

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）

平成 23 年〇月

国土交通省
（多世代利用総プロ 管理技術WG）

はじめに

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、その機能を発揮するためには、住宅の機能・性能が適切に把握でき、維持されていく仕組みとともに、適正な管理が将来にわたって持続されていく必要がある。それが、中古住宅の売買等の場面において、適正かつ健全な流通を支えることにもつながる。1年に1回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、その性能を確認する仕組みが必要である。

構造物は、時間の経過とともに、物理的、化学的に変化する。また、木質材料では、生物学的な変化も発生する。住宅・建築の構造、部位・部材に対しては、こうした物質的な変化に加え、外的要因としての荷重・外力（重力、地震力、風圧力、温熱ムーブメント、人間の活動及び設備機器の稼働等による振動）や、人為的行為（火災・事故、改造、損壊）が働き、時間経過に伴う機能・性能の低下に繋がる劣化現象の要因となる。

建物の全体、部位・部分に起こる変化としては、部材内部で起こる物質的变化や、変形・ひび割れ等の現象として現れる形状的变化などの静的変化と、振動特性や変形・回復等の性状として表される動的変化がある。従来こうした変化を捉える変数（パラメータ）としては、圧縮強度、変形の大きさ、ひび割れの状態、薬品反応、赤外線による温度分布など、主に静的変化を把握する指標が扱われてきた。これらの指標による部分・部位の変化を積み上げて、建物全体の特性変化への影響を推定するアプローチということもできる。一方、構造設計における構造解析の手法を活用し、建物全体の特性変化の有無を、振動波形や固体電波・音等をセンサで直接計測し、解析することにより、構造特性の変化を把握する新たな診断技術として構造ヘルスマニタリング技術（SHM：Structural Health Monitoring）技術の研究、開発が進められてきた。

構造物を一定の状態に保つには、こうした経年変化を把握し、適切に対応するために、定期的な点検・診断の実施と診断結果に基づく評価・対策が求められる。これまでも適切な維持管理の方法として、建物の各部や全体に生じる変化を捕らえる手法や技術が研究、開発、整備されてきた。こうした従来からの点検・診断技術により捕らえられる静的特性・パラメータのみだけでなく、動的特性の変化を捕らえる SHM 技術を活用し、長期に耐用する住宅のスケルトンの健全性を把握する点検・診断の高度化が必要である。

多世代利用総プロ管理技術 WG における 3 ヶ年の検討成果を「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活用ガイドライン(案)」としてとりまとめた。SHM システムに関しては一部の先進的な事業者により実建物への実装が既に行われている段階にあるが、今後新たに事業を始めようとしている事業者や、一層の普及を考えている事業者に役立てて頂くことを期待している。

また、国土交通省では、住宅の建築、維持管理に係る情報として、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し、中古住宅の流通段階において利用する取り組みとして「住宅履歴情報」の整備・普及を推進している。従来の目視点検等の記録を代替または補完する情報として、動的特性に関する情報を付加することにより、技術・情報の利活用による建物管理、維持管理の高度化が期待される。

検討体制

○委員

主査	三田 彰	慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科	教授
委員	濱本 卓司	東京都市大学工学部建築学科	教授
	小松 幸夫	早稲田大学理工学術院	教授
	齊籐 広子	明海大学不動産学部	教授
	薛 松濤	東北工業大学工学部建築学科	教授
	梶原 浩一	(独) 防災科学技術研究所	副センター長
	佐藤 栄児	(独) 防災科学技術研究所	主任研究員
	森田 高市	(独) 建築研究所	国際研究協力参事

○国土交通省（オブザーバ）

高見 真二 住宅局住宅生産課 企画専門官

○国土技術政策総合研究所

大竹 亮 住宅研究部長
高橋 暁 住宅研究部 住宅瑕疵研究官 <研究担当者>
有川 智 住宅研究部 住宅生産研究室長
長谷川 洋 住宅研究部 住環境計画研究室長
眞方山 美穂 住宅研究部 住宅ストック高度化研究室長

○（株）三菱総合研究所（コンサルタント・事務局）

竹末 直樹 社会システム研究本部 主席研究員
大谷津 裕 科学・安全政策研究本部原子力事業グループ 主任研究員
大熊 裕輝 科学・安全政策研究本部社会イノベーショングループ 主任研究員
吉元 怜毅 科学・安全政策研究本部社会イノベーショングループ 研究員
下村 徹 科学技術部門統括室 研究員

目次構成

第1章 総則	1
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 SHMに関する基礎的事項	13
2. 1 SHM の概要	13
2. 2 SHM の特徴	18
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	22
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の関係.....	24
2. 4 建物管理における SHM サービスの利用.....	25
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	45
3. 1 データの取得	45
3.1.1 センサの種類を選定.....	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.....	51
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	57
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	65
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

第1章 総則

1. 1 本書の適用範囲

本書は、多世代利用住宅の振動特性の変化を把握する新たな診断技術として、今後、構造ヘルスマモニタリング技術（SHM：Structural Health Monitoring）が普及・利活用される状況に備えて、計測・評価、情報の蓄積・管理等に関するガイドラインを与えるものである。

【解説】

近年、建物の振動特性の変化を把握する新たな診断技術として、構造ヘルスマモニタリング技術（SHM：Structural Health Monitoring）に対する関心が高まってきている。SHMは、建物の経済的な維持管理や、災害時の迅速な継続使用判断に役立つ技術として期待されている。

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可能性がある。

こうした状況に備え、ユーザの要求を踏まえたSHMのサービスの項目・内容の考え方とともに、センサによるデータの計測、評価、蓄積・管理、ユーザへの情報提供における基本的事項や留意事項を整理しておく必要がある。

本書は特に、長期利用する住宅の維持管理・流通を支える技術としての活用場面を想定し、SHMシステムの設計・構築・運用に係るガイドラインを与えるものである。主な読み手としては、SHMの新規展開や一層の普及を考えている情報サービス事業者や設計・施工会社のほか、研究機関等を想定している。

1. 2 本書で取り扱うSHMの対象範囲

本書で取り扱うSHMの対象範囲について、一般的なSHMの考え方に照らして整理する。

(1) SHMの基本概念

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、度合い等を評価する技術である。そして構造性能のうち主に「安全性」「耐久性」について、使用期間を通じて目標レベル以上に維持管理し続けることを目的としている。

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（サービサビリティ）」の評価に資する技術として記述している。

(2) SHM の適用対象範囲

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。

(3) SHM による推定のレベル

SHM による推定の範囲については、「全体系」「層レベル」「部材レベル」「材料レベル」が考えられる。一般に、詳細なレベルの推定を行うためには多くのセンサを必要とするが、コストとのトレードオフ関係が存在する。

本書で取り扱う SHM は、住宅分野における利用を想定していることから、経済合理性を踏まえて「全体系」及び「層レベル」までの推定を中心とした内容構成である。ただし、適用対象建物の規模によってはコストが釣り合う可能性も考えられることから「部材レベル」までの推定も、本書の内容に一部含めることとした。

【解説】

本書で取り扱う SHM は、多世代利用住宅の維持管理・流通を支える技術としての利用を想定している。SHM の対象範囲について、一般的な SHM の考え方に照らして整理する。

(1) SHM の基本概念

一般に SHM は、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・度合い等を評価し、ユーザが行う補修等の対策の意思決定を支援する技術である。構造物に SHM システムを実装することにより、例えば壁面に生じている亀裂やひび割れが構造物全体にどの程度の影響を与えるものであるか、また、外観からは把握できない構造物内部に蓄積・進展した損傷・劣化がどのような状況であるかについて、評価できる。これにより、構造物性能のうち主に「安全性」「耐久性」について、使用期間を通じて目標内容以上に維持管理し続けることを目的としている。

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「安全性」「耐久性」に加え、一歩進んだ付加価値として「使用性（サービサビリティ）」の評価に資する技術としての普及の可能性も含めて記述する方針としている。

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（サービサビリティ）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

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は、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。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 1 建築構造物の構造性能（安全性、使用性、耐久性）

基本性能	基本性能の項目	関連する現象(例)	基本性能の項目を規定する特性(例)
安全性	a. 構造物内外の空間の確保	剛体転倒、損傷、崩壊、倒壊、落階	鉛直力残余支持強度、転倒復元力、最大変形、塑性率、崩壊機構形式
	b. 構造部材・非構造部材の脱落・飛散による危害の防止	構造部材に取付られた部材の脱落・飛散	部材加速度、強制変形
	c. 設備機器・倒・移動に	※今後精査	速度、強制変形
	d. 安全な避難		速度、強制変形
使用性	a. 使用性能（の確保		化、傾斜、剛性ひび割れ、床加
	b. 日常安全性		化、傾斜、剛性
	c. 気密・防水の確保	化、傾斜、剛性	
	d. 可動部分に関する機能保持	る外気・水・音・熱の侵入 破損・変形による機構の破損 損傷	部材加速度、強制変形
	e. 設備機器の機能保持	振動・変形・傾斜による設備機器の破損	部材変化、傾斜、剛性損傷
	f. 什器の機能保持	什器の破損	部材変化、傾斜、剛性損傷
耐久性	a. 安全性、使用性の持続性	材料劣化	中性化、断面欠損

(出典) 鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドラインを参考に作成

(2) SHM の適用対象範囲

一般に SHM は、計測データに基づき、建築物の柱・梁・壁を中心とする主要構造部を対象とした損傷・劣化状況を評価する。建築分野では間仕切壁・間柱・天井等の二次部材や、エレベータや空調設備等の建築設備を対象としたモニタリングも行われているが、これらは「構造」ヘルスマニタリングとは区別される。また、構造種別（RC 造・S 造・木造等）、導入時期（新築・既存）は特に限定することなく適用可能である。

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。近年研究が進みつつある基礎杭等の下部構造の SHM も、本来的にはモニタリングの対象範囲に含まれるが、本書では上部構造を対象を絞っている。また、戸建木造住宅や RC 造共同住宅を主な適用対象として想定している。評価の対象とする構造性能は前述(1)の通り「安全性」「耐久性」「使用性（サービサビリティ）」である。

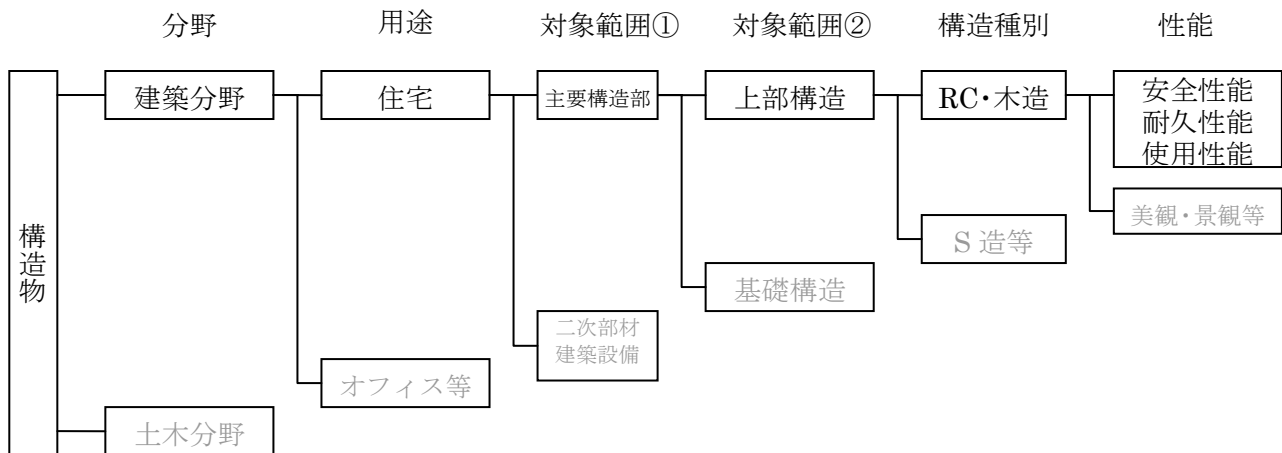


図 1 調査分析の視点と調査対象

(3) SHM による推定のレベル

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、材料レベルといった複数の階層が存在する。

○ローカルモニタリング

部材レベルや材料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、ひび割れ等の発生検知等に代表されるように「現象に基づく損傷検出」を狙いとしている。

目視点検や非破壊検査などの枠組みが既に確立されているが、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。

○グローバルモニタリング

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。

一般に、詳細な推定を行うためには、予め損傷位置が絞り込まれている必要がある。また多くのセンサを必要とし、コストとのトレードオフ関係が存在する。本書は住宅分野における利活用を想定し、経済合理性を踏まえて「現象に基づく損傷検出」よりも「モデルに基づく損傷推定」に主眼を置く。

したがって本書は「全体系」及び「層レベル」までの推定を中心とした内容構成であるが、一方、大規模な共同住宅など適用対象によってはコストが釣り合う可能性も考えられることから「部材レベル」までの推定についても一部含めることとした。

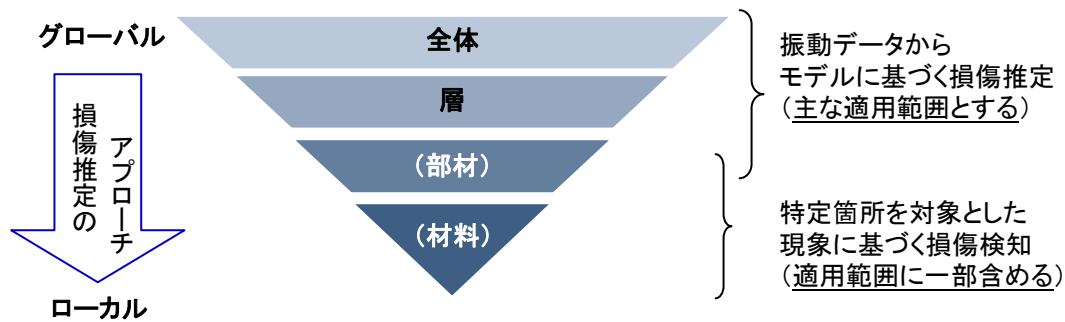


図 2 損傷推定の段階的アプローチ

(参考) 住宅の管理技術としての SHM 技術の位置づけ

共同住宅の「管理」には、以下に示す通り、維持管理、生活管理、運営管理といった3つの側面がある。このうち、本書で取り扱う SHM が、住宅の「管理」全般の中でどのような位置づけにあるかを示す。

①維持管理（メンテナンス）の側面

空間のメンテナンス：日常的な清掃、設備の点検、修繕などの維持管理

【SHM が寄与する領域】構造躯体（ハード）の維持管理

②生活管理（コミュニティライフ）の側面

ライフコントロールとコミュニティ・ディベロップメント：
共同生活に関わる問題、渉外業務、安全・防災に関する業務

【SHM が寄与する領域】災害直後の生活維持

③運営管理（マネジメント）の側面

組織の運営と共用施設の運営：
建物のメンテナンス、共同生活のルール、資金管理など組織運営

【SHM が寄与する領域】合理的な運営資金管理

(出典) 齊藤広子「ステップで学ぶマンション管理」2003.5 彰国社

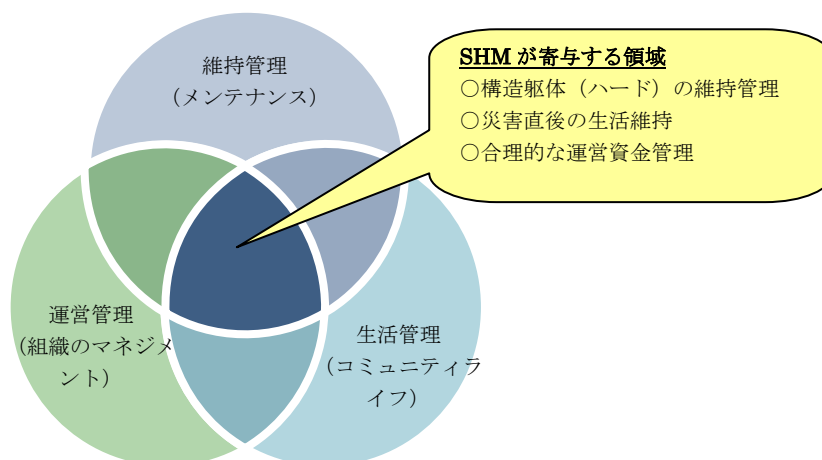


図 3 共同住宅の管理の3つの側面と SHM が寄与する領域

1. 3 本書の構成

本書の構成は以下の通りである。

表 2 本ガイドラインの章・節構成

章構成	節構成
第 1 章 総則	第 1 節 本書の適用範囲 第 2 節 本書で取り扱う SHM の対象範囲 第 3 節 本書の構成 第 4 節 関連用語
第 2 章 SHM に関する基礎的事項	第 1 節 SHM の概要 第 2 節 SHM の特徴 第 3 節 SHM によるデータ計測と評価の考え方 第 4 節 建物管理における SHM サービスの利用 第 5 節 SHM の設計
第 3 章 SHM の構築・運用	第 1 節 データの取得 第 2 節 状態の推定 第 3 節 診断 第 4 節 診断結果の提供 第 5 節 SHM 情報の蓄積・管理

【解説】

第 1 章では、総則として、本書の適用範囲や関連用語等について整理する。

第 2 章では、SHM に関する基礎的事項として、SHM の概要や特徴について整理した後、データ計測のタイミングや推定のレベルの考え方を示す。また、SHM サービスを特徴付ける項目・内容と、それらを設計するための大まかな流れ等を示す。

第 3 章では、SHM サービス事業者が、SHM の構築・運用の実務において参考となるような基本的事項や留意事項について、第 2 章で整理するサービスの項目ごとに示す。

