

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

篠原 聖人¹・加藤 真吾²・豊田 淳³・本田 秀行⁴

¹ 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

² 正会員 株式会社日本インシーク 東日本橋梁部 (〒103-0006 東京都中央区日本橋富沢町 9-19)

E-mail: katou408@insiek.co.jp

³ 正会員 株式会社新日本コンサルタント 社会基盤部 (〒930-0142 富山県富山市奥田新町 51-1)

E-mail: a.toyoda@suncoh.co.jp

⁴ 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

わが国での木橋の建設は 1990 年代と比較し減少傾向にあるが、既存の木橋に対する維持管理や保全への対策は依然として重要な課題である。特に木橋の健全度に対する評価法を構築することは、社会的に急務な課題である。木橋の健全度を把握する方法として、近接目視や打音検査、超音波伝搬速度（時間）の測定などが多く行われており、木橋に対する動的調査の分析結果を用いた経年劣化の評価方法も著者らによって検討されている。本研究は、9 橋の木橋に対する積年の動的調査結果を活用し、木橋の経年による橋梁全体の鉛直等価曲げ剛性（以後、構造剛性と言う）の低減を定量的に把握した。そして、経年による構造剛性の低減率を基にした劣化度から健全度を定量的に把握する方法論を提示した。さらに、木橋の新たな耐用年数の推定式と構造剛性を統合し、経過年の時点で残存年数を算出する方法論も提示した。

Key Words: timber bridge, structural rigidity, durable years, deterioration degree, remaining years

1. まえがき

わが国における木橋の建設は、1990年代と比べ減少傾向にあり、木橋を新設する事例は少なくなっている。対して既存の木橋は、建設より 30 年近く経過しているものも少なくなく、劣化の進行が予想される。このため、既存の木橋に対して維持管理や保全の方策は重要な課題になっている。

しかしながら、木橋に対する維持管理や保全の基礎資料は不足しており、特に集成材を用いた木橋（以後、近代木橋と言う）は、建設から約 30 年と歴史が浅く、基礎資料に充てるためのデータが十分に確保できていないのが現状である。そのため、木橋の経年劣化を把握し、健全度を評価するための手法を確立していく必要がある。

木橋の健全度を把握するための方法として、近接目視や打音検査、超音波伝搬速度（時間）の測定などが多く行われているが、木橋に対する動的調査の分析結果を用いた経年劣化の評価方法も著者ら¹⁾²⁾によって検討されている。また、車両走行による動的応答解析から近代

木橋の健全度を評価する方法³⁾の検討もなされている。

本研究は、経年による木橋の劣化の影響を把握し、健全度を評価する目的から、6 橋の近代木橋と 3 橋の角材木橋の合計 9 橋に対する積年の動的調査結果を活用し、木橋の経年による橋梁全体の鉛直等価曲げ剛性（以後、構造剛性と言う）の低減を定量的に把握すると共に、経年による構造剛性の低減率を基にした劣化度から健全度を定量的に把握する方法論を提示している。さらに、新たな木橋の耐用年数の推定法と構造剛性を統合し、経過年数の時点で残存年数を算出する方法論も提示している。

2. 対象橋梁の概要

本研究では、表-1 に示す 6 つの近代木橋と 3 つの木橋を対象としている。A 橋から F 橋は近代木橋であり、G 橋から I 橋が集成材を使用していない木橋である。

A 橋は、石川県加賀市にある上路式木製アーチ道路橋であり、昭和 62 年に建設されてから 3 度に亘って動的調査が行われている。床板の取り換えなどの補修が行わ

表-1 対象橋梁の設計概要

対象橋梁	橋種	施工年度	主要材料	構造形式	橋長	支間長	幅員
近代木橋	A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
	B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
	C橋	平成10年	カラマツ集成材	π ラーメン橋	30.00m	29.50m	9.25m
	D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
	E橋	平成12年	スギ集成材	中路式アーチ橋	28.00m	25.60m	5.5m
	F橋	平成12年	スギ集成材, ヒノキ集成材	上路式アーチ橋	42.00m	41.00m	10.10m
木橋	G橋	平成02年	ヒノキ	方杖橋	20.80m	20.56m	4.00m
	H橋	平成08年	スギ, ヒノキ	上路式トラス橋	91.20m	45.60m	25~5.1m
	I橋	平成08年	スギ, ヒノキ	上路式トラス橋	62.70m	45.60m	32~5.3m

れ、平成29年の調査時⁴⁾において30年程供用されている本研究の対象橋梁の中でも最も古い近代木橋である。A橋の一般図を図-1に示す。

B橋は、宮崎県西米良村にあるキングポストトラス形式の木製道路橋であり、キングポストトラス橋3連と単純桁橋の合計4径間からなる。また本橋は地元産材によるスギ集成材を用いた世界的にも最大級の木橋でもある。動的調査は、3連ある内の最も大きいキングポストトラス橋に対して2度に亘って実施されており、1度目は完成直後の平成15年時である。また2度目の動的調査⁵⁾は、建設後14年が経過した平成29年に行われている。

