

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

及川 大輔¹・故 菅沼 源二郎²・本田 秀行³・後藤 文彦⁴

¹秋田大学大学院 理工学研究科（〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1）

E-mail: m8020802@s.akita-u.ac.jp

²令和2年9月6日逝去

³フェロー 金沢工業大学名誉教授（〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1）

E-mail honda@neptune.kanazawa-it.ac.jp

⁴正会員 秋田大学教授 大学院理工学研究科（〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1）

E-mail gotou@gipc.akita-u.ac.jp

近代木橋は1987年に第1号橋が架設されてから2000年頃まで全国に架設され、現在まで供用されている橋の経年は多くの場合、20年から30年である。そのため既存の橋の維持管理・保全への対策は重要な課題である。しかし、30年以上経過した橋の劣化進行度や構造性能の低減率などのデータが少なく、維持管理指標の構築が進んでいない。本研究で対象としたかじか橋は大断面集成材を用いた上路式アーチ橋の第1号橋であり、架設から32年以上経過している。本研究では、かじか橋に対して測定された固有振動数等の測定データと有限要素法のモード解析で得られるデータとを比較することにより、測定時のヤング係数を推測する手法を示した。その結果、かじか橋では、経年による一定程度の剛性の低下が確認されたことから、今後、定期的に健全度評価を行うべきであろう。

Key Words: timber bridge, large cross-section glulam timber, 3D modal analysis, MSC/NASTRAN

1. まえがき

日本には様々な形式の木橋が存在するが、コンクリート橋などと比較すると、その架設実績は未だに少ない。また、大断面集成材を用いた日本の木橋（以後「近代木橋」）の歴史はさらに浅く、最初の道路橋は1987年に架設された坊川林道2号橋であり、近代木橋の歴史は30年ほどである。現在まで供用されている橋の経年は多くの場合、20年から30年であるため、既存の橋の維持管理・保全への対策は重要な課題である。しかし、30年以上経過した橋の劣化進行度や構造性能の低減率などのデータが少なく、維持管理指標の構築が進んでいない。木橋の維持管理や保全を行うために残存年数の算定法なども考案されているが、データ数が少ないため検討を続けることが望ましい。本研究で対象とするかじか橋は坊川林道2号橋と同じく1987年に架設され、32年経過しており、上路式アーチ道路橋としては最初の橋である。本橋は維持管理指標の検討を行うための基礎データの蓄積を行わなければならない橋梁の一つである。

本研究は木材の劣化や腐朽などが進行している恐れがあるかじか橋に対して、動的調査と健全度調査から構造性能の低下や劣化進行度の確認を行うことを目的とする。

また本橋は現在までに2004年、2012年、2015年、2017

年と4度の調査を行っており、データの蓄積が行われている¹⁾。そこで積年のデータと比較し経年による構造性能の低減や劣化進行度の傾向を把握するとともに、基礎資料の蓄積の観点から部材ごとの劣化進行度、減衰定数も含めた振動特性に関するデータ蓄積を行う。

2. 対象橋梁

本研究で対象とするかじか橋は「石川県民の森」の敷地内にある2ヒンジ上路式アーチ道路橋であり、大断面集成材を用いた上路式アーチ橋としては日本で初めて架設された。本橋は14tf工事車両が通行可能な道路橋であり主構部材であるアーチ部にはヒバ集成材が用いられている。本橋の維持管理として架設から9年経過した1996年には、床版の腐朽が見られたため、幅員方向の床版に橋軸方向の床版を重ね、床版の二層化を行っている。また2009年には、床版、高欄、地覆の交換、アーチリブの部分補修を行っている。表-1に本橋の設計概要、図-1にかじか橋の設置状況、図-2に橋梁一般図、図-3にかじか橋の平面図を示す。

表-1 かじか橋の設計概要

橋種	上路式2ヒンジアーチ橋	
施工年度	1987年度	
使用材料	木橋骨組部材	ヒバ集成材
	高欄・踏板部材	アカマツ
用途	道路橋	
橋長	22.80m	
支間長	22.16m	
幅員	2.8m	

