

橋りょう下部工健全度 評価システムの開発



増井 洋介*



鈴木 修*

洗掘は、重大な事故と輸送障害につながりかねない現象である。現在、洗掘のおそれのある橋脚には、水位計や橋脚のわずかな傾斜を検知して警報を発する傾斜検知型洗掘検知装置が整備されているが、防災研究所では傾斜のみならず、列車振動などを利用して洗掘の兆候や橋脚の健全度をモニタリングする、橋りょう下部工健全度評価システムの開発を進めている。これまでに、このシステムの振動センサ部の試作機により長期フィールド試験を実施し、必要とするセンサ仕様を決定した。また、列車振動、河川増水時の微動を利用した健全度評価手法について、実測データをもとに検証し、その有効性を確認した。

●キーワード：洗掘、 β 値、増水時微動、固有振動数

1. はじめに

橋脚の洗掘災害は、目視検査で予兆を発見するのが難しい災害の一つである。また、ひとたび発生すれば、重大な事故と輸送障害につながる。JR東日本では洗掘対策として、根固め工施工といったハード対策や、河川水位から洗掘深さを推定し増水時に列車の運転を規制する水位規制、橋脚のわずかな傾斜を検知することにより重大事故を防ぐ傾斜検知型洗掘検知装置の設置といったソフト対策を行っている。しかし、橋脚の洗掘による損傷を検知し、速やかに列車を抑止しても、その修繕には多額の費用を要し、長期間の列車運休を伴うこととなる。そのため、洗掘の前兆を検知することが望ましいが、現行のソフト対策では警報を発報することはできるものの、洗掘の前兆による健全度低下の評価を行うことは難しい。

橋りょう下部工の健全度を評価する手法としては、橋脚衝撃振動試験により得られた固有振動数を用いる方法がある。これは、洗掘などにより橋脚基礎の健全度が低下すると、固有振動数も低下するという傾向を利用して¹⁾。しかしながら、この試験は高所で30kg程度の重錘を扱う危険を伴う作業となっており、高頻度で行うことができない。

防災研究所では、平成14年度に橋脚の傾斜角予測手法²⁾を、平成16年度からは営業列車を起振源とした橋りょう下部工の健全度評価手法を開発してきた。一方、鉄道総合技術研究所では増水時に橋脚の常時微動が大きくなる

ことに着目し、それを利用した橋脚健全度評価手法の開発を進めてきた³⁾。これらの手法に現行の傾斜検知型洗掘検知手法、衝撃振動による健全度評価手法などを組み合わせることにより、常時橋りょう下部工の健全度をモニタリングするシステムが構築可能となる(図1)。

そこで本研究は、現行の傾斜検知型洗掘検知装置とほぼ同等の大きさで、傾斜センサと振動センサの両方を持ち、常時橋りょう下部工の健全度評価が可能なシステムを開発することを目的とする。

本報告では、2007年度に実施したフィールド試験における、列車振動、並びに増水時微動を用いた橋脚健全度評価手法の検討結果について紹介する。

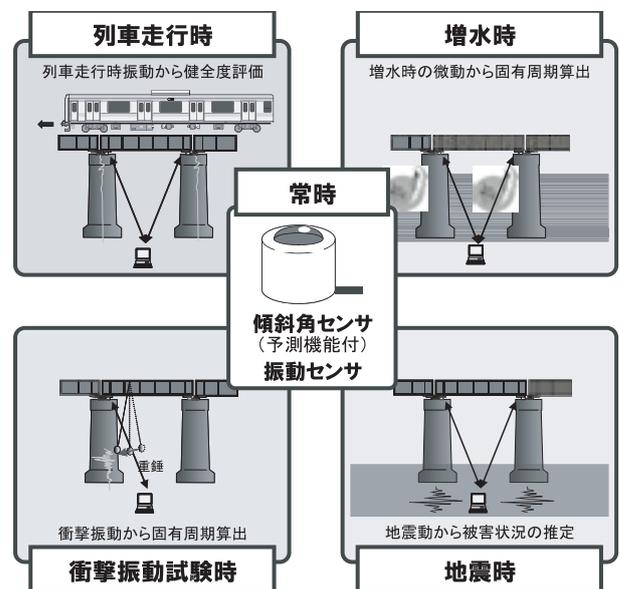


図1 橋りょう下部工健全度評価システムの開発概要

* JR東日本研究開発センター 防災研究所

表1 フィールド試験用センサ仕様

センサ名	SES60R
加速度分解能	0.2Gal
周波数帯域	DC-20Hz
計測範囲	±200Gal
記録波形	加速度3軸、120秒間
サンプリング周期	0.01秒
消費電力	6W (AC100V換算)

