

第 I 部門 現地実測による FRP 歩道橋の振動特性推定

京都大学工学部 学生員 ○水上 裕介 京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 京都大学大学院 学生員 森田 知明 京都大学大学院 正会員 橋本 国太郎
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征 株式会社ヒビ 正会員 日比 英輝

1.はじめに

FRP(繊維強化ポリマー)は従来の橋梁の主要材料であった鉄やコンクリートと比べ強度、耐食性ともに高いため、長寿命で維持管理も容易な橋梁を実現できるとして期待されている新材料である。ただし、日本においては設計基準・指針が十分に整備されているとは言えず、それゆえ FRP 橋梁の実績はまだ少ない。設計基準・指針のさらなる整備、設計手法の確立のためには、FRP 橋梁の安全性、使用性について検証することは必要であると考えられる。そこで本研究においては、FRP 歩道橋の現地振動計測をおこなうことにより、振動使用性検証のための振動特性を把握する。また、季節変動による気温変化が振動特性に及ぼす影響についても同時に考察する。

高い。これは、減衰定数(ξ_m)やモードベクトル(φ_m)についても同様のことが言えると考えられる。そこで本研究では、Stabilization Diagram および Stability Criteria を用い橋梁振動特性の推定精度の向上を図る^{1),2)}。



Fig. 1 Observed pedestrian FRP bridge.

2. 対象橋梁と現地加振実験

対象橋梁は、Fig.1 に示す橋長 18,500mm、橋幅 2,150mm、主構高 2,200mm の FRP トラスの歩道橋である。実験対象歩道橋において加振実験をおこない、鉛直方向と橋軸直角方向の加速度を計測する。温度変化の影響についても考察する為に、実験は春、夏、冬の 3 回おこなう。用いる加速度計数の都合上、Fig. 2 に示すように歩道橋を 2 区間または 3 区間に分けて、順次計測を行う。加振ケースについては Table 1 に示す。曲げモード、ねじりモードなどが満遍なく抽出できるように方法で加振をおこなう。

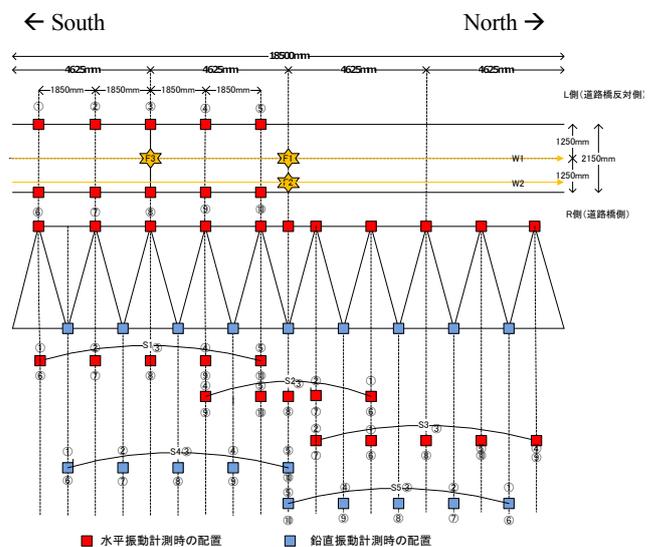


Fig.2 Sensor deploying map and excitation points.

3.振動特性推定

多点観測データに多次元 AR モデルを適用することで、固有振動数、減衰定数、モード形状の振動特性を推定する。一方、考慮する AR 次数により、推定される固有振動数にはばらつきが生じるが、構造物にとって物理的に意味のある固有振動数は、異なる AR 次数をもつ AR モデルにおいても同様に推定される確率が

Table 1 Excitation scenarios.

Scenario	Excitation	Location
F1	Jumping	1/2 span middle
F2	Jumping	1/2 span biased
F3	Jumping	1/4 span middle
W1	Controlled walking	south to north along the central path
W2	Controlled walking	south to north along the biased path

Stabilization Diagram は、AR モデルの AR 次数を縦軸に、振動数を横軸にとり、同定される振動数(f_m)をプロットしたグラフである¹⁾。また、ばらつきが大きいものを除去し、安定的な振動数のみを抽出するために、本研究では式(1)から式(3)に示す Stability Criteria を適用する²⁾。

$$f_{m+p} - f_\varepsilon < f_m < f_{m+p} + f_\varepsilon \quad (1)$$

$$\xi_{m+p} - \xi_\varepsilon < \xi_m < \xi_{m+p} + \xi_\varepsilon \quad (2)$$

$$\begin{aligned} MAC_\varepsilon &= MAC_{(m,m+p)} \\ p &= -p_s, \dots, -1, 1, \dots, p_s \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 f_ε 、 ξ_ε 、 MAC_ε は、それぞれ固有振動数、減衰定数、モードベクトルに関する許容差である。また、 p は考慮する AR 次数の幅である。MAC (Modal Assurance Criteria)はモード信頼性評価基準を表す。

