

免震建物の総合的なモニタリングシステムの開発

浜 辺 千佐子・吉 澤 睦 博・曾 根 孝 行

現在、国内では高い耐震性能を有する「免震建物」の普及が進んでいる。免震建物において、免震装置が設置されている免震層は、高い耐震性能を実現するための重要な層である。このため、日常的な免震装置・層内環境の維持管理が必須であり、さらに地震直後の免震層の健全性の把握が重要となる。一方、社会動向として防災に関するIT化が推進されており、その例として地震後に建物の構造体の健全性を推定支援するモニタリングシステムの導入事例の増加等がある。そこで筆者らは、これらのニーズや社会動向を受けIT・センシングの技術を駆使し、免震層内の日常の維持管理、および地震後の免震層内や上部建物の健全性を推定支援する、免震建物の総合的なモニタリングシステムを開発した。システム導入事例の検証により有効性を確認している。

キーワード：免震構造、免震装置、変位計測、加速度計測、ヘルスマニタリング、被災度判定

1. はじめに

現在、国内では地震後の事業継続のための方策（BCP:Business Continuity Plan）が進められている。庁舎や医療施設など防災拠点として機能する施設（以下、重要施設）では、大地震後も建物機能を維持したいというニーズが強いため、BCPが重要な位置付けとされている。そのため、重要施設を中心に高い耐震性能を有する「免震建物」の普及が進んでいる。免震建物は、免震装置が設置されている免震層を有しており（図-1）、高い耐震性能を実現するための重要な層であることから、日常からの免震装置や免震層内環境の維持管理、および地震直後の免震層の健全性の把握が重要となる。

一方、社会背景として地震災害の激甚化や防災に関する労力不足の課題の解決策の一つに、防災対策のDX化の推進が挙げられる。その一例には、地震後に建物の健全性（被災度）を推定支援するモニタリングシステムの開発、展開がある。建物管理者らによる地震後の迅速な建物継続利用判断をサポートし、企業のBCPや帰宅困難者対策へと活用されている。

このような社会ニーズ・社会動向に応じ、筆者らはセンシング・IT技術を活用し、免震建物を対象として、日常の維持管理から地震後の健全度推定支援まで総合的に活用できる「免震建物の総合的なモニタリングシステム」を開発した。なお、本システムには、免震構造以外の構造形式の建物にも幅広く活用できるメニューも含んでいる。

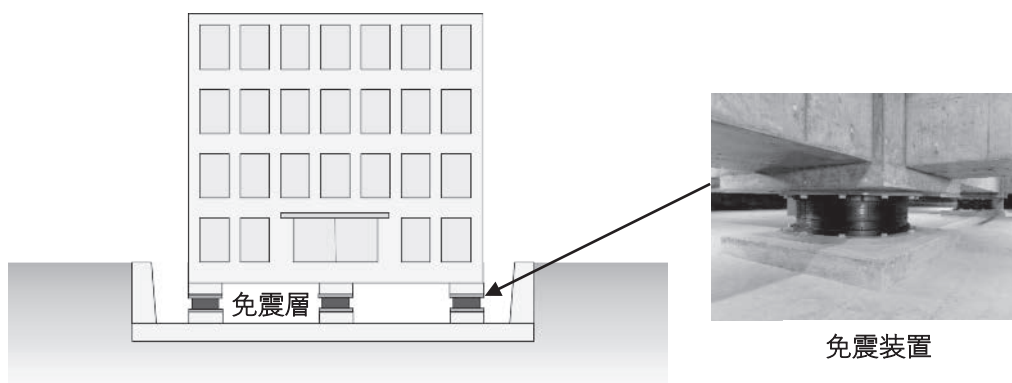


図-1 免震建物イメージ図

2. 「免震建物の総合モニタリングシステム」の概要

本システムが提供する4つのメニューを表一に示す。日常の維持管理用と地震後の健全度推定用のメニューにより構成されている。メニューのうち「免震装置変形遠隔監視」と「免震層モニタリング」は免震構造専用であるが、「画像監視」と「建物健全度推定支援」は免震建物のみならず耐震建物・制振建物にも適用可能である。これらのメニューは、建物管理者などシステムユーザーのニーズに応じて適宜選択する運用となっている。なお、システム実装後にメニューを追加することも可能である。

