

木橋の構造剛性に基づく劣化度の判定

○金沢工業大学大学院 学生員 篠原聖人 サンコーコンサルタント 正会員 豊田 淳
サンコーコンサルタント 正会員 加藤真吾 金沢工業大学 フェロー 本田秀行

1. まえがき 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なわれている。また、動的調査によって振動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なわれている。本研究は木橋の健全度を評価する目的から、9 橋の木橋に対する動的調査の結果と過去に測定した振動特性値に基づき、経年による腐朽等の実態把握を行なった。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劣化度の判定も試みたので、以下に報告する。

2. 対象橋梁 対象とした 9 橋の木橋における設計概要を表-1 に示す。この内、こおろぎ橋、あいあい橋、愛逢橋以外の 6 橋は、主部材に集成材を用いた近代木橋である。

表-1 対象橋梁の設計概要

名称	橋種	施工年度	主要材料	構造形式	橋長	支間長
かじか橋	木製道路橋	昭和 62 年	アデ集成材、アカマツ	上路式アーチ橋	22.76 m	22.16 m
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	50.00 m	48.20 m
みどり橋	木製道路橋	平成 10 年	カラマツ集成材	ペラーメン橋	30.00 m	29.50 m
こおろぎ橋	木製道路橋	平成 2 年	ヒノキ	方杖橋	20.80 m	20.56 m
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	18.80 m	18.20 m
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	91.20 m	45.60 m
愛逢橋	木製歩道橋	平成 8 年	スギ、ヒノキ	上路式トラス橋	62.70 m	45.60 m
おおさる橋	木製道路橋	平成 12 年	スギ集成材	中路式アーチ橋	28.00 m	25.60 m
金峰 2000 年橋	木製道路橋	平成 12 年	スギ集成材、ヒノキ集成材	上路式アーチ橋	42.00 m	41.00 m

3. 動的調査と動的特性 9 橋に対する基本的な動的調査は、常時微動測定試験、砂袋落衝撃試験である。かじか橋とみどり橋は、水平方向の常時微動測定試験において水平振動の特性値が確実に検出できない場合もあることから、人力による水平方向の加振試験も行った。

動的調査で得られた振動データを基に、動的特性として固有振動数と振動モードを求めた。また固有値解析より、各振動モードにおける固有振動数の解析値も求めた。分析および解析による結果の一例として表-2 にみどり橋の動的特性値を示す。この表から、固有振動数の実験値と解析値は良く一致していることが認められる。他の木橋においても同様に実験値と解析値の一致が認められた。

また、過去に行った動的調査での動的特性と比較し、動的特性値の経年変化の傾向を検討した。表-3 は各橋梁の動的特性値の経年変化を表している。表中の固有振動数の低減率は、各橋梁の直近の固有振動数と架設当時の固有振動数を比較し、経年によってどの程度固有振動数が減少したかをパーセントで表している。この表より、経年によって固有振動数が減少していることが見受けられる。

4. 構造剛性 前節より、固有値解析による固有振動数の解析値と動的調査より導いた固有振動数の実験値が良く一致していることが認められた。このため、固有値解析に用いた各解析モデルにおいて、各々の木橋の状態が十分に再現されているものと考えられる。また、経年に伴って固有振動数の実験値が減少する結果も見出された。固有振動数の低減は木橋の部分的な腐朽の影響が総合的に反映したものと考えられるため、固有値解析を用いて固有振動数の低減を再現することで、劣化の状態を解析パラメータより把握することを試みた。

固有値解析において、固有振動数の低減に影響を与える解析パラメータには、部材の断面諸量や質量、ヤング係数等の物性値など様々な要因がある。本研究では、経年による部材の断面諸量や質量の変化は無いものと見做し、各部材のヤング係数等の物性値が一律に変化していると仮定して逆解析を実施し、固有振動数の低減を再現した。この逆解析で得られるヤング係数等の物性値をここでは構造剛性と定義する。また構造剛性は、構造全体の鉛直曲げ剛性と等価であると考えられる。

表-2 みどり橋の動的特性値

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		平成 10 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

表-3 動的特性値の経年変化の傾向

対象橋梁	固有振動数の低減率 (%)			
	振動次数:1	振動次数:2	振動次数:3	平均
かじか橋	46.1	33.8	0.5	26.8
かりこぼうず大橋	9.7	2.3	1.9	4.6
みどり橋	10.8	7.8	4.3	7.6
こおろぎ橋	24.3	13.9	12.0	16.7
元気橋	1.9	4.9	0.0	2.2
あいあい橋	2.6	1.6	4.5	2.9
愛逢橋	3.2	4.9	6.3	4.8
おおさる橋	-1.5	9.8	15.3	7.8
金峰 2002 年橋	7.3	4.3	1.8	4.4

キーワード 木橋、経年、健全度、定量的評価、回帰分析

連絡先 〒921-8501 石川県野々市市扇ヶ丘 7-1 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻

図-1 は、対象橋梁の経年による構造剛性の減少を低減率 S として表したものである。低減率は架設当時の構造剛性と各調査年における構造剛性の比から算出しており、0に近いほど劣化が少なく、1に近いほど劣化が進行していることを示す。図より、各橋梁の構造剛性は経年によって加速度的に低減していることが認められる。また図中の曲線は2次の多項式近似曲線であり、構造剛性の加速度的な変化を表すには最適な曲線であると考え適用した。この回帰曲線の決定係数は約 0.87 であり、元のデータとの適合度合いも十分高いと判断される。

