

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 高架橋柱の地震被害を素早く検知する

鉄道は、地域社会が活動するために必要な社会基盤の一つであり、大規模な地震が発生した後においても、早期に運転を再開することが求められます。早期に運転を再開するためには、地震後の検査において構造物の損傷程度を迅速に検知することが必要となります。ここでは、鉄道構造物として多く用いられている鉄筋コンクリートラーメン高架橋について、地震時の柱の最大応答部材角を測定することで、地震後の損傷程度を迅速に検知することができるモニタリング手法の概要と活用方法を紹介します。



**岡本 大**  
Masaru Okamoto  
構造物技術研究部  
鋼・複合構造研究室長



**仁平 達也**  
Tatsuya Nihei  
前 構造物技術研究部  
鋼・複合構造研究室  
主任研究員

## はじめに

大規模な地震が発生した後に迅速に構造物の損傷状態を把握し、列車運転再開までの休止時間（ダウンタイム）をできるだけ短縮することが求められています。一般に、地震後の構造物の被害調査は、随時検査<sup>1)</sup>として徒歩巡回による目視などで行われます（図1）。このとき、検査員が確実に構造物の損傷状況を把握することが重要であり、そのためにはある程度の時間が必要となります。また、鉄道の高架橋として多く用いられている鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン高架橋に対しては、1995年に発生した兵庫県南部地

震以降、柱の鋼板巻立て補強（※参照）が実施され、目視による損傷状況の確認が困難なRC柱が増えています。このような背景から、鉄道総研では、大規模な地震が発生した後に、数多く存在するRCラーメン高架橋の損傷状態を迅速に検知できる「地震時損傷検知

### ※ 鋼板巻立て補強

既設のRC柱を鋼板で取り囲み、鋼板と既設柱の間にモルタルなどを充填して鋼板と柱の一体化を図る耐震補強工法です。柱を鋼板巻立て補強することにより、地震によって高架橋が急激に崩壊することを防ぐことができます。

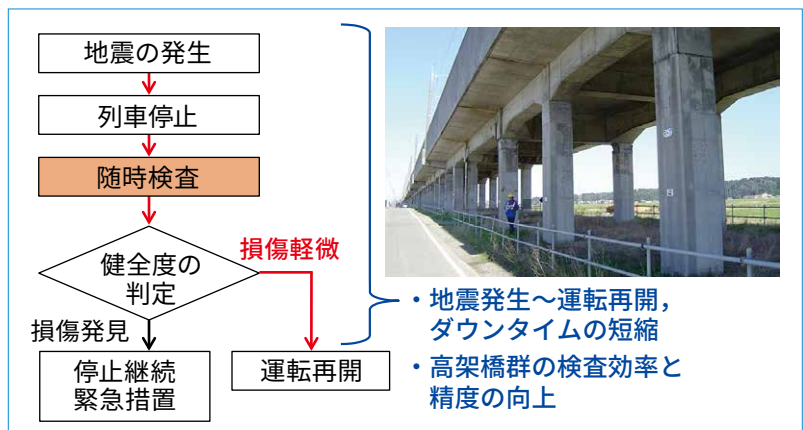


図1 地震後の構造物の検査

システム」を開発しました。ここでは、本システムの概要について紹介します。

### 地震によるRCラーメン高架橋柱の損傷

これまでに発生した大規模地震によって、多くの鉄道構造物が被害を受けてきました。そして、それらの経験を基に、損傷を受けたとしても崩壊などの壊滅的な被害を受けないように、柱のせん断破壊(☞参照)を防止して曲げ破壊となるように耐震設計法が見直されました。

曲げ破壊を生じる柱については、地震時に柱端部に生じる柱の最大の傾き(最大応答部材角 $\theta$ )と、柱に発生する損傷の程度(損傷レベル)の関係はおおむね把握できており、**図2**に示すとおりとなります<sup>2)</sup>。例えば、軸方向鉄筋が降伏するY点(部材角 $\theta_y$ )までは損傷レベルが1となり、目立った損傷はひび割れが発生する程度であり、列車を運行することが可能と判断できます。一方、M点(部材角 $\theta_m$ )を超え、損傷レベル3、4となると、軸方向鉄筋の座屈とともに耐力低下が生じており、何らかの措置をしないと列車を運行することが難しいと判断されます。すなわち、最大応答部材角を測定することで、目視を行わずとも柱の損傷レベルを推定することが可能となるため、列車運行の可否判断を迅速に行えるようになります。

