

住宅に適したヘルスマニタリング技術の開発に関する検討

【研究計画 2 に対応】

一般的に多種類のセンサを高密度に設置するほど、SHM システムによるユーザーへの情報提供の品質は向上するが、現実的な普及を想定した場合、オーナー等のニーズ、住宅の規模やコストに応じて、適切なサービス水準を組み合わせたパッケージを準備する必要がある。

まず、システム開発 SWG を中心に 1) SHM のサービスの項目・水準を整理した上で、2) それらを組み合わせた複数のパッケージを設定し、特徴や技術的課題等を検討した。次に、3) 標準的な住宅を想定した SHM システムの検討を行った。

<報告書 第 3 章の目次構成>

※枠囲い部分のみ抜粋

- 1.1 サービスの項目及び水準の整理
 - 1.1.1 サービス項目A：推定の対象レベル
 - 1.1.2 サービス項目B：入力データ
 - 1.1.3 サービス項目C：診断方法
 - 1.1.4 サービス項目D：診断情報の提供
 - 1.1.5 サービス項目E：診断情報の管理
- 1.2 サービス水準の組合せの考え方
 - 1.2.1 SHMパッケージ検討の基本的考え方
 - 1.2.2 SHMパッケージの検討結果
 - 1.2.3 「特松」「松」パッケージ：常時計測に基づく高品質な診断サービス
 - 1.2.4 「竹」パッケージ：構造特性の経年変化についての定期診断サービス
 - 1.2.5 「梅」パッケージ：類似構造物のデータベースに基づく一時診断サービス
- 1.3 標準的な住宅を想定したSHM技術の検討
 - 1.3.1 検討ケースの設定
 - 1.3.2 中層RC造住宅向け「竹」パッケージの検討結果
 - 1.3.3 中層RC造住宅向け「特松・松」パッケージの検討結果
 - 1.3.4 戸建木造住宅向け「竹」パッケージの検討結果
- 1.4 机上検討に用いる基礎資料の検討・整理
 - 1.4.1 SHMシステム構築・運用に係る要件の検討
 - 1.4.2 建築構造物のセンサ観測事例
 - 1.4.3 SHM試設計に用いる戸建木造住宅モデルの概要

1.1 サービスの項目及び水準の整理

SHM システムを通じてユーザーに提供するサービスを構成する項目として、大きく以下の5つが考えられる。各項目において品質を規定する複数のレベルを含めて、下表に整理する。

表 3-1 SHM サービスの項目・水準

サービスの項目	概要	サービスの水準
A 推定の対象レベル	構造物の損傷や経年変化について推定を行う対象。	<input type="radio"/> 部材 <input type="radio"/> 層 <input type="radio"/> 構造物全体
B 入力データ	構造特性の逆解析に用いる入力データの種類の。	<input type="radio"/> 地震動 <input type="radio"/> 常時微動 <input type="radio"/> 強制加振や自由振動
C 診断方法	構造特性の逆解析結果を“解釈”するために必要な診断の考え方（技術的な逆解析手法とは異なる）。	<input type="radio"/> 自己評価 <input type="radio"/> 相対評価 <input type="radio"/> 設計モデル
D 診断情報の提供	診断結果をユーザーに情報提供するタイミングや頻度。	<input type="radio"/> 適宜 <input type="radio"/> 定期 <input type="radio"/> 一時
E 診断結果の管理	診断結果を構造物の履歴情報として管理する方針や方法。	<input type="radio"/> オンライン <input type="radio"/> オフライン <input type="radio"/> 管理対象外

1.1.1 サービス項目 A：推定の対象レベル

構造物の損傷や経年変化の推定を行う対象として、構造物全体、層レベル、部材レベル等、複数のレベルが考えられ、これらは設置するセンサの種類・数と深い関係にある。

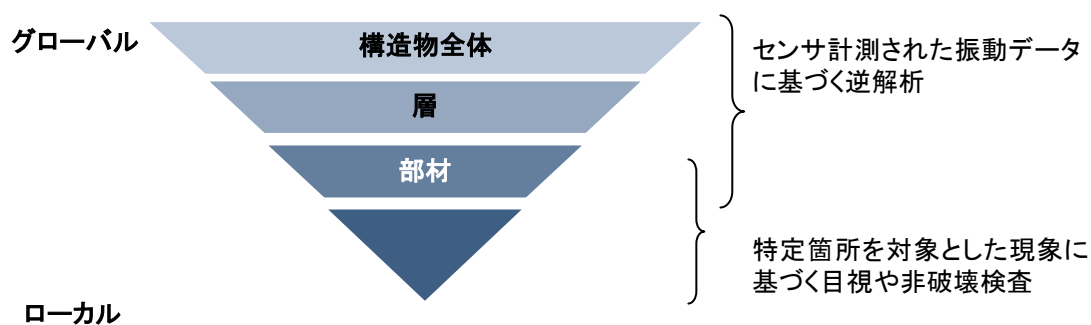


図 3-1 推定の対象レベル

- 全体レベルでのグローバルなモニタリングを行う場合、センサを少数配置することによって、労力をかけずに比較的低コストで推定可能である。
- 層レベルのモニタリングは、全体と部材の中間的位置づけにある。
- 部材レベルのローカルなモニタリングを行う場合は、多種類のセンサを高密度に設置する必要がある。ひび割れ等の現象に基づく目視点検や非破壊検査などとの組み合わせが期待される。通常、センサを設置した位置のごく近傍の状態しか計測できない。また、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。なお、部材レベルの推定が可能な SHM システムは、層・全体レベルも包含される。

表 3-2 項目 A「推定の対象レベル」に関するサービス水準

サービス水準		概要
等級3	部材、層、全体	部材・層・全体レベルと、状況に応じた推定が可能
等級2	層、全体	層～全体レベルの推定まで可能
等級1	全体	全体レベルの推定のみ可能

1.1.2 サービス項目 B：入力データ

構造特性の逆解析に用いる入力データとして、地震動、常時微動、その他の人工的な加振源を用いる場合（強制加振や自由振動等）が考えられる。

- 地震動の場合、地震発生日時の事前予測は困難であるため、センサを予め構造物内部に組み込んでおき、一定以上の振動を検知した場合にセンサがすぐ計測を開始するよう、ホットスタンバイ状態にしておく必要がある。なお、地震動を計測可能な SHM システムは、常時微動の計測についても包含できる。
- 常時微動であれば、定期点検時（特に地震の発生前後）に計測を実施できればよい。強制加振や自由振動では、加振のタイミングと併せて計測できれば十分であるため、センサを予め組み込んでおいたり、ホットスタンバイ状態にしておいたりする必要はない。

