# RCラーメン高架橋の常時微動による 損傷検知に関する解析的検討

坂下 克之1・畑 明仁2・山本 悠人3

1正会員	大成建設株式会社	技術センター	(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)		
katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp					
2正会員	大成建設株式会社	技術センター hata@o	(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1) ce.taisei.co.jp		
3正会員	大成建設株式会社	技術センター	(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)		
ymmyuz01@pub.taisei.co.jp					

RCラーメン高架橋を対象として,常時微動による損傷検知に関する解析的検討を実施した.損傷として 橋脚下端の塑性ヒンジ化を考え,損傷なし(Case0),損傷が構造物軸方向に偏った場合(Case1),損傷が 構造物軸直角方向に偏った場合(Case2)の3ケースを設定し,各ケースに対し,固有値解析を実施して振 動モードを把握した後,常時微動を模擬したランダム波を基部より水平2方向同時入力した.主要点の加 速度伝達関数を比較することにより,Case0~Case2の各ケースの差異が伝達関数に与える影響を検討した. これらの結果から,常時微動モニタリングによる主要点の加速度伝達関数の分析により,損傷エリアの概 略の分布傾向の把握が可能なことがわかった.

Key Words : RC viaduct, monitoring, microtremor, damage detection, eigenmode, transfer function

# 1. はじめに

現在内閣府のSIPをはじめとして,社会インフラへの モニタリングシステム導入へ向けた研究が進められてい る<sup>1)2</sup>.

地震による構造物部材の損傷の発生を考えたとき,た とえば複数の橋脚を有するRCラーメン高架橋の場合, 各橋脚は設計的には同一であっても,材料強度のばらつ きや地盤条件のばらつき等により,特定の橋脚に損傷が 生じることが考えられ,また目視では損傷程度が明確に わからない場合も多い.

常時微動計測を利用した地震や経年劣化に伴う橋梁等 土木構造物の損傷評価に関する研究は多いが<sup>例えば3)~0</sup>, 固有振動数の変化のみに注目したものが多く,3次元的 に分布する部材要素に対する損傷エリアの絞込みに言及 したものは少ない.

そこで本論文ではRCラーメン高架橋を対象として, 常時微動による損傷検知に関する解析的検討を実施した. 3次元フレームモデルに常時微動を模擬したランダム波 を基部より水平2方向同時入力し,主要点の伝達関数を 分析することにより,損傷エリアの分布傾向や絞り込み 評価について検討した.

#### 2. 検討条件

#### (1) 検討対象構造物および解析モデル

検討対象構造物は上部梁・中間梁・橋脚よりなる架空 の連続桁RCラーメン高架橋1ブロック分の3径間区間と



図-1 検討対象構造物解析モデル

する.部材断面形状は、上部梁・中間梁は幅800mm×高 さ1200mm,橋脚は1000mm×1000mmとする.検討対象 構造物の3次元フレーム解析モデルを図-1に示す.境界 条件は、上部橋軸方向梁の両端は自由、橋脚下端は全自

<b>表-1</b> 物性值				
ヤング率(kN/m <sup>2</sup> )	25.0×10 <sup>6</sup>			
ポアソン比	0.2			
単位体積重量(kN/m³)	24.0			
減衰	0.05			

由度固定とする.

上部梁・中間梁・橋脚とも梁要素でモデル化する. RC初期剛性としての物性値を表-1に示す.本論文では 常時微動による微小応答を対象とするため,いずれの梁 要素も初期剛性による線形材料として扱う.

スラブの剛性は考慮しないが、スラブおよび舗装重量 として、幅10m、厚さ35cm、単位体積重量23kN/m<sup>3</sup>分を、 上部梁と橋脚の格子位置節点8箇所に集中質量として配 置する.



各図3番目・4番目の項目の%はそれぞれ橋軸方向・橋軸直角方向の有効質量比



図-3 固有値解析結果 固有モード

#### (2) 検討ケース

本論文の目的は、地震等により構造物の一部が損傷を 受けた場合、その後の常時微動による応答から損傷箇所 を特定できるかを解析的に検討することである.ここで は損傷として、橋脚下端が塑性ヒンジ化した状態を考え る.

