

強震観測の応用としての「モニタリング」

杉村義文

(株) NTT ファシリティーズ、主任研究員

1. はじめに

強震観測の応用としての「構造ヘルスマニタリング」がここ数年で急速に普及している。強震観測と構造ヘルスマニタリングは手法において共通点を持ち、目的において相違点を持つ[1,2]。共通点は、建物に取り付けたセンサでその挙動を観測すること、相違点は、前者が、構造物の地震時挙動を把握すること、後者は、地震時の挙動に関係なく、地震後の構造物の状態を把握することである。構造ヘルスマニタリングは、1990年代より研究が盛んになったものの、当初は、いくつかの課題の存在によりあまり普及が進まなかった。しかし、ここ数年、ニーズの高まりを受けて、急速に導入事例が増加している[3]。

本稿では、近年の構造ヘルスマニタリングのニーズの高まりの背景、続いて、モニタリングシステムの普及の状況、システムの導入・運用事例とデータ活用事例、最後に普及段階に入った本技術の抱える課題について述べる。なお、本来幅広い意味を有する「モニタリング」という言葉について、本稿では、「地震動を受けた建物の健全性評価およびそのための観測」という意味で使用する。

2. 東日本大震災において顕在化した構造ヘルスマニタリングのニーズ

2.1 東日本大震災にて発生した問題

東日本大震災では、主要な交通機関がマヒし、首都圏において大量の帰宅困難者が発生した。帰宅困難者が路上に滞留すると、火災や落下物による2次災害が懸念される。建物に目を向けると、入居者から建物所有者あるいは管理者に安全性の問い合わせが多発し、余震による災害を防止するために、建物が被害を受けていないか早急に判断する必要が生じた。さらに、建物をそのまま恒久的に使用してよいか、それとも補強が必要なのか、判断を迫られた。

2.2 行政の主な動き

そこで、東京都は2013年4月に「帰宅困難者対策条例」を施行し、条例およびそのガイドラインにおいて、建物に留まることが可能かどうかを地震後数時間で事業者が判断することを求めている。安全性が確認された場合は、従業者に対して当施設内での待機を指示し、一斉帰宅を抑制するよう、事業者に努力義務を課している。ここで、施設の安全性は、チェックシートを用いた目視調査にて実施することとなっている。

続いて、内閣府は2015年2月に「大規模地震発生直後における施設管理者等による建物の緊急点検に係る指針」、「大規模地震の発生に伴う帰宅困難者対策ガイドライン」を公表

している。カルテ、チェックシートを活用して、建物管理者が緊急かつ応急的に建物使用可否を短時間で判断するための体制整備、安全性確認方法を示している。

さらに、国土交通省は2018年5月に「防災拠点等となる建築物等に係る機能継続ガイドライン」を公表している。平成28年熊本地震においては、構造躯体の損傷、非構造部材の落下等により、倒壊に至らないまでも、地震後の機能継続が困難となった事例が多く見られたため、本ガイドラインは、防災拠点等となる建築物が大地震に見舞われた場合に、倒壊・崩壊を防止するだけでなく、機能継続を図るにあたり、建築主、設計者、管理者がそれぞれの立場で実施すべき事項を示している。

2.3 既存の危険度判定手法と課題

一方、大地震後の建物の危険度判定には、二次災害防止を主目的とする応急危険度判定[4]、継続使用・補修の判断のための被災度区分判定[5]という仕組みが既に存在している。ここで地震発生直後に注目すると、国および地方公共団体は自ら所有する被災建築物に対する応急危険度判定を速やかに行うことが定められており、これら実施主体からの要請により応急危険度判定士（以下、判定士）がボランティアで現地調査、判定を実施する。調査は、全国統一基準の調査表を用いて実施し、「危険」、「要注意」、「調査済」の3段階で判定される。阪神淡路大震災の前より運用されている本仕組みは、現在、全国に10万人を超える判定士の登録者を抱え[6]、一定の成果を上げているのは間違いないが、課題もいくつか指摘されている。そのひとつは、判定士の確保である[7]。災害時の交通手段や連絡手段の確保が必要とされているが、それにも増して、実際に判定業務に従事できる判定士が不足すると思われる。判定士自身、所属している組織の災害対応も重要な業務であり、ボランティア活動に十分に時間を割けるとは限らない。また、民間の建物でも同様の調査が任意に行われることとなる。その際に必要とされる建築構造の専門技術者は、被災地域が広範で、特に大都市が地震に襲われた場合、調査対象の建物数が膨大となるため、数が絶対的に不足すると言われている。このような人的リソース不足に加え、例えば鉄骨造建物では構造躯体が内装や耐火被覆等により覆われているため目視確認が事実上困難であること、高層建物の被災度評価に適用可能な基準等がないこと[8]、地震時の建物の応答がわからず判断の材料が少ないことなどから、大震災時の建物の危険度判定の対応が遅れる可能性が高い。