表 3-3 項目 B「入力データ」に関するサービス水準

サービス水準		概要
等級3	地震動、常時微動	構造物に予めセンサを組み込む 不意に発生する地震時にもデータ計測が可能
等級2	常時微動	定期点検や地震前後等に常時微動の計測が可能 センサを予め組み込むか臨機に設置するかは任意
等級1	強制加振や自由振動	人工的な加振を行う際にデータ計測が可能 センサは加振時に臨時に設置

1.1.3 サービス項目 C：診断方法

構造特性の逆解析結果を解釈するための考え方として、自己評価、相対評価、設計モデルが考えられる。

- 自己評価とは、例えば、構造物が地震による加力状態にある際に構造特性の時間変化を連続データで捉えることや、前回以前の診断結果からの経年変化を離散データで捉えることが該当する。
- 相対評価は、構造・高さ・規模・平面形状等の観点から類似する構造物の中での、当該建物の相対的な位置づけを捉えるため、類似構造物群ごとに蓄積・管理されたデータベースとの比較が必要である。ただし、これはあくまでも相対的な参考値であり、詳細な診断には、建物自身の履歴データに基づく自己評価が必要である。
- 設計モデルに関しては、設計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考え方である。現在提供されている SHM サービスのほとんどはこの「設計の確認」が主な目的であり、サービスとしての付加価値を考えると、サービス水準が低いと考えられる。

表 3-4 項目 C「診断方法」に関するサービス水準

サービス水準		概要
等級3	自己評価	構造物自身の特性の履歴情報から詳細な評価を行う 地震時の構造特性の時間変化または前回以前の診断結果からの経年変化から評価が可能
等級2	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
等級1	設計モデル	設計パラメータとの比較検証を行う

1.1.4 サービス項目 D：診断情報の提供

診断結果をユーザーに情報提供するタイミングや頻度として、適宜、定期、一時が考えられ、これらはユーザーに対する情報提供の品質と深い関係がある。

- 適宜とは、大規模地震発生を受けて診断結果に応じて警報等の発信、継続使用の可否、補修・補強の必要性有無等の情報提供が可能なサービス水準を指す。災害時のみならず平時も含めて、状況に応じて随時の情報提供が可能なサービス水準を指す。
- 定期とは、定期点検や地震後などの点検時期と合わせて、「構造上問題がない」という安心情報や、補修・補強の必要性有無等について情報提供可能なサービス水準を指す。
- 一時とは、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その場限り、ワンショットで計測し、その診断結果を情報提供するサービス水準を指す。

表 3-5 項目 D「診断情報の提供」に関するサービス水準

サービス水準		概要
等級3	適宜、定期	災害時における警報の発信、継続使用可否等の迅速な情報提供を行うため、特に大規模地震時に有効。平時の適宜の情報提供も含まれる。
等級2	定期	平時の定期的な診断と併せて情報提供を行う。例えば中小地震前後の構造特性の変化を踏まえて安心情報を提供することが可能。
等級1	一時	任意の時期においてワンショットで計測し、診断結果を情報提供

1.1.5 サービス項目 E：診断情報の管理

診断結果を構造物の履歴情報として管理する方法として、オンライン、オフライン、診断後に破棄という、3つの水準が考えられる。

- オンラインとは、構造物の診断結果をデータセンター等の遠隔地で一括管理する方法である。複数の建物を所有するユーザーや、「C.診断方法」においてサービス水準「相対評価」を目指す場合に適している。
- オフラインとは、構造物の診断結果を当該建物内で管理する方法である。建物単体でモニタリングを実施する場合に適している。
- 管理対象外とは、そもそも診断結果を履歴データとして管理する必要がない場合に適用するサービス水準である。「D.診断情報の提供」においてサービス水準「一時」を目指す場合に適している。ただし管理対象外といっても診断結果を破棄するのではなく、本来的には、外部記憶媒体等で簡易な形式により残しておくことが望ましい。

表 3-6 項目 E「診断情報の管理」に関するサービス水準

サービス水準		概要
等級3	オンライン	遠隔地にあるデータセンター等で、複数の建物の診断情報を一括管理する。計測データ自体は建物内のサーバ等で管理する方法もある。
等級2	オフライン	建物内のデータ管理サーバ等において診断情報や計測データ等を蓄積する、スタンドアロン形式で行う情報管理。
等級1	管理対象外	任意の時期においてワンショットで計測するため、計測後に診断情報を管理する必要性が特がない。

以上の検討結果により、サービスの項目・水準は次頁の通り整理することができる。

表 3-7 SHM サービスの項目と水準

サービスの項目	サービスの水準		
	等級3	等級2	等級1
A 推定の対象レベル	3. 部材 2. 層 1. 全体	2. 層 1. 全体	1. 全体
B 入力データ	3. 地震動 2. 常時微動	2. 常時微動	1. 強制加振、自由振動等
C 診断方法	3. 自己評価 (加力状態の構造特性の時間変化、前回以前の診断結果からの経年変化など)	2. 相対評価 (類似構造物群のデータに基づく)	1. 設計モデルとの比較検証
D 診断情報の提供	3. 適宜 (必要に応じて警報発信等)	2. 定期 (点検時期に併せて)	1. 一時 (ワンショットの評価)
E 診断結果の管理	3. オンライン (データセンター等での一括管理)	2. オフライン (建物内での管理)	1. 管理対象外

1.2 サービス水準の組合せの考え方

SHM のサービスは、前節で整理した SHM のサービス水準の組み合わせによって特徴付けられる。組み合わせの考え方は多岐にわたるが、本節では、実現性が高くかつ代表的と考えられるパッケージを設定する。

1.2.1 SHM パッケージ検討の基本的考え方

ユーザーにとっての関心は、導入に伴うコストや、いつどのようなメリットが得られるかだと考えられ、これを5つのサービス項目に照らすと「A 推定の対象レベル」「D 診断情報の提供」に該当する。

A・Dそれぞれのサービス水準の等級3を組み合わせると、部材レベルまでの推定及び適宜の情報提供が可能なSHMシステムとなる。これは、SHMの適用によって見込まれる最高品質のサービスと考えられ、技術的に実現可能性のあるものの、現実的にはコスト面で普及は困難と考えられる。

このようにして、下記マトリクスの3×3の各領域について、技術的な面とコスト面の双方から、サービスとしての成立可能性を検討しながら、パッケージ例を設定することとした。