検討ケースとして図-2に示す3ケースを設定する. Case0は地震を受ける前の健全な状態を想定する損傷な しの場合, Case1およびCase2は地震により損傷が発生し た後の状態を想定した,8箇所の橋脚下端のうち4箇所が 塑性ヒンジとなった場合であるが,Case1は損傷が構造 物軸方向に偏った4箇所に発生した場合,Case2は損傷が 構造物軸直角方向に偏った4箇所に発生した場合である.

解析モデル上は、塑性ヒンジ部は回転フリーのピン結合とする.またCaselおよびCase2においても梁要素は全て初期剛性の線形材料とする.

#### 3. 固有值解析

前章で示した3次元フレーム解析モデルに対して固有 値解析を実施する.本章および次章の解析には,解析コ ードTDAP III<sup>7)</sup>を使用する.

結果として、図-3に各ケースの固有モードを3次まで 示す.いずれのケースとも3次モードまでは、橋軸方向 卓越モード、橋軸直角方向卓越モード、回転卓越モード のいずれかとなっている.

1次モードは、Case0は橋軸方向卓越モード、Case1は橋 軸直角方向卓越モード、Case2は橋軸方向卓越モードで ある.ただしCase1およびCase2については、損傷箇所の 振動方向に対する非対称性から、並進に加えて回転も生 じる.Case1およびCase2で1次モードの卓越方向が異なる のは、上記のように並進に加えて回転が生じるモードで あるため、回転慣性の抵抗により固有振動数が低下して 1次モードとなったものと推測される.

2次モードは、Case0は橋軸直角方向卓越モード、Case1 は橋軸方向卓越モード、Case2は橋軸直角方向卓越モー ドである. Case1およびCase2については、損傷箇所の振 動方向に対する非対称性はないので、並進のみであり回 転は生じない.

3次モードはCase0, Case1, Case2とも回転卓越モード となっている.ただしCase1およびCase2については,損 傷箇所の振動方向に対する非対称性から,回転に加えて わずかに並進も生じる.

#### 4. 常時微動応答解析

#### (1) 解析条件

前章では各損傷パターンに対する固有モードを把握す ることができたが、実際のモニタリングでは固有モード が直接わかるわけではなく、得られるのは各計測点の応



図-4 入力地震動



答波形である.そこで本章では、常時微動による複数の 計測点の応答から固有モードを評価し、損傷箇所の絞込 みにつなげられるかどうかを検討する.

3次元フレームモデル各ケースに対して,橋脚下端に 常時微動を想定した加速度を橋軸方向・橋軸直角方向の 2方向に同時入力した時刻歴応答解析を実施する.橋軸 方向と橋軸直角方向では入力地震動は異なるものを設定 するが,8箇所の橋脚下端の入力地震動は同一とする.

入力地震動は継続時間163.84秒( $2^{14}$ ステップ×時間間隔 0.01秒)とし、橋軸方向・橋軸直角方向それぞれについ て、周波数領域における各振動数(1/163.84Hz刻み)で、 振幅については平均値1.0・変動係数0.2の対数正規乱数、 位相については $0 \sim 2\pi$ の一様乱数を与え、逆フーリエ変 換により時刻歴波形を作成する.図-4に設定した入力地 震動を示す.

なお本論文においては、常時微動を対象とするため前



図-6 伝達関数出力位置

章で述べたように解析モデルは線形であること,次章で 示すように分析は各点の応答の比率である伝達関数で行 うことから,入力地震動レベルは結果に影響しない.し たがって入力地震動や次節以降の応答の大きさの絶対値 については言及しないこととする.

#### (2) 解析結果

詳細な分析は主要点の伝達関数で行うが、参考として 応答波形の一例を示しておく.図-5に凡例に示す代表点 の橋軸直角方向の応答加速度波形を0.0~15.0秒を抜粋し て示す.入力地震動に対して、Case0~Case2は特定の振 動数が卓越して応答している様子がわかる.また周期的 に振幅が増減するうなりのような現象も見られる.

図-6に示す4箇所の出力点に対して,橋軸方向入力に 対する橋軸方向応答の加速度伝達関数を2.0~4.5Hzを抜 粋して図-7に示す.伝達関数は,入力および各点の加速 度時刻歴波形をフーリエ変換して,各振動数成分におい て応答の複素振幅を入力の複素振幅で除して振幅と位相 に変換したものであり、それぞれ応答倍率と位相遅れを 表す.

