GFRP歩道橋の供用12年目の観察結果

松本　幸大[1]・宮阪　裕一[2]・山本　梨乃[2]・濵﨑　瑞生[2]

[1]正会員　豊橋技術科学大学　エレクトロニクス先端融合研究所
（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）
E-mail: matsumoto.yukihiro.lp@tut.jp

[2]豊橋技術科学大学大学院　建築・都市システム学専攻（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）
E-mail: miyasaka.yuichi.yz@tut.jp

[2]豊橋技術科学大学大学院　建築・都市システム学専攻（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）
E-mail: yamamoto.rino.ya@tut.jp

[2]豊橋技術科学大学大学院　建築・都市システム学専攻（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）
E-mail: hamasaki.mizuki.ay@tut.jp

近年，軽量・高強度・高耐腐食性といった特性を持つ FRP 材が注目され，構造物への適用に関する検討が進められている．現在国内では FRP 材を歩道橋として利用する事例は限られており，その経年調査について評価した例は特に少ない．こうした中で，設計仕様書との対応や供用後の構造性能の変化等を計測により定量的に把握・分析することは今後の FRP 構造物の長期性能を示すうえで重要である．本論文では，国内で供用されている FRP 橋の一つである京都府舞鶴市の GFRP トラス歩道橋を対象に，供用 12 年が経過した時点での目視観察結果と人力加振実験より得られた振動特性の分析結果について報告する．結果として，金属製ボルトの腐食とその傾向が明らかになったが，振動特性については大きな変化が無いことを確認した．

Key Words: *GFRP, footbridge, vibration test, natural frequency, visual inspection*

1.　はじめに

FRP 材の有する軽量・高強度・高耐腐食性を活かし，FRP 材を構造材に用いた建設構造物の研究・設計・施工事例が徐々に広がっている[例えば 1-5]．歩道橋を例に取れば，耐腐食性を活かし海岸に近く腐食環境の著しい場所への利用や，軽量性を活かし既設橋梁の架け替えや既設橋梁を拡幅したり検査路などを仮設する場合などの事例が見られる[1]．

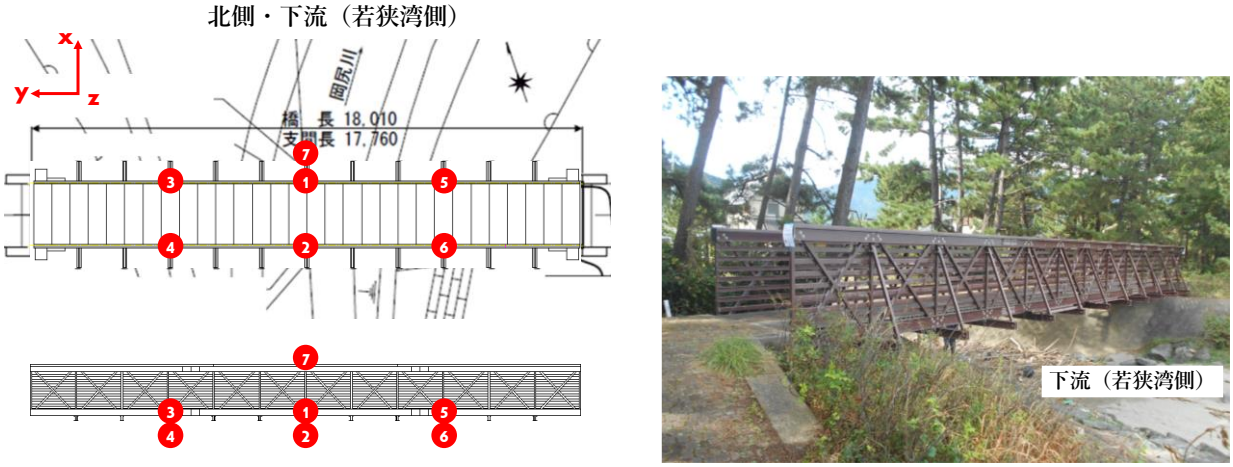
鋼や RC 橋が高度成長期に多数建設され，現在，その維持管理・補修補強が社会問題となっているが，FRP 構造物についても紫外線による樹脂痩せや接合部に金属系材料が用いられている場合はその腐食など，これまでの構造材料とは性質の異なる要因による経年劣化を生じる[6,7]可能性もあり，長期の構造健全性の確保が必要とされる社会基盤構造物においては，その経年変化の特性を把握しておくことは極めて重要であると考える．特に，FRP 構造物の経年に伴い発生する現象を適切に把握することは構造健全性を担保することに加え，メンテナンスコストの算出の精度向上などにも必要となる．材料の経年変化に関しては，FRP 材のクーポンを対象とした促進試験や実曝露試験が多数実施されており，材料自体の経年変化やそれに伴う機械的性質の状況などが明らかになりつつある[例えば 7-9]．一方で，実際に供用されている FRP 構造物の構造性能の評価や経年変化の状況を調査した事例は，構造物の数自体が少ないこともあり，極めて限られている．以上のような背景から，実橋梁において設計時の計算値との対応関係や構造性能の変化などを計測により定量的に把握・分析することは今後の FRP 構造物の長期性能を示すうえで重要であると考える．

