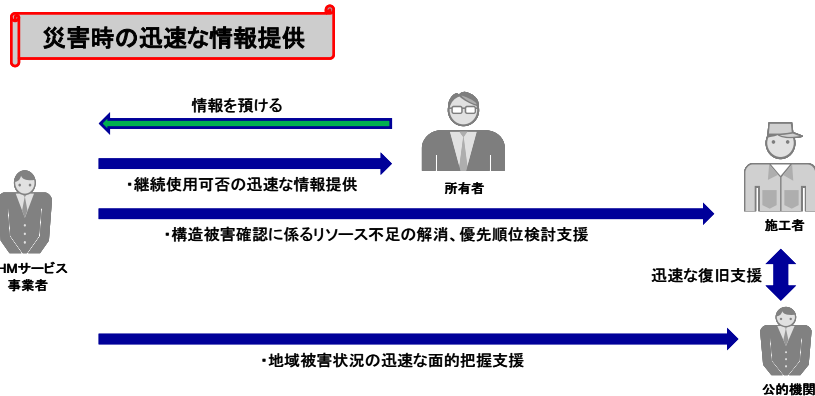


図 3.67 「災害フェーズ」における SHM 利用場面

3点目は、流通段階のメリットです。建物の健康状態を評価した結果が長期にわたって蓄積・管理されていると、流通の場面で買い手にとっての判断材料となるとともに、優位性につながります。例えば住宅履歴情報システムで蓄積管理する情報項目の1つとして、SHM による動的な変化が記録しておくといった仕組みが考えられます。

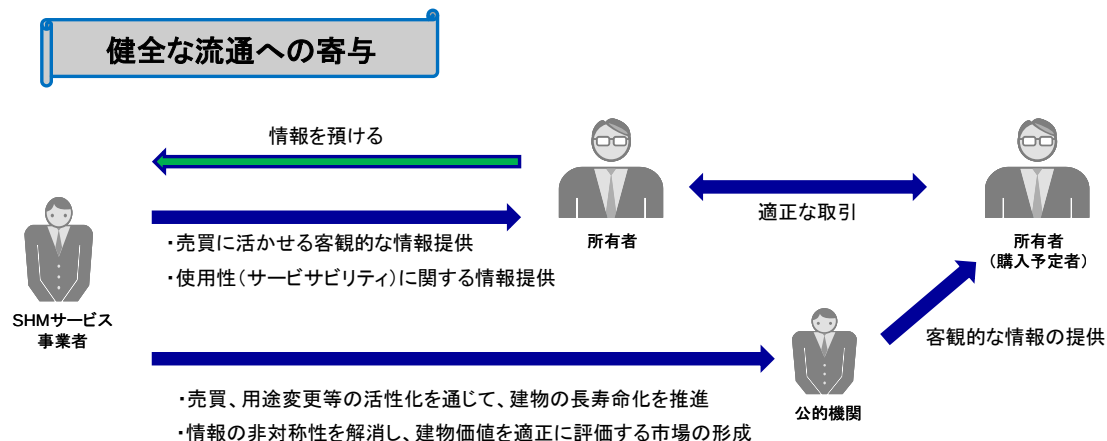


図 3.68 「流通フェーズ」における SHM 利用場面

Q 5 建物の健康診断はどのようにして行い、どの程度まで正確なことが分かるのですか？

A 5 :

建物の柱・梁・床等に設置したセンサから得られたデータを解析して、振動特性（揺れ方）を推定します。その結果を前回以前の推定結果と比較することで、建物の健康診断を行います。

振動特性（揺れ方）の推定に関しては数多くの研究が行われ、高い精度で推定できるようになってきました。ただしそれが補修・補強を必要とするレベルかどうかを示すためには、より多くの建物で計測と評価を積み重ねながら、診断の精度を高めていく必要があります。