1. 4 関連用語

本書で用いる関連用語は以下の通りである。

- (1) 構造ヘルスマニタリング (SHM、SHM システム、SHM サービス)
- (2) 評価の対象とする性能等 (健全性、構造性能、損傷、劣化、振動特性)
- (3) 計測物理量 (ひずみ、変位、速度、加速度)
- (4) 計測のタイミング (定期計測、被災時計測、被災後計測、強振動、微小振動)
- (5) 損傷指標 (モーダルパラメータ、層剛性、層間変形角)
- (6) 推定のレベル (逆解析 (システム同定)、グローバルモニタリング、ローカルモニタリング)
- (7) 住宅に係る関係主体 (所有者、管理会社、設計者、施工者、公的機関等)
- (8) 建物ライフサイクル (設計、施工、建物管理、災害、修繕・補強、売買等)
- (9) 関係の深い制度・枠組み (住宅性能表示制度、住宅履歴情報、応急危険度判定、建物診断 (劣化診断)、定期報告制度、耐震診断、地震 PML 評価)

【解説】

(1) 構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring) に係る用語

①構造ヘルスマニタリング (SHM)

何らかのセンサを用いて、あるいは目視情報等も組合せる等して、建築物の損傷・劣化の状況を推定し、健全性を診断する技術。建築におけるヘルスマニタリングは設備等も対象に含まれるが、本ガイドラインでは建築物の柱・梁・壁を中心とする主要構造部のヘルスマニタリングを対象としており、これを SHM と呼ぶ。

②SHM システム

SHM の構成要素 (①データ取得、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) を組合せて、SHM によって計測・評価されたデータを適切に保存・管理・流通するための全体の仕組みのこと。

③SHM サービス

SHM サービス事業者が、SHM の利用目的及びユーザのニーズを踏まえて SHM システムを設計・構築し、システムの運用期間を通じてユーザに情報価値を提供すること。

(2) 評価の対象とする性能等に係る用語

①健全性

建築物への様々な荷重・外力に対して構造性能が確保されており、そのまま建築物を使用しても支障がない状態を目的とする性能。

②構造性能

安全性、使用性、耐久性、第三者影響度に関する性能、美観・景観等の確保を図るために建築構造に要求される性能。本ガイドラインでは、構造性能のうち建築物への様々な荷重・外力に対する安全性、使用性、耐久性を評価する技術として SHM を位置づけている。

③損傷

建築物に発生するひび割れ、亀裂、破断、欠損、塑性ヒンジ等のことであり、これらの存在により建築物の安全性能が低下する。損傷の評価のための代表的な指標（損傷指標）として、固有振動数や剛性等の低下が挙げられる。

④劣化

建築物の性能（と信頼性）が時間経過と共に次の要因により低下する過程。例えば RC 造共同住宅では、外壁のひび割れ、鉄筋腐食、バルコニー床の漏水等が劣化事象として現れることがある。

- －自然に起こる化学的・物理的・生物学的作用
- －疲労などを引き起こす繰り返し作用（荷重）
- －通常の、あるいは過酷な環境変化
- －使用による磨耗
- －不適切な運用や維持管理の不備

⑤振動特性

建築物固有の揺れやすさ。地震、風、交通振動等による建築物の揺れの状況を計測することで把握される。本ガイドラインでは損傷や劣化の蓄積・進展や使用性の低下が、振動特性の経時・経年変化として現れることを想定している。

(3) 計測物理量に係る用語に係る用語

①ひずみ

材料の形状変化（変形）のこと。SHM では、例えば鉄筋にひずみゲージを取り付けて、せん断ひずみを計測することが考えられる。

②変位

物体の位置の変化を示すベクトルのこと。SHM では、例えば上下階の層間変位を変位計等によって計測することが考えられる。

③速度

単位時間当たりの位置の変化率のこと。SHM では、例えば各階床に速度計を設置する等して計測することが考えられる。

④加速度

単位時間当たりの速度の変化率のこと。SHM では、例えば各階床に加速度計を設置する等して計測することが考えられる。

(4) 計測のタイミングに係る用語

①定期計測

本ガイドラインでは、微小振動（風・中小地震・常時微動）下における建築物の挙動を、SHM によって定期的に計測することを言う。

②被災時計測

本ガイドラインでは、強振動（大規模地震・強風等）下における建築物の挙動を、SHM によってリアルタイムで計測することを言う。

③被災後計測

本ガイドラインでは、建築物が強振動（大規模地震・強風等）を受けた後に、微小振動（風・中小地震・常時微動）下における建築物の挙動を計測することを言う。被災前に行った定期計測の結果と比較することで、被災前後の挙動の違いが現れる。

④強振動

本ガイドラインでは、対象建築物に大きな揺れを伴うような大規模地震や強風等が発生することを言う。

⑤微小振動

本ガイドラインでは、対象建築物の常時微動や、対象建築物に小さなレベルの揺れを起こすような風及び中小地震が発生することを言う。「微小振動」とはやや異なるが、本ガイドラインでは、過去の地震災害を踏まえて建物被害の発生が考えにくい規模の地震（例えば震度5弱以下）も対象に含めることとした。

(5) 損傷指標に係る用語

①モーダルパラメータ（モード特性）

建築物固有の振動特性を決定付ける、モード振動数、モード形状、振幅の減少の度合いを表す減衰定数のこと。例えば建築物に損傷が生ずると、モード振動数が低下したり、減衰定数が増加したりといった傾向がある。

②層剛性

建築物または各層の変形のしにくさのこと。建築物または各層にある一定の力を与えた場合に、剛性が高いほど変形は小さくなる。例えば建築物に損傷が生ずると、損傷が発生した層の剛性が低下する。

③層間変形角

強振動（大規模地震・強風等）下における建築物の上下階の相対変位を階高で割った値。建築基準法上、構造種別等に応じて上限値が決められている。例えば建築物に大きな揺れが生ずると、上下階の層間変形角が増加し、安全限界や損傷発生限界等を超過する可能性がある。

(6) 推定のレベルに係る用語

①グローバルモニタリング

建築物の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のこと。建物内に比較的少数の振動センサを設置し、逆解析（システム同定）を行うことで、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。

②ローカルモニタリング

部材レベルや材料レベルなどローカル（局所的）な損傷を検出する SHM のこと。ひび割れ等の発生検知等に代表されるように「現象に基づく損傷検出」を行う。

③逆解析（システム同定）

一般的に、入出力データから対象システムを表現するモデルの次数やパラメータ等を正しく決めることをシステム同定と言う。本ガイドラインでは、建築設計における正解析と対比

する考え方として「逆解析」という用語を基本に用いる。

逆解析のための方法としては、モード特性を推定する方法、物理パラメータを直接推定する方法、それらの両者を組合せて段階的に推定する方法、ソフトコンピューティングによる方法等がある。

④診断

逆解析結果から、損傷や劣化、使用性について総合的に判断すること。現在の状態から今後の進展度合いおよび余寿命などの予測を含む診断を指す。

(7) ステークホルダに係る用語

①所有者（オーナー）

建築物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。

②管理会社

所有者の資産管理を支援する者。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。

③設計者

建築物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。

④施工者

建築物の施工業務に携わる者。例えば工務店、建設会社等。

⑤公的機関

官公庁、自治体、研究機関等。

(8) 建物ライフサイクルに係る用語

①設計

建築物を企画し設計すること。

②施工・引渡し

設計に基づき建築物を施工し、所有者に引き渡すこと。

③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。

④建物管理

建築物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。

⑤修繕・補強

長期修繕計画に従って建築物を修繕する、または補強すること。

⑥災害

建築物が強振動（大規模地震・強風等）を受け災害に遭うこと。本ガイドラインでは、中規模、大規模の2パターンを想定している。

⑦売買

所有者が別の所有者に譲渡すること。建築物を長期利用する中で、所有者が変わる場面が想定される。

⑧用途変更等

建築物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。

⑨使用中止・建替え

所有者が建築物の使用中止を決定し、建替えを行うこと。

(9) 関係の深い制度・枠組みに係る用語

①住宅性能表示制度

住宅の性能を等級や数値で表示する制度。構造の安定、火災時の安全、劣化の軽減、維持管理・更新への配慮、温熱環境、空気環境、光・視環境、音環境、高齢者等への配慮、防犯対策といった10の性能項目がある。

②住宅履歴情報

住宅の新築、改修、修繕、点検時等における設計図書や施工内容等の情報。これらの情報を蓄積することによって、円滑な住宅流通や計画的な維持管理、災害や事故の際の迅速な対応等が可能となる。

③応急危険度判定

大地震により被災した建築物について、人命にかかわる二次的災害を防止することを目的として判定調査を行うこと。その後に発生する余震などによる倒壊の危険性や外壁・窓ガラスの落下、付属設備の転倒などの危険性を判定する。

④建物診断（劣化診断）

建築物の修繕工事の内容・時期・費用等について予測するための診断。建物の構造から外壁、屋上、その他の設備まで含めて、長期修繕計画の見直しに合わせて行われる。

⑤定期報告制度

不特定多数の人が利用する建築物又は公共性のある建築物について、定期的（建築物は3年毎に1回、建築設備は毎年1回）に専門の技術者に点検してもらい、特定行政庁に報告するよう、建築基準法上で義務付けられている制度。構造の老朽化、避難設備の不備、建築設備の操作・作動不完全等による災害時の危険を避けることを目的としている。

⑥耐震診断

建築物が地震に対してどの程度被害を受けにくいかといった地震に対する強さ、すなわち「耐震性」の度合を調べること。耐震診断の方法には、一次診断、二次診断、三次診断の3種類がある。また、耐震診断の結果を踏まえて、建物の耐震性を向上させ、倒壊を防ぐために、構造躯体の強度を高める工事として耐震補強が行われることがある。

⑦地震 PML 評価

PML（Probable Maximum Loss：予想最大損害額）は、建物が災害によりどの程度の損害が発生する可能性があるかを評価する手法。一般的には、最大級の地震が生じた場合、建物を地震以前の状態に復旧するために必要な費用の予想額を建物の再調達価格に対する比率（%）で表したものの。

用語集の作成にあたっては、構造物のモニタリングに関する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

等

第2章 SHMに関する基礎的事項

2. 1 SHMの概要

SHM技術は、次の5つのステップから構成される。

①データの取得

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。

従来から代表的に用いられてきたサーボ型加速度計、変位計、ひずみゲージをはじめ、近年では多数のセンサが開発され、実用に供されている。

②状態の推定

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。

代表的な逆解析技術として、モード特性を同定する手法、物理パラメータを直接同定する手法等がある。

③診断

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。

推定結果が対象建物にとってどのような意味を持つのか、管理指標の確立が必要である。

④診断結果の提供

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。

⑤SHM情報の蓄積・管理

推定・診断された結果を継続的に蓄積・管理する。

【解説】

SHM技術は下図の通り①～⑤の手順により構成される。

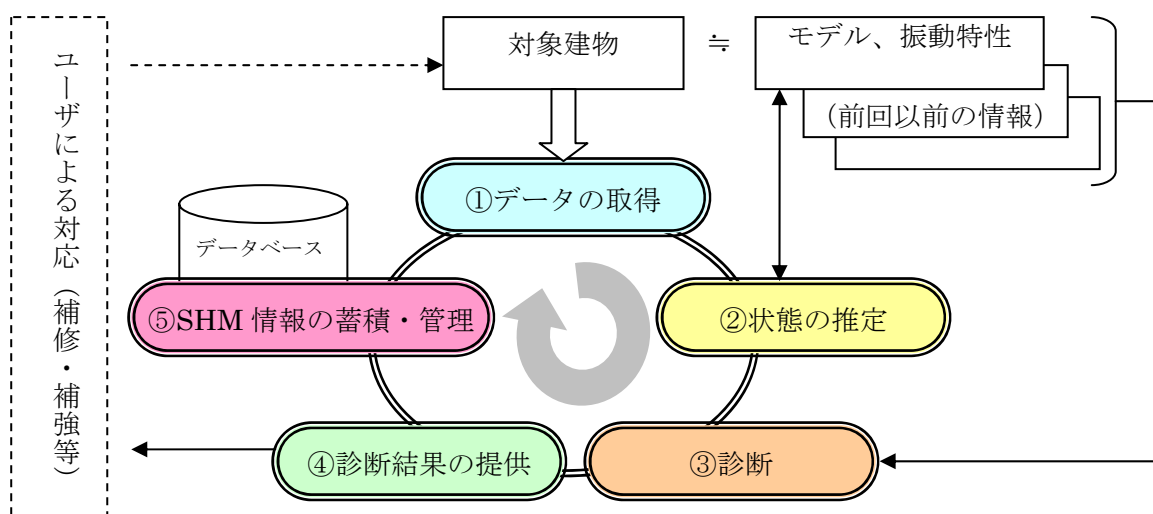


図4 SHM技術を構成する5つのステップ

①データ取得

センサにより建造物の状態（振動応答、変形、ひずみ等）に関する計測データを取得するプロセスである。必ずしも電氣的なセンサに限定する必要はなく、人による目視情報等を含んでも構わない。

以下に示す通り、SHM で従来から代表的に用いられてきたセンサとしては、加速度センサ、変位センサ、ひずみセンサ、AE センサ等がある。近年では半導体技術やネットワーク技術の進展により、より多くの種類のセンサが開発され、実用に供されている。

○加速度センサ

(a)ひずみゲージ式加速度計

加速度の直流成分から測定可能で通常 0～数百 Hz 程度までの応答加速度の測定に使われる。建物や大型建造物の地震応答実験等の測定に適している。

(b)圧電式加速度計

数 Hz～数十 kHz の加速度の測定が可能。衝撃波動の伝播測定等に適している。

(c)サーボ型加速度計

通常加速度の直流成分から測定可能で通常 0～数百 Hz 程度までの微小振動の測定に使われる。また、加速度を積分し速度計、変位計として使われることもある(ただし、この場合直流成分は計れない)。建物の常時微動計測や地震観測等に適している。

(d)MEMS 式加速度計

ゲーム機や自動車等にも使用されている、小型で低価格なセンサ。近年では、SHM や地震観測を目的として、より高感度な MEMS センサの開発も行われている。

○変位計

従来用いられてきた変位計としては、ひずみゲージ式、インダクタンス式、差動トランス式等がある。通常全て相対変位測定を行うものであり、振動実験での層間変位等に使われるものがほとんどであり、実際のモニタリングでは部材継目や既存クラックの開きの監視に使われている程度である。

近年では BOTDR 方式、FBG 方式、光学ストランド方式等の光ファイバセンサシステムや、GPS を使った変位計測技術も開発されてきた。今後は制振部材の変形履歴の監視等に多く使われる可能性がある。

○ひずみゲージ

ひずみゲージは従来より各種部材の応力変動のモニタリング等に多く使われてきた。ひずみゲージ自体は安価であるが多点計測の場合、設置費、測定システムを含めるとモニタリングで使うには高値なものとなってしまう。SHM としては、測定点の部材発生応力で健全性を評価するといった従来方法ではなく、少ない測定点間のひずみ分布の変化と損傷の関連等を評価に取込み、後にでてくるデータ収録の省配線システムと組合せた形の使用方法が考えられる。

○AE センサ

RC 造の建物においては、ひび割れ等の損傷によって AE (Acoustic Emission) が生ずる。複数の AE センサを建物の表面に取り付けると、損傷により生じた弾性波を受信し、損傷の生じた位置は、各センサが弾性波を受信した時間の差により推定できる。AE パラメータ

には AE 事象、AE カウント数、AE ヒット数などがあり、それらによってローカルな損傷検出が可能となる。

②状態の推定

実測データからのノイズの除去、取得したデータの種類や日時などのいわゆるメタ情報の付加などを行った上で、取得した信号を説明するのにもっとも適した物理モデルや数学モデルを決定するプロセス。逆解析（システム同定）技術を適用し、モデル構造の決定及びモデルパラメータを推定する。

取得したデータから建物の状態を推定する逆解析技術は、モード特性を同定する手法、物理パラメータを直接同定する手法等、多数提案されてきている。

設計時に行われる地震時応答解析シミュレーション等を「正解析」とすると、「逆解析（システム同定）」の考え方は以下のように表現される。

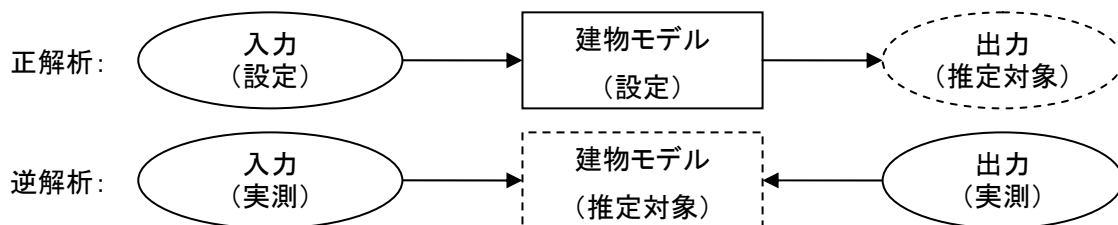


図 5 建物設計における正解析と SHM における逆解析の関係

SHM における逆解析は、計測データからその入出力関係を説明するのに適した数学モデル等を構築し、システム同定手法を適用してモデル構造及びパラメータを推定する。

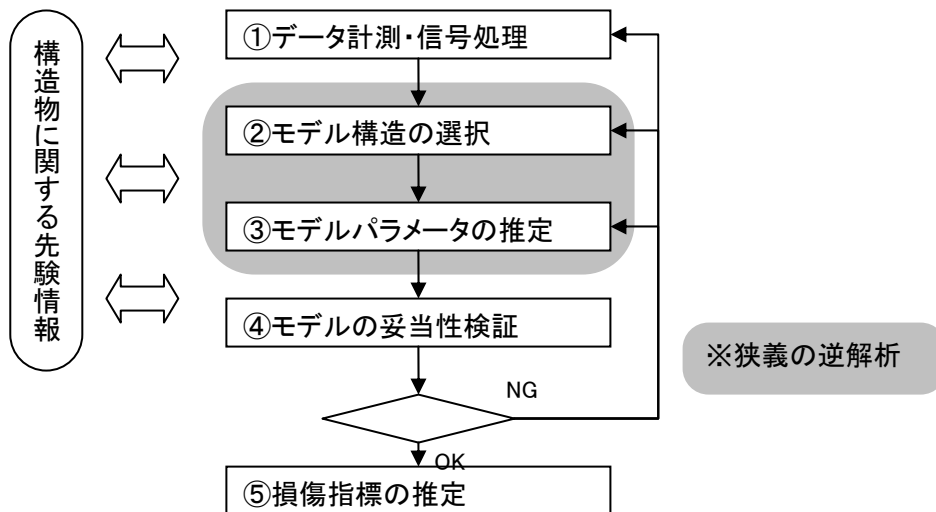


図 6 SHM における逆解析の代表的な実施フロー

③診断

推定したモデルに基づき、情報として蓄積・管理されている前回以前の診断結果等を踏まえながら、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を診断する。さらに、現在の状態が今後どの程度のスピードで進展していくかを予測する。

