

技術用語に関する概要説明

(1) ヘルスモニタリング	1
(2) 構造ヘルスマニタリング技術 (SHM : Structural Health Monitoring)	1
(3) 逆解析 (システム同定)	1
(4) 構造物の損傷推定のレベル	2
(5) 目視点検、非破壊検査	3
(6) 構造物の損傷指標	3
(7) 構造物の損傷推定手法	5
(8) 構造ヘルスマニタリングシステム (SHMシステム)	6
(9) SHMシステムのサービスレベル	6

(1) ヘルスモニタリング

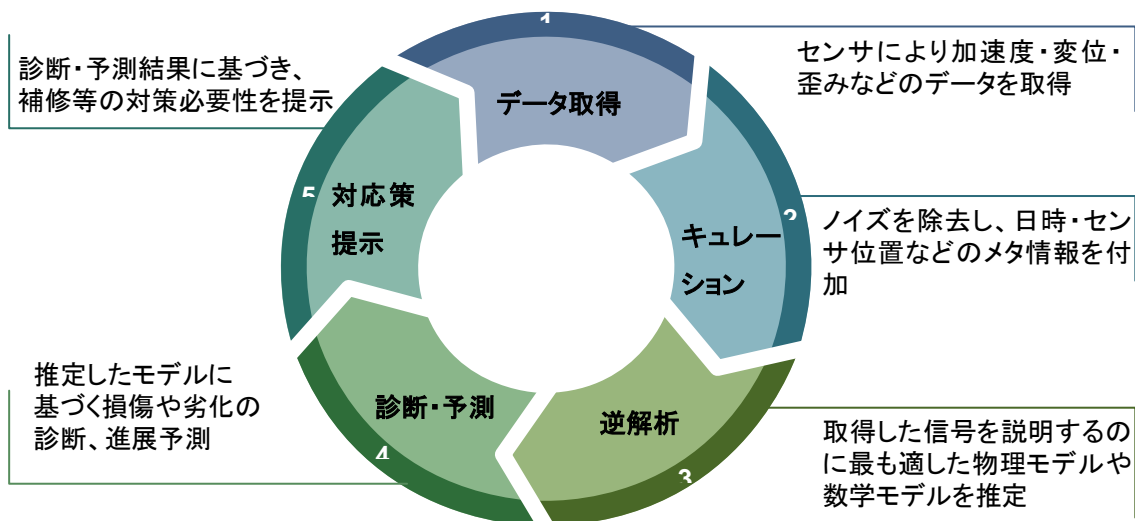
対象物を取り巻く様々な環境情報を取得し、健全性に係る性能を動的に評価・把握すること。

(2) 構造ヘルスマニタリング技術 (SHM : Structural Health Monitoring)

構造物にセンサを設置して振動等の物理量を観測し (センシング)、様々な信号処理手法を駆使して (キュレーション・逆解析)、蓄積された損傷や劣化の発生箇所及び度合いについて動的に診断し、今後の進展状況について予測する技術 (診断・予測)。

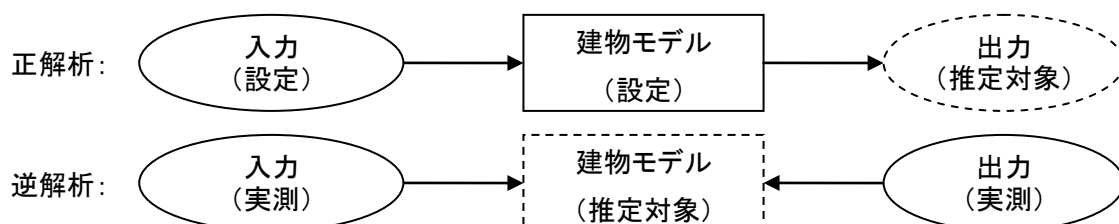
本来的に必要な SHM 技術の構成要素として、下図の通り、①データ取得 (センシング)、②キュレーション (信号処理)、③逆解析 (構造物のモデル推定、システム同定)、④損傷や劣化の診断・予測 (損傷・劣化推定)、⑤建物管理者等に対する補修要否等の対応策提示といった、5つがある。

これまで①～③に関しては多くの方法論が提案されてきたが、未だ実建物への適用事例が少なく、逆解析結果の解釈に関する④・⑤については今後の症例データの蓄積に期待されている。



(3) 逆解析 (システム同定)

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。



SHMにおける逆解析は、実測データに基づく構造物の損傷推定を目的として行う。センサにより計測された振動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し、損傷・劣化状況を把握する。その一般的な手順は次の通り。