本研究における推定では、 $f_\varepsilon = 0.1\text{Hz}$ 、 $\xi_\varepsilon = 1\%$ 、 $MAC_\varepsilon = 0.95$ 、 $p=3$ と設定する。本稿では省略しているが、水平方向振動については、両端の固定されていない上弦材の水平振動計測データを用い水平振動特性の検討を行っており、得られるモードにばらつきが大きく、鉛直モードに比べモード推定が難しい。

Stabilization Diagram と Stability Criteria により推定された鉛直方向振動のモード形状を Fig.3 に、各実験時期における固有振動数および減衰定数の平均値を Table 2 に示す。振動モードについては、夏と冬に関わらず Fig. 3 に示すような曲げ 1 次モードと、ねじれ 1 次モード、曲げ 2 次モードが推定された。しかし固有振動数には変化が観測された。Table 2 に示すように、固有振動数は気温上昇/下降に伴い、下降/上昇することが確認できる。既往の研究においても、橋梁の長期モニタリングにより、同様の傾向が確認されている³⁾。これは、温度変化により部材が膨張/圧縮されるとともに支承部の境界条件にも変化が生じ、それが全体剛性の変化になんらかの働きをすると考えられる。

対象橋梁の推定減衰定数は、曲げ 1 次モードについて 1.9%~2.2%、ねじれ 1 次モードについて 1.1%~1.7%、曲げ 2 次モードで 1.4%~1.8%であった。一方、気温の変化による明確な傾向は観察できないが、春と夏 2 回の計測と冬の計測結果を比較すると、気温下降により減衰定数が下がる傾向がよみとれる。

Table 2 Temperature, frequencies and damping constants.

Temperature	34°C	28°C	9°C
Air	34°C	28°C	9°C
Diagonal member	36°C* -70°C**	not measured	28°C* -10°C**
1 st Bending	8.30Hz	8.48Hz	8.99Hz
Damping	0.0218	0.0223	0.0192
1 st Torsion	12.71Hz	12.69Hz	12.90Hz
Damping	0.0162	0.0171	0.0113
2 nd Bending	16.09Hz	16.03Hz	16.63Hz
Damping	0.0180	0.0183	0.0137

*: temperature in shade, **: temperature in sunny place

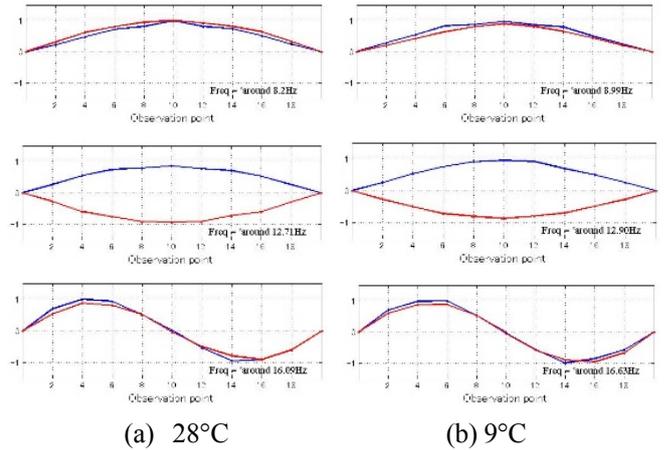


Fig. 3 Mode shapes under different air temperature (Red line: mode of the left side; Blue line: mode of right side).

4. 結論

本研究では、FRP トラス歩道橋の基本振動特性を把握するために、現地振動実験を行い、さらに季節変動による気温変化が振動特性に及ぼす影響についても検討を行った。以下にその結果をまとめる。

- 1) 鉛直方向の振動について、曲げ 1 次モード、曲げ 2 次モード、ねじれ 1 次モードが安定的に推定された。
- 2) 気温上昇により固有振動数が低下することが確認された。ただし、いずれも立体横断施設技術基準・同解説の規定 (1.5~2.3Hz に抵触しないこと) を満たしているため、振動使用性は満足していると考えられる。
- 3) 気温変化の減衰定数への影響について明確な傾向は観察できなかったが、春と夏 2 回の計測と冬の計測結果を比較すると、気温下降により減衰定数が下がる傾向がよみとれる。

謝辞: 本研究の振動調査にあたり、四日市市役所道路整備課の許可のもとに現地振動実験を行った。ここに感謝の意を表す。

【参考文献】 1) Reynders et al.: Fully automated (operational) modal analysis. Mechanical Systems and Signal Processing. 29. pp.228-250,2012. 2) 金 哲佑, その他: 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, Vol.60A, 2014.3. 3) 金 哲佑, その他: 外的影響を考慮した実橋長期モニタリングへのベイズ理論の適用, 第 26 回信頼性シンポジウム講演論文集, 日本材料学会, pp.1-6, 2012.12.