

## 免震建物の免震層モニタリングシステムの開発

株式会社 竹中工務店 技術研究所 曾根 孝行  
山本 雅史  
吉澤 睦博

### 1. はじめに

免震建物は、免震部材（積層ゴムなどの支承材やオイルダンパーなどの減衰材）が配置される免震層全体が地震時に大きく変位して建物へ伝わる地震エネルギーの大半を吸収し、免震層以外の建物部位に大きな変形を生じさせない優れた性能を有している（図 1）。東日本大震災では多くの免震建物で観測記録が得られ<sup>1)</sup>、その分析結果から安全・安心な建物としての優位性が立証された。現在、免震建物は防災拠点となる建物をはじめとして採用が増え続け、2018 年末時点までの計画棟数は約 9,500 棟<sup>2)</sup>とされている。免震建物は都市のレジリエンスを支える重要な存在であると言える。

免震建物の耐震性能は、免震層の特性（免震層内に配置された免震部材を全て集約した特性）に大きく依存している。

そのため、免震層の地震時の動きを計測し、地震を受けた免震部材の性能変化に関する知見<sup>例えば 3)</sup>を活かすなどして免震建物の健全性モニタリングを行う意義は非常に高く、このようなモニタリングを有する「高機能な免震建物」は都市のレジリエンスの維持に大きく寄与することになる。しかし、現在、免震建物のモニタリングが普及しているとは決して言えない。これについて、次の理由が考えられる。

- ・健全性モニタリングのために免震層の変位の時系列データは重要不可欠だが、免震層は大地震時に水平二方向へ±500mm を超えて動く可能性があり、計測レンジの長いロングストローク変位計が必要となる。しかし、コストなどの問題から免震層にロングストローク変位計を設置せず、変位の時系列データは得られないものの簡易で安価なケガキ計（写真 1(a)）を採用するが多い。
- ・昨今、建物の構造モニタリングが認知され普及し始めてきた<sup>4)</sup>。一方、免震建物は、地震時に建物部位が大きく変形しないこと、ロングストローク変位計の設置が普及していないこともあり、免震建物のモニタリングの意義が建物所有者や建物管理者にまで十分伝わっていない状況にある。

筆者らは、高機能な免震建物の普及において免震層への変位計の設置の普及が大きな鍵であり、またその記録を用いて建物所有者や建物管理者が必要とする情報を自動発信できるシステムが普及のための推進力になると考えた。そして、新考案の計測機構を備えた「直立型ロングストローク変位計」を開発すると共に、それによる記録と分析結果の自動表示システムを組み合わせ「免震層モニタリングシステム」を開発した。以下に、本開発技術の内容と実建物への適用例を紹介する。

### 2. ロングストローク変位計の開発

#### 2.1 ケガキ計と従来製品のロングストローク変位計の概要

免震層の変位の記録装置として、ケガキ計とロングストローク変位計がある。

ケガキ計（写真 1(a)）とは、針を使って免震層の動きをケガキ板に引っかき傷として残すものである。簡易で安価という利点がある一方、免震層がどの方向に最大どれだけ動いたかという目視情報しか得られない<sup>5)</sup>。前回までの軌跡により新しい軌跡がわからなくなるため、地震後にはケガキ板の交換が必要となる。ケガキ板の軌跡確認や交換のため免震層内へ入ることになるが、地震直後は余震の



図 1 免震建物の概要

可能性から直ちに入ることが難しく、地震発生から数日待たなければならぬこともある。このようなケガキ計は、健全性モニタリングの観点では不十分な装置であるものの、免震建物に最低限備えるべきものとして普及している。

これに対して、ロングストローク変位計は変位を時々刻々計測できるセンサーである。従来製品(写真 1(b))は横たわった長いロッドが一方へ伸び縮みする磁歪式変位計であるが、ストローク方向のみ(一方向のみ)が計測対象であるため、水平二方向へ動く免震層には最低 2 台の変位計が必要となる。一方へ伸び縮みするロッドが直交方向への免震層の動きに対して曲がらないよう変位計の先端にガイド材を設ける必要があり、その可動領域を含めて十分な設置空間を確保しなければならない。この様に、コスト UP 要因が多く、占有範囲が広いなどの問題があり、従来製品は普及していない。

