

洗掘を受けた橋脚を有する橋梁の振動特性

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A BRIDGE WITH SCoured PIERS

烏野 清*、麻生稔彦**、松田泰治***、龍谷幸二****、仲間高人*****

Kiyoshi UNO, Toshihiko ASO, Taiji MAZDA, Kouji RYUTANI and Takato NAKAMA

* 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

** 工博 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

*** 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎5-1)

**** (株) 千代田コンサルタント九州支店 (〒812 福岡市博多区網場町9-28)

***** 建設省九州地方建設局大分工事事務所 (〒870 大分県大分市大字精家字川原82-1)

Shirataki bridge is a ten-span cantilever girder bridge. The soil around the foundation of two of its piers were scoured about 7m due to flood. This study examines the application of dynamic characteristics measurements of bridge to the estimation of scoured level. In order to determine the relationship between the dynamic characteristics and the level of scour, microtremor and traffic vibration were measured three times during the repair of the bridge; i.e., before repairing, after one pier was repaired and after complete repair.

It was clarified from the measurements and results of eigen value analysis by FEM that scour strongly affects the natural frequency and vibration mode of first out-of-plane vibration. However, natural frequency and vibration mode of in-plane vibrations did not changed much as that of the out-of-plane vibration during the three stages of measurement.

1. まえがき

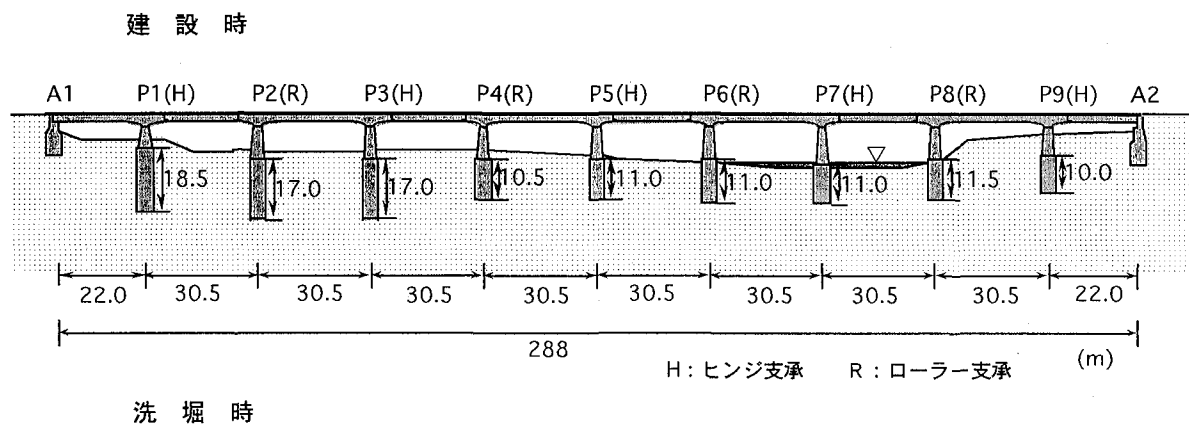
橋梁を長期に渡って有効に活用するためには維持・管理に十分注意をはらわなければならない。構造物の損傷を早期に発見し適切な段階で補修・補強を行う必要がある。一般に橋梁は上部構造と下部構造とから構成されるが、橋梁下部構造が損傷する要因として地震による構造被害、洪水による下部構造周辺地盤の洗掘、地盤変状による基礎構造被害などが考えられる。これらの内、地震については先の兵庫県南部地震でも多くの被害調査がなされており、その実例や補修についての報告がなされている。しかし、地盤変状¹⁾や洗掘についての報告はあまり見受けられない。特に洗掘については橋梁建設当時の河道・地盤状況が明らかである必要がある。しかし、古い橋梁ではこれらの状況が明らかでなく、また橋梁および基礎形式が不明な場合もあり、洗掘度合いの判定が難しい場合も多い。

現在の洗掘調査では船上から標尺などを用いて、河床の形状を計測する方法が中心であり、水中部の詳細な調査が必要な場合には潜水土による調査を実施せざるをえない。しかし、この方法では河川の流速が速いと作業が危険であること、また、作業が大がかりとなり費用・時間が必要なことから現状では十分な頻度で洗掘