SHM 技術では、対象建物の振動特性の経時・経年の変化から「自己評価」に基づく診断を行うことが基本である。どの程度の変化量が認められたときに補修・補強等の対策を検討すべきか、管理指標（閾値）を設定することが、ユーザにとっての対策判断の拠り所となる。

診断の精度を高めるための付加的な方法として、相対評価の考え方がある。建物の規模、築年数、構造種別等で類似した構造物群のデータベースを構築し、対象建物の相対的な位置づけを把握する考え方である。

④診断結果の提供

推定・診断された結果を情報提供し、ユーザが行う補修・補強等の意思決定を支援する。近年では、WEB による診断結果の表示を行う技術が成熟している。

さらに、補修・補強後のデータを計測し、対策の実施前後で目標性能が実現されているかどうかを確認するといった適用も可能である。

⑤SHM 情報の蓄積・管理

推定・診断された結果を、データベース上に継続的に蓄積・管理し、上記①～④の次回以降のサイクルに供する。近年ではデータベース技術の発展により、大規模なデータを蓄積・管理するシステムは実用段階にある。

管理する情報の項目として、対象建物の概要、取得したデータの種類や日時、推定・診断結果等がある。

<参考>

SHM を構成する 5 つのステップごとに、現状の技術的な到達点と課題を整理する。

表 3 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	<u>高精度な計測が可能なセンサが多数</u> 開発されている。	<u>初期コスト</u> 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、 <u>ランニングコスト</u> がかかる。建物の規模によっては、センサの設置・運用が <u>経済合理性</u> に欠ける場合がある。
② 状態の推定	<u>層間変位</u> が閾値を超えたかどうかの判定や、 <u>モード特性</u> 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 <u>損傷指標</u> 及び <u>逆解析技術</u> について、体系的な整理がなされていない。
③ 診断	推定結果をどのように解釈するかは、 <u>ユーザの判断</u> 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 <u>診断・解釈に資する知見</u> が不足している。
④ 診断結果の提供	<u>設計者や施工者向け</u> に、 <u>WEB</u> を通じて情報提供する仕組みは実用段階にある。	<u>所有者や居住者向け</u> 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	<u>大容量のデータを安定的に蓄積・管理</u> するシステムは実用段階にある。	<u>運用コスト</u> が高い、 <u>大電力</u> を必要とする等の課題がある。 <u>データベース構造の標準化</u> が今後必要。

上記の通り、SHM は未だ確立された技術ではなく、今後、実測データの蓄積が進むにつれて解決が期待される課題が残されている。

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。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ってくる。そこで本書では、今後の開発に向けて、必要となるデータの計測・評価・管理における標準的な考え方を示すこととしている。

2. 2 SHMの特徴

2.2.1 SHMのメリット

多世代利用住宅の維持管理・流通の場面における SHM の普及・利用が進むことにより、主に以下3点のメリットが考えられる。

- 1) 建物の維持管理の高度化・効率化
- 2) 災害時における継続使用可否の迅速な判断、安心情報の提供
- 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な流通への寄与

【解説】

多世代利用住宅の維持管理・流通の場面における SHM の普及・利用が進むことにより、主に以下3点のメリットが考えられる。

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（サービスビリティ））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、優位性につながる。

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、健全な流通市場の形成に寄与すると考えられる。

2.2.2 建物ライフサイクルにおける SHM 利用場面

建物ライフサイクルにおいて SHM が有効利用される場面として、①新築フェーズ、②維持管理フェーズ、③災害フェーズ、④流通フェーズが挙げられる。

本書では特に②維持管理フェーズ、③災害フェーズ、④流通フェーズにおける SHM の利活用を検討対象としている。

【解説】

建物ライフサイクルを①新築フェーズ、②維持管理フェーズ、③災害フェーズ、④流通フェーズという4つに区分すると、1.4 で定義した関係主体にとっての SHM の価値は次のように整理することができる。

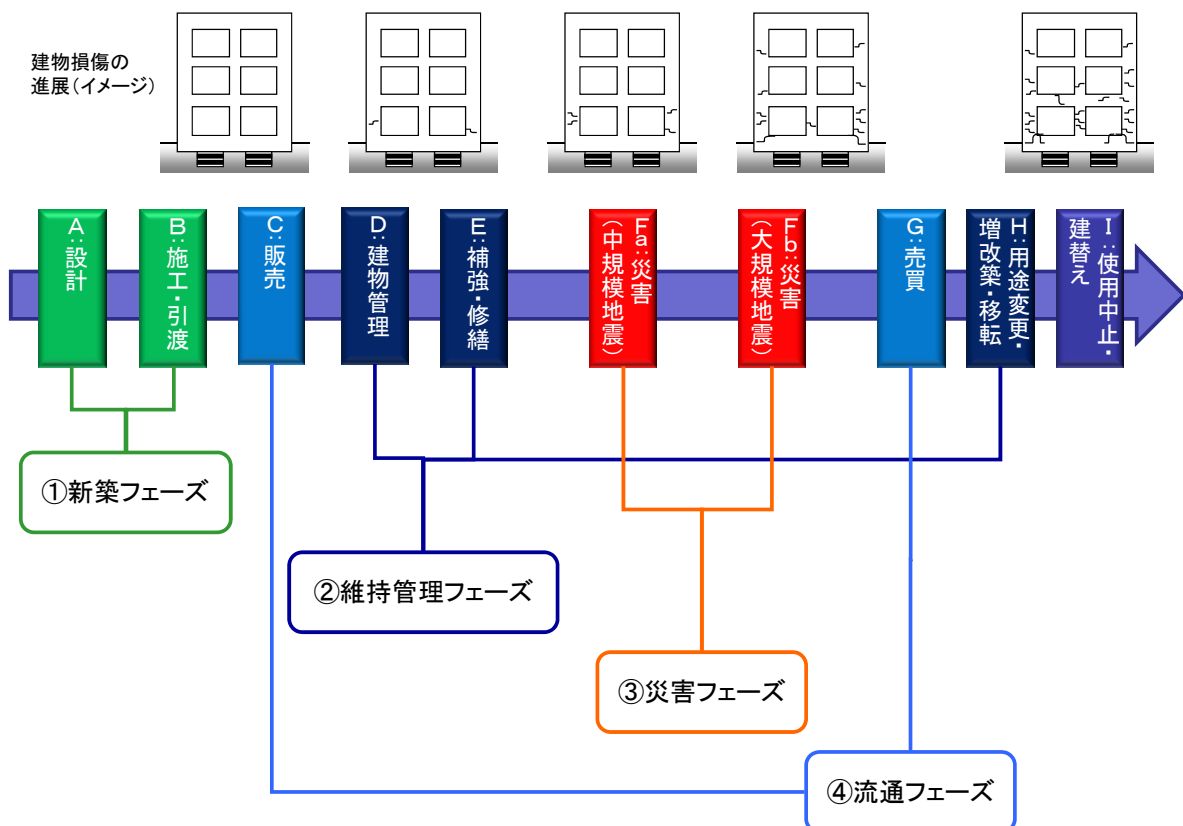


図 7 建物ライフサイクルにおける SHM 利用場面の区分

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。
- 補強・修繕の必要性の説明や、その後の効果測定に活用できる。
- 劣化事象に対症的に対応するのではなく、効率的・効果的な維持管理によるコスト低減が期待される。
- 図面情報等が存在しない建物のモデル構築・更新が可能となる。
- 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。
- 免制振デバイスの適切な時期による点検・交換が可能となる。
- 共通的な基盤があれば劣化メカニズムの解明に役立つ。
- 用途変更等の際に構造上問題のない範囲であるかの確認に活用できる。
- 超長期利用や用途変更等の活性化をサポートすることにより、建物の長寿命化を推進に役立つ可能性がある。

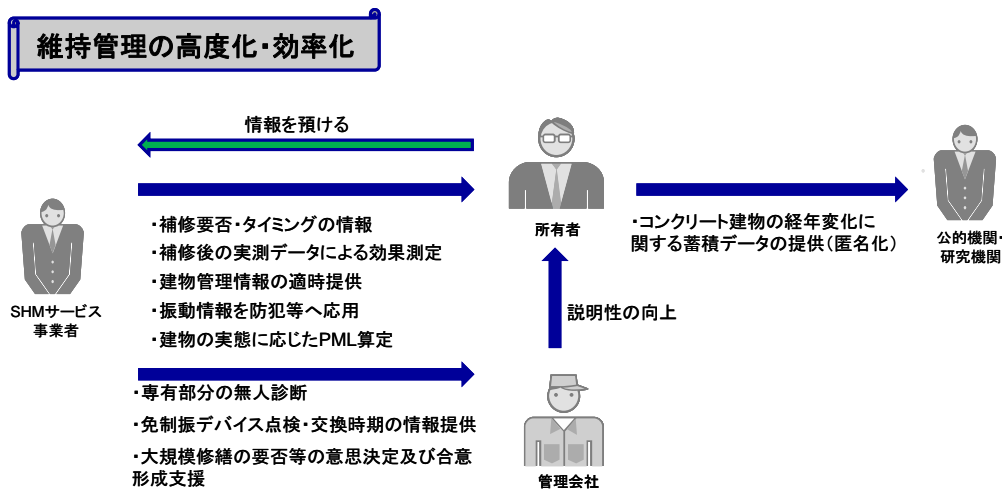


図 8 「維持管理フェーズ」における SHM 利用場面

③災害フェーズ：F a 中規模地震、F b 大規模地震

- 地震の前後で構造上変化がないと分かれば、安心情報を提供できる。
- 補強・修繕の必要性の説明や、その後の効果測定に活用できる。
- 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。
- 応急危険度判定に係るリソース不足の解消につながる情報を提供する。
- 大規模地震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。
- 地震保険の料率算出の精度向上に役立つ可能性がある。

災害時の迅速な情報提供

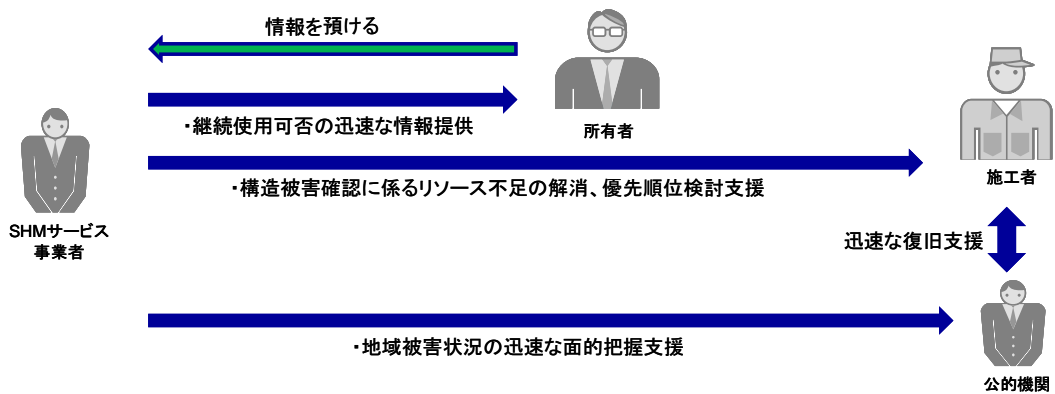


図 9 「災害フェーズ」における SHM 利用場面

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。
- 耐震性能について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。

健全な流通への寄与

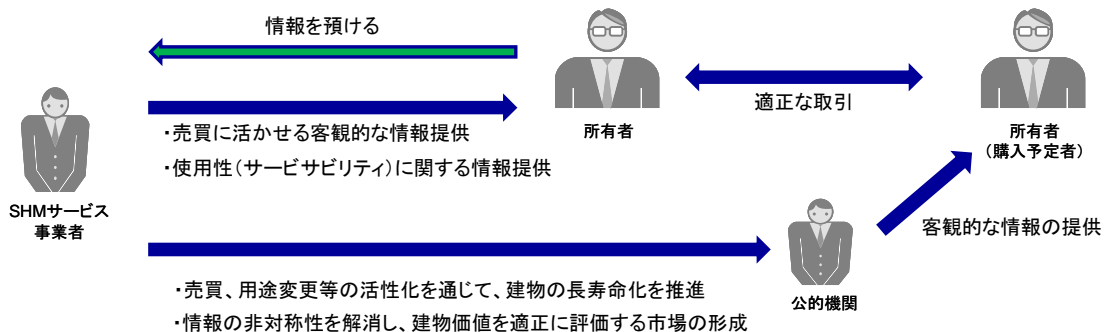


図 10 「流通フェーズ」における SHM 利用場面

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。

本書では特に②維持管理フェーズ、③災害フェーズ、④流通フェーズにおける SHM の利活用を検討対象としている。

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

建物性能を長期にわたり維持していくためには、以下のタイミングにおける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。

- 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（直前の定期計測結果との比較により）
- 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、複数のタイミングにおける計測を可能とする仕組みもある。

【解説】

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。

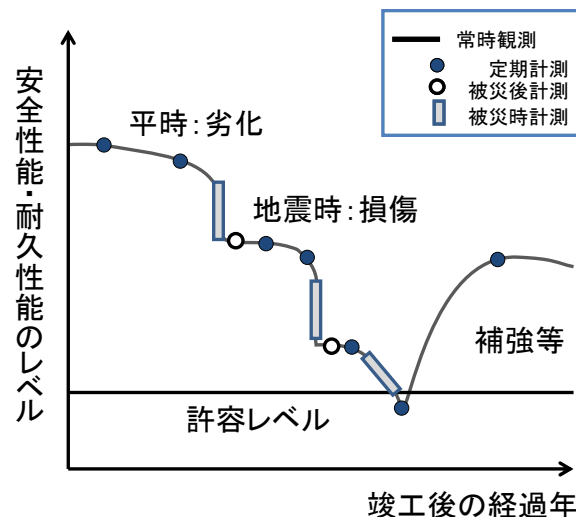


図 11 データ計測のタイミングに関する3つの考え方（イメージ）

（出典）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）より作成

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ねばならず、小型で、安値なセンサの開発が不可欠である。

表 4 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ろう。

2.3.2 推定のレベル

第1章で整理した通り、SHMによる推定のレベルには「全体系」「層レベル」「部材レベル」等が存在する。

- 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

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。

【解説】

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。

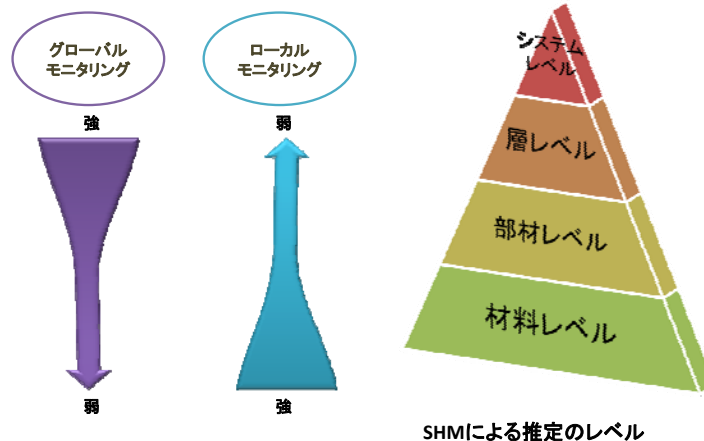


図 12 推定のレベルとグローバル/ローカルモニタリングの考え方（イメージ）

2.3.3 損傷指標とセンサ計測の関係

SHM に用いるセンサは、推定の対象レベル（全体/層/部材）ごとに損傷指標を設定し、指標の推定にどのようなセンサが必要となるかといった観点から、選定する必要がある。

【解説】

SHM に必要となるセンサは、推定の対象レベル（全体/層/部材）ごとに損傷指標（損傷・劣化や使用性の評価指標）を設定し、その推定を達成するためにどのようなセンサが必要となるかといった観点から、選定する必要がある。

表 5 SHM における損傷指標と代表的なセンサ

推定の対象	損傷指標	計測に用いる代表的なセンサ等
全体レベル	1次モード振動数の低下	全体で1個または2個の加速度センサ ^(※1)
層レベル	各次モード振動数の低下	複数の層に加速度センサ
	モード形の局所的な傾斜の増大	複数の層に加速度センサ
	層剛性の低下	複数の層に加速度センサ、層間変位計 ^(※2)
	最大層間変形の閾値超過の有無	複数の層に加速度センサ、層間変位計 ^(※2)
部材レベル ^(※3)	ひび割れの幅・長さ・深さ	AEセンサ、導電塗料、デジタルカメラ
	内部欠陥の有無	赤外線サーモグラフィ、超音波測定器
	歪み量	歪みゲージ、圧電素子
	最大歪み量	炭素繊維、グラスファイバー、TRIP鋼

