

増水時における橋脚の固有振動数の抽出方法と評価システム

防災技術研究部 地盤防災

主任研究員 佐溝昌彦

1. はじめに

河川が増水した場合には、水の流れによって橋脚周辺の地盤が洗掘され基礎の安定性が低下することが懸念される。このため、旅客の安全を確保する目的で列車の運行を抑止することがある。しかし、河川水位が低下し運行を再開する際の可否判断は、衝撃振動試験の結果や目視確認に頼る場合が多く、作業性などの点で課題があった。そこで、増水した際の流水力で揺らされる橋脚の振動に着目し、このときの振動から得られる橋脚の固有振動数の変化から基礎の安定性を評価する手法の開発^{1),2)}を進めてきた。本稿では、この手法の概要を述べるとともに、橋脚の微動から固有振動数を得る具体的な方法および遠隔地からでも制御可能な機能を持つ健全性評価システムについて報告する。

2. 現地測定に基づく増水中の橋脚振動特性

2.1 現地測定の概要

現地測定の対象は、河川の中流域に位置する延長 265.5m の A 橋梁のうち、煉瓦と石造の高さ 10.31m (根入れ長 4.46m)、躯体幅 1.54m、底面長 6.4m の直接基礎形式の 2 号橋脚 (以下 2P) とした。上部工は上路鉸桁 (支間長 23.9m) であり、2P 付近がほぼ流心に位置する。2P の諸元と外観を図 1 に示す。なお、事前に実施した衝撃振動試験の結果、橋脚の固有振動数は 11.3Hz、桁の固有振動数は 3.5Hz であった。

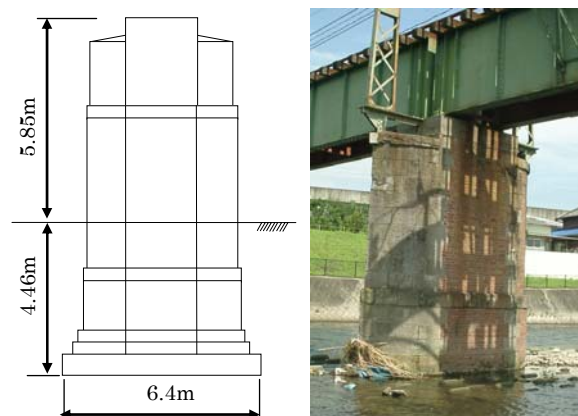


図 1 計測した橋脚の緒元と外観

計測は、当該橋脚の天端に速度計 (物探サービス社製 CR4.5-2S3D) と橋脚近傍に超音波式水位計 (本多電子社製 HD700-A) を設置し、それらのデータを 60 分ごとに 300 秒間記録 (サンプリング間隔 1/100 秒) し、約 1 ヶ月間行った。

2.2 計測結果

計測期間中に約 2.7m の増水を経験した。図 2 に低水時 (桁下水位 5.7m) と最も増水した時 (桁下水位 3.0m) における微動の速度振幅 (橋軸直角方向) の経時変化の比較を示す。図 2 によれば、低水時には両振幅で $5 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 程度であったものが、増水時には両振幅で $40 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と約 8 倍になっていることがわかる。これは、流水によって橋脚が加振されているためと考えられる。また、図 3 には低水時と増水時における橋脚の振動性状を比較するために、低水時および増水時における微動 (橋軸直角方向) のフーリエスペクトルを示す。この図によれば、微動から得られるフーリエスペクトルでは、低水時において衝撃振動試験で得た橋脚の固有振動数付近に、スペクトルの明瞭なピークは見られないものの、増水時には明瞭に現れている。このことから、衝撃