図一2にシステム構成を示す。メニューに応じた各種センサーを建物内に設置する。いずれのセンサーも設置やメンテナンスが容易なものとなっている。これらのセンサーによる計測データは、管理用パソコン画面で一括監視を行う。また、Webサーバを利用しインターネット経由で遠隔の複数拠点からの確認や、スマートフォンやタブレットでの確認も可能である。図一3に各メニューの画面イメージを示す。

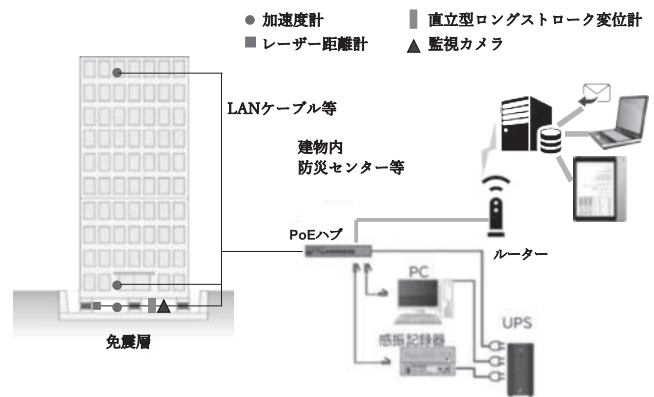
3. システムメニューの概要

以下に、各メニューのシステム概要を示す。

(1) 免震装置変形遠隔監視

本メニューは日常的な免震装置の維持管理のためのものである。施工中から導入し、免震装置の計測管理に活用し、竣工後に維持管理用として継続利用することも可能である。

免震装置の鉛直方向または水平方向の変位量、周辺



図一2 システム構成イメージ

表一 本システムが提供する4つのメニュー

メニュー	日常の維持管理		地震後の健全度推定	
	免震装置変形遠隔監視	画像監視	免震層モニタリング	建物健全度推定支援
機能	日常の免震装置維持管理の一部に活用	日常、地震時の免震層や建物内状況を目視確認	免震層の変位履歴および点検要否推定結果を表示	加速度記録等および建物各階の健全度推定結果を表示
センシング内容	免震装置の変形変動をレーザー距離計で自動計測	監視カメラで免震層や建物内を監視	「直立型ロングストローク変位計」により免震層地震時変位を計測	建物内の加速度計で地震時加速度を計測
適用建物	免震建物用	免震建物以外も適用可	免震建物用	免震建物以外も適用可



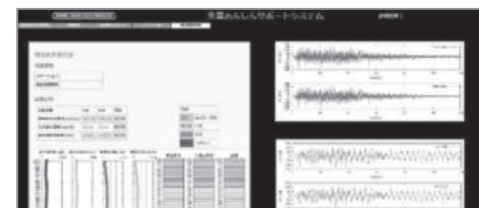
免震装置変形遠隔監視



画像監視



免震層モニタリング



建物健全度推定支援

図一3 システム画面イメージ

温度を自動計測し、免震装置の計測点検に必要な数値を算出、表示する。免震装置は、温度や経年変化の影響で日常的に微小な変形が生じるため、定期的な計測点検が必要とされる。センサーはレーザー距離計を用いており、選定理由として、免震装置は地震時に最大数 10 cm 水平変形するため、その変形を阻害しないように非接触型を選択した。図-4 に示すように鉛直、水平計測とも 2 台ずつセンサーを設置し、計測頻度は 1 時間に 1 回を標準とする。表-2 に計測管理

