

経年による木橋の動的特性の 実態に基づく構造剛性

豊田 淳¹・本田 秀行²・篠原 聖人³・加藤 真吾¹

¹正会員 サンコーコンサルタント株式会社 技術第一部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9)
E-mail: a.toyoda@suncoh.co.jp

²フェロー 金沢工業大学教授 工学部環境土木工学科 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)
E-mail: honda@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³学生員 金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)
E-mail: b1403215@planet.kanazawa-it.ac.jp

木橋の健全度を把握する方法として、例えば目視、ピロディン、超音波伝播速度（時間）などによる測定が多く行われている。また、動的調査によって動的特性値の経年変化の実態を把握し、健全度を評価する方法も著者らによって行われている。本研究は健全度を評価する目的から、4 橋の近代木橋と 3 橋の木橋の合計 7 橋に対する動的調査の結果と過去に測定した動的特性値に基づき、経年による劣化等の実態把握を行った。さらに、橋梁全体の強度と定義する構造剛性の経年による低減率から健全度の評価を試みた。

Key Words: timber bridge, passing age, soundness, structural rigidity

1. まえがき

近年、コンクリート橋や鋼橋などと比較するとその架設実績は少ないが、日本各地で様々な形式の集成材木橋（以後、近代木橋と言う）および丸太や角材木橋が建設あるいは復元されてきた。しかしながら、わが国の近代木橋の架設が 30 年程で歴史が浅いことから、既存の近代木橋も含めた木橋に対する健全度調査が多く行われているが、維持管理および保全法を考えるための基礎資料が不足していることも事実である。このことから、木橋の経年による健全度の実態を評価して保全法の策定を行なうことは重要な課題になっている。

木橋の健全度を把握する方法として、例えば目視、ピ

ロディン、超音波伝播速度（時間）などによる測定が多く行われている。また、動的調査によって動的特性値の経年変化の実態を把握し、健全度を評価する方法も著者ら^{1,2)}によって検討されている。さらに、走行車両による動的応答解析に基づいて近代木橋の経年による健全度を評価する可能性も著者ら³⁾によって検討されている。

本研究は経年による健全度を評価する目的から、4 橋の近代木橋と 3 橋の木橋の合計 7 木橋に対する動的調査の結果と過去に測定した動的特性値に基づき、経年による劣化等の実態把握を行っている。さらに、木材の劣化などにより低下する橋梁全体の強度と定義する構造剛性の、経年による低減率から健全度の評価を試みている。

表-1 対象橋梁の概要

名称	橋種	施工年	主要材料	構造形式	橋長	支間長	幅員
かじか橋	木製道路橋	昭和 62 年	アテ集成材, アカマツ	上路式アーチ橋	22.76m	22.16m	2.80m
かりこぼうず大橋	木製道路橋	平成 15 年	スギ集成材	キングポスト トラス橋	50.00m	48.20m	7.00m
みどり橋	木製道路橋	平成 10 年	カラマツ集成材	π ラーメン橋	30.00m	29.50m	9.25m
こおろぎ橋	木製道路橋	平成 2 年	ヒノキ	方杖橋	20.80m	20.56m	4.00m
元気橋	木製歩道橋	平成 14 年	ベイマツ集成材	下路式アーチ橋	18.80m	18.20m	3.00m
あいあい橋	木製歩道橋	平成 8 年	スギ, ヒノキ	上路式トラス橋	91.2m	45.6m	2.5m ~ 5.1m
愛逢橋	木製歩道橋	平成 8 年	スギ, ヒノキ	上路式トラス橋	62.7m	45.6m	3.2m ~ 5.3m

2. 対象橋梁の概要

対象とした7つの木橋の概要を表-1に示す。

かじか橋は、石川県加賀市に架設された上路式の木製アーチ道路橋である。平成 29 年の調査時⁴⁾では、架設後 30 年程が経過している。一般図を図-1に示す。

かりこぼうず大橋は、宮崎県西米良村に架設された単純桁橋とキングポストトラス橋 3 連の合計 4 径間の木製道路橋であり、地元産材のスギ集成材を用いた世界的にも最大規模の木橋でもある。平成 29 年の調査時⁵⁾では、架設後 14 年程が経過している。一般図を図-2に示す。

みどり橋は、長野県木曾郡に架設された木橋であり、一等木造車道橋としては、世界的にも最大級のπラーメン形式の本格的な道路橋でもある。平成 29 年の調査時⁶⁾では、架設後 19 年程が経過している。一般図を図-3に示す。