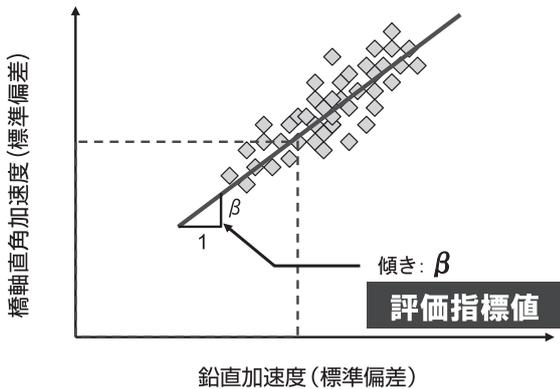


図2 評価指標値

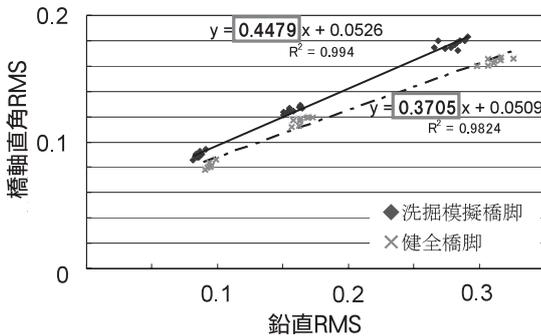


図3 模型実験におけるβ値の変化

2. フィールド試験に供したモニタリングシステムの概要

2.1 センサ試作機

本研究で用いる傾斜センサ、振動センサのうち、振動センサにおいては、ひとつのセンサで列車振動を用いた評価、増水時の微動を用いた評価、地震動を用いた評価、衝撃振動による評価など、複数の評価手法に適用できるセンサの開発を目標とした。評価手法によって、必要な分解能や周波数帯域、計測範囲などがそれぞれ異なるため、幅広い加速度レンジに対応したセンサが必要となる。そこで、傾斜センサに先駆けて振動センサを試作することとした。予備的な調査の結果から、各種評価手法に対応可能な振動センサとして、表1に示す仕様を満足するサーボ型加速度センサ (SES60RTM) を開発した。

なお、SES60Rは5Gal以上の振動を検知すると自動的に振動波形収集を2分間行う設定となっている。また、任意に振動波形を収集することも可能である。これにより、列車通過時の振動はもちろん、増水時微動や地震動の記録も可能である。

2.2 列車振動を用いた評価指標値

列車が橋りょうを通過する際、橋脚には主として鉛直振動が発生する。しかし、橋脚が洗掘を受けると、基礎地盤剛性の左右のバランスが変化するため、水平方向の振動が大きくなるものと考えられる。そこで、橋脚の左右のアンバランスの量を説明するための指標として、橋脚の加速度応答振幅の標準偏差（以下RMSとする）値の水平鉛直振幅比（水平RMS値を鉛直RMS値で除した値）を用いることとした。この水平鉛直振幅比は理論上、走行速度などの影響を相殺している。

橋脚基礎地盤の剛性に変化がなければ、水平鉛直比は変化しないはずである。そこで図2のように、橋軸直角（水平方向）RMSと鉛直RMSを通過列車ごとにプロットしていくことによって得られる回帰直線の傾きβを評価指標値（以下、β値とする）とした。β値が増加する場合は、橋脚の横揺れが増加し、橋脚のアンバランス量が増加している懸念があると解釈する。

この解釈を検証するため、次のような模型実験を実施した。洗掘状況を模擬した橋脚と、健全な橋脚上にHOゲージの鉄道模型を走らせ、それぞれの橋脚で回帰直線を算出した結果、洗掘を模擬した橋脚の回帰直線の傾きが、健全なものを上回ることを確認した（図3）。

2.3 増水時微動を用いた評価

増水中の橋脚（図4）には、流水圧力により平時に比べて大きな微動が発生する。そのため、平時の常時微動では算出が困難な固有振動数も、増水時では可能となる。増水によって橋脚基礎周囲が洗掘されて不安定化する現象を、増水時の微動測定により得られる固有振動数の変化により捉える手法は、鉄道総合技術研究所において開発された。

本研究では、鉄道総合技術研究所の成果に基づき、図5に示す方法により増水時微動による固有振動数を算出している。増水時の1分間の振動データを3つに分け、それぞれの加速度フーリエスペクトルを求め、重ね合わせて平均化して卓越振動数（固有振動数）を求めている。

3. フィールド試験結果

3.1 現地計測システム

橋りょうに設置している水位計の過去データの検討結果から、数年に一度は増水が予想され、頻繁なデータ採取に有利な橋りょうとして都内のA橋りょうを選定し、2007年9月に振動データ計測システムを設置した。その外観を図6に示す。