		D 診断情報の提供			
		情報提供の品質:高 ←		→ 情報提供の品質:低	
		(等級3) 適宜	(等級2) 定期	(等級1) 一時	
A 推定の対象レベル	センサ数:多 ↑	(等級3) 部材	Sランクのパッケージ「特松」 技術的には実現可能だが コスト面で釣合わない →現実性を踏まえて松竹梅の パッケージを設定。 ※1	コスト次第で 実現可能性あり	技術的に困難
	(等級2) 層	※2 Aランクの パッケージ「松」 常設センサのデータに基づく 損傷・経年変化の診断 (地震・常時微動より 多様な観点から評価)	Bランクの パッケージ「竹」 前回測定結果との比較による 経年変化の定期診断 (常時微動で自己評価)	コスト次第で 実現可能性あり	Cランクの パッケージ「梅」 類似構造物群のデータベース 等に基づく一時診断 (常時微動で相対評価)
	センサ数:少 ↓	(等級1) 全体			

平成21年度に実施するE-defense実験データについて、
※1:「フルスペック逆解析」、※2:「簡易な逆解析」を通じて実証を試みる。

図 3-2 SHM パッケージの検討用マトリクス

1.2.2 SHM パッケージの検討結果

前項の検討方法に基づき、想定されるパッケージの代表例として、以下が考えられる。

表 3-8 SHM パッケージの代表例

パッケージ		概要
S ランク 「特松」	常設センサのデータに基づく 損傷・経年変化の高度診断	SHM の適用によって見込まれる最高品質のサービス
A ランク 「松」	常設センサのデータに基づく 損傷・経年変化の診断	地震時のデータに基づき構造特性の変化を連続的に捉えるとともに、常時微動データを活用した評価も可能
B ランク 「竹」	前回測定結果との比較による 経年変化の定期診断	常時微動データに基づき構造特性の変化を自己評価
C ランク 「梅」	類似構造物群のデータベース 等に基づく一時診断	常時微動データの一時的な計測により、構造特性を相対評価する

上記の SHM パッケージと建物ライフサイクルとの関係は以下の通り。

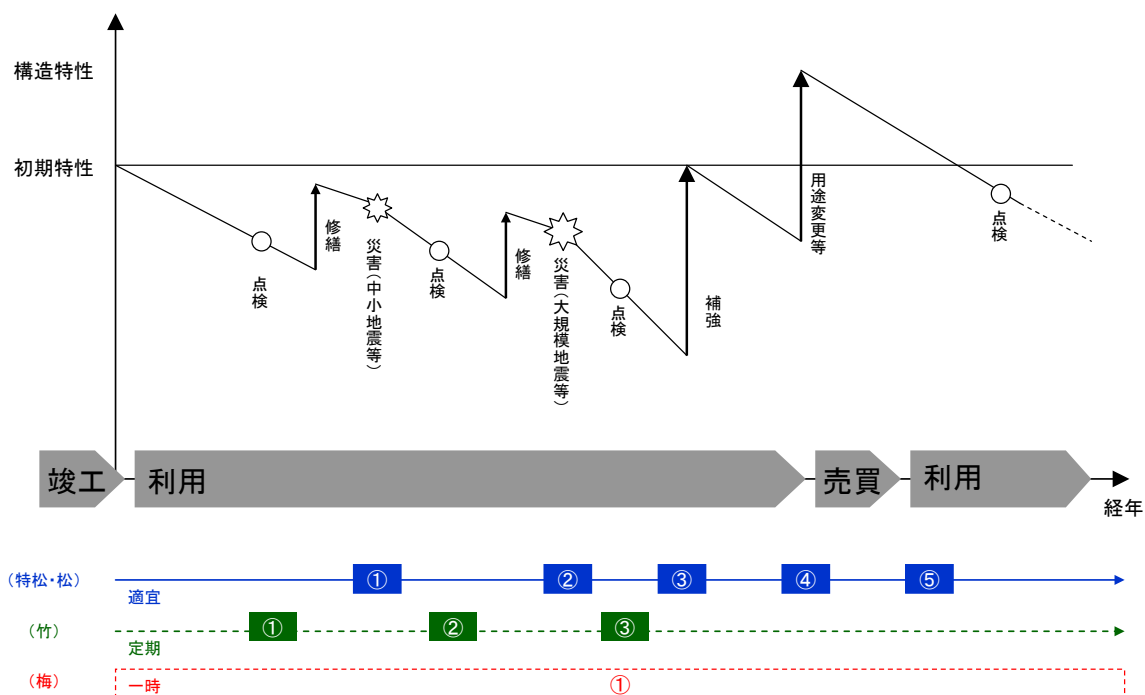


図 3-3 建物ライフサイクルと SHM パッケージの対応

1.2.3 「特松」「松」パッケージ：常時計測に基づく高品質な診断サービス

多様な物理量計測を行うセンサを高密度に配置することで見込まれる品質の高いサービスで、ユーザーに対して様々な情報価値を提供する。大規模地震による加力中の構造物性能の時間変化を捉えることが可能である。

構造物に予め組み込まれたセンサシステムにより、外観からは判別困難な構造物の損傷の箇所や度合いを推定することを目的としている。

「松」パッケージは、各次モード振動数、層間変形角、層剛性などのパラメータの変化を評価し、構造物全体・層レベルで構造特性の時間変化を把握する。「特松」パッケージは、さらに様々なローカルセンサ等を組合せることにより、部材レベルまでの損傷推定が可能となる。特に、震度6強以上の大規模地震が発生した場合は、その加振中の建物の挙動をリアルタイムで計測することができるため、オーナーやエンドユーザーに対しては構造上の安全性を説明する資料として活用することができる。

