

## 鉄道河川橋梁橋脚の衝撃振動試験における桁の影響の一考察

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○樺 健典  
東日本旅客鉄道株式会社 正会員 滝沢 聡

### 1. はじめに

近年、河川増水により橋脚基礎が洗掘を受けて傾斜に至る災害が多く発生しており、河川橋梁の維持管理の重要性がますます高まっている。橋脚周囲の河床低下が確認された場合、流水内において橋脚基礎の状況を直接目視できない場合や、橋脚周囲の地盤が緩んでいることが懸念される場合には、衝撃振動試験<sup>1)</sup>を実施して橋脚の固有振動数を同定し、健全度を評価することが多い。衝撃振動試験は、30kg程度の重錘により橋脚の天端部を打撃し、橋脚上部に設置した速度計もしくは加速度計によって振動計測を行う試験である。これにより得られる振動波形のフーリエスペクトルから橋脚の固有振動数を同定する。得られた固有振動数に対して、健全度評価指標 $\kappa$ （健全時の橋脚の固有振動数に対する現在の固有振動数の比）もしくは固有値解析から得られる基礎のばね定数を設計値と比較することにより、橋脚基礎の健全度を評価することができる。これらの評価においては、桁による橋脚の拘束の影響は考慮せず、打撃により励起される橋脚の振動を一自由度系の減衰自由振動として捉えている。そこで本研究では建設中の鉄道河川橋梁において桁の架設前後に衝撃振動試験を実施し、桁が橋脚の衝撃振動試験結果に与える影響について考察した。



図1 検討対象橋脚の全景

### 2. 検討対象橋梁の概要

検討対象とした橋梁は、水郡線袋田・常陸大子間に位置する第6久慈川橋梁である。第6久慈川橋梁は単線で上路プレートガーダー7連、無筋コンクリート造6基の橋脚からなる橋梁であったが、2019年の台風19号による河川増水に伴い橋脚の倒壊や桁の流失が発生したため、新たに支間72.6mの下路トラス桁2連として復旧した<sup>2)</sup>。新設した橋脚は全高13.3m、鉄筋コンクリート製の直接基礎構造で、根入れ深さは4m、支持地盤は砂岩である。支承部はゴム支承となっている。桁架設後の橋脚の全景を図1に示す。

桁架設前として復旧工事中の2020年11月に、桁架設後として、軌道を敷設し運転再開した後の2021年6月にそれぞれ衝撃振動試験を実施し、その結果を用いて検討を行った。2回の計測の間に目立った増水は無く、根入れの変化はほぼ生じていないと考えられる。なお、計測には速度センサCR4.5-2sを使用し、30kgの重錘を用いて橋脚天端部を橋軸直角方向に10回打撃して橋軸直角方向の振動波形を収録し、S/N比を向上させるためにこれらを重ね合わせた波形を使用して、検討を行った。

なお、検討に際して橋軸直角方向の波形データを使用した理由は、橋軸方向の幅に対して橋軸直角方向の幅の方が大きい、一般的な断面形状の橋脚であれば、橋軸直角方向はロッキング振動が卓越するのに対して、橋軸方向は曲げ振動が卓越するため、根入れ深さに対する固有振動数の感度は橋軸直角方向の方が良いと考えられる。また、橋軸方向は桁の拘束などの影響を受けるが、橋軸直角方向では連続桁のような特殊な場合を除けば経験的に橋軸方向と比較して桁の拘束などの影響を受けにくい<sup>3)</sup>ことから、衝撃振動試験では一般的に橋軸直角方向の波形を基に評価しているためである。