B橋の一般図を図-2に示す。

C橋は、長野県木曾郡にある π ラーメン形式の一等木造道路橋である。 π ラーメン形式としては世界的にも最

大級である。平成10年に建設されて以降、3度の動的調査が行われており、平成29年に行われた3度目の動的調査⁶⁾の時点では建設より19年が経過している。図-3にC橋の一般図を示す。

D橋は、富山県射水市にある下路式の木製アーチ歩道橋である。本橋は地域のシンボリック効果を意識したデザインがなされている。平成14年に建設され、10年後の平成24年に2度目、14年後の平成28年に3度目の動的調査⁷⁾が行われている。D橋の一般図を図-4に示す。

E橋は、群馬県前橋市にある中路式の木製アーチ道路橋である。本橋は林道に建設されている木橋の内、中路式2ヒンジアーチ橋としては日本最大級である。平成12年の架設時に1度目、18年後の平成30年に2度目の動的調査⁸⁾が行われている。E橋の一般図を図-5に示す。

F橋は、鹿児島県南さつま市にある上路式の木製アーチ道路橋である。雨水への対策が施されており、また定

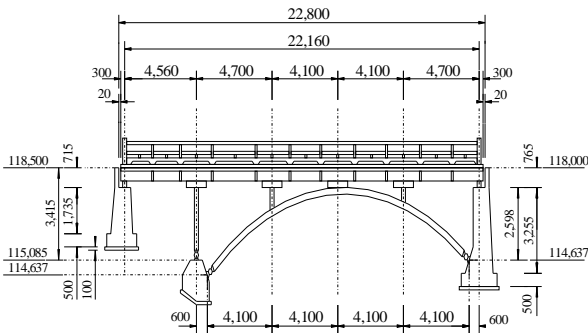


図-1 A橋の一般図

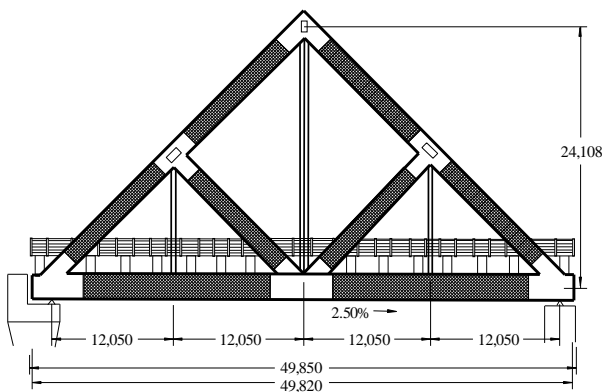


図-2 B橋の一般図

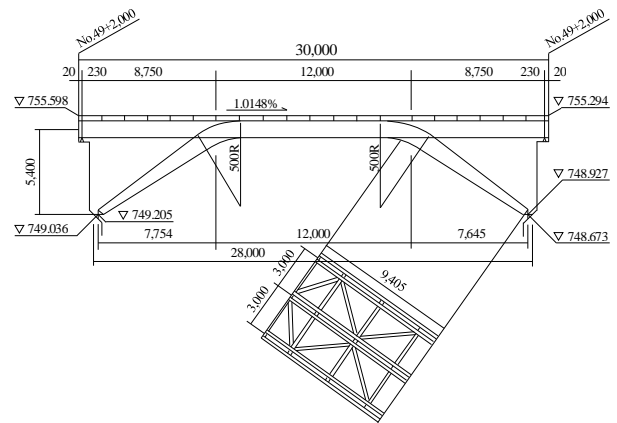


図-3 C橋の一般図

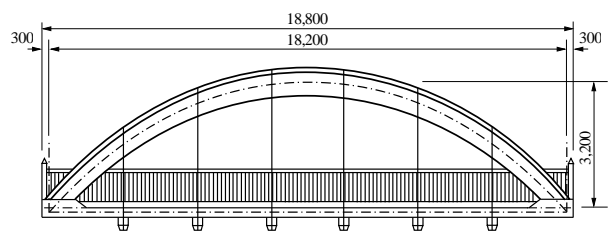


図-4 D橋の一般図

期的な点検もなされている。E橋と同年の平成12年に建設され、その直後に1度目の動的調査が行われた。2度目の動的調査⁹⁾は18年後の平成30年に行われている。F橋の一般図を図-6に示す。

G橋は、石川県加賀市にある方杖形式の木製道路橋であり、ヒノキ角材を複雑に組み合わせた構造になっている。本橋は平成2年に建設されて以降、2度に亘って動的調査が実施されている。2度目の動的調査¹⁰⁾は25年経過後の平成27年であり、令和元年10月に架け替えが行われた。G橋の一般図を図-7に示す。

