

構造ヘルスマニタリングシステム「測震ナビ®」の開発

地震災害レジリエンスを支えるモニタリング技術

佐藤 貢一*¹・関山 雄介*²・上田 俊彦*³・森川 隆*³・
欄木 龍大*⁴・廣石 恒二*⁵・栗栖 藍子*⁵

Keywords : resilience, business continuity planning, structural health monitoring, interlayer deformation angle

レジリエンス, 事業継続計画, 構造健全性モニタリング, 層間変形角

1. はじめに

近年、未曾有の大地震と言えは未だ記憶も新しい平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震や平成 28 年(2016 年)熊本地震である。これらの地震によって広域にわたり構造体・設備機能が低下し、さらに地方に生産拠点を有する大企業では、甚大な被害によって部品調達の滞りから生産停止状態へと追い込まれ、需要と供給のバランスの正常化までに膨大な時間を要した。この震災の被害総額は内閣府白書によると東北地方太平洋沖地震で約 16 兆 9 千億円¹⁾、熊本地震で約 4 兆 6 千億円²⁾との試算が公表され、国民総生産の実質 GDP と比較すると各々 3.6%と 0.8%にもなる。このような経験から各企業の継続的な事業を維持するため、事業継続計画(BCP: Business Continuity Planning)対策や建物が地震動に対して抵抗力を発揮できるような性能設計計画などの「事前対策」の理解がより一層深まってきた。一方、災害後の建物性能を復旧させる復旧力(レジリエンス: Resilience)も同時に注目され、税制面での資金援助や復旧計画立案などの「復旧対策」の取り組みが始まっている。もし仮にこのような対策が行われていない状態で今後予測されている南海トラフ巨大地震が発生した場合、被害総額は約 220 兆円³⁾、首都直下型地震で約 95 兆円⁴⁾と試算され、現在の実質 GDP の約 20~40%を占め、国の経済が逼迫した状態になると推定される。そのため、このような地震災害によって、損傷した構造物や事業停止状態からできるだけ迅速に平常状態へ復旧させるためのレジリエンス力が必要となる。そこで Bruneau と Reinhorn⁵⁾は、建物の供用期間

中に極めて短時間に発生する災害に対して、建物性能が低下してから目標性能に復旧するまでの期間を囲んだ領域をレジリエンストライアングルと称し、この領域を小さくすることでレジリエンス力が高くなることを提唱している。この考えは、前述した「事前対策」の抵抗力と「復旧対策」の復旧力を総合的に建物性能として評価したものである。しかし、レジリエンストライアングルの領域を小さくしたところで、地震直後の建物健全性の確認が早まらない限り、建物の目標性能に達するまでの期間は短縮できない。現在、建物の健全性評価は、応急危険度判定士が一件ごとに建物の傾き計測や外観目視などの調査に基づいて、「調査済」、「要注意」と「危険」の三段階で判定している。この調査には、1日当たり約 20 棟の建物を班に分けて確認し、想定調査期間は 10 日以内を原則としているが、平成 28 年(2016 年)熊本地震では実質約 60 日も期間を費やした。このような課題を解決するには、地震直後の建物調査にかかる時間の「直後対応」をいかに短縮するかが極めて重要であると考えられ、この対応策が全体的な復旧時間に大きな影響を与えることになる。

このような背景から、この「直後対応」における調査時間短縮の一翼を担う手段として、地震後の建物健全性の状態を迅速に確認できる構造ヘルスマニタリングシステム「測震ナビ®」を開発した。本システムの特徴は、外観からでは分からない損傷の程度をセンサの計測結果から三段階で評価する機能を搭載しており、今まで応急危険度判定士が目視調査に要していた時間の短縮し、かつ人的な労力の効率化の支援が図れる。また、応急危険度判定士の調査が 1 回のみに対して、

* 1 技術センター 先端技術開発室 AI連携技術開発室
* 2 リニューアル本部 リニューアル推進部
* 3 ソリューション営業本部 AI・IoTビジネス推進部

* 4 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室
* 5 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