## 2.2 本開発の直立型ロングストローク変位計の概要

筆者らは、従来製品のロングストローク変位計が持つ課題を解決するための計測機構を考え、図 2 に示す直立型のロングストローク変位計を考案した。以下の 3 つの部材が本計測機構の要点となる。

- ①図 2(a)の点線で囲って示した「計測部」
- ②一方は免震層直上と自在継手で接合されもう一方は計測部に接合される「主軸材」
- ③免震層床に設置された設置架台に固定された滑り軸受により鉛直方向にのみ移動可能とされ一方が計測部に接合される「ガイド軸材」

免震層が水平変位すると、図 2(b)に示す様に主軸材が傾くとともにガイド軸材が上に持ち上がる。計測部は拡大部を図 2(c)に示すとおり十字軸を持つ自在継手であり、主軸材の傾きに応じて継手を構成する 2 つの回転軸がそれぞれ回転する。各回転軸に「回転計」を組込むことで各方向の回転量  $\alpha$ 、 $\beta$  を計測し、それらの値から水平二方向の変位量  $X$ 、 $Y$  を算出する仕組みとなっている。

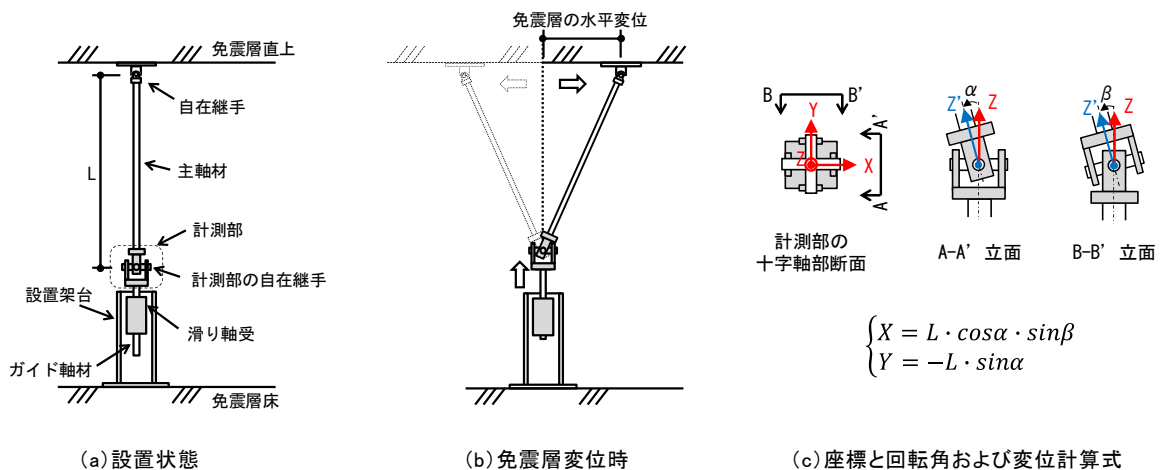


図 2 本開発の計測機構とロングストローク変位計の概要

以上の計測機構を具現化した変位計の製品「直立型ロングストローク変位計」の概要を図 3 に示す。本変位計の計測精度は回転計の性能に依存するため、高精度デジタル式回転計を採用している。また、本変位計の使用形態として、モニタリングシステムの構成部品として間接的に使われる場合と、スタンドアロンで免震建物に組み込んで使う場合のそれぞれを想定し、出力部(回転計の値から変位を算出する計算部を含む)には LAN を用いた通信機構と記録装置を設けている。本変位

計のコストは、量販品の回転計を利用できる点、1 台で水平二方向を計測できる点から、前述した従来製品に比べて 1/2 以下に抑えられる。従来製品が必要としたガイド材などの部材が必要なくなり、設置場所の見付け面積を極めて小さくできる。更に、その部材分のコストや設置手間もなくなることでトータルでの経済性も高く、普及への障壁であったコスト面が大きく改善されている。