H橋は、埼玉県日高市にある鋼製ボールジョイント型の上路式木製トラス歩道橋である。平成8年に建設され、18年後の平成26年に動的調査¹¹⁾が行われている。H橋の一般図を図-8に示す。

I橋は、佐賀県神崎市にあり、H橋と同様に鋼製ボールジョイント型の上路式木製トラス歩道橋である。平成8年に建設され、17年後の平成25年に動的調査¹²⁾が行われている。I橋の一般図を図-9に示す。

3. 動的調査と動的特性

(1) 動的調査

対象橋梁の動的特性を把握する目的から、各橋梁に対して動的調査が実施された。9橋に対する基本的な動的調査の手法は、砂袋落下衝撃試験と常時微動測定試験である。前者は鉛直方向やねじれ方向の動的特性の把握に用いられ、後者は主に水平方向の動的特性を把握する目的で行われている。ただし、後者による動的特性の把握はノイズ処理等で困難な場合があることから、そのリスクを回避するために、一部の対象橋梁では水平方向の動的特性を把握するために水平加振試験も実施した。

(2) 動的特性

動的調査より、図-10に示すような振動波形が得られる。図中の振動波形は、C橋に対して砂袋落下衝撃試験と常時微動測定試験を行った際の支間中央点で測定した振動波形例である。この振動波形に対して、バンドパスフィルターなどのフィルター処理を実施後、高速フーリエ変換法などを用いてフーリエ変換し、卓越した振動数の特定を行った。また、振動波形同士の位相差から振動の形態を同定し、動的特性値である固有振動数と振動モードを求めた。一例としてC橋の動的特性値を表-2に示す。また、MSC/NASTRANによる固有値解析の結果も同時に示す。

表-2より、動的調査から得られた固有振動数の実験値は、MSC/NASTRANによる固有値解析の解析値と良く一致していることが認められる。他の対象橋梁においても同様に、実験値と解析値の一致が見られた^{4)~12)}。

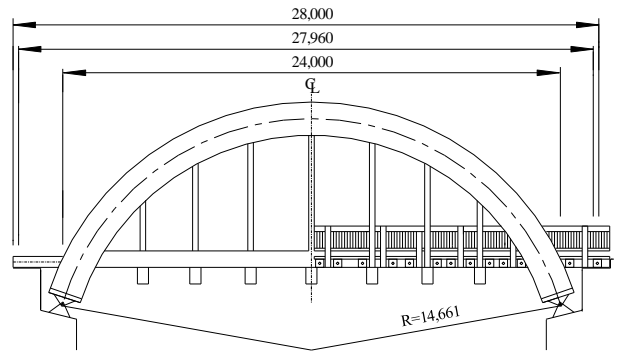


図-5 E橋の一般図

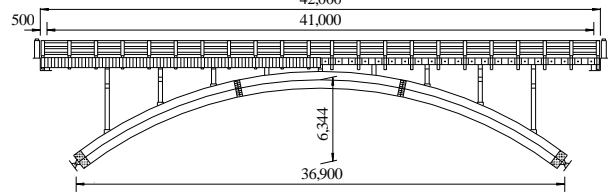


図-6 F橋の一般図

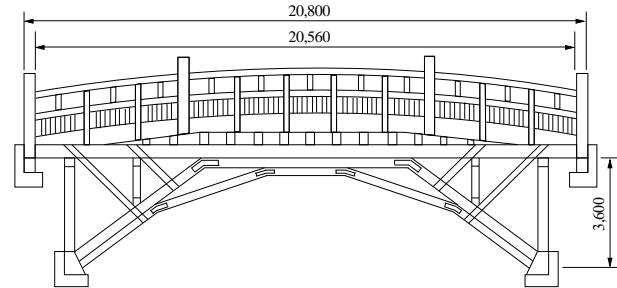


図-7 G橋の一般図

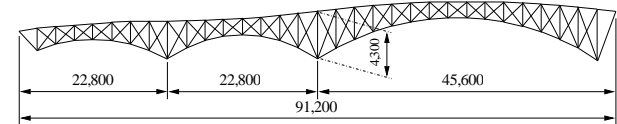


図-8 H橋の一般図

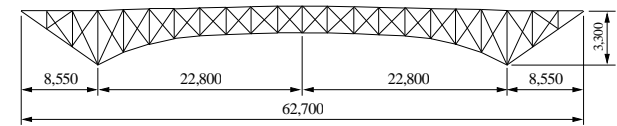
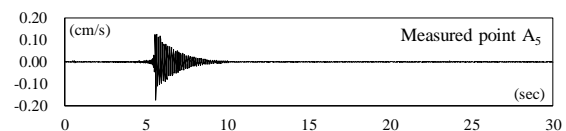
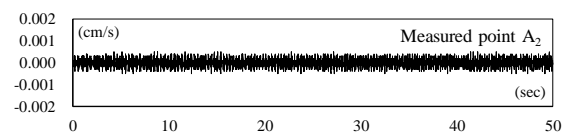