2.4 構造ヘルスマニタリングシステムへの期待

このような状況に対し、建物にセンサを設置して、地震時の挙動を計測し、建物の安全性・被災度を推定する構造ヘルスマニタリングシステムへのニーズが高まっている。当システムの導入により、専門家による調査を待たずとも、直ちに建物を継続して使用することが可能かどうかを、システムの判定結果を参考にして判断することが可能となる。前述の内閣府の指針、国土交通省のガイドラインにおいても同様のシステムの導入を建物の安全性の点検上、有効な手段の一つとして挙げている。実は、同様のシステムは東日本大震災以前の2000年代後半より、首都圏エリアを中心に一部の超高層・高層オフィスビルに導入されており、本震災でも成果を上げたことで注目されるようになった[例えば9]。この時は、地震直後の判定結果により全館避難必要なしと判断できた（その後に被害状況を建築に詳しいものを含めた数人で館内点検したとのこと）。そして、最近では、建物の構造設計者の間において、構造ヘルスマニタリングは広く認識されており、超高層・高層ビルや防災拠点ビルの設計段階では当然のようにシステムを盛り込んでいる。また、多くのディベロッパは、本システムの導入をBCP対策の一つとして採用している。

3. 急速に普及している現状

3.1 最近普及しているシステム

こうして急速に普及している構造ヘルスマモニタリングだが、その研究は1990年代より盛んになされており[例えば 10-16]、従来は、システム同定手法により固有周期や減衰などのモーダルパラメータや剛性などの物理パラメータを同定した上で、これらの変化から損傷を推定する方法が中心であった。そこでは、損傷の有無とその程度を、推定した指標からどう判断するかが課題として存在した。判定手法の一分類を図1に示す。分類の方法として、損傷評価の対象の大きさより、建物全体としたものから、層、部材、材料に分けることができる[17]。また、推定する指標を固有周期や層剛性のような「特性」としたものと、建物の地震時の変形量のような「応答」としたものに分けられる[18]。そして、最近実用化されているものは、加速度記録から層間変形角を算出し、基準値と比較して被災度を判定する、というものが大半であり、分類でいえば左上の領域、建物全体あるいは層レベルの「応答モニタリング」に位置付けられる。地震時の建物の変形が設計値（応答あるいはクライテリア）を超過しないことを確認するという意味で、構造設計の考え方と整合し、実務者（構造設計者）に理解されやすい、というのが普及の要因の一つであろう。また、普及のきっかけは低コスト化も寄与していると思われる。特にセンサについては、MEMSセンサの出現により、従来の加速度計に比べると、微小振幅時のノイズは大きいものの、大地震時の計測性能は、実用上、つまり建物の変形量を算出する上では、十分な精度を有する[19]ものが低コストで入手できるような状況にある。

3.2 普及の状況

ここでは、筆者が調査した構造ヘルスマモニタリングシステムの普及状況について述べる。情報源は、システムを提供している主な事業者である、研究機関、エンジニアリングサービス企業、設計事務所、ゼネコン、インフラ関連企業等に対するヒアリング、インターネット公開情報、シンポジウム講演内容等である。ヒアリングは、強震観測小委員会の委員の方々に対する自身が所属する組織に関するもの、および、特に導入実績数が多いと思われる一部の事業者に対する個別のヒアリングからなり、学会での話題提供という主旨に理解をいただき、可能な範囲で情報提供いただいた。主な調査項目は、これまでの導入実績数と、導入した建物の傾向についてである。なお、戸建住宅向けのシステムは含めていない。調査の結果、これまで累積で少なくとも850棟以上に導入されているようである（2018.10末時点）。導入時期の推移（イメージ）について図2に示す。2000年代後半から導入され、東日本大震災後のニーズの高まりを経て、2015年あたりから急激に増加してい

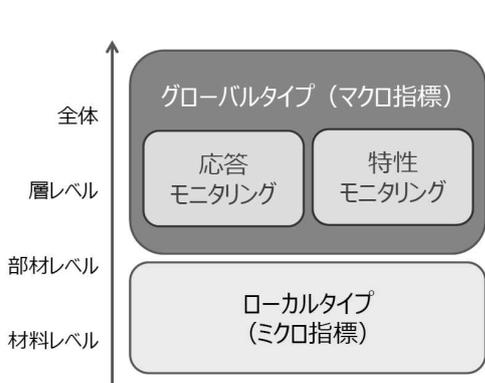


図1 判定手法の一分類

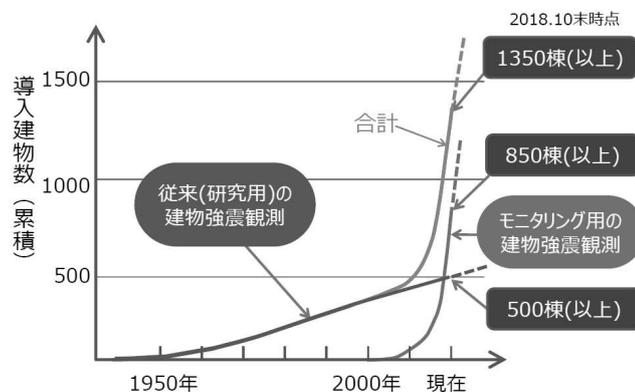


図2 建物強震観測の普及のイメージ

るようである。図 2 にはモニタリング用の建物強震観測に加えて、従来の研究用の建物強震観測も示している。使用しているセンサなどシステムが異なるため、単純比較するものではないが、後者の実績数は約 500 棟とされており[20,21]、設置数だけでみるとここ数年の増加でモニタリング用の建物強震観測の方が多数派となっている。ただし、後者は主に投稿論文の情報に基づいた調査であり、投稿されていないものは観測していても含まれていない可能性があるため、実際にはもっと多いと思われる。