調査が行われているとはいいがたい。このような状況を解決するためには、橋上あるいは川岸から安全かつ迅速に洗掘状況を調査できる手法が必要とされる。そこで、洗掘度合いを橋梁の振動特性の違いから判定できれば、今後の橋梁の維持管理に有効な手段となると考えられる。

橋梁の健全度を振動特性より推定しようとする研究は、これまでに多くなされている^{2) 5)}。しかし、これらの研究の多くは上部構造を対象としたものであり、下部構造についての研究は少ない。下部構造の健全度の推定については加藤らの研究^{6) 8)}や鉄道総合研究所の研究^{9) 10)}がある。この内、鉄道総合研究所の研究は橋脚に対する衝撃振動試験により固有振動数を求めるため、橋脚全てに試験を行う必要があることから簡便さに問題があると考えられる。

そこで、本研究は平成5年の増水により橋脚に大きな洗掘を受けた大分市の大野川に架設された国道10号線の白滝橋について、洗掘の補修段階(5段階)ごとに常時微動測定および車両走行時の振動測定を行い、本橋の振動特性の変化を調べたものである。また、本橋の有限要素法による固有値解析を行い、測定結果と解析結果とを比較することにより、洗掘度合いと橋梁の振



図－1 橋梁概要

動特性との関係を検討した。

2. 橋梁概要¹⁾

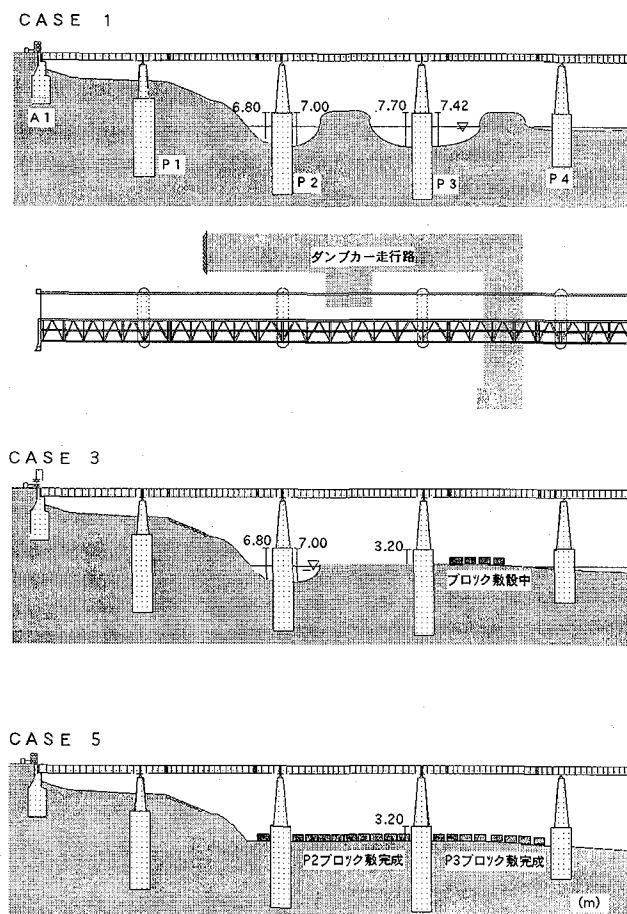
今回対象とした白滝橋の概要を図・1に示す。白滝橋は国道10号の大野川に昭和29年に建設された橋長288.0mの10径間ゲルバーヒンジ付き鋼鈑桁橋で、図・1に示す偶数番号橋脚上はローラー支承、奇数番号橋脚上はヒンジ支承となっている。また、建設後に歩行者の安全な通行を確保するために、橋脚を拡張し、本橋と隣接して歩道橋が架設された。橋脚基礎は全てケーソン基礎となっているが、各橋脚の根入れ深さはかなり異なっている。

本橋は平成5年夏の異常出水により護岸の一部崩壊および左岸側が大きく洗掘された。これにより従来本河川の流路は図・1の上図に示すようにP6～P8橋脚間であったが、出水後にはP2～P3橋脚側へ大きく変化した。

洗掘状況の概要を図・1下図に示す。河床の洗掘は水深調査の結果およそ7.0m程度であり、通常期で1～2mの水深であれば5～6mの洗掘が生じたことになる。一方、上部工ではP2橋脚ゲルバー支点部の桁遊間が設計上50mmのところ、出水後は115mmと開いていた。また、桁の横ずれ防止装置の噛み合わせが35mm程度となっていた。

