

振動モニタリングとアセットマネジメントへの 適用を見据えた展望

大阪大学大学院 ○ 貝戸清之*¹
大阪大学大学院 松岡弘大*²

現在のアセットマネジメントは目視点検データに基づいた方法論で体系化されている。一方で、①常時監視による損傷・劣化の早期検知、②力学的性能の定量的評価に基づく安全・安心の確保、といった実務的要請の極めて高いニーズをアセットマネジメントに組入れることに対しては、目視点検の限界が指摘されている。従来から、目視点検に代わる、定量的データの取得方法、効率的な情報収集手段としてモニタリングが着目されている。本研究では、特に上述の①の課題を意識して、鉄道橋の振動モニタリングに焦点を当てる。具体的には、走行列車荷重を利用した振動モニタリングを提案して、その妥当性と有効性に関して実橋を対象とした振動計測を通して実証的に検証するとともに、現時点におけるアセットマネジメントへの適用可能性、さらには課題と将来の展望について述べる。

【キーワード】振動モニタリング、鉄道橋、走行列車荷重、アセットマネジメント

1. はじめに

現在のアセットマネジメントは、目視点検データに基づいた方法論によって構成されている。そこでは、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測や、マルコフ決定モデルを援用した LCC 最小化に基づく補修戦略の決定など、各要素技術の有機的な体系化がなされており、アセットマネジメントの実用化に大きく貢献している¹⁾。一方で、①常時監視による損傷・劣化の早期検知、②力学的性能の定量的評価に基づく安全・安心の確保、といったより高度な実務的要請の極めて高いニーズをアセットマネジメントに組入れることに対しては、目視点検の限界が指摘されている。目視点検データに基づくアセットマネジメントを第一世代と呼ぶならば、第二世代ではこれらの課題（特に課題①）の解決が可能なモニタリングデータに基づくアセットマネジメントの開発を視野に入れなければならない。

本研究では以上の問題意識の下、鉄道橋を対象とした継続的な振動モニタリングを提案し、実橋での振動計測を通して、その妥当性と有効性について実証

的に検証する。鉄道分野においては、走行列車を利用した振動モニタリングシステムとして、軌道状態の評価を試みた事例がある²⁾。これに対して、本研究では、モニタリングの対象を鉄道橋とし、走行列車荷重作用下における加速度応答から鉄道橋の振動特性を同定し、その経時的な変動から橋梁の損傷・劣化の早期検知を行うものである。以下、2. で走行列車荷重を利用した振動モニタリングの概要を述べる。3. では同手法により局所的な振動特性が同定可能であることを示す。4. では提案手法の現状での課題と将来展望について整理する。

2. 走行列車荷重を利用した振動モニタリング

(1) 提案手法の概要

すでに述べた通り、構造物の損傷・劣化を早期に検知するためには、常時監視が理想的であるが、現実的にはある時間間隔で継続的に構造物の状態をモニタリングすることが重要である。本研究では数ある構造物の状態の中でも振動現象に着目し、それを継続的にモニタリングする手法を提案する。これは、

*1 工学研究科 グローバル若手研究者フロンティア研究拠点 特任講師 kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