続いて、導入建物の傾向の比較（ヒアリングに基づく推測）を表 1 に示す。構造ヘルスマニタリングシステムは当初、超高層・高層オフィスビルへの導入が進められてきた経緯がある。したがって、地域分布を見ると、従来の建物強震観測では、関東エリアに次いで、北海道・東北、東海エリアが多くなっている（それ以外は大きな地震が少なくまだ公開されていない可能性はある）が、構造ヘルスマニタリングでは、関東が大半で、関西、東海エリアが次ぐ。これは、経済活動の活発さ、およびそれに伴うニーズの多さに起因すると思われる。階数分布、主要構造、建物用途は、当初の経緯から、超高層・高層の鉄骨造のオフィスビルが中心であり数的には多いが、それらに限らない防災拠点ビルや建物所有者にとって BCP 対策を進めたいビルへの適用も増加し、近年、多様化が進んでいる。耐震・制振・免震の区別については、免震建物、制振建物の挙動把握を目的にしたものも多い従来の建物強震観測に比べると、耐震建物の比率が多く、免震建物の比率は少ないと思われる。導入建物の傾向ではないが、使用しているセンサの種類は、構造ヘルスマニタリングでは MEMS などの低コストセンサが主力であり、従来型の建物強震観測との決定的な違いはここにあるだろう。

表 1 地震観測導入建物の傾向の比較（ヒアリングに基づく推測）

項目	従来の建物強震観測	モニタリング用の建物強震観測
地域分布	全国に設置、関東が半数近く、北海道・東北、東海が次ぐ	全国に設置、関東が大半、関西、東海が次ぐ
階数分布	10 階以下が 3/4 近くを占める	当初は超高層・高層が多かったが、近年、低層・中層にも展開
主要構造種別	RC 造・SRC 造が 6 割、S 造が 2 割、その他は混合や木造など	当初は S 造が多かったが、近年、RC 造・SRC 造にも展開
建物用途	学校施設、公共施設、ライフライン施設、住宅など多様	当初はオフィスビル中心であったが、近年、商業施設、集合住宅（寮）、物流倉庫、データセンターなど多様
耐震・制振・免震の区分	免震・制振が 1/3	当初は制振が多かったが、近年、耐震も増加、免震は少ない
旧耐震・新耐震の区分	—	新耐震建物中心
（参考）センサの種類	加速度計（従来型）が 3/5、MEMS など簡易センサ 1 割、速度計もあり	MEMS などの低コストセンサが主力

4. 事例紹介

本章では、実際に構造ヘルスマニタリングシステムを導入・運用している事例、および構造ヘルスマニタリングシステムで得られた地震観測記録を活用した研究事例を示す。

4.1 大阪府北部の地震での運用事例

ここでは、2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震（マグニチュード6.1、最大震度6弱）の時の大阪市内のオフィスビルの事例を取り上げる。建物は、大阪市中央区に建ち、1993年竣工、地下2階、地上14階、延床面積約19,100㎡、軒高約60m、地下SRC造耐震壁付ラーメン構造、地上S造純ラーメン構造の事務室用途の建物である。本ビルには図3に示すように、構造ヘルスマニタリングシステムが導入されている[22]。MEMS加速度センサを建物各階に設置、記録・分析を行う収録装置を1階の中央管理室に設置し、それらをUTPケーブル（LANケーブル）にて接続している。収録装置は、外部通信のネットワークと接続し、地震発生後、メールサーバを介してあらかじめ登録している関係者に判定結果のメールが届くようになっている。大阪府北部の地震時に配信されたメールを図4に示す。建物1階における震度が5弱相当であること、建物の層間変形角は最大で1/639であり、事前に設定されていた基準値と比較することで判定結果が「安全」であることがわかる。メールに添付されている判定結果レポートを図5に示す。判定結果レポートは、一般ユーザー向けの簡略なレポート（図5上）と、専門家向けの若干詳細なレポート（図5下）が用意されている。簡略なレポートは、判定結果が一目でわかるような構成とし、詳細なレポートでは、各階の震度（相当値）、最大加速度、最大層間変形角を確認できる。実際に、本ビルでは、現地の大阪のビル管理担当者および東京の災害対応メンバーにメールが送付された。当日は、現地のメンバーはもっと震源に近い他のビルを含めた被災状況の情報収集に追われたが、遠隔地にいる東京の災害対応メンバーは、発生直後にメールの内容を確認