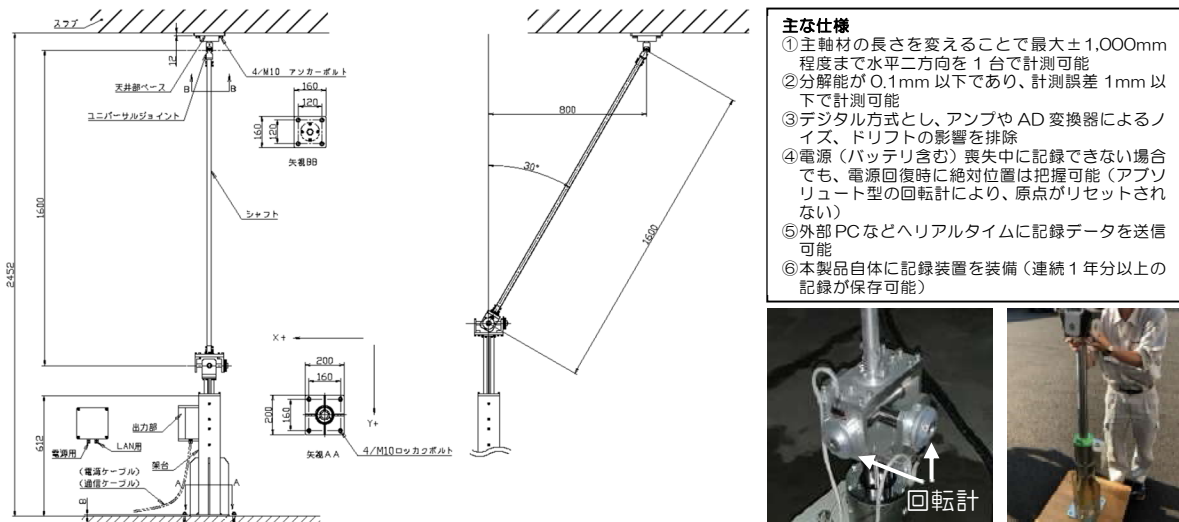


図 3 直立型ロングストローク変位計の製品概要

### 2.3 プロトタイプを用いた追従性確認試験

本変位計の開発時にプロトタイプを製作し、地震時の免震層の動きなどを想定した大変位、大速度下での追従性を確認した。プロトタイプの計測レンジは±750mm である。図 3 の製品と異なり 2 本のガイド軸材が計測部-滑り軸受間に使用されている。本試験では、反力壁に取り付けた H 鋼梁と振動台との間にプロトタイプを設置し、2 台の動的アクチュエータを使って振動台を水平二方向へ加振した(図 4)。参考に振動台の動きをレーザー変位計で計測し、プロトタイプの結果と比較した。