規模の大きい共同住宅に適している。

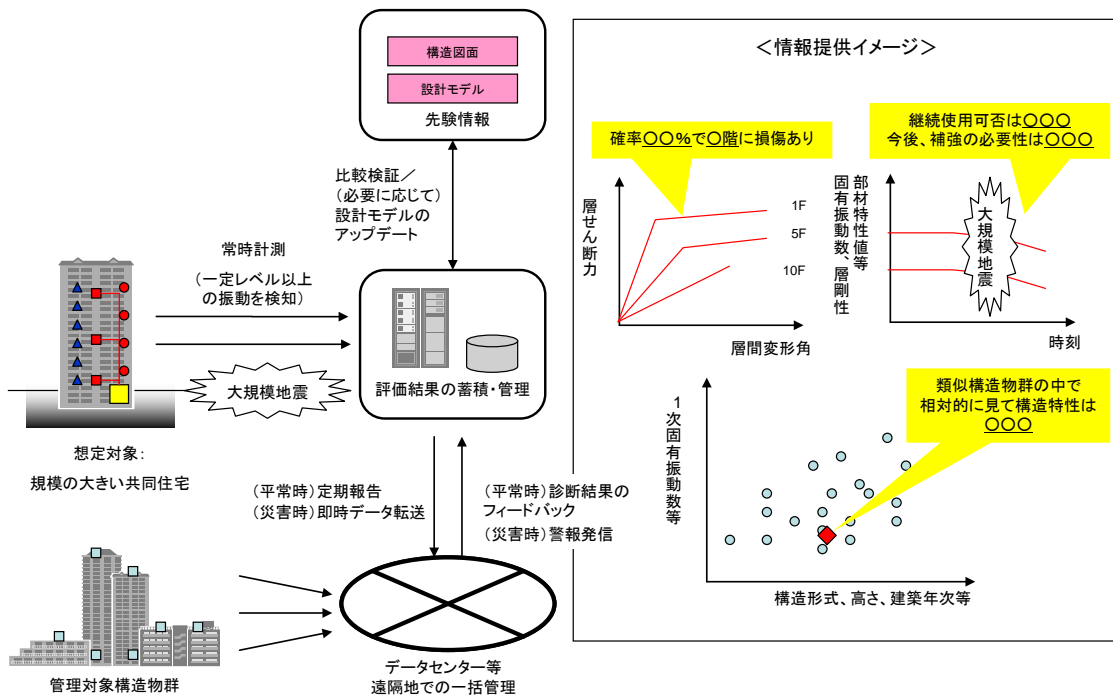


図 3-4 SHM パッケージ「特松・松」の適用イメージ

<特徴>

- 大規模地震時の建物の継続使用可否について迅速な情報提供が可能。建物が異常が発生した場合には過去の記録を遡って原因を特定することができる。
- 一定以上の加速度を検知した場合に計測を開始することで、常時計測に伴うデータ量を低減することができる。
- ライフライン、防犯、設備などライフサポートのための様々なシステムと組み合わせることが有効と考えられる。
- 補強の要否、大規模な用途改変が可能かどうかの判断に資する情報提供が可能。

○ 建物モデルをアップデートし、大規模地震に対して想定される建物被害のシミュレーションの精度を高めるといった用途も将来的に考えられる。

- ▲ 建造物の先験情報として、図面・設計パラメータ等を必要とする。
- ▲ 多くのセンサ配置が必要となり、初期コスト・運用コストが増大する。
- ▲ データの解析及び推定結果の解釈には、専門知識を要する。
- ▲ 実測データに基づく評価結果を、どのように分かりやすく示し、どのように管理するかが課題である。

表 3-9 SHM パッケージ「特松」におけるサービス水準の組合せ

SランクのSHMパッケージ「特松」（一例）

【概要】 常設センサのデータに基づく損傷・経年変化の高度診断

サービスの項目	サービスの水準		
	等級3	等級2	等級1
A 推定の対象レベル	3. 部材 2. 層 1. 全体	2. 層 1. 全体	1. 全体
B 入力データ	3. 地震動 2. 常時微動	2. 常時微動	1. 強制加振、自由振動等
C 診断方法	3. 自己評価 (加力状態の構造特性の時間変化、前回以前の診断結果からの経年変化など)	2. 相対評価 (類似構造物群のデータに基づく)	1. 設計モデルとの比較検証
D 診断情報の提供	3. 適宜 (必要に応じて警報発信等)	2. 定期 (点検時期に併せて)	1. 一時 (ワンショットの評価)
E 診断結果の管理	3. オンライン (データセンター等での一括管理)	2. オフライン (建物内での管理)	1. 管理対象外

表 3-10 SHM パッケージ「松」におけるサービス水準の組合せ

AランクのSHMパッケージ「松」（一例）

【概要】 常設センサのデータに基づく損傷・経年変化の診断

サービスの項目	サービスの水準		
	等級3	等級2	等級1
A 推定の対象レベル	3. 部材 2. 層 1. 全体	2. 層 1. 全体	1. 全体
B 入力データ	3. 地震動 2. 常時微動	2. 常時微動	1. 強制加振、自由振動等
C 診断方法	3. 自己評価 (加力状態の構造特性の時間変化、前回以前の診断結果からの経年変化など)	2. 相対評価 (類似構造物群のデータに基づく)	1. 設計モデルとの比較検証
D 診断情報の提供	3. 適宜 (必要に応じて警報発信等)	2. 定期 (点検時期に併せて)	1. 一時 (ワンショットの評価)
E 診断結果の管理	3. オンライン (データセンター等での一括管理)	2. オフライン (建物内での管理)	1. 管理対象外

1.2.4 「竹」パッケージ：構造特性の経年変化についての定期診断サービス

外観目視による現状の定期的な点検業務に対して、客観的なデータに基づく診断結果を $\pm\alpha$ として提供するサービス。設計の確認や、地震前後の常時微動から構造物の特性変化を評価するといった利用形態も、本ケースに該当する。

外観目視が困難な構造躯体の状況を実測データから評価することによって、技術者による外観目視を中心とした従来型の点検業務の高度化を図る。

各次モード振動数や層間変形角などのパラメータの経年変化を定期的に計測し、点検記録を蓄積・管理することで、構造物全体及び層レベルの損傷推定が可能となる。特にオーナー等にとっては、中規模地震の前後で「変化がない」ことが客観的なデータとして示されることによって、安心情報となりうる。