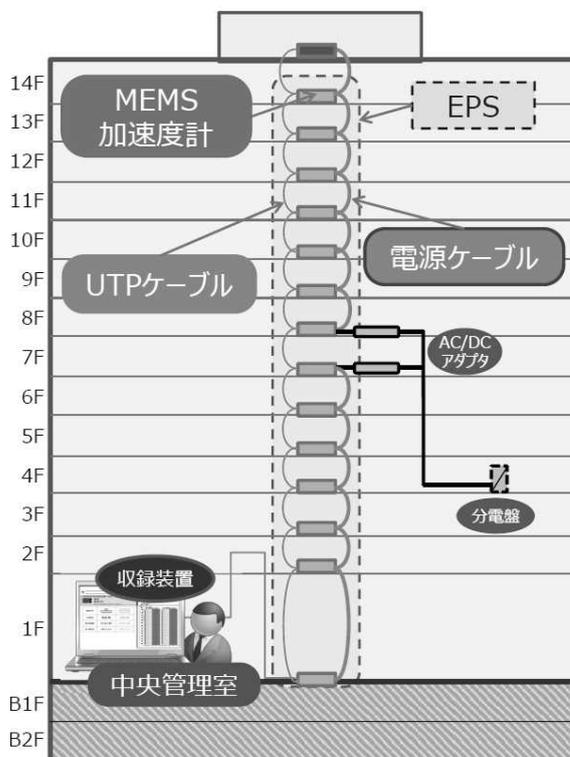


図3 システム構成

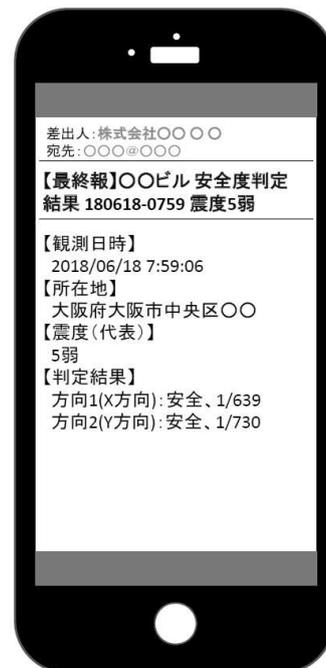


図4 配信メール

認し、判定結果が「安全」であり、かつ層間変形角も 1/500 以下とさほど大きくなかったため、詳細な調査は不要と判断できた。客観的な情報を元に詳細な調査を省略できたことで、導入の意義があったようである。なお、災害対応メンバーには、建築構造の専門家ではない者も含まれるが、事前に運用方法を議論していたこともあり、判定結果のみならず専門的な理解力を要する層間変形角の意味と程度を元にして、行動を決定することができた。システム導入と合わせて、運用ルールの策定とその理解が重要であると言える。

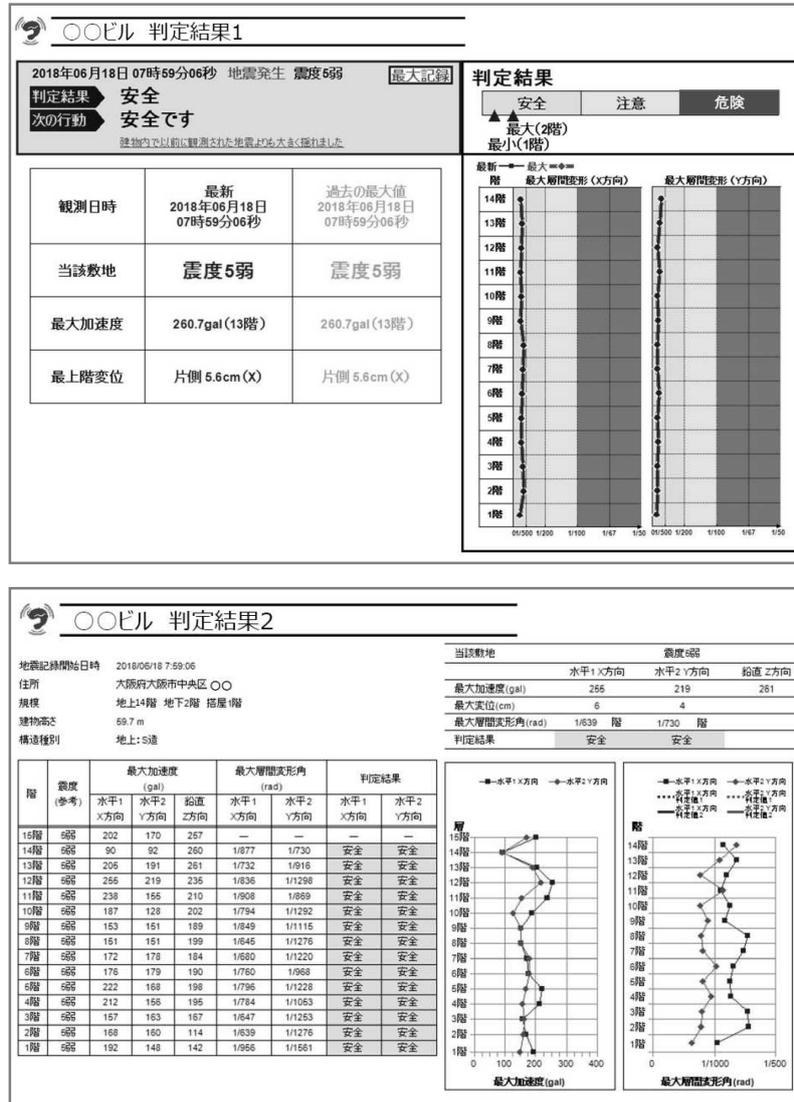


図5 判定結果レポート

4.2 観測データの活用事例

本来、地震直後の構造の状態を把握することを目的に導入したモニタリング用システムから数多くの記録が得られることがある。神田、日下、小笠原らは、得られた多数の中小地震の記録を活用して、強震観測の目的さながら構造物の地震時挙動を把握すべく、地震動の建物への入力損失に関する研究を報告している[23]。建物内に設置したセンサによる地震観測記録は貴重なデータであり、非常に有意義な活用例と言える。

