

河川橋梁および河川堤防の出水時における振動特性

OSCILLATION CHARACTERISTICS OF RIVER BRIDGE AND RIVER BANK DURING FLOOD

松本健作¹・玉置晴朗²・矢澤正人²・岡田崇³・竹澤弘久³・宋東烈⁴・小葉竹重機⁵・清水義彦¹

Kensaku MATSUMOTO, Haruo TAMAKI, Masato YAZAWA, Takeshi OKADA, Hirohisa TAKEZAWA, Dong-Yuel Song,
Shigeki KOBATAKE and Yoshihiko SHIMIZU

¹正会員 博(工) 群馬大学大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

²非会員 株式会社数理設計研究所 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町太田リサーチパーク 1-101)

³学生会員 学(工) 群馬大学大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

⁴非会員 工博 群馬県立群馬産業技術センター (〒379-2147 群馬県前橋市亀里町 884-1)

⁵正会員 工博 群馬大学大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

Oscillation characteristics of river bridge and river bank during flood were examined. Oscillation of Acceleration was measured by original sensor. The results showed that the higher water level become the higher power spectrum of measured acceleration become. The acceleration value was different between bridge piers. The result indicated that the acceleration measurement could represent the main flow direction of during flood. The peak value of acceleration indicated that influence of flood and wind. The measured results also indicated that river bank vibrates, too. The characteristic of river bank oscillation was under influence of bridge oscillation. The power spectrum of river bridge and river bank had same frequency components. These results indicated validity of this method for health monitoring of river structures.

Key Words: river structure, health monitoring, river bridge, bank, flood, Time Series Analysis, ARMA model

1. はじめに

昨今の水災害の頻発を受け、河川構造物の安全性に対する関心は極めて高まっている。一方で、1966年から1986年の、いわゆる高度経済成長期に設置された多くの既存河川施設が劣化により補修を必要とする状態にあること、更には平成9年をピークとして治水事業費が削減される一方であることなどにより、河川構造物の効率的な維持管理手法の確立が急務となっている。構造物の効率的な維持管理を考えるうえで重要となるのが、その構造物がどの程度劣化しているか、どの程度安全であるのかを診断する、いわゆるヘルスマonitoringと呼ばれる一連の取り組みである。対象となる構造物や生じる現象に応じて様々な手法が提案されており、橋梁や盛土構造物を対象とした検討は現在でも盛んに為されている。しかしながら、一般的な橋梁に対する取り組みを、そのまま河川

橋梁に適用できるかどうかについては疑問がある。すなわち、河川橋梁には、他の一般的な橋梁には作用しない、出水等の大規模な流水の影響が作用するためである。出水時の流水の影響は一般的な橋梁の診断時において通常考慮される風や車両等の外力の影響と比較しても十分に大きいものと考えられる。よって河川橋梁の診断を行うに際しては、他の一般的な橋梁に対する場合とは異なる配慮をする必要があると考えられるが、これまで河川橋梁に特化した安全性の診断についての検討が為された例はほとんど無い。このことは橋梁に限らず、盛土構造物などを対象とした検討は為されているが河川堤防を対象とした診断手法としては光ファイバーを用いた海野ら¹⁾の研究など数例があるのみである。

よって本研究では、河川橋梁および河川堤防の状態診断手法に関する基礎的な取り組みを行い、その有効性を検討することを目的として行う。

2. 計測の概要

計測は、渡良瀬川にかかる葉鹿橋(栃木県足利市、利根川合流地点より約 42km)の人道橋を対象として行った。計測地点の概観を写真—1 に示す。計測対象とした人道橋には道路橋が並行して設置されているが、人道橋の方が道路橋の上流側に存在している為、出水の影響は直接的に人道橋に作用する。計測対象が人道橋であることで、車両振動を除去できるため、主たる外力として風と流水のみという状況であると仮定した。橋梁の状態計測には加速度計による振動計測を行った。センサは数理設計製 GID-SSS/M を使用した。3 軸方向の加速度をサンプリング周波数 100Hz で計測する。諸元を表—1 に示す。センサは橋の欄干部に万力で固定して計測を行った。センサ設置状況を写真—2 に示す。このため、得られる計測結果は必ずしも橋梁本体の振動を表していない可能性もあることも考慮して考察を行う。