*2 工学研究科 地球総合工学専攻 修士課程 k-matsuoka@civil.eng.osaka-u.ac.jp

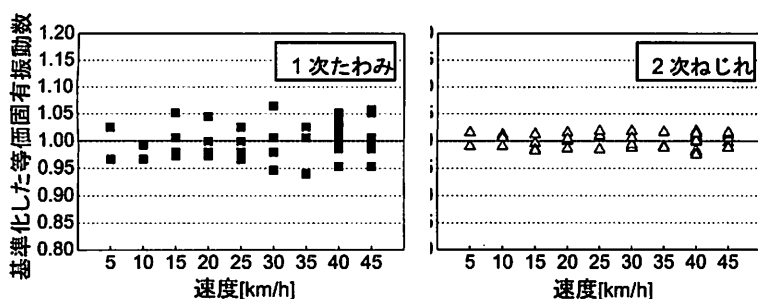


図-1 列車走行試験による固有振動数と速度の関係

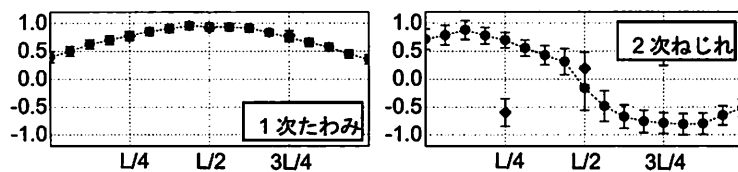


図-2 振動モード形の平均とばらつき

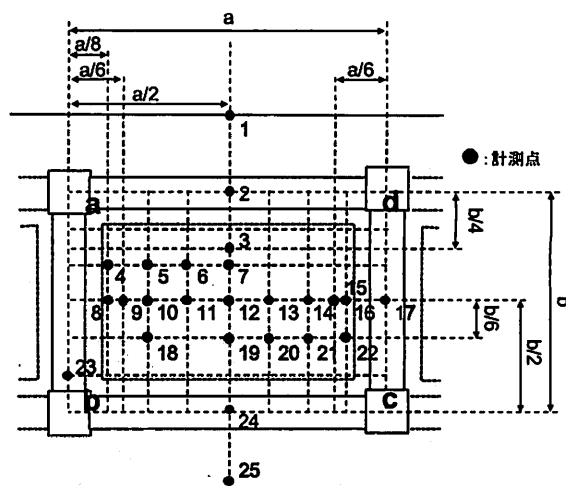


図-3 中間スラブに着目した計測点配置の例

保有性能の低下や損傷の発生・進展とともに変動すると考えられる振動特性を継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ものである。このような振動特性の相対変化を捉えることで、現場点検員の初動体制の効率的な確保が可能となり、アセットマネジメントの高度化やリスクマネジメントへの展開に貢献することが可能となる。

ただし、大型の土木構造物を対象とする振動モニタリングでは、加振源としてどのような外力を採用するかが重要な問題である。この点に関して、橋梁を含む鉄道構造物は、毎日決められた時刻にほぼ均一な速度と荷重を持つ列車が通過するという特徴を有する。日々の振動特性の変化から土木構造物の異常検知を試みる継続的モニタリングの場合には、再現性の高い荷重を加振源として利用できることは望ましい条件である。ただし、走行列車により励起される振動は不規則性や非定常性を有することに留意する必要がある。

(2) 走行列車荷重を利用した鉄道橋振動特性の同定

走行列車荷重の作用下で計測した橋梁の加速度応答から橋梁の振動特性（固有振動数と振動モード形）を同定するとともに、走行列車荷重の不規則性や非定常性が同定結果に及ぼす影響について、振動特性の変動範囲として評価する。なお、計測システムおよび振動特性の同定手法については文献³⁾を参照されたい。本研究では、下路式鋼版桁橋（支間 11.45m）にて実施した列車走行試験、および同定結果を例示する。列車走行試験は列車速度による橋梁の振動特

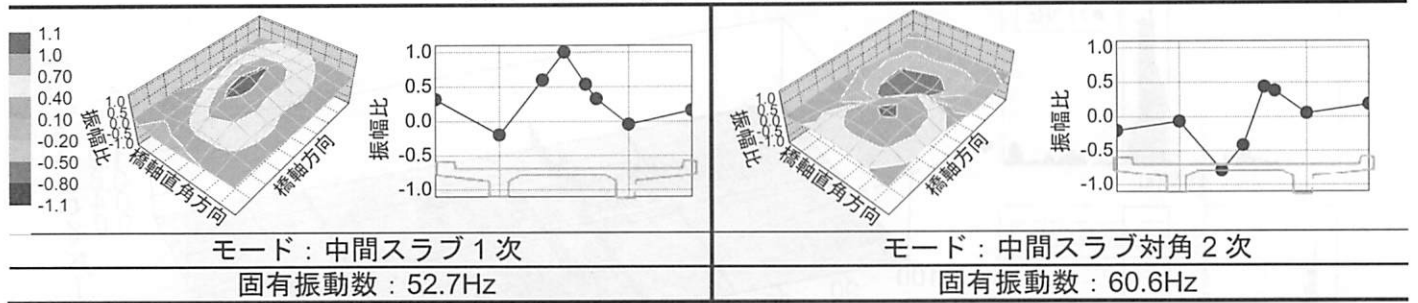
性の変動を確認するために、5km/h 刻みで 5km/h から 45km/h まで列車速度を変化させ、列車が橋梁を通過した際の橋梁の加速度を合計 20 個の加速度センサーで多点計測した。走行実験は、一つ速度当たり 4 回から 12 回程度の往復走行を行った。