5. 解決された課題と残されている課題

5.1 課題の振り返り

構造ヘルスマモニタリングの普及に向けた課題について、これまでの建築学会大会 PD、シンポジウム等にて中村氏が述べている[1,2]。今からおよそ 10 年前の 2006 年の大会 PD、2008 年の第 5 回強震観測データの活用に関するシンポジウムで示された課題は、①損傷指標とその定量的検証（さらに、「損傷を定量的に評価する指標に関する知見不足」、「実構造物における手法の検証不足」の二つの課題にわけられる）、②建物エンドユーザーの関心の低さ（建物エンドユーザーに対する専門家からの説明不足）、③モニタリング結果の所有権の問題といった社会的課題（観測結果の所有性、公表性に関わる課題）、④低コスト化（システムコストだけでなく、設置コスト、維持管理コストも含めた全体コストの低減）である。そして、2016 年の大会 PD での中村氏自身の振り返りでは、①については、層間変形を指標とする実用的なシステムの事例が増えてきているものの、損傷そのものを指標化しその指標を定量的に説明している訳ではないという点でまだ課題が残っている、②については、東日本大震災をきっかけに解消していると言える、③については、想定したほど抵抗になっていない、としている。

ここからは、別の視点で見てみる。①について、現在普及しているシステムは、損傷指標として主に建物の変形を採用し、損傷との関係については建物の構造設計の考え方に依存している。従来から続く高度な研究の成果を活用して精度を高めることは可能であり、その部分はまだ改善の余地があると感じる。また、②については、エンドユーザー側の関心は解決したようだが、専門家からの説明には課題が残っていると感じる。エンドユーザーに対して、本システムが“できること”について十分に説明を行う必要がある。これらの重要な 2 件については、次節でさらに詳しく述べる。③については同感である。④については、センサの低コスト化が全体コストの低減、ひいてはシステムの普及に寄与しているのは間違いないが、それにも増して低コスト化の裏返しとも言える得られる利益（効果）の高まりが普及に大きく寄与していると感じる。冒頭で述べたように構造ヘルスマモニタリングは、システムを導入した実施者が直接的にメリットを享受できる。オフィスビルのテナントの入居継続、工場や商業施設の事業継続など、構造ヘルスマモニタリングから得られる可能性のある価値は、その導入コストを大幅に上回る場合がある。このように費用対効果の“効果”の部分にスポットがあたったことにより普及が進んでいると捉えることもできる。今後は、エンドユーザーの期待にさらに応えるために、過去から続く研究開発を継続し、あるいは新たなセンシング技術を活用するなどして、本システムにとっての“要”である判定精度の向上に取り組み続ける必要がある。

5.2 普及段階を迎えて気を付けるべきこと、残されている課題

(1) エンドユーザーへの説明および表現

構造ヘルスマモニタリングシステムに対するエンドユーザーの関心は高まり、普及が進んでいるが、気を付けないといけないこととして、エンドユーザーへの専門家からのしつかりとした説明と表現が挙げられる。すなわち、システムは、例えば「安全」、「要注意」、「危険」あるいは、「無被害」、「損傷の可能性あり」、「倒壊の可能性あり」といった判定結果を出力するが、これらは確定的な情報ではないということと、複数の意味を持ち得るということである。これは、本システムだけの問題ではなく、専門技術者による判定であっても同様の問題があるが、根本的な原因は、建物の構造安全性に関わる様々な余裕およびばらつきが存在である。具体的には、設計段階、施工段階の余裕度などであり、通常、全ての

部材を許容値ぎりぎりには設計せず、施工時の材料の強度は決められた下限値を上回るように製造される。そのことで、建物の耐震性能は設計時のものよりも結果的に余力を持つ。ただし、それを厳密に把握することは実質的に不可能である。したがって、構造設計の考え方に依存したこのような方法をもって損傷を完全な精度で評価することも不可能であり、判定結果と実被害にも乖離が生じる。図 6 に建物の損傷の発生とモニタリングシステムの判定の関係を示す。あくまでイメージではあるが、建物毎の余裕度・ばらつきの違いの影響で、応答や外力が 1 次設計や 2 次設計などのそれぞれの状態を超過しても全ての建物が一様に「一部損傷」や「倒壊・崩壊」を起こすわけではなく、応答や外力の上昇に伴い、徐々に発生確率が高まると考えられる。このことは建築構造の専門家にとっては当然のことだと思うが、それゆえ、意識から薄れて説明することを忘れがちである。エンドユーザーは専門家ではないことを忘れてはならない。さらに、システムの判定結果である「安全」、「要注意」、「危険」、あるいは「無被害」、「損傷の可能性あり」、「倒壊の可能性あり」が何を意味するのか、構造物の状態を意味するのか、それとも入居者が取るべき行動を意味するのか、あるいは両方を含むものなのか、導入したシステムをエンドユーザーがスムーズに運用するために、導入時、運用中ともに導入側が正しく認識する必要があり、提供側はそれを正確に伝える必要がある。同じ構造物の状態でも異なった行動を選択することもあり得るが、例えば参考文献[24]では、「安全」、「要注意」、「危険」はそれぞれ、「軽微損傷以下、継続使用可能、退避不要」、「健全度低下、塑性化しているが軽微な損傷、余震を考慮しても建物崩壊の危険性はなし、避難検討」、「余震により崩壊の危険性有り、避難」としている。そして、基準値（図 6 中の安全・要注意・危険のしきい値）をどう選択するか、人命優先で最も安全側の選択をとるのであれば、ケース 1 がよいと思われ、自社のオフィスビルや工場など一旦避難することにさほど抵抗がない場合は容易に適用できると思われる。なお、本サービスを提供する側の事情としても、危険の恐れのあるものを「安全」と評価することに技術者として強い抵抗を持つため、この選択が選ばれることもある。一方、平均的な判定精度を高めたいのであれば、ケース 2 を選択するかもしれない。さらに、テナ

