

新旧部材の測定値を用いた集成材木橋の劣化評価

環境構造工学分野 8020802 及川 大輔
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

わが国における木材利用は、軽く加工しやすいことから多くの構造物に用いられてきた。しかし、木材は腐朽による劣化事例が多く¹⁾、特に屋外使用は、腐朽を発生させる要素である水分・酸素・適切な温度の3つの条件²⁾が揃いやすい環境であり、近年の木材利用は住宅など屋根付きの構造物への使用が多い³⁾。そのため木材を土木構造物に利用する例は全体と比較すると少なく、特に道路橋や歩道橋などの多くは、鋼材やコンクリートを主材料としている⁴⁾。

わが国における集成材を用いた近代木橋の歴史は30年程度であり、欧米諸国と比べると非常に浅い。ボンゴシ材を用いた木橋については、10年程度で落橋した例や劣化から架替えが行われた例もあり、撤去部材を対象とした材料強度に関する研究も多く行われている^{5),6)}。しかし、スギの大断面集成材を用いた国内の木橋の強度試験に関する研究は少なく、特に20年以上経過した木橋の撤去部材に対する研究はほとんど行われていない。

木橋についての設計基準的な国内の文献として、(財)国土技術研究センターが取りまとめた「木歩道橋設計・施工に関する技術資料」⁷⁾があり、点検・管理についても参考資料として具体的方法とともに、いくつかの木橋の点検チェックシートの記載例も示されている。架設後数年での腐朽があまり進行していない時点での点検例ではあるが、集成材の点検例も含んでおり貴重な資料である。しかし、腐朽した状態の点検例などは少なく、腐朽状態のヤング率や強度に関する内容も少ないことから、架替え時期・メンテナンス内容など正確な劣化診断を行うには劣化状態・ヤング率・強度などより多くの内容を含む必要がある。そのため、20~30年程度経過した橋梁部材の強度や剛性に関する検討には意味があり、まずは基礎データの蓄積が必要である。

本研究では27年供用後、架替えが行われためもと橋を対象とし撤去部材の材料試験からヤング率と曲げ強度を算出する。本橋は1994年に架設されたが、

架設時のヤング率は測定しておらず、27年の経過による部材劣化を推定することは不可能である。そこで架替えが行われた新めもと橋の部材ヤング率を測定し、みなし新設時のヤング率として比較し、劣化状況について検討する。また数値解析を用いて、劣化状態を反映させたモデルで解析を実施し、27年供用後の部材が橋梁部材として安全であるか検討する。

なお、数値解析では構造性能の検討として主構部材であるアーチリブの圧縮応力・座屈荷重で検討している。また振動解析で固有振動数の低減から曲げ剛性の低減を推定した。座屈荷重の検討は木製アーチ橋の設計で用いられている座屈照査⁸⁾に関して数値解析で座屈荷重を算出し、設計荷重と座屈荷重の比較から安全性を検討したものである。曲げ剛性の検討は、固有振動数と曲げ剛性に相関が確認されている⁹⁾ため、橋梁全体の固有振動数の低減から橋梁全体の曲げ剛性の低減を推定したものである。

今回、対象としためもと橋は秋田県仁別国民の森内に架橋されていた大断面集成材を用いた木製2ヒンジ中路的アーチ橋である。2020年に架替えが行われたことから、架替え時に撤去された部材を頂けることとなったため本研究を行った。本橋は27年間供用された橋であり、わが国における集成材木橋の歴史を踏まえても貴重な橋である。図-1に橋梁一般図、図-3に旧めもと橋と新めもと橋の外観、表-1にめもと橋の設計概要示す。

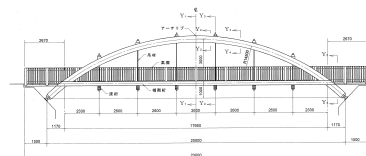


図-1 旧橋めもと橋一般図

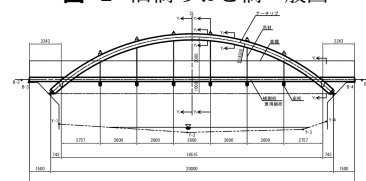


図-2 新橋めもと橋一般図



図-3-a 旧めもと橋



図-3-b 新めもと橋

図-3 めもと橋の外観

表-1 設計概要

橋種	中路式 2 ヒンジアーチ	
施工年度	1994 年	
使用材料	アーチ・床桁・補剛桁	秋田スギ集成材
	横構・床版・高欄部	秋田スギ製材
用途	歩道橋	
橋長	23m	
支間長	20m	
幅員	1.5m	
所在地	秋田県秋田市仁別 仁別国民の森	

