

常時微動計測による曲線鋼板桁橋の固有振動特性同定に関する一考察

Modal identification of curved steel plate girder bridge based on ambient vibration measurement

北見工業大学 正員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
 北見工業大学 学生員 ○湯村美紀 (Miki Yumura)
 北見工業大学 学生員 坂和平 (Kazuhei Ban)
 北見工業大学 正員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
 北見工業大学 正員 三上修一 (Shuichi Mikami)
 北見工業大学 フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)

1. はじめに

近い将来の老朽化橋梁の急増に対して、物理的なモニタリングデータから橋梁の損傷度や余寿命を評価する構造健全度診断システムの開発がもてられている¹⁾。このような構造健全度評価手法のひとつとして、振動データからシステム同定手法を用いてモード特性の変化を把握する方法が考えられる。このような振動データに基づく構造健全度診断は、損傷による微小な振動特性の変化を検出するため高精度な構造同定アルゴリズムが必要であるとともに、結果の妥当性を適切に評価するためには、対象橋梁の構造に特有の固有振動特性を十分に把握しておく必要がある。

曲線橋は山間地の峠部や都市高架橋など、線形の制約条件が厳しいところでよく採用されている構造形式である。架け替えや大規模な補修が困難なため維持管理上も重要視されるべきだが、振動特性は3次元的に複雑な挙動を示すため、振動データに基づく構造健全度診断を実現するには、詳細な実験データや解析例の蓄積が必要である²⁾。

本研究では、北見市郊外の峠部に架設されていた連続曲線桁橋において、橋梁全体系の振動計測実験を行った。この実験結果のうち、常時微動測定結果に対して相関関

数法と Eigensystem Realization Algorithm(ERA)を適用して固有振動特性の同定を行った。同時に数値解析モデルに対する固有振動解析を実施して両者を比較するとともに、曲線橋特有の検討項目として曲線半径が固有振動モードに与える影響を考察したのでその結果を報告する。