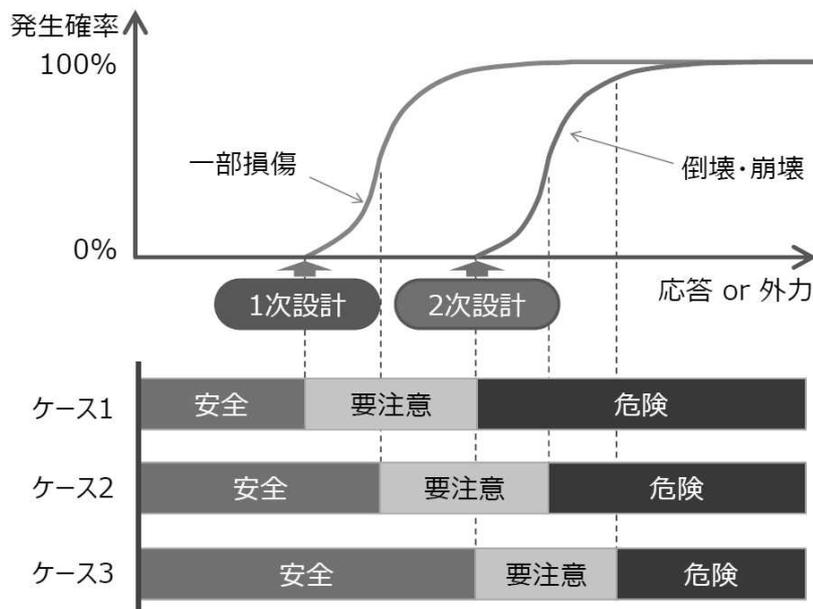


図 6 建物の損傷の発生とシステムの判定結果の関係のイメージ

ントが入居するオフィスビルでは不必要に避難の指示を出すことを極力避けたいというエンドユーザー側の意識も作用するため、ケース 3 を選択することも考えられる。ここで重要なことは、どのような選択をしたとしても、判定には前述のような不確定な要素が含まれていること、具体的には、危険な状態であっても「要注意」との判定にとどまる恐れがあること、あるいは、安全な状態であっても「危険」と判定する可能性があることをエンドユーザーにしっかりと説明することである。そして、判定と実被害の乖離が存在する可能性があるため、本システムは建物所有者あるいは管理者の継続使用に係る意思決定を支援する目的で導入するもの、意思決定に有用な客観的な情報を提示するものであり、最終的に判断するのは”ひと”であることを利用者に十分に伝える必要がある。なお、利用者側であるディベロッパが自ら判定の表示方法と運用とをセットで検討した事例がある[25]。運用に合わせた設定・表示がなされており、今後、設定の妥当性が検証され、エンドユーザーとしての納得性が高まると思われる。

(2) 判定の精度の向上

前項で述べたように建物の持つ構造安全性の様々な余裕度、ばらつきが存在する限界があるとは言え、エンドユーザーの要求に応じるために判定精度を高めることがよいとは言ってもない。そのためには、まずは既存のシステムで地震記録が取れた際の判定の精度検証が重要である。さらに、過去および将来の耐震性能に関する研究との関連が重要である。現在普及しているシステムは、図 1 に示した分類の左上の領域であるが、既に述べたようにそれ以外の領域の研究も古くから進められている。例えば、野口らは、光ファイバーセンサーを用いて鉄骨梁のひずみ計測の可能性と課題について述べている[26]。また、家らは、RC 造の柱梁、耐震壁のひび割れをカメラで撮影した画像を用いて分析するシステムを開発している[27]。強震観測から得られた記録及びその他の方法から得られた記録を図 7 に示すように組み合わせることで判定精度を高めることが可能ではないか、と考える。

ここでは、判定精度の向上に関わる筆者らの取り組みを二つ紹介する。一つ目は、多角的な視点からの判定である。普段、建築構造技術者は、地震が発生し、ある建物で地震記録が得られた場合、まずは入力地震動の応答スペクトルを求め、建物の固有周期との交点から、建物に作用したであろう地震力の大きさを把握して、損傷の有無を推測することができる。さらには、図 8 のように各階の加速度記録を元に各階の層せん断力を算出し、層間変形角との関係を描くことで、塑性化の状況、エネルギーの吸収状況を知ることができる[28,29] (図 8 では縦軸を加速度としているが質量を乗じることで層せん断力に変換)。そして、図 9 に示すように、層間変形角と入力地震動のスペクトル (建物上下階で地震記録が得られているため、地震時の実際の周期も把握でき、建物に作用したであろう地震力の大きさをピンポイントで把握可能)、建物の吸収エネルギーを組み合わせることにより、層間変形角のみを用いた場合よりも、高精度に判定できる可能性がある。複数の間接指標からどのような判定結果を出力するかは、実際の強震観測記録による検証を経て説得力が増すが、建物が大きく損傷するような記録は現時点では限られているため、当面、E-Defense の建物崩壊実験のデータや、数値解析シミュレーションのデータを用いることも考えられる。この方法は、システム化・自動化が容易であり、実現性が高い。