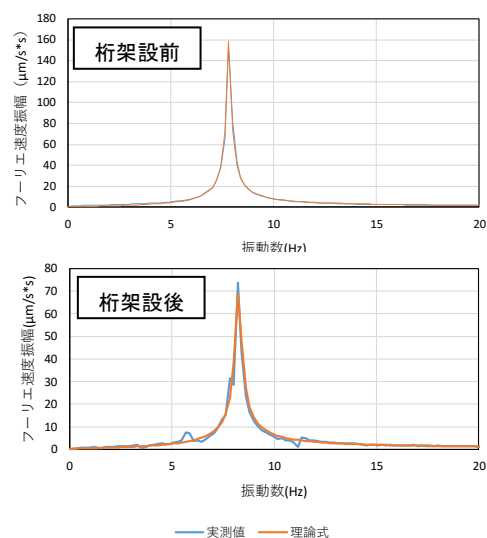


図2 桁架設前後の衝撃振動試験結果

### 3. 衝撃振動試験結果

$\omega_0$ を固有円振動数(rad/sec)、 $h$ を減衰定数、 $x$ を変位、 $A$ を定数とすると、打撃時を $t=0$ としたときの時刻 $t$ における応答速度 $\dot{x}$ は、

$$\dot{x} = A\omega_0 e^{-h\omega_0 t} \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

と表される<sup>4)</sup>。そこで、実測の時刻歴波形とフーリエスペクトルが上記の理論式及びそのフーリエスペクトルと一致するようパラメータを求めた結果、桁架設前の橋脚の固有振動数は7.81Hz、桁架設後は8.18Hzとなった。理論式と実際の計測で得られた波形のフーリエスペクトルを図2に示す。桁架設前においては実測値と理論式がほぼ一致しているが、桁架設後には若干の乖離がみられ、これらは桁の影響で生じたと考えられる。

キーワード 河川橋梁, 橋梁検査, 直接基礎, 衝撃振動試験, 固有振動数

連絡先 〒141-0031 東京都品川区西五反田3丁目5番8号 目黒MARCビル4F 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター TEL 080-9649-9953

#### 4. 考察

衝撃振動試験により励起される振動を一自由度系の減衰自由振動として考えると、橋脚の固有振動数  $f$  は、ばね定数を  $k$ 、質量を  $m$  としたとき、理論上、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

で表され、式(2)からは桁架設に伴い上乗荷重が大きくなると橋脚の固有振動数  $f$  は低下すると考えられる。しかし、本橋梁においては、3章で述べたように桁架設後に橋脚の固有振動数が上昇する結果となった。縮小模型実験において桁の架設により橋脚の固有振動数が上昇する可能性があることが指摘されていた<sup>4)</sup>が、実橋梁においても確認されたことになる。

この原因として橋脚が桁架設や軌道敷設の影響で拘束され剛性が増したことによる影響が考えられる。そこで、図3に示す多質点系のモデルを考え、固有値解析から再現することを試みた。地盤の抵抗を、土被り部橋脚躯体前面の水平地盤ばね定数を  $K_h$ 、フーチング底面のせん断地盤ばね定数を  $K_s$ 、鉛直地盤ばね定数を  $K_v$ 、回転地盤ばね定数を  $K_r$  とし、それぞれのばね定数は鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物<sup>5)</sup>に則り設定した。桁架設後については桁の死荷重を考慮するとともに、桁による拘束効果を表現したばね定数を  $K_u$  として設定した。 $K_u$  は、橋軸直角方向の衝撃振動試験結果を基にした橋脚健全度評価のための固有値解析では、通常考慮しないばね定数である。

衝撃振動試験において橋脚の多点計測を行っていないため、今回はシミュレート倍率を全てのばね定数に対して一律の値に設定した。ゴム沓となっている橋脚天端と桁の間(図3の青線部分)の部材剛性は、実測した桁と橋脚天端部の振幅比が解析結果と整合するよう、橋脚躯体の1/2,500に設定した。ここで、シミュレート倍率とは設計用値と実測値との乖離に対する補正係数のことである。一般に地盤ばね定数はひずみレベルに依存するが、設計標準で示されている地盤ばね定数の設計用値が地震時の比較的大きな変位レベルを想定した値であり、衝撃振動試験によって生じる変位レベルと大きく異なるため必要となる補正係数である。