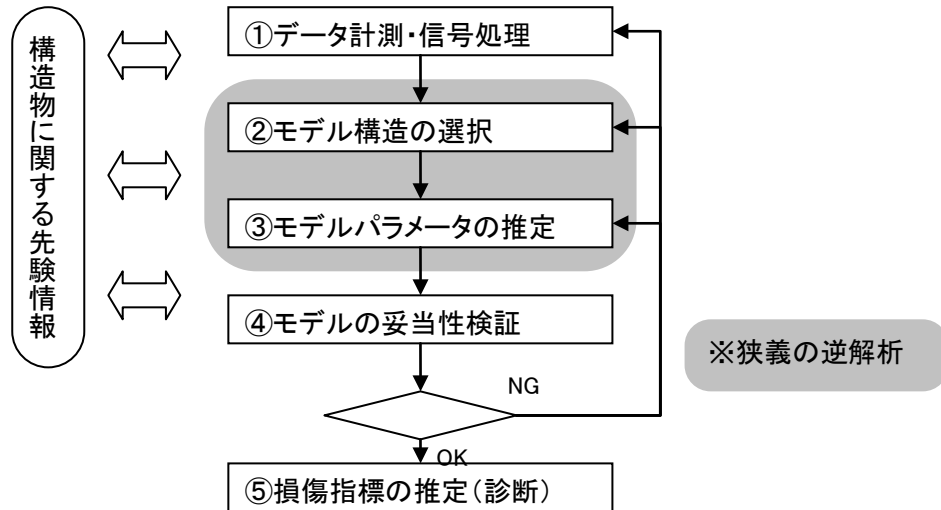


図 SHMにおける逆解析の実施フロー

(4) 構造物の損傷推定のレベル

構造物の損傷推定を行うレベルとして、構造物全体、層、部材、2次部材等、複数の階層が存在する。一般的には、グローバル（全体）からローカル（局所）へと、段階的に絞り込むことが適切と考えられ、今後これらを戦略的に組み合わせて、トータルな損傷推定システムを構築していくことが重要と考えられる。

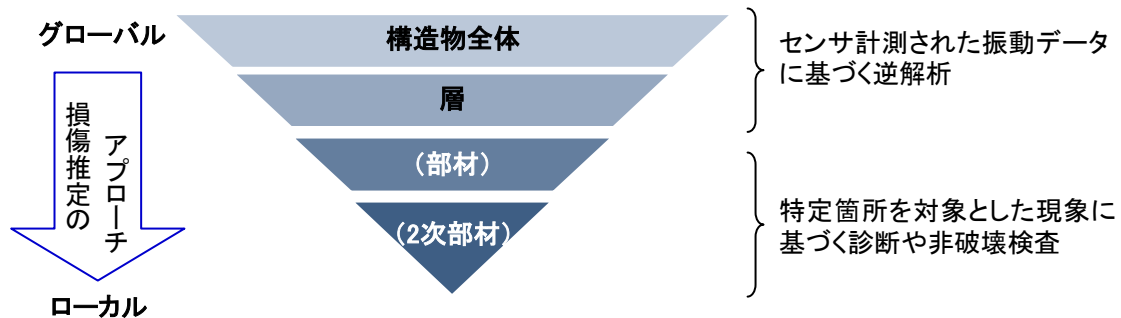


図 損傷推定の段階的アプローチ

ローカルなモニタリングは、部材・2次部材レベルのひび割れ等の現象に基づく損傷検知がメインであり、技術者による目視点検や非破壊検査など、枠組みとしては既に確立されている。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、ローカル損傷検出の限界がある。

これに対しグローバルなモニタリングは、構造物の被覆の有無に関わらず、建物内に比較的少数のセンサを配置することにより、労力をかけずに、構造物の損傷指標を様々な損傷推定手法により推定する。

(5) 目視点検、非破壊検査

構造物には、その使用状況や健康状態及び余寿命を評価し、適切な補修や補強を実施することが求められるが、従来の技術者による目視点検や各種評価手法には、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。

超音波探傷検査やアコースティック・エミッションなどの非破壊検査技術は、外観目視では把握しにくい構造物内部に進展した損傷・劣化状況を推定する点で、SHM との共通点がある。しかし、対象範囲がローカルな特定箇所に限定されること、ワンショットで診断する技術であること、計測機器のオペレーションに人間を介する等の相違点がある。