3. 測定概要

河床洗掘時と復旧作業時および復旧終了時における橋梁の振動特性を明らかにするために、次の各ケースについて常時微動測定と車両走行時の振動測定を実施



図－2 測定時の洗掘状態

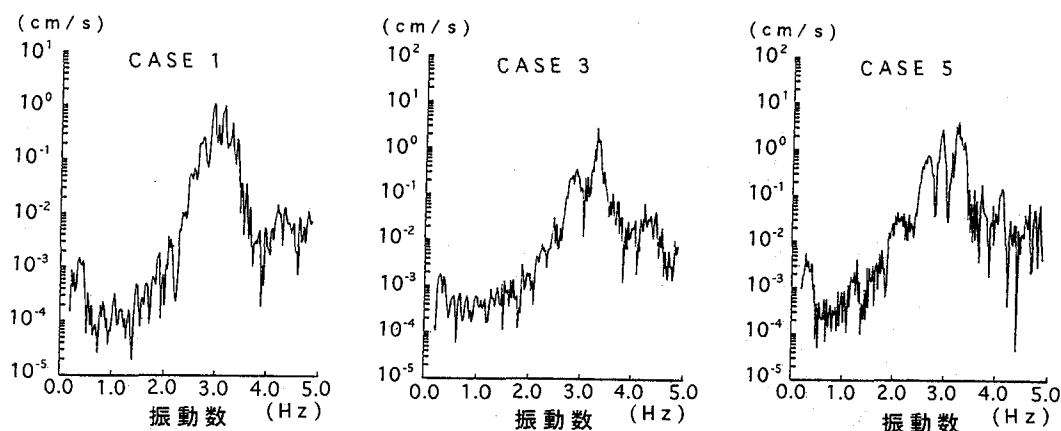


図-3 上下方向振動フーリエスペクトル

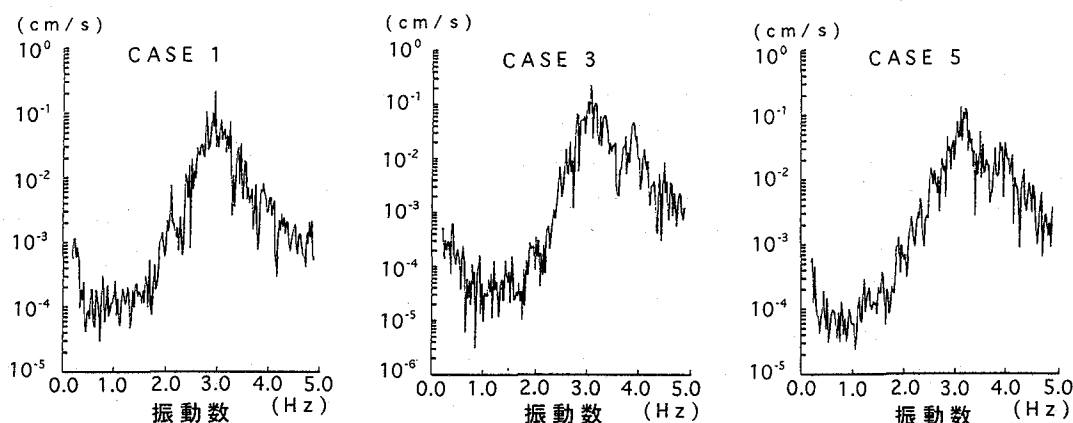


図-4 橋軸方向振動フーリエスペクトル

した。

CASE 1 : P 2、P 3 橋脚埋め立て前

CASE 2 : P 3 橋脚周囲に工事用道路完成

CASE 3 : P 3 橋脚埋め立て完了

CASE 4 : P 3 橋脚ブロック敷設完了

CASE 5 : P 2 橋脚ブロック敷設完了

CASE 6 : 全橋脚ブロック敷設完了

これらの内、CASE2では橋脚洗掘補修前に工事用道路の埋め立てを行ったものである。したがって、CASE1に比べて埋め立て用の土砂が橋脚周辺に流れ込んでいることが予想されたが、水深調査の結果ほとんど変化なかった。また、埋め立て完了時とブロック敷設後の地盤の状態もほとんど同じと考えられる。したがって、CASE1とCASE2およびCASE4～CASE6における地盤状況はほぼ同じものと考え、CASE1、CASE3およびCASE5を比較の対象とすることとした。CASE1、CASE3およびCASE5の状況を図・2に示す。