しかしながら、金峰 2000 年橋やこおろぎ橋などの回帰曲線から乖離している木橋も存在する。前者の場合、構造形式が上路式である点や床板上にアスファルトを舗装している点、主部材に対して防腐処理や塗装が施されている点など、雨水等による主部材の腐朽を抑制するための対策が十分になされているため、他の木橋よりも劣化の進行が緩やかであると考えられる。また後者の場合は、前者のような腐朽への対策は十分ではなく、主部材も断面の小さな角材を複雑に組み合わせた構造になっているため、雨水等の影響を受けやすく、主部材の劣化が進行しやすい構造になっている。このため、より適合した回帰曲線を得るためには、個々の木橋の構造形式や腐朽への対策を考慮する必要があると考える。

5. 回帰分析 経年に伴った構造剛性の低減に適合した回帰曲線を構築するため、土木学会が提示する耐用年数の予測法に用いられる指標値 Y の値に着目した。指標値 Y は、使用材料や周辺環境、構造形式など木橋の腐朽に影響を与える各種の因子を点数化し纏めたものであり、前節で示した問題点の解決に役立つと考えた。

指標値 Y は、腐朽に対する抵抗力が高いほど値が大きくなるため、構造剛性の低減率 S は指標値 Y に反比例すると考えられる。これを考慮して2変数の重回帰分析を行った結果を表-5に示す。また重回帰分析に用いた目的変数と説明変数を表-4に示す。表-5より、指標値 Y を含んだ回帰式の方が決定係数 R^2 が高く、前節の回帰曲線よりもより適合性が高いことが見出された。また、図-2は動的調査による実験値と回帰式による予測値を比較したグラフであり、指標値 Y を取り入れたことにより、実験値と予測値の誤差が改善されていることが確認できる。

6. 回帰式の活用 過去に撤去や通行止めとなった木橋の共用年数と指標値から、共用終了時点における構造剛性の低減率を算出した結果を表-6に示す。表より、構造剛性の低減率は平均で約 0.45 であり、信頼区間 (95%) は約 0.4 から 0.5 である。これは、構造剛性が 4 割から 5 割低減した時点で木橋が撤去もしくは通行止めとなっていることを表している。このため、構造全体の鉛直等価曲げ剛性が 5 割以上低減している木橋に対しては、何らかの対策を講じる必要があると考える。

7. 参考文献 1) JSCE 木材利用ライブラリー002：木橋の耐用年数，土木学会木材工学特別委員会・木橋研究小委員会，2011 年。

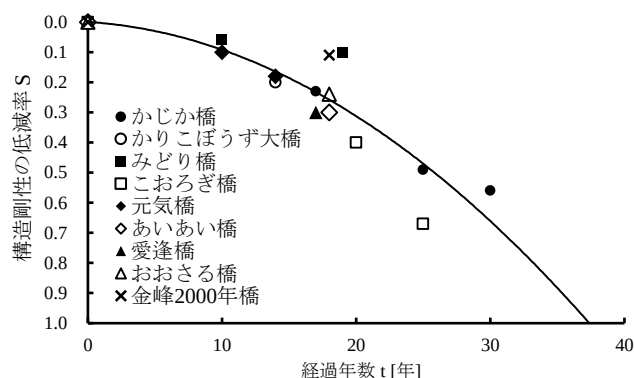


図-1 構造剛性の低減率

表-4 目的変数と説明変数

名称	目的変数	説明変数	
	低減率 S	経過年数 t (年)	指標値 Y
かじか橋	0.23	17	1.81
	0.49	25	2.11
	0.56	30	2.11
かりこぼうず大橋	0.20	14	2.18
みどり橋	0.06	10	4.00
	0.10	19	4.00
こおろぎ橋	0.40	20	1.57
	0.67	25	1.57
元気橋	0.10	10	2.06
	0.18	14	2.06
あいあい橋	0.30	18	1.54
愛逢橋	0.30	17	1.54
おおさる橋	0.24	18	3.09
金峰 2000 年橋	0.11	18	3.93

表-5 回帰分析結果

	指標値 Y なし	指標値 Y あり
回帰式	$S = \beta_1 t + \beta_2 t^2$	$S = (\beta_1 t + \beta_2 t^2) / Y$
係数 β_1	0.00281	0.00899
係数 β_2	0.00064	0.00115
R^2	0.921	0.985
R^{*2}	0.870	0.934
有意 F	5.94×10^{-12}	2.92×10^{-19}

R^2 : 決定係数、 R^{*2} : 自由度補正決定係数

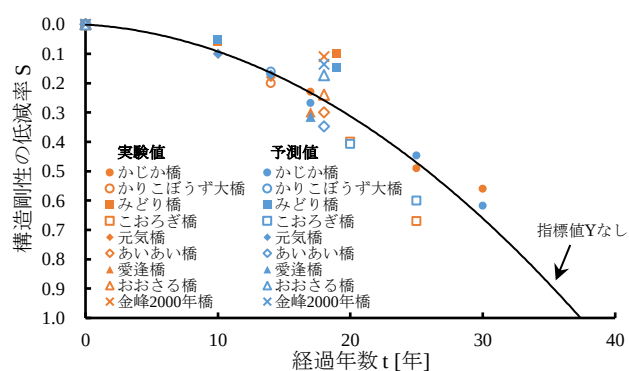


図-2 実験値と予測値の比較

表-6 共用終了時点における構造剛性の低減率

	共用年数 T (年)	指標値 Y	構造剛性の低減率 S
A 橋	17	1.10	0.44
B 橋	17	1.20	0.40
K 橋	22	1.40	0.54
Q 橋	24	1.80	0.49
R 橋	15	1.00	0.39
T 橋	20	1.50	0.43
Y 橋	13	0.70	0.44
平均	—	—	0.45
信頼区間	—	—	$0.40 \leq \mu \leq 0.49$