

損傷前後における鋼製模型橋梁の動的特性の変化に関する実験的検討

筑波大学大学院 学生会員 ○酒井 真清  
筑波大学大学院 学生会員 金子 直樹  
筑波大学大学院 学生会員 佐久間活機

筑波大学大学院 学生会員 秦 涼太  
筑波大学システム情報系 正会員 山本 亨輔

1. 目的

効率良く橋梁を点検する方法として、車両通過時に発生する交通振動に基づいた構造ヘルスマニタリング技術が開発されている。構造ヘルスマニタリングでは、橋梁の損傷がその動的特性を変化させるという仮定に基づいている。動的特性の変化を確認するため、実橋梁に損傷を導入し、交通振動を計測する実験が行われている。ただし、実験の対象橋梁はトラス橋が多く<sup>1)~3)</sup>、国内橋梁の約73%を占める桁橋<sup>4)</sup>での検証が求められる<sup>5)</sup>。そこで、本研究では、桁橋を模擬した鋼製模型橋梁を建設し、実車走行実験を行う。健全時と人工損傷導入時それぞれで模型橋梁の固有振動特性を推定し、その変化を比較することで、交通振動モニタリングの有効性を考察する。

2. 検討方法

2.1. 車両走行実験

今回、実験に用いる模型橋梁は、支間長9.10m、桁高0.20m、有効幅員2.52mの鋼製桁橋（図1参照）である。また、図1(b)のように、サンプリングレート300Hz、計測レンジ±2G、20bitsの小型無線加速度センサS1~S14を床板上に設置し、振動を計測した。損傷ケースは、S11直下の横桁と主桁を締結しているボルトを取り外す軽損傷ケース（剛性低下）と、その横桁を完全に取り除く重損傷ケース（質量・剛性低下）の2つのケースを用意した。本実験では、交通振動を励起するため、軽トラック（表1参照）を走行させ、橋梁の鉛直加速度振動を計測した。

2.2. 分析手法

本研究では、橋梁の動的特性を分析するため、各センサで計測された加速度振動データに特異値分解を適用した。Kerschenら<sup>6)</sup>によれば、構造物の応答行列を特異値分解して得る固有直交モードは、構造物の固有振動モードの近似になるとされる。

任意の $n \times m$ 行列 $\mathbf{D}$ は次のように分解できる。

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \tag{1}$$

ここで、 $\mathbf{U} \in R^{n \times n}$ 、 $\mathbf{V} \in R^{m \times m}$ は直交行列である。また $\mathbf{\Sigma} \in R^{n \times m}$ は次式のような行列である。

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_n & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$\sigma_1, \dots, \sigma_n$ は、 $\mathbf{D}$ の特異値であり、降順に並んでいるとする。このような行列操作を特異値分解という。

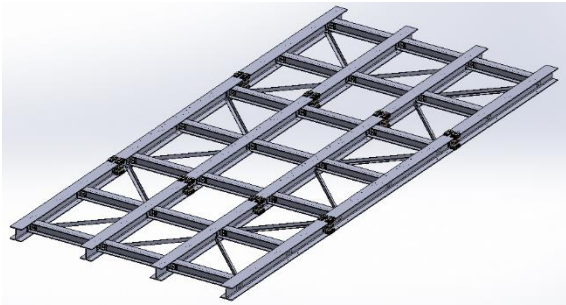
構造物を $n$ 点計測した結果から得られる時刻歴波形データを、次式のようにデータ行列化する。

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{y}(t_0) \mathbf{y}(t_1) \cdots \mathbf{y}(t_n)] \tag{3}$$

データ行列 $\mathbf{Y}$ に特異値分解を適用すると、次式を得る。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T = \mathbf{U}\mathbf{Q} \tag{4}$$

ここで、 $\mathbf{U}$ はモード形状の推定値であり、 $\mathbf{Q}$ は基準座標 $\mathbf{q}(t)$ の推定値をデータ行列化したものである。ここで式(4)より、特異値分解による橋梁モード形状推定法は、基準座標 $\mathbf{q}(t)$ の無相関性（つまり、 $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T$ が対角行列となる）を仮定している。しかし、交通振動の各次モードの基準座標が無相関である保証は無い



(a) 鋼製模型橋梁の骨組み



(b) 鋼製模型橋梁の全体図とセンサ位置

図1 模型橋梁の形状

表1 実験車両の諸元

|      |        |
|------|--------|
| 長さ   | 3.39 m |
| 幅    | 1.47 m |
| 高さ   | 1.78 m |
| 車両重量 | 810 kg |
| 前軸重  | 510 kg |
| 後軸重  | 300 kg |