こおろぎ橋は、石川県加賀市に架設された木製の方杖橋であり、橋全体がヒノキで建造された全国的にも珍しい橋梁である。平成 27 年の調査時⁷⁾では、架設後 25 年程が経過している。一般図を図-4に示す。

元気橋は、富山県射水市に架設された下路式の木製アーチ歩道橋である。周辺景観との調和や外材の活用による周辺施設からの展示効果、地域のシンボリック効果を意識してデザインされている。平成 28 年の調査時⁸⁾では、架設後 14 年程が経過している。一般図を図-5に示す。

愛逢橋およびあいあい橋は、共に鋼製ボールジョイント型の木製上路式トラス橋であり、それぞれ佐賀県神埼市と埼玉県日高市に架設されている。図-6に示す愛逢橋は、平成 25 年の調査時⁹⁾で 18 年程が経過している。図-7に示すあいあい橋は、平成 26 年の調査時¹⁰⁾で 17 年程が経過している。

3. 動的調査

各橋梁における動的特性の把握を目的とし、各種動的調査を行った。7 橋に対する基本的な動的調査の手法は、砂袋落下衝撃試験および常時微動測定試験である。かじか橋や元気橋などに対しては、水平振動の特性値が確実に検出できない場合を想定し、人力による水平方向の加振試験も加えて行った。振動の測定は、図-8に示すように基本的に 6 台のサーボ型速度計を使用し、アーチ部、トラス部、π ラーメン部、方杖部の支間長の 1/4、1/2、3/4 点で上流側と下流側にそれぞれ 1 台ずつ配置した。