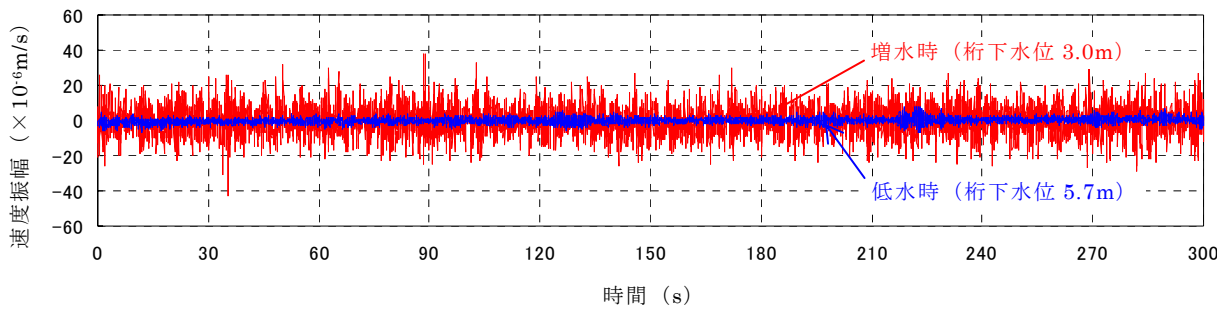


図2 A橋梁2Pにおける微動の速度振幅の経時変化の比較

振動試験などを実施してあらかじめ固有振動数が確認されている橋脚では、増水時であれば微動によるスペクトル振幅のピーク(卓越振動数)から橋脚の固有振動数が特定できることを確認した¹⁾。なお、当該橋脚では橋脚周りの地盤がブロック工で防護されているため、増水時に洗掘は起こっていない。

3. 微動による固有振動数の特定方法の検討

3.1 探索範囲の検討

微動によるスペクトル振幅のピークを探索する際の振動数の探索範囲について、微動による固有振動数 (f_{0mi}) と衝撃振動試験による固有振動数 (f_{0l}) との残差から求めた変動係数により検討した。なお、ここでは衝撃振動試験で得た固有振動数付近に現れる卓越振動数のひとつを微動による固有振動数としている。

具体的には、橋脚の固有振動数 (f_{0l}) を中心にして、その固有振動数の一定割合 (Δf_0 : $\pm 5\%$, 10% , 20% , 30%) を探索範囲として設定し、それぞれの範囲内における最大値(ピーク)を f_{0mi} として求め、さらに f_{0l} との残差から求めた変動係数で整理した(図4)。この図によれば、増水時や低水時にかかわらず、探索範囲を狭くするほど変動係数は小さくなるものの、5%では探索範囲内でピークを特定できなくなる場合があり、変動係数が大きくなる。また、変動係数は探索範囲が f_{0l} の $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ の範囲で最も小さくなる。このため、今回の検討では探索範囲は $\pm 10\%$ が妥当であると判断した。

3.2 データの時間長の検討

微動のフーリエ解析 (FFT) を行う際に、解析データ長によっては固有振動数 (f_{0mi}) が精度良く求められないことが考えられる。そこで、 f_{0mi} をできる限り精度良く求める方法について検討した。FFTを行う際の解析データ長に対する f_{0mi} と衝撃振動試験による固有振動数 (f_{0l}) との差の関係を検討する。計測された300秒のデータにおける初頭からの解析データ長を5, 10, 15,

