

繰り返し実験による速度－SSMA の Mahalanobis 距離を用いた橋梁点検手法の検討

筑波大学 人工知能科学センター 正会員 ○高橋 悠太

筑波大学 学生会員 井上 潤

筑波大学 正会員 山本 亨輔

1. 背景

橋梁点検は、熟練技術者による近接目視点検が義務化されている。少子高齢化の影響による技術人材の減少を考えると、代替もしくは補完する技術が求められる。本研究では、移動センシングに注目する。まず、車両に設置したセンサを得られた振動について、車両－橋梁相互作用を解く。推定された橋梁振動を用いて、橋梁の健全性を評価する。従来の移動センシング技術は、部材破断などの大規模な損傷について、数値的実験的に有効性が示されてきた。ただし、実際の点検においては、これらの損傷は即供用停止となり、また容易に目視で発見できると考えられる。社会実装を前提とすると、より軽微な損傷をロバストに検知可能であることが望ましい。このような技術として、橋梁損傷検知指標である SSMA (Spatial Singular Mode Shape : 空間特異モード角度) を統計的に分析する手法があげられる。SSMA は速度で変化することから、車両速度変化の影響を受けてしまう。しかし、橋梁損傷によって、このばらつき方が変化すると考え、速度－SSMA から得られる Mahalanobis 距離 (以降、MD) を、損傷検知に適用する。本手法は、実車両が走行可能な模型実験によって、有効性が示されている¹⁾。本研究では走行回数の増加が容易な紙製橋梁模型と模型車両を用いて、走行回数を増やしたうえで、再現性を確認する。

2. MD の導出過程と実験概要

まず、MD の導出過程について示す。MD は、2つのデータ群 X と Y がどれほど異なるかを表す特徴量である。データの異常性を表すのに用いられ、振動データや推定固有振動数の MD から、橋梁損傷の検知を試みる例²⁾もある。

今、ある橋梁状態での SSMA と速度をデータ群行列 $\mathbf{x}$ ($\in R^2$, SSMA と速度) とする。 $\mathbf{x}$ の平均 $\boldsymbol{\mu} = E[\mathbf{x}]$ ($\in R^2$), 分散共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma} = \text{Cov}[\mathbf{x}]$ ($\in R^{2 \times 2}$) が求められるので、実測データ $\mathbf{y}$ ($\in R^2$) との MD は、

$$d = \sqrt{(\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})} \quad (1)$$

と表される。

次に、実験に用いた紙製模型橋梁と模型車両の外観を図－1、諸元を表－1 および表－2 に示す。模型は実際の鋼製橋梁細部を詳細に再現し、固有振動数のみ同程度 (5[Hz]程度) となるように設計した。損傷は模型部材の除去によって再現した。健全時 (INTACT) に対し、軽度損傷 (LIGHT) は車両走行側下部の横構を、重度損傷 (HEAVY) は同横桁と中央部横桁を、それぞれ除去することで模擬した。ただし、横構は本来副構造であり、また紙製模型橋梁の横構が強度に寄与することは、実際の橋梁と比較しても、ほとんどない点に注意する。このため、本実験においては、軽度損傷として設定している。



(a) Overview of bridge model



(b) Bridge model without deck



(c) Vehicle Model

図－1 紙製模型橋梁と模型車両の外観

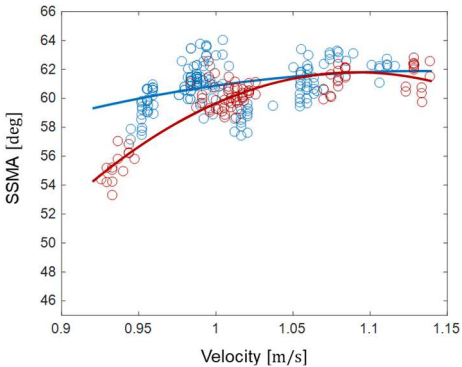
キーワード 橋梁健全度評価 移動センシング 空間特異モード角度 (SSMA) Mahalanobis 距離
連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