図-9 I橋の一般図



a. 砂袋落下衝撃試験



b. 常時微動測定試験

図-10 振動波形の一例

表-2 動的特性値の一例 (C橋)

振動次数	振動モード	固有振動数 (Hz)			
		平成 10年	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

表-3 固有振動数の経年変化の傾向

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
B橋	9.7	2.3	1.9	4.6
C橋	10.8	7.8	4.3	7.6
E橋	-1.5	9.8	15.3	7.8
F橋	7.3	4.3	1.8	4.4

また表-2 より、経年によって固有振動数の実験値が低減していることが確認できる。表-3 は、構造形式が異なる 4 近代木橋に対して、建設直後と直近の動的特性値を比較したものであり、固有振動数の実験値が経年によってどの程度低減しているかを表している。この表からも経年による固有振動数の低減が確認できる。なお、表中の平均値は、各木橋に対して振動次数の全体的な変化の傾向を見るために記述している。

4. 構造剛性

前節において、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。このことから、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、経年によ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劣化の影響が総合的に反映したものと考えられる。このため、固有値解析の逆解析を用いて固有振動数の低減を再現し、劣化の状態を解析パラメータから把握することを試みたり。

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がある。なお、固有値解析では経年による木部材の質量変化を顧慮する必要もあるが、その根拠と精度のある検討例がないこと、および実験日前の約 1 ヶ月間の気象条件、実験当日の晴天・雨天等の気象条件で木橋全体の質量は大きく異なる。この質量変化は経年による木部材の質量変化よりはるかに大きい要因である。そして、実験値はこれらの要因および劣化要因をすべて反映された結果としての値と考えることができる。

このことから、本研究では、経年によって部材の質量が変化しないものとし、各部材のヤング係数等の物性値

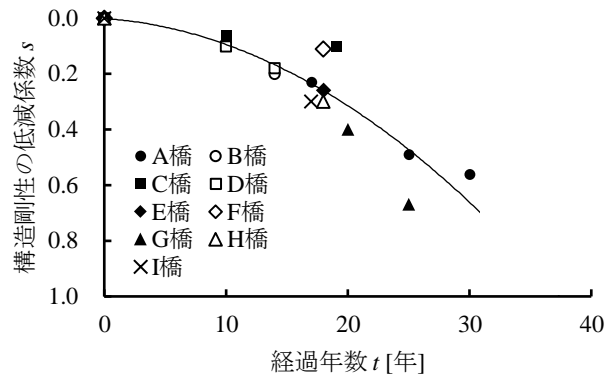


図-11 構造剛性の低減係数

が一律に変化していると仮定して逆解析を行い、鉛直方向の基本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本研究では構造剛性と定義している。また、この構造剛性は橋梁全体の鉛直方向の曲げ剛性と等価であると考えられる。

図-11 は、対象橋梁の経年による構造剛性の減少を低減係数 s (以降、低減係数と言う) として表したものである。低減係数は架設時の構造剛性と各調査年における構造剛性の比率から算出しており、0 に近いほど構造剛性の減少が少なく、1 に近いほど構造剛性の減少が進んでいることを表している。また、低減係数が 1 に近いほど劣化が進行していることが考えられる。この図より、全ての対象橋梁において構造剛性の低減が見られ、経年によって劣化が進行していることが見受けられる。また、経過年数が 0 に近いほど構造剛性の低減は遅く、時間の経過に伴って低減の速度が増していることが確認できる。なお、図中では経過年数が 31 年以降の回帰線図を消去している。これは、わが国の近代木橋の建設実績が約 31 年であるから、31 年経過後の低減係数の形状は現状で不明であることが、その理由である。

図中の曲線は 2 次の多項式回帰曲線である。前述した構造剛性の減少傾向を表すのに適した回帰曲線であると考慮適用した。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は十分に高いと判断できる。式(1)に図中の回帰曲線を示す。

$$s = 0.0028t + 0.0006t^2 \quad (1)$$

この回帰曲線は、9 木橋分と少ないデータを基にしたものであり、また木橋と近代木橋を区別していないため、今後により多くのデータを収集することで 31 年以降の低減係数の形状やその回帰曲線の精度を向上させていく必要がある。

5. 構造剛性の低減係数に基づく劣化度の算定

前節において、低減係数 s を定義し、式(1)の回帰曲線を算出した。しかしながら、図-11におけるC橋とF橋およびG橋は、回帰曲線と乖離していることが見て取れる。その理由として、以下が考えられる。

