

構造物の固有振動モード測定技術

鉄道力学研究部 構造力学

主任研究員 曾我部正道

1. はじめに

近年、新幹線の営業速度や試験最高速度は飛躍的に向上しており、更なる速度向上への技術開発も進められている。列車の高速化と土木構造物の関係においては、安全性の観点からは共振に対する評価が、使用性の観点からは振動・騒音などの周辺環境への影響評価が課題となってくる。これらの課題に的確に対処していくためには、構造物の振動モード形状を部材レベルの変形まできめ細かく把握しておく必要がある。

構造物の振動に関して筆者ら¹⁾は、高速化に伴う構造物全体系1次モードに関する共振現象を指摘し、これに対応した動的設計手法を提案している。また宮下ら²⁾は、部材振動の研究として、鋼鉄道橋における高速走行に対し、列車走行速度と局部振動についての関係を明らかにし、局部振動によって局部応力が大きくなることで、疲労上問題が発生することを指摘している。原ら³⁾は、高架橋張出しスラブ部材の振動が地盤振動に悪影響を及ぼす場合があること等を指摘している。

しかし現状では、部材レベルの変形形状まで着目した検討事例は限られており、例えば最も一般的な鉄道構造物である鉄筋コンクリート(以下RCという)ラーメン高架橋についてですら、振動特性や振動モードが十分には明らかにされていないのが実状である。

以上のような背景から本研究では、以下を研究の目的とした。

- (1) 鉄道RCラーメン高架橋を対象として、多点同時測定結果から実験解析によるモード形測定手法を用いて、振動特性、特に振動モード形状および固有振動数を推定する。
- (2) 上記の成果を踏まえ固有振動数の簡易な推定方法を提案する。

2. 固有振動モードの測定方法

固有振動モードを測定する方法は機械工学の分野でその理論や実証が多く行われている。これらの方法については、例えば、参考文献4)、5)に詳しい。振動特性を把握する方法としては、数値解析による方法、および実験解析による方法がある。近年では、安価なセンサーが開発されたことで、多点同時測定を簡易に行なうことができるようになった。以下、鉄道構造物に設置した加速度センサーの応答値を利用して、振動モード形を把握する方法を述べる。なお、測定方法には、簡易なものから複雑なものまで理論整理されているが、本研究の目的から、最も簡易なものを利用する。本測定では、ハンマーを利用した衝撃加振を行っている。この方法は簡易に加振ができる上に、自由振動に近い振動を励起することに特徴がある。また、加振力に可観測性があることも特徴である。しかし、波高率が極端に大きいことや、SN比が小さいこと、また、低周波帯域を励起しにくいことに注意が必要である。本測定では、入力インパルスハンマーによる加振であるため、力として可観測であるが、測定では、列車荷重の利用も想定しているため、入力が未知である場合の振動モード形の測定手法を中心に述べた。この場合には、構造物に対する入力において、①構造物の減衰が小さく各モードが近接していない、②入力が卓越した振動数成分を持たないホワイトノイズであるという2条件を満たした場合、以下の手順により振動測定が可能である。

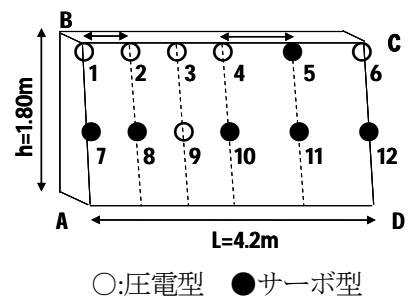


図1 基本例題構造物及び加速度計設置位置

図1に示すRC壁の高欄を基本例題として取り上げて具体的な測定方法について述べる。図中の番号は測定点番号を示す。この測定例では、12の測定点を設けた。なお、図中の○は電圧型加速度計、●はサーボ型加速度計を示す。サーボ型加速度計は低振幅域(～約 20m/s^2)しか測定ができないという性能を考慮して、基本的には振幅が小さいと考えられる箇所に配置した。サンプリング周波数は 2000Hz とし、測定時間は数回の試行測定から10秒と設定した。加振は、ハンマー打撃による。打撃箇所は、高欄中央上端(測定点4)付近を中心として、左端上端(測定点1)、やL/4点上端(測定点2と3の間)など複数点で行った。

図2に中央上端におけるハンマー打撃を行った際の測定点4での加速度応答を示す。ハンマー打撃は、高欄から約20cmハンマーを離し、わずかな力で衝撃を与えた。最大振幅は、 20m/s^2 となった。加速度応答は、一般的な自由振動波形であり、全測定点においても同様の傾向であった。基準点としては、いずれのモードの節にならず、かつ低次モードの腹にならない点として測定点11とした。