本報告では，国内で供用されている FRP 歩道橋の一つである京都府舞鶴市の GFRP トラス歩道橋を対象に，供用 12 年が経過した時点で，目視観察と加振実験を行い，経年変化の状況を把握するとともに，振動特性の分析結果について報告する．なお，筆者らは供用開始時点，および，供用 5 年経過時点にも振動実験を実施しており[10,11]，過去実施した観察結果・加振実験結果との比較検討も併せて行う．

2. 対象歩道橋の概要と外観

図-1 に本研究で対象とする FRP 歩道橋の概要 [1]を示す．本歩道橋は，支間長約 18m，幅員 2.0m のトラス歩道橋で，竣工は 2009 年である．上弦材および下弦材は 203×56×10×10 の溝形材，斜材は 51×51×6×6 の箱形断面を使用しており圧縮側斜材は箱形断面内に四角棒が埋め込まれている．断面形状は FRP 床板デッキを下弦材および縦通材にボルトで締結している．

図-2 に 2014 年 5 月および 2021 年 11 月に撮影した歩道橋の状況を示す．2014 年時点においても路面下の桁や水平ブレース接合部に使用されている亜鉛メッキボルトの一部に発錆が見られているが，GFRP 材の表面は概ね光沢があり表面の顕著は変状は確認されなかった．2021 年では，2014 年に発錆の見られたボルトは腐食が進行し，GFRP 材についても全体に表面保護材（クリア塗料）の白化・剥離が散見された．また，上弦材の接合ボルトにおいても笠木により日陰となる部分については新たな腐食が見られた．腐食が観察された箇所については，降雨により飛来塩分などが洗浄されないなどの局所的な環境条件に起因していると考えられる．



(a)　概要とセンサ設置位置　　(b)　外観（2021 年 11 月）

図-1　GFRP 歩道橋の概要

2014 年 5 月			
2021 年 11 月			
	上弦材継手 （上流側・北面）	アウトリガー周辺 （下流側・北面）	補剛桁・水平ブレース接合部

図-2　2014 年と 2021 年の各部外観

3. 振動実験

(1) 実験方法

実験は人力による加振とし，**表-1** に示す方法で実施した．加速度センサはバッテリ・メモリを内蔵した 3 軸加速度計（ATR-Promotions 製 TSND121，加速度ピックアップ InvenSense MPU-6050）を 7 台使用し，サンプリング周波数は 1kHz とした．設置場所は，**図-1** に示すように下弦材（溝形断面の上フランジ上側）の支間の 1/4, 1/2, 3/4 に対応する位置に両側に計 6 か所，上弦材笠木に 1 か所設置した．加速度の座標軸についても**図-1** に示している．なお，2014 年までの計測では有線式 1 方向加速度計を使用しており，同時計測が可能なセンサ数やセットアップ時間の制限から，支間の 1/4, 1/2 における 2 方向（鉛直・幅員）やのみの計測であったが，センサデバイスの入手性・操作性の向上により本計測では 7 か所×3 方向とした．**図-3** に加速度計の設置状況を，**図-4** に実験の様子（ケース 5）を示す．