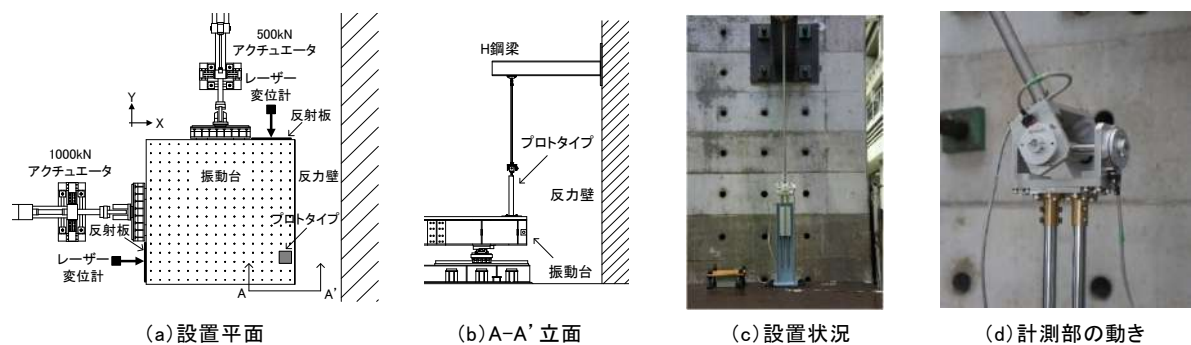


図 4 試験状況

本試験の詳細は参考文献 6 を参照とする。以下では試験結果の一例として、正円加振と応答波加振を行った際の結果を示す。正円加振は、X 方向と Y 方向とで 90 度位相をずらした振動数 0.2Hz の正弦波加振(正弦波の始めと終わりにテーパ処理を実施)である。本加振の最大変位は X・Y 方向共に 450mm、最大速度は X・Y 方向共に 0.57m/s である。応答波加振は、免震建物を模擬した解析モデルへ 2016 年熊本地震時に観測された地上の地震記録を与えた時の免震層の応答変位を用いたものである。本加振の最大変位は X 方向 271mm、Y 方向 422mm、最大速度は X 方向 0.66m/s、Y 方向 0.91m/s である。図 5 は振動台を加振した際にプロトタイプ(黒線)とレーザー変位計(赤線)が計測した変位のオービットであるが、両者は良く一致している。図 6 に正円加振時の速度波形の拡

大図を示す。速度は計測された変位を数値微分して求めた。レーザー変位計による速度波形(赤線)には電気ノイズなどの影響と思われる高振動成分が至る箇所に見られる。これに対し、プロトタイプによる速度波形(黒線)には同様な高振動成分が見られない。この様子は他の加振でも確認されている。本試験により、プロトタイプは最大速度 1.0m/s 程度の動きやランダムな動きにも追従して計測でき、かつその計測結果から速度波形も安定して評価できることを実証した。

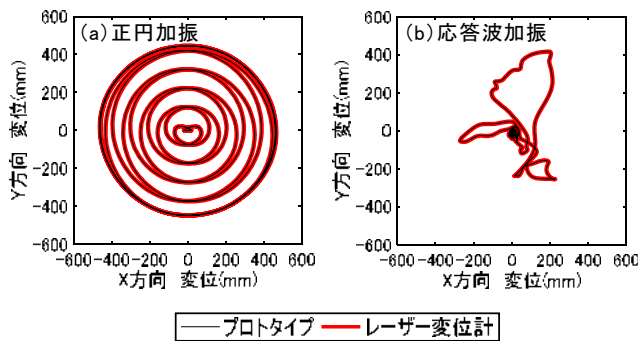


図5 オービットの比較

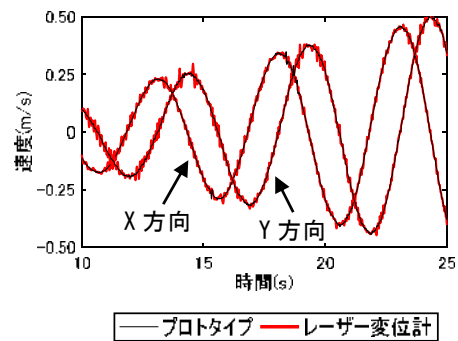


図6 速度波形の比較(正円加振時)

### 3. 免震層モニタリングシステムの開発

#### 3.1 システム利用者ごとに望まれる機能

免震建物のモニタリングシステムの利用者として、建物管理者と、免震建物の構造や免震部材を熟知した専門家(構造設計者や免震建物点検技術者など)を想定した。

建物管理者は、地震直後に免震建物の点検の必要性を判断しなければいけない。(社)日本免震構造協会が発行する維持管理基準<sup>7)</sup>では、免震建物の点検として地震直後の災害時に行う「応急点検」が定義されており、その実施目安を概ね震度V弱以上の地震としている。この目安が適切な判断基準だとは決して言えないが、地震の都度、個々の免震建物で免震層がどの程度動いたかを把握出来ない状況下ではこの様な判断基準しか設けられない。また、地震直後は余震の可能性があり、免震層へ入って行う点検は危険を有している。そのため、地震直後に防災センターや管理室などから免震層の動きを迅速に把握し、応急点検を今行うべきかどうか明確に判断できることがモニタリングシステムに望まれると筆者らは考えた。