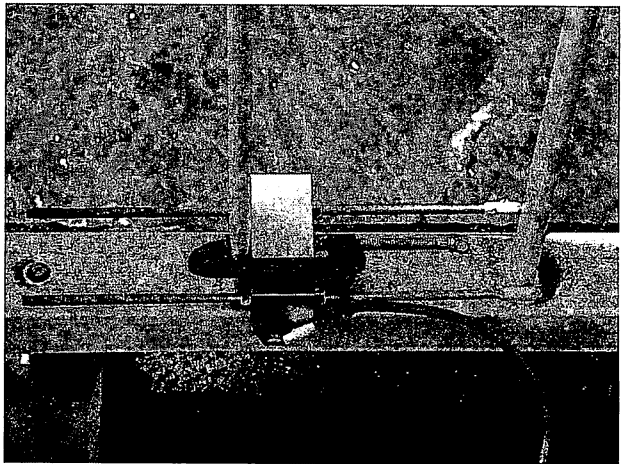
計測対象の出水は2006年6月16日から17日にかけてのもので、平水時 1m 弱程度から最大 3.49m まで増加した。計測はピーク時を含む計 5 回、左岸側の第 1 および第 2 橋脚の直上にて行った。橋脚直上で計測を行ったのは、計測ポイント間で、できるだけ構造的差異を無くすためと、出水の主流部が橋脚のどの位置に当たるか、による計測結果の変化を検出することができるかどうかを検討するためである。表—2 に計測時の水位および 10 分間平均風速を示す。風速は気象庁ホームページより引用した計測地点最寄りの桐生観測所におけるデータである。①～⑤が左岸側第 1 橋脚で、⑥～⑩が第 2 橋脚についての計測である。当該出水のハイドログラフを図—1 に示す。図中の数字は表—2 に対応するものである。



写真—1 計測地点の概観

表—1 加速度センサの諸元

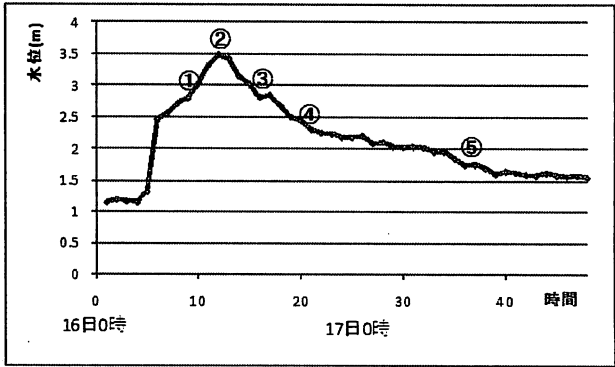
計測原理	静電圧型	Range	64dB
計測軸	3 軸	Size	3×3×8cm
測定範囲	±1.5G	Sampling	100Hz
A/D 変換	12bit,	価格	¥48,000



