

令和 2 年 5 月 11 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06543

研究課題名(和文)近代木橋の経年による構造剛性の実態評価に基づく耐用年数の推定法開発

研究課題名(英文)Development of estimated method of durable years based on actual condition of structural rigidity for modern timber bridges by many years past

研究代表者

本田 秀行 (HONDA, HIDEYUKI)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：00110990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：近代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。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の低減係数を定式化した。そして、経年による構造剛性の低減係数を基にした劣化度から健全度を定量的に把握する方法を開発した。さらに、木橋の新たな耐用年数の推定式と構造剛性の低減係数を統合し、経過年時での残存年数を算出する方法論も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、実質的な経年による劣化曲線である等価曲げ剛性に基づく構造剛性の低減係数を世界初として定式化した。これは、世界的に全く検討されていない木橋特有である修復限界状態設計法の構築に対する第一歩であり、学術的意義は高い。また、構造剛性の低減係数から木橋の劣化度を定量的に評価する方法論を開発した。さらに、新たに構築した耐用年数と構造剛性の低減係数の統合によって、経過年時での木橋の残存年数の推定法も開発するなど、社会的意義は高い。

研究成果の概要(英文)：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 in whole bridge by passing age of the timber bridges. In addition, this study developed 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 developed.

研究分野：工学

キーワード：木橋 経年劣化 構造剛性 耐用年数 健全度 残存年数

### 1. 研究開始当初の背景

わが国の近代木橋は、約 66 年前から建設が始まっている欧米の歴史に比べて非常に浅く、維持管理や保全法を学術的に論議する基盤がほとんど無かった。木橋は気象環境の要素に大きく影響されるため、諸外国の評価法や基準をそのまま日本の近代木橋に適用することはできない問題もある。このことから、わが国独自の近代木橋の保全に対して、経年による構造剛性低下の実態評価に基づく耐用年数推定法の開発が緊急な社会的課題となっている。

### 2. 研究の目的

木橋の耐用年数が推定できれば、既設木橋では修繕工事の時期を維持管理者に情報提示、新設木橋では構造形式等の変更によって耐用年数の向上を図る設計と将来の保全法に貢献ができる。そこで、本研究は実橋での再実験や健全度調査などから、近代木橋の経年による構造剛性の実態を定量的に評価する。その結果に基づき、集成木材の経年による強度や剛性の低下など気象環境の負荷に基づくわが国独自の近代木橋の耐用年数推定法の開発を目的としている。

### 3. 研究の方法

(1) 近代木橋の架設実績と点検や保守工事に関して収集した図 1 に示す 1007 橋のデータを要因分析し、完成から補修工事までの年数やその理由などの実態を定量的に把握する。

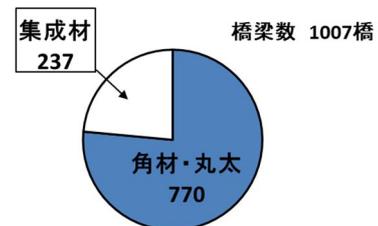


図 1 集積データ数

(2) 近代木橋に対する目視検査や健全度調査および実橋の振動実験から、経年による構造剛性の低減係数を逆解析の手法で検討し、構造剛性の低減係数から劣化度を定量的に評価する手法を開発する。

(3) 近代木橋の耐用年数に関係する要因と再分割した項目の点数化に対して、32 近代木橋を対象に妥当性を検討し、その結果に基づいて耐用年数の推定式を検討する。さらに、木橋と近代木橋に対する耐用年数の推定式を定式化する。