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

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

(※3) 部材レベルの損傷推定に用いるローカルセンサの一例を併せて整理した。

※それぞれの損傷指標の考え方について、図示する

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

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 (2.3.1) 及び推定のレベル (2.3.2) の組合せから、以下の3つが挙げられる。

- | | | | | |
|--------|-------------|------|--------------|-----------------|
| 【強振動時】 | <u>強振動</u> | に基づき | <u>部材レベル</u> | の評価を行う SHM サービス |
| 【平時①】 | <u>微小振動</u> | に基づき | <u>層レベル</u> | の評価を行う SHM サービス |
| 【平時②】 | <u>微小振動</u> | に基づき | <u>全体レベル</u> | の評価を行う SHM サービス |

【解説】

SHM の利用目的及びユーザのニーズを踏まえて、SHM サービスを明確にする。

例えばデータ計測のタイミング (2.3.1) の面からは、強振動時 (大規模地震・強風) の計測・評価を目的とする場合と、微小振動 (風・中小地震・常時微動) の計測・評価を目的とする場合とでは、SHM システムの要求機能は異なる。また、推定のレベル (2.3.2) の面からは、全体レベルの評価を行う場合と、部材レベルの評価を行う場合とでは、設置するセンサの種類・数が異なってくる。

代表的な SHM サービスの例として、データ計測のタイミング (2.3.1) 及び推定のレベル (2.3.2) の組合せから、強振動時/平時①/平時②という3つを取り上げる。

なおこれら以外にも、利用目的に即した SHM サービスとしては様々な形が考えられる。ユーザのニーズの聞き取り段階において、建物ライフサイクルにおける主な利用場面やコスト上の制約等も考慮しながら、SHM サービスを明確にする必要がある。

【強振動時】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時 (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強振動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。

【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。

【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

形態Ⅱ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。

3つのSHMサービスの適用イメージを次頁以降に図示する。

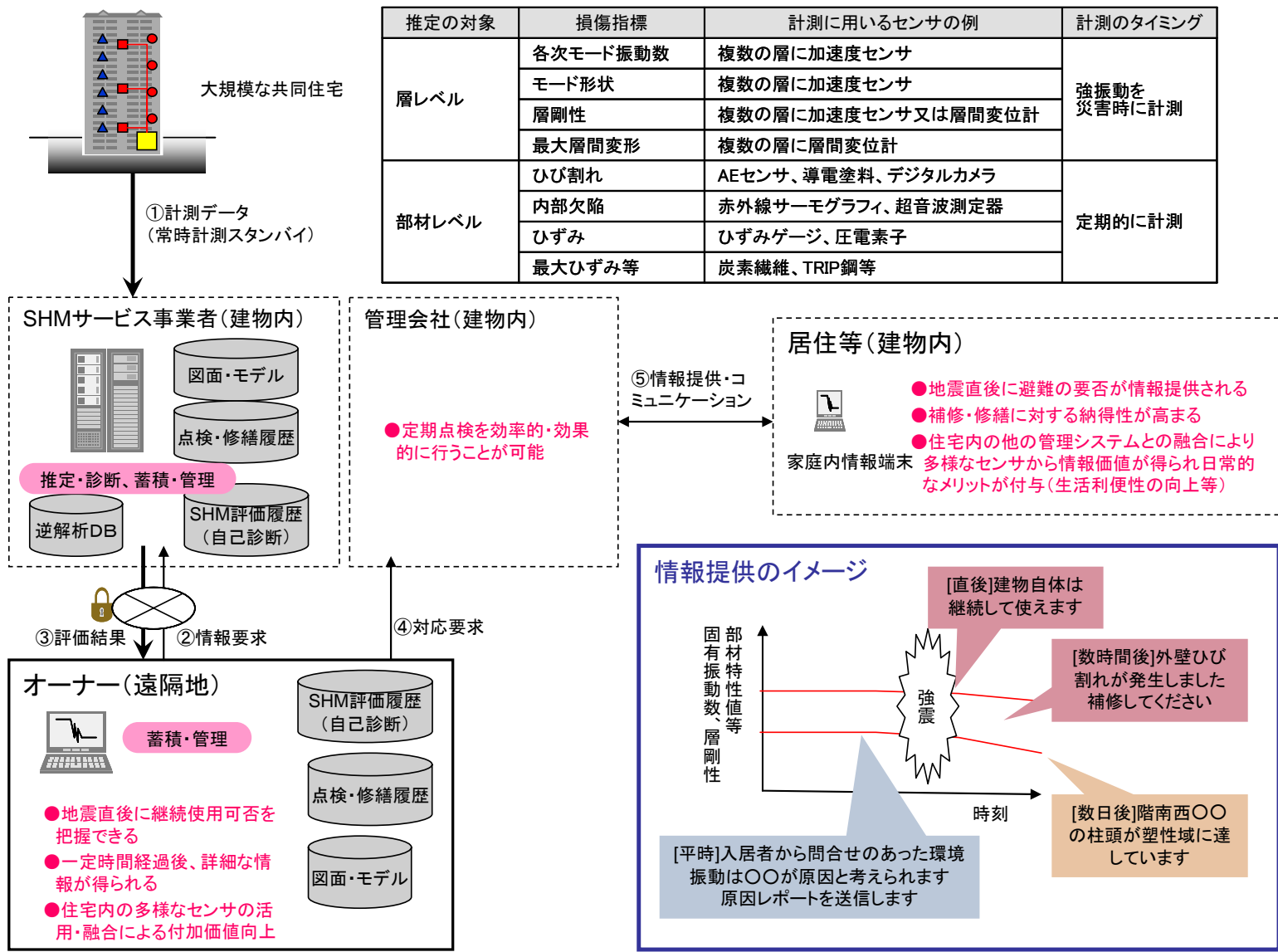


図 13 強振動に基づき部材レベルの評価を行う SHM サービスの利用イメージ

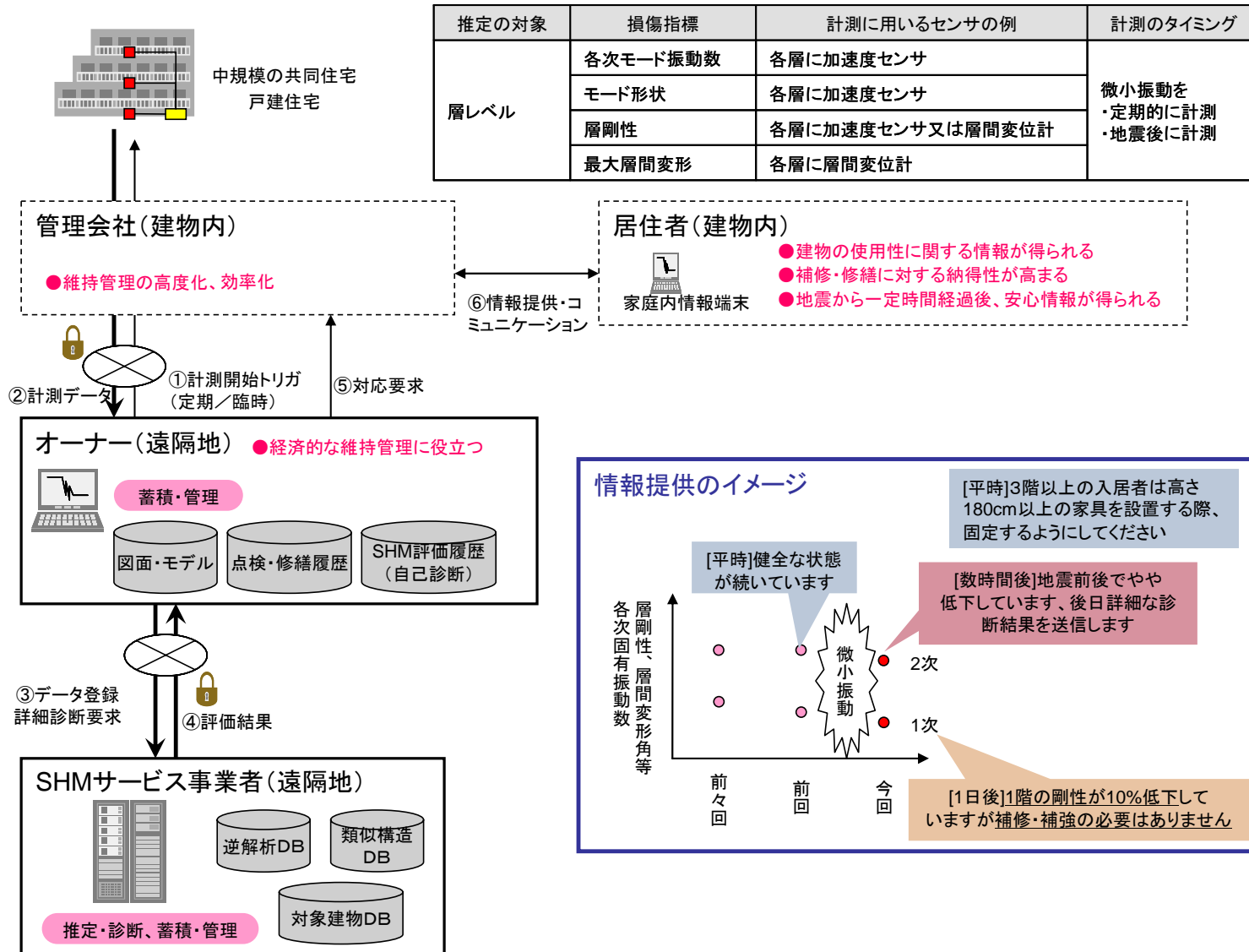


図 14 微小振動に基づき層レベルの評価を行う SHM サービスの利用イメージ

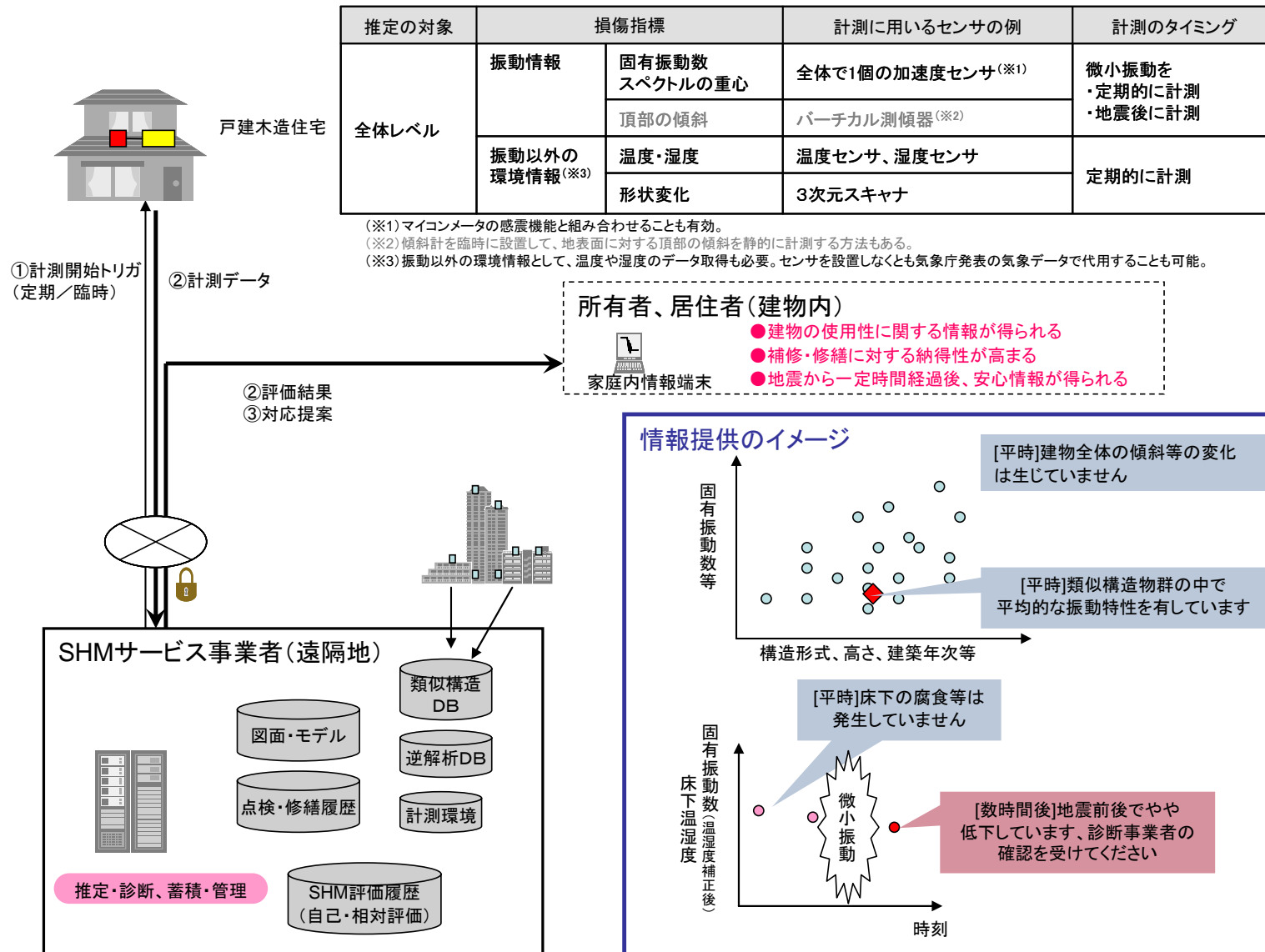


図 15 微小振動に基づき全体レベルの評価を行う SHM サービスの利用イメージ

2.4.2 サービスの項目と内容

SHM システムによりユーザに提供するサービスの項目と内容は、前項で特徴付けした SHM のサービス (2.4.1) に応じて選定する。

(1) サービスの項目 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、被災時計測、定期計測、被災後計測がある。

(2) サービスの項目 B : 状態の推定

建物の振動特性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、構造物全体、層レベル、部材レベルがある。

(3) サービスの項目 C : 診断

推定結果を踏まえ、どのような考え方にに基づき診断を行うかという項目。
サービスの内容として、自己評価、相対評価がある。

(4) サービスの項目 D : 診断結果の提供

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 (避難の要否、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・補強の要否等) といったサービスの内容が考えられる。

(5) サービスの項目 E : SHM 情報の蓄積・管理

SHM による計測・評価の結果を蓄積・管理するためのデータ項目 (記録として残す情報の項目・フォーマット) やアクセス権限に関する項目。

所有者による情報管理を支援するために、管理会社、設計・施工会社、情報サービス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が、サービスの内容として存在する。

【解説】

SHM システムによりユーザに提供するサービスの項目及び内容の全体像は、次の表の通り整理することができる。

表 6 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？	<input type="checkbox"/> 被災時計測 <input type="checkbox"/> 定期計測 <input type="checkbox"/> 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？	<input type="checkbox"/> 全体 <input type="checkbox"/> 層 <input type="checkbox"/> 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？	<input type="checkbox"/> 自己評価 <input type="checkbox"/> 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？	<input type="checkbox"/> 基本情報 <input type="checkbox"/> 被災直後の安全行動の支援情報 <input type="checkbox"/> 被災後の安心情報 <input type="checkbox"/> 判断・対応の支援情報 <input type="checkbox"/> 使用性に係る情報 <input type="checkbox"/> 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

前述したサービス形態（2.4.1）に応じて、必要となるサービスの内容が異なる。そこで以下、サービスの内容ごとに強振動時／平時①／平時②という3つの分類フラグを立て、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。

(1) サービスの項目 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2.3.1で述べた通り、被災時計測、定期計測、被災後計測がある。

①被災時計測 強振動時／平時①／平時②

地震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 強振動時／平時①／平時②

定期点検時と併せて、或いは1ヶ月に1回等の予め定めたタイミングにより、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 強振動時／平時①／平時②

地震発生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 7 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	
		強振動時	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 不意に発生する強振動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	地震発生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		●

(2) サービスの項目 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 2.3.2 で述べた通り、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 8 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

(3) サービスの項目 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 強振動時 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 強振動時 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。一方、戸建木造住宅に関しては類似建物群の生成が比較的容易と考えられる。また、推定の精度を補完するため、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が考えられる。

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 9 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		
		強振動	平時①	平時②
自己評価	強振動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			●

(4) サービスの項目 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（避難の要否、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・補強の要否等）といったサービスの内容が考えられる。

①基本情報 強振動時 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、計測された建物の挙動をそのまま提示する。

②被災直後の安全行動の支援情報 強振動時 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。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、地震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 強振動時 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 強振動時 平時① 平時②

地震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。

⑤使用性に係る情報 強振動時 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（サービサビリティ）の評価を行い、情報提供する。

表 10 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	
		地震動	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	避難の要否、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要否、補修・補強の要否等に関して、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(サービサビリティ)について情報提供		●

(5) サービスの項目 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。

②アクセス権限

所有者による情報管理を支援するために、管理会社、設計者・施工者、情報サービス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が、サービスの内容として存在する。

ここではシステムの利用者として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 11 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