(2) 実験結果

図-5 に加振実験から得られた応答加速度の時刻歴の例を，**図-6** にフーリエ振幅スペクトルの例を示す．フーリエ振幅スペクトルは Parzen のスペクトルウインドウ（バ

図-3 加速度計の設置状況

図-4 加振の様子

表-1 加振プログラム（ケース 1～8 を 2 巡実施）

ケース	加振方法		加振力	試行回数	加振位置
1	衝撃	ジャンプ	実験員（1 人）	3	橋軸：中央 橋軸直角：中央
2	衝撃	ジャンプ	実験員（1 人）	3	橋軸：中央 橋軸直角：上流側
3	衝撃	ジャンプ	実験員（1 人）	3	橋軸：中央 橋軸直角：下流側
4	ランダム	ジグザグ走行	実験員（4 人）	3	橋軸：西から東 橋軸直角：中央
5	歩行	2Hz 歩行	実験員（1 人）	3	橋軸：西から東 橋軸直角：中央
6	歩行	2Hz 歩行	実験員（1 人）	3	橋軸：西から東 橋軸直角：下流側
7	歩行	2Hz 歩行	実験員（2 人）	3	橋軸：西から東 橋軸直角：中央
8	水平力	人力加力	実験員（4 人）	3	橋軸：支間の 1/4 点の横桁 4 本