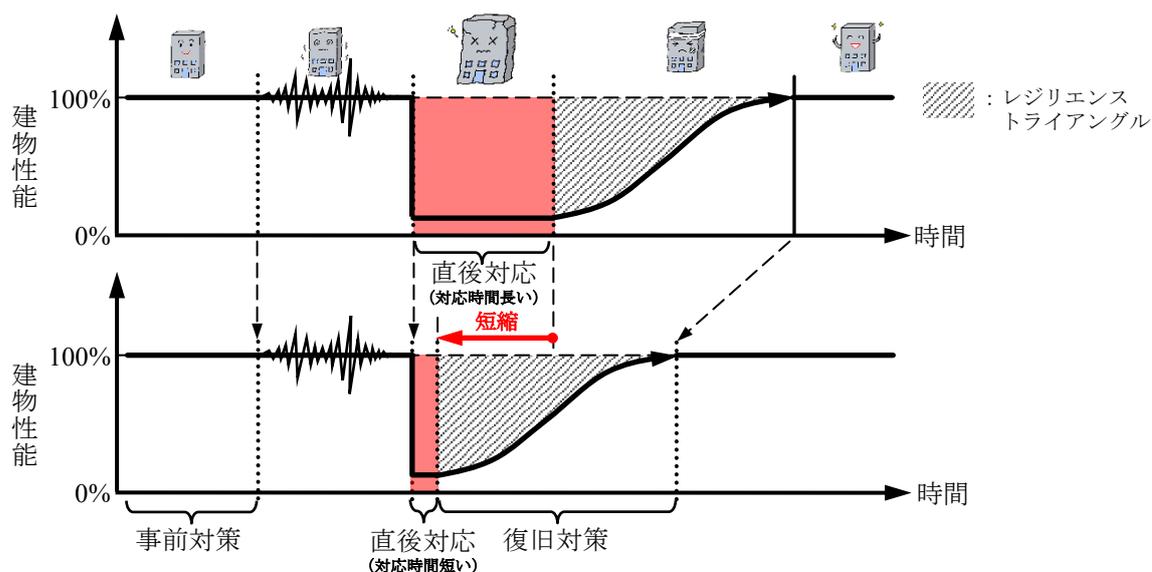


図1 「直前対策」、「直後対応」、「復旧対策」フェーズの位置付け

Fig.1 Positioning of "Preliminary measures", "Immediate response" and "Recovery measures" phases

断続的に発生する地震ごとに本システムが判定することできる。そのため、特に避難所として想定される学校や自治体等の公共施設、生産や物流の要となる民間企業等の建物に導入されれば、時々刻々変化する建物の状況が確認でき、リアルタイムに災害対策への一助となると考えられる。

本報では、地震災害を想定し、時系列的に生じる事象に対処しなければならない設計計画時の抵抗力の「事前対策」、建物の健全性状況確認の「直後対応」と健全性を失った建物を目標性能まで復旧させる復旧力の「復旧対策」の3つのフェーズの位置付けと中でも「直後対応」の重要性について述べる。次に、「事前対策」と「復旧対策」の仲立ちを行う「直後対応」の役割を担う地震直後の構造物の健全性を評価する構造ヘルスマモニタリングシステム「測震ナビ®」について紹介する。最後に構造のみならず建物全体としての総合的な健全性モニタリングの必要性について述べる。

2. 地震災害を想定した「事前対策」、「直後対応」と「復旧対策」フェーズの位置づけ

本章では、前述したように、災害前の「事前対策」と災害後の「直後対応」と「復旧対策」の各フェーズの位置づけについて述べる。図-1は、地震災害を想定した建物性能を時系列ごとに示したものである。災害前の「事前対策」は、耐震・免震・制振構造の性能設計を基本計画することで抵抗力が向上し、想定される

地震力対策として位置づけられる。次に、災害後の「復旧対策」は、税制資金援助や建物が目標性能レベルまでに復旧させるための対策として位置づけられる。ただし、この対応策は建物用途によって千差万別であり、すべての被害状況に対して復旧計画を実施するには、調査を含めるとかなりの時間を要する。特に、直接目視が不可能な構造体において、被害状態を可視化することができれば、対策案が早期に立案ができ、レジリエンス向上に寄与することが可能になる。もう一つの災害後の「直後対応」は、図-1に示すように地震直後の構造健全性状態を確認し、「復旧対策」へ速やかに移行できる役割と位置づけられる。今までの「直後対応」は、図-1上図に示すように地震が発生し建物の健全性が失うと、応急危険度判定士が建物の傾き計測と外観目視による診断を行い、すべての建物の健全性を確認するには数十日間を要していた。一方、図-1下図のように「直後対応」の時間が数分～数十分以内で構造の健全性が確認できれば、復旧までの時間が短縮される可能性が極めて高い（ただし、レジリエンストライアングル（斜線領域部分）は同じであると想定）。さらに被害状況が見える化されれば、建物オーナー、居住者や設計者などと情報共有が図れ、その後の「復旧対策」に資することになり、極めて重要な位置づけと考えられる。この「直後対応」の方策の一手段として、迅速に構造健全性評価を可能にした構造ヘルスマモニタリングシステムを開発し、次章ではこのシステム「測震ナビ®」について詳細に述べる。