表 各種評価技術の内容比較

	定期点検	非破壊検査	構造ヘルスマモニタリング
目的	部材や特定箇所の 損傷・劣化把握 (ローカルモニタリング)	部材や特定箇所の 損傷・劣化把握 (ローカルモニタリング)	構造物全体や層レベルの 損傷・劣化把握 (グローバルモニタリング) (ローカルモニタリングへ の展開も可能)
測定方法	人による近接目視 現象に基づく評価	計測機器による 静的・動的計測	センサによる動的計測
測定頻度	定期的 次回点検まで打ち切り	定期的 次回点検まで打ち切り	リアルタイム 継続的・連続的
測定費用	点検要領の作成 技術者の配置・養成	計測機器購入費用 計測要員の配置	システム初期投資 センサ等維持費用
課題	点検頻度の最適化 判定のばらつき抑制 建物内部の状況把握困難 人手の確保、効率化	点検頻度の最適化 設備の停止・再稼働 効率化	費用対効果 膨大なデータの蓄積管理 実構造物による検証

(6) 構造物の損傷指標

建築構造物の性能には、構造性能、耐久性能、設備性能、空間性能など様々な性能がある。構造性能に絞っても、安全性、修復性、使用性等の性能がある。SHM では主に、地震や経年劣化による構造安全性能を、供用期間を通じて目標水準以上に維持管理し続けることを目的としている。

土木分野は建築分野と異なり、公共性が高く、構造が比較的単純であり、常に高いレベルの外力に晒されているため予防保全の必要性が高いこと等から、センサによるモニタリング技術の導入が進んでいる。例えば橋梁やトンネルについては、損傷推定のレベルや要求性能ごとに、性能指標及びモニタリング項目の整理が次のとおり行われている。

表 土木構造物における性能指標とモニタリング項目の例

レベル	要求性能	橋梁		トンネル	
		性能指標	モニタリング項目	性能指標	モニタリング項目
構造物全体	安全性能	剛体安定 風・地震時応答特性	変位・変形 剛性、応力、荷重	剛体安定 地震時応答特性	変位・変形 応力、荷重
	使用性能	— (橋梁の使用性能は部材レベルの性能)		走行性 流水	変位・変形 漏水
	耐久性能	時間経過後の 安全性能	沈下、構造系の変化	時間経過後の各性能	地山の変形 地下水位の変動
部材	安全性能	断面耐力 疲労耐力、じん性	荷重、材料物性 断面諸元	断面耐力	荷重、材料物性 断面諸元
	使用性能	走行性	変位・変形 ひび割れ、ポットホール	走行性 流水	変位・変形 漏水、摩耗
	第三者影響度 に関する性能	剥離、剥落	ひび割れ、浮き	剥離、剥落	ひび割れ、浮き
	耐久性能	時間経過後の各性能	鋼材の腐食、ひび割れ	時間経過後の各性能	鋼材の腐食、ひび割れ
特定箇所	安全性能	断面耐力 ケーブル破断	荷重、材料物性 断面諸元、ケーブル張力	—	—
	使用性能	走行性	ひび割れ、ポットホール	—	—
	第三者影響度 に関する性能	間詰め床版部の 剥離、剥落	ひび割れ、浮き	添加材の落下	ひび割れ、浮き
	耐久性能	時間経過後の各性能	ケーブルの腐食	時間経過後の各性能	コンクリートの鋼材の 腐食、ひび割れ
備考	部材	桁、床版、橋脚、橋台、塔、アンカレッジ、舗装		覆工コンクリート、舗装	
	特定箇所	間詰め床版、支承、複合構造接合部、各種 ケーブル、塔、アンカレッジ		架線、照明、換気等	

建築分野においては、構造物全体及び層レベルの構造安全性能を評価するための損傷指標について、大まかに次の通り整理できる。

表 建築構造物の損傷推定の目的と損傷指標の対応

				(1) 損傷推定の目的			
				構造物全体	層		
				(損傷の有無)	(損傷の位置)	(損傷の程度)	
(2) 損傷指標	モード特性の変化	固有振動数	基本モード	●		●	
			複数モード	●	●	(他技術との組合せによる)	
		モード形状	振幅		●		
			層間変形角		●		
			曲率		●		
	物理パラメータの変化	層剛性			●	●	
		層減衰係数			●	●	
		柔性マトリクス			●	●	
	閾値を超える観測量				● (層間変位等)	(予め特定)	● (構造形式による)
	モデルに基づく予測応答量と観測量との乖離					●	●

例えば構造物全体の損傷有無を把握する目的であれば、主に固有振動数（基本モード）の経時変化や、層間変位の最大値などを損傷指標とする。

層レベルの損傷位置・損傷程度を把握する目的であれば、固有振動数（複数モード）や層剛性などのパラメータの変化を主な損傷指標とする。免震建物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建物であれば、免震層の最大変位が閾値を超えたかどうかを観測することで、層レベルのシンプルな **SHM システム** を構築できる。