表-2 測定概要

サンプリング時間	30s
サンプリング周波数	100Hz
データ数	N=1024
サンプリング時間間隔	0.01ms
周波数分解能	0.0977Hz
最大周波数	50Hz



図-1 かじか橋の設置状況

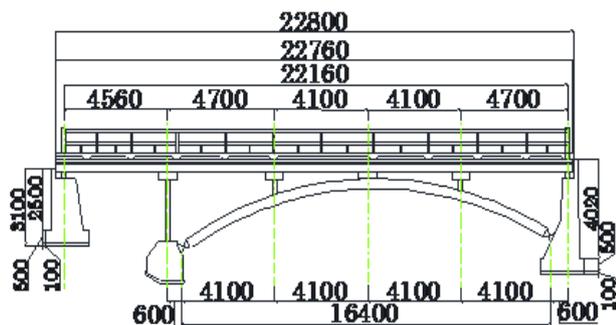


図-2 かじか橋の一般図

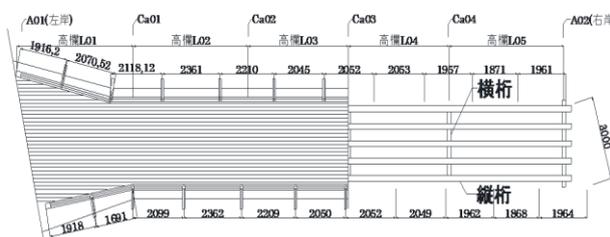


図-3 かじか橋の平面図

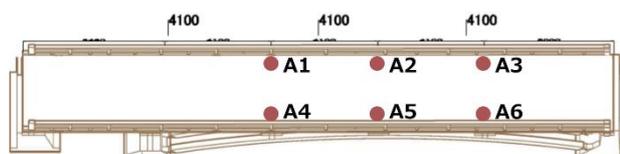


図-4 サervo型速度計設置位置

3. 調査概要

本研究では、構造性能と健全度評価を行うため、動的調査と目視による健全度調査を実施した。以下に動的調査、健全度調査の概要を示す。

(1) 動的調査

橋にサーボ型速度計を設置して振動波形を測定する。サーボ型速度計は上流側、下流側各3点設置する。動的調査の手法として今回は砂袋落下衝撃試験、人力加振試験を行った。図-4にサーボ型速度計設置位置を、表-2に測定概要を示す。

a) 砂袋落下衝撃試験

橋の幅員中央、アーチ支間長 l の $1/4$, $1/2$, $3/4$ に約 10 kgf の砂袋を高さ約 20cm の位置から落下させ、橋梁に鉛直方向の加振を行った。本試験は鉛直方向の固有振動数と振動モードの同定に有効である。測定時間は 30 秒で、各測点 3 回ずつ測定を行った。図-5 に砂袋落下衝撃試験の加振位置と試験の様子、図-6 に測定波形を示す。

b) 人力鉛直加振試験

橋の高欄部、アーチ支間長 l の上流側 $1/4$ 、下流側 $3/4$ を人力で鉛直方向に加振した。本試験は鉛直ねじれ固有振動数と振動モードの同定に有効である。測定は 10 回加振した後、30 秒間測定を行った。図-7 に人力鉛直加振試験の加振位置と試験の様子、図-8 に測定波形を示す。

c) 人力水平加振試験

橋の高欄部、アーチ支間長 l の下流側 $1/2$ を人力で水平方向に加振した。本試験は水平方向の固有振動数と振動モードの同定に有効である。測定は 10 回加振した後、30 秒間測定を行った。図-9 に人力水平加振試験の加振位置と試験の様子、図-10 に測定波形を示す。

(2) 健全度調査

橋の各部材に対して目視試験を実施した。今回は足場が設置できなかったため、近接での目視ができる限りは近接目視を実施し、近接目視ができない場所については望遠カメラを用いて遠方目視を実施した。

