

## 走行列車荷重を利用した鉄道橋の振動モニタリング

|               |     |        |
|---------------|-----|--------|
| 株式会社ビーエムシー    | 正会員 | ○杉崎 光一 |
| 大阪大学大学院工学研究科  | 正会員 | 貝戸 清之  |
| 財団法人鉄道総合技術研究所 | 正会員 | 曾我部正道  |

**1. はじめに：**団塊的に老朽・劣化が進む鉄道橋を効率的に維持管理していくための一手法として、継続的な振動モニタリングの実用化が期待されている。継続的振動モニタリングの特徴は、保有性能や損傷とともに変動すると考えられる振動特性（固有振動数，減衰比，振動モード形）を連続的に計測することによって、それらの日常の変動範囲から逸脱する変化を捉えようとする点にある。これらのうち、本研究では特に、走行列車荷重の作用下における橋梁の動的応答から振動特性の同定が可能な新しい振動モニタリングに関して、実橋を対象とした実証分析を試みる。

**2. 振動計測実験の概要：**計測対象は、鉄道総合技術研究所内のループ線に設置された下路式鋼版桁橋（支間 11.45m，道床式(フローティングラダー軌道)）である。振動計測実験では、当該橋梁の列車通過時の加速度応答を計測し、固有振動数と振動モード形の同定を試みる。なお、計測される加速度は列車通過時の応答であるので、同定される固有振動数と振動モード形は、橋梁単体の振動特性ではなく、橋梁と列車の複合系の振動特性であることを断っておく。橋梁（複合系）の全体振動を同定するために、圧電型加速度計を主桁下フランジ上に等間隔に 17 台設置した。また、たわみモードとねじれモードの判別用として、もう一方の主桁下フランジ上の L/4，L/2，L3/4 点に 3 台の加速度計を設置した。これら合計 20 台の加速度応答は、サンプリング周波数 1kHz で AD ボードを介してノート PC に収録される。以上の計測条件のもと、列車速度を時速 5km から 45km まで 5km 刻みで変化させ、列車走行試験を行った。実験の概要を写真-1 に示す。

**3. 固有振動数と振動モード形の同定：**走行列車荷重下の加速度応答を、ホワイトノイズを入力とする不規則振動過程であると仮定し、周波数領域において固有振動数と振動モード形の同定を行った。詳細は割愛するが、同定手法の概要を述べる。まず、全 20 計測点の中から基準計測点を選定する。選定に際しては、いずれのモードの節にならない点、かつ低次モードの腹にならない点が望ましい。今回のケースでは、試行錯誤の結果、L/4 点付近を選定した。次に、基準点と各計測点のクロススペクトルを算出する。さらに、基準点を入力、各計測点を出力として全計測点の伝達関数も併せて求める。クロススペクトルと伝達関数で確認される複数のピークを読み取り、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する。さらに、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する。一方、ピーク周波数の位相の情報を利用して、 $-\pi/2 \sim \pi/2$  であれば同位相、それ以外であれば逆位相であると判断して、振動モード形に $\pm$ の符号を与える。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。得られた振動モード形の実測値に対して、サインカーブ等で解析理論値を設定し、理論値と実測値の相関係数である MAC 値を利用して、振動モード形を特定した。列車通過時の L/2 点での加速度応答を示す。列車進入とともに加速度応答が大きくなっていること、最大値が約  $2\text{m/sec}^2$  となっていることが確認できる。同定に際しては、全加速度応答に対して列車通過時の 10 秒間を切り出し、周波数分析を行うこととした。このために、今回のスペクトルの周波数分解能は 0.1Hz となった。これらの加速度応答から上述の手法により同定した結果を表-2 および図-2 に示す。表-2 において付近となっているのは、数回の試行において同定した固有振動数にばらつきがあるためである。たわみモードに関しては、1 次の鉛直モードおよび、2 次、3 次、4 次とモードを同定したが、4 次モードに関しては MAC 値が低くなっている。また、ねじれモードに関しても、1 次のねじれモード、および 2 次を同定することができた。また、本実験に先立って、インパル

キーワード：走行列車荷重，振動モニタリング，モード形同定，振動特性，保有性能

連絡先：株式会社ビーエムシー 千葉市美浜区中瀬 2-6 (sugisaki@hashimori.jp)

