

ERA を用いた列車通過前後における開床式高架橋の振動特性の同定

大阪大学大学院 学生会員 ○松岡 弘大
 大阪大学大学院 正会員 貝戸 清之
 株式会社 BMC 正会員 杉崎 光一
 財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 渡辺 勉

1. はじめに

現在、急速に老朽化が進む土木構造物を効率的に維持管理していくことが喫緊の課題となっている。このような状況の下、既設構造物の保有性能の評価および損傷の予防・対策を目的として、構造物の固有振動数や減衰比、振動モード形などの振動特性に着目したモニタリング手法が提案されている。振動特性の変化を捉えるような振動モニタリングの場合には、外力の振幅や周波数特性が日々均一であることが理想的である。鉄道構造物に着目した場合、毎日定刻にはほぼ同じ荷重を持つ列車が一定の速度で走行するという望ましい性質を有する。本研究では、走行列車荷重に着目し、列車走行時の加速度応答から鉄道橋の振動特性の同定を試みる。なお、列車走行時に観測される加速度応答をそのまま用いた場合、同定される振動特性は橋梁と列車の複合的な構造系の振動特性となる。したがって、橋梁単独の振動特性を同定するためには、列車が橋上に載荷されていない、①列車退出後の自由振動応答、および②列車進入直前の過渡応答より作成した疑似的自由振動応答を用いることとする。

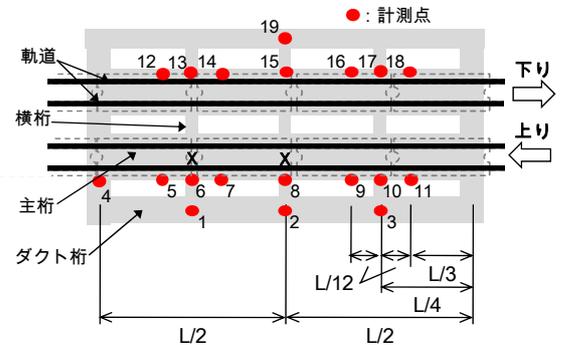


図-1 対象橋梁概要と計測点配置

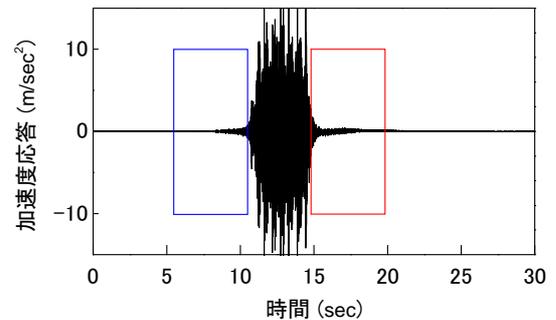


図-2 列車走行時の加速度応答（計測点 8）

2. 列車走行データを用いた振動特性の同定

対象橋梁は開床式コンクリート T 桁橋（橋長 25m）である。当該橋梁は、主に雪荷重を軽減するために、床版構造が省かれた構造となっていることが特徴である。列車が通過した際の加速度応答を圧電型加速度計により多点同時計測した。橋梁の概要と加速度計配置を図-1 に示す。加速度計は主桁上とダクト桁上に全 19 台設置し、サンプリング周波数 2kHz で収録した。通過列車は、下り方向へ向かう 6 両編成の特急であり、その通過速度は 135km/時であった。同定に用いた加速度応答を図-2 に示す。同図から列車進入、通過、退出の様子が加速度応答の振幅から読み取れる。

計測された加速度応答に ERA (Eigensystem Realization Algorithm) を適用し、固有振動数、減衰比、振動モード形の同定を行った。ERA は構造物をシステムととらえ、特異値分解を利用してその特性行列を決定する方法である。本手法の適用にあたっては、入力応答として自由振動応答が必要である。このため、はじめに図-2 に示す加速度応答から列車退出後の波形(赤囲い)を自由振動応答と仮定して ERA の入力応答とした。つぎに、図-2 中の列車進入時に着目する。列車進入時の応答は、列車退出後の自由振動応答とは反対に徐々に加速度振幅が増加する応答特性を示している。そこで、進入時の加速度応答(青囲い)を抽出し、時系列データの順列を逆にすることで疑似自由振動応答を作成し、それを ERA の入力応答とした。同定に際しては、主桁の振動特性に主眼を置き、図-2 中の計測点 4 から計測点 18 の全 15 点の加速度応答を用い、ハンケルマトリクスを 2,000×30,000 次元の行列とした。解析結果から MAC 値が 0.99 以上かつモード減衰比が正の条件を満たすものを主桁の振動特性として抽出した。最終的な振動特性の決定に際しては、参考文献 1) の同定結果なども参照した。