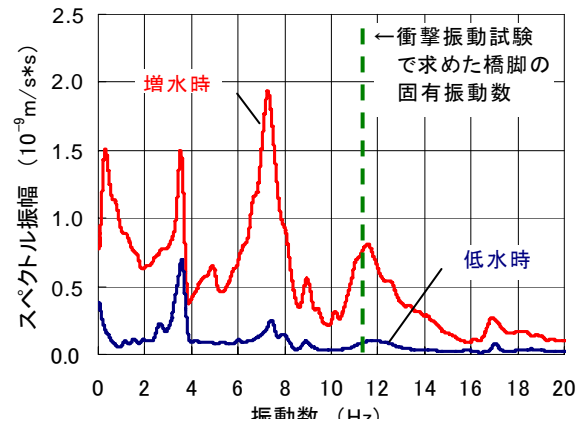


図3 水位が異なる場合の微動のフーリエスペクトルの比較

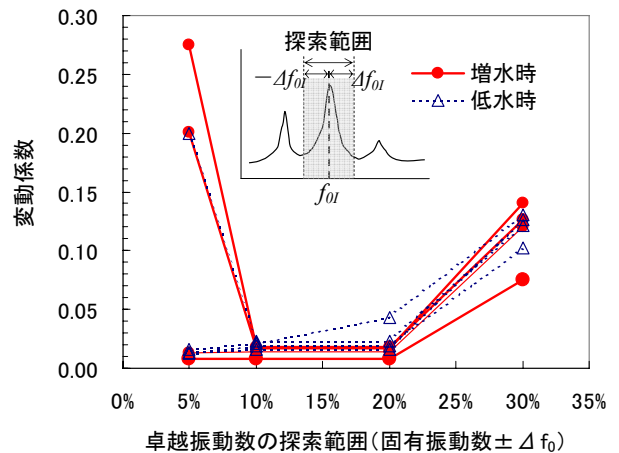


図4 探索範囲の違いによる固有振動数の残差の変動係数

20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 160, 200, 300 秒間の 13 段階に設定し、このデータから卓越振動数を求めた。なお、卓越振動数を探索する範囲は、 f_{0I} と f_{0I} の $\pm 10\%$ とした。解析データ長と f_{0mi} と f_{0I} との残差から求めた変動係数との関係を図 5 に示す。その結果、解析データ長が長くなるほど残差の変動係数が小さく、かつほぼ一定となることから、解析データ長は 60 秒以上 (図 5 の太破線) とすることが妥当であると判断した。

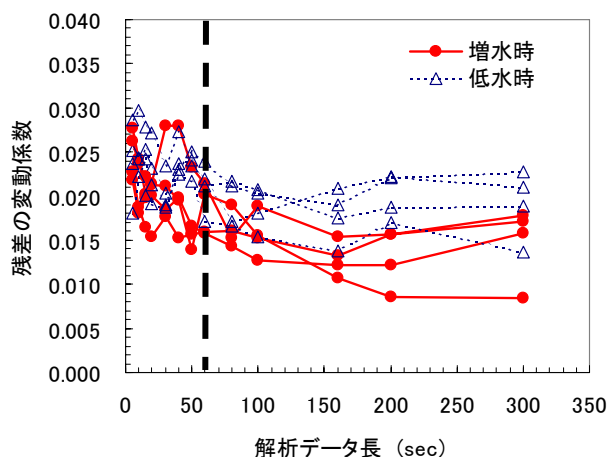


図 5 解析データ長と固有振動数の残差の変動係数との関係

4. 橋脚基礎の健全性評価システムの試作および稼働試験

4.1 評価システムの概要³⁾

橋脚基礎の健全性の継続的な監視およびシステムの制御が遠隔地からできる機能は、施設の管理の点やシステムの保守作業の軽減の点からも有効となる。以下にその機能を解説する。

(1) 遠隔地からの制御方法

本システムでは、測定条件や解析条件の設定データと評価結果データとをインターネット上のデータサーバー(以下、サーバー)に保存することで、現地のシステムと関係各所とのデータの共有化を図ることとした。現地のシステムは、起動の都度、サーバーに保存されている設定ファイルを読み込み、設定された条件で動作する。これにより、遠隔地から任意の条件で測定させることが可能となる。また、評価結果は現地の処理装置内に保存されるとともに、随時サーバーにアップロードされるため、サーバーにアクセスできる複数の端末から同時に閲覧できる。

(2) システムの構成

評価システムの機器構成の概略を図 6 に示す。システムは、橋脚上に設置する速度センサ(3方向成分)と水位計、システムの制御と健全性評価を行う処理装置、サーバーとのデータ伝送用の通信端末、それらの動作電源となるバッテリーから構成されている。また、サーバーにはインターネットを通じて複数の PC から適切なセキュリティ機能を持たせた上でアクセス可能である。

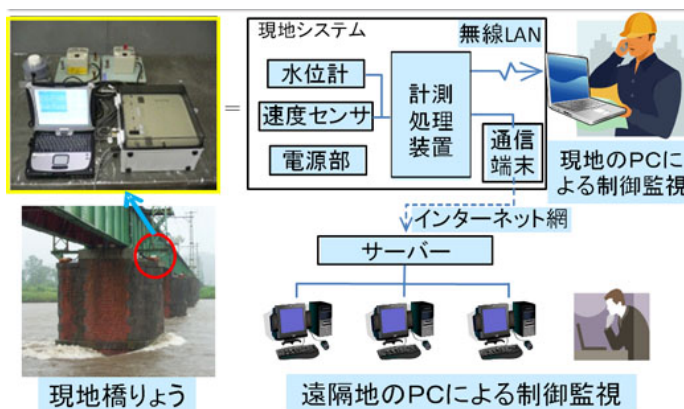


図 6 システム構成概略図

(3) 通信方法

現地橋脚からのサーバーへの通信手段は、現地での設備をできる限り簡素化するために無線方式とした。現地システムとサーバー間におけるデータ通信には伝送速度と通信エリアの観点から NTT ドコモの FOMA (A2502 HIGH-SPEED) を用いた。また、現地システムと現地の PC 間のデータ通信には無線 LAN を使い、現地でも測定結果と評価結果の閲覧を可能とした。