C橋やF橋の場合、構造形式が上路式であり、かつアスファルト舗装であるため、主部材や床板が腐朽しにくい構造になっている。また防腐処理や塗装が十分に施されている点も雨水による腐朽の抑制に繋がっているものと考えられる。このため、他の対象橋梁よりも劣化の進行が緩やかであり、回帰曲線と乖離しているものと考えられる。これに対してG橋の場合、構造形式が上路式であるものの、舗装はなく敷板が剥き出しの状態であり、敷板同士も密着していないため、主部材や敷板が腐朽しやすい状態となっている。また敷板の繊維方向に勾配がないため、雨水が貯まりやすい構造でもある。加えて部材に対する塗装も施されていない。このため、他の対象

橋梁よりも劣化の進行が早く、前者と同様に回帰曲線から乖離しているものと考えられる。これらのことから、木橋の構造形式や防腐処理等の違いにより、劣化の進行速度にばらつきが生じ、低減係数の経年変化に差が具現化したと考えられる。そこで、これらのばらつきを考慮した低減係数の回帰曲線を算定できないかを検討した。

構造形式や防腐処理の有無などによる劣化傾向の違いを式に反映させるため、参考文献13)における指標値 Y を用いた。この指標値は木橋の耐用年数を推定するために用いられる値であり、式(2)に示すように P や E などの様々な要因の積と和で計算される。 P や E は、それぞれ木橋の使用材料や架設位置の周辺環境などによって定まる値であり、表-4に示す6の要因がある。また各要因は各項目に細分化され、点数化がなされている。一例として、使用材料 P と構造形式 S の各項目と点数を表-5と表-6に示す。

$$\text{指標値} : Y = P \times E \times S \times D \times C + M \quad (2)$$

これらの要因は、木橋の劣化に影響を与えるものであることから、前述した劣化の進行速度の変動に対して指標値を用いて説明ができると考えた。

指標値 Y に含まれる各要因の点数は、値が大きいほど劣化に対する耐性が高いと考えられる。例えば、表-6の構造形式に関する要因の中の「上路式・下路式等の区

表-4 各要因と算定式

使用材料 P	$P = p_1 + p_2 \times p_3$
周辺環境 E	$E = e_1 \times e_2$
構造形式 S	$S = s_1 \times s_2 \times s_3 \times s_4$
腐朽防止 (構造) D	$D = d$
腐朽防止 (施工) C	$C = c$
維持管理 M	$M = \sum(m \times N)$

表-5 使用材料 P の各項目と点数

項目	点数	
材料固有の耐久性: p_1	1.5	ヒキ, ボンゴシ, ケキ, ヒバ, ク
	1.0	サ, ベイマツ, カマツ, クサ
	0.9	モミ, アカマツ, クマツ
	0.8	トドマツ, エゾマツ, クスノ
材料固有の防腐剤の浸透性: p_2	1.1	ヒバ
	1.0	サ, ベイマツ, モミ, アカマツ, クマツ
	0.9	ヒキ, ケキ, カマツ, エゾマツ, トドマツ
	0.8	ク, ボンゴシ, クサ, クスノ
防腐処理の方法: p_3	1.0	注入処理と表面処理
	0.6	注入処理
	0.3	表面処理
	0.0	防腐処理なし

表-6 構造形式 S の各項目と点数

項目	点数	
屋根の有無: s_1	2.0	屋根あり
	1.0	屋根なし
上路式・下路式等の区分: s_2	1.0	上路式
	0.8	中路式
	0.8	下路式
桁橋等の橋梁形式: s_3	1.0	桁橋
	0.9	アーチ橋, ラーメン橋
	0.8	床版橋
	0.7	トラス橋
床版形式: s_4	1.8	鋼床版, コンクリート床版
	1.5	木床版 (舗装あり)
	1.0	木床版 (敷板)

表-7 対象橋梁の指標値

対象橋梁	経過年数 t [年]	低減係数 s	指標値 Y
A橋	17	0.23	1.81
	25	0.49	2.11
	30	0.56	2.11
B橋	14	0.20	2.18
C橋	10	0.06	4.00
	19	0.10	4.00
D橋	10	0.10	2.06
	14	0.18	2.06
E橋	18	0.24	3.09
F橋	18	0.11	3.93
G橋	20	0.40	1.57
	25	0.67	1.57
H橋	18	0.30	1.54
I橋	17	0.30	1.54

表-8 回帰分析の結果

		指標値 Y なし	指標値 Y あり
回帰式		$s = \beta_1 t + \beta_2 t^2$	$s = \frac{\beta_1 t + \beta_2 t^2}{Y}$
	係数		
	β_1	0.0028	0.0090
	β_2	0.0006	0.0012
	R^2	0.921	0.985
	R^{*2}	0.870	0.934
	有意 F	5.94×10^{-12}	2.92×10^{-19}