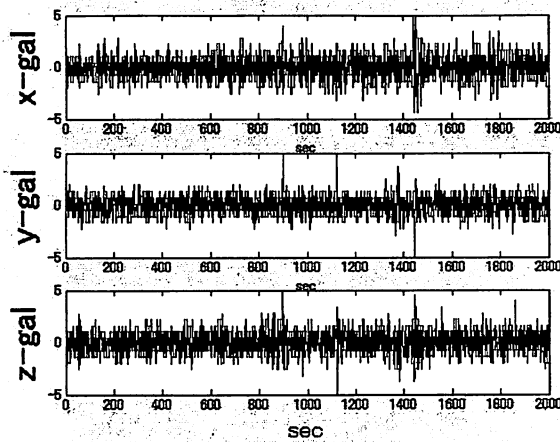
写真—2 加速度センサ設置状況

表—2 計測条件

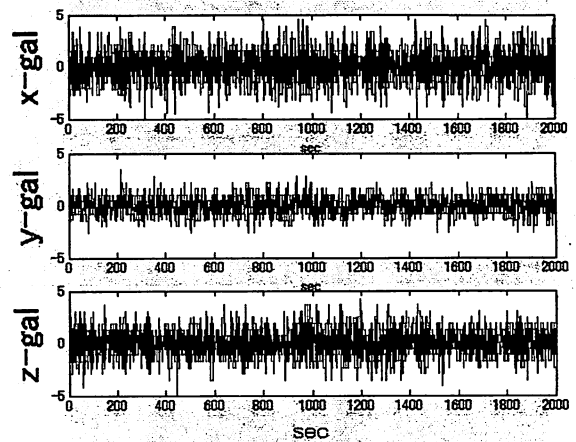
Case	計測日	時刻	水位(m)	平均風速 (m/s)
①	2006/6/16	9:50	3.03	0
②	2006/6/16	12:10	3.49	2
③	2006/6/16	15:40	2.82	1
④	2006/6/16	19:30	2.51	1
⑤	2006/6/17	14:20	1.70	3
⑥	2006/6/16	9:50	3.03	0
⑦	2006/6/16	12:10	3.49	2
⑧	2006/6/16	15:40	2.82	1
⑨	2006/6/16	19:30	2.51	1
⑩	2006/6/17	14:20	1.70	3



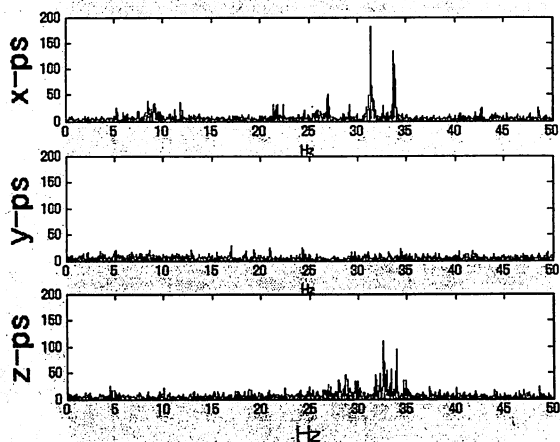
図—1 計測対象出水のハイドログラフ
(国土交通省提供 WEB 頁より引用加筆)



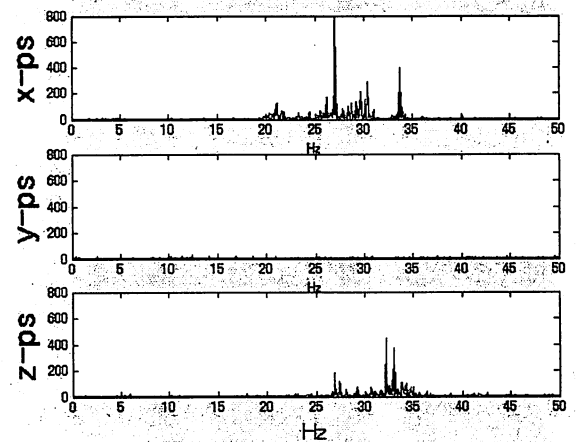
図—2—(1) 計測加速度 (case①)



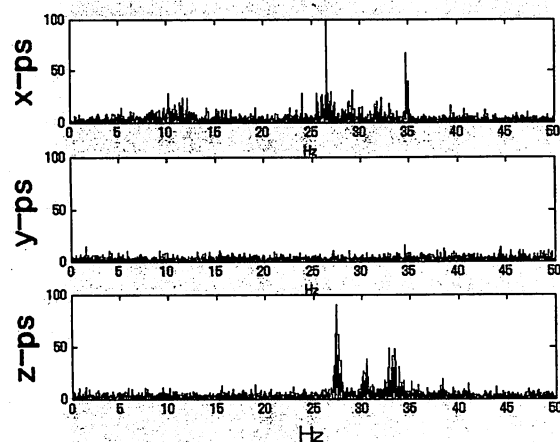
図—2—(2) 計測加速度 (case②)