表－1 橋梁諸元

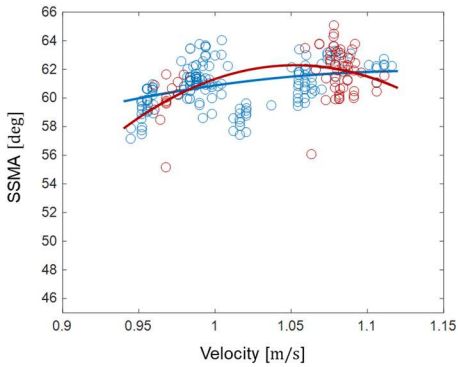
Overview	Span Length [m]	4.24
	Natural frequency [Hz]	5.30
Deck	Thickness [mm]	52
Paper Material	Thickness [mm]	1
	Flange span [mm]	70
	Web Height [mm]	260

表－2 車両諸元

Overview	Length [mm]	400
	Wide [mm]	280
	Weight [kg]	6.0
	Spring Ratio [N/m]	124.8
	Natural Frequency (No weight) [Hz]	2.77

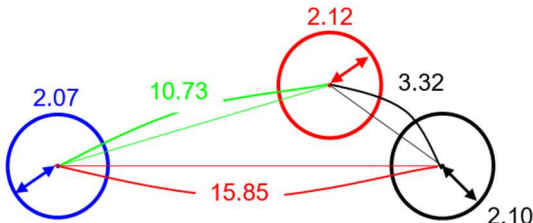


(a) 健全 (青) と軽度損傷 (赤)



(b) 健全 (青) と重度損傷 (赤)

図－2 各橋梁状態での速度と SSMA の関係



図－3 MD を用いた分析結果の概念図

表－3 各橋梁状態での MD

x	1	2	3	1	1	2
	1	2	3	2	3	3
D	2.07	2.12	2.10	10.73	15.85	3.32
Ar [%]	-	-	-	62.9	85.1	35.1

(※ 1...INTACT, 2...LIGHT, 3...HEAVY)

3. 結果と考察

図－2 に各橋梁状態で得られた速度と SSMA の関係について示す。青は健全時、赤は損傷時を示す。曲線は、それらの近似曲線を示す。傾向として、一部交わる範囲があるが、速度変化によって異なる。ただし、両条件でも明確に判別することは困難である。

次に、MD を算出する。まず、同一橋梁状態で得られたデータ群を等分にし、互いに MD の平均を算出する。より大きい値を同一橋梁内での MD とし、異なる橋梁状態で得られた MD がそれを超えた場合、対象データは基準データと異なる分布を持つといえる。結果の概念図を図－3 に、値を表－3 に示す。概念図は同一橋梁内の MD 平均を半径とした円と、異なる橋梁状態の MD 平均を辺とする三角形により構成される。 x は基準データ群、 y は比較データ群を示す。 D は得られた MD の平均値を、Ar は正解率を示す。円の半径より三角形の辺が大きいことから、MD の平均値を用いて損傷検知可能なことがわかる。この結果から、提案手法の再現性が確認された。

4. まとめ

既往の研究で有効性が示されている、速度－SSMA の Mahalanobis 距離を用いた橋梁点検手法の再現性を、紙製橋梁模型実験によって検証した。提案手法は紙製橋梁模型実験においても、損傷検知に成功した。

今後は、車両重量を変化させたり、車両速度を大きく変更させたりして追加試験を行う。また、実際の物流車両にセンサを搭載し、On-going なモニタリング技術としての適用性検証を試みる。また、数値計算を用いた、さまざまな橋梁モデルの検証を行う。

参考文献

1) 高橋悠太, 山本亨輔, 岡田幸彦: 空間特異モード角度を用いた比較的軽度な橋梁損傷検知の可能性検討, 構造工学論文集, Vol.65A, 2019.

2) 金哲佑, 張凱淳, 北内壮太郎: 損傷前後の鋼単純トラス橋の振動特性同定と統計的分析による異常検知, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 70, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 17), I_63-I_72, 2014.