

# 地震時に高架橋柱の損傷を検知する

松本 光矢

構造物技術研究部  
(コンクリート構造 研究員)

曾我部 正道

鉄道力学研究部  
(構造力学 主任研究員)

谷村 幸裕

構造物技術研究部  
(コンクリート構造 研究室長)



まつもと みつや



そがべ まさみち



たにむら ゆきひろ

## はじめに

強い地震が発生した場合、鉄道構造物の損傷の有無を把握するために、直ちに随時検査が実施されます。随時検査では、目視を中心とした調査が実施され、検査員が徒歩巡回を行って構造物の被害を確認します。この検査結果によって、安全が確認されてから運転が再開されることとなりますが、徒歩巡回による目視調査にはある程度の時間を要し、被害が予想される範囲の広さによっては、運転再開までかなりの時間を要する場合があります。

一方、鉄筋コンクリート高架橋では、1995年兵庫県南部地震の発生以降に耐震補強が進められ、柱には鋼板巻立て等の耐震補強が実施されています。これにより構造物の耐震性は向上しましたが、柱を鋼板で覆ってしまうため、柱の損傷を地震後に目視で確認することが困難となっています。

図1は、柱を鋼板巻立て補強された高架橋が地震を受け



図1 柱が鋼板巻立て補強された高架橋の地震後の状況

た例で、地震直後の状況です。地表面に大きな地割れが発生するほどの強い地震であり、高架橋の損傷が懸念されます。しかし、柱が鋼板巻立てされているため目視調査ができず、損傷状況を確認するためには鋼板の取り外しが必要となり、運転再開までに長い時間が必要と考えられます。

また、耐震補強されていない柱や、鋼板巻立て以外の工法でコンクリート表面が観察できる場合でも、随時検査を目視のみに依存すると、すべての高架橋を徒歩巡回で調査することになり、効率が悪く復旧時間の短縮を図ることは困難です。このような背景から、目視調査に頼らず、地震時に高架橋柱の損傷を早期に検知する方法が必要となりました。

## 鉄筋コンクリート柱の地震時損傷

地震の揺れによって高架橋が変形しますが、この変形は主に柱の傾斜によって生じ、柱は地震による損傷を受けやすい部位となっています。柱の変形や損傷は上下端部に集中し、大規模地震時には損傷が顕著となる場合があります。そして、既往の研究により、柱の傾斜する角度(以下、部材角といいます)と柱端部の損傷程度には関係があることが知られています。従って、地震時における柱端部の部材角を測定することができれば、地震による高架橋の被害を定量的に把握することができ、復旧に必要な時間を短縮することが可能となります。

図2は、鉄筋コンクリート柱の地震による損傷事例です。地震により生じる部材角が小さい場合はひび割れ等の軽微な被害にとどまりますが、ある限界以上の部材角が生じると、かぶりコンクリートのはく離、はく落が生じ



(a)コンクリートのはく落



(b)軸方向鉄筋の変形

図2 鉄筋コンクリート柱の損傷事例

ます(図2(a))。さらに大きな部材角を生じると、軸方向鉄筋が座屈して変形します(図2(b))。鉄筋の変形が進行すると柱の耐力が低下し、さらに生じる部材角が大きくなると高架橋全体が大変形してしまいます。図2は、鉄筋コンクリート柱の例ですが、鋼板巻立てされたコンクリート柱においても、同様に部材角と損傷との関係があることが知られています。したがって、地震時に生じた部材角を測定し、目視によることなく高架橋の損傷を知ることができれば、運転再開に要する時間を大幅に短縮できると考えられます。

そこで、筆者らは、地震時の部材角を測定する応答部材角測定装置の開発を進めてきました。本稿では、部材角測定装置とそれをを用いた損傷レベルの推定方法について紹介します。

### 部材角測定装置

図3に部材角測定装置の概略図を示します。装置には2つのピークセンサーが組み込まれています。ピークセンサーは、その名のとおりに、応答変位のピークのみを記憶する装置です。測定用の駒が正負の最大応答変位を記録する