まずCaseOについて見ると、出力点A~Dは全て同じ応 答であり、約3.6Hzに共振点がある.この振動数は図-3 で示した橋軸方向卓越モードである1次モードの固有振 動数である.

Caselについて見ると、共振点振動数は約3.0Hzとなる. この振動数は図-3で示した橋軸方向卓越モードである2 次モードの固有振動数である.ただし特徴的なのは、 2.6Hz付近と3.7Hz付近を中心として、分布にばらつきが



図-7 橋軸方向入力に対する橋軸方向応答の加速度伝達関数

生じていることである.上記2つの振動数は,図-3で示した橋軸直角方向卓越モードである1次モードと回転卓越モードである3次モードの固有振動数に一致する.図-3で述べたように,Caselの1次モードは橋軸直角方向卓越モードであるが回転成分も含まれる.本解析は水平2方向同時入力を行っているため,橋軸直角方向入力により構造物に1次モード振動が発生した結果回転挙動が生じる.またCaselの3次モードは回転卓越モードであるが橋軸直角方向の有効質量も持っているため,橋軸直角方向入力により励起される.回転挙動が発生すると図-6に示した4つの代表点には橋軸方向の変位成分がわずかに

生じるから、1次モードと3次モードの固有振動数でわず かに卓越して挙動しているはずである.しかし図4で示 したように、両入力は振幅・位相とも独立にばらつきを 与えているため、橋軸直角方向入力に起因する回転応答 の成分としての橋軸方向応答が、橋軸方向入力を分母と する伝達関数にばらつきを与え、このような伝達関数形 状になったものと考えられる.

Case2について見ると、最も大きなピークの振動数は約2.9Hzであり、これは振動数は図-3で示した橋軸方向 卓越モードである1次モードの固有振動数である.特徴 的なのは、出力点A,CとB,Dでは最大ピークの大きさに



図-8 橋軸直角方向入力に対する橋軸直角方向応答の加速度伝達関数

差がありA,Cの方が大きいことと、出力点B,Dでは約 3.5Hzに小さなピークがあることである.前者の特徴に ついては図-3のCase2の1次モードを見てわかるように、 A,C側は損傷が偏って弱軸となっているために、B,D側 よりも橋軸方向に大きく変位するモードであることから 説明できる.後者の特長の3.5Hzは3次モードの固有振動 数である.3次モードは回転卓越モードであるが橋軸方 向の有効質量も持っているため、橋軸方向入力により励 起される.したがってその回転の橋軸方向成分が表れて いるものと考えられる.Case2についてはCase1で見られ たような伝達関数のばらつきはない. 橋軸直角方向入力に対する橋軸直角方向応答の加速度 伝達関数を図-8に示す.



図-9 回転に伴う出力点の変位成分



図-10 平均応答の加速度伝達関数



平均応答集計点

Case0について見ると、出力点A~Dは全て同じ応答であり、約3.7Hzに共振点がある.この振動数は図-3で示した橋軸直角方向卓越モードである2次モードの固有振動数である.

Caselについて見ると特徴が2つ見られる.1つ目は出 カ点A,Bでは2.6Hz付近に大きなピークがあるが出力点 C,Dではそのピークがほとんど見られないこと、2つ目は 出力点C,Dでは3.7Hz付近にピークが発生し、このピーク は出力点A,Bでもわずかに見られることである.1つ目の 特徴におけるピーク振動数2.6Hzは図-3で示した橋軸直 角方向卓越モードである1次モードの固有振動数である. C,Dではそのピークがほとんど発生しないのは、モード 図を見てわかるように、C,D側の橋軸直角方向剛性が大 きく、その結果A,Bでは大きく変位するがC,Dではほと んど変位しない形状になっていることから説明できる. 2つ目の特長の3.7Hzは3次モードの固有振動数である.3 次モードは回転卓越モードであるが橋軸直角方向の有効 質量も持っているため、橋軸直角方向入力により励起さ れ、その回転の橋軸直角方向成分が表れているものと考

えられる.また出力点C,Dの方がピーク値が大きいのは, モード図を見てわかるように,A,B側よりもC,D側の方 が大きく変位する形状となっていることから説明できる.