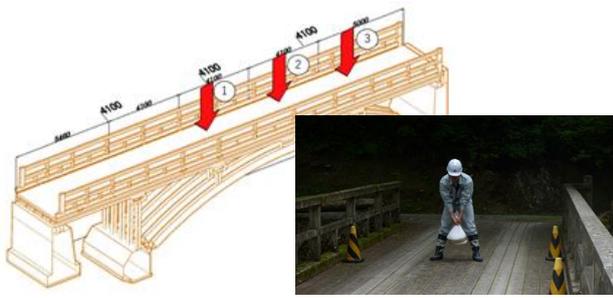


図-5 砂袋落下衝撃試験の加振位置と試験の様子

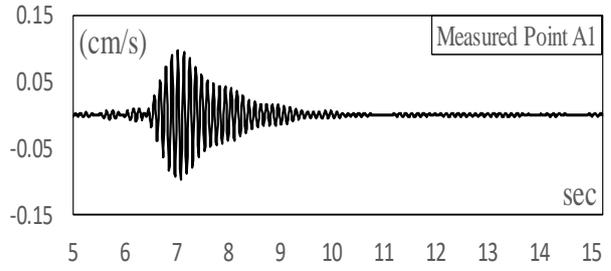


図-6 砂袋落下衝撃試験測定波形

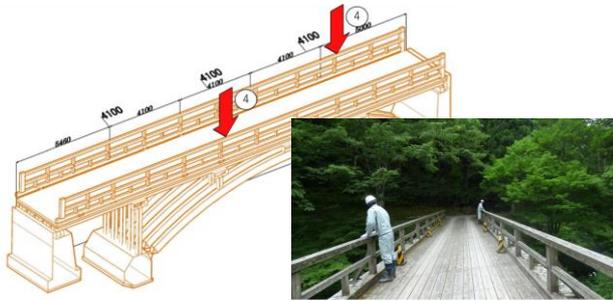


図-7 人力鉛直加振試験の加振位置と試験の様子

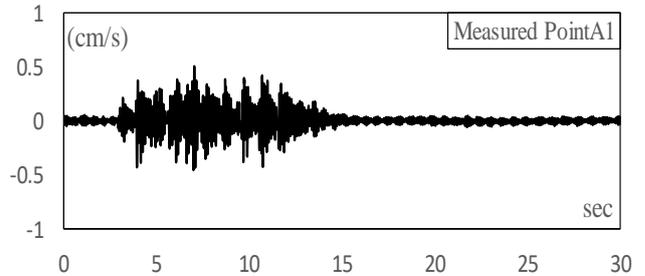


図-8 人力鉛直加振試験測定波形

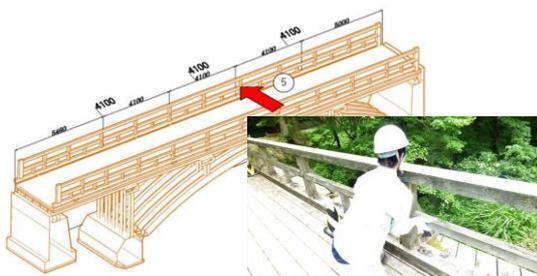


図-9 人力水平加振試験の加振位置と試験の様子

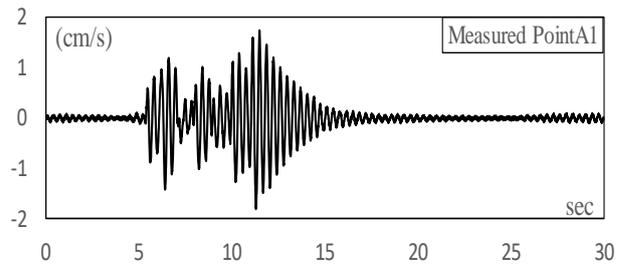


図-10 人力水平加振試験測定波形

表-3 経年による固有振動数の変化

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)									
		2004年		2012年		2015年		2017年		2019年	
		実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値
1	水平対称一次	5.17	4.57	3.13	3.32	2.92	3.32	2.81	3.09	2.73	3.05
2	鉛直逆対称一次	11.62	11.65	9.47	9.48	9.46	9.48	8.79	8.8	8.69	8.69
3	鉛直対称一次	15.82	13.61	15.82	11.08	15.51	11.08	15.43	10.28	15.38	10.16
4	鉛直対称二次	19.14	20.04	18.95	16.31	18.04	16.31	17.68	15.14	17.18	12.69