次に、基準点と各測定点のクロススペクトルを算出する。さらに、基準点を入力とし各測定点を出力とした全測定点の伝達関数も併せて求める。図3に、測定点4と基準点(測定点11)のクロススペクトルを示す。図中、複数のピークを確認することができるが、これらのピーク周波数を固有振動数の候補としてストックした。図4に基準点を入力とし各測定点を出力とした伝達関数を示す。ストックしたピークに対応する振動数での伝達関数の振幅を読み取り、振動モード形の振幅とした。また、ピーク周波数の位相情報を利用して、 $-\pi/2 \sim \pi/2$ であれば同位相、それ以外であれば逆位相として振動モードに±の符号を与えた。なお、得られた振動モード形に対しては、最大振幅が1となるように基準化を行った。

図5に振動モードの測定結果を示す。83Hzで1次の振動モード形、94Hzで2次のモード形を測定することが可能であった。1次では全体が倒れるようなモードであり、2次では自由端がねじれるモードであった。以上がモード測定方法の概略である。これらの手法を用いて実構造物の測定を行った。

3. 実構造物における測定

前章の方法により、実構造物の多点同時測定を行い、固有振動モードを推定した。

3.1 ラーメン高架橋の中間スラブ

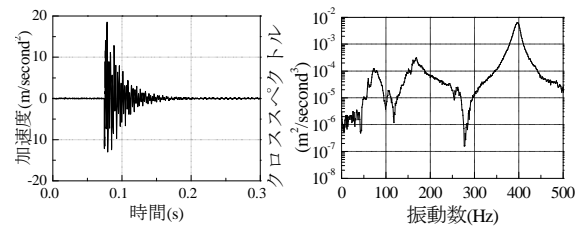


図2 加速度応答

図3 クロススペクトル

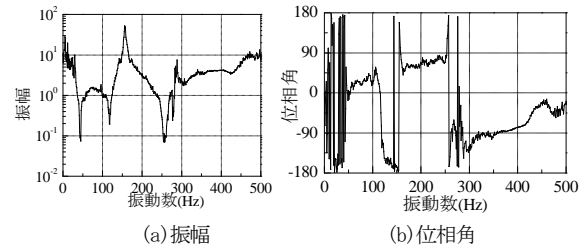


図4 伝達関数(測定点11入力、測定点4出力の例)

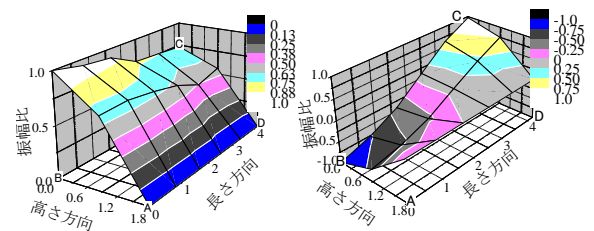


図5 測定振動モード (高欄)
(a)83Hz (b)94Hz

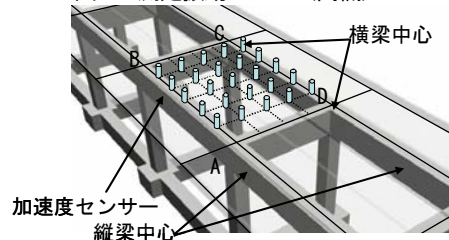


図6 センサー配置(中間スラブ)

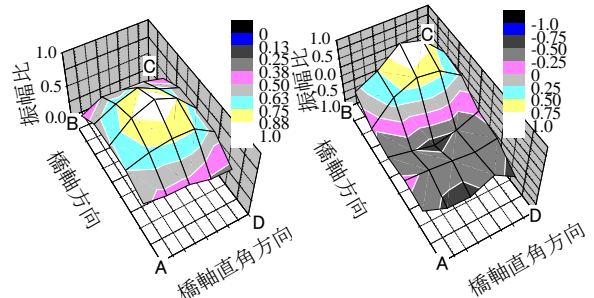


図7 計測振動モード (中間スラブ)
(a)20Hz (b)96Hz

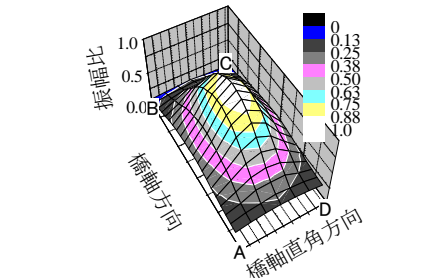


図8 解析振動モード (中間スラブ) 21Hz

図6に中間スラブの測定におけるセンサー配置を示す。センサーは縦梁のスペンを6等分、横梁のスペンを4等分し、その格子上の点に25個を配置した。図7に測定した振動モードおよび振動数を示す。加振位置はスラブ中央とし測定を行った。測定結果の1次の固有振動数は20Hzと推定された。図8に三次元FEM解析結果を示す。解析結果は21Hzで同様の振動モードが得られた。測定結果の96Hzでは2次の振動モードが得られた。