キーワード 構造ヘルスマニタリング、橋梁、桁橋、交通振動、特異値分解、モード形状

連絡先 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

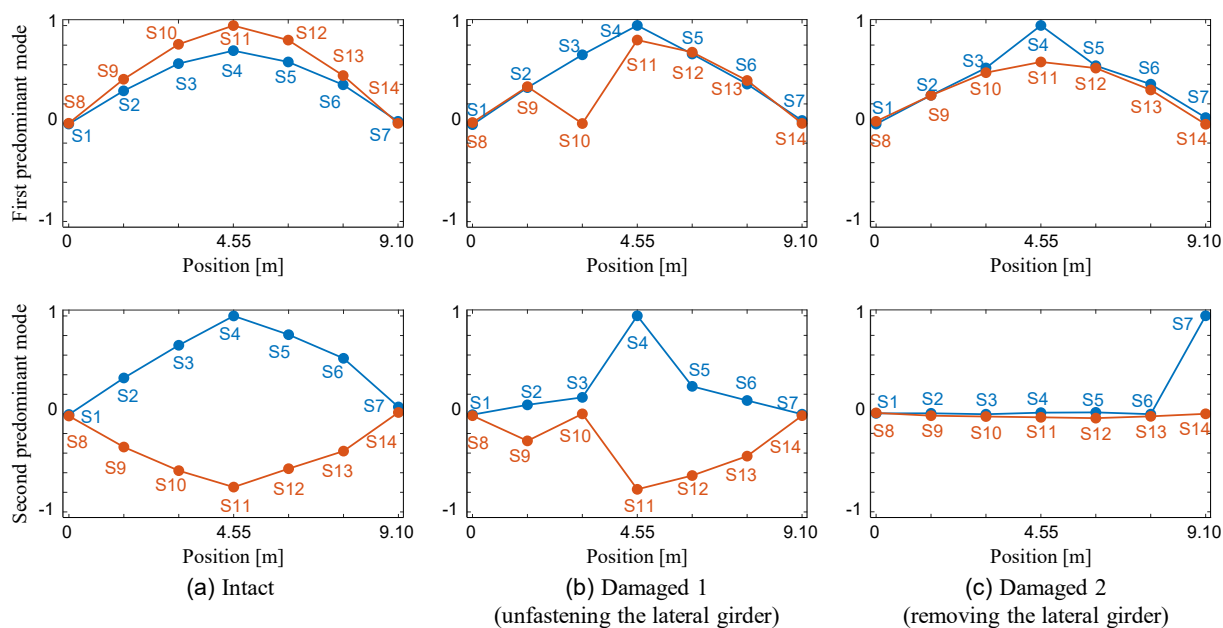


図2 各ケースで推定される卓越1次モードと卓越2次モードのモード形状

ため、適用性は別途、検証する必要がある。

### 3. 検討結果

模型橋梁の交通振動データに特異値分解を適用し、橋梁の振動モード形状を推定した。これを卓越振動モードと呼称し、健全・軽損傷・重損傷の各ケースにおける1次・2次卓越モードのモード形状の一例を図2に示す。ただし、モード形状は最大値を1として正規化している。損傷無しの場合、たわみ1次モードとねじりモードが卓越している。また、たわみ1次モードではセンサ群S8~S14の振幅がセンサ群S1~S7と比べて大きいことが読み取れる。

次に、軽損傷（横桁締結解除）の場合、卓越1次モードは健全時同様、たわみ1次モードである。但し、S10の振幅が明らかに小さくなっていることがわかる。この傾向は卓越2次モードでも確認される。また、ねじりモードである卓越2次モードでは、センサS4およびセンサ群S8~S14の振幅が大きくなっていることも確認された。締結解除による剛性低下の影響と考えられる。

一方、横桁を脱落させた重損傷の場合でも、卓越1次モードは変わらずたわみ1次モードに見えるものの、損傷無しの場合と比べてセンサS4の振幅が大きくなっていることが分かる。また、全体を俯瞰するとセンサ群S1~S7とセンサ群S8~S14の振幅はほぼ同じで、健全時の結果から変化したことが分かる。卓越2次モードは、進入側端部で振幅が大きくなっている。これは、横桁脱落の影響で、端部での衝撃振動が発生しやすくなることを示唆している。

### 4. まとめ

本研究では桁橋を模擬した鋼製模型橋梁に人工損傷を導入し、車両走行実験を行うことで動的特性の

変化を調べた。導入した2つの損傷は模型橋梁の剛性を変化させ、モード形状の推定結果に対してそれぞれ異なる影響を与えることが確認された。また、損傷によるモード形状の変化は損傷を与えた部位ではなく、主にその周辺部分で観測されることが分かった。

謝辞：本研究の一部は、特別研究員奨励費：22J10994によって実施した。

### 参考文献

- 1) 山本亨輔, 伊勢本遼, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響, 構造工学論文集, 58A, pp. 180-193, 2012.
- 2) 金哲佑, 北内壮太郎, 張凱淳, 大島義信, 杉浦邦征: 単径間鋼トラス橋における振動特性の同定とその変化に及ぼす損傷の影響, 構造工学論文集, 60A, pp. 184-193, 2014.
- 3) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: 未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証, 構造工学論文集, 53A, pp. 258-267, 2007.
- 4) 国土交通省, 道路統計年報 2020, 橋梁の現況, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2020/nenpo03.html>
- 5) 三増拓也, 金哲佑, 五井良直, 林巖: 実鋼桁橋の損傷前後における振動特性に関する考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 74(2), 21, I\_513-I\_522, 2018.
- 6) G. Kerschen, J. C. Golinval: Physical interpretation of the proper orthogonal modes using the singular value decomposition, Journal of Sound and Vibration, 249(5), 849-865, 2002.