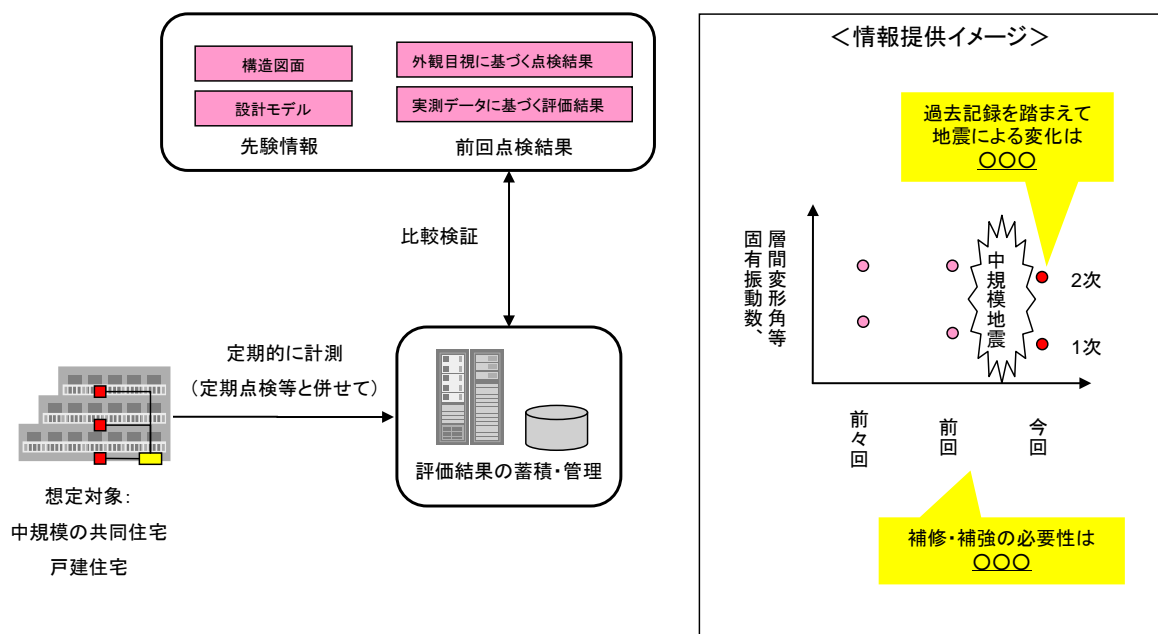


図 3-5 SHM パッケージ「竹」の適用イメージ

<特徴>

- 初回計測時は建物の設計情報との比較検証となるが、2回目以降の計測時は、前回以前の点検・評価結果を活用して評価することができる。
- 計測方法を統一すれば、必ずしも、予め構造物に組み込んでおく必要はない。
- ▲ データの解析及び推定結果の解釈には、ある程度の専門知識を要する。
- ▲ 実測データに基づく評価結果を、外観目視による点検記録とどのように整理して蓄積・管理するか、明確にする必要がある。

表 3-11 SHM パッケージ「竹」におけるサービス水準の組合せ

BランクのSHMパッケージ「竹」（一例）

【概要】 前回測定結果との比較による経年変化の定期診断

サービスの項目	サービスの水準		
	等級3	等級2	等級1
A 推定の対象レベル	3. 部材 2. 層 1. 全体	2. 層 1. 全体	1. 全体
B 入力データ	3. 地震動 2. 常時微動	2. 常時微動	1. 強制加振、自由振動等
C 診断方法	3. 自己評価 (加力状態の構造特性の時間変化、前回以前の診断結果からの経年変化など) <small>2回目以降計測時</small>	2. 相対評価 (類似構造物群のデータに基づく)	1. 設計モデルとの比較検証 <small>初回計測時</small>
D 診断情報の提供	3. 適宜 (必要に応じて警報発信等)	2. 定期 (点検時期に併せて)	1. 一時 (ワンショットの評価)
E 診断結果の管理	3. オンライン (データセンター等での一括管理)	2. オフライン (建物内での管理)	1. 管理対象外

1.2.5 「梅」パッケージ：類似構造物のデータベースに基づく一時診断サービス

類似建物群のデータベースに基づき、常時微動をワンショットで計測し、相対評価を行う。耐震診断等に代わり、実物の性能評価を簡易に行うサービス。

建築年次、構造設計方式、階数等から同じグループに属すると考えられる複数構造物のデータベースを構築しておく。対象構造物にごく少数のセンサを設置し、ワンショットで計測された常時微動データから 1 次固有振動数等の指標を推定する。その上で、予め構築したデータベースに基づき、同じグループに属する構造物間で相対評価を行う。

戸建住宅に適している。

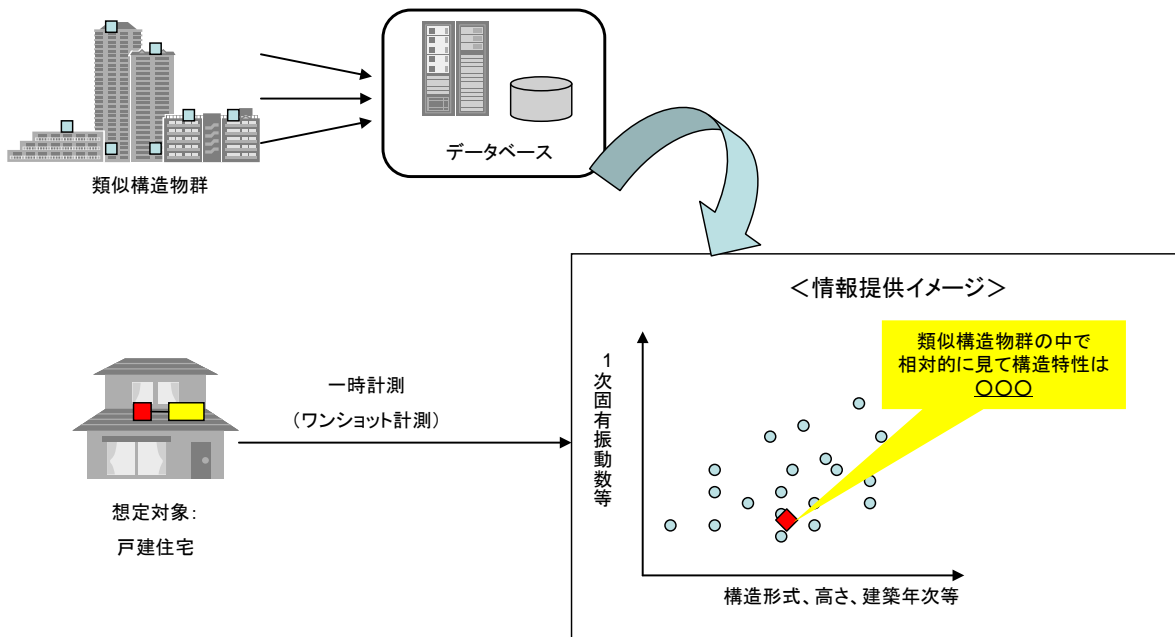


図 3-6 SHM パッケージ「梅」の適用イメージ

<特徴>

- 構造物の基本情報（図面、設計パラメータなど）が存在しない既存建物に対しても適用することができる。
- 最小 1 個の加速度センサを臨時に設置し、常時微動のワンショット計測を行うため、コストを安く抑えることができる。
- ▲ 類似構造物の評価結果のデータベースを構築する際、対象構造物のカテゴリー分けの考え方を明確にする必要がある。
- ▲ データを 1 箇所で管理し、劣化モデルの構築に活用する体制が必要となる。その際、類似構造物群に応じてどのように匿名化するかがポイントとなる。
- ▲ 常時微動の計測結果から劣化状況や地震時の構造特性をどこまで評価できるかという関係を明確にする必要がある。