4. 動的特性

動的調査より測定された波形にバンドパスフィルターなどのフィルター処理を行い、高速フーリエ変換法を用いてフーリエ変換し、パワースペクトルから卓越振動数の特定を行った。またクロススペクトル解析を用いて、波形同士の位相から振動モードの同定を行った。

ヤング係数を変えながら MSC/NASTRAN による 3 次

元骨組解析を行い、測定値に近い固有振動数を与えるヤング係数を推定した。3次元骨組解析は橋の骨組モデルを作成し、材料諸量など物性値を考慮して解析を行うものである。物性値には断面諸量やヤング係数などがあるが、木材の単位体積重量、断面諸量は経年によって変化しないものと仮定し、今回はヤング係数のみを変化させた。本橋の過去 4 回の測定による実験値と MSC/NASTRAN による解析値¹⁾を表-3 に示す。

5. 構造剛性

本研究では、MSC/NASTRAN による3次元骨組解析に用いる物性値、特に経年による低減が考えられるヤング係数を変化させ固有振動数の解析値を実験値に近づける逆解析を行った。この逆解析から推定されるヤング係数を構造剛性と定義する。逆解析では本橋の代表的な振動モードである鉛直逆対称一次振動モードを基準として実験値に近づける。そのため他の振動モードでは多少解析値と実験値に誤差が生じている。なお、今回は全木部材のヤング係数を一律に変化させて逆解析を行っている。現実には部位ごとに腐朽の影響が異なるため、健全度調査から得られた劣化の程度に応じて、部材ごとにヤング係数の変化に重みをつけるといった手法も考えられるが、重みの設定に主観が入る影響を避けるため、今回は基礎的な研究として、まずはすべての木部材（ヒバ集成材とアカマツ）のヤング係数を同じ低減率で一律に変化させるものとする。

表-3 から経年によって固有振動数が低減していることがわかる。固有振動数の低減は、部材毎の劣化が橋全体の構造性能の低減を表しているものと考えられる。また調査を開始した2004年のデータでは実験値と解析値がほぼ一致している。このことは、適切にヤング係数を推測した3次元骨組モデルが本橋の状態をよく再現したものと考えられる。振動モード図を図-11に示す。

構造剛性の低減率は、架設時（1987年）を0%、木部材のヤング係数が0まで低減した状態を100%として、経年ごとの低減を表したものである。

構造剛性の低減率は架設から32年経過している2019年の調査では57%低減していることがわかる。経年による構造剛性の低減について1回目の調査である2004年は23%低減、2012年は49%低減と架設から25年までは構造剛性の低減が著しく進んでいることがわかる。しかし2015年以降の低減は7年で8%とあまり進んでいない。2015年の調査では2012年から構造剛性が変化しておらず低減が認められない。今回までの調査によって経年による構造剛性の低減は認められているが、低減の傾向がつかめているものではない。現在提案されている構造剛性の低減係数の算出式や残存年数の算出式²⁾は現時点までの低減の傾向から算定したものであり、算出式を確立していくためにも構造剛性の低減の傾向を把握していくことが必要である。本橋の傾向が近代木橋全てに当てはまるものであるかは現時点では分からない。とはいえ本橋の調査結果を基に、今後のデータ蓄積から木橋一般の傾向についてもある程度は推測できるだろう。

また経年による振動モード毎の固有振動数の低減から水平対称一次振動モードが鉛直逆対称一次振動モードの低減に比べると著しく低減していることが見て取れる。

低減率で比べると鉛直方向は25%であるのに対して、水平方向の低減率は47%と2倍近く低減していることがわかる。振動モード毎の固有振動数の低減率が一定でないことから低減率の差によって腐朽箇所が特定できるのではないかと考えた。本橋の場合は水平方向低減率が大きいため、アーチ端部の腐朽が考えられる。今回は健全度調査も実施しているので、目視試験の結果も踏まえて、低減に影響している腐朽部がどこであるのかを考察する。

また鉛直対称一次振動、鉛直対称二次振動の低減率が鉛直逆対称一次振動などに比べて比較的少ないが、これは本橋が上落式アーチ橋で鉛直方向に振動しにくい構造であるためと考えられる。表-4に各部材の推定ヤング係数、図-12に経年による構造剛性と推定ヤング係数の低減、図-13に経年による固有振動数の低減を示す。