(4) 表示画面

評価システムでは、現地での監視と遠隔地での監視が行える。図 7 に監視画面の例を示す、現地の PC では測定している微動と水位の経時変化、微動の各成分のスペクトルおよび健全度の経時変化が閲覧できる。一方、遠隔地では微動の各方向成分のスペクトルと健全度の経時変化および最新の微動から求めた橋脚の固有振動数と水位を数値として表示する。

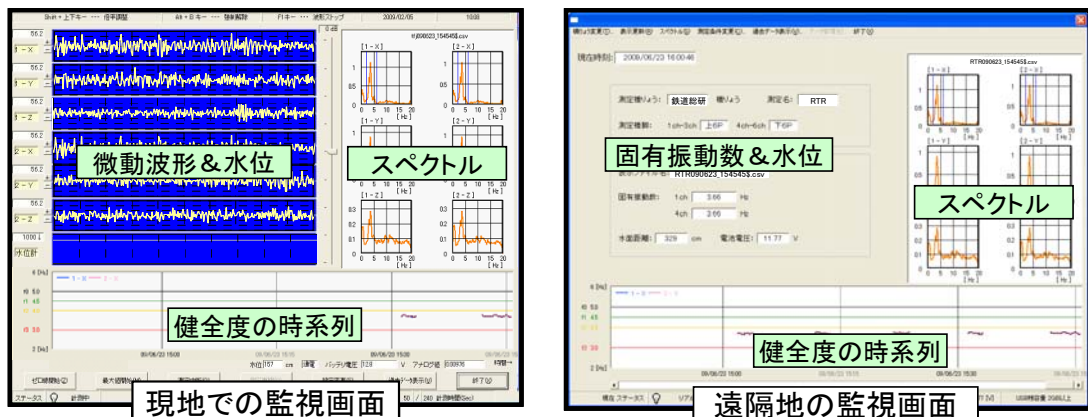


図 7 評価システムの監視画面の例

4.2 稼働試験

稼働試験を総研構内で行い、データ通信時のエラー発生頻度と稼働時間の確認を行った。

(1) データ通信

サーバーへのファイル送信では、携帯電話(FOMA)の接続上の問題から 1 日 144 回の送信あたり 1~3 回程度ファイルが送信できない状況が発生した。携帯電話の接続上の障害は携帯電話を用いたシステムの性格上やむを得ないと考えている。なお、そうした場合でも、処理装置の USB メモリ内にはデータが保存され、後日確認は可能である。

(2) バッテリーでの稼働時間

このシステムはバッテリーで稼働できるシステムとしている。そこで、常時測定での連続稼働試験を行い、稼働時間の確認を行った。試験に用いたバッテリーは鉛蓄電池 (12V-24A) を 2 個並列で接続した。その結果、概ね 2000 分 (約 33 時間) は連続稼働が可能であることがわかった。河川増水の経過時間を考慮すると、72 時間の連続稼働時間を確保することが必要と考えており、現段階ではバッテリーの並列個数を増やすことやソーラパネルの併用などの措置が必要である。

5. おわりに

河川増水時における橋脚基礎の健全性を橋脚の微動で評価する手法とこれに基づくシステムの概要について報告した。今後は、システムの信頼性と評価手法の更なる精度向上に努めていく予定である。

【参考文献】

- 1) 佐溝昌彦, 渡邊諭, 小林徹, 中村貴史, 村石尚: 直接基礎橋脚の支持条件が躯体振動性状に及ぼす影響, 鉄道総研報告, vol.18, No9, 2004.9
- 2) 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, 第 21 巻, 第 1 号, 2007.1
- 3) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 輿水聡, 杉山友康: 増水時における橋脚基礎の洗掘に対するリアルタイム健全性評価システム, 地盤工学会研究発表会, 2009.7