#### ☞ せん断破壊

兵庫県南部地震で高架橋に甚大な被害をもたらしたのは柱のせん断破壊です。せん断破壊は、地震の影響などで横方向(水平方向)に力を受けたときに柱の斜め方向にひび割れが発生し、場合によっては高架橋が崩壊に至ってしまう破壊形態です。せん断破壊は、斜めひび割れが拡大すると急激に耐荷力が低下し、もろい破壊となるのが特徴です。

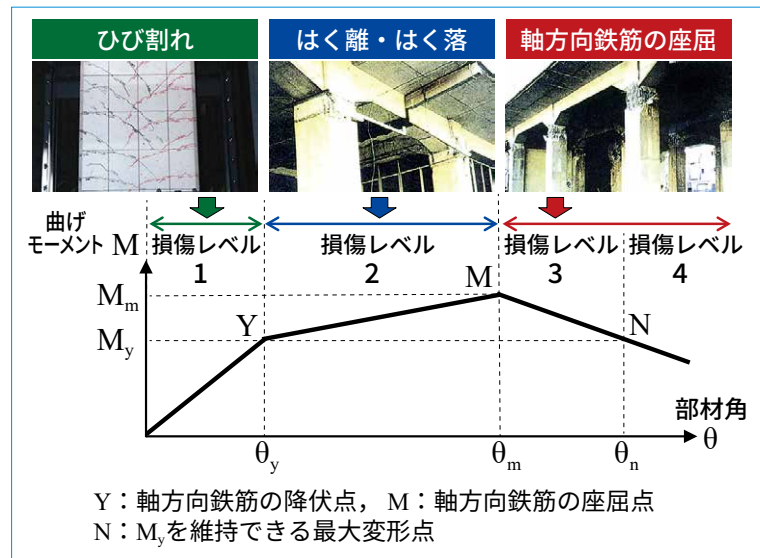


図2 RC柱の部材角と損傷レベル

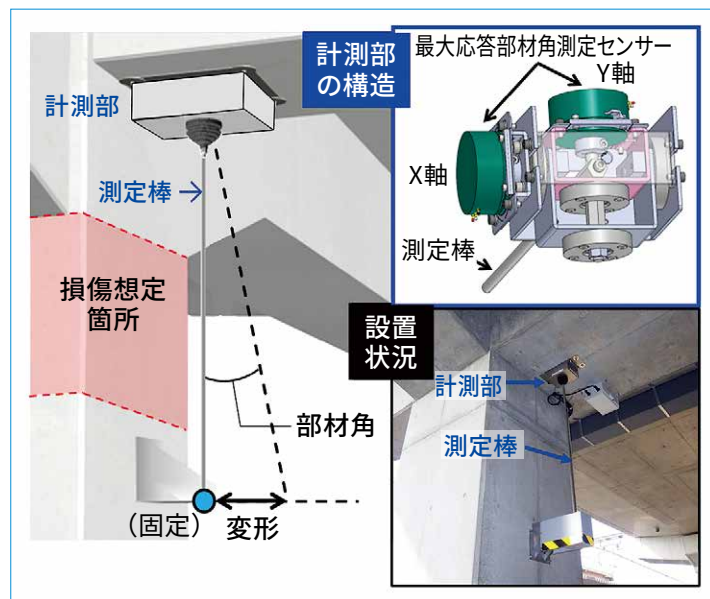


図3 最大応答部材角測定装置

### 最大応答部材角測定装置

前述のように、目視による確認を行わなくとも、迅速な列車運行の可否判断ができるようにすることを目的として、高架橋柱の最大応答部材角測定装置<sup>3)</sup>を開発しました。最大応答部材角測定装置は**図3**に示すように、RCラーメン高架橋のほりに計測部を固定し、計測部に取り付けた測定棒の他端を柱に設置した治具に固定します。計測部には、X、Y(橋軸方向、橋軸直角方向)の2方向の最大応答部材角を測定できるようにセンサーが組み込まれており、地震によって生ずる柱の傾きに測

定棒が追従することで、地震時の柱の部材角を測定することが可能となります。なお、測定部と測定棒を取り付けた治具は、**図2**の損傷レベル3の写真に示すような、柱の損傷が大きくなると想定される範囲(損傷想定箇所)を挟むように設置しておきます。

モニタリングでは、電源の確保が課題となる場合がありますが、本装置は、太陽光発電パネルによりバッテリーに蓄電した電力を用いることとしています。そして、構造物の応答加速度が100gal(1m/s<sup>2</sup>)程度以上になると計測を開始し、測定時間を60秒程度と限