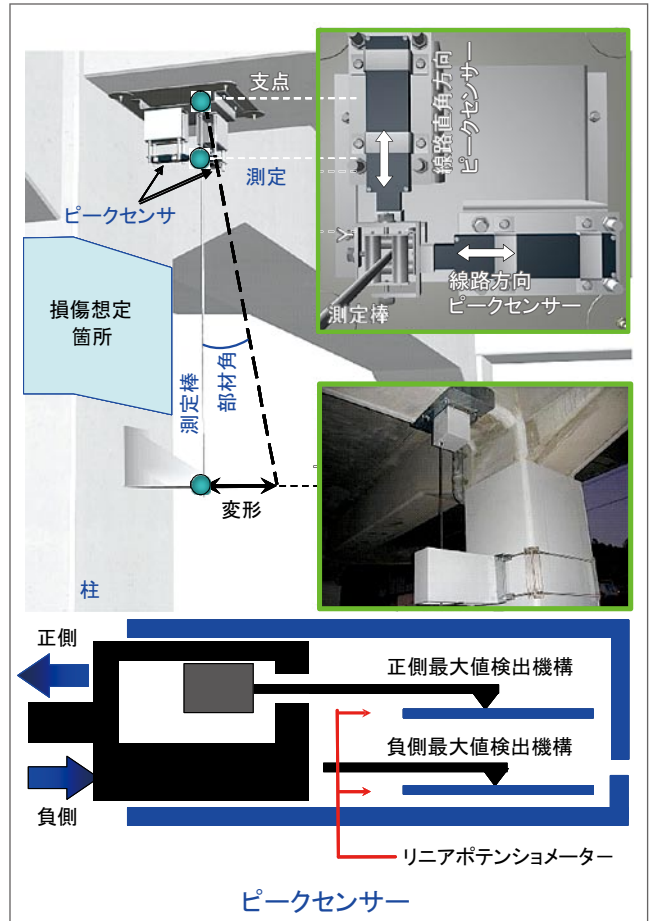


図3 部材角測定装置の概略図

ようになっており、震災後にリニアポテンシオメーターの電圧値を測定することにより、ピークセンサーの最大応答変位を知ることができます。

ピークセンサーの可動領域は $\pm 10\text{mm}$ であるため、図に示したようなテコの原理を用いて、高架橋の部材角を測定する装置を考案しました。この装置は、任意方向の構造物の揺れを線路方向と線路直角方向の2方向の成分に分割して、その部材角を測定することができます。

このシステムの特徴としては、常時測定する必要がない場合には、装置自体は電源を必要としないこと、設置コストが安いこと、また機械式センサーであるため耐久性や信頼性が高いことなどが挙げられます。

図4に伝送システムの概要を示します。前述の部材角測定装置を複数設置することにより線区全体の伝送システムを構築します。測定結果は地震直後に無線LANネットワークで中継されるか、RF-IDタグで収集することとなります。

### 部材角測定装置の測定精度

部材角測定装置の性能確認試験としては、専用の実験フレームを使用した静的実験、実物大模型を使用した静的実

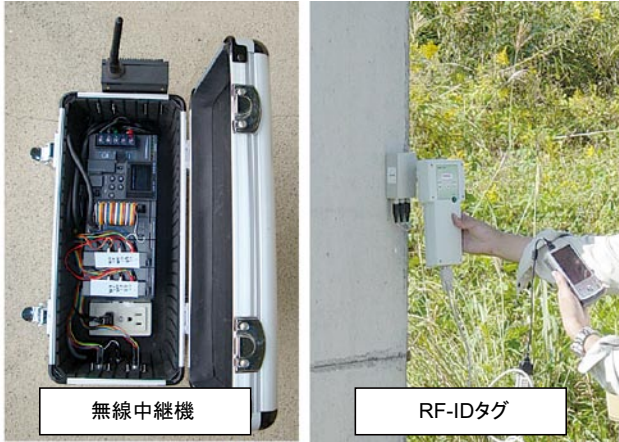
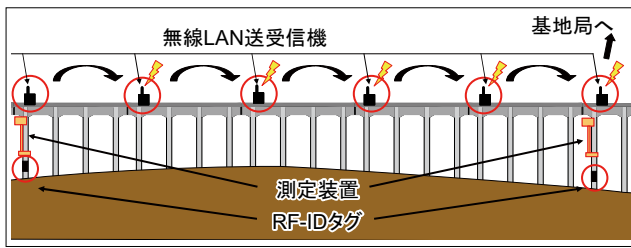