表 12 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 2.4.1）との対応関係を以下に示す。

表 13 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？	<input checked="" type="checkbox"/> 被災時計測 <input type="checkbox"/> 定期計測 <input type="checkbox"/> 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？	<input checked="" type="checkbox"/> 全体 <input checked="" type="checkbox"/> 層 <input checked="" type="checkbox"/> 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に基づき解釈するのか？	<input checked="" type="checkbox"/> 自己評価 <input type="checkbox"/> 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？	<input checked="" type="checkbox"/> 基本情報 <input checked="" type="checkbox"/> 被災直後の安全行動の支援情報 <input type="checkbox"/> 被災前後の比較情報 <input checked="" type="checkbox"/> 判断・対応の支援情報 <input type="checkbox"/> 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 14 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か？	<input type="checkbox"/> 被災時計測 <input checked="" type="checkbox"/> 定期計測 <input checked="" type="checkbox"/> 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か？	<input checked="" type="checkbox"/> 全体 <input checked="" type="checkbox"/> 層 <input type="checkbox"/> 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か？	<input checked="" type="checkbox"/> 自己評価 <input type="checkbox"/> 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か？	<input checked="" type="checkbox"/> 基本情報 <input type="checkbox"/> 被災直後の安全行動の支援情報 <input checked="" type="checkbox"/> 被災後の安心情報 <input checked="" type="checkbox"/> 判断・対応の支援情報 <input checked="" type="checkbox"/> 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・補強の要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 履歴情報の管理	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 15 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か？	<input type="checkbox"/> 被災時計測 <input checked="" type="checkbox"/> 定期計測 <input checked="" type="checkbox"/> 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か？	<input checked="" type="checkbox"/> 全体 <input type="checkbox"/> 層 <input type="checkbox"/> 部材	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基づき解釈するのか？	<input checked="" type="checkbox"/> 自己評価 <input checked="" type="checkbox"/> 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か？	<input checked="" type="checkbox"/> 基本情報 <input type="checkbox"/> 被災直後の安全行動の支援情報 <input checked="" type="checkbox"/> 被災後の安心情報 <input type="checkbox"/> 判断・対応の支援情報 <input checked="" type="checkbox"/> 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 履歴情報の管理	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情報サービス機関が遠隔地で支援する形が考えられる。

2. 5 SHM の設計

SHM の設計は、以下の流れに沿って行う。

①SHM サービスの明確化

SHM の利用目的及びユーザのニーズを踏まえて、SHM サービスを明確にする（2.4.1 参照）。建物ライフサイクルにおける利用場面、コスト等を考慮する必要がある。

②対象建物の基本情報の把握

SHM システムを実装する対象建物について、建物の規模、図面等の基本情報を把握する。

③計測のタイミングの設定

上記①②を踏まえ、データ計測のタイミングについて、定期計測／被災後計測／被災時計測（2.3.1 参照）のいずれを適用すべきかを検討する。

④推定のレベルの設定

推定のレベルについて、全体系／層レベル／部材レベル（2.3.2 参照）のいずれを適用すべきかを検討する。

⑤損傷指標の設定

推定のレベルが決定した後、何をもって建物の状態を評価するかという損傷指標を設定する。代表的な損傷指標として、固有振動数、層間変形等が挙げられる。

⑥必要機器構成の検討

上記③～⑤を踏まえ、計測に用いるセンサ、データ伝送のための通信手段、解析・評価やデータ管理を行うサーバ等の必要機器構成について検討する。

⑦コストの評価

必要機器構成が決定した後、SHM システムの構築・運用に係るコストを評価する。この場合、初期費だけでなく維持・更新費も併せて検討しておく。

【解説】

SHM の設計及び構築・運用の流れを図示する。

本節では SHM の「設計」を対象としており、SHM の「構築・運用」に係る具体的な内容は、第 3 章でサービスの項目ごとに記載する。

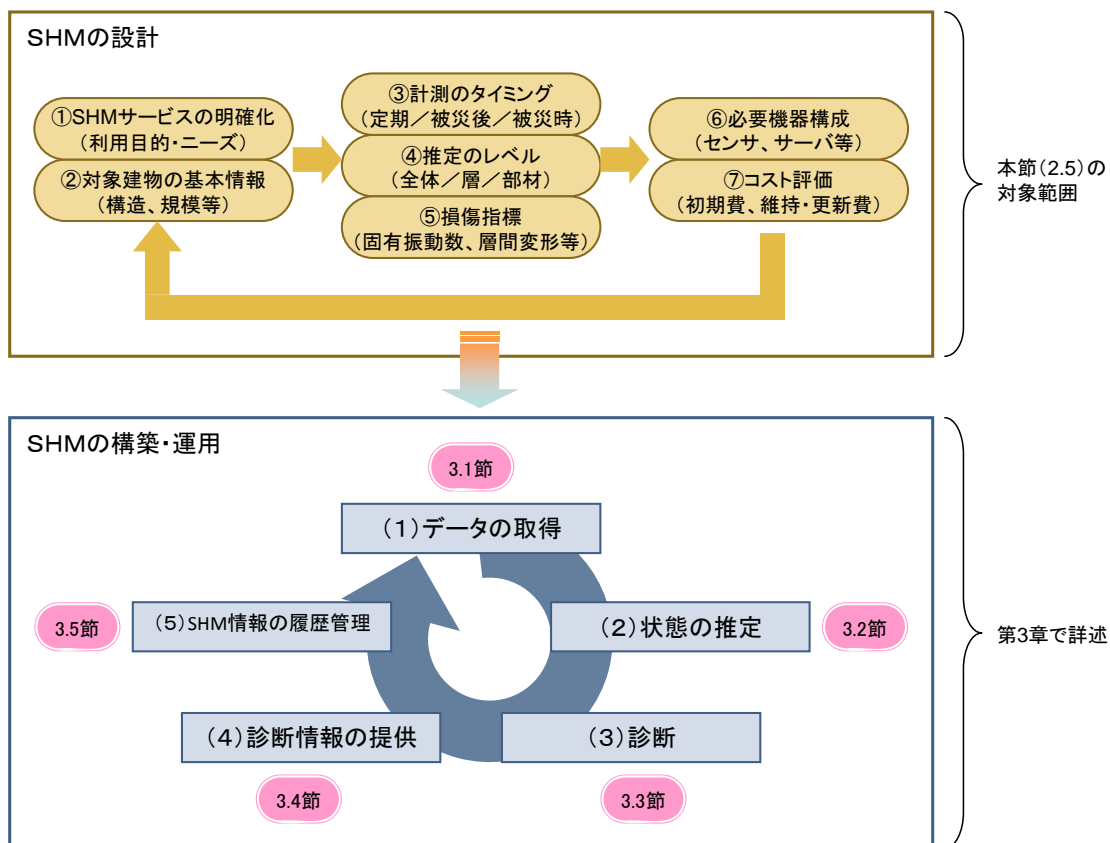


図 16 SHM の設計、構築・運用の流れ

① SHM サービスの明確化

まず第一にユーザのニーズを踏まえて SHM サービスを明確にする必要がある。

SHM の主な利用場面やコストに対する要求等を把握できれば、次の段階として「いつ計測するのか」「どのレベルまで推定するのか」といった検討につながる。

表 16 ユーザのニーズと SHM の利用場面の例

例	主体	ニーズ	SHM の利用場面
ア	設計者、施工者	設計・施工した建物の実物性能の確認	新築フェーズ
イ	管理会社	建物管理業務の効率化・高度化	維持管理フェーズ
ウ	所有者、居住者	地震直後の避難要否・継続使用可否の把握	災害フェーズ
エ	所有者	売買時の判断材料	流通フェーズ

- 例アは、竣工直後の建物に一定期間センサを設置する形態が考えられる。設計・施工の確認は、層レベルで行う場合が多い。
- 例イは、センサは必ずしも常設とする必要はなく、微小振動（風・中小地震・常時微動）の計測時期に併せて臨時設置する形態も考えられる。SHM によって全体系または層レベルの推定結果からある程度限定された範囲について、技術者が部材レベルの詳細な診断を行う等、トータルな仕組みを構築することが有効と考えられる。

- 例ウは、いつ起こるか分からない強振動時の挙動を計測するため、センサは常設とする。地震直後における所有者及び居住者向けの情報提供に関しては、情報提供の迅速性と分かりやすさが必要となる。
- 例エは、実測による建物の動的な特性を、記録として定期的かつ継続的に蓄積・管理していく仕組みとともに、その情報に対する信頼性の裏づけが必要である。

例えば、災害フェーズ及び維持管理フェーズの利用目的に即した SHM サービスの代表的な例として「強振動時システム」「平時①システム」「平時②システム」が挙げられる。

【強振動時システム】 強振動に基づき部材レベルの評価を行う SHM

予め設定した閾値を強振動時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。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、詳細な情報提供を行う。

多くの種類・数のセンサを必要とする。システムの設置・運用コストから、建物の規模によっては経済合理性に欠ける場合があるため、本システムに関しては、大規模な共同住宅が主な適用対象となる。

【平時①システム】 微小振動に基づき層レベルの評価を行う SHM

微小振動（風・中小地震・常時微動）に基づき、平時あるいは地震前後の構造特性の変化について、層レベルの評価結果を情報提供する。補修・補強の効果を測定する活用方法も考えられる。層レベルの推定には、各層で1個以上のセンサが必要となる。

主な適用対象として、中層RC造共同住宅が考えられる。

【平時②システム】 微小振動に基づき全体レベルの評価を行う SHM

微小振動（風・中小地震・常時微動）に基づき、平時あるいは地震前後の構造特性の変化について、全体レベルの評価結果を情報提供する。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。

②対象建物の基本情報

SHM システムを実装する対象建物について、建物の規模、図面等の情報を収集する。ここで把握する情報は、センサの種類・数や設置箇所、逆解析手法等を選定していく上で重要な基本情報となる。

③計測のタイミング

データ計測のタイミング（定期計測／被災後計測／被災時計測）は、以下の考え方に基
づき設定する。

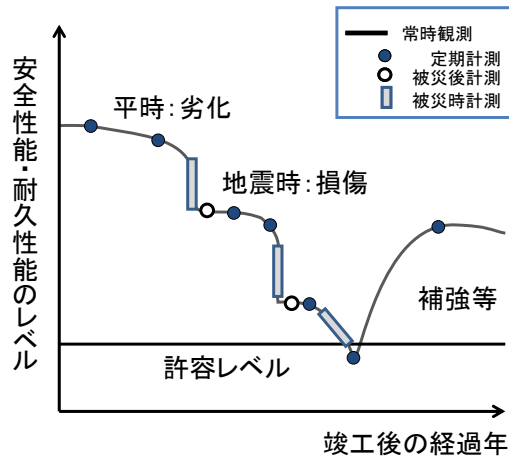


図 17 データ計測のタイミングに関する3つの考え方（イメージ）

（出典）日米共同構造実験研究「ヘルスマonitoring技術利用ガイドライン」P41（H15.3）より作成

【強振動時システム】

センサを常設とし「被災時計測」を行う。

【平時①システム】、【平時②システム】

センサは常設もしくは臨時設置とし「定期計測」「被災後計測」を行う。

④推定のレベル

建物の損傷推定を行うレベル（全体系／層レベル／部材レベル）は、以下の考え方に基
づき設定する。

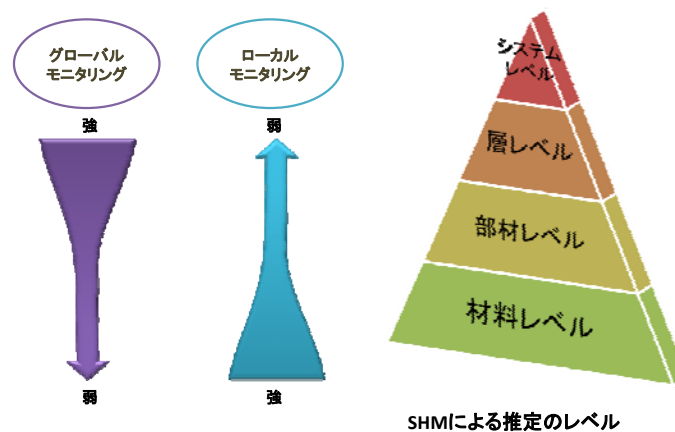


図 18 推定のレベルとグローバル／ローカルモニタリングの考え方（イメージ）

【強振動時システム】

推定のレベルを「部材レベル」とする。

部材レベルの推定には、多くの種類・数のセンサが必要となるため、コストとのト

レードオフ関係が存在する。

ローカルな損傷検出を目的としたセンサは、エネルギーが集中しやすい箇所を予め特定した上で設置される。しかし、建物構造が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、精度の面から限界がある。

【平時①システム】

推定のレベルを「層レベル」とする。

層レベルの推定には、基本的には各層に1個以上のセンサが必要となる。

部材レベルの推定と比較して、比較的lowコストで損傷推定が可能である。

【平時②システム】

推定のレベルを「全体系」とする。

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。

主な適用対象である戸建木造住宅は、非線形性や不整形、温湿度依存性等の理由から、振動データのみで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、推定のレベルは全体系にとどまる。

⑤ 損傷指標

建物の損傷推定を行う指標（固有振動数／層間変形等）は、以下の考え方にに基づき設定する。

表 17 SHMにおける推定のレベルと代表的な損傷指標の関係

推定のレベル	損傷指標
全体系	1次モード振動数の低下
層レベル	各次モード振動数の低下（※）
	モード形の局所的な傾斜の増大
	層剛性の低下
	最大層間変形の閾値超過
部材レベル	ひび割れの幅・長さ・深さ
	内部欠陥の有無
	歪み量
	最大歪み量

（※）特定の層が損傷・劣化すると当該層をモード形の腹にもつ次数においてモード振動数の低下が顕著となる。

【強振動時システム】

部材レベルの推定を行うため、ひび割れ、内部欠陥、歪み等を指標として設定する。

【平時①システム】

層レベルの推定を行うため、モード振動数、モード形状、層剛性、層間変形等を指標として設定する。

【平時②システム】

全体系の推定を行うため、固有振動数を指標として設定する。

⑥必要機器構成

一般的には、センサ、データ伝送手段としてのケーブルや通信機器、解析・評価や蓄積・管理するためのサーバ、電源等が必要となる。

但し、例えばデータ伝送方法を有線とするか無線とするか、複数建物のデータを遠隔地で一括して管理するか単体建物のデータを建物内で管理するか等に応じて、必要機器は異なってくる。必要機器構成を検討するためのこれらの条件は、サービス形態だけでなくコストとのバランスによって設定すべき部分が多いことから、後述⑦と並行して検討する。

⑦コスト

必要機器構成が決まった後は、例えば次のような費用項目を想定し、コスト評価を行う。

初期コストに係る項目（例）

- センサ及び周辺機器（電源、伝送用ケーブル、ルータ、通信キャリア等）
- サーバ及び周辺機器（バックアップシステム等）
- 解析用ソフトウェア
- ユーザ向け情報端末
- システムの実装（作業）

運用コストに係る項目（例）

- センサ・サーバ等の更新
- サーバ運用保守（作業）
- データの解析・評価（作業）

SHM サービス事業者は上記①～⑦を踏まえ、ユーザとの間で合意を図りつつ、SHM の設計を行う。

次章では、SHM 技術を構成する5つのステップごとに、SHM システムの構築・運用における具体的な考え方について整理する。

第3章 SHMの構築・運用

3. 1 データの取得

SHM 技術を構成する 1 番目のステップ「データの取得」について、次の手順に基づき、利用目的や対象建物に応じたシステム構築・運用における考え方を示す。

- 3.1.1 センサの種類を選定
- 3.1.2 センサの性能の設定
- 3.1.3 センサの設置箇所・数
- 3.1.4 センサデータの伝送方法の決定
- 3.1.5 センサの実装
- 3.1.6 計測条件の設定

3.1.1 センサの種類を選定

SHM では、地震・風等の自然現象、人為的な車両交通や歩行など、構造物に作用する動的な振動現象を動的に計測する必要がある。SHM の設計段階（2.5 参照）で検討した損傷指標に応じて、その評価に必要となる物理量の観点から、SHM に用いるセンサの種類を選定する。

電気式の代表的なものとしてサーボ型加速度計、遠距離まで配線可能な光ファイバを利用した加速度計などがある。近年では、センサに処理機能を持たせたスマートセンサが開発されている。

【解説】

振動計測に用いられる代表的なセンサとしては、加速度センサ、変位センサ、歪みセンサ等がある。加速度計としては、サーボ型、光ファイバ（FBG 方式等）、家庭用のゲーム機や自動車などに利用されている MEMS 方式等が存在する。

センサによって計測すべき物理量は、前述 2.5 で設定した損傷指標に応じて、次の対応関係に基づき決定される。

【強振動時システム】

部材レベルの推定を行うため、AE センサ、歪みゲージ等を用いる。

損傷・劣化の状況をグローバルからローカルへ段階的に特定しようとする場合には、部材レベルだけでなく、層レベル・全体系の推定を併せて行うため、加速度センサや層間変位計を用いる。

【平時①システム】

層レベルの推定を行うため、加速度センサや層間変位計を用いる。

【平時②システム】

全体系の推定を行うため、加速度センサを用いる。

本システムの主な適用対象と想定される戸建木造住宅は、計測時の環境条件の影響

を大きく受けることが考えられるため、温度・湿度等によるキャリブレーションが必要となる。そこで、温度・湿度センサも併せて設置を検討する。

表 18 強振動時システムにおける損傷指標と代表的なセンサの例

推定の対象	損傷指標	計測に用いる代表的なセンサの例
全体レベル	1次モード振動数の低下	全体で1個または2個の加速度センサ ^(※1)
層レベル	各次モード振動数の低下	複数の層に加速度センサ
	モード形状の相対変位の増大	複数の層に加速度センサ
	層剛性の低下	複数の層に加速度センサ、層間変位計 ^(※2)
	最大層間変形の閾値超過	複数の層に加速度センサ、層間変位計 ^(※2)
部材レベル ^(※3)	ひび割れの幅・長さ・深さ	AEセンサ、導電塗料、デジタルカメラ
	内部欠陥の有無	赤外線サーモグラフィ、超音波測定器
	歪み量	歪みゲージ、圧電素子
	最大歪み量	炭素繊維、グラスファイバー、TRIP鋼