表 3-12 SHM パッケージ「梅」におけるサービス水準の組合せ

CランクのSHMパッケージ「梅」（一例）

【概要】 類似構造物群のデータベース等に基づく一時診断

サービスの項目	サービスの水準		
	等級3	等級2	等級1
A 推定の対象レベル	3. 部材 2. 層 1. 全体	2. 層 1. 全体	1. 全体
B 入力データ	3. 地震動 2. 常時微動	2. 常時微動	1. 強制加振、自由振動等
C 診断方法	3. 自己評価 (加力状態の構造特性の時間変化、前回以前の診断結果からの経年変化など)	2. 相対評価 (類似構造物群のデータに基づく)	1. 設計モデルとの比較検証
D 診断情報の提供	3. 適宜 (必要に応じて警報発信等)	2. 定期 (点検時期に併せて)	1. 一時 (ワンショットの評価)
E 診断結果の管理	3. オンライン (データセンター等での一括管理)	2. オフライン (建物内での管理)	1. 管理対象外

1.3 標準的な住宅を想定したSHM技術の検討

本節では、標準的な RC 共同住宅や木造住宅を想定した場合のケーススタディを行い、必要なセンサの種類・数・設置箇所に係る考え方を整理する。

1.3.1 検討ケースの設定

検討対象とする住宅モデルや SHM パッケージを設定する。

(1) 検討対象とする住宅モデル

今年度研究計画において、当初は「標準的な RC 造共同住宅モデル」として、高層塔状／高層板状／中層板状の3つを対象モデルとして想定していた。しかし、実在する建物の詳細な図面及び設計パラメータ等の入手が困難であること、RC 造以外に限定せず戸建木造住宅を検討対象に含める必要性等をかんがみ、研究計画を修正することとした。

検討対象とする住宅モデルは、中層 RC 造、戸建木造の2つとする。

- 中層 RC 造住宅に関しては、平成 20 年度に実施された E-defense 実験における、病院を模擬した実大試験体を検討対象として扱う。
- 戸建木造住宅に関しては、平成 17 年度に実施された E-defense 実験において用いられた実大試験体を検討対象として扱う。

(2) 検討対象とする SHM パッケージ

検討対象とする住宅モデルと SHM パッケージの組合せは、以下の通りとした。

中層 RC 造住宅モデルに対しては SHM パッケージ「竹」「松・特松」、戸建木造住宅モデルに対しては「竹」を実装する場合を想定する。

表 3-13 3つの検討ケース

ケース	住宅モデル	パッケージ	サービスの概要
1	中層 RC 造	B ランク「竹」	常時微動データに基づき構造特性の変化を定期的に自己評価
2	中層 RC 造	A ランク「松」 S ランク「特松」	地震時のデータに基づき構造特性の変化を連続的に捉えるとともに、常時微動データを活用した評価も可能
3	戸建木造	B ランク「竹」	常時微動データに基づき構造特性の変化を定期的に自己評価

- ケース 1 は、病院実験の逆解析結果を踏まえ、特にランダム加振データの逆解析において困難であった点等を振り返りながら検討する。
- ケース 2 は、病院実験の逆解析結果を踏まえ、特に地震波加振データの逆解析において困難であった点等を振り返りながら検討する。
- ケース 3 は、対象を戸建木造住宅として新規に検討する。

1.3.2 中層 RC 造住宅向け「竹」パッケージの検討結果

平成 20 年度に実施された E-defense 実験における病院を模擬した RC 造 4 階建ての実大試験体を検討対象として、SHM パッケージ「竹」（常時微動データに基づき構造特性の変化を定期的に自己評価）を適用する場合のセンサ配置計画について検討する。

(1) 住宅モデル

モデルの概要は第 2 章に示した通り。

(2) 常時微動データから評価を行う上での留意点の整理

第 2 章で行った病院実験のランダム加振時のデータ逆解析において困難であった点を踏まえて、常時微動データから評価を行う上での留意点を以下の通り整理し、センサ計画の検討に反映することとした。

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

(3) 損傷指標及びセンサの選定

SHM パッケージ「竹」におけるサービス項目「A.推定の対象レベル」は、「全体」及び「層」レベルとなっている。これらのレベルごとに何を損傷指標とし、損傷指標の評価のためにどのような種類のセンサが必要となるか、次の通り検討した。

表 3-14 中層 RC 造住宅向け「竹」パッケージ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	1 次モード振動数	全体で 1 個または 2 個の加速度センサ ^(※1)
	頂部の傾斜	傾斜計 ^(※2)
層レベル	各次モード振動数	各層に加速度センサ
	モード形状	各層に加速度センサ
	層剛性	各層に加速度センサ及び層間変位計 ^(※3)
	層間変位	各層に加速度センサ及び層間変位計 ^(※3)

- (※1) 1 次モード振動数を推定するための加速度センサは、固有値のみ評価する場合は頂部に 1 個、伝達関数を評価する場合は頂部及び 1 階にそれぞれ 1 個あれば十分である。
- (※2) 傾斜計を臨時に設置して、地表面に対する頂部の傾斜を静的に計測する方法もある。
- (※3) 層間変位計は設置が大がかりになることから、最大値記憶センサや傾斜計の活用も考えられる。