図1 対象橋梁

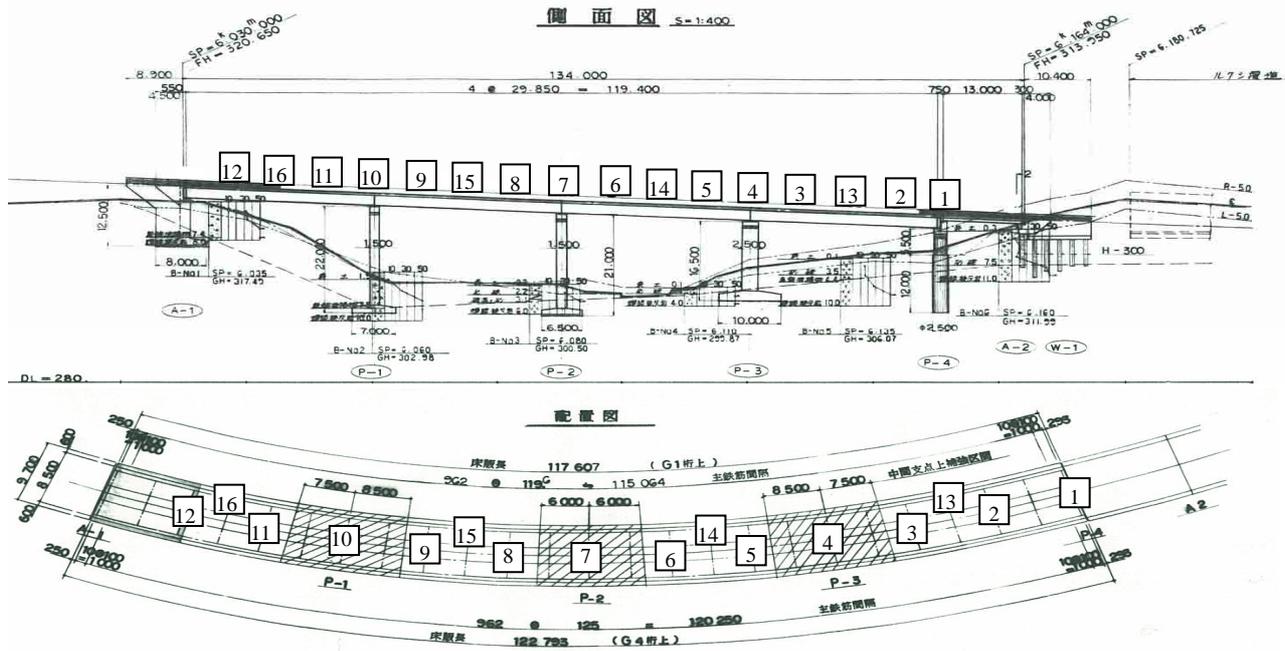


図2 加速度計設置図

2. 常時微動記録による固有振動特性同定

2.1 対象橋梁

図-1 および図-2 に示す対象橋梁は北見市に昭和 62 年 10 月に竣工された 4 径間連続曲線鋼鈹桁橋および PC 単純桁橋からなる橋梁である。本研究は曲線橋部分を研究対象としている。曲線橋は支間長が 4@29.850m、全長 119.400m、橋脚の高さ 16.5~22.0m、縦断勾配 5.00%、横断勾配 6.00%となっている。支承条件を表 1 に示す。また本橋梁には大きな損傷などはなく振動測定時は概ね健全であったと考えられる。なお、対象橋梁は路線の廃止に伴い 2009 年 11 月に撤去されている。本実験は対象橋梁の撤去直前に行ったため実験時の通行車両はなかった。

2.2 常時微動測定

表-2 に示す加速度計を計 16 個床版上に図-2 のように設置し、加振を伴わない状態での振動測定を実施した。P-4 橋脚上の加速度計を ch.1 とした。計測はサンプリング周波数 200Hz、データ点数 16384 点 (81.920 秒) で行い、常時微動記録を 30 サンプル取得した。

2.3 固有振動特性同定

本研究における同定手法は、Eigensystem Realization Algorithm(ERA)を用いた^{3), 4)}。常時微動記録から固有振動特性を同定するために、まず常時微動波形から相関関数法を用いて減衰自由振動波形を生成した。次に生成した減衰自由振動波形を ERA に適用して固有振動数、減衰定数、モード形状を算出した。相関関数法では基準点 s と観測点 r の常時微動データに対して、 $r \times s$ 組の相互相関関数 R_{rs} を算出し、これは点 s にインパルス外力を与えた時の点 r の応答となる。本研究では基準点と観測点を全 16ch とし、 16×16 組の相関関数を作成した。

ERA では、相関関数を自由度ごとに並べた Markov パラメータを作成し、これをさらに任意のステップだけシフトさせながら並べた Hankel 行列を作成する。Hankel 行列の大きさは予備的な解析から 200 行 100 列とした。システム最小実現を得るために特異値分解を用いるが、得られた対角行列について最大特異値の 0.05 パーセント以下を削除してシステム行列を再構築し、これに対して固有値解析を行った。また ERA では Modal Amplitude Coherence(MAC)と呼ばれる指標を用いて、同定結果からインパルス応答が再構成可能かどうかを判別することができる。すなわち MAC 値が低い同定結果は構造物のモードとしては信頼性が低い。この指標と減衰定数を用いて、得られたモード形状の信頼度の基準とした。ERA によって算出された固有振動数、減衰定数を表-3 に、各固有振動数のモード形状を図-3 に示す。

図-3 のモード形状図の作成にあたり、センサーの設置位置以外の点は、得られたデータから推定した。推定した点は各径間の中央部で、橋軸直角方向の中心と地覆上に設置したセンサーの対称位置に相当する点である。まず、それぞれの径間で橋軸上に設置された 2 つチャンネルから得られた振幅の平均を支間中央の振幅とした。さらにこの点と地覆上の点を結んだ線を外挿して対称な点を推定した。たとえば、第 4 径間では、ch.2 と ch.3

表 1 支承条件

	接線方向	法線方向	鉛直方向	接線軸回り	法線軸回り	鉛直軸回り
A-1	M	F	F	F	M	M
P-1	M	F	F	F	M	M
P-2	M	F	F	F	M	M
P-3	F	F	F	F	M	M
P-4	M	F	F	F	M	M

ただし、M は可動, F は固定を示す。

表-2 使用した加速度計

型式名	AS-2GB	AS-5GB	AS-2TG
定格容量(m/s ²)	19.61	49.03	19.61
計測軸数	1 軸	1 軸	3 軸
使用数	10 個	4 個	2 個
製造元	株式会社共和電業		

表-3 常時微動記録から同定した固有振動特性

次数	固有振動数[Hz]	減衰定数
1	3.4343	0.009154
2	4.2223	0.096639
3	5.0330	0.004090
4	5.4637	0.014952
5	6.2208	0.004308
6	6.9896	0.011295

