# 木部材の部分的腐朽が木橋の固有振動数に与える影響

環境構造工学分野 8021801 青山 昌樹 指導教員 後藤 文彦

## 1. はじめに

既存橋梁のメンテナンスは重要だが,部材の点検 の際に任意の箇所に対して目視や打音を行うには, 足場を組んだり,外に身を乗り出したりと危険や労 力を伴う.またこのような点検からは劣化の具合を 定性的にしか判断することができない.一方で橋梁 全体の剛性は固有振動数から定量的に推定すること ができるが,振動試験は足場を組む等の点検と比べ て比較的安全かつ容易に固有振動数という定量値を 得ることができる.

著者らはこれまで石川県の木橋である かじか橋 を対象に 3D 解析モデルを作成し,振動解析による 固有振動数の解析値と既往の振動試験の測定値を比 較して解析モデルの妥当性を検討している<sup>1)2)</sup>.そ の既往研究では,木橋の経年劣化は木部材全体の一 様な劣化が起きるわけではなく、部材の部分的な劣 化の影響が大きいということを固有振動数の低減の 観点から示した、本研究では対象橋梁の解析モデル の部材に複数の部分的な劣化を与えて振動解析を 行う.そして各腐朽箇所における段階的な腐朽が橋 全体の固有振動数に与える影響について,感度解析 を用いて検討する.また,感度解析を用いて特定の 箇所の劣化が木橋の固有振動数に影響を与える大 小を調べたのち,2019 年のかじか橋の健全度調査 のデータと比較して解析モデルの妥当性を検証し 直す .

### 2. 対象橋梁

感度解析の対象とした かじか橋の概要を表-1 に 示す.かじか橋は 1987 年に架設された上路アーチ 道路橋で,大断面集成材を使用した木車道橋の中で もアーチ橋としては第1号橋である.架設から 35 年が経過しているが,2019年の健全度調査による 目視試験からも木部材の腐朽は明らかである.その 際の写真を写真-1,に示す.

表-1 かじか橋概要

所在地	石川県加賀市山中温泉上新保町石川県民の森			
形式	上路アーチ橋			
諸元	橋長 22.8m , 支間 16.4m , 有効幅員 3.0m			
用途・設計荷重	<b>車道</b> 6t			
事業主体	石川県			
竣工	1987年12月			
使用材料	ヒバ集成材			



写真-1 アーチ端部の腐朽

## **3.** 解析モデルの設定

解析ソフトの Salome-Meca を用いて対象橋梁の 解析モデルを作成し,振動解析を行う.以下ではその解析モデルの設定を説明する.

(1) 腐朽箇所の設定

対象橋梁の解析モデルに対して感度解析をするた めの仮想的な腐朽を与える.腐朽を与える箇所を 図-1,図-2に示す.橋軸方向と幅員方向で腐朽箇所 を,アーチ部材で $a_{a} \sim a_{a}$ , $a_{b} \sim a_{c}$ , $a_{c} \sim a_{\epsilon}$ ,  $a_{t} \sim a_{c}$ , $a_{a} \sim a_{o}$ とする.縦桁の支柱との接合 部で $c_{a} \sim c_{a}$ , $c_{b} \sim c_{c}$ , $c_{c} \sim c_{c}$ とす る.また $a_{b} \sim a_{b}$ をまとめて $A_{1}$ とする.同様に  $A_{2}$ , $A_{3}$ , $A_{4}$ , $A_{5}$ , $C_{1}$ , $C_{2}$ , $C_{3}$ , $C_{4}$ とする.これ らの箇所に腐朽を与える理由は以下の通りである.

構造的に重要な部材であるアーチには,目視試験 で腐朽が見受けられた端部  $A_1$ , $A_5$ (写真-1)と,目 視試験でも腐朽が見受けられ,かつ鋼板で覆われて 雨水が滞留しやすいと予想される支柱接合部の  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ を設定する.各箇所で腐朽範囲は,深さが アーチ高さの上側 1/4 (125mm), 長さが1000mm 程度,幅がアーチ幅の200mmとなっている.これ らは著者らの既往研究 $^{2)}$ と同じ設定である.図-2 の青緑色の箇所が設定した腐朽箇所である.

