

局所的な振動を考慮した多点振動計測による 高速鉄道橋梁の動的挙動解析と加速度基準の検証

地球総合工学専攻 社会基盤工学コース
社会基盤マネジメント学領域 四井 陽貴

1. はじめに

高速鉄道橋梁では、通過する車両の規則的な車軸配置による加振振動数と橋梁の固有振動数が近接することにより列車通過時に動的応答が増大する共振現象が発生する場合がある。鉄道橋の共振現象に対しては国内外で数多くの研究が実施され管理基準の整備が進められてきた。桁の最大変位が基準となっている日本の高速鉄道とは異なり、欧州の構造物基準である Eurocode では列車通過時の床版加速度に基準値が設定されている。この基準値は車輪がレールから浮き上がることや支承の浮きを防止する観点で設定されており、本研究で取り扱う軌道構造の場合には 5m/s^2 が上限値となっている。

しかし、欧州高速鉄道では床版加速度が基準値であるにも関わらず、慣例的に桁に生じる加速度を計測して床版加速度の照査が実施されている。列車通過時に桁全体の振動だけでなく床版部材単位の局所的な振動が卓越する場合には、このような照査方法では実際に生じている加速度の過小評価につながっている可能性がある。実測結果に基づいて床版部材単位の振動を評価するためには面的な多点加速度計測による振動モード同定が必要である。ただし実橋梁を対象とした加速度の実測事例は数少なく、実測結果に基づいて Eurocode 基準を検証した事例も、本研究とは軌道構造が異なる合成桁を対象とした研究¹⁾が存在する程度であった。このように列車通過時の動的挙動解析が十分実施されていない状況であったことから、本研究では日本のコンクリート箱桁橋を対象に加速度計測を実施して Eurocode 基準を評価した。

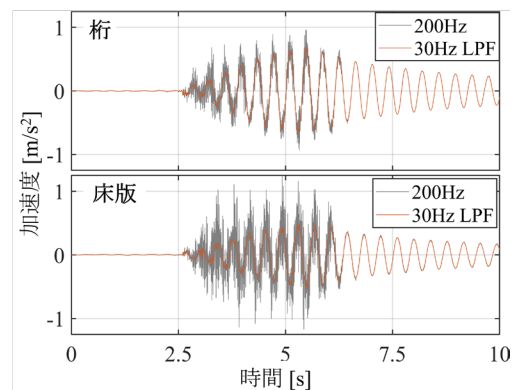
2. 検討手法の概要

箱桁内部の上面と下面に合計 23 台の加速度計を設置し、計 24 列車通過時の加速度を測定した。桁下面の計測点は桁全体の挙動を把握するために設置した。桁上面の加速度計は床版部材の面的な振動を把握するために設置し、横桁と偏向部隔壁に囲まれた領域を一単位と考えて 2 次元平面状にアレイ配置した。得られた波形から Eurocode の基準である 30Hz ローパスフィルタ (LPF) 加速度を算出し分析した。

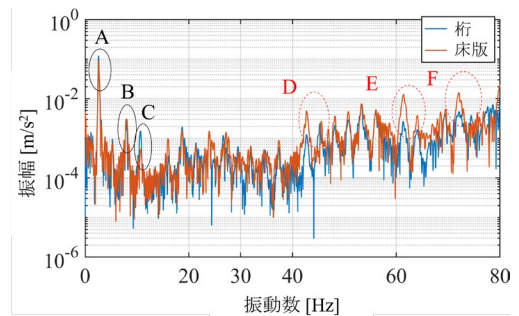
振動モードの同定には ERA (Eigensystem Realization Algorithm) を適用した。ERA は線形時不変システムを仮定して最小実現の考え方に基づいて多点で計測された自由振動波形から振動特性を同定する手法である。本研究では、列車通過後の残存波形を自由振動波形とみなして ERA を適用し、各振動モード形の固有振動数とモード減衰比を同定した。

3. 加速度計測と振動モードの同定結果

計測された加速度波形の事例を図-1(a)に示す。加速度の最大値は Eurocode の基準値 5m/s^2 を大きく下回っている。また、30HzLPF 加速度は床版部材振動モードの影響が反映さ



(a) 加速度波形の比較



(b) 加速度スペクトル

図-1 桁と床版の加速度計測結果の事例

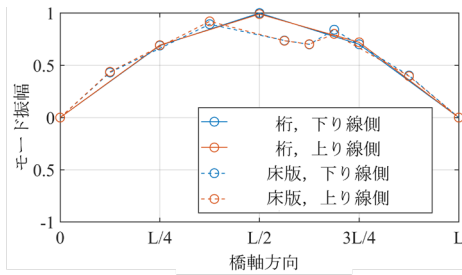


図-2 桁全体振動モード (1次曲げ 2.58Hz)