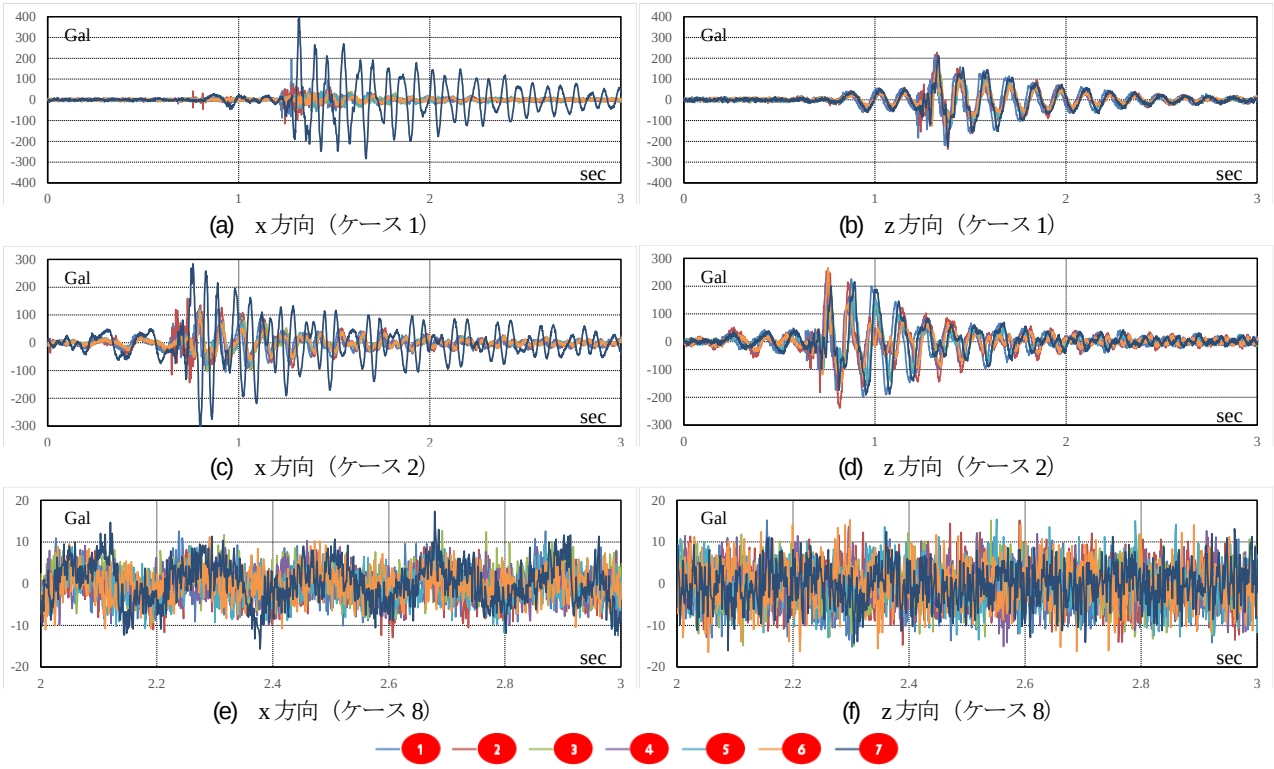


図-5 時刻歴応答加速度の例

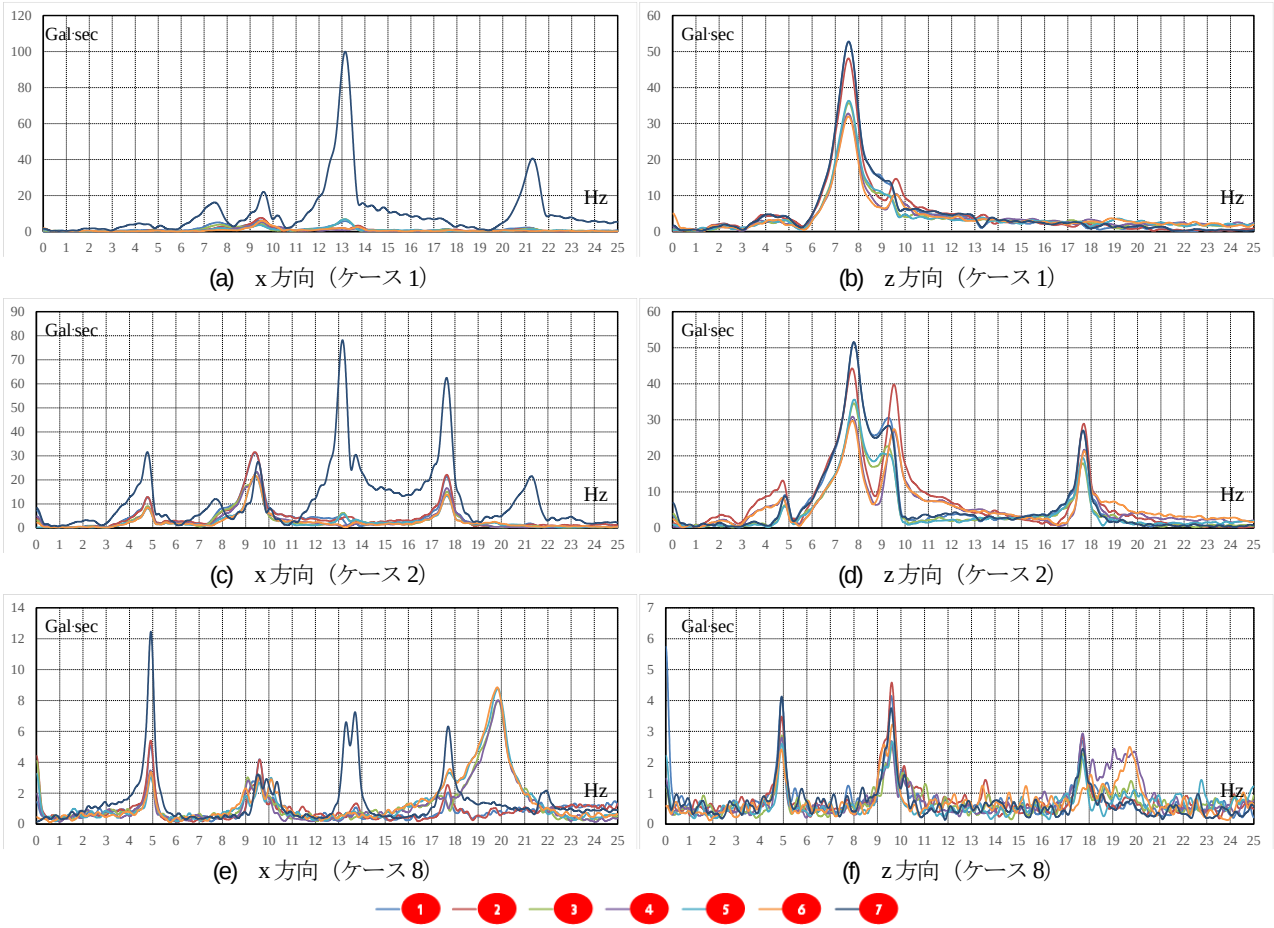


図-6 応答加速度のフーリエ振幅スペクトル

ンド幅 0.25Hz）を用いて平滑化している．**図-5 (b)**，**6 (b)** より，鉛直方向 1 次固有振動数として約 7.7Hz が得られた．また，**図-5 (a)**を見ると相対的にセンサ 7 のみに大きな振動が生じていることから，幅員方向に笠木が独立振動している様子もうかがえる．これは，トラス構面の面外振動に対応すると考えられ，その固有振動数は**図-6 (a)**より約 13Hz と評価できる．この振動数に対応する振動は他の加振ケース（**図-6 (c), (e)**）においても比較的大きな加速度振幅で観察されており，本歩道橋の構造形式において生じやすい振動成分と言えることから，繰返しの振動による影響を評価する際には着目が必要な部位となると考えられる．本歩道橋の最低固有振動数となる幅員方向 1 次固有振動数としては，**図-5 (e)**，**6 (e)**より約 4.9Hz が得られた．本歩道橋の設計目標値は鉛直方向 5Hz 以上，水平方向 3Hz 以上とされているが，いずれの設計目標値も満たされている．また，供用直後と 5 年経過後の振動計測結果として鉛直方向は両計測結果とも 7.6Hz の振動数が得られたことが報告されており，変化が無いことが確認された．幅員方向については 5 年経過後の計測において 4.8Hz と評価されており，幅員方向も変化はないと判断できる．

表-2 卓越振動数一覧

(a) Z 方向

ケース	巡目	卓越振動数 [Hz]		平均 [Hz] (変動係数)
		センサ 1	センサ 2	
1	1	7.797	7.786	7.68 (1.21%)
		7.668	7.660	
		7.622	7.614	
	2	-	-	
		7.568	7.561	
		7.778	7.774	

(b) X 方向

ケース	巡目	卓越振動数 [Hz]		平均 [Hz] (変動係数)
		センサ 1	センサ 2	
8	1	4.944	4.936	4.94 (0.47%)
		4.929	4.913	
		4.940	4.944	
		4.910	4.913	
	2	-	-	
		4.971	4.990	
		4.948	4.944	