加えて縦桁下面の,支柱との接合部に C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>,C<sub>4</sub>の腐朽を与える.この箇所は目視試験では 見ることができないが,鋼板に覆われた縦桁下面の 接合部が雨水の滞留で腐朽しやすいと予想される箇 所である.縦桁下面の腐朽範囲について,及川ら<sup>4)</sup> は集成材を用いた木部材の腐朽範囲は,接着剤等の 影響によってラミナ厚の 30mm 程度にとどまると いうことを提唱している.よって解析モデルの縦桁 下面の腐朽深さを 30mm に設定した.腐朽の長さ は 600mm,幅は 200mm である.この腐朽範囲は 概ね接合のための鋼板で覆われた範囲になっている が,解析モデルでは要素数を節約するため薄い鋼板 は省略したモデルを使用する.以上,これらの腐朽 が木橋の固有振動数の低減にどのような影響を与え るかについて振動解析で調べる.



図-1 解析モデル腐朽箇所 全景



図-2 解析モデル腐朽箇所 拡大(A<sub>2</sub>,C<sub>2</sub>, a<sub>b</sub>~a<sub>c</sub>, c<sub>b</sub>~c<sub>c</sub>)

- 4. 解析手法
- (1) 振動解析の解析手法
- a) 幅員方向をまとめて腐朽を与えるケース

前章ではかじか橋の過去の目視試験で腐朽が確認 された木部材や,構造上の問題で雨水の滞留が予測 され腐朽の疑いがある木部材に,解析モデル上で腐 朽部分を設定した.これらの腐朽部分に以下のよう な段階的な仮想腐朽を与えて振動解析を行い,各箇 所における腐朽が木橋の固有振動数の低減にどのよ うな影響を与えるかを見る.以下に解析上での腐朽 の与え方と解析ケースを示す.

図-1 の赤丸で囲まれた  $A_1 \sim A_5$ ,  $C_1 \sim C_4$  の計9 箇所に対して「1箇所ごとに」ヤング率を段階的に 下げていく.ヤング率は腐朽箇所へそれぞれ健全 時(9.6GPa),健全時の0.9倍(8.64GPa),0.8倍, 0.7倍,…,0.1倍,0.05倍,0.02倍,0.01倍の計 13段階を与える.ヤング率の他,比重0.459,ポ アソン比0.4は腐朽の段階に依らず一定に腐朽箇 所へ与える.腐朽箇所以外の部材の物性値は表-2, 表-3を一定に与える.以上,(13段階の腐朽ヤング 率)×(9箇所)=117ケースの振動解析の結果から 各部材の部分的な腐朽が木橋の固有振動数に与える 影響を見る.

表─2 王備健全時諸元						
主構ヤング率	比重	ポアソン比				
9.60GPa	0.459	0.4				

表3 床版健全時諸元							
軸方向ヤング率	橋軸直角ヤング率	比重	ポアソン比				
	鉛直方向ヤング率						
10.29GPa	0.412GPa	0.541	0.4				

1 ケースごとの解析値からは,水平1次モード (図-3),鉛直逆対称1次モード(図-4),ねじれ逆対 称1次モード(図-5),鉛直対称1次モード(図-6) の4つのモードの固有振動数を見る.高次の振動 モードは実際の振動試験で測定することが難しいた め,今回は低次のこれら4つのモードを扱う.

b) 1箇所ずつ腐朽を与えるケース

水平 1 次モードやねじれ逆対称 1 次モードでは 幅員方向で非対称な振動モードである.実橋は日照



図-3 水平1次モード



図-4 鉛直逆対称1次モード



図-5 ねじれ逆対称1次モード



図-6 鉛直対称1次モード

の偏りなどの影響で幅員方向で部材の腐朽の進行 が異なる可能性がある.またかじか橋は構造的に も幅員方向で非対称である.そこで,後の結果で示 す $A_1 \sim A_5$ , $C_1 \sim C_4$ の9箇所の感度解析で,鉛直 逆対称1次モードの感度が高かった $A_2$ , $A_4$ , $C_2$ ,  $C_4$ をさらに幅員方向に分けて $a_b \sim a_c$ , $a_c \sim a_c$ ,  $c_b \sim c_c$ , $c_c \sim c_c$ の25箇所で,上記と同様それぞ れ一箇所ずつ13段階のヤング率を与えて振動解析 をする.以上(13段階の腐朽ヤング率)\*(20箇所 )= 260ケースの振動解析の結果から幅員方向に 非対称な腐朽が木橋の固有振動数に与える影響を見 る.解析値の固有振動数を読み取る振動モードは, 上記と同様に水平1次モード,鉛直逆対称1次モー ド,ねじれ逆対称1次モード,鉛直対称1次モー の4つである.