結果の一例として、図-1 に計測した加速度応答を利用して同定した 1 次たわみモードと 2 次ねじれモードの固有振動数を示す。図中の値は平均で基準化している。モードにより変動の大きさに差があることが見て取れる。また、変動の小さいモードでは列車速度に関わらず 1 から 3% 程度の精度で同定が可能であることも理解できる。したがって、通常の営業列車が有する速度の変動程度であれば、固有振動数の時系列データから異常検知を試みる際の影響はほとんどないといえる。また、固有振動数と同様に振動モード形の変動範囲を算出することも可能である。図-2 には全 48 回の試験結果から求めた振動モード形の平均と変動を示す。図中のシンボルは平均を、エラーバーは変動（平均で基準化した値）を示す。振動モード形の変動はモードの節の付近で大きくなるとともに、次数が低いほど小さくなる傾向であった。固有振動数との相関性は見られなかったが、振動モード形という空間情報は、より感度の高い異常検知指標となり得る可能性がある。

3. 局所的な振動特性の同定

損傷は局所事象であり、構造物の全体モードにその影響が確認できる時点では構造物がすでに深刻なダメージを負っている可能性がある。また、その時に

表-1 部材に着目した振動特性の同定例



は損傷が顕在化している可能性が高く、目視によっても検出は可能である。振動モニタリングの実用化に向けた課題の一つには、大型構造物に生じる損傷・劣化というミクロな現象（例えば、損傷による部材の剛性低下）を構造物の振動特性というマクロな情報の変化に基づいて検知できるのか、という感度に関するものがある。そこで、計測対象を橋梁全体ではなく、部材単位へと局所化させることで、相対的に異常検知感度を高めることができる。また、走行列車荷重は、不規則で非定常な入力特性を有すると考えられるが、加振力が強く、広い周波数帯を加振できるという特徴もある。本研究で走行列車荷重を用いた振動モニタリングを提案する理由は、部材単位の振動計測を視野に入れているためである。

部材単位で計測点を密に配置し、高次モードまで着目範囲を拡大して検討した事例を示す。試験は供用中の RC ラーメン高架橋の中間スラブを対象とし、計測点 20 点程度を中間スラブに設置するとともに、他部材（張出しスラブ、縦桁、横桁）にも設置することで中間スラブのモード振幅のみが卓越するモードを検討した。加速度の配置を図-3 に示す。同定結果の例を表-1 に示す。中間スラブの振動モード形は等高線図で示している。またスパン中央の橋軸直角方向の振動モード形も記載している。なお、モード振幅は最大値を 1 に基準化している。30Hz 程度までの低次モードでは従来通り、主桁、張出しスラブのモード振幅が 1 に近く全体モードであった。しかし、50Hz 以上の高次モードでは中間スラブのみが大きなモード振幅を示す部材単位の局所的な振動モードを示している。このように比較的大きな荷重である列車走行荷重が作用する場合であっても部材振動が励起されており、今後の局所的モニタリングへの展開が可能であると考えられる。

4. 現状の課題と今後の展望

(1) 橋梁・列車振動の同期計測

異常検知の感度を高めるためには、同定手法を高度化することも重要である。高度化のための方法としては、①さらに多くの情報量を獲得する、②方法論の高度化を図る、がある。方法論の高度化については実際に ERA 等の適用を検討中である。一方、①の情報量の増加に関しては、現在、構造物への入力である走行列車荷重は未知として解析を行っている。走行列車荷重そのものを直接計測することは困難ではあるが、列車に加速度計を設置し、橋梁通過時の加速度応答を橋梁への入力と考えることは妥当である。入出力情報が完備することで同定精度が向上し、異常検知感度も高まると期待できる。

しかしながら、ここで問題となるのが、列車の振動応答と、橋梁の振動応答との同期である。それぞれ別システムで加速度を計測するが、列車が移動体であるために、両システムを有線接続することは不可能である。そこで、本研究では GPS 時計に着目する。GPS 時計は GPS 衛星から標準時刻を受信し、受信した時刻信号を暗号化されたパルス波で出力する装置である。異なった装置であっても出力する時刻信号（パルス波）の誤差は極めて小さい。したがって、両システムにそれぞれ接続した GPS 時計の出力を基準として、受信した 2 つの GPS 信号の二乗誤差が最小になるように一方の時系列を移動させることで 2 つの GPS 信号の時刻を同期させることが可能となる。

抽出した橋梁通過中の時系列から橋梁の固有振動モードを励起している入力荷重成分に着目する。橋梁の固有振動数は前節同様に同定可能であるため既知である。橋梁通過中の列車振動時系列をフーリエ変換しパワースペクトルにすることで各固有振動モードに寄与する入力荷重成分を確認することができる。