常時微動測定と車両走行時の振動測定は同じ測点で計測することとし、P 2、P 3 橋脚上およびP 2からP 3 橋脚間とP 3からP 4 橋脚間の桁上のスパン長1/2点

と1/4点において測定した。また、CASE1ではP 4 上にも測点を設けた。なお、各測点とも測定方向は橋軸方向（x方向）、橋軸直角水平方向（y方向）および上下方向（z方向）の3方向である。常時微動の測定にあたっては車両の走行が全くない時間を選んで測定する予定であったが、交通量が多いため乗用車のみの走行時における測定を常時微動とみなすこととした。

4. 測定結果

各補修状態における固有振動数の変化を求めるために各測点の加速度時刻歴からフーリエスペクトルを求めた。この際、常時微動と車両走行時の卓越振動数にあまり差がなかったことから、ここでは車両走行時の結果を示す。フーリエスペクトルを求めるにあたっては、測定データをサンプリング間隔 0.01 秒でAD変換し、4096個の加速度データから求めたスペクトルを2回平均した。なお、本実験では交通止めが実施できないため、多種の車両が走行し振動振幅が一定していない。このため減衰定数の変化による検討は不可能と考えられる。

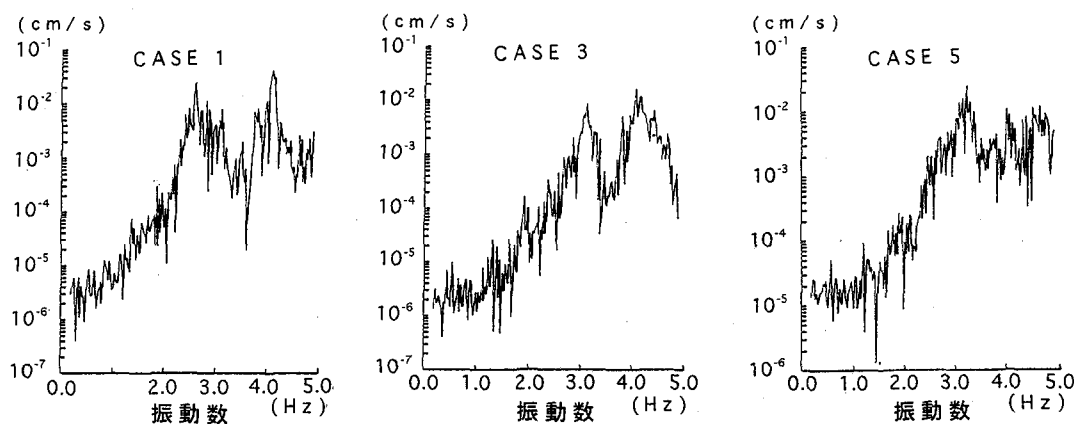


図-5 橋軸直角水平方向振動フーリエスペクトル

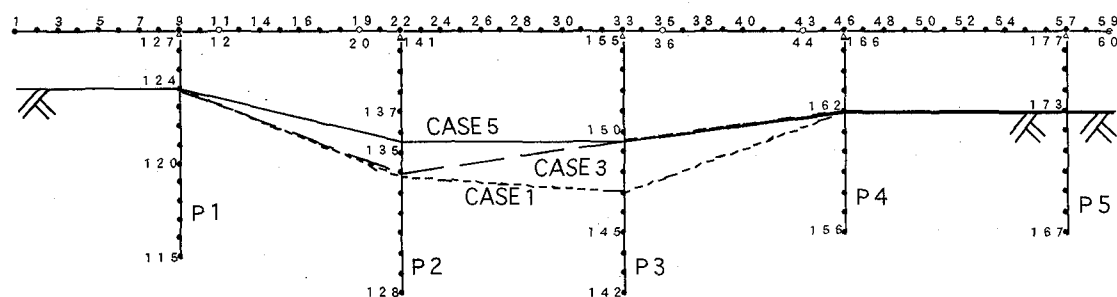


図-6 解析モデル

図-3は上下方向振動のフーリエスペクトルである。CASE1とCASE5はP2-P3桁上の中央点、CASE3は1/4点について示している。上下方向振動では2.8～3.5Hzに複数の卓越振動数が認められ、桁の上下振動の振動次数が接近していることがわかる。また、各CASEとも卓越振動数の変化は少なく、この方向の振動に対する洗掘の影響は少ないことを示している。したがって、上下方向の振動を洗掘度合いの判定に用いることは難しいものと考えられる。P2-P3桁上の1/4点における橋軸方向振動のフーリエスペクトルを図-4に示す。各CASEとも3Hz前後にピークが見られるが、これは桁の上下振動による橋軸方向成分によるものと考えられる。図-5はP2橋脚上の桁における橋軸直角水平方向のフーリエスペクトルである。橋軸直角水平方向振動の最初のピークは2.5～3.5Hz付近にあり、CASE1、CASE3、CASE5の順に徐々に高くなっている。このことから橋軸直角水平方向の1次振動は洗掘の影響を強く受け、洗掘度合いの判定に、この振動方向における固有振動数の変化を利用できる可能性を示しているものと考えられる。