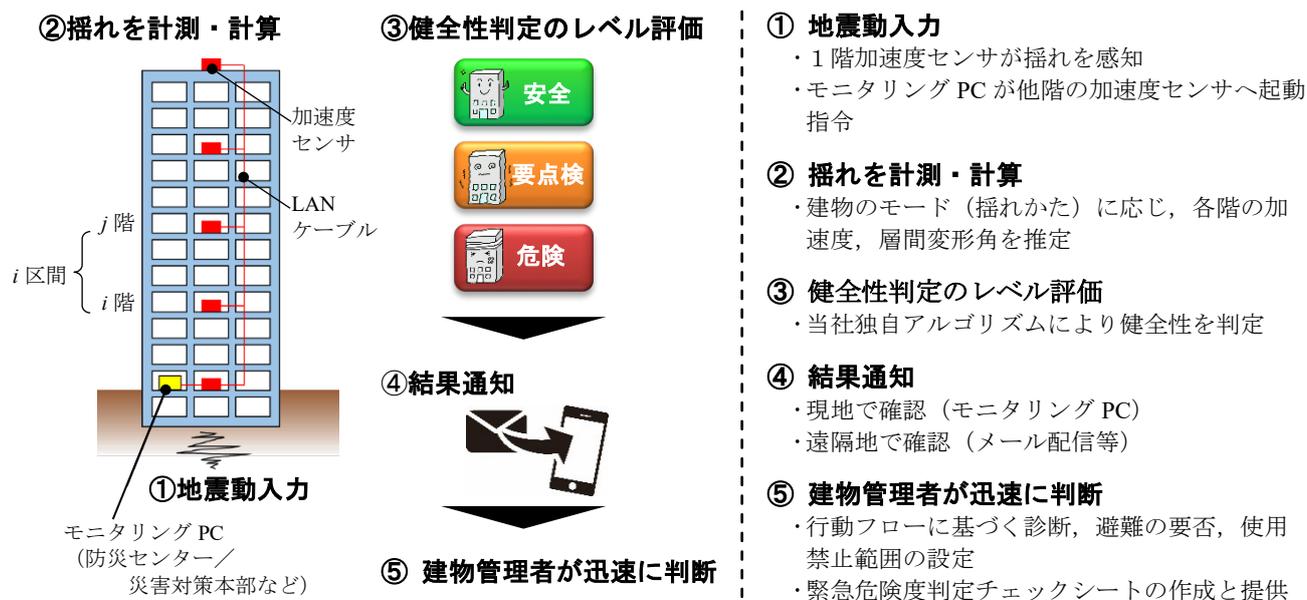


図-2 構造モニタリングシステムの概念図

Fig.2 Overview of structural monitoring system

3. 構造ヘルスマニタリングシステムの開発

本章は、地震動を受けた構造物の健全性評価を迅速に判定する「直後対応」として位置づけた構造ヘルスマニタリング「測震ナビ®」の概要、判定方法、センサの性能試験や判定結果の表示方法について述べる。

3.1 システムの概要

構造ヘルスマニタリングシステム「測震ナビ®」の基本構成は、図-2に示すように建物の複数階に加速度センサを設置し、これらセンサを有線LANケーブルでモニタリングPCに接続した方式である。この加速度センサは、地震動を受けた構造物の揺れを検知し、加速度センサで取得した物理量から換算された変位量に基づいて構造体の健全性を評価する。次項では構造物が評価されるまでの流れを述べる。

3.1.1 地震動入力

地震動が建物に入力すると常時動作している加速度センサがその揺れを感知する。その揺れが建物特性ごとに予め設定した加速度の大きさ(トリガー値)以上になった時に、モニタリングPCから他の加速度センサへ起動指令を出す仕組みを基本としている。

3.1.2 揺れの計測・計算

加速度センサは、地震動による振動か、または加速度センサ近傍で物などを落下させた時の振動かを自動で判断する機能を備えており、地震動による振動と判断すれば計測を開始する。また地震終了後、建物の揺れが終了しているか否かも自動で判断し、揺れが収まっていれば計測を終了する。この計測終了後、速やか

に加速度データから変位データに換算し、計測開始から終了までの時々刻々の層間変位角を算出する。ここで層間変形角を算出する場合、地震の主要動近傍で層間変形角が大きくなる傾向があるため、この部分を抽出する処理手法を採用した。詳細は、3.2.2の変位量換算の算出法で述べる。