(4) センサ配置計画

「全体レベル」「層レベル」の推定を目的としたセンサ配置計画の検討を行う。

層間変位計の設置箇所は、高さ方向で2つのフロアにわたって設置する。

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

【振れの影響を無視してよい場合】

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

【振れの影響を考慮する場合】

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

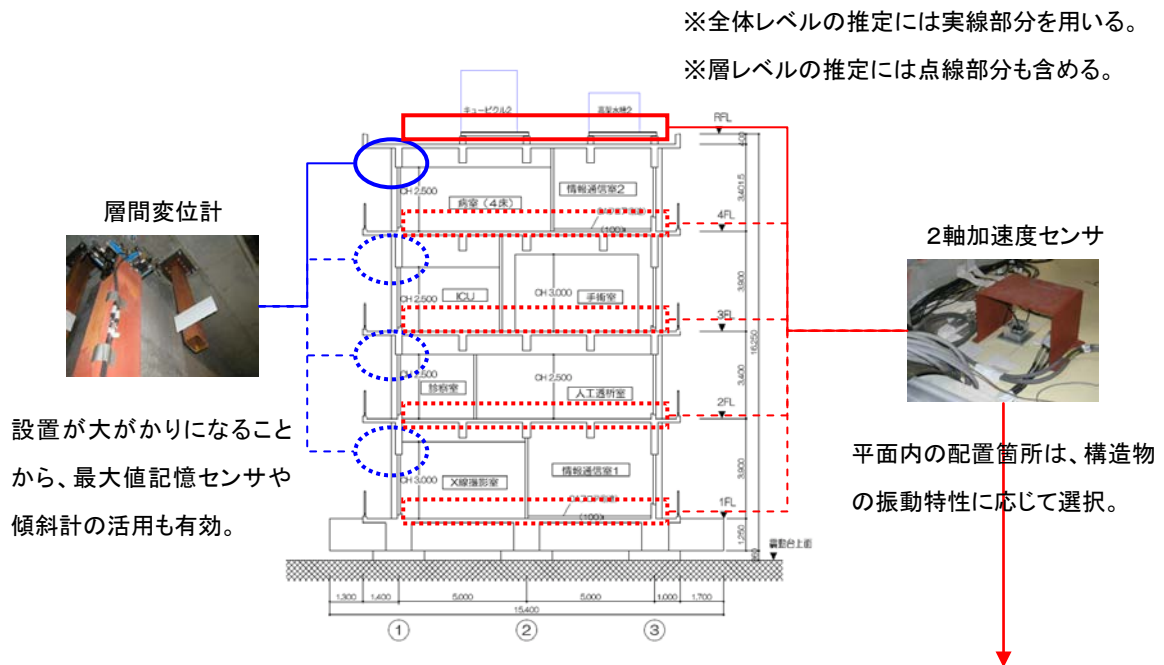


図 3-7 中層 RC 造住宅向け「竹」パッケージにおけるセンサ配置計画

1.3.3 中層 RC 造住宅向け「特松・松」パッケージの検討結果

平成 20 年度に実施された E-defense 実験における病院を模擬した RC 造 4 階建ての実大試験体を検討対象として、SHM パッケージ「特松・松」（常設センサのデータに基づく高品質な損傷・劣化の診断）を適用する場合のセンサ配置計画について検討する。

(1) 住宅モデル

モデルの概要は第 2 章に示した通り。

(2) 地震波加振データから評価を行う上での留意点の整理

第 2 章で行った病院実験の地震波加振時のデータ逆解析において困難であった点を踏まえて、評価を行う上での留意点を以下の通り整理し、センサ計画の検討に反映することとした。

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

(3) 損傷指標及びセンサの選定

SHM パッケージ「松」におけるサービス項目「A.推定の対象レベル」は「全体」「層」レベルとなっている。前述 3.4.2 の SHM パッケージ「竹」の検討結果と比べると、診断の実施時期や情報提供のタイミングが異なるものの、損傷指標及びセンサに関しては基本的に同様である。

そこで、SHM パッケージ「松」に限定せず「特松」の適用まで見据え、「部材」レベルの損傷に用いるローカルなセンサを含めて、何を損傷指標とし、損傷指標の評価のためにどのような種類のセンサが必要となるか、次の通り検討した。

表 3-15 中層 RC 造住宅向け「松」「特松」パッケージ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等
全体レベル	1次モード振動数	全体で1個または2個の加速度センサ ^(※1)
層レベル	各次モード振動数	各層に加速度センサ
	モード形状	各層に加速度センサ
	層剛性	各層に加速度センサ及び層間変位計 ^(※2)
	層間変位	各層に加速度センサ及び層間変位計 ^(※2)
部材レベル ^(※3)	ひび割れ	AEセンサ、導電塗料、デジタルカメラ
	内部欠陥	赤外線サーモグラフィ、超音波測定器
	歪み	歪みゲージ、圧電素子
	最大歪み等	炭素繊維、グラスファイバー、TRIP鋼

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

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

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

(4) センサ配置計画

SHMパッケージ「松」におけるセンサ配置計画に関しては、前述 3.4.2 のSHMパッケージ「竹」とほぼ同様である。ただし実際には、地震の揺れによってセンサやケーブルの断線、センサ自体の回転・ずれ等が発生し、データが欠損する可能性も懸念される。そのような場合に備えてセンサ配置において冗長性を確保する必要があるが、そこはコストとの兼ね合いで困難な場合が多い。

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

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

1.3.4 戸建木造住宅向け「竹」パッケージの検討結果

文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」（平成 14～18 年度）において、平成 17 年 10 月中旬から 11 月末の間、3 種類 5 体の木造建物試験体を用いて、「移築」「倒壊」「耐震補強効果の可視化」をキーワードとした E-defense による振動台実験が行われた。

ここでは、移築補強・無補強建物実験で使用された戸建木造試験体を検討対象として、SHM パッケージ「竹」（常時微動データに基づき構造特性の変化を定期的に自己評価）を適用する場合のセンサ配置計画について検討する。

（1）住宅モデル

移築補強・無補強建物実験では、既存不適格木造住宅が大地震においてどのような挙動と損傷過程を示すのかを明らかにするため、明石市内で解体される予定のほぼ同様な間取りを持つ 2 棟の住宅が E-defense に移築された。そして、耐震補強をした住宅は大地震に耐え、耐震補強していない住宅のみ倒壊する結果を得ることを実験の目的とした。

選定された 2 棟はともに築 31 年（1974 年に新築）の木造軸組構法 2 階建てで、現在の都市部に最も多く建つ在来木造住宅である。住宅の仕様は、外壁モルタル、内壁土塗り壁、瓦葺きの建物である。

以下、防災科研の報告書に基づき、試験体の概要を整理する¹。



図 3-8 移築補強・無補強実験における試験体の外観

表 3-16 戸建木造住宅モデル（A 棟）の概要

Location	Akashi City, Hyogo Prefecture (20km from E-Defence)	Interior walls	<i>Juwaku</i> finish coating/ mud base
Age	31 years old	Ceilings	Plaster boards, printed plywood (Japanese-style rooms)
Structural method	Two-story wood frame dwelling by conventional construction method	Floors	<i>Tatami</i> mats/wooden floors, bond/ coarse timber
Area	Total floor area: 72.30m ² (1st/2nd floors: 37.73m ² /34.57m ²)	Bathroom	Prefabricated (Model A)/tiled (Model B)
		Type of foundation	RC with continuous footing
Roof materials	Roofing mortar/tiles (very heavy)	Rejoined part of brace spec.	Nailing or the like
Exterior walls	Lath mortar/wood lath base	Pillar top/base spec.	Tenon jointing/nailing