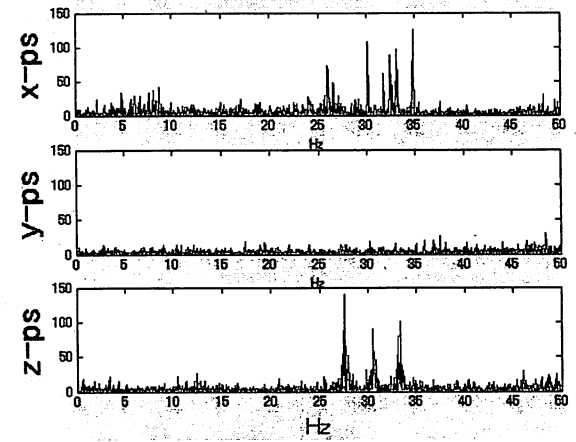
図—3—(1) 計測加速度のパワースペクトル (case①)



図—3—(2) 計測加速度のパワースペクトル (case②)



図—4—(1) 計測加速度のパワースペクトル (case⑥)



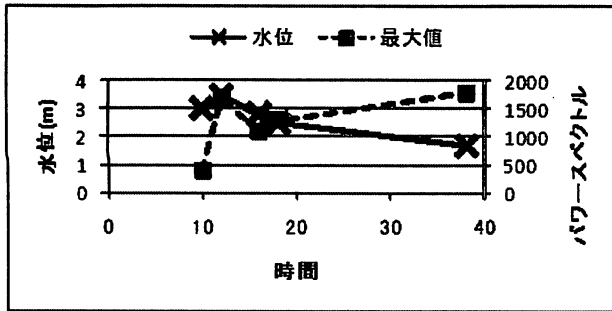
図—4—(2) 計測加速度のパワースペクトル (case⑦)

3. 出水時における河川橋梁の振動特性

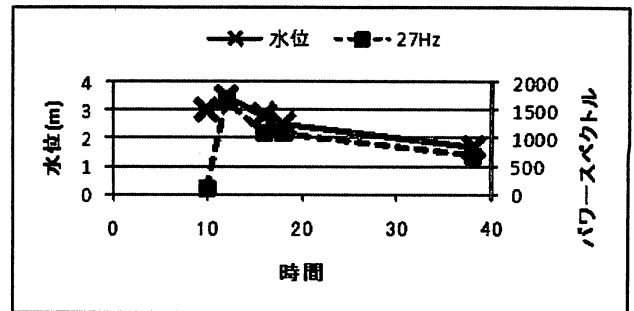
3.1 原信号とパワースペクトル

図—2 の (1) および (2) に、case① および ② における計測された加速度の原信号を示す。各図、上から流下方向、河道横断方向および鉛直方向の gal 単位の加速度である。増水中の case① とピー

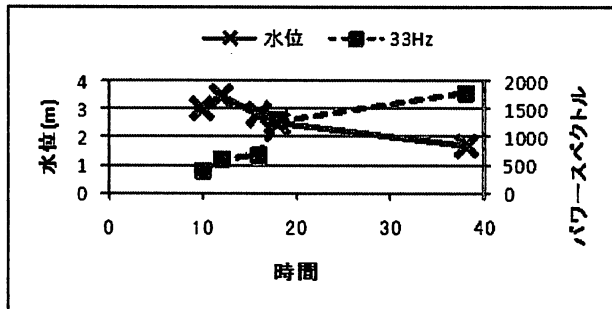
ク時の case② を比較すると、流下方向および鉛直方向の加速度が、水位の上昇に伴って若干増加しているように見える。これらの各図のパワースペクトルを求めたものが図—3 の (1) および (2) である。パワースペクトルを見ると、やはり流水に対して法線方向となる河道横断方向には振動が見られないことが分かる。両図は縦軸の縮尺が異なっており case① の流下方向に最大 180 ほど、case②