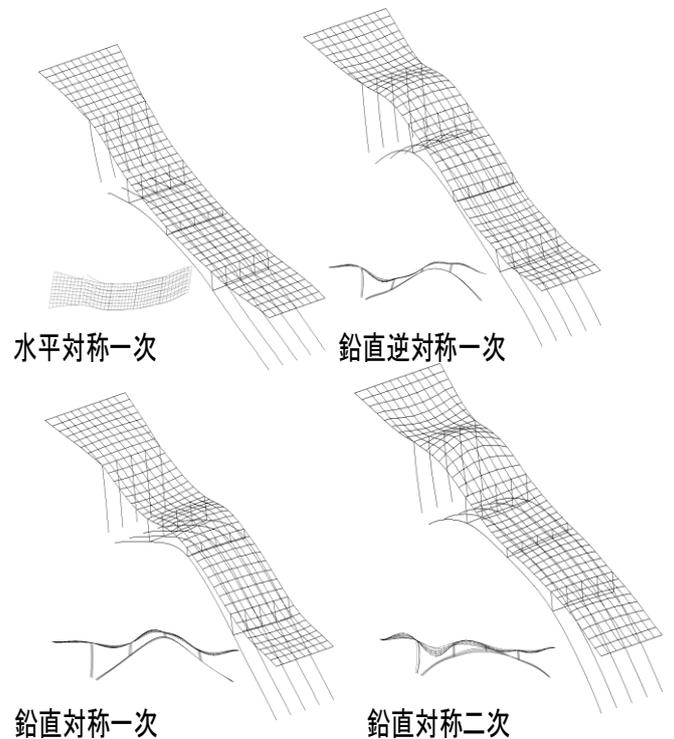


図-11 各振動モード図

表-4 各部材の推定ヤング係数

部材	ヤング係数 (GPa)					
	1987年 完成直後	2004年 17年経過	2012年 25年経過	2015年 28年経過	2017年 30年経過	2019年 32年経過
構造剛性の低減率	0%	23%	49%	49%	56%	57%
床版	10.29	7.93	5.25	5.25	4.53	4.41
縦桁	9.60	7.40	4.90	4.90	4.22	4.13
横桁						
アーチ						

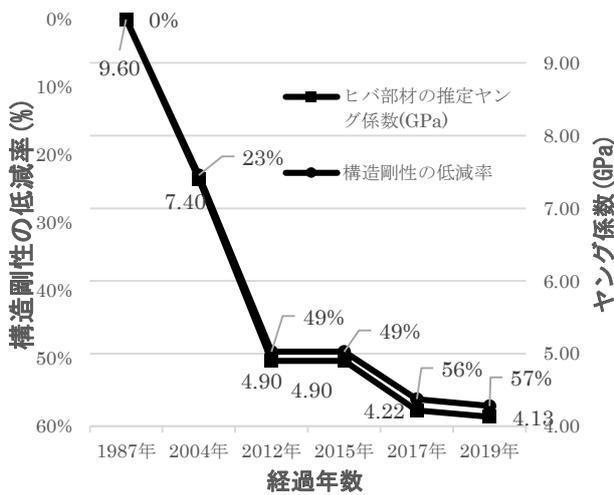


図-12 経年による構造剛性と推定ヤング係数の低減

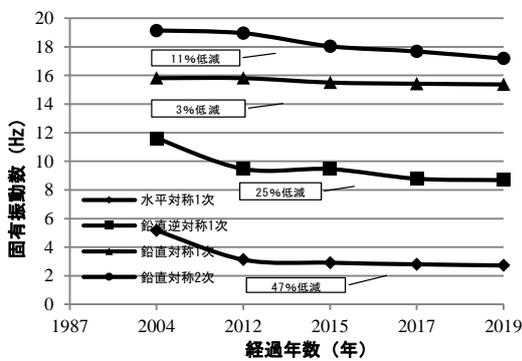


図-13 経年による固有振動数の低減率

表-5 減衰定数

振動モード	2004年	2012年	2015年	2017年	2019年
	(雨天)	(雨天)	(雨天)	(晴天)	(曇天)
水平対称一次	0.011	0.005	0.004	0.008	0.025
鉛直逆対称一次	0.024	0.009	0.007	0.004	0.012
鉛直対称一次	0.018	0.011	0.005	0.009	0.003
鉛直対称二次	0.011	0.01	0.004	0.002	0.002