なお、各振動の固有振動数および振動モードについて

では数値解析結果と比較して後に示す。

5. 数値解析

橋脚の洗掘度合いの判定を実験的に求めるだけでなく、解析を併用することにより合理的に判定できるものと考え本橋の固有値解析を行った。特に橋軸直角水平方向の固有振動数が大きく変化していることから、変位モードの変化が予想される。

図-6に白滝橋の解析モデルの内、洗掘部分であるA1橋台からP5橋脚部分を示す。図中の黒丸は質点を表し、質点番号を付している。また、白丸はゲルバーバりのヒンジに相当する節点である。解析では本橋を212節点の多質点系にモデル化し、各質点とも6自由度を有する立体骨組みとした。また、洗掘の影響を解析に取り込むためには、橋脚基礎であるケーソン部分に地盤バネを考慮しなければならない。そこで、このケーソン部分も多質点系にモデル化し、図-6に示すように各洗掘状態での解析を行った。ここで、ケーソンに作用する地盤ばね定数の算定にあたっては、本橋建設地盤の地質および地盤柱状図が現存していないことから、地質を砂質土として測定値に一致する地盤ば

表－1 地盤ばね定数

K_x (t/m)	K_y (t/m)	K_z (t/m)	$K_{\theta x}$ (t/m)	$K_{\theta y}$ (t/m)	$K_{\theta z}$ (t/m)
128000	71680	75402	304106	150946	201036

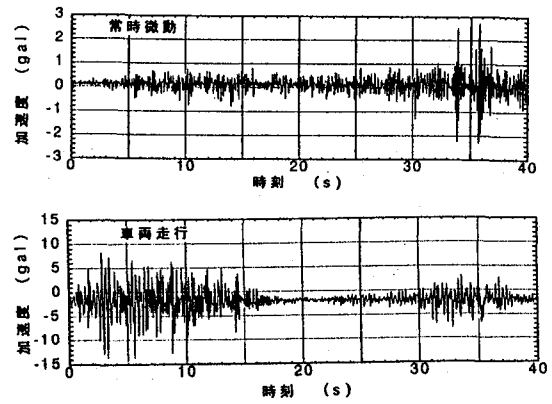
表－2 固有振動数の比較

方向	次数	CASE 1 (Hz)			CASE 3 (Hz)			CASE 5 (Hz)		
		常時 微動	車両 走行	解析 結果	常時 微動	車両 走行	解析 結果	常時 微動	車両 走行	解析 結果
z	1	3.00	3.06	3.06	—	3.06	3.06	3.09	3.13	3.06
	2	3.16	3.16	3.14	—	3.13	3.14	3.13	3.19	3.14
	3	3.25	3.25	3.26	—	3.25	3.26	3.25	3.25	3.25
	4	3.31	3.38	3.36	—	3.31	3.36	3.31	3.38	3.36
y	1	2.69	2.56	2.56	3.06	3.06	3.04	3.31	3.20	3.26
	2	3.41	3.22	3.37	3.31	3.25	3.38	3.66	3.31	3.48
x	1	—	—	3.05	—	—	3.05	—	—	4.39