なお、損傷指標を推定するために必要となる計測・分析システムは、対象構造物や目標とする **サービスレベル** に応じて異なる。

（7）構造物の損傷推定手法

建築構造物の実測データからモデルに基づく損傷推定手法に関しては、過去多くの研究報告がなされて、次の4つの観点から類型整理される。

①モード特性同定による損傷推定

固有振動数は、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。

層レベルのローカルな損傷推定を行う場合は、各層1個のセンサを設置すれば、高次モードを含めたモード特性情報の変化を利用して、おおまかに損傷発生層を特定することが可能である。

②物理パラメータの直接同定による損傷推定

運動方程式などの先験情報に基づいて物理モデルを構築すると、多項式モデル等とは異なり、物理的意味をもつモデルのパラメータを推定することができる。

物理パラメータの直接同定による損傷推定手法では、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、いかに有意な信号を抽出するかが重要となる。

③モード特性に基づく物理パラメータの段階的同定による損傷推定

前述①②を組合せた考え方で、固有振動数やモード形状などのモード特性に基づき、層剛性などの物理パラメータを段階的に同定するものである。多くの方法が、モード情報と層剛性の間の関係式に基づく。

④ソフトコンピューティングを利用した損傷推定

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出てくる。ニューラルネット等によるソフトコンピューティングを利用した方法は、このような状況でも頑健性を有するとして注目されている。

(8) 構造ヘルスマニタリングシステム (SHM システム)

SHM 技術を構造物に実装し、データの i) 取得、ii) 伝送、iii) 蓄積・管理、iv) 逆解析・情報提供までを一貫して行うシステム。

主に土木構造物に適用されてきた従来の地震観測システムは、測定現場で各種センサにより計測されたデータが、アナログケーブルを介して現場近くの監視室に設置されている収録用サーバに伝送され、データベースが構築される仕組みである。データベースは遠隔地にある監視室からも公衆回線を通じて閲覧することができ、クライアントの要求に応じて、あるいは警報を監視室側から発信するような形で、情報が伝達される。

しかし、長期耐用住宅へのヘルスマニタリングシステムの適用を見据えた場合、従来型のデータ収集・伝送システムには次の課題があると考えられる。

- アナログケーブル、サーバ等の設置・運用において多大なコストを要する。
- センサの耐用年数が数年から 10 年程度と短い。
- 多種類のセンサを高密度に配置・運用するのは非経済的である。
- センサからの微弱な信号を遠方まで伝達させるためには、プリアンプの搭載や十分なノイズ対策が必要となり、センサの小型化が困難である。
- データの量が膨大となる。サンプリング時間間隔を 10 ミリ秒とし複数のセンサを用いた場合、10 分間あたりのデータ容量が数 MB にもなる。
- PC に転送された後の解析段階でも、データ量が多いとセンサ数の増加に伴いデータ処理に時間を要することになる。

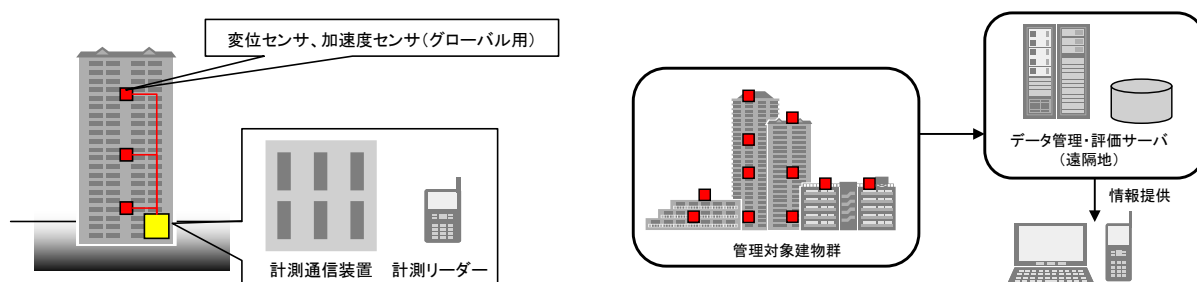


図 SHM システムの実装イメージ

(9) SHM システムのサービスレベル

SHM システムの構築・運用による、ユーザーへの情報提供の品質のこと。構造物の損傷推定のレベル（グローバル／ローカル）、目的（地震時の迅速な被災状況判定／平時の維持管理等）等によって、サービスレベルが決定される。

一般に、センサの種類・数を増やせば増やすほど、SHM システムのサービスレベルは向上すると考えられる。ユーザーから見てサービスレベルは高いに越したことはないが、膨大な数のセンサ情報を参照する SHM システムはコストが増大し、住宅向けの適用・普及に際して非現実的となる場合がある。

そこで、市場性を見据えたサービスレベルの設定と、そのサービスレベルを達成する上で必要となる SHM システムのスペックの整理が重要となる。