れる床版計測点で桁計測点より値が小さく、床版部材振動が卓越する状況にはなっていないことが明らかとなった。(b)に示す加速度スペクトルの比較でも、D から F に示すような床版のみで卓越するピークは 30Hz 以下の範囲では確認できない。30Hz 以下で比較的大きなスペクトル振幅を有するピーク A から C は桁と床版で同等程度の振幅を有していることから桁全体振動に対応していると考えられ、この仮説をモード同定により検証した。

桁全体振動モードは、図-2 に示す 1 次曲げ (2.58Hz) に加えて 1 次ねじれ (7.88Hz)、2 次曲げ (9.25Hz) の合計 3 モードが同定された。これらの固有振動数は図-1 (b) で示した 3 つのピーク A, B, C にそれぞれ対応する振動数になっていた。また、図-3 は床版部材の振動モードである。合計 4 モードが同定されたが、2 種類の 1×1 次モード (図-3 では A と B で区別) が存在した。本研究では隣接床版部材との位相関係を比較し、隣接床版と同位相か逆位相による連成性状の違いとして結果を考察した。図-4 は、当該床版の計測点 (D7 と記載) と隣接する床版部材の同じ位置の計測点 (図中では D1, D14 と記載) とのクロススペクトルの位相を算出した結果である。A モードでは両方の隣接床版と逆位相であるのに対して、B モードは片側と同位相であることが確認できる。同位相モードの場合には、隣接床版に回転を拘束されるため周辺固定支持の条件に近づくのに対して、逆位相モードの場合には周辺単純支持の条件に近くなる。実際に同定結果を計算値と比較した結果、A モードは周辺単純支持された平板振動の理論値と、B モードは固有値解析によって算出された周辺固定支持された平板の固有振動数と一致した。このように多点情報を生かすことにより連成性状も考慮した列車通過時の局所的な動的挙動を解明した。

さらに、以上の床版部材の局所的な振動を考慮した動的挙動解析の結果を踏まえると、分析対象としたコンクリート箱桁橋では桁全体の 1 次曲げ振動が卓越しているため、慣例的に実施されていた床版加速度を桁加速度で代用した照査でも実際に生じている加速度の過小評価にはつながっていないといえる。

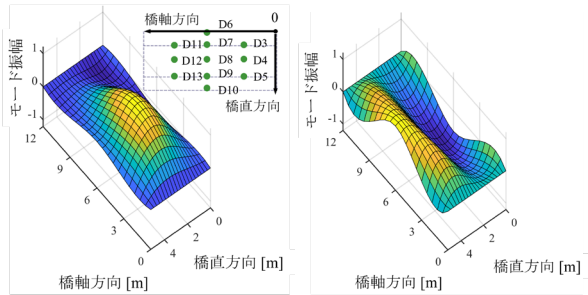
4. おわりに

本研究では加速度の面的な多点計測によって、分析対象の高速鉄道橋梁では局所的な床版部材単位の振動を考慮しない照査でも、Eurocode の加速度基準に対して過小評価につながっていないことを実証した。

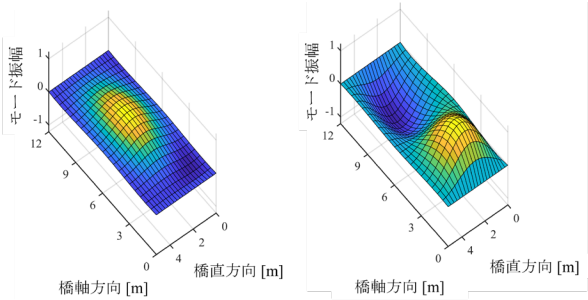
参考文献

- 1) Matsuoka, K., Collina, A., Somaschini, C and Sogabe, M.: Influence of local deck vibration on the evaluation of the maximum acceleration of a steel-concrete composite bridge for a high-speed railway, *Engineering Structures*, Vol.200, 109736, 2019.

謝辞：本研究の実施にあたっては、指導教員である貝戸清之先生ならびに公益財団法人鉄道総合技術研究所の皆様にご多大なご支援を賜りました。深く感謝申し上げます。



(a) 1×1 次 A (23.9Hz) (b) 1×2 次 (41.1Hz)



(c) 1×1 次 B (52.7Hz) (d) 2×1 次 B (60.3Hz)

図-3 床版部材振動モード

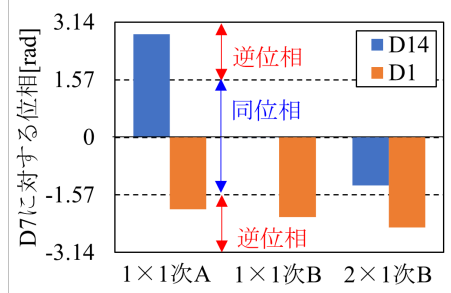


図-4 隣接床版との連成性状