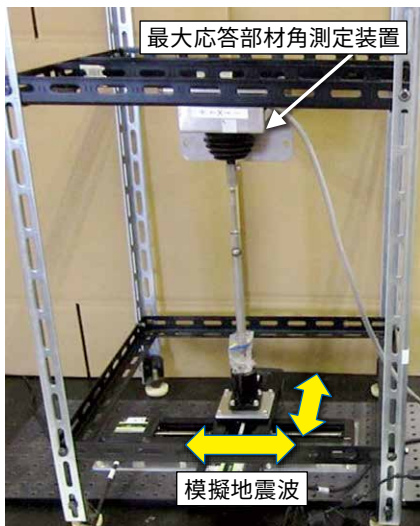


図4 模擬地震波を入力した実験

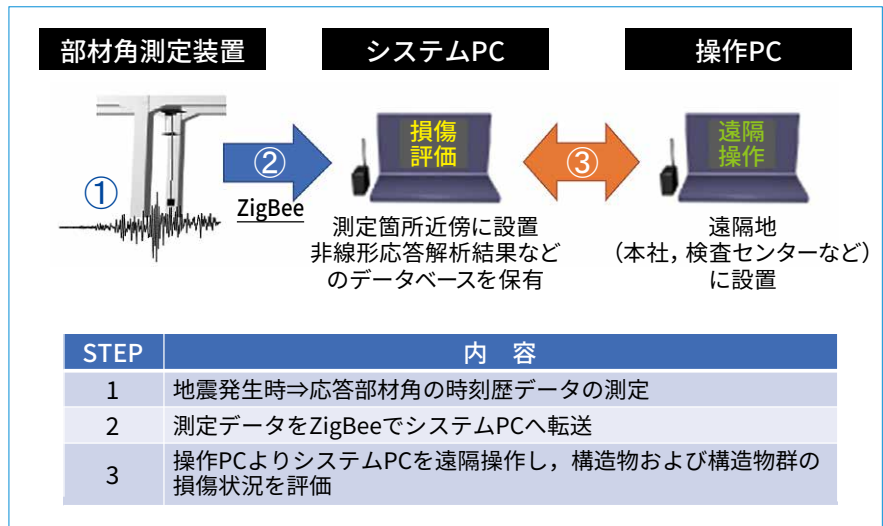


図5 地震時損傷検知システムの全体概要

定することで消費電力を抑えています。

部材角の測定精度については、図4に示すような模擬地震波を動的に与えた実験により、入力値の最大値と最大応答部材角測定装置で測定した最大値が精度よく整合していることを確認しています。

### 最大応答部材角測定装置を用いた地震時損傷検知システムの全体概要

図5に、最大応答部材角測定装置を用いた地震時損傷検知システムの全体概要を示します。

①RCラーメン高架橋の柱に設置した最大応答部材角測定装置により、地震時における線路方向・線路直角方向の2方向の応答部材角を測定します。

②測定データは、伝送可能距離は短いものの、消費電力が小さいZigBeeなどの無線通信を用いて測定装置近傍に設置したパソコン(システムPC)に自動的に伝送します。システムPCには、図2に示すような曲げモーメントと部材角の関係を含む対象高架橋の非線形解析結果を事前に準備しておきます。伝送された応答部材角の測定データと、システムPC内の解析結果を比較することで、高架橋柱の損傷レベル

を特定します。また、図6に示すように測定を行う高架橋を選定し、その測定結果を基に、測定を行っていない高架橋の損傷レベルを推定します。損傷レベルの推定方法については後述します。

③システムPCは、測定装置と遠隔地の事務所(例えば、鉄道事業者の本社や検査センターなど)を中継する役割も担っており、システムPCは、遠隔地に設置したPCから、インターネット経由で操作することができます。