スハンマーによる衝撃加振試験も実施した．その結果は1次：14.7Hz，2次：60.5Hzであり，列車の重量が載荷されていない分，固有振動数が若干大きくなっている．インパルスハンマーにより同定された振動モード形はいわゆる構造物の固有振動数であると考えられるが，列車荷重を利用した場合のように，高次のモードは励起できない．また，モード形はサインカーブ等と比較して歪な形になるため，MAC値は低くなる．

4. **まとめ**：本研究では，走行列車荷重を利用した鉄道橋において，実橋における振動実験において，橋梁と列車の複合系の全体4次モードまでの固有振動数と振動モード形を同定することに成功した．列車荷重を利用し，通過ごとの応答から機械的（自動的）に固有振動数を同定することは，常時の振動モニタリングを行う手段となろう．しかしながら，本手法を利用して，固有振動数を異常検知のための指標として採用するためには，今後，列車重量や環境条件の変動による影響についても検証していく必要がある．



写真-1. 列車走行実験

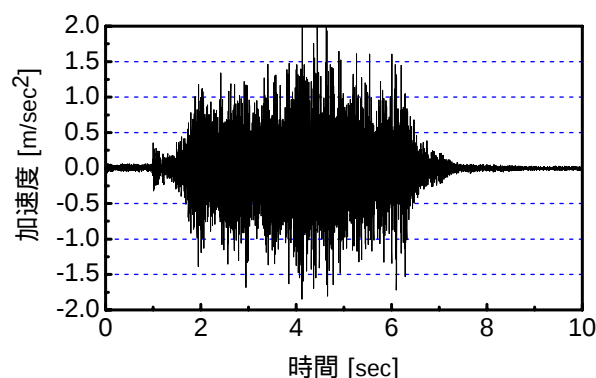


図-1. 加速度応答 (L/2 点, 35km/時)

表-1. 同定されたモード

| モード名  | 振動数        |
|-------|------------|
| 1次たわみ | 17.1Hz 付近  |
| 1次ねじれ | 30.0Hz 付近  |
| 2次たわみ | 57.7Hz 付近  |
| 2次ねじれ | 152.7Hz 付近 |
| 3次たわみ | 220.9Hz 付近 |
| 4次たわみ | 670.6Hz 付近 |

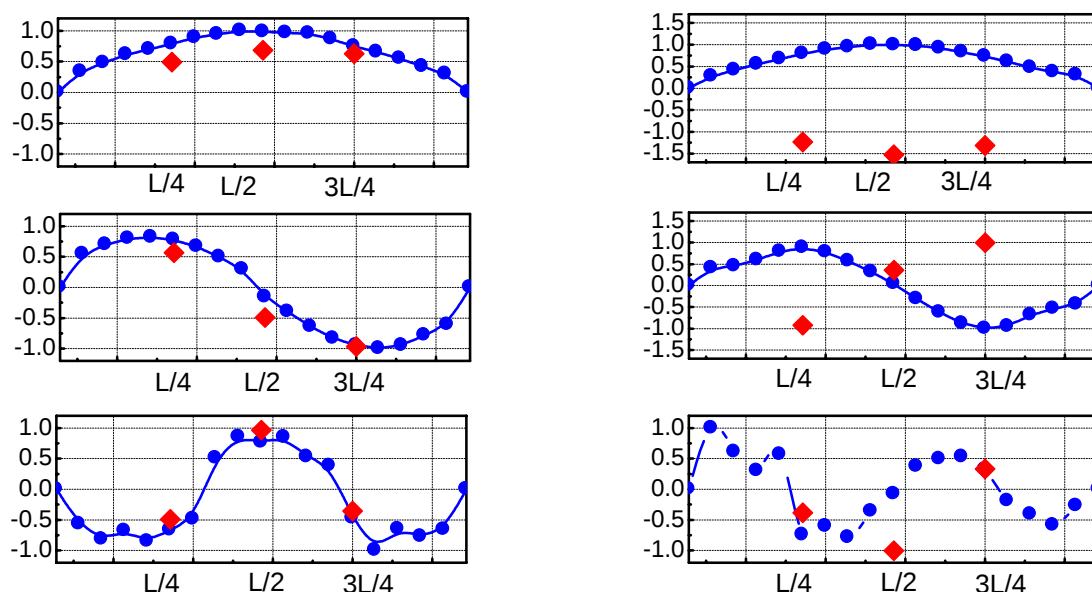


図-2. 振動モード形（左上：1次たわみ，右上：1次ねじれ，左中：2次たわみ，  
右中：2次ねじれ，左下：3次たわみ，右下：4次たわみ）