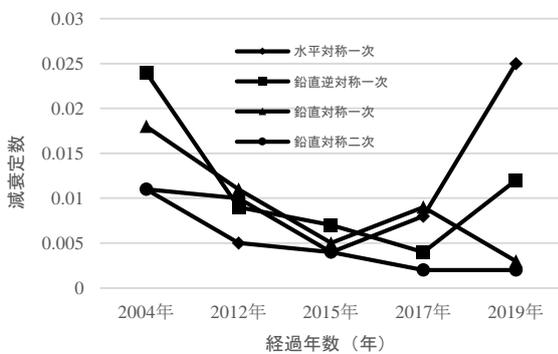


図-14 経年による減衰定数の低減

6. 減衰定数

減衰定数は動的調査で得た振動データ波形を基に求めた。減衰定数の算出は経年による構造剛性の低減に影響されるものと仮定して行った。経年に伴う減衰定数の変化の傾向がつかめれば、木橋の経年変化を確認する1つのパラメーターとして維持管理に用いることができる。本橋は過去4回の振動データにおいても減衰定数の算出を行っているため、これまでの結果を表-5に示す。また今回の結果も踏まえたグラフを図-14に示す。

表-5の減衰定数は含水率などの関係から天候が関係していることも考えられるため、天候も同時に示す。図-14に示したグラフから経年による変化傾向が読み取れる。全体的に減少傾向になっているが2019年は増加している。減衰定数が低下すれば橋の振動がおさまりにくなるため剛性が弱まっていることが関係していると考えられる。しかし現時点では減衰定数の変化傾向がつかめないため今後もデータの蓄積が必要である。

7. 動的調査による構造性能

2019年度の調査で本橋の動的調査は5度目の調査であった。本橋は架設から32年ほど経過している、劣化が進んでいることが考えられるので、橋全体の構造性能を把握するため、動的調査の測定値から5章で述べた逆解析を用いて構造剛性(ヤング係数)を算出した。構造剛性は現時点で57%低減しており、また近代木橋の耐用年数の推定式³⁾から算出した本橋の耐用年数は29年であり、本橋の構造性能は著しく低下していると評価される。

また石川県山中温泉郷内に架設されているこおろぎ橋は近代木橋ではないが、架設から25年経過した2017年の調査では構造剛性が62%低減したのが確認され、調査から4年後の2019年に架け替えが行われた。

動的調査から構造性能を評価すると低減率57%の本橋の構造性能が低下していることは明らかであるが、低減率62%で架け替えを行ったこおろぎ橋の事例と比べると、必ずしも緊急な掛け替えを要すとは言えない。

また構造剛性の低減傾向を把握していくためにも本橋は重要な橋であるため、今後10年をめぐりに定期的な動的調査および健全度調査を行い、構造剛性の低減率や設計時点での要求性能に対する耐力の余裕等を総合的に判断して、架け替え時期を検討していくことが妥当であると考えられる。

8. 健全度調査

(1) 健全度調査の判断区分

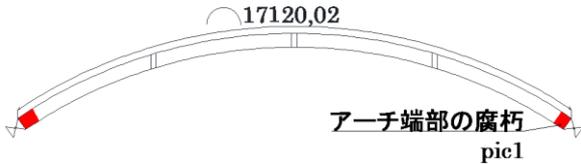
健全度調査は日本林道協会、木橋技術協会が作成した木橋定期点検要領(案)⁴⁾に則り目視検査を行った。今回は足場などの設置が不可能であったため、アーチリブ、横桁は望遠カメラを用いて遠方目視を実施した。