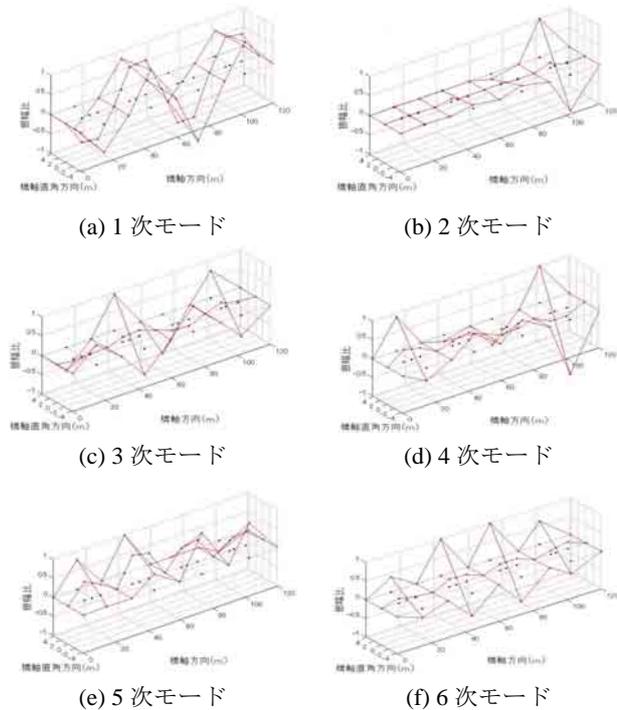


図-3 モード形状

の平均値を支間中央の振幅とし、ch.13 と支間中央の振幅を外押し、ch.13 の対称点の振幅とした。なお、後述の数値解析モデルにおける結果と比較して、その妥当性を確認している。また ch.1 を橋軸方向 0m としている。

同定結果から、1次モードは逆対称曲げモードとなっており、一般的な連続橋の1次モードであると考えられる⁵⁾。2次モードはA1~P1間の1径間のみ大きくねじれが発生している。このモード形状はMACが低いモードであり減衰定数も他のモード形状に比べて非常に大きくすぐに振動しなくなるモードだと考えられる。3次モードは逆対称で曲げとねじれが連成したモードである。4次モードは対称ねじれモードである。このモード形状もMACが低いモードである。5次モードも曲げとねじれの連成したモードである。6次モードは対称ねじれモードの形状になっている。本研究の対象橋梁では、曲線橋であるがねじれ剛性の高い箱桁ではなく、钣桁形式でありねじれモードが比較的発現しやすかったと考えられる。

3. 固有振動解析

解析には Midas-Civil を用いて 3次元 FE モデルの固有値解析を行う。固有振動解析は Subspace Iteration タイプを用い 30 次まで行う。

3.1 実橋 (R=170m) モデル

実際の橋梁をモデル化した実橋 (R=170m) モデルは半径 166.250m~173.750m の円弧上に 4 本の桁を生成し縦断勾配 5.00%、横断勾配 6.00%とする。モデル断面として主桁は 1 本あたり幅 2.5m、厚さ 0.332m の床版を I 型鋼桁の上に乗せた合成断面とした。横桁は I 型、横構と中間支材は本来 CT 形鋼であるが節点位置の制約から、中立軸に対して同じ断面 2 次モーメントの長方形断面で構成し、中立軸上に配置する。なお、実際の橋梁は非合成断面であるが、本研究では常時微動を用いているため鋼桁と床版は一体として挙動すると考え合成断面とした⁶⁾。

表-4 には境界条件となる支承のばね定数を示す。解析モデルでは支承をばねでモデル化した。各支点では各主桁が 6 自由度でばね支持されているが、同一方向では同じばね定数とした。また、鉛直軸回りのばね定数は 0 とした⁷⁾。

曲線橋 (R=170m、R=100m) モデルでは支承の方向を定める必要がある。実際の支承の支持方向は固定支承 (P-3) から放射状に各々の可動支承が設置してあるが、曲線橋モデルでは A-1 と P-4 を結んだ線を X 軸としているので、この X 軸に対する支承の角度を表-5 に示す。

質量については、Midas の質量計算機能のうち、自重を集中荷重として質量に変換し、各節点に作用させる方法を用いている。

3.2 直線橋モデルと曲線橋 (R=100m) モデル

本研究では、曲線橋特有の検討項目として曲線半径が固有振動モードに与える影響を考察するため、実橋と比較して小さな曲線半径となる R=100m のモデルと直線橋モデルに対しても解析を行った。