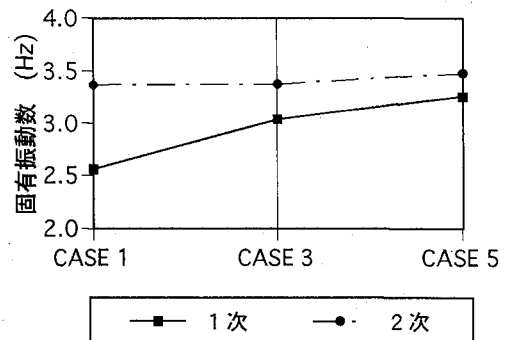
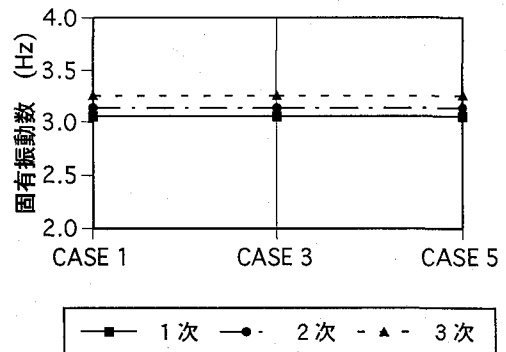
ね定数を算定することとした。まず、洗掘が全くないCASE5を基準状態とし、測定より得られた橋軸直角水平方向1次振動の固有振動数に解析値が一致するような地盤ばね定数を求めた。この結果、地盤ばね定数はN値を20として、道路橋示方書により算定される常時の地盤ばね定数とほぼ一致した。この地盤ばね定数を表・1に示す。CASE3およびCASE5では洗掘された部分に対応するケーソンの質点に作用している地盤ばね定数をゼロとして解析した。

6. 解析結果と測定結果の比較

表・2に各CASEの固有値解析から得られた固有振動数を測定値と比較して示す。ただし、橋軸方向振動の測定値は上下方向振動の影響を強く受けるために判別が困難であった。表より上下方向振動の1次から4次までの固有振動数が3.0～3.4Hzの範囲にあり非常に近接している。この理由としては、本橋がゲルバー形式の連続橋であり、合計9個の中間ヒンジがあることから、変位モードが少しだけ異なる振動が現れたためである。上下方向振動の固有振動数は常時微動測定および車両走行の振動測定から得られた測定値と解析結果は良く一致しており、しかも各CASE間での違いはほとんどない。一方、橋軸直角水平方向振動では1次の固有振動数が各CASE間でかなり異なっている。CASE1では2.6Hz、CASE3が3.0Hz、CASE5が3.3Hz程度となっており、洗掘の改修が進み地表面からの橋脚高さが低くなるにつれて固有振動数が増加していることがわか



図－7 加速度時刻歴



図－8 固有振動数の変化

る。また、常時微動試験結果と車両走行試験を比較してみると、常時微動試験の方が多少高くなっている。これは図・7に示すように常時微動が微小振動であるのに対し、車両走行時にはかなり大きく振動しており、支承および中間ヒンジ点の摩擦が小さくなり、全体の剛性が低下しているものと考えられる。なお、解析から得られた橋軸直角水平方向2次の固有振動数は実験値にほとんど近い値を示している。

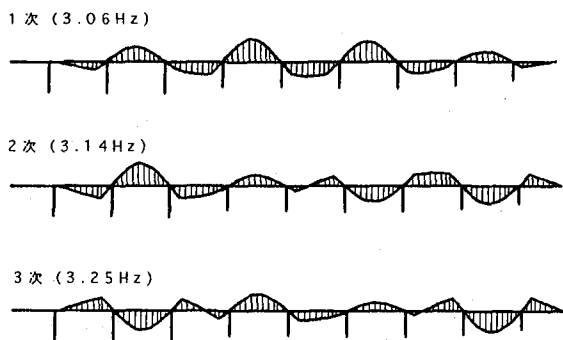


図-9 上下方向振動モード (CASE5)

図-8は各CASEにおける固有振動数の変化を図示したもので、本橋程度の洗掘状態であれば橋軸直角水平方向1次振動の固有振動数が2割程度異なっていることがわかる。したがって、連続橋橋脚のうち、どの部分が洗掘しているかで多少異なるかも知れないが、洗掘度合い判定法に利用できる振動特性は橋軸直角水平方向1次振動ではないかと考えられる。

図-9はCASE5における上下振動1次～3次の振動モードを示したものである。上下方向振動の振動モードはCASE1、CASE3とも図-9に示すモードとほぼ同じであり、橋脚の洗掘による影響をあまり受けずに桁の剛性のみで上下振動の特性が決まることを裏付けている。

一方、図-10は各CASEの橋軸直角水平方向1次振動の振動モードである。この振動モードは各CASEごとに大きく異なり、桁の振動する部分がCASE1からCASE5へと徐々に広がっている。このため、1次の固有振動数が変化しており、洗掘度合い判定に利用できることを示している。