¹防災科学技術研究所（2008 年 3 月）「平成 17 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ木造建物実験—震動台活用による構造物の耐震性向上研究—」防災科学技術研究所研究資料第 320 号、p.83-140



図 3-9 戸建木造住宅モデルの立面図

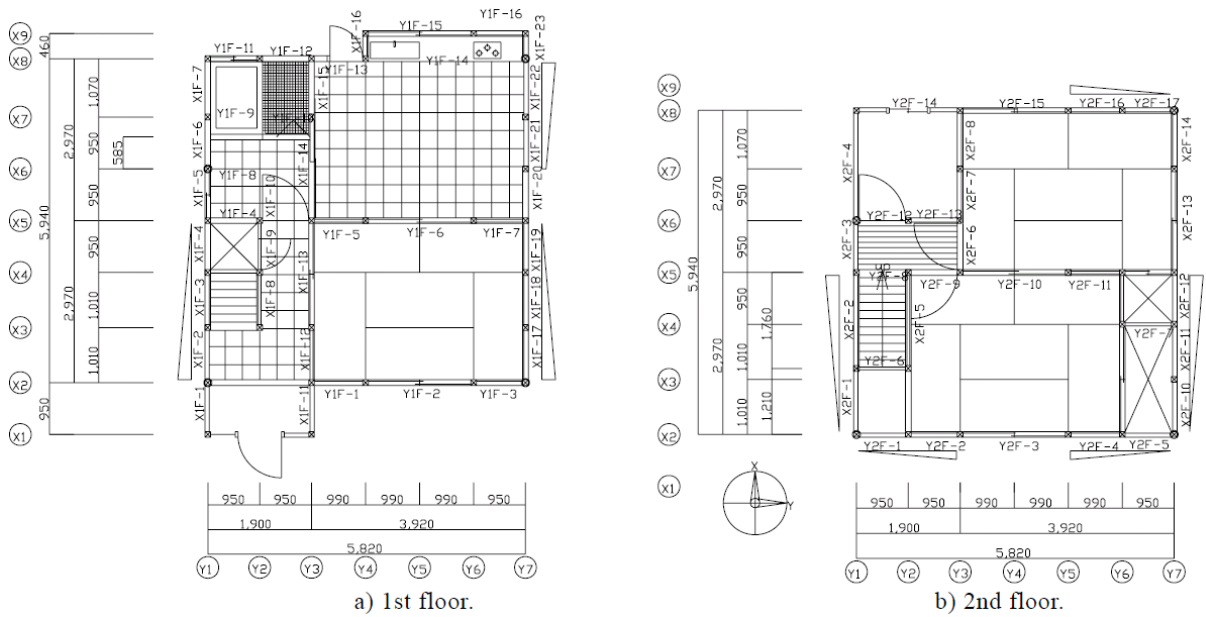


図 3-10 戸建木造住宅モデルの平面図

(2) 木造住宅の評価を行う上での留意点の整理

S造・RC造などの他の構造形式と比較して、木造住宅の常時微動データから評価を行う上での留意点を以下の通り整理し、センサ計画の検討に反映することとした。

- 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。
- 柱梁が多く不静定次数が高い。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。
- 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。
- 剛床の仮定が成り立たないことが多く、多数のセンサが必要となる。

(3) 損傷指標及びセンサの選定

SHMパッケージ「竹」におけるサービス項目「A.推定の対象レベル」は、「全体」及び「層」レベルとなっている。しかし木造住宅の場合は、前述の通り、計測データから構造特性を高精度で推定することが困難であるため「全体」レベルの推定に限定することが現実的と考えられる。また木造建物は他の構造形式と比べ、振動情報に基づくモード振動数などの損傷指標の、湿度や温度に対する依存性が高い。そこで振動以外の環境情報として、温度や湿度の考慮も必要と考えられる。

何を損傷指標とし、損傷指標の評価のためにどのような種類のセンサが必要となるか、次の通り検討した。

表 3-17 戸建木造住宅向け「竹」パッケージ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	スペクトルの重心	全体で1個の加速度センサ ^(※1)
		頂部の傾斜	傾斜計 ^(※2)
	振動以外の環境情報 ^(※3)	温度	温度センサ
		湿度	湿度センサ

(※1) 加速度センサを頂部に1個だけ設置し、スペクトルの重心を測定する。なお、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。

(4) センサ配置計画

「全体レベル」の推定を目的としたセンサ配置計画の検討を行う。

加速度センサの計測方向成分については、水平 2 方向の計測が可能なものを用いる。木造建物の場合、剛床の仮定が困難であることから、必要に応じて平面内に複数の加速度センサが必要である。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組み合わせることで、センサ数を低減することも有効と考えられる。

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組み合わせることで、センサ数を低減することも有効と考えられる。

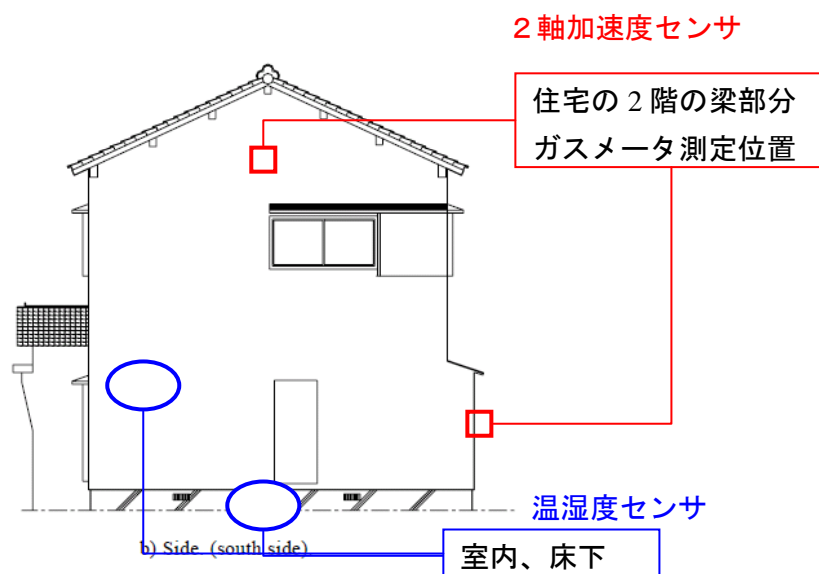


図 3-11 戸建木造住宅向け「竹」パッケージにおけるセンサ配置計画