3.1.3 健全性判定のレベル評価

健全性判定には、時々刻々の層間変形角のうち最大層間変形角を算出し、この値と建物の性能によって評価される層間変形角の閾値と比較することで、「安全」、「要点検」、「危険」の3段階で判定する。この評価結果は、建物に設置されたモニタリングPCの表示画面で確認することができる。さらに、積層表示灯(3色)を玄関や外壁などに設置することで構造の健全性評価結果を外部から可視化することも可能である。

3.1.4 結果通知

本システムの診断結果の通知機能は、基本的に建物内に設置したモニタリングPCの表示画面で確認する。しかし、建物外や遠隔地にいる関係者へ建物診断結果を周知させるため、メールを送信することで情報が共有され、居場所によらずリアルタイムに合意形成が図られ災害対策に貢献できる。

3.1.5 建物管理者が迅速に判断

地震直後の構造の健全性評価結果以外に、管理者が必要な情報に、建物内外への避難の要否、建物使用可否の制限や帰宅困難者への受入判断可否などがある。このように詳細な対策を行う場合には、緊急危険度判定チェックシートを建物管理者と協働で作成・提供の

用意しており、このシートは地震後の実効性の高いBCPや事業継続マネジメント（BCM：Business Continuity Management）に有効となる。

3.2 健全性の判定方法

本システムの健全性の判定方法は、加速度センサ間の高さ方向の層間変形角（以下、区間変形角と呼ぶ）に基づいて評価する。ここで評価した結果を「安全」、「要点検」、「危険」の3段階で示し、各段階の閾値は、日本建築構造技術者協会（JSCA）⁶⁾や当社の設計で予め定めた値を適用する。

3.2.1 区間変形角の算出法

区間変形角の算出法は、図-2に示すように加速度センサが設置された上層階（ j 階）と下層階（ i 階）の変位差を i 区間の高さ（ H_i ）で除した値とした。また最大区間変形角（ $R_{i,max}$ ）は、式(1)に示すように地震継続時間（ T ）までの区間変形角の最大値（絶対値）とした。

$$R_{i,max} = \text{MAX} \frac{|\delta'_i - \delta'_j|}{H_i}, \quad t=1, \dots, T \quad (1)$$

ここで、

$R_{i,max}$: i 区間の最大区間変形角

δ'_i : 時刻 t における i 階の変位量 ($i=1, \dots, N-1$)

δ'_j : 時刻 t における j 階の変位量 ($j=i+1, \dots, N$)

H_i : i 区間の高さ

N : 加速度センサの個数

式(1)からも明白なように、健全性判定には変位量を用いて評価することになる。その際に加速度センサの加速度の物理量を変位量に換算する必要あり、この換算法によっては健全性判定結果に影響を与えることになる。次項ではこの変位量への算出法について述べる。

3.2.2 変位量換算の算出法

加速度から変位の物理量へ算出するフローを図-3に示す。はじめに加速度センサの時刻歴データを収集（①）し、このデータをフーリエ変換により時間領域から周波数領域へ変換（②）する。次に、長周期成分をカットするフィルター処理（③）を適用し、この周波数領域において円振動数で2階積分（④）を行う。その後、高速逆フーリエ変換（⑤）を行い時間領域へもどす処理を行うことで、最終的に得られたデータが時刻歴変位データ（⑥）となる。この方法の特徴として、地震終了時には建物が概ね元の位置に戻る現象を再現するため、周波数領域でフィルター処理と積分を適用した点である。仮に時間領域で積分をした場合は、時刻歴変位波形が時間経過と共に徐々に大きく（ドリフト）なる現象が生じ、実現象と異なる。そのため、

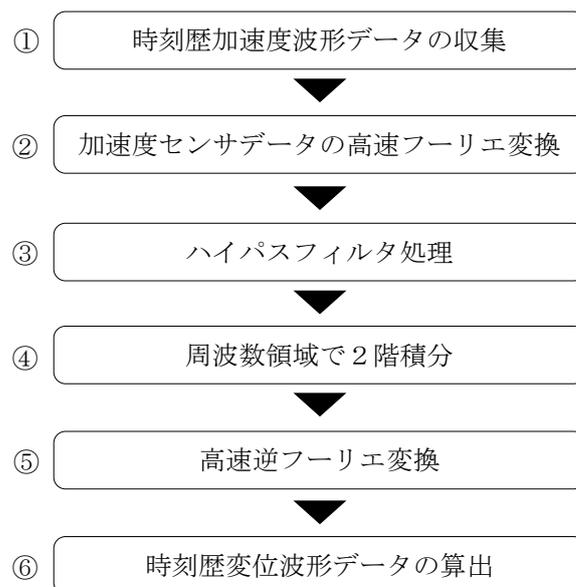


図-3 加速度から変位量へ算出法のフロー
Fig.3 Flow of calculation method from acceleration to displacement