図-11はCASE5におけるP2橋脚の橋軸方向1次振動の振動モードを示したものである。橋軸方向1次振動の振動モードは各CASEとも同様のものであった。これはローラー支承であるP2橋脚の固有振動であり、表-2に示すように洗掘の深さにより固有振動数が変化していることを示している。しかし、橋脚の橋軸方向の振動には桁の上下振動の橋軸水平成分が現れることから、この振動特性を掘削判定に用いることは難しい。また、本橋のローラー支承の位置関係からP2橋脚が単独で振動しやすい構造となっているため、この振動は洗掘橋脚と支承関係で異なる。

以上の測定および解析結果から、橋脚洗掘度合いの判定法として橋梁の振動特性の変化を利用する場合、橋軸直角水平方向の振動特性に注目すればよいことが判明した。しかし、洗掘度合いが橋梁高さに比べて小さい場合には、固有振動数の変化は小さいと思われ、今後数多くの実験および解析による検証が必要であろう。

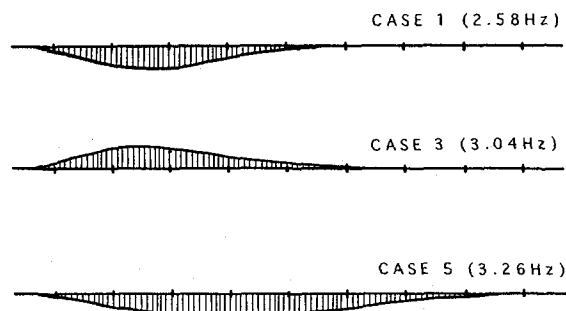


図-10 橋軸直角水平方向振動モード



図-11 橋軸方向振動モード

7. まとめ

洗掘を受けた橋梁の振動特性と洗掘度合いとの関係を明らかにするために、白滝橋について実橋における振動測定および固有値解析を行った。その結果、上下振動は洗掘による橋脚基礎の剛性低下による振動特性の違いは見られなかった。一方、橋軸直角水平方向1次振動の固有振動数は洗掘の改修が進み、地表面からの橋脚高が低くなるにつれて増加していた。また、橋軸直角水平方向1次振動の振動モードは、洗掘の改修が進むにつれ橋軸直角水平方向に振動する範囲が徐々に広がっており、振動モードの変化も明瞭であった。したがって、洗掘度合いの判定を行う際に、橋軸直角水平方向1次振動の振動特性の変化を利用できる可能性が示された。

今後、多くの洗掘された橋梁に対して振動測定を実施しデータを蓄積することにより、振動測定と固有値解析の併用による洗掘度合い判定法の確立を図りたい。

参考文献

- 1) 槌矢、山中 他：橋台基礎の側方流動現象に関する一考察、第20回土質工学研究発表会講演集、pp.1179-1180、1985
- 2) 伊東：振動測定によるコンクリート橋の点検法について、土木学会第38回年次学術講演会講演概要集Ⅰ、pp.349-350、1983
- 3) 松下、中井 他：道路橋の振動特性の経年変化と補修との相関性に関する研究、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集Ⅰ、pp.519-520、1985

- 4) 森川、山本 他：橋梁損傷と振動特性の変化に関する解析的検討、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集Ⅰ、pp.736-737、1990
- 5) 山本、森川 他：振動特性を利用した既存橋梁の損傷評価法に関する研究、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集Ⅰ、pp.786-787、1990
- 6) 加藤、島田：橋脚振動特性の実測データによる統計分析、土木学会論文報告集 第338号、pp.229-232、1983
- 7) 加藤、高木、島田：PC橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究、土木学会論文報告集 第341号、pp.113-118、1984
- 8) 加藤、田中：振動測定に基づく橋梁下部工特性の判定、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集Ⅰ、pp.26-27、1989
- 9) 西村、棚村 他：衝撃振動試験による橋梁基礎の根入れ効果の検討、第23回土質工学研究発表会講演集、pp.1547-1548、1988
- 10) 田中、西村 他：軟弱地盤中に建設された高架橋の健全度判定、第29回土質工学研究発表会講演集、pp.1659-1660、1994
- 11) 仲間、松本：河床洗掘を受けた白滝橋の動態観測、第46回九州地方建設局管内技術研究発表会論文集、1995

(1995年9月18日受付)