(4) 構造剛性の低減係数と耐用年数を統合化し、構造剛性の低減係数に基づいて経過年数の時点での残存年数を算出する手法を開発する。

### 4. 研究成果

(1) 木橋の耐用年数の推定式の定式化

ボンゴシ材のデータを除去して若干の実年数のデータを追加したデータを図 2 に示す。図中の  $R^2$  は決定係数である。木橋を従来の木橋と近代木橋に区別して、それぞれ決定係数が最も大きくなる耐用年数の推定式を検討した。その結果を式(1)、(2)に示す。なお、木橋の耐用年数の最大が実年数を考慮して 30 年、近代木橋は 50 年としている。

$$\text{木橋: } T = 15Y \quad (T: 30 \text{ 年}) \quad (1)$$

$$\text{近代木橋: } T = 8.93 e^{0.57Y} \quad (T: 50 \text{ 年}) \quad (2)$$

$$\text{指標値: } Y = P \times E \times S \times D \times C + M \quad (3)$$

式(3)に示す指標値  $Y$  は、表 1 に示す  $P, E, S, D, C, M$  の 6 つの各要因から構成されている。

(2) 対象橋梁

本研究では、表 2 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。一例として、B 橋は宮崎県西米良村にあるキングポストラス形式の木製道路橋であり、キングポスト橋 3 連と単

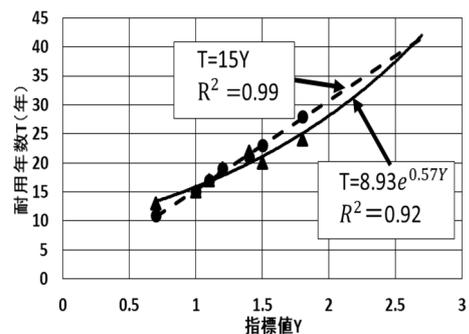


図 2 近代木橋と木橋の耐用年数の推定

表 1 指標値の各要因と算定式

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) $D$	$D = 1.0$
腐朽防止(施工) $C$	$C = 0$
維持管理 $M$	$M = \Sigma(m \times N)$

純桁橋の合計 4 径間からなる．地元産材によるスギ集成材を用いた世界的に最大規模の木橋でもある．B 橋は，過去に完成直後と 14 年経過した時点で 2 回の動的調査を行っている．

表 2 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	22.76 m	22.16 m	2.80 m
	B 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	7.00 m
	C 橋	平成 10 年	カラマツ集成材	$\pi$ ラーメン橋	30.00 m	29.50 m	9.25 m
	D 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	3.00 m
	E 橋	平成 12 年	スギ集成材	中路式アーチ橋	28.00 m	25.60 m	5.5 m
	F 橋	平成 12 年	スギ集成材, ヒノキ集成材	上路式アーチ橋	42.00 m	41.00 m	10.10 m
木橋	G 橋	平成 02 年	ヒノキ	方杖橋	20.80 m	20.56 m	4.00 m
	H 橋	平成 08 年	スギ, ヒノキ	上路式トラス橋	91.20 m	45.60 m	2.5 ~ 5.1 m
	I 橋	平成 08 年	スギ, ヒノキ	上路式トラス橋	62.70 m	45.60 m	3.2 ~ 5.3 m

### (3) 構造剛性

図 3 に，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) 示す．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．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認められる．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も確認できる．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．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え適用した．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(4)に図中の回帰曲線を示す．

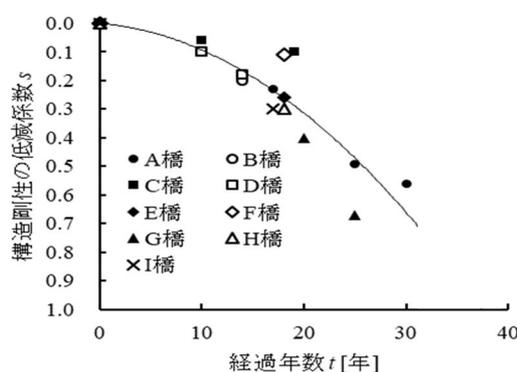


図 3 構造剛性の低減係数

$$s = 0.0028t + 0.0006t^2 \quad (4)$$

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事は今後の課題である．

表 3 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 4 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	$\beta_1$	0.0028	0.0090
	$\beta_2$	0.0006	0.0012
$R^2$		0.921	0.985
$R^{*2}$		<b>0.870</b>	<b>0.934</b>
有意 F		$5.94 \times 10^{-12}$	$2.92 \times 10^{-19}$