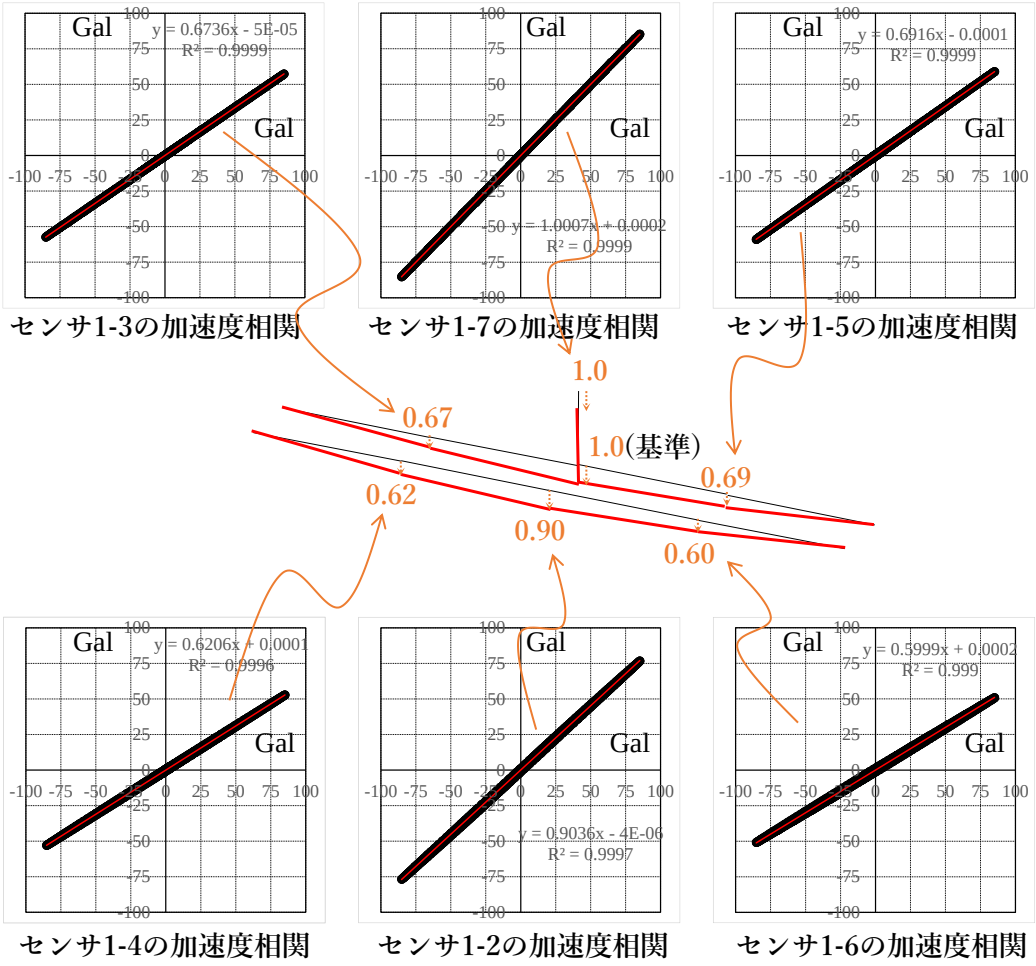
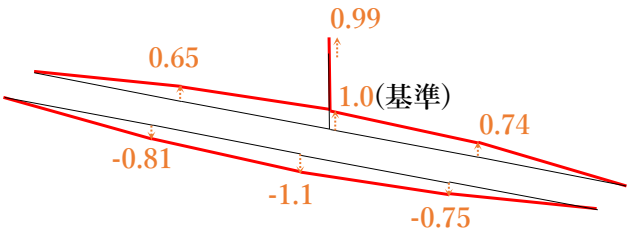
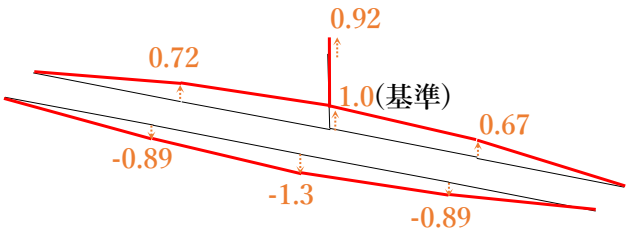


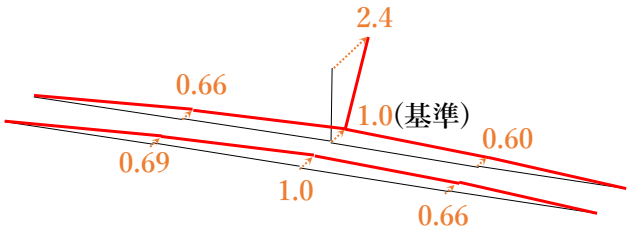
図-7　鉛直１次モード（7.7Hz）に対する分析結果（ケース１）



(a)　ケース２・9.6Hz 近傍のモード図



(b)　ケース４・9.6Hz 近傍のモード図



(c)　ケース８・4.8Hz 近傍のモード図

図-8　振動モードの推定結果

各加振ケースから卓越振動数を**表-2**にまとめる．一部は計測不良により評価できない試行回もあったが，各計測結果から得られた卓越振動数の変動は小さいと言え，安定した計測データが得られたと考える．

本報告では，同時多点・多軸の加速度計測が簡便に実施できるセンサデバイスを用いた計測を行っていることから，計測データから振動モードを推定することを試みた．方法は，以下の方法を採用した．