専門家は、専門的な見地から免震建物が健全か、免震部材の保守・交換が必要かを判断しなければいけない。そのために免震層へ入ってケガキ計の軌跡や免震部材の状況を目視確認したり元の位置からの変形量を計測したりするものの、それだけの情報から健全性を正確に判断することは難しい。また、余震の可能性から免震層へ入って行う作業自体が危険性を有している。そのため、免震層の変位データを免震層へ入らずとも取得でき、健全性の分析に利用できることが専門家にとって望ましく、またその分析も可能な部分は自動計算で行なわれてその結果が逐次表示されることがモニタリングシステムに望まれると筆者らは考えた。

#### 3.2 本開発の免震層モニタリングシステムの概要

筆者らは、建物管理者と専門家に有用な自動表示システムを検討し、本開発の直立型ロングストローク変位計とともに「免震層モニタリングシステム」を構築した。本モニタリングシステムの構成を図7に示す。本システムは変位計と管理PCとがLAN接続しており、変位データをリアルタイムに取り込む。管理PCに繋がられる変位計は1台または2台であり、どちらの場合にも自動表示システムは対応している。建物に加速度計が設置される場合は、そのデータも変位計と同様に取り込み、健全性の分析に用いることができる。

図8に自動表示システムの画面を示す。次に示す3つの表示部で構成されている。

##### ①免震層の平面図の表示部

- ②水平二方向（建物 X 方向と Y 方向）の変位の値のバーグラフ表示部
- ③変位データの記録開始・終了と分析に基づく判定結果のメッセージ表示部

①は、本システムの利用者が免震層内の免震部材や変位計の配置、後述する変位評価位置を把握するためのものである。

②は、免震層の変位の現在値や残留変位を把握したり、応急点検の判断を行ったりするために使用する。免震層の変位の現在値はバーグラフと数値によりリアルタイムに表示される（図 9）。バーグラフ上には過去の変位の最大値が残される。また、事前設定の判定値を超える変位が生じると背景色が黄や赤などに变化する。判定値を専門家と事前に設定することで、視覚的に応急点検の必要性など判断できる。変位計を 1 台設置する場合は変位計の値そのものが表示される。変位計を 2 台設置する場合は免震層外端など免震層内の任意の 4 点を変位評価位置（A 点、B 点、C 点、D 点）として設定でき、各値が表示される。

③は、自動分析結果を確認するためのものである。一定以上の大きさを超える動きが免震建物に生じると変位データなどが csv ファイルとして記録開始され、管理 PC 上に保存される。同時に免震層の最大変位や最大速度が自動算出され、事前設定の判定値と比較して点検判断のためのメッセージが即時表示される。また、免震層の累積変位量も自動算出され、判定値と比較して点検判断のためのメッセージが即時表示される。免震層の最大変位や最大速度、累積変位量は免震部材の健全性判断の指標になるものである。これらの判定値を専門家と事前に協議し、レベルに応じた複数メッセージを準備しておくことで管理者の行動判断がより明確になる（図 10）。