3.2 張出しスラブ

図9に張出しスラブの測定におけるセンサー配置を示す。橋軸方向は、端横梁間を12等分し、予測されるモード形状にあわせて図中の位置に配置した。橋軸直角方向には、張出し長を3等分した位置に配置した。図10に測定した振動モードおよび振動数を示す。また、図11に解析結果を示す。解析結果では、1次の固有振動数は13Hzであった。測定結果では、13Hzにピークが確認できたが、解析結果とは異なる振動モードであった。これは、解析モデルに考慮できていない張出しスラブ下面の電柱基礎の影響により、加振した振動が全体に伝わらず、同様の振動モードではなかったと考えられる。19Hzでは中央部と端部が逆位相となる振動モードが得られた。

3.3 縦梁および横梁

図12に縦梁および横梁のセンサー配置を示す。センサー配置において、縦梁は横梁中心間を12等分し、横梁は縦梁中心間を12等分した位置に配置した。図13に縦梁と横梁の測定振動モードおよび振動数と解析結果を示す。縦梁、横梁の測定結果については、綺麗な振動モードが得られなかった。これは、梁にスラブが取付いており、その境界が明確ではなく、スラブと連成して振動しているためと考えられる。また、縦梁の測定結果は、解析結果に比べて固有振動数が大きい値となった。実構造では、後述するように梁上に路盤コンクリートが配置されている。解析では、路盤コンクリートの質量は考慮しているが、剛性は考慮していない。このため、両者に差が生じたものと考えられる。

4. 固有振動数の簡易推定法

4.1 理論式および近似式

固有振動数の算定に関しては理論式および近似式が提案されている。例えば、土木学会の構造力学公式集⁶⁾では、部材の固有振動数の算定式を以下のように示している。

式(1)に片持ち梁、式(2)に単純梁、式(3)に両端固定梁の固有振動数算定式を示す。

$$f = \frac{1}{2\pi\lambda^2} \sqrt{\frac{3EI \cdot g}{\rho A(\mu + 0.23)}} \dots(1) \quad f = \frac{1}{2\pi\lambda^2} \sqrt{\frac{48EI \cdot g}{\rho A(\mu + 0.49)}} \dots(2) \quad f = \frac{1}{2\pi\lambda^2} \sqrt{\frac{192EI \cdot g}{\rho A(\mu + 0.38)}} \dots(3)$$

ここに、 λ は部材の長さ(m)、 E は部材のヤング係数(kN/m²)、 I は部材の曲げ剛性(m⁴)、 A は部材の断面積(m²)、

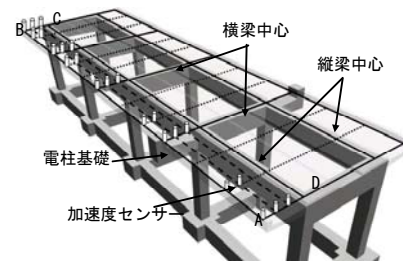


図9 センサー配置(張出しスラブ)

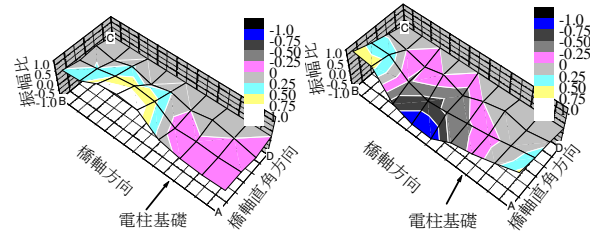


図10 計測振動モード(張出しスラブ)

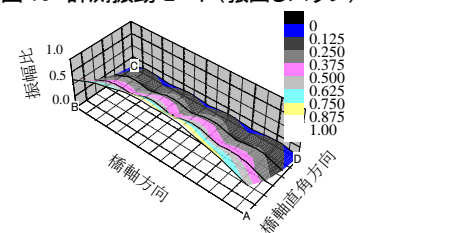


図11 解析振動モード(張出しスラブ) 13Hz

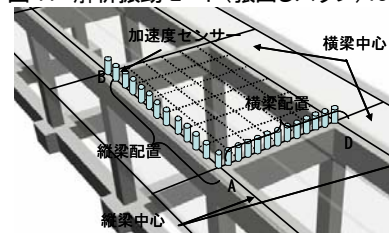


図12 センサー配置(縦梁・横梁)