[1] 計測データ（応答加速度の時刻歴）をフーリエ変換する

[2] 振動モードを推定する振動数付近以外のフーリエ振幅スペクトルを削除するバンドパスを経て，フーリエ逆変換を行う

[3] フーリエ逆変換により得られる特定振動数の時刻歴に対してセンサ間の応答値相関図を描くことにより大きさの比と正負の関係を得る

本研究では，バンドパスの際の振動数幅は注目振動数に対して±0.5Hz とし，センサ 1 の加速度を基準として相関分析を行った．**図-7** に加振ケース 1 の z 方向応答に対して 7.7±0.5Hz の振動成分のみを取り出した加速度相関図と，その結果から得られたモード図を示す．また，**図-8** にケース 2 と 4 から 9.6Hz 近傍の振動モードを，ケース 8 から 4.8Hz 近傍の振動モードを推定した結果を示す．**図-7** より，7.7Hz がたわみ変形に対応する振動モードであること，また，**図-8 (c)**より，4.8Hz は幅員方向にたわむ形状の振動モードであることが確認できた．さらに 9.6Hz は橋軸方向のねじれ変形に対応する変形モードであることが分かった．

4. おわりに

本研究では供用後 12 年が経過した海岸近くに位置する GFRP 歩道橋について，目視によるに状況の観察を行うとともに加振実験を行い振動数・振動モードの分析を行った．その結果，目視観察では接合部に用いられている金属製ボルトの腐食が進行している部位は，雨水が当たりにくい場所である傾向が見られた．また，振動特性分析では供用直後・供用 5 年後と振動特性は変化が無いことを確認できた．今後も，定期的な観察・分析を続けることで FRP 構造物の経年特性についてデータを蓄積する予定である．

謝辞：本研究の実施にあたり，ヒロセホールディングス（株）　熊田哲規氏に多大な協力を頂いた．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 土木学会：複合構造シリーズ 04　FRP 歩道橋設計・施工指針（案），2011
2) 土木学会：複合構造シリーズ 06　FRP 水門設計・施工指針（案），2014
3) 角間恒，岡田慎哉，久保圭吾，松井繁之：ＦＲＰを用いた道路橋歩道拡幅構造の耐荷性能に関する研究，構造工学論文集，第 60A 巻，pp.1150-1158, 2014
4) 林厳，金哲佑，杉浦邦征，鈴木康夫，日比英輝：材料物性値のばらつきを考慮した GFRP 歩道桁橋の静的・動的応答評価，構造工学論文集，第 66A 巻，pp.329-339, 2020
5) 中川原颯，大西弘志，盛合将和：接着接合 GFRP 板材を用いた床版橋の断面に関する検討，第 8 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集，pp.18-25, 2020
6) 野雅彦，松本幸大，福本昌宏：港湾環境で使用されるペトロラタム被覆防食用 FRP の劣化機構および耐久性評価，第 6 回　FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム　講演集，2016
7) 土木学会：複合構造レポート 11　土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ，2014
8) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994
9) M.Schwartz：COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK (2nd Edition), McGrow-Hill, Inc., 1991
10) 松本幸大，山田聖志，齋藤翔，Ngyuen Duc LONG，熊田哲規：ＦＲＰトラス歩道橋の力学特性，土木学会第 65 回年次学術講演梗概集(I-495)，2010
11) 松本幸大，吉岩明彦，織笠千春，熊田哲規：FRP トラス歩道橋に対する供用 5 年経過後の観察，土木学会第 70 回年次学術講演梗概集(CS3-004)，2015

(Received August 26, 2022)

INSPECTION BY DYNAMIC BEHAVIOR FOR GFRP FOOTBRIDGE AT 12 YEARS OF IN-SERVICE

Yukihiro MATSUMOTO, Yuichi MIYASAKA, Rino YAMAMOTO and Mizuki HAMASAKI

In recent years, fiber reinforced polymer (FRP) materials have been focused on application to civil structures because of their excellent material properties. Several FRP structures have been constructed in Japan, but limited durability investigation is found, especially in actual FRP structures. Therefore, investigation of long-term behavior and mechanical performance inspection will be important to prove their durability and sustainability. Based on the background, we conducted a visual inspection and dynamic behavior investigation under dynamic loads for the GFRP footbridge built 12 years ago. The results show that several corrosion of metallic bolts are found and the characteristic of corroded positions is made clear. And it is confirmed that the dynamic behavior such as the natural frequency of lateral and vertical vibration modes isn't degraded.