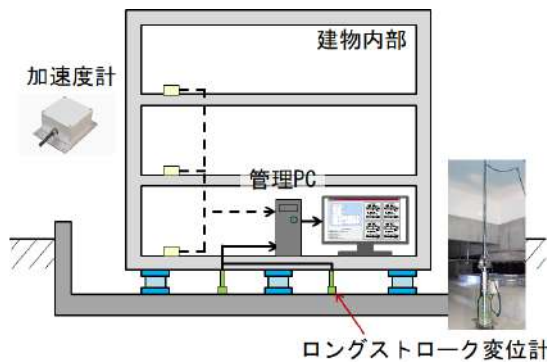


図 7 免震層モニタリングシステムの構成

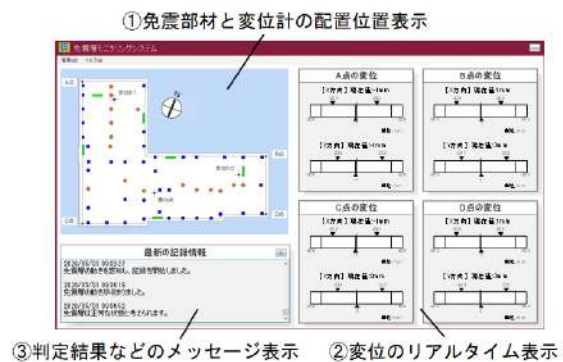


図 8 自動表示システムの画面の例

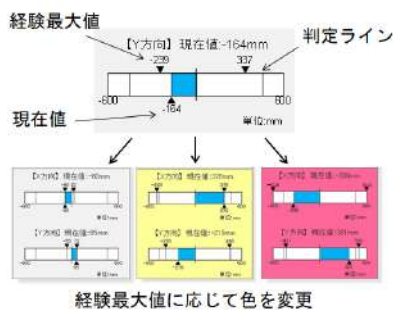


図 9 変位表示の例

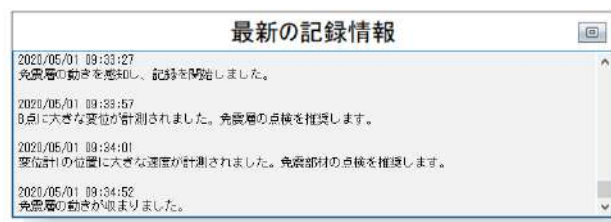


図 10 メッセージ表示の例

#### 4. 実施例

開発した免震層モニタリングシステムは、写真 2 に示す 2 棟の免震建物に導入された。それぞれは防災拠点としての役割を持つ免震建物である。両建物では建物の加速度も観測しており、本システムの結果と総合して免震建物の健全性モニタリングが行われる。



(a) 竹中工務店深江竹友寮



(b) 横浜市役所新庁舎

写真 2 免震層モニタリングシステムの導入事例

## 5. まとめ

都市のレジリエンスを支える重要な存在である免震建物は、その耐震性能が免震層の特性に大きく依存しており、免震建物の健全性モニタリングを行う意義が非常に高い。このようなモニタリングを有する「高機能な免震建物」は都市のレジリエンスの維持に大きく寄与する。筆者らは免震建物の健全性モニタリングの普及を目指し、新考案の計測機構を採用した「直立型ロングストローク変位計」とそれによる記録と分析結果の自動表示システムとを組み合わせた「免震層モニタリングシステム」を開発した。

本変位計は、設置場所の見付け面積を極めて小さくしつつ、水平二方向の免震層の大変位を 1 台で計測することができるものであり、従来製品に対してコストの面などが大きく改善している。本自動表示システムは、利用者として建物管理者と専門家を想定し、応急点検の実施判断に役立つ表示をそなえつつ、健全性モニタリングを行うために必要なデータ取得や分析結果の表示を行えるものである。それぞれ建物所有者や建物管理者にとって有益なものであり、免震建物における健全性モニタリングの普及を促すものと考えている。

開発した免震層モニタリングシステムは、防災拠点としての役割を持つ 2 棟の免震建物に導入された。今後筆者らは、本技術の更なる展開を通じて「高機能な免震建物」の普及に貢献していく。

## 謝辞

本免震層モニタリングシステムで用いた直立型ロングストローク変位計の開発は、株式会社東京測振との共同開発によるものです。プロトタイプ製作にご協力頂きました同社と倉橋護謨工業株式会社に謝意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 免震構造協会: 報告会 東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査, 2012.1
- 2) 日本免震構造協会: 2019 年度免震制振データ集積結果, [https://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms\\_ss\\_data.pdf](https://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms_ss_data.pdf) (最終検索: 2020 年 7 月 16 日)
- 3) 大成建設, 鹿島建設, 清水建設, 竹中工務店: 平成 22 年度国土交通省建築基準整備促進事業「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」調査報告書, 2011.3
- 4) 日本建築学会: 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, 2020.1
- 5) 国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成 28 年(2016 年)熊本地震建築物被害調査報告(速報), 国総研資料 No.929 号, 建築研究資料 No.173, p.5.7-4, 2019.9
- 6) 曾根孝行, 鈴木悠, 吉澤睦博, 山本雅史: 免震層への設置を想定した直立型ロングストローク変位計の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 25 巻, 第 61 号, pp.1057-1060, 2019.10
- 7) 日本免震構造協会: 免震建物の維持管理基準<改訂版> -2018-, pp.4-5, 2018.8