表-2 被害度判定基準

被害度	観察状態
0	健全
1	部分的に軽度な虫害または腐朽
2	全体的に軽度な虫害または腐朽
3	2の状態の上に、部分的に激しい虫害または腐朽
4	全体的に激しい虫害または腐朽
5	虫害、または腐朽により形がくずれる

2. 材料試験

(1) 試験方法

静的曲げ試験、応力波伝播試験・縦振動法試験・目視試験を実施した。試験終了時、各試験体の両端 10cm を含水率測定用の試験片として採取し、試験時重量と全乾燥後重量から試験体含水率を算出している。下記に各試験の試験方法を示す。

a) 3 点曲げ試験

3 点曲げ試験は構造用木材強度試験マニュアル¹⁰⁾に記載されているせん断強度測定のための 3 点曲げ試験を参考にし、床桁:2990mm・補剛桁:1800mm・地覆木:900mm で試験を実施した。製材と集成材の試験方法を図-4、図-5 に示す。

b) 応力波伝播速度試験

応力波伝播速度試験器 FAKOPP を用いて試験を実施した。センサーは両端から 10cm の位置に挿入し、センサー間距離 1m で試験を実施した。試験概要を図-6 示す。なお、アーチリブや地覆木などセンサー間距離が 1m より小さい場合については、文献¹¹⁾に示されているようにセンサー間距離の違いが測定値に影響を与えている可能性がある。

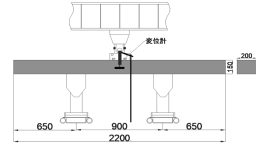


図-4-a 試験概要



図-4-b 試験の様子

図-4 3 点曲げ試験（製材）

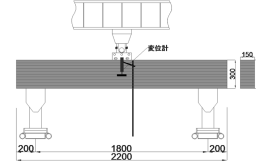


図-5-a 試験概要



図-5-b 試験の様子

図-5 3 点曲げ試験（集成材）

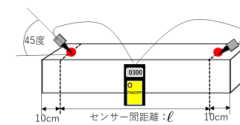


図-6-a 測定概要



図-6-b 測定の様子

図-6 応力波伝播速度試験

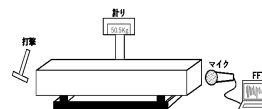


図-7-a 測定概要



図-7-b 測定の様子

図-7 縦振動法試験

c) 縦振動法

縦振動法は試験体の端部をゴムハンマーで打撃し、発生した音の特性から FFT アナライザーを用いて固有振動数を推定した。測定概要を図-7 に示す。

d) 目視試験

JIS K 1571(2010)「木材保存剤の性能試験方法および性能基準」¹²⁾表-2 を基準として 0~5 の被害度を判定した。また今回は、目視・触診・打音の 3 項目を行い総合的な評価で劣化度を判定している。

(2) 試験結果

各試験から測定された結果を用いて下記に示す算出式を用いて木材強度・ヤング率を算出した。算出した結果の 95% 信頼区間を算出し、信頼区間の最大値・最小値・平均値を求めた。標本数が少ないアーチリブや地覆木などは、信頼区間の値を正確に算出