(1) 砂袋落下衝撃試験

砂袋を用いて橋梁を鉛直やねじれ方向に加振し、その時の応答速度を測定する。常時微動測定試験では、ねじれ振動モードなど動的特性が雑音等によって精度良く検

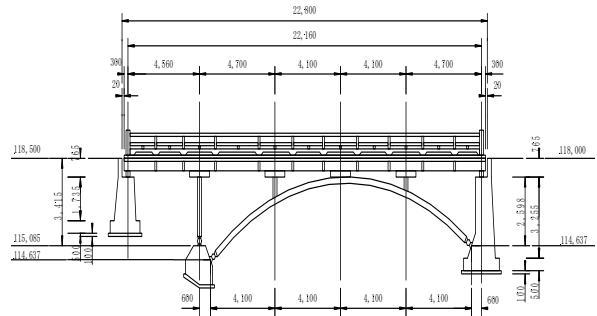


図-1 かじか橋の一般図

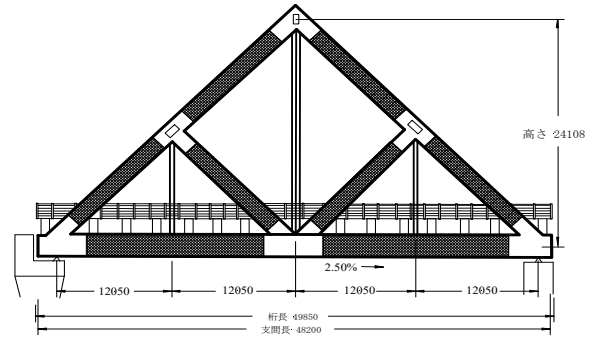


図-2 かりこぼうず大橋の一般図

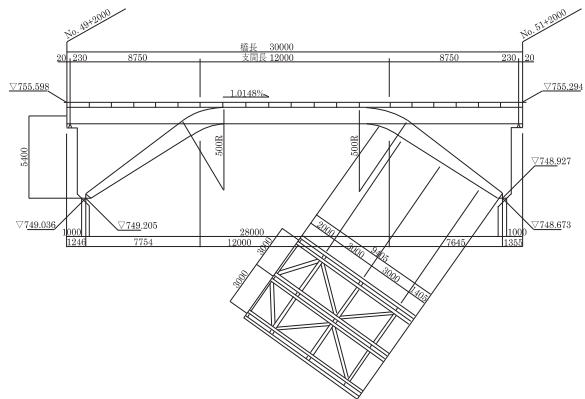


図-3 みどり橋の一般図

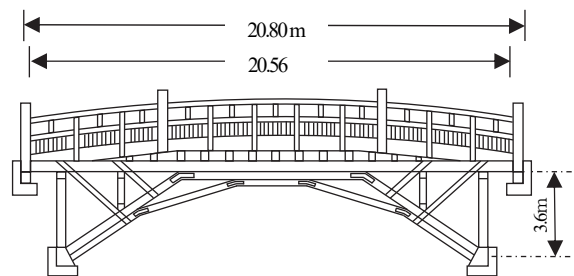


図-4 こおろぎ橋の一般図

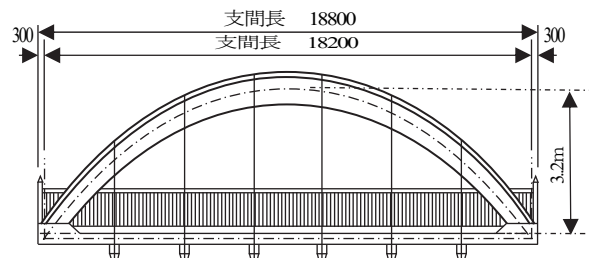


図-5 元気橋の一般図

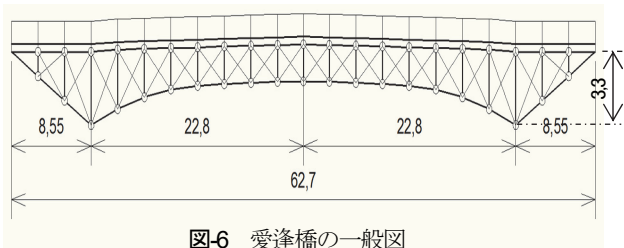


図-6 愛逢橋の一般図

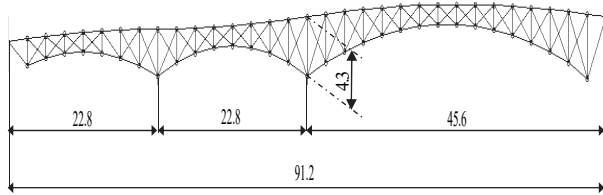


図-7 あいあい橋の一般図

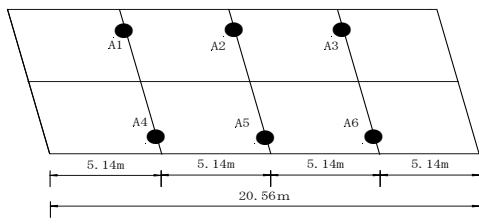


図-8 測定点の一例（こおろぎ橋）

出できない可能性があるため、本試験は動的特性の把握において重要である。

図-9 は、みどり橋に対する砂袋落下衝撃試験の応答速度波形の一例である。衝撃加振点は幅員中央の支間長の1/2点であり、また計測時間は30秒である。

(2) 常時微動測定試験

橋梁に外力荷重としての加振源がない状態で、自然の微振動に対する橋梁の応答速度を測定する。

図-10 は、みどり橋に対する常時微動測定試験の応答速度波形の一例である。計測位置は支間長の1/2点であり、また計測時間は50秒である。

(3) 水平加振試験

ロープなどを用いて橋梁を水平方向に加振し、その時の応答速度を測定する。

図-11 は、かじか橋に対する水平加振試験の応答速度波形の一例である。計測位置は支間長の1/2点であり、また計測時間は30秒である。

4. 動的特性

動的調査で測定された振動波形に対して、生波形の各種フィルター処理後、自己スペクトル解析、相互スペクトル解析などを行ない、動的特性として固有振動数、振動モードおよび減衰定数を求めた。また、過去に実施し