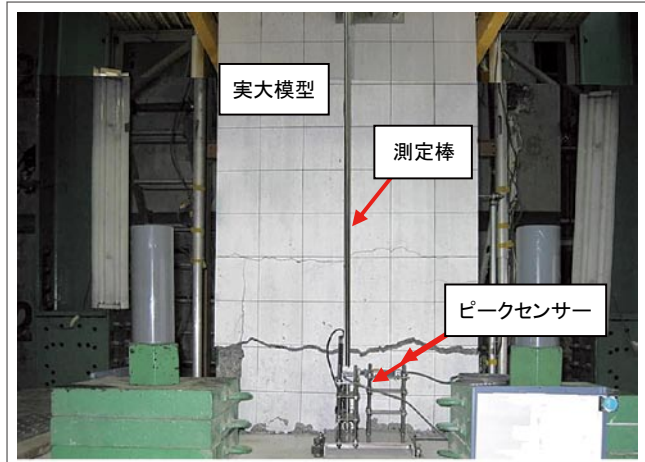
図4 伝送システムの概要

験、振動台を用いた動的実験を実施しました(図5)。図6に振動台実験の結果を示します。図から部材角測定装置は、動的応答における正負のピーク値を的確に測定できていることが分かります。

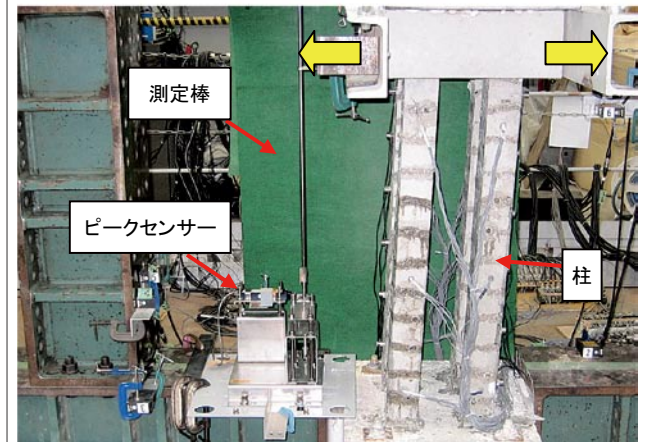
図7に部材角測定装置の精度を示します。図から実応答部材角 $\theta_{ds}$ が0.01rad以下の場合には測定部材角と実応答部材角にばらつきがあることがわかります。この誤差は、装置のテコ機構及びピークセンサーの両者に存在する機械的な隙間に起因して生じています。しかし、実際の鉄道高架橋の柱は、0.01rad以下ではほぼ無損傷となりますので、0.01rad以上の領域に限って見ますと、測定値誤差は概ね $\pm 10\%$ 以内であり、良好な性能を有していることが分かります。従って、部材角測定装置は実用上十分な精度を有していると考えられます。

### 高架橋群における部材角測定装置の配置

このような部材角測定装置を全ての構造物に設置することができれば、高い精度で損傷レベルを把握することが可能となります。一方で、装置が設置されていない構造物の損傷レベルを推定する判定アルゴリズムを導入することができれば、より安価に、かつ少ない装置で効率的な損傷の把握が可能となると考えられます。そこで、限られた高架橋柱の部材角の測定結果から他の高架橋柱の応答部材角を推定する方法を提案し、実際の新幹線高架橋を模擬したモデル線区を用い、数値解析による検証を行いました。