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

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

(※3) 部材レベルの損傷推定に用いるローカルセンサの一例を併せて整理した。

表 19 平時①システムに用いる損傷指標とセンサの例

推定の対象	損傷指標	計測に用いるセンサの例
全体レベル	1次モード振動数の低下	全体で1個または2個の加速度センサ ^(※1)
	頂部の傾斜の増大	層間変位計、バーチカル測傾器 ^(※2)
層レベル	各次モード振動数の低下	各層に加速度センサ
	モード形状の相対変位の増大	各層に加速度センサ
	層剛性の低下	各層に加速度センサ、層間変位計 ^(※3)
	最大層間変形の閾値超過	各層に加速度センサ、層間変位計 ^(※3)

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

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

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

表 20 平時②システムに用いる損傷指標とセンサ

推定の対象	損傷指標		計測に用いるセンサ
全体レベル	振動情報	固有振動数	全体で1個の加速度センサ ^(※1)
		スペクトルの重心	
		頂部の傾斜	バーチカル測傾器 ^(※2)
	振動以外の環境情報 ^(※3)	温湿度	温度センサ、湿度センサ
形状変化		3次元スキャナ等	

(※1) マイコンメータの感震機能と組み合わせることも有効と考えられる。

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

(※3) 振動以外の環境情報として、温度や湿度のデータ取得も必要と考えられる。センサを設置しなくとも気象庁発表の気象データで代用することも可能である。

3.1.2 センサの性能の設定

SHM に用いるセンサについて、測定範囲、分解能、応答周波数等の面から、適切と考えられる性能を設定する。

一般にセンサ性能が高いほど高精度な測定が可能となるが、住宅に用いるセンサとしては、できるだけ小型で安価であることが要求事項の1つとして考えられるため、SHM の利用目的やユーザのニーズを踏まえて設定する。

【解説】

一般的にセンサの性能は、測定範囲、分解能、応答周波数、温度範囲等によって規定される。SHM に用いるセンサの性能を設定する際は、以下の事項に留意する。

《留意事項》

- 住宅に用いるセンサとしては、できるだけ小型で安価であるということが望ましい。
- A/D 変換の分解能が不足していると、振幅の小さい振動数領域でノイズの影響を受けやすいため、一定の分解能を確保しておく必要がある。
- センサの耐用年数は数年～10年程度であり、使用期間が長期化するにつれ低振動数領域のノイズの影響を受けやすくなるため、定期的な更新が必要となる。
- センサの停電対策が必要である。
- データが万一欠損した場合に備え、センサ自身に内部記憶機能を持たせる必要がある。

3.1.3 センサの設置箇所・数の決定

SHM に用いるセンサについて、センサの設置箇所及び数を決定する。

一般に多種類のセンサを高密度に設置するほど、ユーザに提供する情報価値は高まると考えられるが、特に住宅に用いるセンサとしては、対象建物の構造・規模、コスト等の面を考慮してセンサ数を限定する場合を想定し、基本的な考え方を抑えておく必要がある。

【解説】

多種類のセンサを高密度に設置するほどサービスの水準は高まるが、対象建物の構造・規模、コスト等の面を考慮する必要がある。

建物タイプに応じた設置の考え方を以下に整理する。

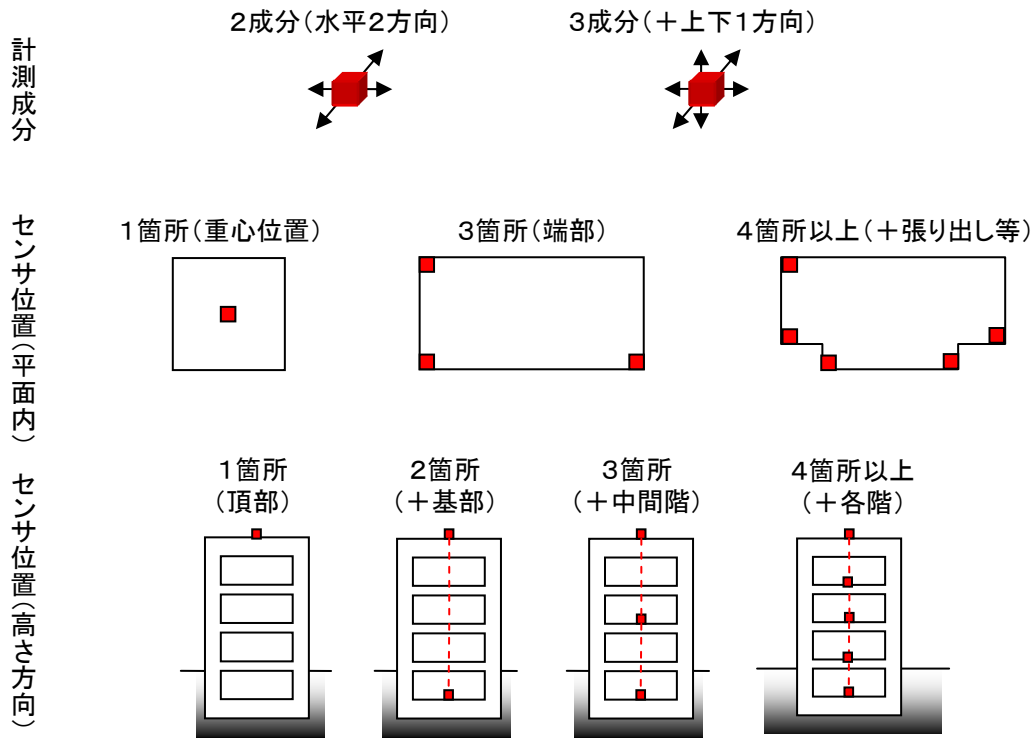


図 19 加速度センサ設置の考え方 (イメージ)

【大規模な共同住宅 (強振動時システムの主な適用対象)】

大規模な共同住宅は、上下方向のモードが地震動によって励起される可能性が考えられるため、水平2方向に加え上下方向も含めた3方向の計測成分を確保する。

平面内の配置は、平面形状が正方形に近い共同住宅である場合、重心位置に1箇所とする。

高さ方向の配置は、高次モードの影響を考慮する必要があるため、中間階を含め3箇所以上での計測が必要となる。特に推定しようとするモード形の節 (振幅0) にある階での計測は避け、腹の近くを計測する。

【中層 RC 造共同住宅 (平時①システムの主な適用対象)】

中層 RC 共同住宅に対しては、一般的には、高層建築と比較して上下動の影響が小さいことから、水平2方向の計測成分を確保する。

平面内の配置は、長軸・短軸が明確な平面形状である場合、捩れの影響を考慮するために端部3箇所に配置する (剛床を仮定)。張り出し等がある場合は、それらの端部も含まれる。

高さ方向の配置は、基礎部・頂部の2箇所を基本とする。

【戸建木造住宅（平時②システムの主な適用対象）】

戸建木造住宅に対しては、水平2方向の計測成分を確保する。

平面内の配置は重心位置に1箇所が基本となるが、剛床の仮定が困難であることに留意が必要である。ガスメータに組み込まれたマイコンメータの感震機能との組み合わせや、温度・湿度などの環境情報は、断熱性や腐食予防を目的とした床下の温湿度のモニタリングとの組み合わせによって、センサ数を低減することも有効と考えられる。

高さ方向の配置は、住宅上部に1箇所が最低限必要であり、必要に応じて基礎部・頂部の2箇所に設置する。

3.1.4 センサデータの伝送方法の決定

センサによる計測データを、サーバ等へどのような方法により伝送するかを決定する。

一般には有線・無線の2つに大別され、それぞれのメリット・デメリットを踏まえて適切な方法を選択する。

【解説】

センサによる計測データの伝送方法は、有線・無線のそれぞれの特徴を踏まえ、以下の点に留意しつつ適切な方法を選択する。

《留意事項》

- 有線ケーブルによりデータ伝送を行う場合、センサへの電源供給が可能であること、データ送信速度が速く信頼性が高いこと等のメリットがある。しかしケーブル配線の困難な部位には、センサの設置が困難である。
- 無線によりデータ伝送を行う場合、複雑なケーブル配線が不要であり、そのコストも低減することができる。しかし、センサ及び無線用モジュールの消費電力と通信速度、通信データ量を踏まえた適切な電源の確保が課題である。
- 特にRC造共同住宅等ではシールド効果があり、無線による通信が不安定となる場合があるため、通信環境の確認が重要である。
- データの伝送量を抑えるため、センサ内部で1次処理を行う機能を持たせることについても検討を要する。

3.1.5 センサの実装

センサの設置箇所・方法等について、対象建物の状況を踏まえて具体的に検討し、センサを実装する。

【解説】

前述 3.1.3 では、建物の振動性状を踏まえた理論的なセンサ配置の考え方を示したが、共同住宅等の内部にセンサを実装する際、現実的には重心位置に配置することが困難な状況も想定されるため、以下のような点に留意する。

《留意事項》

- 共同住宅の場合は、専用部分ではなく共用部分に設置する。
- 計測時にできるだけ一定の環境条件を確保するため、天候や温度・湿度の変動、居住者の生活上の振動による影響が少ない箇所に設置する（パイプスペース等）。
- 電磁的なノイズ影響の少ない箇所に設置する。
- バッテリー駆動ではないセンサを用いる場合、電源を確保しやすい箇所に設置する。

また、センサの設置方法に関して、SHM サービス別に整理すると以下の通り。

【強振動時システム】

センサ本体は接着剤やアンカーボルト等を用いて建物にしっかり固定する。

【平時①システム】【平時②システム】

センサを臨時設置して微小振動（風・中小地震・常時微動）の計測・評価を行うような場合であれば、両面テープ等で十分である。

3.1.6 計測条件の設定

SHM の設計段階で検討した「センサによる計測のタイミング」について、それを実現するためのセンサの計測トリガ、サンプリング振動数等を設定する。

【解説】

SHM の設計段階で検討した「センサによる計測のタイミング」について、それを実現するためのセンサの計測トリガ等を設定する。

【強振動時システム】

被災時計測を行うため、一定以上の加速度を検出した場合に計測を開始するトリガを設定する。

【平時①システム】【平時②システム】

定期計測あるいは被災後計測を行うため、ユーザ任意のタイミングを指定できるようなトリガを設定する。

《留意事項》

- 建物の動特性を評価するために着目する振動数領域の2倍以上を目安として、サンプリング振動数を設定する。
- 強振動時システムの場合は特に、計測開始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。

3. 2 状態の推定

SHM 技術を構成する 2 番目のステップ「状態の推定」について、次の手順に基づき、利用目的や対象建物に応じたシステム構築・運用における考え方を示す。

- 3.2.1 データの前処理
- 3.2.2 推定手法の選定
- 3.2.3 モデル構造の選択
- 3.2.4 モデルパラメータの推定
- 3.2.5 モデルの妥当性検証
- 3.2.6 損傷指標の推定

3.2.1 データの前処理

計測データの逆解析の行う前に、トレンドの除去、リサンプリング等による生データの前処理を行う。

【解説】

データの逆解析の前段階として、必要に応じて、以下に示すような信号処理を行う。

- ・ アウトライア（異常値）、トレンド（低振動数領域の外乱）の除去
- ・ 同定に用いる 時間帯の切り出し
- ・ ナイキスト振動数を考慮した リサンプリング
- ・ 特定の振動数領域の信号を抽出する フィルタリング

《留意事項》

- 強振動時には特に非線形領域への対応が必要となるが、短い区間長のデータを切り出して線形手法で推定することも可能である。しかし、推定誤差が大きくなる原因にもなるため留意する。
- リサンプリングに際しては、建物の振動特性を踏まえて 着目したい振動数領域の 2 倍以上の振動数を確保する。

3.2.2 推定手法の選定

SHM の設計段階で検討した「損傷指標」について推定するための逆解析手法を選定する。例えばモード特性を同定する手法、物理パラメータを直接同定する手法等があり、それぞれの特質を踏まえて適切な手法を選定する。

【解説】

SHM の設計段階で検討した「損傷指標」について推定するための方法論は、大きく 4 類型に整理することができる。建物の先験情報、損傷・劣化指標、センサ計測量等、様々な条件に応じて、適切な逆解析手法を選定する。

- ・固有振動数などのモード特性を推定する方法
- ・時刻歴データから物理パラメータを直接的に推定する方法
- ・モード特性から感度解析等を経て物理パラメータを段階的に推定する方法
- ・ニューラルネットワーク等の学習モデルを用いたソフトコンピューティングにより応答予測と実際の観測の差異を検出する方法

【モード特性を推定する方法】

建物内部に損傷・劣化が進展すると基本固有振動数は低下するといった考え方で、構造物の損傷・劣化推定が行われる。

入出力関係を捉えるための最低2個のセンサから経時変化を追跡でき、あらゆる構造物に共通の指標として構造物間の比較やデータベース化が行いやすいため、簡易かつ汎用的なシステム構築に適している。

表 21 損傷指標となる代表的なモーダルパラメータの特徴

損傷指標	メリット	デメリット
固有振動数 (基本モード)	○少ないセンサ数で推定可能 ○建物全体の損傷有無を推定可能 ○ノイズの影響を受けにくい	▼損傷に対する感度がやや低い ▼層レベルの損傷推定は困難 ▼損傷程度の定量的把握が困難
固有振動数 (複数モード)	○少ないセンサ数で推定可能 ○層レベルの損傷位置を推定可能	▼高次モードの推定精度がやや低い ▼損傷程度を定量的に把握するためには、他技術を組合せる必要がある
モード形状 (振幅・曲率等)	○層レベルの損傷位置を推定可能	▼複数の層にセンサが必要 ▼ノイズの影響を受けやすい ▼高次モードの推定精度がやや低い

【物理パラメータを直接的に推定する方法】

モード特性の同定を行うことなく、入出力時系列データから剛性や減衰などの損傷指標を直接同定する。適用にあたっては、観測ノイズを除去し、有意な信号を抽出するかが重要となる。

【モード特性から物理パラメータを段階的に推定する方法】

固有振動数の変化と剛性低下を関係付ける感度方程式から、損傷位置と損傷程度を推定する考え方に基づいている。

【ソフトコンピューティングによる推定方法】

建物の規模が大きく複雑になると、モデル化の不確定性、パラメータ推定の誤差、ノイズ混入の影響、非線形性の増大などにより、数学モデルの有効性が十分に発揮できないような場合もある。このような状況でも有効な手法として、ニューラルネット、ファジィ推論等のソフトコンピューティングによる推定方法が用いられる場合があるが、課題の1つとして学習用データの確保が挙げられる。

《留意事項》

- 専門家によるエキスパートジャッジを要するような手法や、その結果によって診断結

果が左右されるような手法は、結果の信頼性の担保が難しい。そのため、できる限り汎用的な手法を用いることが望ましい。

- 推定結果の妥当性を示すため、推定手法を複数選定しておくことが望ましい。
- 強振動時システムの場合は、非線形領域への対応が課題であり、非線形性を含めた逆解析手法の適用が必要となる。また、強振動時のモード振動数は、入力レベルの振幅依存性によって変化することに留意する。
- 上記において、短い区間長のデータから線形手法で推定することも可能である。しかしこれが、推定誤差が大きくなる原因にもなるため留意する。

3.2.3 モデル構造の選択

対象建物の基本情報等を踏まえ、建物の動特性を表現するモデル構造を選択する。モデル構造の選択においては、モデル化誤差と演算負荷を考慮する必要がある。

【解説】

対象建物の基本情報等を踏まえ、建物の動特性を表現するモデル構造を選択する。モデル構造は、前 3.2.2 で選定する推定手法に応じて異なるが、モード特性を推定するための代表的な数学的モデルとしては、多項式モデル、状態空間モデル等が挙げられる。

また、建物の先験情報が詳細に得られている場合には、力学的なモデリングを行い物理パラメータを直接同定するという考え方も採られ得る。

例：多項式モデル

最も一般的に用いられるモデルとして、ARX モデル (Auto-Regressive eXo-geneous) がある。ARX モデルでは、入力データ u が nb 個、出力データ y が na 個観測された場合に、外乱項に白色ノイズを仮定したモデルの入出力関係を、シフトオペレータ q の多項式を用いることで (z 変換と同一視してよい)、次のように表現することができる。

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + \omega(k) \quad \text{但し、} \quad \begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \end{aligned}$$

ARX モデルは、システムの伝達関数 $G(q)$ と雑音モデル $H(q)$ を次のようになっている。

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)}, \quad H(q) = \frac{1}{A(q)}$$

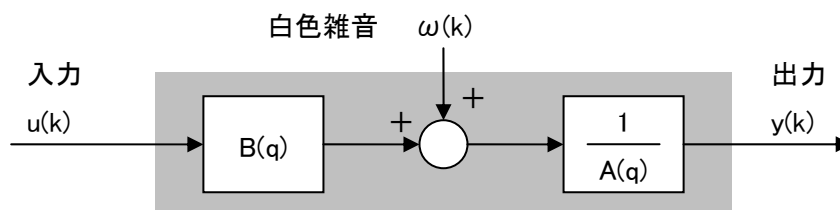


図 20 ARX モデルの構造

ARX モデルの他にも、システムの伝達関数 $G(q)$ と雑音モデル $H(q)$ の考え方に応じて、AR モデル、ARMAX モデル等、様々な考え方が存在する。

《留意事項》

- モデル構造に起因するモデル化誤差を低減するには、対象建物の基本情報や非線形性の考慮等を踏まえ、建物の動特性を表現する適切なモデル構造を選択する必要がある。
- 一般にモデル構造を複雑にすればするほど、モデル化誤差は小さくなる。しかしその分演算負荷が増大し、迅速な情報提供を行う SHM サービスにおいては不適となる場合も考えられるため、留意する。
- モデル構造の複雑さを考慮した規範として例えば AIC (赤池情報量規範) 等があり、モデルの次数を有限個で切り詰める際の判断基準の 1 つとして活用できる。