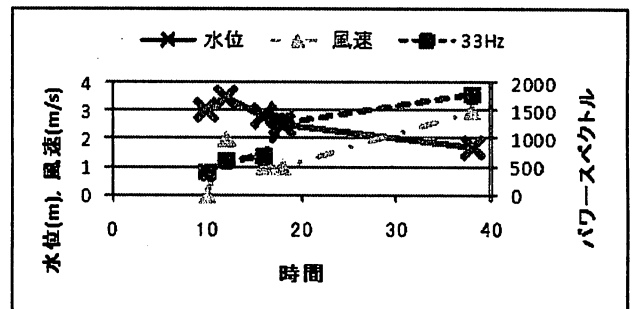
図—5—(1) パワースペクトルの最大値(全周波数帯域)と水位の経時変化



図—5—(2) パワースペクトルの最大値(27Hz 帯域)と水位の経時変化



図—5—(3) パワースペクトルの最大値(33Hz 帯域)と水位の経時変化

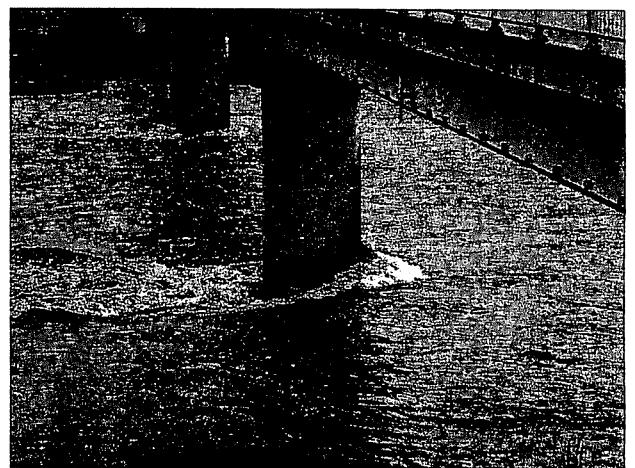


図—5—(4) パワースペクトルの最大値(33Hz 帯域)と水位および風速の経時変化

のやはり流下方向に最大 800 ほどの値が見られ、水位の上昇に伴って、25～35Hz の周波数成分が大きく励起されており、出水による水位上昇に伴って河川橋梁の振動が大きくなっている様子が見て取れる。図には示していないが、その他の計測結果を見てもこの 25～35Hz の周波数帯において顕著な変動を示すことから、この帯域が橋梁特有の固有振動数であろうと考えられる。図—4 の(1)および(2)は、それぞれ図—3 の(1)および(2)と同時刻における、第 2 橋脚上での計測結果である。やはり第 1 橋脚と同様の周波数帯域に強い振動成分が表れていることが分かるが、図—4—(1)の増水時では最大 100 程度、図—4—(2)のピーク時では最大 150 程度で、第 1 橋脚で見られた最大値と比べると小さい値となっている。現地観測の際、第 1 橋脚への流水の衝突が第 2 橋脚に比して大きかったことを確認している。写真—3 に第 1 および第 2 橋脚における堰上げの様子を示す。写真手前が第 1 橋脚であり、その奥に第 2 橋脚が見える。第 1 橋脚の方が、堰上げが大きく、より主流部に近い状況であることがうかがえる。出水時における主流の水衝部が第 1 橋脚であったと考えられ、そのため第 1 橋脚の方が第 2 橋脚よりもパワースペクトルの値が大きくなったものと考えられる。またこのことは、加速度の計測により、出水時における主流の状態を推定する知見が得られることも意味している。