ただし， $R^2$ ：決定係数， $R^{*2}$ ：自由度補正済決定係数

(4) 低減係数による劣化度の算定法開発

図3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られる。その理由として、木橋の構造形式や防腐処理等の違いにより、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、これらの変動を考慮した低減係数の回帰曲線を検討した。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。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(5)を構築した。

$$s = \frac{\beta_1 t + \beta_2 t^2}{Y} \quad (5)$$

式(5)の分子は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  $\beta$  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。

そこで、式(5)の回帰係数  $\beta$  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3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4に示す。表4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)よりも適合度が高いことが確認できる。

図4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(5)に表4の回帰係数  $\beta$  を代入した結果を式(6)に示す。

$$s = \frac{0.0090t + 0.0012t^2}{Y} \quad (6)$$

式(6)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、維持管理や保全において有用な知見が得られる。

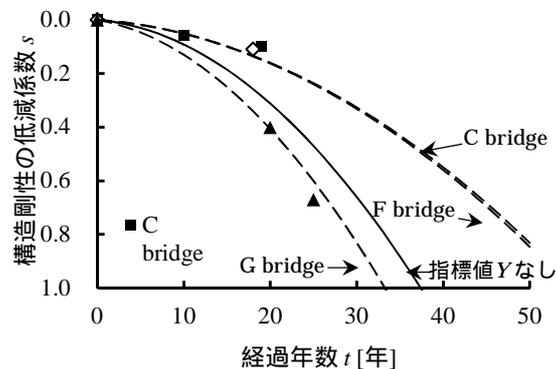


図4 回帰曲線の比較図

(5) 低減係数による残存年数の算定法開発

木橋の維持管理や保全を行う上で、耐用年数および経過年数時点での残存年数の推定法を確立することは重要である。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たな残存年数の推定式を検討した。

式(1)と式(2)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。

(6) 推定耐用年数の検証

木橋における比較の結果から、橋番号2と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、近代木橋における比較結果では、4橋全てにおいて初期耐用年数よりも差が小さくなることを確認された。このことから、より実態に近い耐用年数を算出でき、妥当な結果であると判断できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsushi Toyoda, Hideyuki Honda and Shingo Kato	4. 巻 8
2. 論文標題 Static and dynamic structural performance of modern timber bridges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of JACE	6. 最初と最後の頁 26-43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 篠原聖人、加藤慎吾、豊田 淳、本田秀行	4. 巻 18
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 木材利用研究論文報告集18	6. 最初と最後の頁 16-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 本田秀行、豊田 淳、加藤真吾、篠原聖人	4. 巻 17
2. 論文標題 木橋の健全度調査に対する定量的評価法の試案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 木材利用研究論文報告集17	6. 最初と最後の頁 17-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 豊田 淳、本田秀行、篠原聖人、加藤真吾	4. 巻 17
2. 論文標題 経年による木橋の動的特性の実態に基づく構造剛性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 木材利用研究論文報告集17	6. 最初と最後の頁 24-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本田秀行、豊田 淳、加藤慎吾、篠原聖人
2. 発表標題 木橋と近代木橋に対する耐用年数の推定式と要因分析
3. 学会等名 木材利用研究発表会講演概要集18
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠原聖人、豊田 淳、加藤慎吾、本田秀行
2. 発表標題 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
3. 学会等名 木材利用研究発表会講演概要集18
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠原聖人、豊田 淳、加藤真吾、本田秀行
2. 発表標題 経年による木橋の動的特性の実態に基づく構造剛性
3. 学会等名 木材利用研究発表会講演概要集17
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----