3.2.4 モデルパラメータの推定

3.2.2 及び 3.2.3 で選択した推定手法及びモデル構造に基づき、モデルを構成する各パラメータを推定する。

【解説】

前 3.2.2 及び 3.2.3 で選択した推定手法及びモデル構造に基づき、モデルを構成する各パラメータを推定する。

例：最小二乗法

例えば ARX モデルの場合、出力 $y(k)$ について書き換えると次のとおり。

$$y(k) = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(k) + \omega(k)$$

$$\text{但し、パラメータベクトル } \boldsymbol{\theta} = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$$

$$\text{データベクトル } \boldsymbol{\varphi}(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T$$

このとき予測誤差は

$$\varepsilon(k) = y(k) - \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(k)$$

で与えられ、予測誤差として 2 次関数を選び最小化するようなパラメータ推定方法を最小 2 乗法という (なお、予測誤差として log 関数を選ぶ方法は最尤推定法といわれる)。

最小 2 乗法におけるパラメータ推定のための評価規範は次式のようになる。

$$J_N(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{y(k) - \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(k)\}^2$$

上式において評価規範 $J_N(\boldsymbol{\theta})$ を $\boldsymbol{\theta}$ に関して微分して $\mathbf{0}$ とおくと、 $\boldsymbol{\theta}$ に関する連立 1 次方程式が得られる。これを解くことにより、パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}$ を推定することができる。

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(N) = \mathbf{R}^{-1}(N) \mathbf{f}(N)$$

$$\text{但し、} \mathbf{R}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \boldsymbol{\varphi}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k) \quad : (n_a+n_b) \times (n_a+n_b) \text{ 行列}$$

$$\mathbf{f}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k) \boldsymbol{\varphi}(k) \quad : (n_a+n_b)\text{次元ベクトル}$$

3.2.5 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する。
その検証結果を踏まえて、必要に応じて再び 3.2.3 及び 3.2.4 のステップを繰り返す。

【解説】

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する。
例えば実際の出力（計測データ）と、3.2.4 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。
検証結果を踏まえて、必要に応じて再び 3.2.3 及び 3.2.4 のステップを繰り返す。

3.2.6 損傷指標の推定

モデルパラメータを何らかの手順で変換する等により、SHM の設計段階で検討した「損傷指標」を推定する。

【解説】

前述 3.2.4 で推定したモデルパラメータそのものは、損傷推定を行う上で意味を持たない。
そこで、建物の損傷指標に変換する必要がある。例えば、推定された多項式モデルのパラメータは、次の手順により、固有振動数や減衰定数といったモーダルパラメータに変換可能である。
ARX モデルの場合伝達関数 $G(q)$ は次式で再定義することができる。

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} = k + \sum_{i=1}^{n_a} \frac{r_i}{1 - p_i q^{-1}}$$

ここで p_j は $A(q)$ の根、つまり伝達関数 $G(q)$ の極である。 r_j は雑音特性 $H(q)$ を部分分数展開したときに留数として求めることができる。 k は直接項である。

最終的に伝達関数の極 p_i から、次式により対象構造物の i 次の固有振動数 ω_i 及び減衰定数 h_i を推定する。

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

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

但し、 Δt は解析を行うサンプリング周期（秒）。

《留意事項》

○伝達関数の極情報の中から、対応する安定したモードの判断・判定に際しては、解析側のエキスパートジャッジを要する。

- 損傷指標の推定結果は確定的に示すのではなく、複数回の推定結果の平均・標準偏差をとって評価する等、信頼度がどの程度の幅を持つものなのかを示すことが望ましい。
- 強振動時システムのように迅速性が要求される場合、解析処理に要する時間も問題となるため、演算負荷の軽減が課題となる。

3. 3 診断

SHM 技術を構成する 3 番目のステップ「診断」について、次の手順に基づき、利用目的や対象建物に応じたシステム構築・運用における考え方を示す。

3.3.1 診断の考え方の整理

3.3.2 管理指標の設定

3.3.1 診断の考え方の整理

対象建物の損傷指標の推定結果（3.2 参照）を踏まえ、その推定結果から「診断」に結びつけるための考え方を整理する。SHM は「自己評価」による診断を基本とする技術であるが、利用目的やユーザのニーズに応じて、考え方を整理する。

【解説】

SHM では、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「自己評価」による診断の考え方を基本としている。

自己評価を基本としつつ、その他の考え方も織り交ぜるかどうかについては、利用目的やユーザのニーズに応じて検討する必要がある。

【強振動時システム】

地震によって加力状態にある建物の挙動をリアルタイムで計測し、予め設定した閾値を超過したか否かを踏まえて評価（自己評価）を行う。

【平時①システム】、

微小振動（風・中小地震・常時微動）時の推定結果を蓄積・管理し、前回以前の推定結果からの経年変化に基づき、評価（自己評価）を行う。初回測定時には、初期値を得る目的から計測・評価を実施する。

維持管理フェーズにおいては推定結果の記録を踏まえて、災害フェーズにおいては被災後計測を実施し被災前の推定結果の変化から、評価（自己評価）を行う。新築フェーズにおいては、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診断するケースも想定される。

推定結果についてどの程度の変化が認められた場合に補修・補強を行うかという管理指標を、ユーザ側で設定しておく必要がある。

【平時②システム】

基本的に平時①システムと同様である。

これに加え、本システムで想定される主な適用対象である戸建木造住宅は、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ことから、推定のレベルは全体系にとどまる。評価精度を補完するため、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が考えられる。

(参考) 相対評価

建物構造・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。

例えば戸建木造住宅について、類型化の考え方の一例を示す。

- 建物規模（平屋／2階建／3階建）
- 地盤種別（地盤の特性値 $T_c < 0.2$ / $0.2 \leq T_c < 0.6$ / $0.6 \leq T_c$ ）
- 工法種別（壁式構造／軸組構造等）
- 建築年次

ただし 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、あくまでも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。また、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からその有効性を含めまだ研究途上にある。

3.3.2 管理指標の設定

SHM による推定結果を解釈するための管理指標を設定する。

管理指標は一律に定められるものではなく、対象建物ごとに設定するため、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。

【解説】

SHM による推定結果を解釈するための管理指標は、ユーザが効果的な対策に結び付けていくための重要な判断材料となる。

例えば SHM サービスの例ごとに、次のような考え方にに基づき、管理指標を設定することが有効と考えられる。

【強振動時システム】

被災度判定調査では、被災後の建物の静的な状態において、技術者による層間変形角等の計測結果から、大破・中破等の判定が行われる。

強振動時システムでは、地震外力を受けている最中にある建物の動的な状態において、層間変形角等の指標が、これらの閾値を超えたか否かで「診断」を行う。

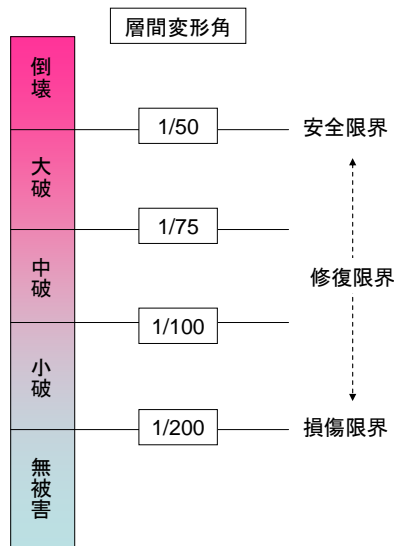


図 21 被災度判定調査における層間変形角の基準（例）

※安全限界。修復限界。損傷限界の説明

【平時①システム】、【平時②システム】

例えば鉄道高架橋の分野では、固有振動数の変化から健全度の診断を行う考え方がある。観測された固有振動数が当初からどの程度低減しているかを健全度指数として定め、その管理指標に応じた処置が行われる。

兵庫県南部地震では、被災した RC ラーメン高架橋の復旧工事後、列車運転を再開する前に、600 箇所弱で衝撃振動試験を通じて目視では確認できない基礎部を含めた高架橋全体の安全性評価を行い、健全度指数 0.7 以上であれば列車走行上問題ないと判定された事例がある。

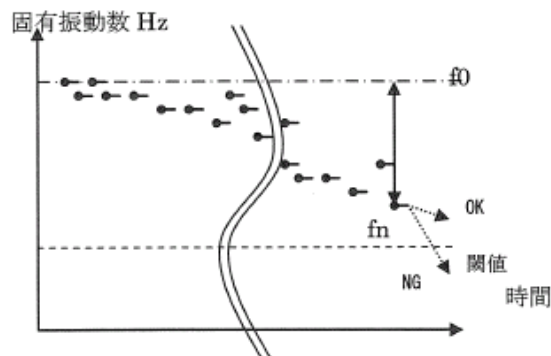


図 22 固有振動数の経年変化に基づく健全度判定イメージ

表 22 鉄道高架橋の健全度指数の参考例

健全度指数	判定ランク		処置
$\alpha \leq 0.7$	A	(A1)	詳細な検査を行い、対処を考慮する
$0.7 < \alpha \leq 0.85$		(A2)	傾斜や洗掘などの変状の進行性を監視する
$0.85 < \alpha$	B以上		現在では問題がなく、健全と考えられる

(出典) 土木学会「橋梁振動モニタリングのガイドライン」P158-159 (H12.10)

※図の使用について要問い合わせ

《留意事項》

- 管理指標は一律に定められるものではなく、建物の構造・規模等によって個別に設定するため、SHM 情報の記録を一定のデータベース構造（後述 3.5 参照）の下に蓄積・管理していく仕組みが必要である。
- 今後の技術的な改善や技術利用の促進のためには、例えば次のようなデータに関しては共通基盤として、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環境の整備も必要となる。ただし情報は所有者のものである考え方の下、匿名化処理を行うことを基本とする。
 - ・建物情報（建物規模、構造種別、築後経過年数、地盤条件）
 - ・センサ情報（センサの種類、諸元）
 - ・計測情報（計測データ、日時、温湿度、地震イベントとの対応等）
 - ・解析情報（固有振動数等の指標の推定結果）

3. 4 診断情報の提供

情報の受け手の特性に応じて、情報提供の内容・方法・タイミング等を検討する。

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。

【解説】

【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。

【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、強振動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。

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。



図 23 リスクコミュニケーションの過程を示す CAUSEモデル

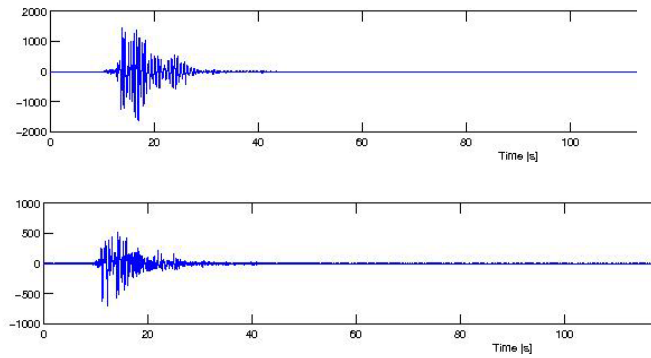
《留意事項》

- 簡単に説明しようとするとう不信感を招き、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。
- 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。
- 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。
- 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）。
- 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。

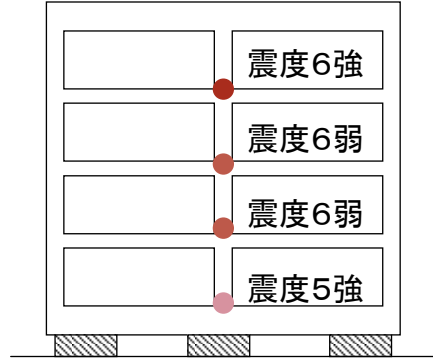
サービス形態に応じて、ユーザへ情報提供する内容としては、以下が考えられる。

①基本情報 【サービス形態によらず共通】

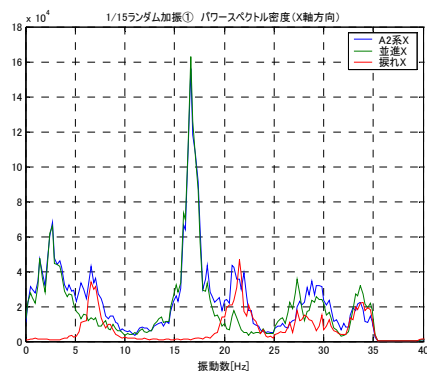
加速度時刻歴波形や層間変位、モード特性（モード振動数、モード形状等）等、計測された建物の挙動をそのまま提示する。



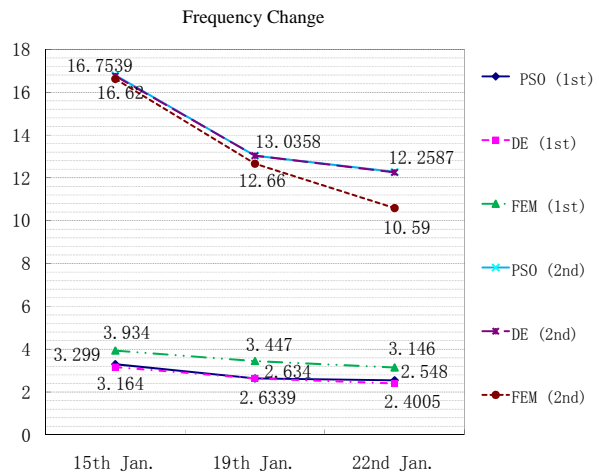
時刻歴波形



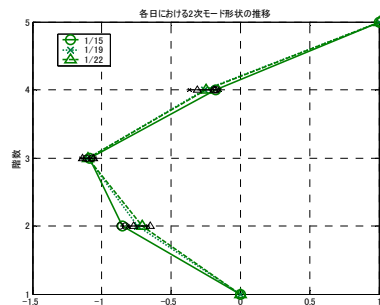
各階の震度情報



スペクトル情報



固有振動数の算出結果



モード形

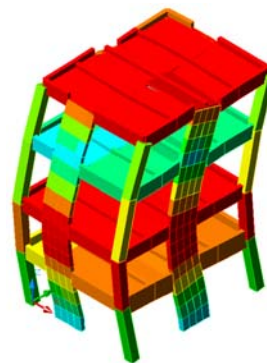


図 24 SHM システムを通じた「基本情報」の提供イメージ

②被災直後の安全行動の支援情報【強振動時システム】

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をもたらす。特に地震発生直後においては、ユーザからの要求の有無に関らず、プッシュ型で情報配信する仕組みが求められる。

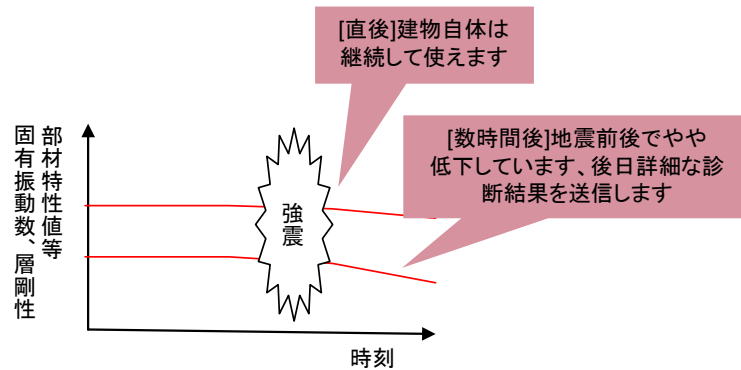


図 25 SHM システムを通じた「被災直後の安全行動の支援情報」の提供イメージ

③判断・対応に係る支援情報【サービス形態によらず共通】

地震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。

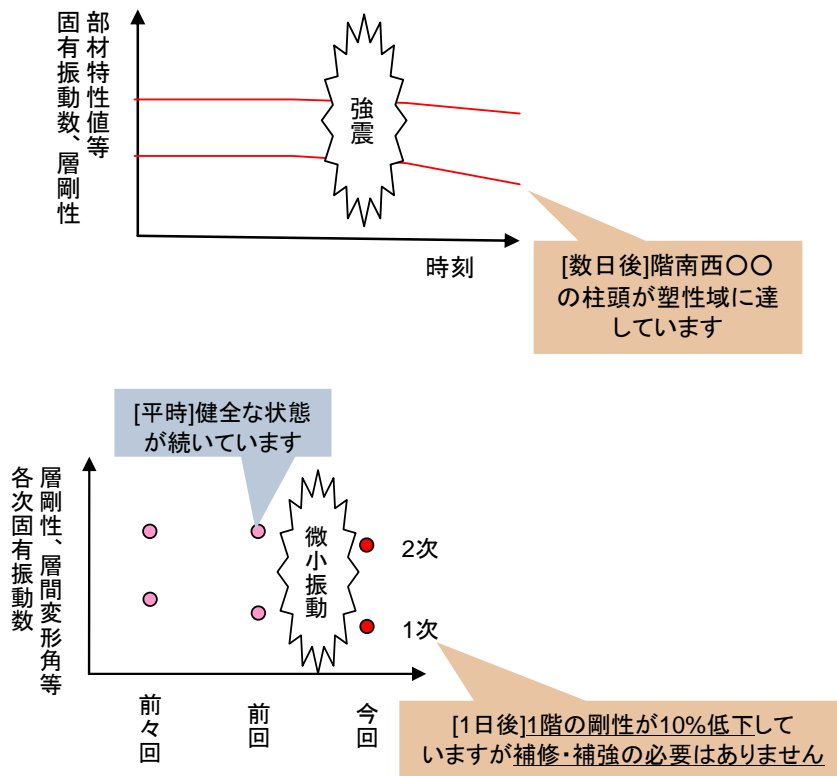


図 26 SHM システムを通じた「判断・対応に係る支援情報」の提供イメージ

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情報価値をもたらす。

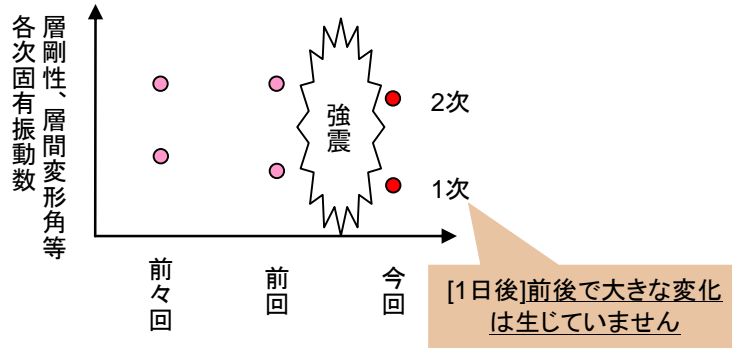


図 27 SHM システムを通じた「被災前後の比較情報」の提供イメージ

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（サービサビリティ）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号室の環境振動は〇〇が原因と考えられます