(2) 感度解析の解析手法

振動解析の結果を用いて感度解析を行う.振動解 析の結果により,腐朽箇所1箇所ごとに,水平1次 モード,鉛直逆対称1次モード,ねじれ逆対称1次 モード,鉛直対称1次モードの4つの振動モードで 腐朽13段階のヤング率の低減に対する固有振動数 の解析値が得られる.その1つのモードにつき13 個のヤング率-固有振動数のプロットをとり,その 回帰線を最小二乗法により作成する.また,加えて 回帰直線も作成し,回帰直線の傾きの大きさを用い て感度を判定を行う.決定係数 R<sup>2</sup> で感度を判定す る例 5) もあるが,今回それぞれの回帰線の  $R^2$  の 値は,後の解析結果で示すようにどの腐朽箇所,振 動モードにおいても1に近い値で有意な差がなかっ た.そのため今回は固有振動数の絶対的な低減を表 すことのできる回帰直線の傾きの大きさを感度判定 に採用する.

- 5. 解析結果
- (1) 振動解析の結果

振動解析の結果の一部を図-7,図-8に示す.グラ フは $A_1 \sim A_5$ , $C_1 \sim C_5$ の腐朽箇所9つと振動モード 4つ, $a_b \sim a_c$ , $a_c \sim a_{\epsilon}$ , $a_t \sim a_{\epsilon}$ , $c_b \sim c_c$ , $c_t \sim c_{\epsilon}$ の腐朽箇所25個と振動モード4つをかけ合わせた 分だけあるが,今回は省略して図-7と図-8のみを 示す.前述の通り,決定係数 $R^2$ はどのケースの回 帰も1に非常に近い値になったため,今回は感度の 判定を回帰直線の傾きの大きさで行う.



図-7 A<sub>1</sub> 腐朽時の鉛直逆対称 1 モードの低減



図-8 A<sub>2</sub> 腐朽時の鉛直逆対称 1 モードの低減

### (2) 感度解析の結果

 $A_1 \sim A_5$ ,  $C_1 \sim C_4$ の9つの腐朽箇所ごとに水平1 次モード,鉛直逆対称1モード,ねじれ逆対称1次 モード,鉛直対称1次モードの固有振動数の低減に ついて,それぞれ図-7,図-8のようにグラフを作成 して回帰直線の傾きを取り出し,棒グラフにまとめ たものが図-9と図-10である.図-9はアーチの感 度解析結果,図-10は縦桁接合部の感度解析結果で ある.横軸は腐朽箇所ごとの振動モード,縦軸は回 帰直線の傾きの大きさとなっている.

また同様に $a_{b} \sim a_{z}$ , $a_{z} \sim a_{z}$ , $a_{t} \sim a_{z}$ , $c_{b} \sim c_{z}$ ,  $c_{t} \sim c_{z}$ ,の 25 個の腐朽箇所ごとに水平 1 次モード, 鉛直逆対称 1 モード,ねじれ逆対称 1 次モード,鉛 直対称 1 次モードの固有振動数の低減について回帰 直線の傾きを取り出し,棒グラフにまとめたものの 一部が図-11,図-12 である.図-11 は $a_{b} \sim a_{z}$ の 感度解析結果,図-12 は $c_{b} \sim c_{z}$ の感度解析結果で ある.横軸は腐朽箇所ごとの振動モード,縦軸は回 帰直線の傾きの大きさとなっている.



図-9 A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub>の感度解析結果

## 6. 考察

(1) 得られた回帰線についての考察

図-7,図-8は結果の一例だが,表示していない



図-10  $C_1 \sim C_4$ の感度解析結果



図-11 *a*<sub>か</sub>~*a*<sub>こ</sub>の感度解析結果



図-12 c<sub>か</sub>~c<sub>こ</sub>の感度解析結果

どの腐朽箇所と振動モードでも,固有振動数の低減 は二次の多項式か対数式に非常にきれいに回帰式が 求められた.2つの関係が一意に式で表されるとい うことは,将来的には低減式を求めることができれ ば,橋梁の固有振動数の測定値から部材のヤング率 が推定できるということを示唆する.この結果は今 後経年による固有振動数の測定値の低減から部材の ヤング率を推定する手法を構築するための大きな足 がかりとなる.