本算出法では、周波数領域による変位算出の手法を適用した。一方、この手法の限界は、周波数領域において長周期成分を除去するフィルター処理（③）を行っているため、地震終了後に建物の残留変位が再現できないことである。特に鉄筋コンクリート造建物は、地震の規模によっては地震継続中に大きな変形が生じることで残留変位が生じる可能性が高いことから、地震の主要動近傍の挙動を把握することで、構造の健全性を確認することが可能となる。このような考えにより、本評価の判定範囲を地震の主要動近傍の区間変形角を的確に捉えることとした。次項では、変位量算出法の妥当性を振動実験で得られた加速度センサの時刻歴加速度波形データを用いて検証すると同時に、MEMS型加速度センサ性能の違いによる精度の比較検討を行う。

3.2.3 センサの性能による変位量の精度検証試験

本項では、種類の異なる加速度センサの時刻歴加速度波形の形状や振幅を振動実験により比較検討し、この時刻歴加速度波形から変位算出法の妥当性を確認するため、時刻歴変位波形から精度検証を行う。表-1に比較検討を行ったサーボ型とMEMS型の加速度センサの性能比較表を示す。本検討では、サーボ型加速度センサを正解値とし、2種類の性能の異なるMEMS型加速度センサ（分解能やノイズ密度）に対して加速度波形から変位量算出法を適用した場合の変位波形の比較検討を行った。実験方法は、振動台上にサーボ型センサとMEMS型加速度センサを3種類設置し、低層建物から高層建物までを想定した固有振動数の範囲（0.1～

15.0Hz) を網羅したホワイトノイズ波とスイープ波を振動台に入力した。加振諸元を表-2 に示す。また、図-4~図-7 にサーボ型センサと各 MEMS 型センサで収集された時刻歴加速度波形と変位量算定法によって導いた時刻歴変位波形を示す。ただし、時刻歴変位波形は、振動台を直接変位計で計測した。この結果より、加振

ケースに対して下記のようなことを確認した。

ホワイトノイズ波の場合：

- ① MEMS-1 のセンサの時刻歴加速度波形は、サーボ型センサの波形と比較して、各方向ともに形状および振幅が一致した。ただし、MEMS-2 のセンサの時刻歴加速度波形の形状や振幅にわずかに差異があるこ

表-1 センサの種類

Table 1 Kind of Accelerometer sensor

	サーボ型	MEMS-1	MEMS-2
分解能	1/1000gal	3.9 μ G / LSB	60 μ G / LSB
ノイズ密度	—	22.5 μ G / $\sqrt{\text{Hz}}$	150 μ G / $\sqrt{\text{Hz}}$

LSB:Least Significant Byte ^{注1)}

表-2 加振諸元

Table 2 Vibration specifications

加振波	振動数(Hz)	振幅(gal)	加振方向
ホワイトノイズ	0.1~15.0	100	XYZ
スイープ	0.5~15.0	30	X

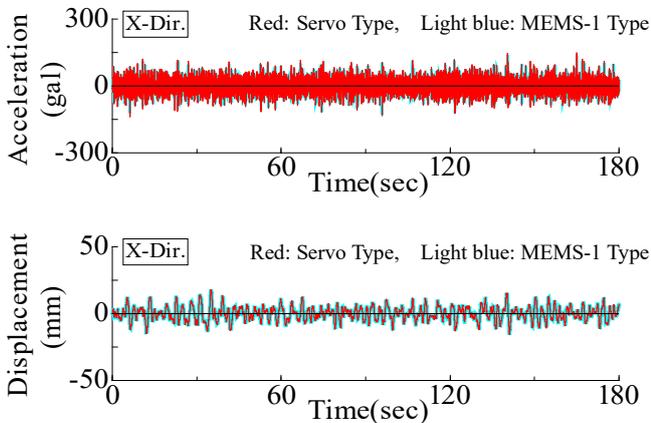


図-4(a) サーボ型と MEMS-1 の比較 (X 方向)

Fig.4(a) Comparison of Servo Type and MEMS-1 Type (X-Dir.)