Case2について見ると出力点A~Dとも伝達関数は大き くばらついている.これは前述した図-7のCase1のばら つきと同じ理由と考えられる.すなわち,本解析は水平 2方向同時入力を行っているため,橋軸方向入力により 構造物には回転を伴う1次モードと3次モードが発生する. しかし図-4で示したように、両入力は振幅・位相とも独 立にばらつきを与えているため,橋軸方向入力に起因す る回転応答の成分としての橋軸直角方向応答が,橋軸直 角方向入力を分母とする伝達関数にばらつきを与え,こ のような伝達関数形状になったものと考えられる.図-7 のCase1のばらつきよりも図-8のCase2のばらつきの方が 大きいのは、図-9に概念図で示すように、回転に伴う出 力点A~Dの変位は、橋軸方向成分よりも橋軸直角方向 成分の方が大きいためと考えられる.

図-7,図-8の結果より、CaselおよびCase2については、 各点の応答の分析のみでは、伝達関数の分布がばらつい て挙動が明確にわからない部分もある.これらのばらつ きは、並進と回転の成分が混在することに起因すると予 想されるため、複数点の応答より構造物の平均的な並進 応答と回転応答に分離して、加速度伝達関数を描いた結 果を図-10に示す.算出方法はまず、図中凡例に示す8点 の応答より構造物の橋軸方向・橋軸直角方向の平均加速 度波形を算出する.次に8点の加速度波形から上記2方向 の平均化速度波形を差し引いた波形から構造物の平均角 加速度波形を算出する.それらと入力地震動波形より伝 達関数を算出する.Case0については、図-7、図-8で見た ように少なくとも出力点A~Dの4点では、挙動が同じで 回転は生じておらず、伝達関数の分布にもばらつきはな く挙動が明確であることから、ここでは図化していない.

Caselについて見ると、橋軸方向入力に対する橋軸方 向平均応答は、図-7で見られた伝達関数にばらつきはな くなっており、共振振動数は約3.0Hzでこれは2次モード の固有振動数であることは明白である. 橋軸直角方向入 力に対する橋軸直角方向平均応答は、約2.6Hzにメイン のピークと約3.7Hzに小さなピークがあり、図-8で分析 したように、前者は1次モード、後者は回転卓越モード である3次モードに対応する.後者のピークが現れる理 由は、図-3のCaselの3次モード図を見てわかるように、 回転卓越モードであっても、損傷箇所の非対称性から橋 軸直角方向の並進成分が含まれるためと考えられる.橋 軸方向入力に対する回転平均応答は、伝達関数が大きく ばらついているが、これは損傷箇所の対称性から明確な ように、橋軸方向の入力に起因する回転は生じないため と解釈できる. 橋軸直角方向入力に対する回転平均応答 は、ばらつきのない伝達関数が得られ、約2.6Hzと約 3.7Hzにピークがあり、それぞれ1次モード、3次モード に対応することは明白である.

Case2についてもCase1と概ね同様な分析結果となって いるので詳細な記述は省略するが、特記するとすれば、 橋軸直角方向入力に対する橋軸直角方向平均応答の伝達 関数をとることにより図-8で発生していた大きなばらつ きが解消されること、Case1では橋軸方向入力に対する 回転平均応答の伝達関数はばらつき、橋軸直角方向入力 に対する回転平均応答の伝達関数はばらつきがないが、 Case2ではその逆になることである.

#### (3) 分析結果のまとめ

前節までの分析により,常時微動による応答波形の伝 達関数を分析することにより,損傷箇所の偏りの傾向を 評価できる可能性があることが示された.

具体的には,

損傷が橋軸方向に偏っている場合:

・上部四隅各点の伝達関数について、橋軸直角方向入力 に対する橋軸直角方向応答の伝達関数はばらつきが生じ ないが、橋軸方向入力に対する橋軸方向応答の伝達関数 はややばらつきが生じる.