- (2) 感度グラフの考察
- a)  $A_1 \sim A_5$ ,  $C_1 \sim C_4$ の腐朽

A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub>, C<sub>1</sub>~C<sub>4</sub>の腐朽についてのグラフである 図-9と図-10を見ると,水平1次モード(赤色)は どの箇所でも感度が低い.鉛直逆対称1次モード (青色)はA<sub>2</sub>, A<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>の箇所で感度が高く

なっている.ねじれ逆対称1次モード(緑色)も鉛 直逆対称 1 次モードと同様に  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $C_2$ ,  $C_4$ の 箇所で感度が高くなっている.鉛直対称1次モー ド(橙色)は $A_3$ ,  $C_2$ ,  $C_4$ の箇所で感度が高くなっ ている.これらのことから腐朽箇所と振動モードに おける感度の関係を考察すると,振動の腹となる 箇所(図-13)は感度が高く,振動の節となる箇所 (図-14)は感度が低いと言える.すなわち振動試験 によって振動モードごとの固有振動数の低減を確認 することで,振動の腹になる部分の劣化を評価する ことができる.一方で写真-1に見られるような部 材端部などの振動の節の箇所の劣化は固有振動数へ の感度が低いため,目視試験等で劣化を確認するこ とが重要である.この結果の一部は既往研究<sup>2)</sup>で も示しているが,本研究では感度の高低を新たに回 帰直線の傾きという定量値で示している.

b) 
$$a_{th} \sim a_{c}$$
,  $a_{t} \sim a_{e}$ ,  $a_{th} \sim a_{e}$ ,  $c_{th} \sim c_{c}$ ,  
 $c_{th} \sim c_{e}$ の腐朽

 $a_{th} \sim a_{c}$ ,  $a_{th} \sim a_{c}$ ,  $a_{th} \sim a_{c}$ ,  $c_{th} \sim c_{c}$ ,  $c_{th} \sim c_{c}$ の腐朽についてのグラフの一部である図-11 と図-12 を見る. ねじれ逆対称 1 次モード(緑 色)は幅員方向で非対称に振動するモードであり, これは $A_{1} \sim A_{5}$ ,  $C_{1} \sim C_{4}$ の腐朽と同様に振動の腹と なる箇所は感度が高く,振動の節となる箇所は感度 が低いと言える結果となった.

一方鉛直逆対称 1 次モード(青色)を見ると,腐 朽箇所に依らずほとんど一定の値となった.これは  $A_1 \sim A_5$ ,  $C_1 \sim C_4$ を腐朽させた結果と異なるものと なった.その要因は,鉛直逆対称 1 次モードは幅員 方向で非対称に振動するモードで,そのようなモー ドはアーチや縦桁が 1 本だけ腐朽しても他 4 本の それらが健全であれば剛性を保ち固有振動数は低減 しにくいためと考える.よって鉛直逆対称 1 次モー ドの固有振動数が低減するときは複数本のアーチや 縦桁が腐朽していると予想される.

# ご解析を用いた実橋の劣化性状の予測 前章まででは、固有振動数の低減に対して、各振 動モードの振動の腹にあたる部材の劣化が固有振動



図-13 鉛直逆対称1モードの腹



図-14 鉛直逆対称1次モードの節

数の低減に影響を与えるということ確認した.今章 では前章までの成果をもとに解析パラメータを調整 し,解析値を測定値に近づける逆解析を用いて実橋 の劣化性状を推定する.

著者らはこれまで,架設から 30 年程度経過した かじか橋を対象に,固有振動数の測定値と解析モデ ルの解析値を比較することで,経年劣化した実橋を 解析モデルで再現することを検討してきた.今回は 過去の健全度調査の中で,最も新しいデータである の 2019 年の測定値と,解析パラメータを調整した 解析値を比較することで解析モデルの妥当性を検討 し,実橋の部材状態を推定する.かじか橋の経年の 固有振動数の測定値は表-4 のとおりである.この 中で卓越モードである鉛直逆対称1次モードの測定 値(8.69Hz)に着目し,これに解析値が一致すると きのパラメータを見ていく.

### 表-4 経年の測定値

	2004 年	2012 年	2015 <b>年</b>	2017 <b>年</b>	2019 年
鉛直逆対称1次	11.62Hz	$9.47 \mathrm{Hz}$	$9.46 \mathrm{Hz}$	$8.79 \mathrm{Hz}$	8.69 Hz

### (1) 解析モデルの設定

前章ではかじか橋の卓越振動モードである鉛直逆 対称 1 次モードの固有振動数に対して, A<sub>2</sub>, A<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>の箇所の腐朽の感度が高いと示した.また 表-4 に見られるように鉛直逆対称 1 次モードの経 年による低減が確認できる.よって  $A_2$  ,  $A_4$  ,  $C_2$  ,  $C_4$  に腐朽が発生していると考えられ , 解析モデル 上でこれらの箇所に腐朽を設定する .

また,前章までは感度解析の結果を分かりやすく 示すために腐朽深さを実橋で想定される範囲より も大きく設定したが,今章では解析モデルで実橋を 再現することを検討するため,腐朽範囲は目視試験 から窺えた範囲を解析モデルに設定する.腐朽範囲 について,アーチと支柱の接合部は,アーチに長さ 1000mm 程度,幅 200mm,深さ 30mm とする.縦 桁と支柱の接合部は,縦桁に長さ 500mm 程度,幅 200mm,深さ 30mm とする.