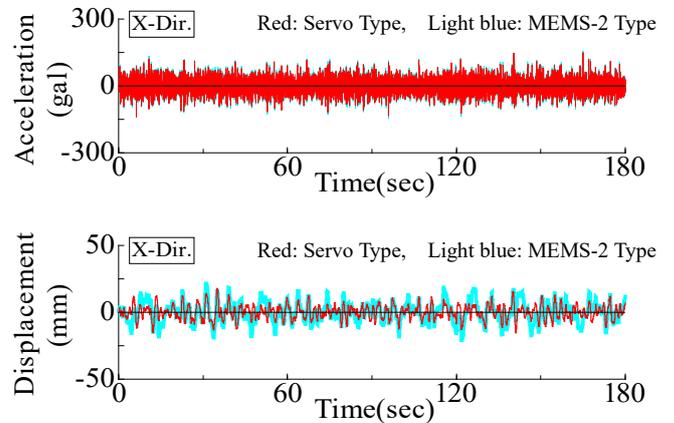


図-4(b) サーボ型と MEMS-2 の比較 (X 方向)

Fig.4(b) Comparison of Servo Type and MEMS-2 Type (X-Dir.)

図-4 ホワイトノイズ加振時のサーボ型と MEMS 型センサの比較 (加振方向 : X 方向)

Fig.4 Comparison of Servo type and MEMS type sensor at white noise excitation (X-Dir.)

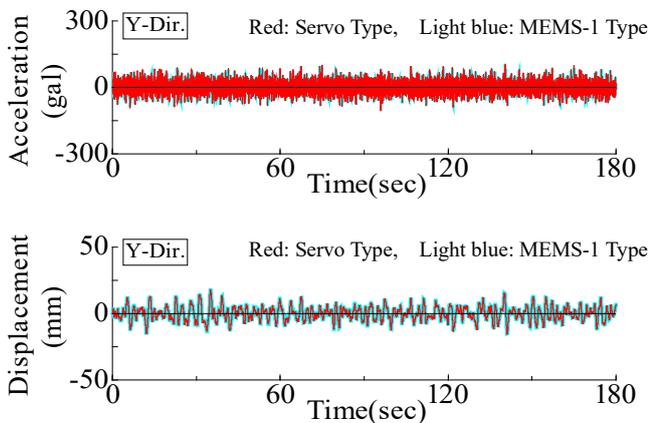


図-5(a) サーボ型と MEMS-1 の比較 (Y 方向)

Fig.5(a) Comparison of Servo Type and MEMS-1 Type (Y-Dir.)

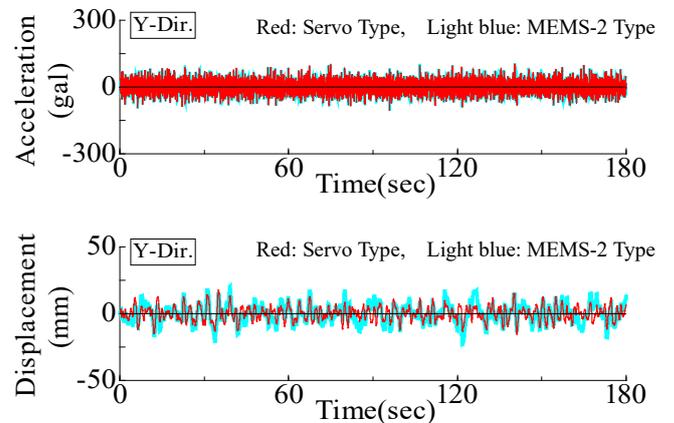


図-5(b) サーボ型と MEMS-2 の比較 (Y 方向)

Fig.5(b) Comparison of Servo Type and MEMS-2 Type (Y-Dir.)

図-5 ホワイトノイズ加振時のサーボ型と MEMS 型センサの比較 (加振方向 : Y 方向)

Fig.5 Comparison of Servo type and MEMS type sensor at white noise excitation (Y-Dir.)

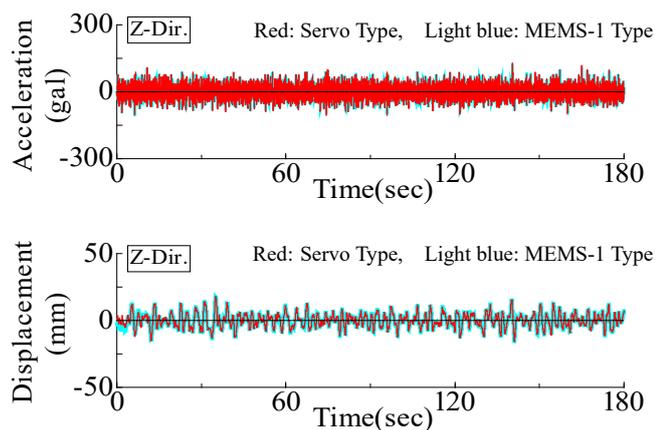


図-6(a) サーボ型と MEMS-1 の比較 (Z 方向)
Fig.6(a) Comparison of Servo Type and MEMS-1 Type (Z-Dir.)