【解説】

建物に損傷や劣化が生じると、その位置や度合いに応じて、振動特性（揺れ方）に「動的な変化」が現れます。例えば、既に一部の事業者が、地震時に最大層間変形角（上下階の変位量の差の最大値から算出）が閾値を越えたどうかを計測するといったサービスを提供していますが、この方式であればかなり正確に推定できるといえます。また、戸建住宅等であれば最低 1 個の加速度センサを設置しておけば、固有値（その建物固有の揺れやすい周波数領域）を高い精度で推定して、動的な変化を捉えることができます。

ただし現時点の技術レベルでは、それらが本当に補修・補強を必要とするレベルなのかどうかの最終的な判断基準が不足しています。人間の体の健康診断に関しては、BMI やメタボリックシンドロームなど、病気のサインとなる症例を積み重ねて、その診断基準が確立されてきました。SHM も同様に、今後普及が進み、より多くの建物で計測と評価を積み重ねながら、進歩していく部分が大きいと考えられます。

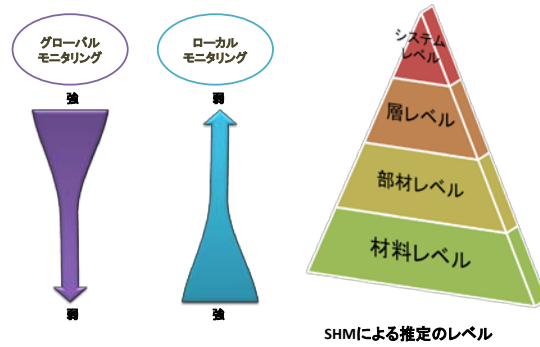
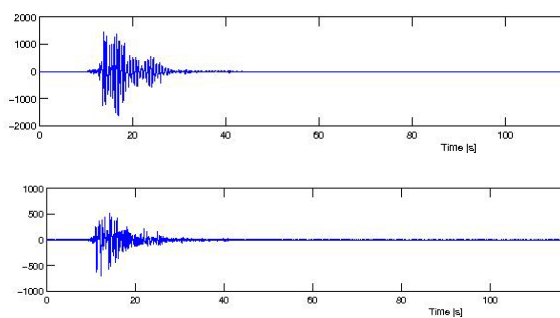
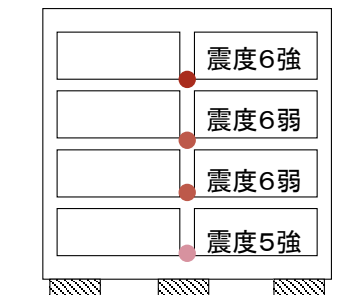


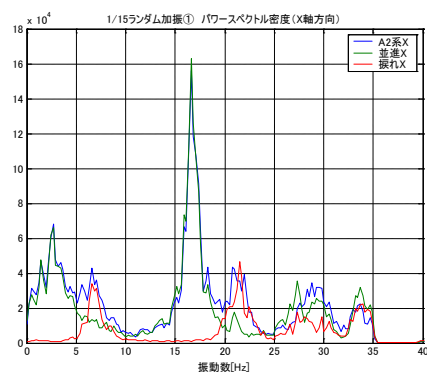
図 3.69 推定のレベルとグローバル／ローカルモニタリングの考え方（イメージ）