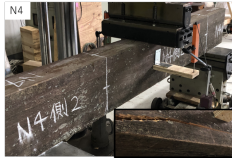


図-8-a 試験の結果

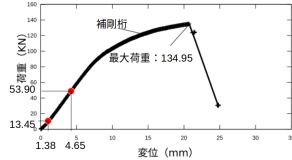


図-8-b 荷重-変位曲線

図-8 補剛桁の曲げ試験

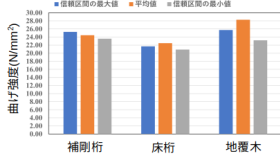


図-9-a 曲げ強度

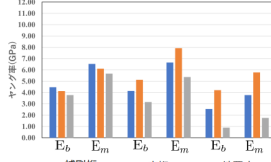


図-9-b 曲げヤング率

図-9 曲げ試験結果

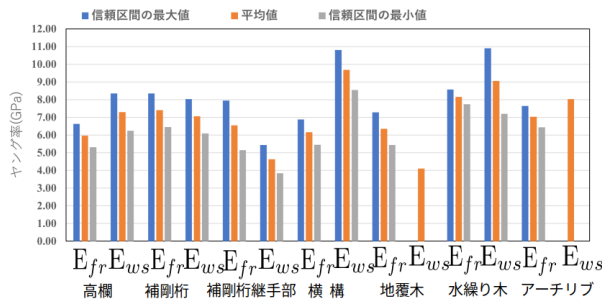


図-10 非破壊試験結果

できなかったため、平均値のみを記載している。

a) 静的曲げ試験

試験の結果から以下に示す式を用いて、試験体の最大曲げ応力 (f_b)、実験条件における見かけの曲げヤング率 (E_b)、標準条件における見かけ曲げヤング率 (E_m) を算出した。図-8 に補剛桁の曲げ試験の様子と補剛桁の荷重-変位曲線を、図-9-a, 9-b に各部材の曲げ強度 (f_b)・見かけの曲げヤング率 (E_b, E_m) を示す。また、試験体含水率 (u) を含水率測定用試験片から算出した。曲げ強度は繊維飽和点以下の含水率では上昇する¹³⁾と明らかになっているが各試験体の含水率がいずれも繊維飽和点以上の含水率であったため含水率による補正は行っていない。

E_m は標準試験状態とは異なる試験法で試験を実施した場合、標準試験条件時の値に調整するためのものである。

$$f_b = \frac{3aF}{bd^2} \quad (1)$$

ここで、 f_b ：最大曲げ応力、 F ：最大荷重、 a ：荷重点-支点間距離、 d ：梁の高さ、 b ：梁の幅である。

$$E_b = \frac{\ell^3(F_2 - F_1)}{48I(w_2 - w_1)} \quad (2)$$

ここで、 E_b ：実験条件における曲げヤング率、 I ：断面二次モーメント、 ℓ ：支点間距離、 F_1 は最大荷重の約 10%、 F_2 は最大荷重の約 40%、 w_1 は F_1 に対応する変位、 w_2 は F_2 に対応する変位とする。

$$E_m = \left(\frac{1 + \frac{2.4d^2 \frac{E}{G}}{3\ell^2 - 4a^2}}{1 + \frac{2.4d_0^2 \frac{E}{G}}{3\ell_0^2 - 4a_0^2}} \right) E_b \quad (3)$$

ここで、 E_m ：標準条件における曲げヤング率、 E_b ：実験条件における曲げヤング率、 G ：せん断弾性係数 (今回は $G = E_m/15$)、

d ：試験条件における梁せい、 ℓ ：荷重スパン、 a ：荷重点-支点間距離、 d_0, L_0, a_0 ：標準条件におけるこれらの値である。

b) 応力波伝播試験

応力波伝播試験で得られた伝播時間から以下の式で動的ヤング率を算出した。算出式を式 (4) に示す。また地覆木に関しては、他の試験体と違い、接線方向の伝播時間を計測し接線方向のヤング率を算出している。木材の接線方向ヤング率は繊維方向ヤング率の約 $\frac{1}{20}$ とされているため¹⁴⁾ 地覆木の結果は接線方向ヤング率の 20 倍としている。

$$E_{ws} = \nu^2 \rho \times 10^{-3} \quad (4)$$

ここで E_{ws} ：動的ヤング率 (GPa)、 ν ：伝播速度 ($\nu = \ell/t$)、 ℓ ：センサー間距離 t ：応力波の伝播時間 ρ ：密度である。

c) 打撃音法試験

測定された縦共振固有振動数から縦振動法の算出式 (5) を用いて軸方向ヤング率を算出した。縦ヤング率 (E_{ws}) 軸方向ヤング率 (E_{ft}) を図- 10 に示す。

$$E_{fr} = (2f\ell)^2 \rho \quad (5)$$

ここで E_{fr} ：軸方向ヤング率、 f ：固有振動数、 ℓ ：部材長さである。

3. 架替え後の新橋

2020 年に架替えが行われた新橋めもと橋の部材ヤング率について応力波伝播速度法を用いて測定を実施した。

新橋のめもと橋は、旧橋のめもと橋同様、2 ヒンジ中路式アーチ橋として設計されており旧橋同様秋田スギ製材・秋田スギ集成材を用いている。構造形式もほぼ旧橋と同じ形状であるが、多少変更されており、アーチリブの外側の補剛桁はアーチリブの内側にアーチリブとは離間して設置している。その他、地覆木・水繰り木が撤廃されている。測定は、アーチリブ・横構・縦桁・床桁・高欄・床版である。測定したヤング率を図-11 に示す。