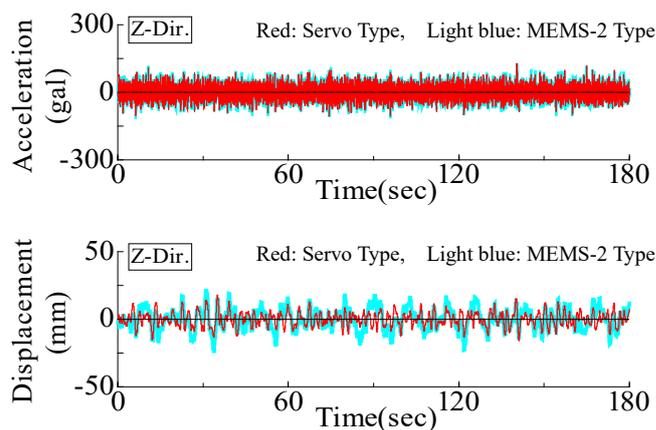


図-6(b) サーボ型と MEMS-2 の比較 (Z 方向)
Fig.6(b) Comparison of Servo Type and MEMS-2 Type (Z-Dir.)

図-6 ホワイトノイズ加振時のサーボ型と MEMS 型センサの比較 (加振方向 : Z 方向)
Fig.6 Comparison of Servo type and MEMS type sensor at white noise excitation (Z-Dir.)

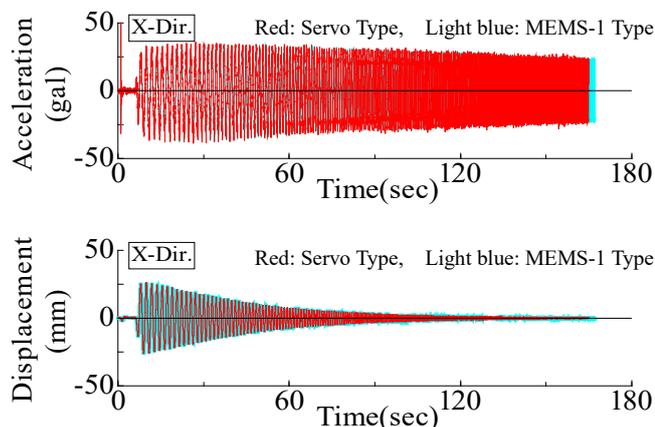


図-7(a) サーボ型と MEMS-1 の比較 (X 方向)
Fig.7(a) Comparison of Servo Type and MEMS-1 Type (X-Dir.)

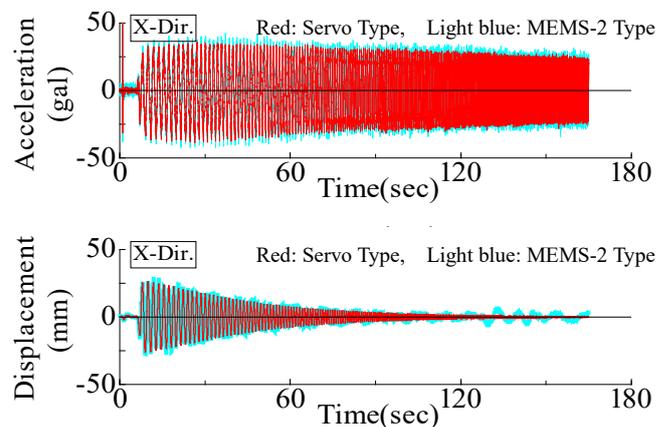


図-7(b) サーボ型と MEMS-2 の比較 (X 方向)
Fig.7(b) Comparison of Servo Type and MEMS-2 Type (X-Dir.)

図-7 スイープ加振時のサーボ型と MEMS 型センサの比較 (加振方向 : X 方向)
Fig.7 Comparison of Servo type and MEMS type sensor at sweep excitation (X-Dir.)