(a) 実大模型を使用した静的実験



(b) 振動台実験

図5 実験の状況

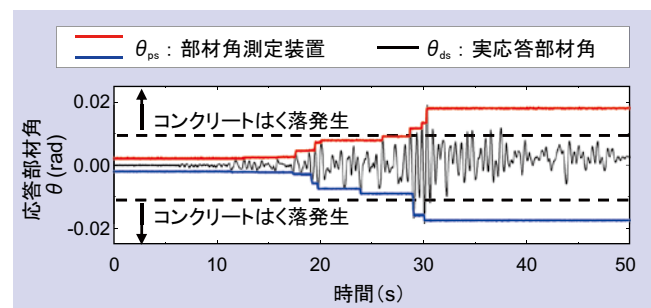


図6 振動台実験結果

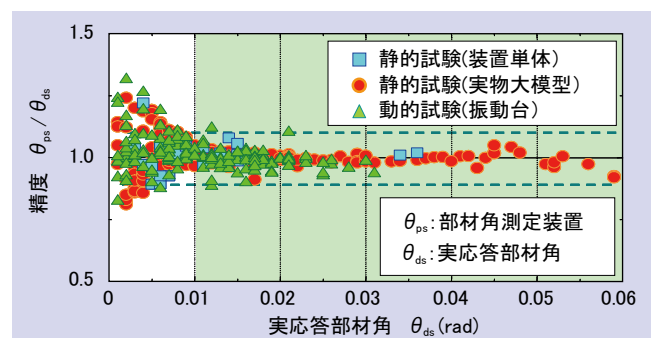


図7 部材角測定装置の測定精度

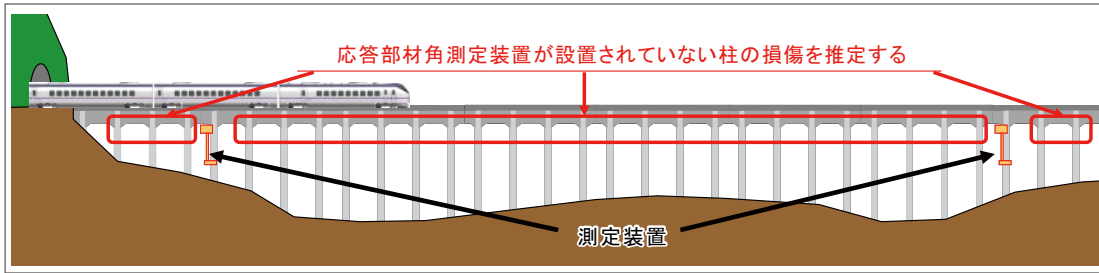


図8 部材角測定装置の配置概念図

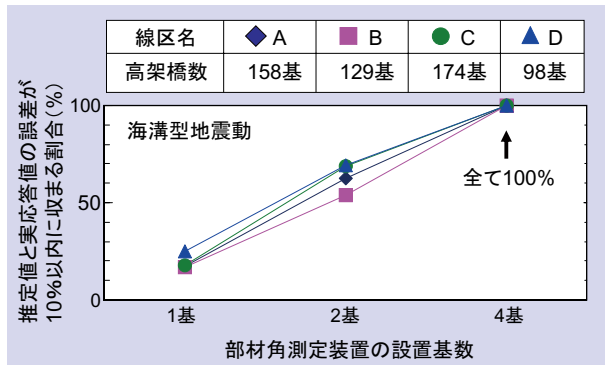


図9 数値実験の結果

図8に、連続する高架橋群における部材角測定装置の配置概念図を示します。多数の柱のうち、いくつかの柱に部材角測定装置を設置し、地震時の応答部材角を測定します。その他の柱については、事前解析により各高架橋の振動特性と水平耐力を把握しておき、地震時に測定された部材角から地震動特性を推定し、推定された地震動特性を用いて各高架橋柱の応答部材角を推定します。

部材角測定装置の設置基数と推定精度の関係に関する数値実験を行っています。この例では、モデル線区を4種類とし、それぞれの線区で諸元が異なる高さ7.5m～10.0mの高架橋がさまざまな組み合わせで、平均長さ5kmに渡り連続しているとして設定します。まず、各高架橋の動的非線形解析を実施して、得られた値を地震動に対する実際の応答値とします。部材角測定装置を設置する高架橋は、高さ8.5mの高架橋に1基とした場合、高さ7.5m, 10.0mの2基とした場合、高さ7.5m, 8.5m, 9.0m, 10.0mの4基とした場合を設定し、これらの高架橋の解析結果を測定装置による測定値とします。測定値から他の高架橋の応答の推定値を算定し、実際の応答値との推定誤差を計算します。図9は、それぞれの線区において、推定誤差が10%以内となった高架橋数の割合を示したものです。図より、部材角測定装置の設置数が増えると誤差が10%以内となる割合が増えることがわかります。

本検討におけるモデル線区の延長は平均で5kmですが、部材角測定装置を4基配置すれば高い精度で柱の損傷を推定できることがわかりました。



図10 新幹線高架橋への部材角測定装置設置状況

### 実構造物への設置

図10に部材角測定装置の新幹線高架橋への設置状況を示します。現在、本装置を設置し、耐久性及び耐鳥獣害試験を実施しています。設置してから約2年が経過していますが、現在のところ適切なデータ取得を維持しています。

### おわりに

今後は、部材角測定装置の改良、耐久性試験を行うとともに、設置個所に関するシミュレーションの深度化を図っていく予定です。

本研究の一部は国土交通省からの補助金を受けて実施されました。[RRR]

### 文献

- 1) 鈴木哲也, 仁平達也, 曾我部正道, 宮本則幸, : 鉄道RCラーメン高架橋の損傷レベル検知システムの開発, コンクリート年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.721-726, 2007
- 2) 松本光矢, 曾我部正道, 仁平達也, 谷村幸裕: 応答部材角測定システムを用いた鉄道高架橋の被害判定手法, J-RAIL2008, pp.395-398