ただし、 R^2 : 決定係数, R^{*2} : 自由度補正決定係数

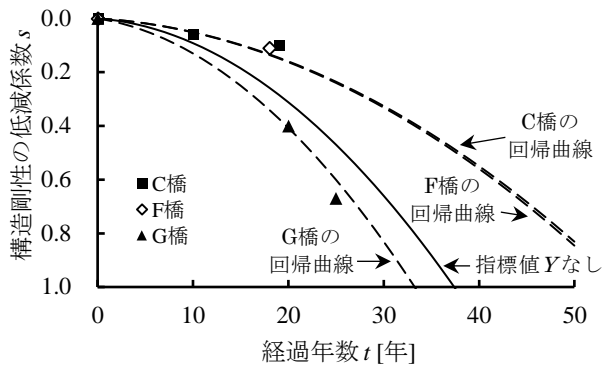


図-12 回帰曲線の比較図

分： s_2 では雨水の影響を受けにくく、劣化に耐性のある上路式が最も高い点数となっている。このことから、指標値の増加に伴って低減係数の経年変化は緩やかになると仮定し、式(3)を構築した。

$$s = \frac{\beta_1 t + \beta_2 t^2}{Y} \quad (3)$$

式(3)の分子は、式(1)と同じ2次の多項式曲線である。また分母は指標値Yであり、指標値の増加に伴って分子の回帰係数βが減少するため、2次の多項式曲線の傾きは緩やかになると考える。

式(3)の回帰係数βを求めるために、9橋の対象橋梁における指標値を調査年ごとに算出した。表-7にそれぞれの指標値と低減係数を示す。また、重回帰分析の結果を表-8に示す。なお、A橋は1987年に建設され、初期耐用年数が式(2)から算出すると1.81になる。経過年数が18年(2005年)の時に床板、地覆、高欄等の床組の修繕工事が行われた。その実績によって式(2)の維持管理Mが+になり、指標値Yが大きくなり経過年数が25年では指標値が2.11になっている。

表-8における指標値なしの式は、式(1)と同じものである。この表より、指標値Yを含んだ回帰式の方が決定係数 R^2 が高く、指標値を含まない式(1)の回帰式よりも適合度が高いことが確認できる。

また、図-12にC橋とF橋およびG橋における回帰曲線の比較図を示す。図中の実線は指標値なしの回帰曲線であり、また点線は指標値ありの回帰曲線である。指標値を含む回帰曲線の場合は、橋ごとに回帰曲線が異なる。この図からも、指標値を含む式の方がより高い適合度であると確認できる。ここで、式(3)に表-8の回帰係数βを代入した結果を式(4)に示す。

$$s = \frac{0.0090t + 0.0012t^2}{Y} \quad (4)$$

この式を用いることにより、動的調査を行っていない木橋についても、概略的に低減係数sを算出することが可能である。また、低減係数の算出が可能となれば、木橋の劣化状態を間接的に求められるため、維持管理や保

表-9 C橋における各要因と指標値

P	E	S	D	C	M	Y
1.9	1.2	1.4	1.3	1.0	0.0	4.0

全において有用な知見が得られる。例えば、現在架け替えが決まっているG橋の低減係数sは約0.6であり、また同程度の構造剛性の低減で架け替えられた木橋も過去に存在している¹⁴⁾。このような事例を基に、低減係数の基準を定め、劣化状況を定量的に判断することも可能であると考える。

6. 構造剛性の低減係数に基づく残存年数の算定

第4節と第5節において、構造剛性の経年による低減の傾向を示した。特に、式(1)や式(4)の回帰曲線は、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。そこで本節では、これらの構造剛性の低減に関するデータを活用する方法について検討する。

木橋を維持管理・保全していく上で、耐用年数の推定法を確立することは重要な課題である。このことから、土木学会・木材工学委員会・木橋研究小委員会では参考文献13)、15)に示すような研究成果を公表している。また、参考文献16)、17)に示すような近代木橋に対する耐用年数の推定法も著者らの本田によって考案されている。

式(5)と式(6)は、木橋と近代木橋に対する耐用年数Tの推定式である。木橋の推定式は、木橋研究小委員会が提案した式である。また近代木橋の推定式は、著者らの本田が77橋分の近代木橋より算出した式であり、耐用年数の推定式に関する研究¹⁸⁾を参照されたい。

$$\text{木橋} : T = 15Y \quad (T \leq 30 \text{ 年}) \quad (5)$$

$$\text{近代木橋} : T = 8.93e^{0.57Y} \quad (T \leq 50 \text{ 年}) \quad (6)$$

式(5)と式(6)を計算するにあたり、式(2)で示した指標値Yを算出する必要がある。しかしながら表-4や表-5に示すように、指標値の各要因や項目は木橋の建設時や維持管理の際に決定される値であり、木橋の劣化に関する諸量は含まれていない。そこで、これらの耐用年数に関する式と木橋の実質的な劣化を表す低減係数を統合し、劣化の実態を反映した新しい耐用年数の推定式を構築できないか検討した。以下はその方向性を示すものである。