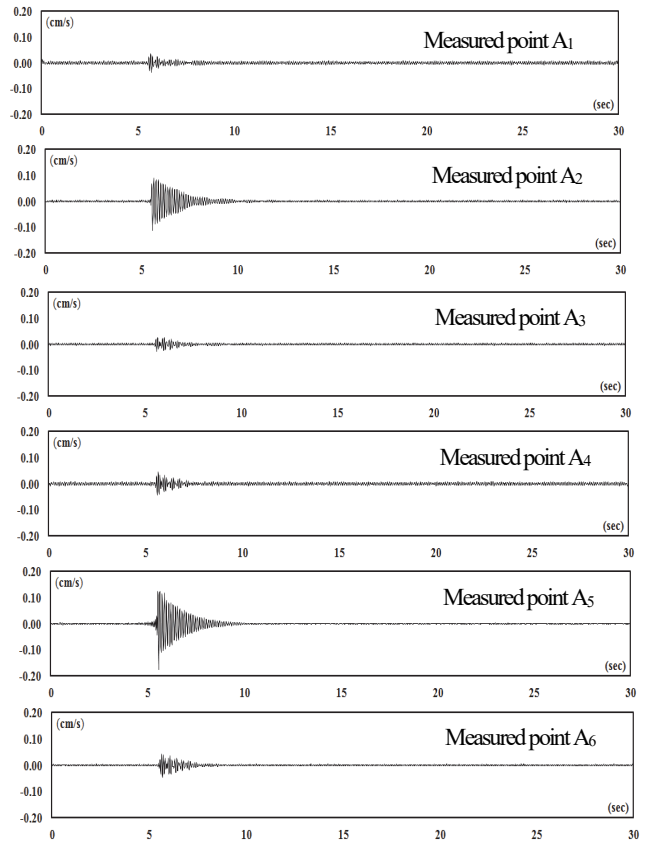


図-9 砂袋落下衝撃試験での応答速度例（みどり橋）

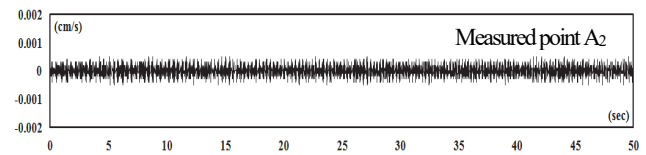


図-10 常時微動測定試験での応答速度例（みどり橋）

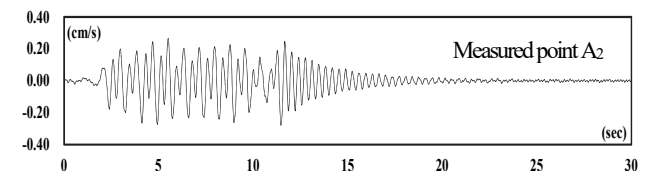


図-11 水平加振試験での応答速度例（かじか橋）

た動的調査による動的特性と比較し、動的特性値の経年変化の傾向を検討した。さらに、MSC/NASTRAN を用いた固有値解析も行っている。

(1) かじか橋の動的特性⁴⁾

かじか橋の調査結果から得られた代表的な動的特性値を表-2 に示す。表中の昭和 62 年は本橋の完成年で、平成 16 年は架設後 17 年が経過した時点、平成 24 年は架設後 25 が経過した時点、平成 29 年は架設後 30 年が経過した時点での動的調査の結果を示している。表-2 を図示した図-12 から、経年によって固有振動数が低減しており、特に平成 16 年以降の低次の振動数において、急激な低減が見られる。また表より、実験値と解析値の

表-2 経年によるかじか橋の固有振動数

振動次数	振動モード	実験値 (Hz)				解析値 (Hz)			
		昭和 62 年	平成 16 年	平成 24 年	平成 29 年	昭和 62 年	平成 16 年	平成 24 年	平成 29 年
1	水平対称 1 次	—	5.17	3.13	2.81	5.21	4.57	3.51	3.26
2	鉛直逆対称 1 次	—	11.62	9.47	8.79	13.27	11.65	9.48	8.80
3	鉛直対称 1 次	—	15.82	15.82	15.43	15.51	13.61	11.08	10.28
4	鉛直対称 2 次	—	19.14	18.95	17.68	22.83	20.04	16.31	15.14

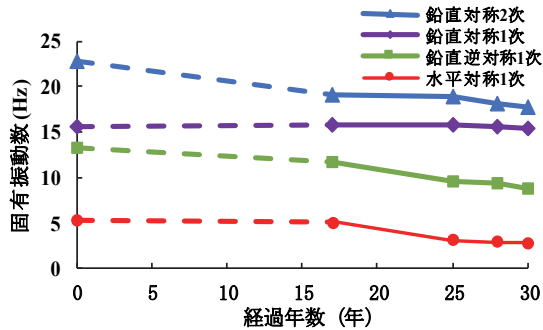


図-12 かじか橋の固有振動数の低減実態

両者は低次の振動次数では良く一致していることも認められる。図-13 に固有値解析による振動モードの例を示す。

(2) かりこぼうず大橋の動的特性⁵⁾

かりこぼうず大橋の動的特性値を表-3 に示す。また、図-14 にかりこぼうず大橋の経年による固有振動数の実態を示す。表中の平成 15 年は本橋の完成年であり、平成 29 年は架設後 14 年が経過した時点での動的調査の結果を示している。経年による固有振動数の低減が見られるが、その傾向は緩やかである。