直線橋モデルと曲線橋 (R=100m) モデルの部材は実橋モデルと同じものであり、曲線半径の違いによる部材の数や配置は変更していない。

直線橋モデルは実橋の桁長の平均である 120.200m を桁の長さとしすべての桁を同じ長さとした。横断勾配は

表-4 ばね定数 [kN/mm]

	接線方向	法線方向	鉛直方向	接線軸回り	法線軸回り
A-1	0	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ⁹	1.0×10 ⁹
P-1	0	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ⁹	1.0×10 ⁹
P-2	0	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ⁹	1.0×10 ⁹
P-3	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ⁹	1.0×10 ⁹
P-4	0	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ⁹	1.0×10 ⁹

表-5 支承の配置方向

	直線橋	実橋 (R=170)	曲線橋(R=100)
A-1	0°	-5°	-9°
P-1	0°	0°	0°
P-2	0°	6°	10°
P-3	0°	10°	16°
P-4	0°	23°	26°

表-6 各モデルの固有振動数 [Hz]

	直線橋	実橋 (R=170)	曲線橋 (R=100)	実験
1	3.69	3.48	3.43	3.43
2	4.14	3.99	3.99	4.22
3	4.66	4.61	4.78	5.03
4	(4.99)	4.81	4.84	
5	5.05	5.05	5.28	5.46
6	5.74	5.57	5.47	6.22
7	5.85	5.76	6.04	
8	6.46	6.46	6.62	6.98

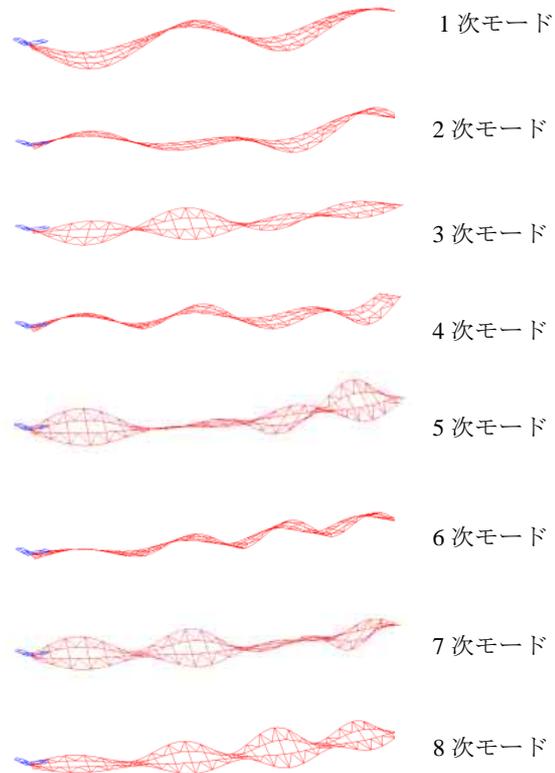


図-4 モード形状

実橋モデルの片勾配 5%ではなく拌み勾配 2%とする。

曲線橋 (R=100m) モデルは半径を 96.250m ~ 103.750m の円弧上に 4 本の桁を生成した。このモデルの勾配は実橋モデルと同じである。

3.3 結果と考察

表-6、図-4 に固有振動解析結果のうち鉛直方向に有効質量率が高い 1 次~8 次モードの固有振動数とモード形状を示す。

この解析結果は全体的に実験値と実橋モデルで近い結果が得られた。1 次モードでは実験値とほぼ同じモードを得た。解析では、曲線外側の外桁の振幅が大きいが、これは外側の桁長が内側に比べて長いためであり、その他のモードでも同じである。2 次モードは、第 2 径間と第 3 径間の振幅が第 1 径間と第 4 径間のものに比べて小さく、実験で得られた A-1~P-3 の曲げたわみは整合している。しかし、第 4 径間の振幅と第 1 径間のねじれがお互い合致していない。3 次モードは、ねじれ、上下の振幅共に実験の形状とほぼ同じである。解析の 5 次モードは実験の 4 次モードと第 1、第 4 径間のねじれ振幅が大きく対応している。6 次モードは、実験の 5 次モードに似たモード形状であり、たわみは整合しているが実験結果ではねじれ振幅もある。8 次モードは、実験の 6 次モードと似たモード形状であり、たわみ、ねじれ共に実験の形状とほぼ同じである。なお、4 次モードと 7 次モードは実験結果と対応するものが見つからなかったため考察から除いた。