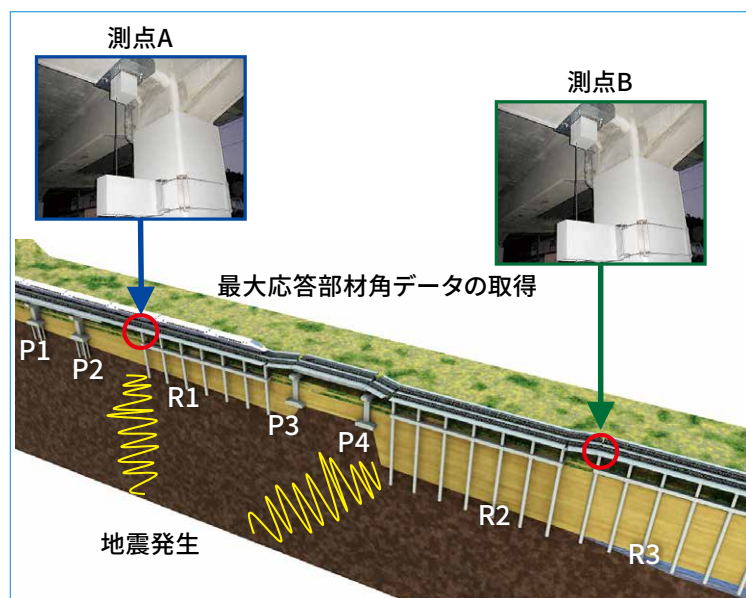


図6 高架橋群と測定点のイメージ

### 高架橋柱の損傷レベルの推定方法

高架橋群全体では非常に多くの柱が存在しています。そのため、すべての柱に測定装置を設置することは現実的ではありません。本システムは、測定装置を設置した数本の柱の測定結果から、数kmにも及ぶ高架橋群を構成する各々の高架橋の損傷レベルを推定できる点に特徴があります。

地震の揺れの性質は、「振幅」と「周期」によって分けて考えることができます。「振幅」は地震の揺れの大きさ



図7 高架橋の形状の例

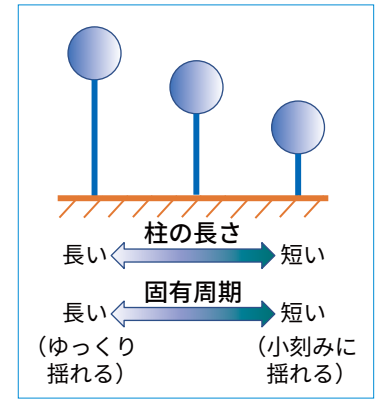


図8 柱の長さとの固有周期の関係



図9 地震時損傷検知システムを構築した例

をあらわし、「周期」は地震の揺れが往復するまでにかかる時間です。一方、高架橋は、図7に示すように、柱の短いものや長いものなど、形状が異なり、重量もさまざまです。そして、これらの違いによって、高架橋ごとに地震によって揺れやすい固有の周期をもっており、これを「固有周期」とよんでいます。固有周期は、図8に示すように、仮に重量や柱の断面寸法が同一であれば、柱の長さが長くなると固有周期も長くなり、ゆっくり揺れます。また、柱の長さが短くなると固有周期も短くなり、小刻みに揺れるようになります。そして、地震波に高架橋の固有周期と一致する周期の成分が多く含まれると高架橋の揺れが大きくなり、損傷も大きくなります。

本システムでは、固有周期が異なる何本かの高架橋柱の応答部材角を測定

し、固有周期と応答部材角の関係を直線補間することによって、測定を行っていない高架橋柱の応答部材角を算定します。そして、計測を行った柱と同様に、算定した応答部材角と事前に計算しておいた解析結果から各高架橋の損傷レベルを推定します。

### 地震時損傷検知システムの試験運用

図9に、実際のRCラーメン高架橋を対象に、地震時損傷検知システムを構築した例を示します。最大応答部材角測定装置の設置位置から約40m離れた箇所にシステムPCを設置し、測定装置には、測定データ伝送のために太陽光発電パネルによって電力を供給しました。そして、遠隔地に設置した操作PCにより、システムPCのデータを確認できるようなシステム構成と

しました。

本システムの稼働状況の確認を行う目的で、1日1回の測定と測定データの伝送を行い、数年にわたる測定を行っていますが、太陽光発電パネルを設置したことにより、バッテリーは大きな電圧低下を生じず、良好にデータを取得できていることを確認しています。

### おわりに

ここでは、高架橋の地震時に応答する柱の最大の傾きである最大応答部材角を測定することで、遠隔地より高架橋の損傷状態を検知する手法について紹介しました。今後も、引き続き検討を進め、提案した方法の実構造物への適用を進めていきたいと考えています。なお、本記事に関する検討の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。**RRR**

### 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物、丸善出版、2007
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善出版、2004
- 3) 仁平達也 石原匠、濱上洋平、岡本大、阿部圭太、西岡英俊：大規模地震後の早期復旧に向けた高架橋の地震時損傷検知システム、鉄道総研報告、Vol.32、No.2、pp.35-40、2018