(3) みどり橋の動的特性⁶⁾

みどり橋の動的特性値を表-4 に示す。表中の平成 10 年は本橋の完成年で、平成 20 年は架設後 10 年が経過した時点、平成 29 年は架設後 19 年が経過した時点での動的調査の結果を示している。また、平成 29 年に対する固有値解析による解析値も一例として示している。表より、経年によって固有振動数が低減していることが見出される。また、実験値と解析値の両者は良く一致していることも認められる。図-15 は、みどり橋の経年による固有振動数の低減の実態を図示したものである。

表-3 経年によるかりこぼうず大橋の固有振動数

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)	
		平成 15 年	平成 29 年
1	鉛直対称 1 次	2.48	2.24
2	ねじれ対称 1 次	3.05	2.98
3	鉛直逆対称 1 次	4.82	4.73
4	鉛直対称 2 次	7.17	7.03

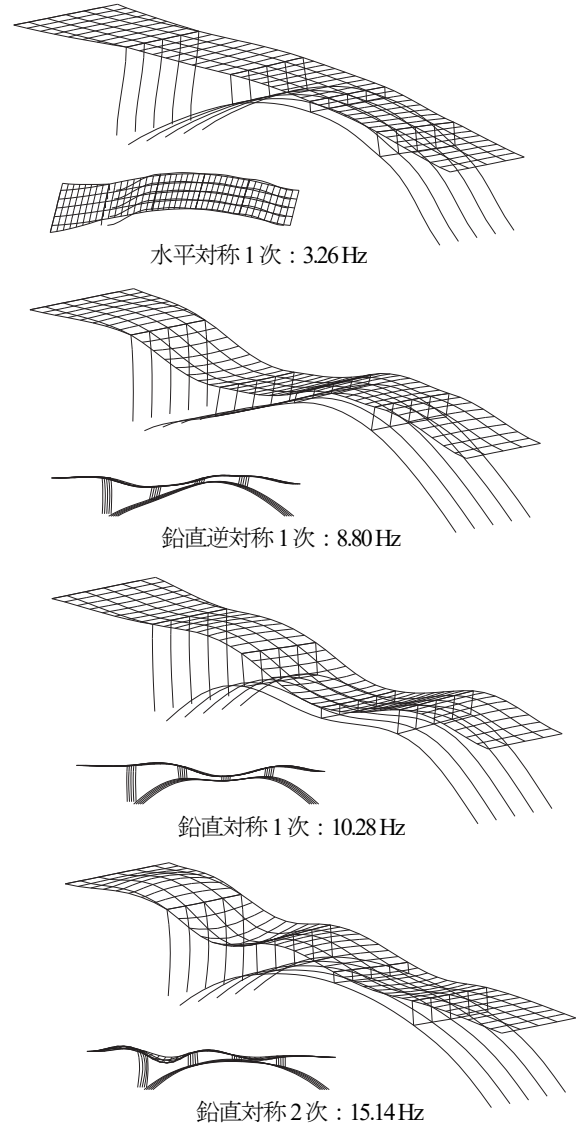


図-13 かじか橋の固有値解析による振動モードの例

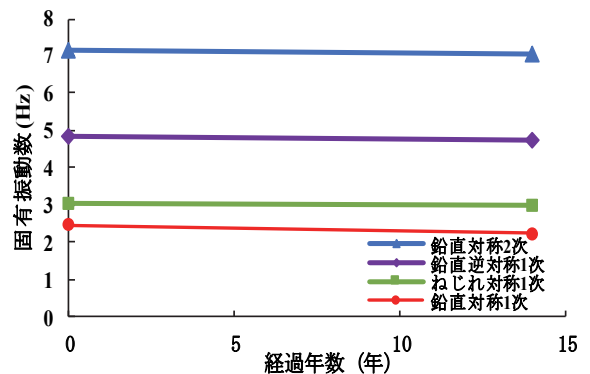


図-14 かりこぼうず大橋の固有振動数の低減実態

(4) こおろぎ橋の動的特性⁷⁾

こおろぎ橋の動的特性値を表-5 に示す。表中の平成 22 年は架設後 20 年が経過した時点、平成 27 年は架設後 25 年が経過した時点での動的調査の結果を示している。表より、実験値と解析値は、平成 22 年では水平対称 1 次振動モードおよび鉛直対称 1 次振動モード、平成 27 年では水平対称 1 次振動モードにおいて、良く一致していることが認められる。また、図-16 は、こおろぎ橋の経年による固有振動数の低減の実態を図示したものである。固有振動数は経年によって低減しており、特に平成 22 年から平成 27 年の 5 年間で急激な低減が認められる。