図 28 SHM 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。

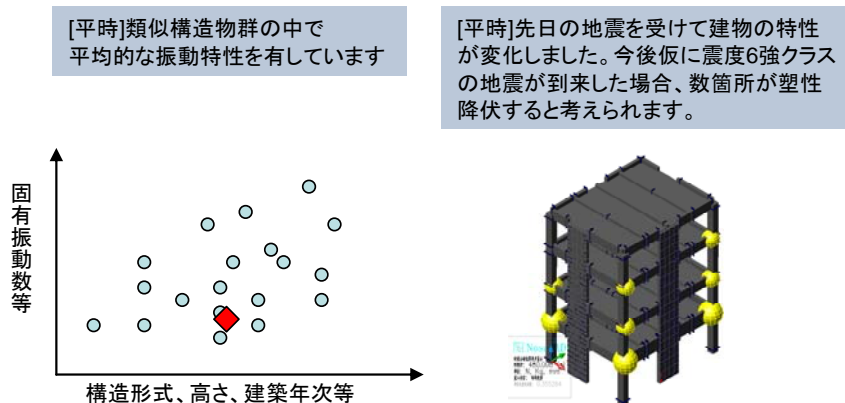


図 29 SHM システムを通じたその他の情報の提供イメージ

3. 5 SHM 情報の蓄積・管理

SHM システムの概念図を作成し、ステークホルダの関係を明確にする。

次に、SHM で計測・評価されたデータを長期にかつ安定的に蓄積・管理するためには、サーバ構成、データモデル、アクセス権限、セキュリティ対策等において標準的な考え方を踏まえる必要がある。以下にその要件を整理する。

- 3.5.1 システム概念図の整理
- 3.5.2 サーバ構成
- 3.5.3 データモデル
- 3.5.4 アクセス権限
- 3.5.5 セキュリティ対策
- 3.5.6 情報の保管・継承・削除等の基本ルール

3.5.1 システム概念図の整理

SHM システム概念図を作成し、システムを取り巻くステークホルダ（ユーザ、システム管理者、情報の二次利活用者）の関係を明確にする。

【解説】

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「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。

SHM システムの概念図は、例えば次のような形で整理することができる。

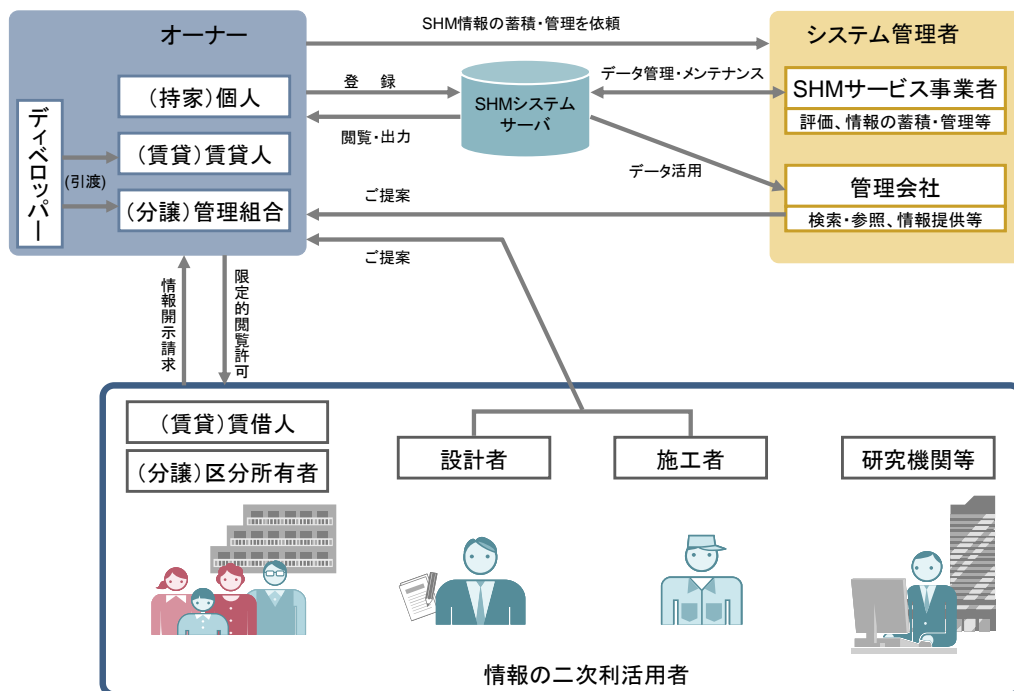


図 30 SHM システムの概念図（例）

3.5.2 サーバ構成

SHM システムを運用するためのサーバ構成を検討する。主に、観測データ受信用サーバ、解析用サーバ、データベース管理用サーバが必要である。

【解説】

SHM システムは、主に3つのサーバで構成される。センサで計測されたデータを受信するセンサゲートウェイ、推定・診断を行うための解析サーバ、データベースの管理と Web サーバとして機能するデータサーバの3台である。

なお、以下に示すサーバ構成はあくまで一例であり、サービス提供時にはユーザのニーズを踏まえて個別に検討する必要がある。

【センサゲートウェイ（計測データ受信サーバ）】

センサゲートウェイは、センサユニットから送信される計測データを受信し、計測データとその属性データであるメタデータを、データサーバにあるデータベースに格納する役割を持つ。

ここで、センサから送信される計測データについては、ミスが許されず、常にその受信プログラムが稼動しているため、センサゲートウェイには他に負荷をかけることができない。そのため、その受信プログラムとは別に、計測データの処理プログラムを1秒ごとに実行するだけに行っている事例もある。

センサゲートウェイは、計測データを安定的に蓄積するためにはサービスが途切れないことが求められるため、二重化することが望ましい。

【解析サーバ】

解析サーバでは、解析ソフトウェアを使用して解析を行う。

解析を行うにあたり、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する。解析結果はデータサーバ内にあるデータベースに格納される。

解析サーバは、同時処理数を考慮して CPU 及びメモリを選定する。障害時に速やかに復旧できることが求められるが、リアルタイムでの解析が必要な場合は二重化することが望ましい。

【データサーバ】

データサーバはデータベースを管理し、計測データを除く SHM に必要な全てのデータを管理するとともに、web 経由でユーザとのインタフェースとなる。

もしユーザがインターネットを通じて解析をする命令を下した場合、データサーバは解析サーバにその情報を伝達し、解析を行わせる。データサーバの Web ページでは、アクセス認証を行い、ユーザ権限に応じてアクセス制御を設定する。ユーザ権限の設定例を下表に示す。

表 23 SHM システムにおけるユーザ権限付与の考え方 (例)

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：慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 三田研究室「構造ヘルスマニタリング（略称：K-SHM）プロジェクト 2009 年度報告書」

3.5.3 データモデル

SHM システムで管理するデータモデルを検討し、各データテーブルで管理する情報項目を設定する。

【解説】

SHM システムのデータモデルを下図に示す。各項目がデータテーブルを表し、図の点線はテーブル同士の関連を表すもので、黒丸がある側のテーブルが、黒丸がない側のテーブルに対して多の関係にあることを表現している。

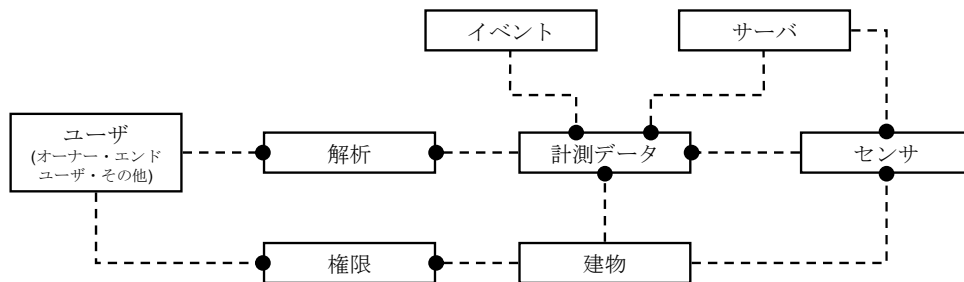


図 31 SHM システムで管理するデータモデルの ER 図 (例) ※説明追加

出典：慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 三田研究室「構造ヘルスマニタリング（略称：K-SHM）プロジェクト 2009 年度報告書」

以下に、それぞれのテーブルの詳細を示す。

【計測データテーブル】

データが計測された日時や建物、サンプリング周波数など、その計測データを分類する情報が格納されるテーブルである。

あるイベントによって建物に設置されたセンサがデータを計測し、そのデータを送信する際にヘッダファイル（xml ファイル）として送信されたものから、処理プログラムによってデータベースに格納される。このテーブルはデータモデルの中心にあることからわかるように、得られたデータを分類する重要なテーブルである。

表 24 計測データテーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
計測時のセンサ情報	センサ ID	センサテーブルとの整合が必要
	センサの種類	加速度、速度、変位、AE 等
	センサの状態	安定／通信異常／再起動中
計測時の環境条件	日時	トリガがかかった日時（年月日、時刻）
	温湿度	
	イベントとの対応	平時（微小振動）以外の環境条件（地震、工事等）
生データ（時刻歴波形）	波形の種類	加速度、速度、層間変位、AE 等
	サンプリング	周期／周波数
	データ長	データ個数／データ時間

【建物テーブル】

建物の名前、構造、住所など、その建物を分類する情報が格納されるテーブルである。

建物を特定するために必要な基本情報であり、建物ごとにユニークに設定される。

表 25 建物テーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
建物基礎情報	建物名称	
	構造	【構造材料による分類】木造（在来工法・2×4工法・木造パネル構法・丸太組構法）／S造（重量鉄骨構造・軽量鉄骨構造）／RC造／SRC造等 【防火性能による分類】防火／耐火／準耐火等 【応答制御による分類】免震構造／制震構造
	階層	地上／地下
	所在地	郵便番号、住所
	建築確認年月日	

	完了検査年月日	
	増改築履歴	増築、改築、耐震化等の完了年月日や施工内容等
所有者情報	所有者名	個人名／法人名
	所有者変更履歴	所有者が変更した場合

【センサテーブル】

センサが設置されている建物、センサの種類など、そのセンサを分類する情報が格納されるテーブルである。

センサの初回接続に送信されるデータから、処理プログラムによってデータベースに格納される項目と、その後にユーザによって、Web システムから入力することでデータベースに格納される項目とに分類される。例えば、設置されている建物やセンサの種類についての情報をセンサは持っておらず、接続後にユーザによって Web システムから入力する。

表 26 センサテーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
センサ情報	センサ ID	
	計測物理量	加速度、速度、変位、層間変位、温度、湿度 等
	メーカー	
	機種	
	サンプリング	
設置条件	設置箇所	階層、レイアウト（図面） 等
	方向	測定軸方向（X-Y-Z 軸の方向等）
	固定方法	

【サーバテーブル】

取得した計測データを収集するサーバの OS や住所など、そのサーバを分類する情報が格納されるテーブルである。

表 27 サーバテーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
サーバ情報	サーバ名	
	OS	
	CPU	
	メモリ	
	HDD 容量	
	IP アドレス	
	住所	

【ユーザテーブルとユーザ権限テーブル】

ユーザの氏名やパスワード、そのユーザの権限など、ユーザを分類し、ログイン時などに使用する情報が格納されるテーブルである。

Web システムからユーザの新規登録や権限の変更などを行うことによってデータベースに格納される。ここで、ユーザは大きく所有者・二次活用者・その他に分類される。

ユーザ権限については次項「③アクセス制御」で詳細に示す。

表 28 ユーザテーブルやユーザ権限テーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
ユーザ情報	ユーザ ID	
	氏名	法人契約の場合は会社名
	登録年月日	
	連絡先	住所、電話番号、E-mail 等
	メール配信設定	
ユーザ権限情報	権限の分類	システム管理者／建物管理者／一般ユーザ

【解析履歴テーブル】

どのユーザがいつどんな解析をしたのかという履歴を格納するテーブルである。

Web システムから解析を行ったときに、その履歴がデータベースに格納され、次回同じ解析を行うときに計算を省略し、高速に結果を表示することに活用されるテーブルである。

表 29 解析履歴テーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
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	
推定に用いる方法	推定手法の種類	ARX モデル、部分空間法、直接計測 等
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
診断結果	自己評価結果	閾値との比較、前回以前の履歴の推移)
	相対評価結果	類似構造物群との比較

【イベントテーブル】

センサの計測トリガに関連するイベントの情報を管理するためのテーブルである。

計測トリガには大きく分けて任意の計測（定期計測、臨時計測）と偶然の計測（地震、その他偶発的事象（工事等））がある。

特に、地震情報を収集するため、気象庁とリンクし、定期的に（例えば1時間おきに）最新の地震情報を確認し、新しく情報が更新されていれば、その情報を自動的にデータベースに格納する。解析結果を閲覧する際に、その計測データと関連のあるイベントをこのテーブルから検索する。

表 30 イベントテーブルで管理する情報項目（例）

分類	データ項目（例）	備考
計測トリガ情報	強振動時のトリガ値	計測開始するトリガ値
	定期計測のトリガ値	計測開始設定時刻（時刻設定、測定間隔設定）
	臨時計測のトリガ値	計測開始する日時

以上のデータテーブルは、SHM を成立させるために必要なデータ項目であり、システム構築側の目線での分類である。これらをサービス事業者側の目線で分類しなおすと、以下のように整理することができる。

大分類（1）～（3）はこれまで示した通りであるが、「（4）提供情報」と「（5）共通基盤」は新規項目となる。（4）は個別建物に対する提供情報であり主に所有者や居住者向けのサービスであり、（5）はベンチマーク評価に利用することを目的として匿名化した情報であり主に事業者向けのサービスである。

表 31 SHM サービス事業者からみた「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（詳細は前述(a)～(g)参照）
（1） 基本設定	①ユーザ情報	ユーザ情報（ユーザ ID、氏名、登録年月日、連絡先、メール配信設定）、ユーザ権限情報 等
	②建物情報	建物基礎情報（建物名称、構造、階層、所在地、建築確認年月日、完了検査年月日、増改築履歴）、所有者情報（所有者名、所有者変更履歴） 等
	③センサ情報	センサ情報（センサ ID、計測物理量、メーカー、機種）、設置条件（設置箇所、方向、固定方法） 等
	④サーバ情報	サーバ名、OS、CPU、メモリ、HDD 容量、IP アドレス、住所 等
	⑤イベント情報（センサの計測トリガ）	強振動時（計測開始するトリガ値） 定期計測（計測の頻度、時間帯等） 臨時計測（計測開始する日時）
（2） 計測情報	①計測時のセンサ情報	センサ ID、センサの種類、センサの状態 等
	②計測時の環境条件	日時、温湿度、イベントとの対応 等
	③生データ（時刻歴波形）	波形の種類、サンプリング、データ長 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	基本情報（計測データ 等） 被災直後の安全行動の支援情報（避難の要否 等） 被災後の安心情報（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匿名化した建物基礎情報	築後経過年数、構造種別、階層、免震・制震構造の有無、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

3.5.4 アクセス制御

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、管理会社、設計・施工会社、情報サービス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。

【解説】

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する。

なお、入居者が所有者に対して情報開示を求める場合の手続きとして、賃貸と分譲では異なる。賃貸の場合は所有者が管理会社であるため、入居者と管理会社間での手続きとなる。分譲の場合は所有者が管理組合になるため、入居者は管理組合の合意を得る手続きが必要となる。

表 32 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

3.5.5 セキュリティ対策

個人情報保護を確保し、不正アクセスによる情報の流出・改ざん・削除等を防止するためのセキュリティ対策を検討する。

【解説】

セキュリティ確保の方策は、サービス事業者ごとに定めておく必要がある。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、一定の対策が求められる。

例えば、以下のような対策がある。

- 期間限定のアクセス権の付与
- 所有者が変わるときにはそれまでのアクセス権の無効化

3.5.6 情報の保管・継承・削除等の基本ルール

長期間にわたり住宅履歴情報の蓄積を行うと、サービス事業者と所有者のいずれかが変更になることがある。その際、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。

【解説】

例えば所有者が変更になる場合の住宅履歴情報の継承については、元の所有者からサービス事業者に変更連絡を行った後、新しい所有者からデータ継承の申請を受けて契約した後に SHM 情報を継承し、その後の情報を蓄積開始する。

所有者が蓄積を止める場合は、サービス事業者は、個人情報保護の観点から、蓄積している住宅履歴情報を所有者に全て返却または削除することが原則となる。

購入や賃貸の場合は、購入予定者／入居予定者が情報を参照するためには所有者の許可が必要である。

トラブルの未然防止のため、その方法についてルールを定め、ユーザに提示する必要がある。

(その他、データのバックアップや保存期間、確保すべきシステム冗長性等の基本的な考え方について追記予定)

- バックアップの頻度、保存期間
- 確保すべきシステムの冗長性、必要な復旧のタイミング 等