・上部の回転平均応答の伝達関数について,橋軸直角方 向入力に対する回転平均応答の伝達関数はばらつきが生 じないが,橋軸方向入力に対する回転平均応答の伝達関 数は大きなばらつきが生じる.

・損傷が橋軸方向のどちらに偏っているかは、上部四隅 各点の伝達関数の振幅のピーク値により評価が可能であ る.

損傷が橋軸直角方向に偏っている場合:

・上部四隅各点の伝達関数について、橋軸方向入力に対 する橋軸方向応答の伝達関数はばらつきが生じないが、 橋軸直角方向入力に対する橋軸直角方向応答の伝達関数 は大きなばらつきが生じる.

・上部の回転平均応答の伝達関数について、橋軸方向入 カに対する回転平均応答の伝達関数はばらつきが生じな いが、橋軸直角方向入力に対する回転平均応答の伝達関 数は大きなばらつきが生じる.

・損傷が橋軸直角方向のどちらに偏っているかは、上部 四隅各点の伝達関数の振幅のピーク値により評価が可能 である.

# 5. まとめ

RCラーメン高架橋を対象として、常時微動モニタリ ングによるによる損傷検知に関する解析的検討を実施し た.検討の結果、前章(3)節にまとめたように、主要点 の伝達関数の分析により、損傷エリアの分布傾向の把握 が可能なことが示唆された.今回の検討では、損傷が橋 軸方向に偏っている場合、損傷が橋軸直角方向に偏って いる場合といった、概略の損傷エリア分布傾向の同定に とどまったものであるが、個々の橋脚の損傷の有無とい ったさらに詳細な損傷箇所の絞込みに関しては、今後の 検討課題である.

また今回の解析では,損傷の対象とする塑性ヒンジを ピン構造としていること,構造物の橋軸方向の両端の境 界条件を自由としていること,複数の橋脚下端に同一の 波形を入力していること等,検討条件を単純化・理想化 している部分もあるため、今後それらを実際の条件に近づけた検討や、実橋でのモニタリング結果との比較による検証等を続けていきたい.

#### 参考文献

- 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP:エスア イピー) | 内閣府: < http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/ sip/> (2017年8月23日アクセス)
- モニタリングシステム技術研究組合(RAIMS):平 成 28 年度 RAIMS 活動報告会 インフラ維持管理へ のモニタリングシステム導入に向けた取り組み, 2016.
- 古川愛子,大塚久哲,梅林福太郎:構造物の損傷に 伴う振動特性の変化に関する実験的考察,土木学会 地震工学論文集,Vol.28, pp.1-9, 2005.
- 4) 電力中央研究所:実大橋梁耐震実験における長期振動モニタリング(その1)ー曲げ破壊先行型 RC 構造物の損傷による新道徳性変化の検出ー,電力中央研究所報告, N08010, 2009.
- 5) 電力中央研究所:実大橋梁耐震実験における長期振 動モニタリング(その2)-RC構造物の損傷レベル と固有振動数低下の関係把握-,電力中央研究所報 告, N08033, 2009.
- 宮下剛,玉田和也,他:振動を利用した健全性診断 に向けた実橋梁の損傷と動特性変化,土木学会論文 集 A1(構造・地震工学),Vol.68, No.2, pp.367-383, 2012.
- 7) 耐震・構造解析シリーズ | アーク情報システム:
  <a href="http://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/">http://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/</a> (2017年8月8日アクセス)

# ANALYTICAL STUDY ON DAMAGE DETECTION OF RC VIADUCT BY MICROTREMOR OBSERVATION

# Katsuyuki SAKASHITA, Akihito HATA and Yujin YAMAMOTO

In this paper, analytical studies on damage detection of RC viaduct by microtremor observation are conducted. Plastic hinge at the bottom of pier is represented as damage, following three cases are set up, the case of no damage (Case0), the case in which dameges occur on one side of bridge axial direction (Case1), the case in which dameges occur on one side of bridge axial rectangular direction (Case2). In each case, characteristic vibration mode is estimated by eigenvalue analysis, and dynamic analysis in which two directional microtremor waves are input to the bottom of pier is carried out. The difference of Case0 $\sim$ Case2 is evaluated by comparing transfer functions at representative points. As a result, it is verified that transfer function given from microtremor observation is effective to specify damage area.