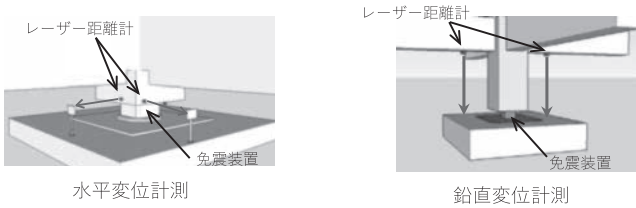


図-4 レーザー距離計の設置イメージ

表-2 計測管理項目

	管理項目	しきい値
水平変位計測	上下フランジ水平ずれ (X, Y 方向) 計測位置 フランジ外周2点	最大水平 ずれ量
	装置平面 フランジ 水平ずれ 装置断面	
鉛直変位計測	上下フランジ間距離 (対角 2 点) 計測位置 フランジ対角2点	出荷検査時高さ からの 最大鉛直変位量
	装置平面 フランジ傾き 装置断面	
	温度補正高さ (20℃換算値) フランジ傾き	同上 最大傾き角度

項目を示す。この項目は (一社) 日本免震構造協会の基準に準拠したものである^{1), 2)}。表中の鉛直変位計測項目のうち、温度補正高さ (20℃換算値) とは、免震装置の長期的なクリープ変形量を把握するため、ゴム部分の熱ひずみの影響を差し引いた数値であり、本システムでは変位と温度の計測値より自動計算する (以降、基準温度補正高さと呼ぶ)。

施工期間中に計測した事例を紹介する³⁾。対象とした建物は、平面規模が 330 m×170 m という長大な平面の、地上 10 階建の基礎免震構造である。長大な平面のため床躯体の乾燥収縮・温度ひずみ等の影響により免震装置の変位量が想定より大きくなるリスクを考慮して、本メニューにより、リアルタイム管理を行った。計測対象装置の平面位置を図-5 に示す。計測対象装置は建物外周を主として合計 15 か所とした。図-6 は、対象装置 A 近傍の免震層内温度と外気温度 (気象庁 HP より)、図-7 は装置の水平変形を示す。この 2 つのデータ照合により、施工中の装置変形は温