実橋と実験で固有振動特性を比較すると、1 次モードが最も実験値との差が小さく 1.4%の差だった。最大では 6 次モードで 10.4%の差となった。モード形状については、実験では計測点数に制約があり、モード形状も含めて精度を向上させるようさらに検討が必要である。

図-5 は、直線橋モデル、実橋モデル、R=100m モデルの同形状における振動数を比較したものであるが、たわみモードでは、曲線半径が小さくなれば振動数は小さくなり、ねじれモードでは、逆に曲線半径が小さくなれば振動数は大きくなる傾向にある。なお、直線橋モデルの 4 次モードでは、曲げとねじれが連成するモードとなり実橋モデルのモードと形状が異なるので対象から除いた。なお、直線橋モデルの曲げたわみモードでは内桁の振幅が外桁よりも大きくなった。これは、内桁のフランジ幅が外桁より小さく剛性がやや低いからである。

4. おわりに

本研究では既設の連続曲線橋において、橋梁全体系の振動計測実験を行った。常時微動測定においては通行車両などの影響を受けない良好な条件で測定を行い、複数の振動モードを精度良く同定した。設計図書から数値解析モデルを構築し、実験結果と比較したところ各モードで固有振動数やモード形状はおおむね一致した。曲線半径を変更したモデルとの比較では、たわみモードとねじれモードで固有振動数にあたる影響が異なることなどを確認した。

測定における今後の課題としては、モード形状をより精密に求めるためのセンサー基数の増加が必要だが、従

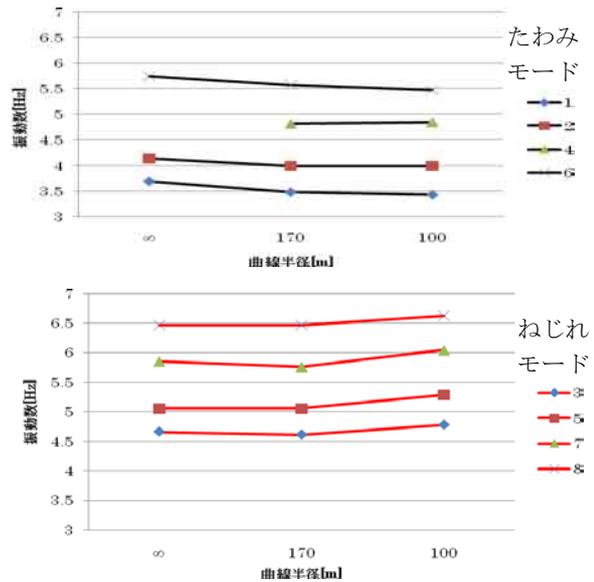


図-5 固有振動数の比較

来型の有線センサーでは測定にかかわる時間やコストが大きくなるため、無線センサーの導入を検討する。解析においては、モデルアップデートを適切に行えるような手法の開発が必要である。

謝辞

本研究における現場振動実験においては、北海道開発局網走開発建設部北見道路事務所、株式会社宮田建設の皆様のご協力をいただきました。また実験の実施に際しては北見工業大学土木開発工学科(専攻)の談日華、伊藤卓、久保成美の各氏の協力を得ました。また、本研究の経費の一部は科学研究費補助金(課題番号 21710166)ならびに日本鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業(学生研究助成)」の補助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 大島俊之編：橋梁振動モニタリングのガイドライン、土木学会、2000。
- 2) 西弘明、佐藤京、岡田慎哉、小室雅人、岸徳光:曲線鋼箱桁橋の固有振動特性評価に関する実験的・解析的研究、鋼構造年次論文報告集、第16巻、pp.317-324、2008。
- 3) Jer-Nan Juarn: Applied System Identification, Prentice Hall PTR, 1994。
- 4) 長山智則、阿部雅人、藤野陽三、池田憲二:常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解、土木学会論文集、No.745/I-65、pp.155-169、2003。
- 5) 中井博、小林治俊：土木構造物の振動解析、森北出版、1999。
- 6) 大塚久哲、崔準祐、山内春絵：4 径間連続曲線箱桁橋における地震時の支承反力に関する研究、土木学会地震工学論文集、pp.485-492、2007。
- 7) 日本道路協会：道路橋支承便覧(改訂版)、2004。