式(5)と式(6)に示した耐用年数を初期耐用年数 T_i と定義し、経年によって耐用年数が構造剛性と同等に低減していくと仮定すると、ある経過年数tにおける残存年数 T_G は、式(7)のようになると考えられる。

$$T_G = T_i(1 - s) - t \quad (7)$$

式中の残存年数 T_G は、建設時からの経過年数tにおける関数で、例えば、建設より10年が経過した木橋の場合、10年経過した時点での残りの耐用年数のことを示している。また式中のsは、前節で示した低減係数であ

り、経過年数 t が 0 年の時に低減係数 s は 0 であるため、残存年数 T_G は初期耐用年数 T_i と一致することが確認できる。また、残存年数 T_G が 0 年の時に計算上、木橋は寿命を迎えるため、その時の経過年数 t が実質的な耐用年数と考えられる。

ここで、式(7)による算出例を示す。対象とする橋梁は、近代木橋である C 橋とし、3 回目の動的調査が行われた平成 29 年における残存年数 T_G を算出する。また、低減係数は式(1)を用いる。まず、C 橋の建設年は平成 10 年であるため、経過年数 t は 19 年である。そのため、低減係数 s は、式(1)より以下のように $s=0.27$ である。

$$s(t = 19) = 0.0028t + 0.0006t^2 \cong 0.27$$

また、指標値 Y は、参考文献 13) を参考に各要因の点数化を行い、式(2)より算出した。各要因の点数と指標値を表-9 に示す。

よって、初期耐用年数 T_i は式(6)より 87.3 年であるが、最大値の 50 年となる。また、残存年数 T_G は式(7)より、 $50-19=31$ 年ではなく、以下のように 17.5 年となる。

$$T_i(Y = 4.0) = 8.93e^{0.75Y} \cong 87.3 \text{ 年} > 50 \text{ 年}$$

$$T_i(Y = 4.0) = 50 \text{ 年}$$

$$T_G = T_i(1 - s) - t = 50 \times (1 - 0.27) - 19 = 17.5 \text{ 年}$$

これらのことから、C 橋は平成 29 年の時点において、残り 17 年半ほど供用が可能であると判断される。

しかしながら、この式はあくまで仮定であるため、実際の木橋における実年数と比較して妥当性を確認する必要がある。そこで、文献 19) で挙げられている 5 つの木橋と 4 つの近代木橋の実年数に関するデータを基に比較を行った。表-10 は、文献中の各木橋の実年数と指標値を示したものである¹⁹⁾。

一例として、橋番号 1 における比較の結果を図-13 に示す。図の横軸は経過年数 t 、縦軸は残存年数 T_G である。また、初期耐用年数 T_i には式(5)を用いた。

残存年数が 0 年の時、経過年数は約 15 年であるため、耐用年数は 15 年である。また、実年数は 17 年、式(5)による初期耐用年数が約 19 年であることから、実年数との差は初期耐用年数と同程度であることが確認できる。他の 8 橋に対しても同様の比較を行った結果を図-14 と図-15 に示す。

図-14 の木橋における比較の結果から、橋番号 2 と橋番号 3 において、実年数との差が初期耐用年数よりも離れる結果となった。ただし、他の木橋においては、初期耐用年数よりも差が小さい、もしくは同等であることが確認された。一方、図-15 の近代木橋における比較結果では、4 橋すべてにおいて初期耐用年数よりも差が小さくなることが確認された。このことから、比較した 4 橋の近代木橋においては、より実態に近い耐用年数を算出でき、比較的妥当な結果であると判断できる。しかし

表-10 木橋と近代木橋の実年数および指標値

	橋番号	実年数 $T_{実}$ (年)	指標値 Y
木橋	1	17	1.25
	2	21	1.30
	3	28	1.74
	4	22	2.57
	5	15	1.30
近代木橋	6	13	1.12
	7	17	2.16
	8	23	2.28
	9	19	1.68