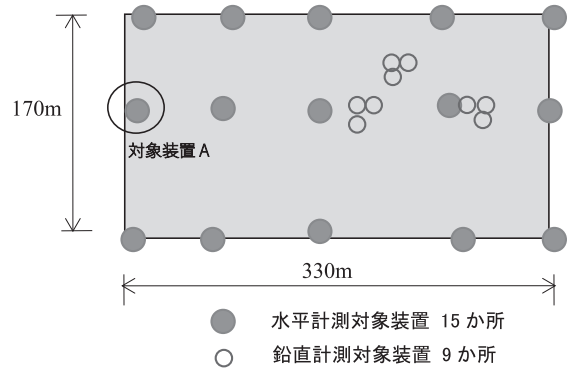


図-5 計測対象装置の平面位置図

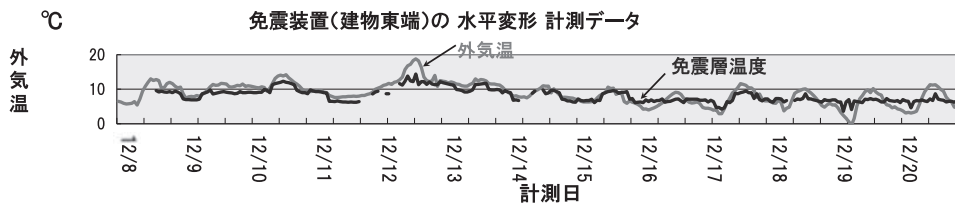


図-6 免震層内温度 (対象装置 A 近傍) と外気温

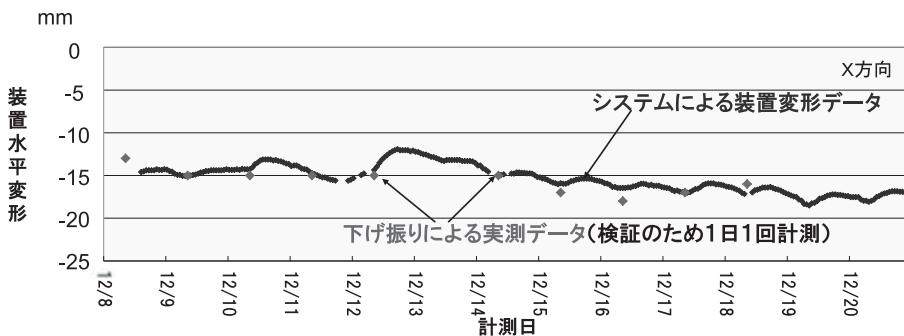


図-7 免震装置水平変形 (建物端部の対象装置 A)

度との相関が強く、免震層直上の床スラブ躯体の温度ひずみに追従していることが想定されたため、その情報を次工程の施工にフィードバックした。また、システムの精度検証として、定期的な下げ振りによる実測値と整合し信頼性を確認した。

本建物では、竣工後も長期モニタリングを行っている。図一8に6年半にわたり鉛直変位を計測したグラフを示す⁴⁾。図中の上のグラフは外気温と免震層内温度、下のグラフは鉛直高さや自動温度補正高さの変動量である。季節変化による気温変動に応じて一定周期で変位変動していることから、免震装置(積層ゴム支承)のゴム部分の温度ひずみによる影響が大きいと考えられる。免震装置の鉛直方向の長期クリープ変形については、関連する調査研究事例は多くあるものの⁵⁾など、免震装置のゴム部分の温度ひずみ成分とクリープ変形成分の正確な案分が難しい。本システムによる鉛直変位と周辺温度の同期データの長期蓄積により、温度ひずみ成分を精度高く把握することができ、長期クリープ変形量の高精度な検証が可能となる。

(2) 画像監視

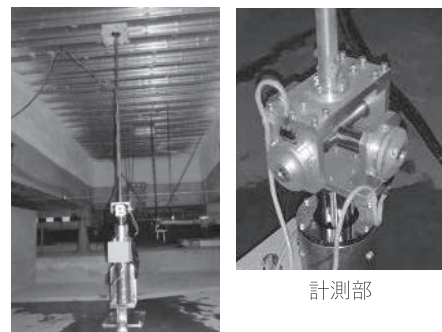
免震装置の外観や免震層内または地震後の建物内の被害状況を監視カメラにより目視確認するメニューである。図一3で示した画像監視の画面は、現地では免震層内は消灯しており前も見えないほど暗い環境であるにも関わらず、投光器の設置により鮮明に免震装置や免震層内の状況が確認できている。これは遠隔地からの維持管理に対しても大変有効な機能である。免震層用の他に、建物室内用にセンサーライト内蔵の監視カメラも選択可能である。これら監視カメラ・投光器の電源は、非常用電源付のパソコンからLANケーブルを通じて給電しており、災害後にカメラの設置箇所が停電で暗転した場合も、監視カメラが稼働し状況確認が可能となり、災害時にも役立つメニューである。