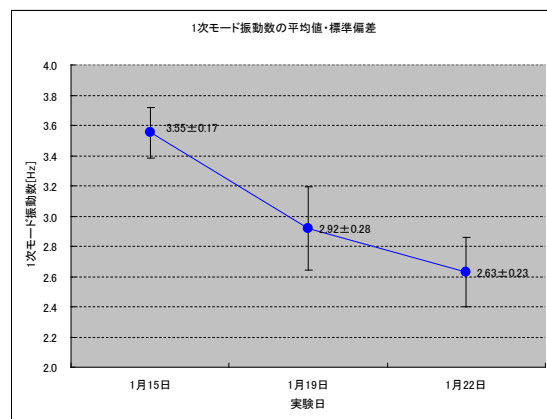
加速度時刻歴波形



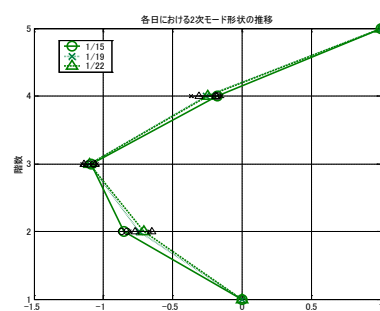
各階の震度情報



スペクトル情報



固有振動数の算出結果



モード形

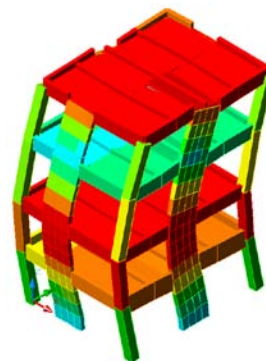


図 3.70 SHM システムを通じた「基本情報」の提供イメージ

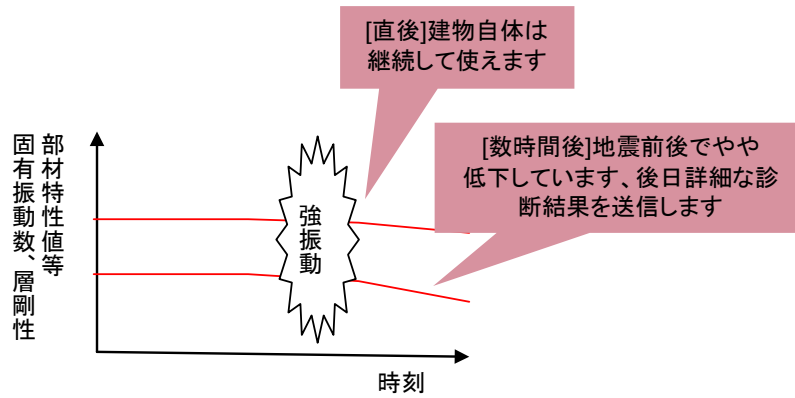


図 3.71 SHM システムを通じた「被災直後の安全行動の支援情報」の提供イメージ

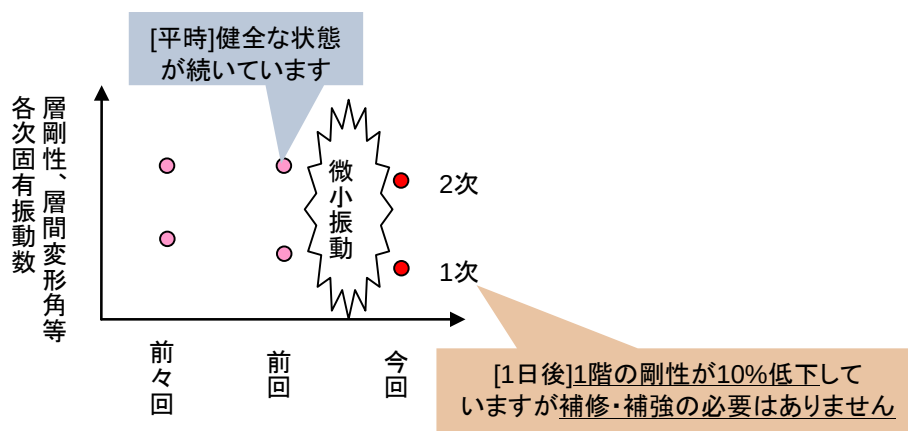


図 3.72 SHM システムを通じた「判断・対応に係る支援情報」の提供イメージ

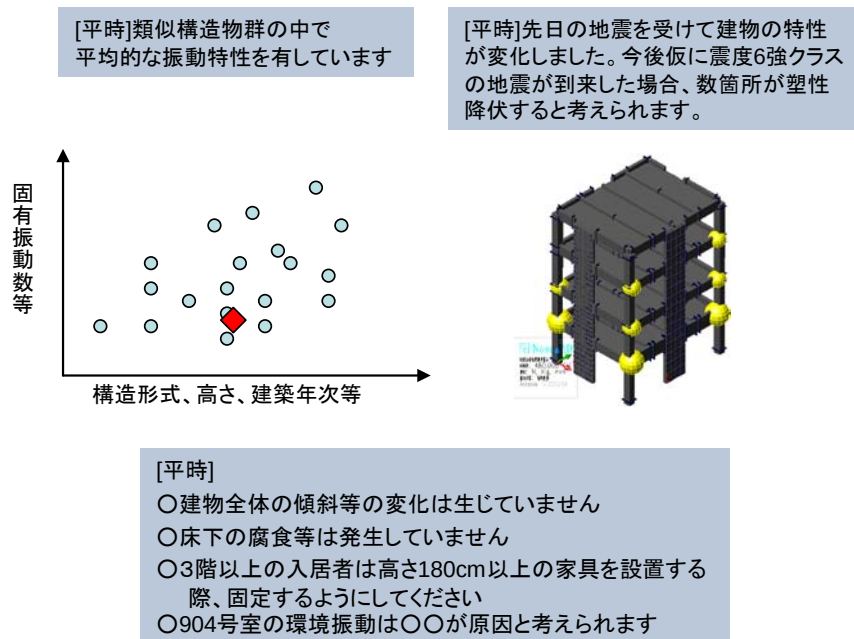


図 3.73 SHM システムを通じたその他の情報の提供イメージ

Q 6 SHM で取得された情報は、どこに保管され、誰がどのように活用するのですか？

A 6 :

SHM で取得された情報は、セキュリティの施されたネットワークを介して SHM の情報管理者と認定された事業者の管理下にあるサーバに保管されます。このサーバに保管されたデータは、情報を預けているオーナーが ID とパスワードを用いることでいつでも閲覧することができます。一方で、不正アクセスやデータの改ざんがないよう厳重に管理されます。

このデータの活用方法としては、建物の売買時に、買主へ説明する資料にすることなどが挙げられ、建物の健全性を客観的に示すこともできます。

また大規模地震の発生時には、あらかじめサービス事業者と契約することで、データを解析して建物の応急危険度を判定・通知してもらうことにも活用できます。SHM で取得された情報を蓄積して同一建物の構造の状況変化を把握することにも活用できます。

また保管されたデータは、あらかじめサービス事業者と契約することで、Q5 に記載されているように、建物の健康状態の推定精度を上げるために研究用に利用されることがあります。利用されるときは、匿名化されてどの建物のデータか特定できないように配慮されます。