(2) 損傷写真, 損傷図

目視検査の結果、アーチ部材、縦桁及び枕梁、高欄部に損傷が確認された。各部材毎の損傷写真, 損傷図を図-15, 16, 17, 18に示す。



a. 損傷写真



b. 損傷図

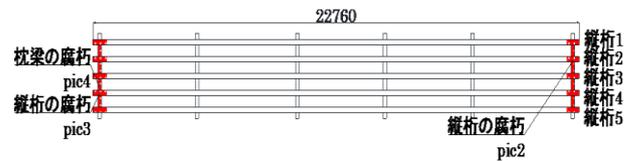
図-15 アーチ端部の損傷写真と損傷図



a. 縦桁の損傷写真



b. 枕梁の損傷写真



c. 損傷図

図-17 縦桁, 枕梁の損傷写真と損傷図



a. 損傷写真

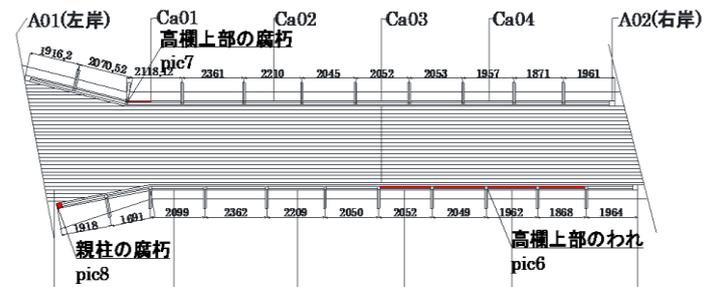


b. 損傷図

図-16 アーチリブの損傷写真と損傷図



a. 損傷写真



b. 損傷図

図-18 高欄部の損傷写真と損傷図

9. 健全度評価

健全度調査から木橋定期点検要領（案）を用いて健全度評価を行った。また部材毎に健全度評価を行い、部材毎の健全度評価で最も評価の低いものを橋全体の評価とした。表-6 に部材単位での健全度評価の結果を示す。表-7 に橋全体の健全度評価の結果を示す。

(1) アーチリブ、アーチ端部の健全度評価

図-15 に示した写真から見て取れるように、アーチ端部ではドライバーが刺さるほどまで木材内部の腐朽が進行していた。また図-16 に示した写真からアーチリブは支柱との接合部の腐朽が進行しており遠方目視であったが、表面がえぐれ内部が見えていた。そのため主構部材であるアーチ部の健全度評価は判定区分 III、対策区分 C2 の安全性の観点から速やかな補修が必要と判断されるものとした。また腐朽の原因は接合部に水が溜まっていることが挙げられる。特にアーチ端部に関しては支承部材との接合部の構造に問題があるものと考えられる。

(2) 縦桁、枕梁の健全度調査

図-17 に示した写真から見て取れるように、縦桁では枕梁との接合部が腐朽していた。また同様に枕梁でも接合部が腐朽していた。腐朽部にドライバーを指したところ木材内部がえぐれるほど腐朽が進行していた。そのため縦桁の健全度評価は判定区分 III、対策区分 C2 の安全性の観点から速やかな補修が必要とされるものとした。枕梁の健全度評価は判定区分 II、対策区分 M の日常の維持管理工事で早急な処置が必要とされるものとした。また腐朽の原因は接合方法が組み木工法であるためと考えている。組み木工法は建築に多く用いられている工法であり、接合部を凹凸に加工し金物継ぎ手を使わず接合する方法である。凹凸に加工するため、木口から水が浸透しやすく腐朽が進んでしまっていると考えられる。

(3) 高欄部の健全度調査

図-18 に示した写真から見て取れるように、親柱の根元にドライバーが収まるほどの穴が開いていた。また損傷図に示すように高欄上部（笠木部材）にもわれが生じていた。そのため高欄部の健全度評価は判定区分 I、対策区分 B とし、変状が確認され状況に応じて補修が必要とされるという判断にした。また腐朽の原因としては架設場所の環境によるものと考えている。本橋の周辺には木が多くあり日光が遮られていた。こけが多く繁殖していたことが証拠として挙げられるであろう。またわれについては経年による木材特有の劣化と考える。二度にわたって補修を行っている床版部分の腐朽は確認で