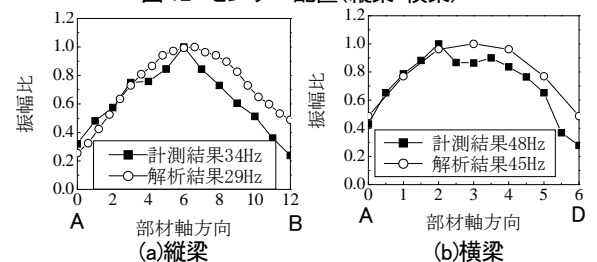


図13 計測および解析振動モード(縦梁・横梁)

表 1 固有振動数の測定結果と FEM 解析、理論式および近似式との比較

		測定 (Hz)	FEM 解析 (Hz)	理論式および近似式						
				固定支持(Hz)		単純支持(Hz)		使用数値		
				路盤コンクリート		路盤コンクリート		部材寸法(m)	E (kN/m ²)	単位重量 (kN/m ³)
				非考慮	考慮	非考慮	考慮			
ラーメン高架橋	中間スラブ	20	21	30	61	16	31	a=5.2, b=9.2	2.5 × 10 ⁷	24.5
	張出しスラブ	13	13	13				λ=2.6		
	縦梁	34	29	25	33	11	14	λ=10.0		
	横梁	48	45	94	143	40	63	λ=6.0		
単純 T 型桁	中間スラブ	19	17	42	79	21	40	a=5.2, b=9.2	2.5 × 10 ⁷	24.5
	張出しスラブ	11	12	13				λ=2.6		

g は重力加速度(m/s²)、 ρ は部材の単位重量(kN/m³)、 $\mu (=m/\rho A \lambda)$ 、 m は集中質量(kN)を示す。

式(4)に四辺単純支持および固定支持スラブの固有振動数算定式を示す。

$$f = k \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D \cdot g}{\rho \cdot h}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $k (=b/a)$ は長辺・短辺比率で支持条件(固定または単純)に基づく係数、 a は短辺長さ(m)、 b は長辺長さ(m)、 D は部材の曲げ剛性(kN・m²)、 h は部材厚(m)を示す。

4.2 測定結果とFEM解析、理論式および近似式との比較

表 1 に固有振動数の測定結果と FEM 解析、理論式および近似式との比較結果を示す。支持条件は固定支持と単純支持とした。図 13 に示す路盤コンクリート剛性の考慮の有無についても検討した。ヤング係数や路盤コンクリートの影響が明確でないため、必ずしも全ての現象を説明しきれていないが、設計への対応の観点からは表中で着色したケースが妥当であると考えられる。

縦梁は、ラーメン径間数が多いため支持条件の固定度が高くなっていると推定される。また全スパンに渡り路盤コンクリートが設置されているためその影響も大きくなったと推定される。横梁、中間スラブは、測定および解析より支持条件の固定度があまり大きくないことが推定され、また路盤コンクリートも間欠となるため影響は少ないと推定される。

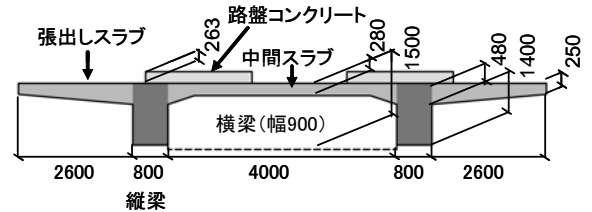


図 13 ラーメン高架橋の断面図

5. まとめ

本研究では、実験解析によるモード形測定手法を用いて、以下の知見を得た。

- (1) 多点同時測定結果から標準的な鉄道 RC ラーメン高架橋の振動特性、例えば、梁出しスラブ 1 次 13Hz、中間スラブ 1 次 20Hz など、固有振動モードおよび固有振動数を推定した。測定結果は、FEM 解析結果とも比較的よい一致を示した。
- (2) 上記の測定固有振動数を理論式および近似式で簡易に評価する手法について、適用式の種類および剛性の考慮方法の観点から整理した。

参考文献

- 1) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集 No.724/I-62, pp.83-102, 2003.1
- 2) 宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹: レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.4
- 3) 原恒雄ほか: 新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工の開発, 土木学会論文集 No.766/I-68, pp.325-338, 2004.7
- 4) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977
- 5) 長沼昭男: モード解析, 倍風館, 1985.7
- 6) (社)土木学会: 構造力学公式, 博栄社, 1986.6