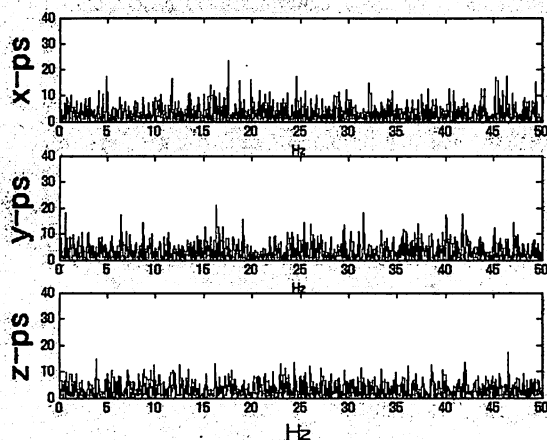
3.2 パワースペクトルの経時変化

次に、加速度のパワースペクトルの最大値と水

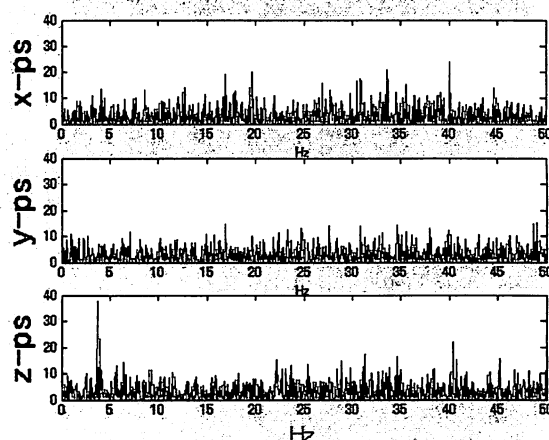


写真—3 第 1 および第 2 橋脚における堰上げの様子

位の相関性について図—5—(1)に示す。横軸は 2006 年 6 月 16 日 0 時を原点とした時間を、左縦軸は水位を、そして右縦軸はパワースペクトルをそれぞれ表している。図中実線が水位、点線がパワースペクトルである。図を見ると、パワースペクトルの値がピークにかけて増加し、その後しばらく減少していく様子は、水位の変動と良く一致しているように見える。しかし 19 時以降、水位が減少しているのに対してパワースペクトルの値は増加し、相関性が見られなくなる。これは、橋梁振動を励起している外力が出水のみではなく、今計測の場合、風の影響が含まれているためであると考えられる。そこで、パワースペクトルの最大値算出にあたって、帯域を 2 つに分けて考察を行うこととした。すなわち、図—3 および図—4 に見



図—6—(1) 高水敷護岸ブロックの加速度の
パワースペクトル(増水時)

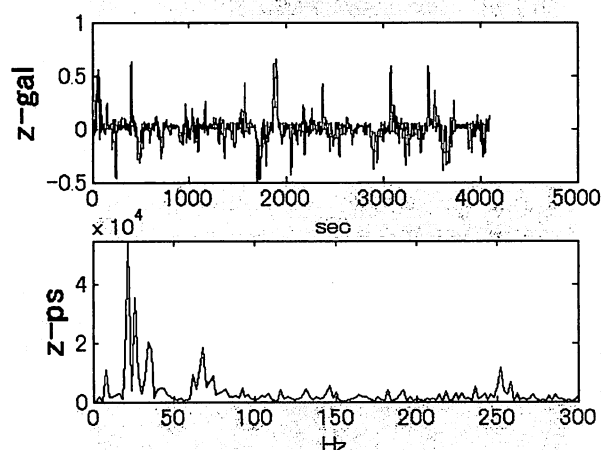


図—6—(2) 高水敷護岸ブロックの加速度の
パワースペクトル(ピーク時)