きなかった。

(4) 橋全体の健全度評価

健全度評価は部材毎の診断結果の中で最も評価の低いものとした。その結果、主構部材であるアーチ部、縦桁の判定区分 III を橋全体の評価にすることとした。判定内容としては橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に処置をするべき状態とした。経年に伴い雨水などが部材内部に浸透し腐朽したことが一番の原因である。しかし雨水の浸透は構造によって雨水が滞留したことや、木材加工により木口から浸透したことが要因になっているため、構造の改善を行えば十分に腐朽の進行を遅らせることができたであろう。

表-6 部材毎の健全度評価

部材 / 部位	使用材料	判定区分	損傷種類	点検方法	
上部構造	アーチ部	ヒバ集成材	III C2	腐朽	遠方目視
	縦桁	ヒバ集成材	III C2	腐朽	近接目視
	枕梁	ヒバ集成材	II M	腐朽	近接目視
その他	高欄部	アカマツ	I B	われ腐朽	近接目視
	横桁	ヒバ集成材	I A	-	遠方目視
	床版	アカマツ	I A	-	近接目視

表-7 橋全体の健全度評価結果

判定区分	判定内容
III	早期措置段階
橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態	
所見等	
経年による劣化、雨水の滞留によりアーチリブ、アーチ端部、縦桁の腐朽進行が著しく、早急な措置が必要である。	

10. あとがき

本研究では、架設から 32 年経過している大断面集成材を用いた上路式アーチ橋（かじか橋）に対して、動的調査と健全度調査から、構造性能と健全度の評価を実施した。動的調査では、固有振動数の低減、構造剛性の低減ともに確認された。健全度調査では主構部であるアーチ部が著しく腐朽していたことが確認された。しかしながら積年のデータから、減衰定数の経年による傾向を把握することはできなかった。また構造剛性についても経年が進むにつれて低減率が低下していることから今後ともデータの収集を行い低減傾向の把握が必要である。

本橋は近代木橋の中の上路式アーチ橋としては第1号橋であり、経年による各データの傾向を把握するためには重要な橋である。

本研究による本橋の評価としては早急に架け替えを行わなければならないほどの構造性能低下ではないと判断している。今後10年間をめどに定期的な調査を実施してデータ収集し、健全度評価を行うべきであろう。

謝辞：本研究に際し、かじか橋の調査を快く承諾いただいた石川県民の森およびかじか橋の管理者の方々や調査に協力していただいた当時の金沢工業大学本田研究室の篠原聖人氏、井上真吾氏、京田侑己氏、燕圭一郎氏に深く感謝の意を表す。

なお、第二著者の菅沼源二郎氏は投稿直前に故人とられた。ここに謹んで弔慰を表す。

参考文献

- 1) 森瀬彬, 吉田将一郎: 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, 平成29年度金沢工業大学環境土木工学科プロジェクトデザインⅢレポート(卒業論文), pp1-38, 2017.
- 2) 篠原聖人, 豊田淳, 加藤真吾, 本田秀行: 経年による木橋の構造剛性に基づく劣化度と残存年数の算定法, 木材利用研究発表会講演概要集 18, pp61-68, 2018.
- 3) 本田秀行・豊田淳・加藤真吾・篠原聖人: 木橋と近代木橋に対する耐用年数の推定式と要因分析, 木材利用研究発表会講演概要集 18, pp53-60, 2018
- 4) 日本林道協会, 木橋技術協会: 木橋定期点検要領(案), pp7-9, 2018

(Received October 16, 2020)

(Accepted January 31, 2021)

STRUCTURAL PERFORMANCE AND SOUNDNESS EVALUATION OF AGING TIMBER ARCH HIGHWAY BRIDGE

Daisuke OIKAWA, The Late Genjiro SUGANUMA,

Hideyuki HONDA and Humihiko GOTOU

About 30 years have passed since most of timber bridges in Japan were constructed. Although maintenance of such old timber bridges is important, methods to estimate degradation level of the bridges have not been established and the needed data for the estimation are few.

In this study, we showed a method to estimate degradation level for a typical old timber bridge "Kajika Bridge" constructed in 1987. Concretely, we estimated Yong's modulus of the bridge members, comparing between the measured frequencies for the bridge in several years and those adjusted by FEM modal analysis.

As a result, since it was found that the stiffness of the bridge decreased because of degradation during a long time to a certain extent, we propose regular soundness estimation in near future.