(3) 免震層モニタリング

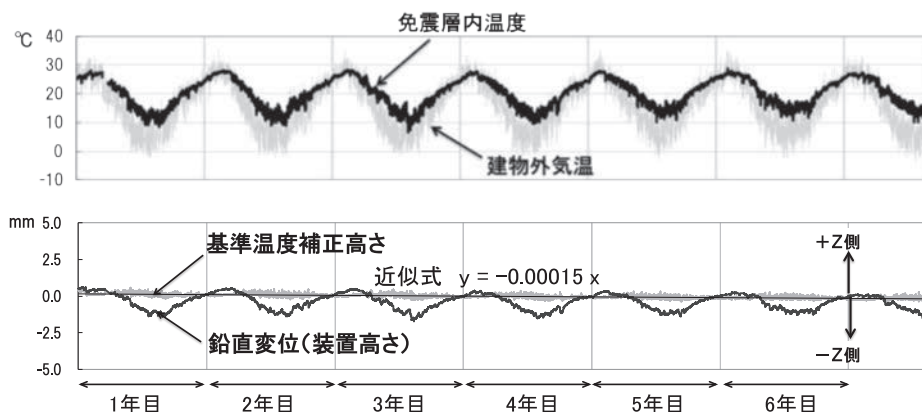
本メニューは、地震時の免震層の変位履歴をデジタル値で記録する「直立型ロングストローク変位計」を用いて、リアルタイムに免震層変位の軌跡図や最大変位量等をパソコン画面に出力する。背景として、大地震後の免震建物の健全性の判断は免震層の最大変形量や変形履歴を把握する必要性があげられる。従来は、免震層内に物理的に変位軌跡を記録する「変位ケガキ計」(写真一1)を設置し、地震後に建物管理者や免震点検技術者が免震層に立ち入り目視確認する運用となっていた。しかし免震層は余震で水平に変形する危険性もあり、また軌跡からの健全性判断が技術的に難しいという課題があった。そこで我々は「直立型ロングストローク変位計」(写真一2)を開発した。免震



写真一1 変位ケガキ計 (従来)



写真一2 直立型ロングストローク変位計



図一8 モニタリング事例 鉛直変位計計測データ

層の変位時刻歴 (X, Y 方向) をデジタル計測し、遠隔したパソコンで確認できる。図-9 に直立型ロングストローク変位計の概要を示す。免震層が地震時に水平変位した場合、図中 (b) に示すように主軸材が X, Y 方向に傾き、その回転量を計測部に設けた回転計を使って計測し、その結果を用いて水平二方向の変位量を算出する仕組みである。

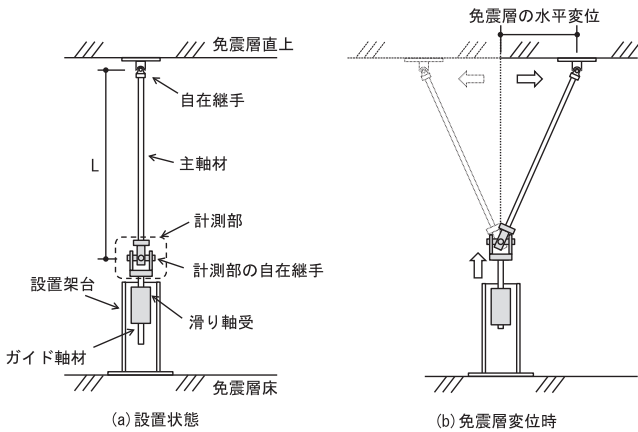


図-9 直立型ロングストローク変位計の概要

(4) 建物健全度推定支援

本メニューは建物内の複数の階に加速度計を設置し、加速度計測値を用いて、直ちに建物各階の健全度 (安全, 要注意, 危険) を推定、その結果を画面表示するものである。図-10 に出力画面イメージを示す。

現在、同様な機能をもつシステムが多数、開発・販売されている。普及の背景に、行政の帰宅困難者対策がある。地震後に極力建物内にとどまるよう、施設管理者に対して早急に建物の安全性に関する判断を行うことを求めている。しかし、現状では建物全体の点検の実施は困難である場合も多く、危険を伴うリスクもある。加えて、施設管理者が構造的な安全性を推定することは難しい。本メニューは、このような課題の解決策の一つとして、導入が進んでいる。

4. おわりに

免震建物を対象に、日常の免震層の維持管理や地震後の建物の健全性を推定支援する機能を備えた「免震

健全度推定結果

地震情報

ステーション	大阪Aビル	地震検知時刻	2018年06月18日 07時58分39秒
--------	-------	--------	-----------------------