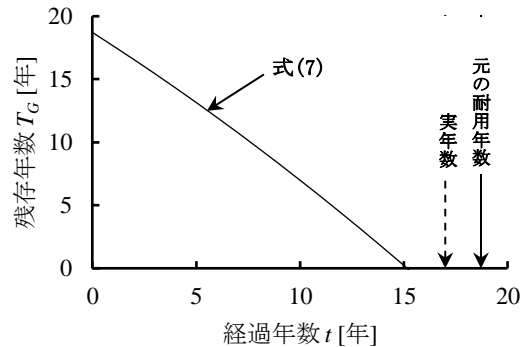


図-13 残存年数と実年数の比較

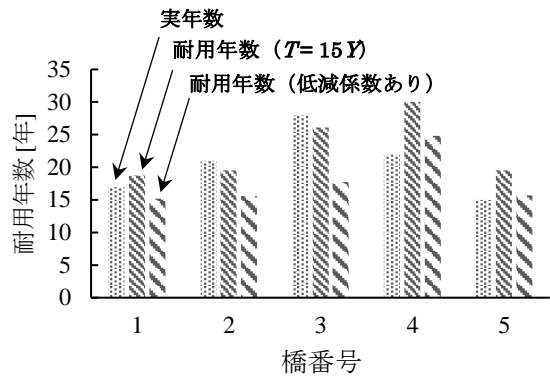


図-14 木橋の実年数との比較

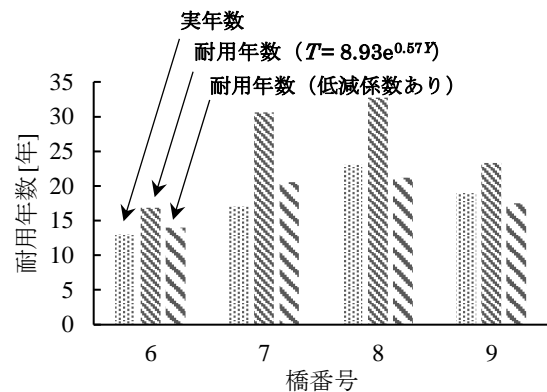


図-15 近代木橋の実年数との比較

ながら、木橋については、実態よりも短い耐用年数を算出する場合があることから、今後、検討に要するデータの集積から検討を重ねる必要がある。

7. あとがき

本研究は、9橋の木橋に対して20数年に亘って実施された動的調査の結果を基に動的特性値を算出し、ヤング係数を逆解析から推定することにより、経年による構造剛性の低減係数を導いた。さらに、木橋の実質的な劣化曲線である経年による構造剛性と耐用年数を基に、低減係数による健全度の評価法および残存年数の算出法に対する方法論を論述した。

本研究で示した経年による構造剛性の低減係数は、未だ検討されていない木橋特有の修復限界状態設計法の構築に関係するが、未だデータ数が少ないように思われる。本研究で示した式(1)、式(4)の精度に関して、本来なら近代木橋と木橋を区別し、さらに構造形式別等のパラメータを確定することは理想的である。そのような高い精度を有する構造剛性の低減係数を定式化するために、今後の研究者による継続的なデータ収集と検討を期待したい。

謝辞：本研究に際し、20 数年に亘る多くの木橋に対する実橋実験とデータ分析や解析等に多大な協力を頂いた当時の本田研究室の多数の大学院生および学部4年生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年経過した上落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) 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.
- 8) 相内義時・吉岡久遠・反町拓寛：経年による木製アーチ道路橋（おおさる橋）の構造性能と健全度評価，平成30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.1-35, 2018.
- 9) 浅野典人・玉井理喜・松本浩平：経年による木製アーチ道路橋（金峰2000年橋）の構造性能と健全度評価，平成30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.1-32, 2018.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Hideyuki Honda: Strength Decrease of Wood Materials in Kintaikyo Bridge used 48 Years, The report of the 18th Congress of IABSE, CD-R, 2012.
- 15) 土木学会木材工学委員会：土木技術者のための木材工学入門，土木学会，pp.103-106, 2017.
- 16) 篠原己観郎・本田秀行・荒木昇吾：近代木橋に対する耐用年数の推定法，構造工学論文集 Vol.61A, pp.578-584, 2015.
- 17) Hideyuki Honda and Shogo Araki: Applied method and Estimation of Durable years for modern timber bridges, Proc. of the WCIE, pp.1-8(CD-R), 2016.
- 18) 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，pp.53-60, 2019.
- 19) 柴田大輔・藤永廉太郎：木橋に対する耐用年数の算出法，平成30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, 2018.

(Received August 31, 2019)
(Accepted November 11, 2019)

CALCULATION METHOD OF DETERIORATION DEGREE AND REMAINING YEARS BASED ON STRUCTURAL RIGIDITY OF TIMBER BRIDGES

Masato SHINOHARA, Shingo KATO, Atsushi TOYODA and Hideyuki HONDA

The strategy of maintenance to existing timber bridge is the important problem, though the timber bridge is constructed in the decreasing tendency compared with the 1990s in Japan. This study used the dynamic investigation result at long standing to the nine timber bridges, and understood quantitatively the decrease of vertical equivalent flexural rigidity (thereafter, it is said the structural rigidity) in whole bridge by passing age of the timber bridges. In addition, this study presented the methodology that quantitatively understood soundness from the reduction factor of the deterioration degree based on the decrease rate of the structural rigidity by passing age. Moreover, the new estimated equation on durable years and the structural rigidity of timber bridge are integrated, the methodology that calculated the remaining years of timber bridge at the number of years elapsed is presented.