二つ目は、振動解析と観測記録の連携である。通常、設計用の振動解析モデルは実物との乖離が必ず存在する。設計は安全性を確保するのが目的であるため、乖離そのものは受け入れている (そうせざるを得ない)。一方、実際の損傷を把握しようとなると、少なくとも実物と乖離したモデルでは正確な判断は困難である。時刻歴応答解析の応答値やそのス

ペクトル解析等を通じ振動解析モデルを調整することで、観測記録と整合した解析を行うことが可能となる。図10は東日本大震災の際の仙台市内の超高層ビルの屋上階の変位について、地震観測記録と立体フレームモデルによる振動解析の結果を比較したものである[30]。調整方法は無限に存在するため、観測記録との整合は、実現象の再現のための必要条件ではないが、少なくともその振動解析結果から得られる、例えば、大梁や柱の負担力、塑性化の状況は、乖離しているもの比べると信頼性が高いと考えられる。これらの結果から部材レベルで損傷を把握することも可能である。解析モデルの調整方法、調整の解釈、その扱いについては検討する必要があるが、システム化・自動化は、若干ハードルが高くなるものの可能である。いずれの方法も、実務的発想であり、既往の理論的で高度な研究に比べると独自性は少ないかもしれないが、判定精度を高める工夫のひとつとして有効であろう。あるいは、設計の考え方には依らないもっと別の方法を組み合わせることで判定精度を格段に高められる可能性があると考えられる。

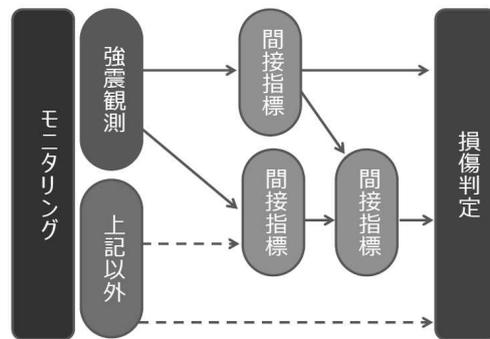


図7 指標化と損傷把握概念図

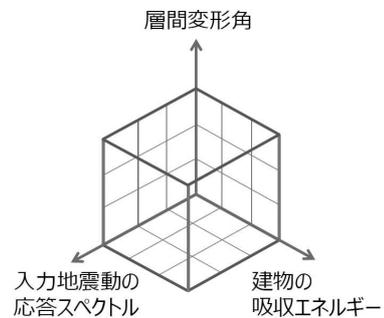
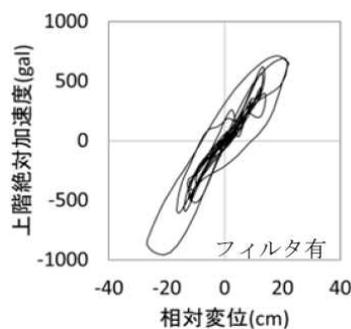


図8 絶対加速度－相対変位関係 (参考文献[28]より)

図9 複数の指標を組み合わせ例

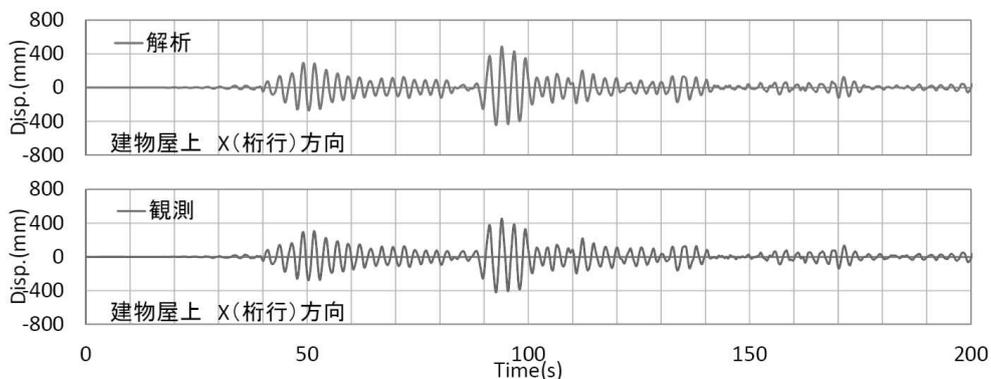


図10 観測と解析の変位時刻歴応答の比較 (参考文献[30]の図より作成)

6. まとめ

近年の構造ヘルスマモニタリングのニーズの高まりの背景、同システムの普及の状況、導入・運用および活用事例、本システム普及に向けた解決された課題と残された課題について述べた。エンドユーザーへの説明、判定精度の向上という重要な課題が残されているが、同様のシステムは急激に普及しており、導入実績は当面増え続けると思われる。そのことが、本分野の研究の推進、本システムの精度向上にもつながり、さらなるニーズの向上とシステムの普及という、いい循環を生み、強震観測の普及、そのデータ活用を通じた建築物・都市の地震災害軽減に寄与することに期待する。