(5) 元気橋の動的特性⁸⁾

元気橋の動的特性値を表-6 に示す。表中の平成 24 年は架設後 10 年が経過した時点、平成 28 年は架設後 14 年が経過した時点での動的調査の結果を示している。表より、実験値と解析値の両者は良く一致していることが認められる。

(6) 愛逢橋の動的特性⁹⁾

愛逢橋の動的特性値を表-7 に示す。表中の実験値と解析値の両者は良く一致していることが認められる。18 年の経過で、愛逢橋の構造剛性は約 30%低下していることが推定⁹⁾されている。

(7) あいあい橋の動的特性¹⁰⁾

あいあい橋の動的特性値を表-8 に示す。表中の実験値と解析値の両者は良く一致していることが認められる。17 年の経過で、あいあい橋の構造剛性は約 30%低下していることが推定¹⁰⁾されている。

以上のように、対象とした 7 橋の 5 木橋に対して固有振動数と経年による固有振動数の低減実態を示した。7 木橋とも経年によって固有振動数が低減し、また振動モードの出現順位に変更がないことが認められる。

5. 構造剛性の低減率

前章において、固有振動数が経年に伴って低減する実態が見出された。そこで、経年によって木橋の構造剛性がどのように低減するかを検討した。実験値の固有振動数は、木橋の部分的な腐朽等による劣化の影響が総合的に反映されている。前節における固有振動数の実験値と解析値の両者は良く一致しているため、劣化の実態が固有値解析の中で再現されているものと考えられる。

そこで、経年による固有振動数の低減に関して、木材のヤング係数等の物性値を求める逆解析を実施した¹⁾。また、そこで得られた強度低下に関する尺度を、橋梁全

表-4 経年によるみどり橋の固有振動数

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		平成 20 年		平成 29 年	
		実験値	実験値	実験値	解析値
1	鉛直対称 1 次	7.23	6.90	6.45	6.46
2	鉛直逆対称 1 次	8.69	8.63	8.01	8.57
3	ねじれ対称 1 次	9.08	9.00	8.69	8.58
4	ねじれ逆対称 1 次	10.69	10.60	9.47	10.50

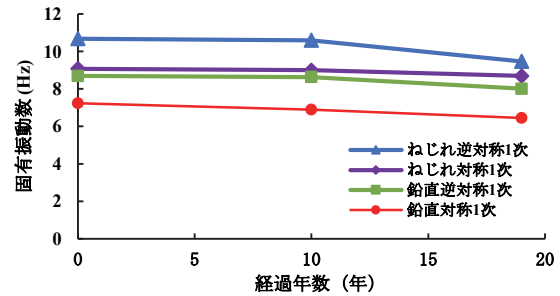


図-15 みどり橋の固有振動数の低減実態

表-5 経年によるこおろぎ橋の固有振動数

振動次数	振動モード	実験値 (Hz)		解析値 (Hz)		
		平成 22 年	平成 27 年	完成時	平成 22 年	平成 27 年
1	水平対称 1 次	13.31	10.08	17.63	13.31	10.08
2	鉛直対称 1 次	13.84	11.91	17.93	13.85	10.25
3	鉛直逆対称 1 次	16.19	14.25	19.19	14.75	10.97
4	ねじれ対称 1 次	19.08	17.18	24.04	18.79	13.75

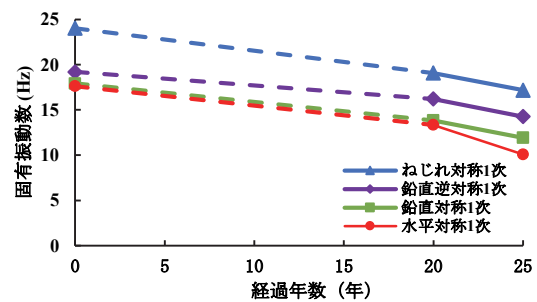


図-16 こおろぎ橋の固有振動数の低減実態

表-6 経年による元気橋の固有振動数

振動次数	振動モード	実験値 (Hz)		解析値 (Hz)	
		平成 24 年	平成 28 年	平成 24 年	平成 28 年
1	アーチ水平対称 1 次	2.68	2.63	2.66	2.67
2	床板水平対称 1 次	3.90	3.71	5.09	5.02
3	鉛直逆対称 1 次	6.93	6.93	6.95	6.92
4	ねじれ逆対称 1 次	7.71	7.03	7.22	7.12