診断結果

診断項目	南北成分	東西成分	判定
建物最大加速度 (cm/s ²)	159.1	358.0	要注意
入力最大速度 (cm/s)	11.2	24.4	安全
最大層間変形角 (rad)	1/563	1/541	安全

観測日時		2018年06月18日 07時58分39秒		
階	震度階	最大加速度 (gal)		
		南北成分	東西成分	上下成分
31F	震度5強相当	159.1	209.5	284.3
15F	震度5強相当	148.6	358.0	478.5
B2F	震度5弱相当	98.3	252.8	175.4
長周期地震動階級		大阪Aビル	階級1	
		大阪市北区	階級2	

凡例	
安全	無被害～軽微
要注意	小破
要注意	中破
危険	大破以上

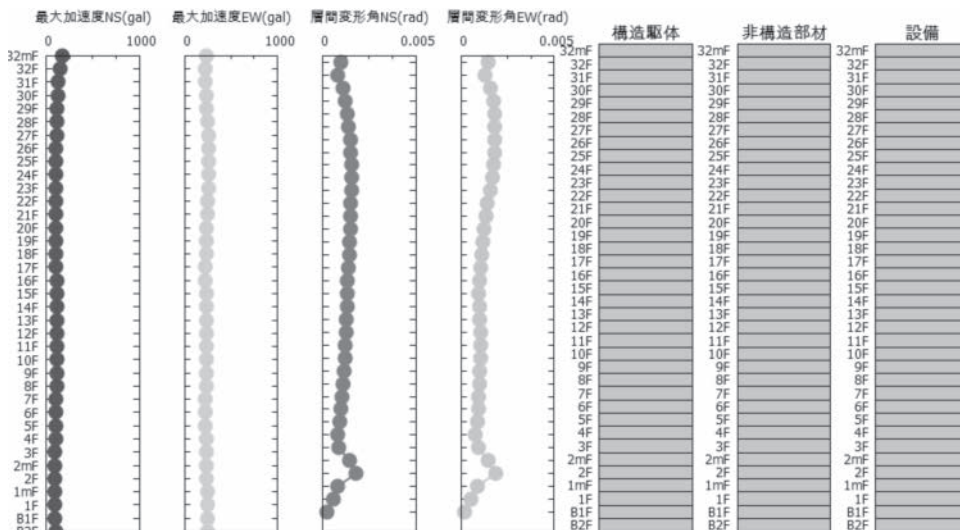


図-10 健全度推定支援出力画面イメージ

の総合的なモニタリングシステム」を開発した。本論では、システムの4つのメニューの概要や導入事例を紹介した。

本システムは、大規模地震に備えた有効なBCP対策の一つと考えている。今後も、建物へのシステム導入を推進し建物や地域の防災力強化に貢献するとともに、地震観測結果のフィードバックによる技術的検証を積極的に推進していく。

JCMA

《参考文献》

- 1) 日本免震構造協会：免震構造施工標準 2021（発行：経済調査会），2021。
- 2) 日本免震構造協会：免震建物の維持管理基準 2022,2022。
- 3) 浜辺，大畑：免震装置変位のリアルタイム遠隔監視システムの開発その1 開発システムの概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 617-618，2014年9月
- 4) 大畑，浜辺：免震装置変位のリアルタイム遠隔監視システムの開発その5 システムによる長期計測結果概要と積層ゴム支承の経年変化に関する分析（続報），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 917-918，2018年7月
- 5) 森田他：天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究（その2）クリープ特性について，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 399-400，2010年9月

【筆者紹介】

浜辺 千佐子（はまべ ちさこ）
 ㈱竹中工務店
 空間・構造エンジニアリング本部
 シニアチーフエンジニア



吉澤 睦博（よしざわ むつひろ）
 ㈱竹中工務店
 技術研究所 環境・社会研究部
 主席研究員



曾根 孝行（そね たかゆき）
 ㈱竹中工務店
 技術研究所 建設基盤技術研究部
 グループ長