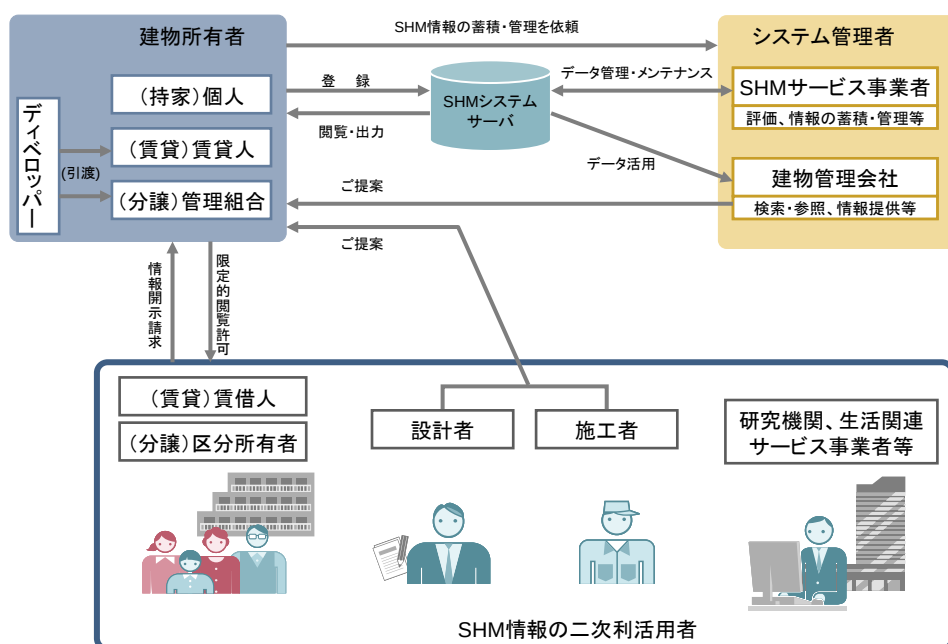


図 3.74 SHM システムの概念図（例）

Q 7 SHM の導入を検討してみたいのですが、費用はどの程度かかるのですか？

A 7 :

SHM の利用目的や建物の構造・規模等に応じて、センサの種類・性能・個数、サーバ及び周辺機器等は異なってきます。

あくまで参考ですが、一部の事業者では、比較的規模の大きな共同住宅やオフィスビルを対象として、1棟あたり数百万円で設置するサービスを提供しています。

Q 8 SHM を導入したいのですが、どこに相談すればよいのですか？

A 8 :

大手不動産会社、ゼネコンなどでサービス提供が開始されていますので、これらの会社にお問い合わせいただければ情報が得られます。ただし、分譲タイプの共同住宅にお住まいの方は、マンション管理組合とご相談ください。

Q 9 今後、SHM の導入は義務化されるのでしょうか？

A 9 :

事業者による先導的な取組みとしての普及が期待される技術であり、現時点では義務化までは予定されていません。しかし将来的には、住まいの履歴書と言われる住宅履歴情報（いえかるて）の中に「動的な変化」を捉えるための情報項目の 1 つとして、SHM による計測・評価結果を位置づけることが検討されています。

9. まとめ

平成 20 年度から 3 年間かけて、住宅のスケルトンの健全性評価に構造ヘルスマニタリング技術を適用し、住宅の多世代利用に向けてハード面の管理の高度化を図るため、技術開発と活用手法の両面から調査検討を行った。

第 1 章では、SHM の継続的なシステム運用と情報提供のあり方について両面から検討した。住宅の維持管理に係る既往管理システムの提供事業者へのヒアリング等を通じて、システムが成立している背景要因や今後の課題等を整理するとともに、データ収集や情報提供内容の面から SHM システムと親和性が高いと考えられる既往管理システムについて考察し、これらと組合せによる SHM サービスが提供されることによって、SHM の普及可能性が高まることを示した。また、SHM による診断結果をユーザに分かりやすく提供するための内容・方法等に関して検討した。

第 2 章では、防災科研 E-defense で行われた実験を通じて、SHM の技術的な検証を行った。管理技術 WG としての SHM システムをアドオンした。平成 20 年度・21 年度と防災科研 E-defense における実験データを後日貸与頂き SHM の技術的な検証を行ってきたが、平成 22 年度は管理技術 WG 独自の SHM システムをアドオンし、大きな地震入力を受けた建物のデータの計測・評価を行い、遠隔地に情報配信するといった仮想 SHM サービスが成立しうることを示した点が、新しい取り組みであった。

また、SHM の技術的な到達レベルを明らかにするため、平成 20 年度及び平成 22 年度に実施された E-defense 実験データ（2 ヶ年分）の逆解析を実施した。微小振動下における SHM サービスを想定した逆解析では、平成 20 年度からの固有振動数等の経年変化を捉え、試験体の 1 層に損傷が集中していることを示した。今後の課題として、ユーザによる補修・補強等の判断につなげていくため、実建造物の測定データ及び技術者による目視等の調査結果を併せて蓄積・管理するためのデータ構造や、それらを匿名化した上で二次的な情報活用者がアクセスできる社会的仕組みの整備の必要性を示した。また、強振動下における SHM サービスを想定した逆解析では、各階加速度データに基づき層せん断力と層間変形角の関係を分析し、層レベルの損傷推定を行い、応急危険度判定に代わるサービスとしての技術レベルは既に実現可能な状況にあることを示した。しかし人命に係るサービスであることから、地震時におけるデータ計測・伝送や評価が確実に稼動するような仕組みは、今後のシステム運用上の課題であるとした。