体の構造剛性として定義した。

一例として、かじか橋の経年によるヤング係数の低減率を表-9 に示す。かじか橋は、床板にアカマツ材、縦

表-7 愛逢橋の固有振動数

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)	
		解析値	実験値
1	ねじれ対称1次振動	1.22	1.22
2	鉛直対称1次振動	1.97	1.93
3	水平対称1次・ねじれ2次連成	2.61	2.54
4	鉛直逆対称1次振動	3.11	4.10

表-8 あいあい橋の固有振動数

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)	
		解析値	実験値
1	ねじれ対称1次振動	1.25	1.22
2	鉛直対称1次振動	1.88	1.85
3	鉛直逆対称1次振動	3.11	2.97
4	水平対称1次振動	3.66	3.56

表-9 かじか橋の経年によるヤング係数の低減率

部材		ヤング係数 (kN/mm ²)				ヤング係数の低減率 (%)			
		昭和62年	平成16年	平成24年	平成29年	昭和62年	平成16年	平成24年	平成29年
		完成時	17年経過	25年経過	30年経過	完成時	17年経過	25年経過	30年経過
床板	アカマツ	10.30	7.95	5.30	4.51	0	23	49	56
縦桁	アテ	9.61	7.46	4.91	4.22	0	23	49	56
横桁									
アーチ									

桁や横桁、アーチ部材にアテ（ヒバ）集成材が使用されているため、完成時のヤング係数の値には、石川県産アカマツ材の標準的なヤング係数（10.30 kN/mm²）および石川県産アテ（ヒバ）材の標準的なヤング係数（9.61 kN/mm²）を用いている。平成16年、平成24年、平成29年における各部材のヤング係数は、各年度の固有振動数の実験値に基づき逆解析を行い算出した値である。またヤング係数の低減率は、完成時のヤング係数を基準としたときのヤング係数の低減割合であり、縦桁の場合は30年の経過で56%低減している。また、構造剛性の低減率は約56%である。なお、本解析ではヤング係数の減少率と同程度に各部材の断面積と断面2次モーメントなどの断面諸量を減少させている¹⁾

他の対象橋梁に対しても同様の手法¹⁾で逆解析を行い結果を得た。図-17にその結果を示す。完成時を0%とし、経年による低減率を%で表している。かりこぼうず大橋は14年の経過で約20%、みどり橋は19年の経過で約10%、元気橋は14年の経過で約18%の低減である。3橋とも雨水等に対する耐久設計が工夫されていることに起因されていると考えられる。一方、かじか橋は架設後17年が経過した後、構造剛性が急激に低減しており、30年の経過で約56%になっている。こおろぎ橋においても20年経過後に急激な低減が見られ、25年の経過で約67%まで低減していることが認められる。このような状況の木橋に対しては早急な保全対策を講ずる必要があると思われる。

7 木橋分のデータを基にした低減率に関して、現状においては近似曲線の推定まで至っていない。しかし、架設後の10年間は構造剛性の低減が緩やかであるのに対して、10年以降、特に20年以降では急激に低減する傾

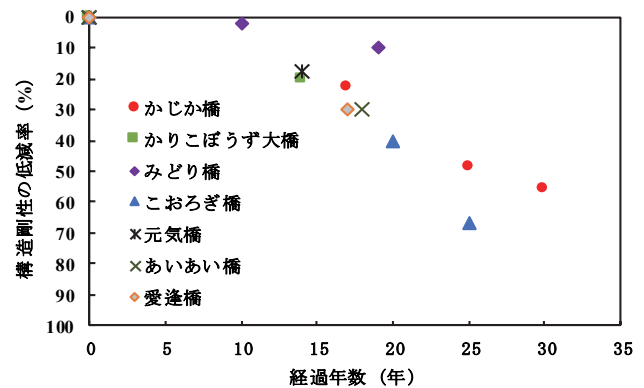


図-17 木橋に対する構造剛性の低減率

向が認められる。構造剛性の低減率に関する推定式は、経年による木橋の実質的な劣化式になり得ると考えられることから、より多くのデータを収集して精度を向上させていく必要がある。