キーワード ERA, 振動特性の同定, 走行列車荷重, 振動モニタリング, 開床式高架橋

連絡先 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院 工学研究科フロンティア研究センター

3. 同定結果

2つの入力波形から同定した各主桁の固有振動数、およびモード減衰比を**表-1**に示す。列車退出後の自由振動応答を入力応答とした場合、同定可能であったのは5.6Hzの1次モードのみと100Hz以上のモードのみであり、それぞれの減衰比は3%、0.2%程度であった。これに対して、列車進入前の疑似自由振動応答を入力応答とした場合、固有振動数が54.0Hzから109.9Hzまでの間で各主桁5個以上のモードを同定することができたが、前述の5.6Hz付近の低次のモードを同定することはできなかった。これらより、列車進入時および退出時の橋梁の応答特性が異なっていることがわかる。また、疑似自由振動応答より同定される減衰比は、その物理的意味が通常の自由振動応答とは異なるために、今後の検討が不可欠である。つぎに、同定した振動モード形として代表的なものを**図-3**に示す。同図(a)は列車退出時の自由振動応答より同定された5.6Hzでの振動モード形を示す。上り、下り両主桁の1次たわみモードはともに同程度励起されている。一方で、同図(b)の列車進入時の疑似自由振動応答では、両桁とも54.1Hzで固有振動数を示している。しかし励起された振動モード形は、下り主桁が3次、上り主桁が4次モードを示しており、各主桁がそれぞれで個々に振動していることがわかる。また、上り主桁のみで励起されているモードとして同図(c)に5次モードを示す。これらの結果から、列車が橋梁に進入する前であっても、導入される加振力は部材により異なることがわかる。また、概して列車が走行する桁は、走行しない桁と比較して同じ振動数でもモード次数が低くなっていた。このことから、列車が走行する主桁に大きな加振力が導入されていると考えられる。

4. おわりに

上記の結果における列車退出時および進入時での違いは、入力応答の卓越成分に起因すると考えられる。しかし、加振条件こそ異なるものの、列車が通過することに起因する質量の変化を含んでいないことを考慮すると、同定した振動特性はともに橋梁単体の構造系の振動特性であるといえる。つまり、これらの2つの入力応答から各主桁の振動特性として、下り主桁7個、上り主桁12個のモードを同定したことで等価と考えることができる。別の研究成果では、列車通過中の応答を用いて橋梁と列車の複合的な振動特性が同定できることを明らかにした。今回の結果を合わせることで、1本の列車が橋梁上を通過する応答から、橋梁と列車の複合的な振動特性に加え、橋梁単体としての振動特性を同時に把握可能であると考えられる。今後、上記の2つの振動特性からその相互関係、および損傷の影響などを検討していく予定である。

表-1 同定結果

列車退出時の自由振動応答			
下り主桁(列車走行桁)		上り主桁	
固有振動数	モード減衰比	固有振動数	モード減衰比
5.6 Hz	0.029	5.6 Hz	0.032
105.7 Hz	0.002	131.1 Hz	0.002
列車進入時の疑似自由振動応答			
下り主桁(列車走行桁)		上り主桁	
固有振動数	モード減衰比	固有振動数	モード減衰比
69.7 Hz	0.008	54.0 Hz	0.004
92.4 Hz	0.012	57.2 Hz	0.005
92.7 Hz	0.003	67.6 Hz	0.003
103.9 Hz	0.009	69.7 Hz	0.008
109.9 Hz	0.018	71.1 Hz	0.001
		75.3 Hz	0.006
		86.7 Hz	0.037
		91.0 Hz	0.014
		99.8 Hz	0.004
		103.1 Hz	0.006

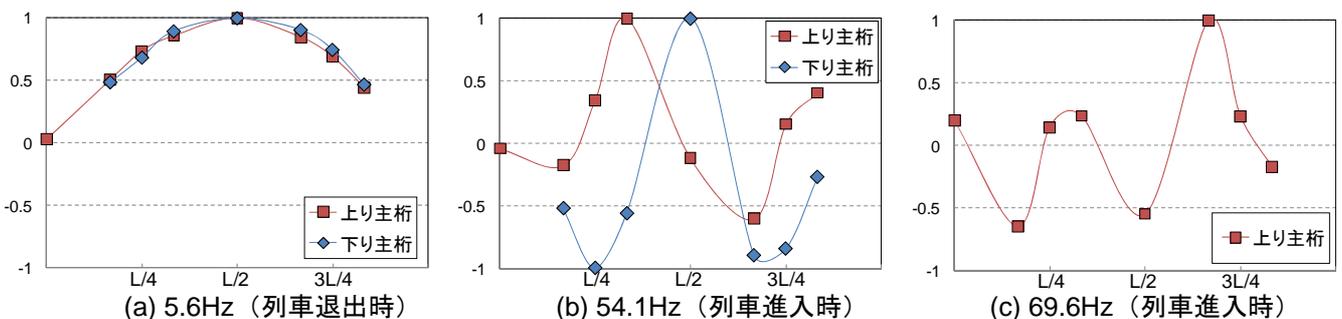


図-3 同定された振動モード形

【参考文献】 1) 松岡弘大, 貝戸清之, 杉崎光一, 渡辺勉: 列車走行時の加速度応答を用いた開床式橋梁の振動特性同定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, 2009 (投稿中).