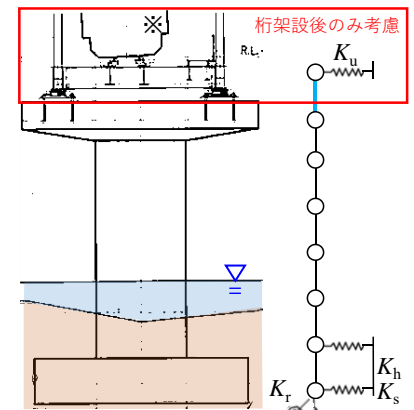
桁架設前の橋脚の固有振動数の実測値が解析値と一致するようにシミュレート倍率を求めたうえで、同じ倍率を使用して、桁架設後の橋脚の固有値解析から得られる固有振動数が実測値と一致するよう  $K_u$  を算出した。さらに、これらの値を使用して桁架設後について  $K_u$  を考慮する節点を増減して根入れを変化させ、それぞれの根入れに対する橋脚の固有振動数の解析値を求めた(図4)。図4には比較のため  $K_u=0$  と仮定して桁の死荷重のみを考慮して算出した結果も併せて示しているが、根入れによらず  $K_u$  考慮の有無が橋脚の固有振動数に対して大きな影響を及ぼしていることが分かる。桁の载荷により基礎底面の地盤ばね定数が変化する可能性も考えられるが、 $K_u=0$  と仮定した場合、固有値解析においてシミュレート倍率を大きい値に変化させても、根入れ4mにおける固有振動数の解析値が実測値に達しなかったため、桁架設後の本橋梁では  $K_u$  の考慮が必須といえる。ただし、桁による拘束効果が生じたとしても、根入れの減少に伴って橋脚の固有振動数が低下傾向を示すことには変わりはないため、健全時の固有振動数との比較に基づく橋脚の健全度判定にあたっては、大きな影響は無いと考えられる。

#### 5. まとめ

本論文では、建設途中の鉄道橋梁において桁架設前後に衝撃振動試験を実施し、健全度評価に際して桁が与える影響についての考察を行った。今回の検討対象橋梁は最新の設計基準等に基づき建設された、洗掘の恐れのない健全性の高い橋梁であり、維持管理において洗掘に対する基礎の健全度評価を要する場面が多い旧式の橋梁とは構造が大きく異なるが、一般に橋軸直角方向は桁による拘束などの影響を受けにくいとされているのに対して、本橋梁では橋軸直角方向の桁の拘束効果が大きく、固有値解析でより正確に実測の振動を再現するためにはこれを考慮する必要があることが分かった。

#### 参考文献

- 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) 基礎構造物・抗土圧構造物, pp.165-171, 丸善出版, 2007.
- 2) 江幡尚彦, 荒澤秀輔: 水郡線 第6久慈川橋りょうにおける台風19号災害と復旧工事, 日本鉄道施設協会誌, 59(8), pp.42-43, 2021.
- 3) 羽矢洋, 峯岸邦行, 水野進正: 橋梁下部工の健全度診断に関わる最近の話題, RRR, 63(5), pp.10-13, 2006.5.
- 4) 生井貴宏, 佐名川太亮, 西岡英俊, 上野慎也: 衝撃振動試験を用いた橋脚基礎における減衰定数評価手法の検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.22, pp.21-26, 2018.
- 5) 鉄道総合技術研究所編, 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, pp.146-149, 丸善出版, 2012.



※ 列車荷重は本モデルでは考慮しないが、参考として示している

図3. 検討モデルの概要

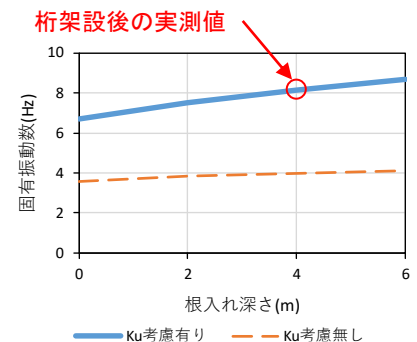


図4. 固有振動数の解析値