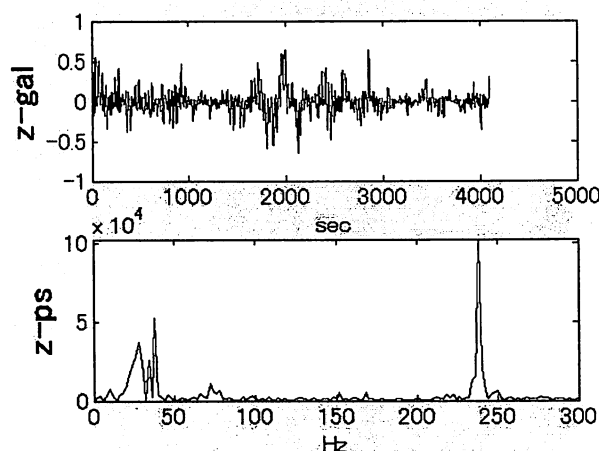
られた 25～35Hz の周波数帯域を、特徴的な 27±2Hz (25Hz～29Hz) および 33±2Hz (31Hz～35Hz) という帯域毎に分け、パワースペクトルの最大値を算出し直した。結果をそれぞれ図—5—(2)および図—5—(3)に示す。図—5—(2)を見ると、27Hz 付近の帯域における振動は、全体的に水位の変動と連動しており、高い相関性を示した。一方、33Hz 付近の振動はピーク前の挙動も含めて水位と連動しているようには見えず、これがいま一つの外力である風による振動成分である可能性がある。図—5—(4)に、水位、33Hz 付近のパワースペクトルの最大値に、表—2 に示した 10 分間平均した風速を加えたものを示した。19 時以降の風速の上昇がパワースペクトル値の上昇と連動しており、33Hz 付近の振動成分が風の影響によるものである可能性が高いことを示すことができた。橋梁の安全性を検証する際に、その振動モードの変化や固有振動数の変遷から劣化などを推定する試みが多く為されている。しかし、河川橋梁の場合、通常検討されている風以外に、流水という独立した外力を持つため、河川橋梁に対してはそれらを分離して取り扱う独自の手法の確立が必須であることが分かる。

4. 出水時における河川堤防の振動特性

河川施設の中でも、特に重要な構造物が河川堤防であるが、橋梁などとは違い土構造であること、構成土質や過去の施工法が不均一であることなど、その取扱いは極めて難しい。河川堤防の維持管理は現在ボーリング調査などを行って全国的にその安全性の検証が為されているが、実際に出水中において堤体がどのような状態であるのか、どの程度危険あるいは安全であるのかの評価手法に関する研究例は少ない^{2),3)}。そこで本研究では、これまで河川橋梁を対象に行ってきた振動解析を出水中の堤体に適用し、出水時における堤体の状態推定に向けた基礎的な取り組みを試みる。



図—7—(1) 葉鹿橋の鉛直振動とパワー
スペクトル(2004 年 9 月 30 日)



図—7—(2) 葉鹿橋直下高水敷護岸の鉛直振動と
パワースペクトル(2004 年 9 月 30 日)

図—6 の(1)および(2)はそれぞれ増水時およびピーク時における葉鹿橋直近の高水敷護岸の加速度信号である。増水時にはノイズに隠れて有意な信号が読み取れないが、ピーク時には鉛直方向加