SES60Rに接続したデータ収集盤からは、無線LANによる遠隔データ回収を可能とし、河川堤防からでも収集が可能となっている。

3.2 β 値の検証

図7（左）は、2007年10月27日一日の列車振動データをプロットしたものである。当日の河川状況はいたって穏やかであり、

水位上昇もなかった。 β 値は5.18となっている。当時A橋りょうには、軸重の異なる2種類の車両が通過していたが、その軸重の差の影響や、日中時間帯の温度差による指標値のパラツキなどは認められなかった。すなわち、橋脚基礎地盤に変化がなければ、 β 値は安定することが見て取れた。

一方、この半月後となる2007年11月10日のデータ（図7（右））では、 β 値は5.57となった。10月27日と比較して、基礎周辺や河川状況に特段の変化は認められなかった。

ヒトの体温も、体調は変わらずとも日々によって微妙に変化するものである。10月と11月の β 値の差は、橋脚健全度に差は認められなかったが、誤差の範囲といえるのではないかと考えている。すなわち図8にあるように、 β 値は普段はある一定の範囲内の値（通常領域）にあり、橋脚基礎地盤に変化があると β 値はその範囲外（危険領域



図4 河川増水中の様子

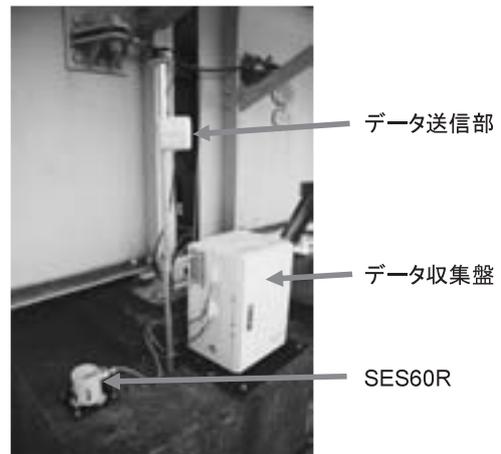


図6 データ計測システム

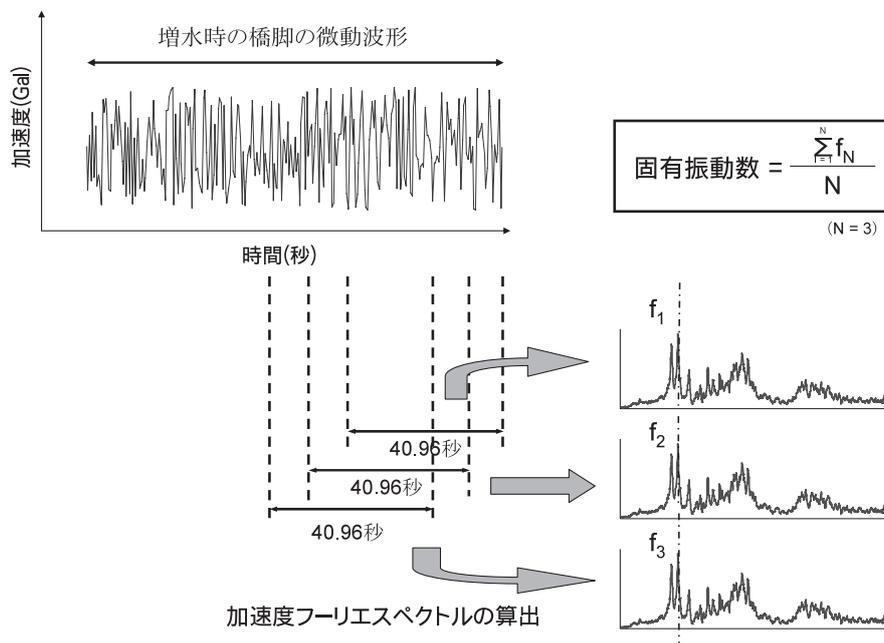


図5 増水時微動を用いた固有振動数の算出方法

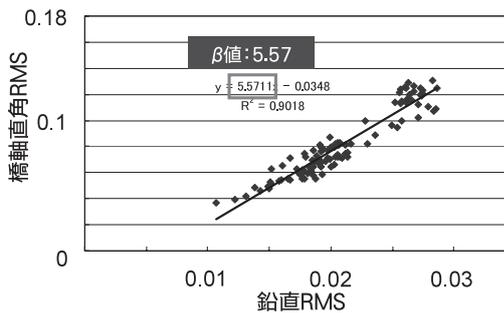
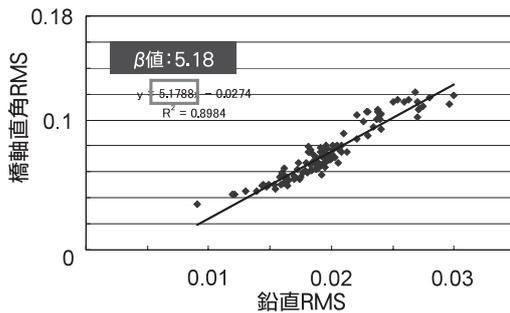