とを確認した。

- ② MEMS-1 のセンサを用いて算出された時刻歴変位波形は、各方向ともに振動台の時刻歴変位波形とほぼ一致し、最大振幅比で約 5%の範囲に収まった。一方、MEMS-2 のセンサの場合は、各方向とも形状および振幅が振動台の時刻歴変位波形と一致せず、最大振幅比で約 50%の差が生じた。

スイープ波の場合：

- ① サーボ型センサと MEMS-1 のセンサの時刻歴加速度波形は、形状および振幅ともに一致した。
- ② サーボ型センサと MEMS-2 の時刻歴加速度波形では、振幅比で MEMS-2 の方が約 18%大きかった。
- ③ MEMS-1 のセンサの時刻歴変位波形は、振動台の波

形と比較し最大振幅比で 2%の範囲に収まったが、MEMS-2 のセンサの時刻歴変位波形では、振動台の変位波形と比較し最大振幅比 10%の差が生じ、さらに加振終了近傍でも揺れている傾向を示した。

このような性能特性の異なる MEMS 型加速度センサの精度検証試験結果により、分解能やノイズ密度が小さな MEMS-1 のセンサを用いた方が、時刻歴加速度および変位波形ともに誤差が小さく、低層から高層建物までの固有振動数を網羅することが可能なセンサであることを確認した。したがって、時刻歴変位波形を正確に取得するには、分解能やノイズ密度の小さなセンサを使用することが必要不可欠であり、本システムでは、MEMS-1 の加速度センサを採用した。



図-8 判定結果例 (PC画面)
Fig.8 Judgment result example (PC screen)



図-9 判定結果例 (メール受信通知)
Fig.9 Judgment result example (email reception notification)

3.3 判定結果の表示方法

モニタリング PC は、建物の管理者と相談の上、所定の場所に設置し、そこに判定結果が表示される。また、予め設定した建物管理者などへメールで判定結果を報告する機能を搭載している。モニタリング PC などの画面に表示する判定結果例を図-8、またメールに受信された判定結果例を図-9 に示す。表示結果には、観測日時 (トリガー開始時間)、判定結果、震度、最大時の構造体や仕上げの区間変形角 (方向と階ごと) や設備の最大加速度が表示される。

4. 今後の建物ヘルスマニタリングとまとめ

現在、構造ヘルスマニタリングシステムの導入実績は、他社のシステムも含めると事務所ビルなどへの導入が 1000 棟を超えたと想定される。ただし、国内の事務所ビルなどの全棟数と比較すると導入実績が極めて少ない。国土交通省が 2020 年 1 月に南海トラフ地震 (M8~9 クラス) が今後 30 年以内に発生確率が 70~80%と公表され、レジリエンスの一助となる「直後対応」の構造ヘルスマニタリングの導入が必要不可欠となる。この導入を促進させるために、日本建築学会ではシンポジウム「建物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題」⁷⁾で 2030 年までのロードマップに社会的な整備と支援制度の取り組みが必要であると明記されている。具体的に構造ヘルスマニタリングに対する補助金制度、地震保険損害の整備や地震観測データの提供の義務化などを法令化することである。一方、構造ヘルスマニタリングのみならず、同時に

非構造部材被害や室内被害の状況を確認するモニタリング技術を包含した総合的な建物健全性モニタリングが技術開発の発展が望まれる。

今後は想定外の地震動にも対処できるシミュレーション技術の高度化、IoT や人工知能 (AI) を用いた Society5.0 (デジタルツイン) の社会づくりを構築し、さらなる国土強靱化を図る必要があると考えられる。

注

注1) LSB : 二つの隣り合う量子ステップ (ビット) 間の差異を電圧単位で測定した量。

参考文献

- 1) 内閣府 : <https://www.bousai.go.jp/2011daishinsai/pdf/110624-1kisyu.pdf>, 政策統括官 (防災担当), 平成 23 年 6 月
- 2) 内閣府 : <https://www5.cao.go.jp/keizai3/kumamotoshisan /kumamotoshisan20160523.pdf>, 政策統括官 (経済財政分析担当), 平成 28 年 5 月
- 3) 内閣府 : 南海トラフ巨大地震被害想定について (経済的な被害), https://www.bousai.go.jp/jishin/Nankai/taisaku_wg/pdf/3_sanko.pdf, 政策統括官 (防災担当), 令和元年 6 月
- 4) 内閣府 : 首都直下地震の被害想定と対策について (最終報告), https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_siryu03.pdf, 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ, 平成 25 年 12 月
- 5) M. Bruneau and A. Reinhorn : Overview of the resilience concept, Proc. of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering (米国地震工学会議), 2006.
- 6) 社)日本建築構造技術者協会 : JSCA 性能設計説明書 2017 年度版【耐震性能編】, pp.15-37, 2018.3.
- 7) 日本建築学会, 建物健全性モニタリング小委員会 : 建物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題, シンポジウム, 構造委員会 振動運営委員会, pp.92-101, 2020.1.