速度の 4Hz 付近にピークが見られるようになる。この 4Hz の振動は流水の影響であると考えられ、出水によって護岸が振動を受けている様子を計測できているものと考えられるが、出水自体の規模が小さいこともあり、この 2006 年 6 月出水においては、堤体の振動が計測できたのはピーク時においてのみであった。橋梁と違い土構造による波動の減衰効果を受けること、堤体は橋脚のように出水の流下方向の作用を直接受けるものではないことなど、橋梁に比べて検出が難しいことが分かる。ここで、図-7-(1)~(3)に 2004 年 9 月 30~10 月 1 日かけて発生した出水時における葉鹿橋とその直近の高水敷護岸の振動信号を示す。(1)が橋梁、(2)が橋梁直下、(3)が橋梁から 10m 上流部での加速度(上図)およびパワースペクトル(下図)である。図-7-(1)を見ると、鉛直方向の 30Hz 付近にピークが見られ、これが出水による流水の作用が堤体に及ぼしている波動成分であろうと考えられる。他にも 70Hz および 250Hz 付近に比較的小さなピークが見られることが分かる。図-7-(2)は図-7-(1)に示した振動を計測した橋梁の直下の高水敷護岸での計測結果である。250Hz 付近に最大値が見られるが、図-7-(1)と同様に 30Hz 付近と 70Hz 付近に比較的小さなピークがでていることが分かる。すなわち、橋梁直下の高水敷の振動はそこに設置されている橋梁の振動特性と強い相関性を持つということが明らかになった。橋梁では 30Hz の低周波側、高水敷では 250Hz の高周波側にそれぞれ最大値発生帯域が変化する理由は現在のところ不明であり、今後の課題とした。図-7-(3)は橋梁より 10m 上流側の同じく高水敷上で計測した結果である。30Hz 付近に顕著なピークがあり、先の両図も含め、この 30Hz という帯域が共通して大きなピーク値を示したことになる。250Hz 付近にも僅かなピークが見られるが、図-7-(2)と比較すると大きく減衰していることが分かる。この高周波側のピークを橋梁の振動が高水敷に及ぼす波動成分であると仮定すると、橋梁直下において顕著であった波動成分が距離減衰によって 10m 先では見られなくなっていると考えられる。このように、堤体(本研究では高水敷上での計測であったが)は出水によって振動成分を励起しており、その波形特性から構造物の安全性の検証を行う技術への適用が期待できる。今後はこれらの波形データの物理的な考察を加えたうえで、河川構造物の安全性検証システムの開発を試みる。

5. まとめ

以下に、本研究で得られた主要な結論を示す。

- 1) 河川橋梁は出水時に流水の影響を受けて、主に流下および鉛直方向に振動しており、その振動は水位の上昇と伴に増大し、また水衝部ほど大きな値となることを確認した。

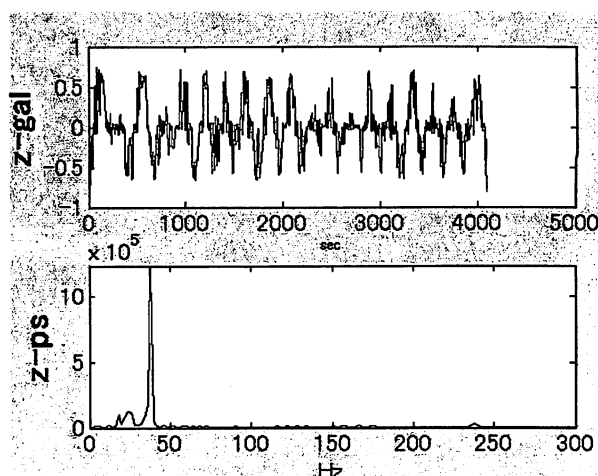


図-7-(3) 葉鹿橋上流 10m 地点の高水敷護岸の鉛直振動とパワースペクトル (2004 年 9 月 30 日)

- 2) 河川堤防を対象として計測信号の固有振動数の変化から構造物の安全性検証を行うに際しては、風などの通常考慮される外力に加えて、流水の影響を十分に考慮する必要があることを示した。
- 3) 堤体も出水時には振動しており、高水敷護岸の振動計測結果から、橋梁との位置関係によってその振動特性に大きな差が生じることを明らかにすることができた。

謝辞：本研究は、平成 19 年度科学研究費補助金若手研究(B)、および平成 19 年度(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業を受けて行われた。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 海野修二, 石井武司, 斎藤邦夫, 望月恵: 変形監視用光ファイバセンサの河川堤防への適用性に関する実大模型実験, 河川技術論文集, 第9集, pp.115-120, 2003.
- 2) 松本健作, 宋東烈, 玉置晴朗, 青木隆行, 藤田智之, 菅正信: 時系列解析を用いた出水時における河川橋梁の振動と水位の相関性に関する研究, 水工学論文集, 第50巻, CD-ROM, 2006.
- 3) 松本健作, 宋東烈, 玉置晴朗, 藤田智之, 青木隆行, 菅正信: 時系列解析を用いた出水時における河川橋梁の振動特性に関する研究, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 75-83, 2006.

(2008. 4. 3 受付)