第 3 章では、平成 21 年度に作成した SHM 技術に関する関連用語の整理・解説資料に基づき、主要用語、SHM 技術の概要、SHM 技術のユーザへの効果等に関する解説文案・図案等を作成した。建築の専門家でない一般にも分かりやすく技術内容を伝える技術解説書（一般向け Q&A 集）として取り纏めた。

多世代利用総プロにおける SHM の技術利用に係る検討の取りまとめとして、「多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン（案）」を作成した。当該ガイドラインは、システムの利用目的等を踏まえたサービスの形態、項目・内容等を整理し、システムの利用目的を達成するための事業者側の備えを確認できるような内容とした。今後、SHM の利用及びサービス提供を検討している設計者・施工者・SHM サービス事業者等には是非活用していただきたい。

現段階で SHM は、応急危険度判定に代わるサービスとしては実用段階にあり、実際に大手建設会社をはじめとして、災害時利用を目的としたサービス提供を開始している。特に多世代利用住宅では、住宅の長期利用に伴い災害に遭遇する確率が相対的に高まることが考えられるため、SHM の備えが一層重要と考えられる。しかし、災害時にのみ有効利用されるシステムは費用対効果の面でユーザに訴求するのが難しいという点が、事業者ヒアリングを通じて多く挙げられた。SHM 技術が今後普及していくためには、災害時の確実な稼動を担保することと、平時のメリットを兼ね備えることが不可欠と考えられる。

平時の技術利用としては、現状では、設計者・施工者の間で、自ら設計・施工した建物の確認を目的とした、微小振動時の SHM 利用のニーズがある。しかし一般ユーザを含めて広く SHM が普及していくには、微小振動時の評価結果が建築構造物の要求性能（安全性能、使用性能、耐久性能等）の中でどのように位置づけられ、建物の維持管理・流通段階において自らの建物の状態を説明するパラメータとして活用できるかを明確にし、センサの利用を社会的に後押しする政策が必要である。

また、固有振動数等のモーダルパラメータがどの程度低下した場合に、補修・補強等を検討すべきかについて、実測データに基づく知見が不足している点が課題である。センサデータだけでなく、技術者の目視による結果も併せて蓄積・管理し、実現象と照らし合わせて効果的な知見が蓄積されるような仕組みが必要である。情報は住宅所有者のものであるが、その情報を匿名化することで、二次利活用者も含めて限定的に閲覧できるような共通基盤の構築も検討を要する。

平成 23 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖地震が発生し、仙台市内の SRC 造建物が、東北地方太平洋沖地震を受けて大破した。この建物は、1978 年の宮城県沖地震で鉄筋が切れていたことに気付かぬままに補強され今回被災したという経緯がある。このように構造体として外見上は大きな変化が無くとも、建物のコアな部分は被覆材におおわれて深刻なダメージが蓄積されていることに気付かないことが多い。

建物にセンサを設置し健康状態を把握する「構造ヘルスマモニタリング」を、特に防災上重要な拠点となる建物へ実装し、有用性を十分に検証した後、一般の建物へも徐々に普及させていく必要がある。センサを搭載した建物が増えれば増えるほど、面的な状況把握と対策リソースの配分を迅速かつ合理的に行うことができる。

また、建物が安全であることが迅速に分かれれば、地震直後の大量の帰宅困難者等の発生を抑制することや、応急危険度判定要員の不足を解消することにもつながる。建物の継続使用可否について実測データに基づいて判定する仕組みや、地震酔いなどに代表される「使用性」を性能項目の 1 つに位置づける必要がある。

今後の展開としては、実建物を対象とした実証や、具体的な制度設計が考えられ、産官学の連携が一層重要と考えられる。