参考文献

- [1] 中村充：構造ヘルスマモニタリングと地震観測，建築物の地震時挙動を知るためにー建築物における強震観測の意義ー，2006 年度日本建築学会大会 構造部門（振動）パネルディスカッション資料，pp.9-16，2006.9
- [2] 中村充：強震観測とモニタリングの共通点・相違点，将来の大地震に備える強震観測とモニタリング，2016 年度日本建築学会大会 構造部門（振動）パネルディスカッション資料，pp.4-12，2016.8
- [3] 日本建築学会：構造委員会 振動運営委員会 建物健全性モニタリング小委員会主催シンポジウム「建物の構造・機能評価に関するモニタリング技術の現状」資料，2017.2
- [4] 日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998
- [5] 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2015
- [6] URL：<http://www.kenchiku-bosai.or.jp/assoc/oq-index/>（一般財団法人日本建築防災協会 全国被災建築物応急危険度判定協議会 HP）
- [7] URL：<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/39739.pdf>（宮城県 HP 被災建築物応急危険度判定の実施実績について，平成 23 年東北地方太平洋沖地震における応急危険度判定について）
- [8] 鈴木芳隆，小鹿紀英，高橋元美：高層建物に対する震災後被災度評価の現状と課題，鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術，2017 年度日本建築学会大会 構造部門（鋼構造）パネルディスカッション資料，pp.14-21，2017.9
- [9] 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対応策，2014.10
- [10] 斎藤知生：モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定，日本建築学会構造系論文集，第 508 号，pp.47-54，1998.6
- [11] 中村充，安井譲：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会構造系論文集，第 517 号，pp.61-68，1999.3
- [12] 演本卓司，森田高市，勅使川原正臣：複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第 560 号，pp.93-100，2002.10
- [13] 楠浩一，勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法，日本建築学会構造系論文集，第 569 号，pp.119-126，2003.7
- [14] 中村充，柳瀬高仁，池ヶ谷靖，圓幸史朗，米山健一郎：構造物のヘルスマモニタリングを目指したスマート加速度センサの開発，日本建築学会技術報告集，第 14 巻，第 27 号，pp.153-158，2008.6
- [15] 白石理人，森井雄史，岡田敬一，杉本浩一，佐藤俊明，倉田真宏，飛田潤：多点高密度配置した振動センサと部分構造の出力誤差による局所損傷検出 多点同期計測シス

- テムの構築と鉄骨造高層建物の大型振動台実験への適用, 日本建築学会構造系論文集, 第 736 号, pp.801-811, 2017.6
- [16] 山田有孝: わが家の地震健康診断ー地震時のリアルタイムモニタリングー, 日本建築学会 情報システム技術委員会 スマート建築モニタリング応用小委員会主催「IoT スマート建築と知的環境シンポジウム」資料, pp.56-63, 2017.5
- [17] 伊山潤: 鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術の確立に向けて, 鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術, 2017 年度日本建築学会大会 構造部門 (鋼構造) パネルディスカッション資料, pp.1-7, 2017.9
- [18] 白石理人, 森井雄史, 岡田敬一: 高層建物の振動台実験へのモニタリング技術の適用事例, 鋼構造建物の震災後被災度評価・損傷評価技術, 2017 年度日本建築学会大会 構造部門 (鋼構造) パネルディスカッション資料, pp.22-29, 2017.9
- [19] 仲野健一, 小阪宏之, 山本健史, 鹿嶋俊英: MEMS センサを搭載した計測デバイスの性能評価と 6 階建木造実験住宅における強震観測の実施, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, 2018.12
- [20] 片岡俊一, 境茂樹, 栗田勝実, 神原浩, 山村一繁, 安井健治: 建築物における強震観測の現状調査, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 32 号, pp.87-90, 2010.2.
- [21] 飛田潤, 鹿嶋俊英, 中村充, 植竹富一, 山村一繁, 栗田勝美, 神原浩: 国内の強震観測建物台帳の作成, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻, 第 46 号, pp.901-904, 2014.10
- [22] 吉田献一, 松下剛史, 西井宏安, 後藤和弘: リジリエンスの向上を目指した構造ヘルスマモニタリング技術開発 (その 1) システム概要と層間変位算出精度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.93-94, 2014.9
- [23] 神田克久, 日下彰宏, 小笠原さおり: 安全性判定のためのモニタリングシステムの実建物への適用と観測データ活用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1119-1120, 2017.7
- [24] 文部科学省 都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト 都市機能の維持・回復のための調査・研究: 健全度判定システムを用いた地震時の建物の管理マニュアル作成指針 (案), 2017.3
- [25] 内田篤志, 谷沢弘容, 高野陽介, 伏見晋悟, 井口真吾: 構造ヘルスマモニタリングシステムの被災度区分判定の閾値に関する考察 (その 1) 構造ヘルスマモニタリングシステムと被災度区分判定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.119-120, 2018.9
- [26] 野口和也, 松島由到, 諏訪田晴彦, 勅使川原正臣: 高知能建築構造システムの開発に関する日米共同構造実験研究 (その 7) 光ファイバーセンサーによる歪み分布測定基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.531-532, 1999.7
- [27] 家哲也, 井野昭夫, 宇佐美祐人, 土橋徹, 安田正治: 中低層 RC 造ビル向けひび割れ検知システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.207-208, 2018.9
- [28] 吉海伸祐, 渡邊信也, 渡辺真司, 杉村義文, 鈴木幹夫: 地震観測記録から得られる動的履歴特性に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.931-932, 2016.8
- [29] 渡辺真司, 松下剛史, 林政輝, 鈴木幹夫: RC 造建物における鉄筋降伏前後の等価減衰定数に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.127-128, 2017.7
- [30] 永島茂人, 杉村義文, 後藤航, 鈴木幹夫, 元樋敏也, 土肥博: 東北地方太平洋沖地震における超高層制振建物の地震応答評価 (その 1) 強震観測記録の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.315-316, 2011.7