### (2) 解析諸元の設定と逆解析結果

梁の曲げ振動理論式は $f=rac{1}{2\pi}rac{\lambda^2}{l^2}\sqrt{rac{EI}{
ho_A}}$ で表され, f:固有振動数, $\lambda:$ 振動モードによる定数,l:スパ ン長, E: ヤング率, I: 断面二次モーメント, ρ: 密度,A:断面積である.既往研究<sup>1)2)</sup>では経年で 低減する物性値はヤング率のみとし木部材の含水率 (密度)は気乾密度で一定としていたが,本研究では 密度を気乾密度の 1.5 倍とし含水率 42% に設定し 固有振動数の解析値が 2019 年の測定値 8.69Hz と 一致するような部材ヤング率を逆解析によって求め た.その結果,健全時推定の諸元(主構部 9.6GPa, 床版 10.29GPa) に対し逆解析により求められた部 材ヤング率は健全時のヤング率と比較して 66.8% 残存だった (主構部 6.55GPa , 床版 7.01GPa ). め おと橋の例<sup>3)</sup>からも見られるように,建設から30 年以上経過した木部材のヤング率としてこの値は妥 当な範囲だと考えられる.以上より,建設から30 年以上経過し木部材の部分的な腐朽が見られるかじ か橋の劣化状態を,鉛直逆対称1次モードの固有振 動数に着目して解析モデル上で再現できた.

# 8. まとめ

木橋解析モデルに部分的な腐朽箇所を設定し,各 箇所ごとにヤング率を段階的に低減させて振動解析 をした.その解析結果から4つの振動モード(水平 1次,鉛直逆対称1次,ねじれ逆対称1次,鉛直対 称1次)を取り出して,腐朽箇所と振動モードごと に固有振動数の低減グラフを作成したところ,部材 ヤング率の低減と橋梁の固有振動数の低減の関係は 二次の多項式または対数式で非常に高い精度で回帰 することを明らかにした.さらにこの低減曲線の回 帰直線の傾きを用いて感度解析をしたところ,部材 ヤング率と固有振動数の関係について,振動の腹と なる箇所は感度が高く,振動の節となる箇所は感度 が低くなることが分かった.

以上の結果をもとに架設から 30 年以上経過した かじか橋の劣化性状を解析モデルを用いて予測し た.解析モデルのヤング率を,健全時から 33.2% 低 減(66.7%残存)させ,含水率を 42% に設定した ところ,アーチ橋で卓越する鉛直逆対称1次の振動 モードの固有振動数が測定値と解析値で一致した. 架設から 27 年経過して架け替えられた めおと橋 で測定された部材ヤング率は,みなし新設時と比較 して 20% 程度の低減だったため,逆解析から得ら れた かじか橋の劣化状態も妥当なものだと考えら れる.

本研究では,部材ヤング率の低減と橋梁の固有振 動数の低減の関係は高い精度の回帰式で表される ことを示した.今後の展望として,この関係を用い て,固有振動数の低減を観察することで特定の部材 の劣化を推定する手法を構築したい.

### 参考文献

- 青山 昌樹,及川 大輔,後藤 文彦:木橋の劣化診断のた めの振動解析モデルの検討,令和2年度土木学会東 北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), I-2, 2021.
- 根本 柊哉,及川 大輔,青山 昌樹,後藤 文彦,青木 由香利:振動解析を用いた木橋の劣化状態の予測,令 和3年度 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要 集(CD-ROM), I-1, 2022.
- 3) 及川 大輔,故 菅沼 源二郎,本田 秀行,後藤 文彦:経 年による木製アーチ道路橋(かじか橋)の構造性能と 健全度調査,木材工学論文報告集19,pp.72-79,2021.
- 4) 及川 大輔,藤原 有沙,後藤 文彦,野田 龍,石黒 駿:
   27 年供用された木橋部材の劣化評価,土木学会論文 集 E2(材料・コンクリート構造),77 巻5号,pp. I.45-I.54,2021.
- 5) 黒田 璃紗, 西尾 真由子: 既存鋼鈑桁橋のモデルパラ メータ事後分布を用いた信頼性評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No. 3, 380-392, 2016.
- 6) 西尾 真由子,人見 淳:橋梁支承の腐食劣化過程を対象としたモデルパラメータ事後分析逐次推定に関する基礎研究,土木学会論文集A2(応用力学),Vol.71,No. 2, 99-108, 2015.