6. あとがき

本研究では、7橋の木橋に対して、動的調査および動的的特性値に基づく経年劣化等の実態把握を行った。各橋梁の動的調査による固有振動数の実験値を基に、経年に伴う橋全体のヤング係数を逆解析より推定し、構造剛性の低減率を算出した。昭和28年に架設され48年後の平成13年に架け替えが行われた錦帯橋は、架け替え前の時点で構造剛性が約60%まで低減¹¹⁾している。このことを考慮すると、平成29年時点で約56%低減しているかじか橋や平成27年時点で67%まで低減しているこおろぎ橋に関しては、早急に何らかの保全対策を講ずる必要があると思われる。

7 木橋分のデータを基にした低減率に関して、架設後 10 年間は構造剛性の低減が緩やかであるのに対して、10 年以降、特に 20 年以降では急激に低減する傾向が認められた。データ数が少ない状況ではあるが、この傾向は木材を使用した構造物としては妥当な傾向と推察される。今後、木橋の保全法を確立するため、あるいは木橋特有の設計法である修復限界状態設計法の論議を始めるためにより多くのデータを収集し、精度の高い構造剛性の低減率とその推定式を構築していく所存である。

謝辞：本研究に際し、各橋梁の調査およびデータ分析、解析に携わった森瀬彬氏、吉田将一郎氏、岩谷旭氏、萱野崇氏、宮野友輔氏、柴田祐氏、清水将吾氏、大井智道氏、坂井雄平氏、酒井智哉氏、森建氏に感謝の意を表します。

また、本研究の一部は科研費 17K06543 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 本田秀行・糠山尚希・興津光：20 年経過した木製方杖車道橋の健全性と木材の強度低下，木材利用研究論文報告集 10，pp.108-115，2011.
- 2) 本田秀行：25 年経過した上路式アーチ木製車道橋の健全度と構造性能，木材利用研究論文報告集 12，pp.51-57，2013.
- 3) 豊田淳・本田秀行：動的応答解析に基づく近代木橋の経年による健全度の評価法，木材利用研究論文報告集 16，pp.1-8，2017.
- 4) 森瀬彬・吉田将一郎：経年による木製アーチ橋（かじか橋）の構造性能と健全度評価，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），pp.1-38，2017.
- 5) 岩谷旭・萱野崇・宮野友輔：経年による木製トラス道路橋（かりこぼうず大橋）の構造性能と健全度評価，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），pp.1-39，2017.
- 6) 篠原聖人・柴田祐・清水将吾：経年による木製ラーメン道路橋（みどり橋）の構造性能と健全度評価，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），pp.1-33，2017.
- 7) 大井智道・坂井雄平：経年による山中温泉こおろぎ橋の構造特性と健全度評価，平成 27 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），pp.1-24，2015.
- 8) 酒井智哉・森建：経年による木製アーチ歩道橋（元気橋）の構造性能と健全度評価，平成 28 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），pp.1-37，2016.
- 9) 本田秀行：17 年経過したボールジョイント型木製トラス歩道橋の健全度評価，木材利用研究論文報告集 14，pp.51-56，2015.
- 10) 本田秀行：18 年経過したボールジョイント型木製トラス歩道橋の健全度評価，木材利用研究論文報告集 15，pp.34-39，2016.
- 11) Hideyuki Honda: Strength Decrease of Wood Materials in Kintaikyo Bridge used 48 Years, The report of the 18th Congress of IABSE, CD-R, 2012.

(2018.8.31 受付)

STRUCTURAL RIGIDITY BASED ON DYNAMIC PERFORMANCE OF TIMBER BRIDGE BY PASSING AGE

Atsushi TOYODA, Hideyuki HONDA, Masato SHINOHARA and Shingo KATO

As the method to investigate soundness of timber bridges, many measurements by the ultrasonic velocity etc. are done. Moreover, the evaluation method of soundness from the realities into which the dynamic characteristic values by the passing age is being done by authors. From the purpose to evaluate soundness by dynamic test of seven timber bridges, this study is investigated the realities of degradation based on the change of the dynamic characteristic values by passing age, and then the results on natural frequency obtained by past dynamic test are integrated and the properties by passing age are examined. In addition, the soundness is also investigated from the decrease rate by passing age of the structural rigidity defined as strength of the whole bridge.