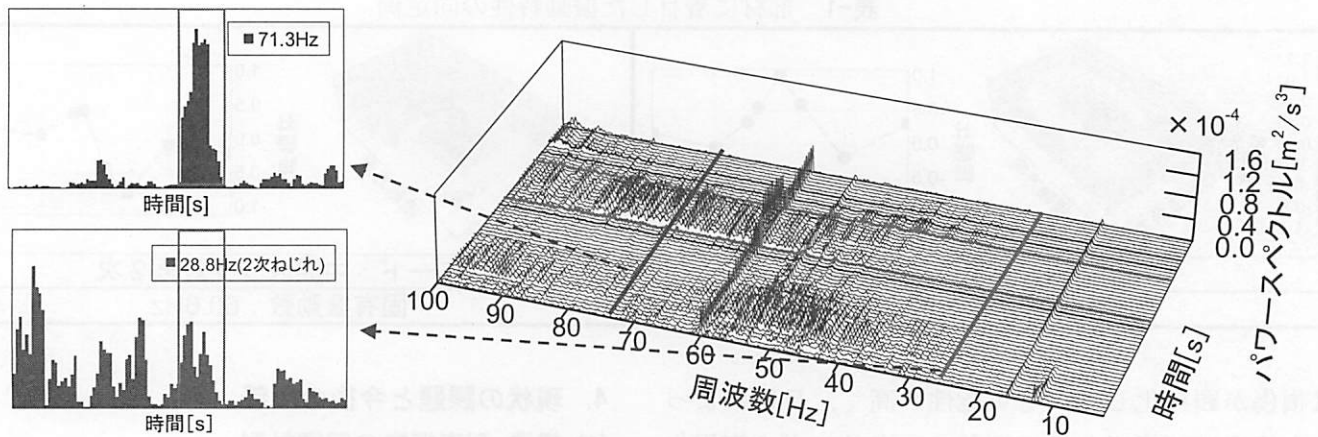


図-4 列車振動における周波数領域の時系列分析

(2) 列車振動モニタリング

同期させた橋梁と列車の加速度応答を用いることで同定精度の向上を期待することができる。しかし、さらなる実用化を見据えたときには、橋梁側で蓄積されるデータの効率的な回収を検討しなければならない。光ファイバ等を用いた有線ネットワークや、通信機能を装備した無線センサーシステムを構築することが一般的には考えられる。しかしこのような方法はハードウェア側の開発要素や費用負担が増すために、ここでは列車振動のみを利用した構造物の振動モニタリングの可能性を検討する。端緒についたばかりで、困難な課題ではあるが、データ回収のハードウェア負担を軽減することができ、有力な手法であると考えられる。以下に現時点での試みを整理する。

まず、必要となるのは橋梁通過中の時系列成分の抽出（位置の同定）である。これには GPS 等の利用が考えられる。図-4 は、橋梁通過前後の列車の加速度応答を基本時間 T （ここでは 5 秒）として、順次 dt （ここでは 0.5 秒）ずつずらして切り出し、それぞれに対してフーリエ変換することで列車振動のランニングスペクトルを算出する。まず、時間軸に沿った変化を見ると、赤線の間で示される橋梁通過中では特に高次成分（例えば 71.3Hz）が卓越することが見て取れる。この成分に着目することで橋梁通過中の振動を抽出することは可能である。この振動成分が橋梁のどのような振動成分であるのかは現時点では不明であるが、このような橋梁通過中でのみ卓越するような周波数成分を異常検知指標として採用することでできれば、実用性は高まる。ただし、橋梁の固有振動成分（28.8Hz）に着目しても、橋梁通過中以

外でも同様の卓越成分を確認できる。このように列車振動のみに着目した場合、列車が橋梁を通過中か否かを判定することは可能であるが、その加速度応答から橋梁の固有振動数を把握するには至っていない。現状はフーリエ変換を基本とした簡易的な解析に留まっているが、今後ウェーブレット解析などを用いて、信号処理技術の高度化を図る必要がある。

5. おわりに

本研究では、モニタリング手法のアセットマネジメントへの適用を視野に入れ、鉄道橋を対象とした継続的な振動モニタリングを提案した。具体的には、走行列車荷重を利用した振動モニタリングを構築し、実橋での振動計測を通して、その妥当性と有効性について実証的に検証した。さらに、実用化に向けた課題と展望について著者らの考えを整理した。

謝辞：本研究は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。

【参考文献】

- 1) 小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集，No.793/IV-68，pp.59-71，2005.
- 2) 石井博典，藤野陽三，水野裕介，貝戸清之：営業列車の走行時の車両振動を用いた軌道モニタリングシステムの開発，土木学会論文集 F，Vol.64，No.1，pp.44-61，2008.
- 3) 松岡弘大，貝戸清之，杉崎光一，渡辺勉，曾我部正道：走行列車荷重を利用した振動モニタリングによる開床式高架橋の振動特性の同定，応用力学論文集，Vol.12，pp.983-994，2009.