図7 β 値の変化 (左:2007年10月27日 右:2007年11月10日 いずれも増水無し)

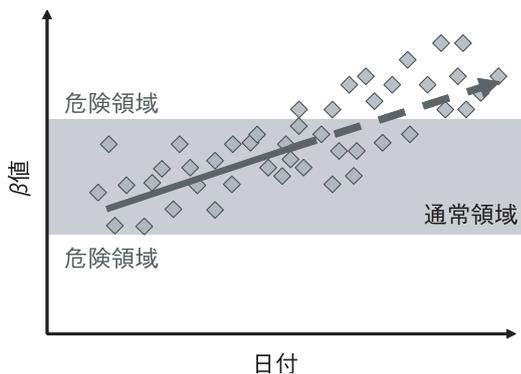


図8 β 値を用いた評価方法

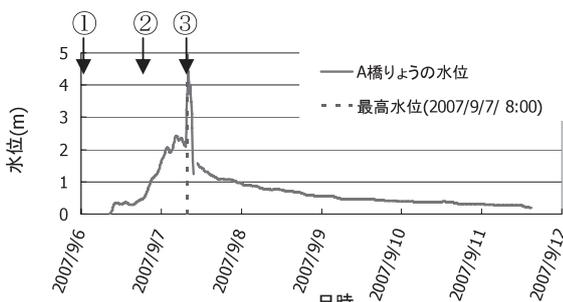


図9 A橋りょうでの水位変化

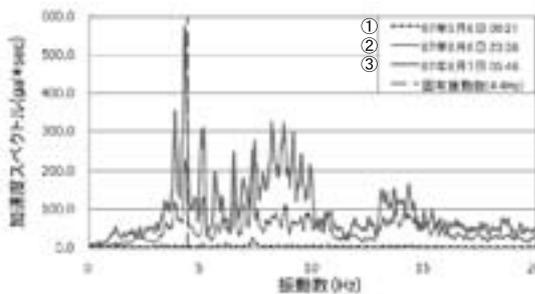


図10 増水時の加速度フーリエスペクトル

域)に移動する。それを検知して異常発生(橋脚の健全度低下)と判断し、詳細調査を行う、というフローで実務に取り入れるのが妥当と考えている。

なお、通常領域、危険領域については、長期的に蓄積した日々のデータを用いて算出した β 値のパラッキに対して、統計的評価(例えば超過確率など)を行うことにより設定が可能である。

※ SESは(株)山武の登録商標である。

3.3 増水時微動を用いた手法の検証

A橋りょうでは、2007年9月6~7日にかけて、台風の襲来により増水した。その際の橋脚振動を用いて、図5の手法を用いて加速度スペクトルを算出した。このスペクトルの算出には30秒程度のデータが必要であること、スペクトル解析には2のべき乗のデータ数が必要であることから、4096個のデータ(40.96秒)を使用している。図9はA橋りょうでの水位の変化(平常時水位を0mとしたもの)、図10は①増水していない時、②増水中、③最も水位が上がった時の3つの加速度フーリエスペクトルを表している。なお、当該橋脚の固有振動数は4.4Hzであることを、衝撃振動試験により確認している。

この結果、増水が進むにつれ、4.4Hz付近に卓越振動数が得られるようになっていく過程が確認された。仮に増水中に洗掘が進行すれば、卓越振動数が徐々に低下していくことが予想され、それにより固有振動数の低下が推定でき、橋脚に何らかの異常が発生していることがモニタリングできるようになる、と想定している。

4. 今後について

2008年度は、列車振動を用いた橋脚健全度モニタリング手法について検証を行うとともに、傾斜センサを試作してA橋りょうにてフィールド試験を開始している。また、地震動を用いた健全度モニタリング手法の検討も進めている。

システム全体の設計も含め、数年後の実用化に向けて今後も開発を継続する。

参考文献

- 1) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989.8
- 2) 小林範俊, 島村誠: 橋脚洗掘モニタリング手法の開発, JR EAST Technical Review, No.3, pp.49-52, 2003.5
- 3) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 淵脇晃, 杉山友康: 微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価, 鉄道総研報告, Vol.21, No.1, pp.31-36, 2007.1