4. 部材劣化度

架替え後の新橋が旧橋同様の樹種で架設されていることから、材料試験から算出した 27 年経過時のヤング率と架替え後の新橋で測定したヤング率をみなし新設時ヤング率として比較し、経年による部材劣化度を算定した。新橋で構造が変更されている補剛桁は新橋縦桁のヤング率、地覆木・水繰り木は新橋床版のヤング率を用いた。なお、比較には軸方向ヤング率を用いている。縦振動法を実施していない部材に関しては、曲げヤング率の算出式と軸方向ヤング率の算出式の比較 (6) から推定した変換式を用いて軸方向ヤング率に変換した値としている。

$$\frac{P\ell}{48E_z I} + \frac{P\ell}{4GkA} = \frac{P\ell}{48E_b I} \quad (6)$$

図-12 に各部材の新橋で測定したヤング率と旧橋 27 年経過時ヤング率の比較を示す。比較の結果アーチリブで 12.5%、床桁で 13.3%、横構で 21.3%、補剛桁で 24.2%、補剛桁継手部で 39.5%、高欄で 25.1%、地覆木で 28.8%、水繰り木で 0.5% の低減が確認された。

5. 数値解析

4. 部材劣化度では、架替えが行われた新橋のヤング率と 27 年経過した旧橋のヤング率を比較し、部材の劣化について言及した。本章では、部材の劣化が橋梁全体の構造性能にどの程度影響するかを有限要素解析ツール「Salome-meca2019」で数値解析を実施し検討した。

構造性能は、主構造部材であるアーチリブについて節点部の圧縮応力・座屈荷重から検討を実施した。橋梁全体の剛性評価は橋梁全体の固有振動数から、橋梁全体の曲げ剛性について検討を実施した。上記 3 点については新橋の測定ヤング率と旧橋の測定ヤ

ング率を用いて、みなし新設時と 27 年経過時の比較も行っている。

なお、解析に用いたヤング率は、4. 部材劣化度で用いた軸方向ヤング率である。

(1) 線形解析

アーチリブ節点での圧縮応力を算出し、スギ 2 級集成材の許容圧縮応力の範囲内に収まっているかを検討した。図-13 にアーチ節点を示す。

また本検討では、追加事項として雪荷重に関する検討を行っている。雪荷重は設計時、除雪の有無や架設環境の積雪条件から判断し、積雪 1m² あたり 3.5kN の雪荷重を考慮している。本研究で対象としているめもと橋は本来、除雪が行われる前提として活荷重+荷重 (積雪 0.15m) で設計されている。しかし、現状はめもと橋へ通ずる道が冬季間通行止めとなり除雪も行われないことから、管理者でさえ通行することはできず、めもと橋の除雪を行えない状態である。そのため最大積雪深として 4m 程度の積雪が想定され、積雪によって落橋の危険性も考えられる。この雪荷重に関する影響はめもと橋だけではなく、積雪が想定される山間部や林道にかかるすべての橋梁についても言えることであり今後の設計・維

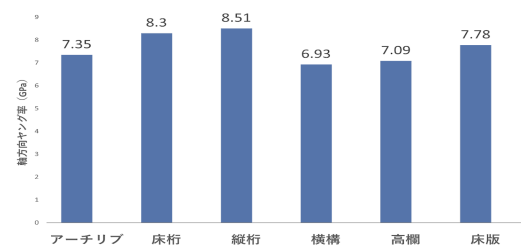


図-11 新橋めもと橋の測定ヤング率

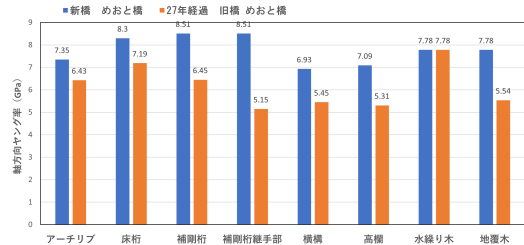


図-12 新橋と 27 年経過時のヤング率の比較

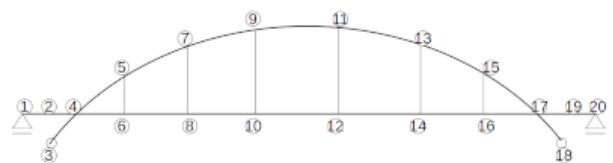


図-13 アーチリブ節点部

表-3 アーチ節点の圧縮応力

	節点番号 番号	圧縮応力 積雪 0.15(m) (MPa)	圧縮応力 積雪 (4m) (MPa)
みなし 新設時	5	0.64	4.42
	7	0.50	3.92
	9	0.59	4.60
27 年 経過時	5	0.74	10.32
	7	0.68	7.44
	9	0.57	7.31

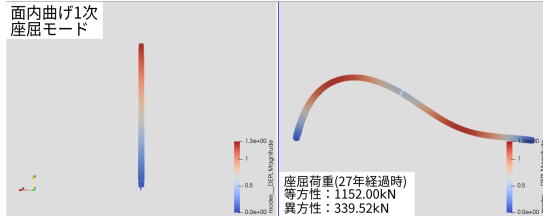


図-14 面内座屈モード

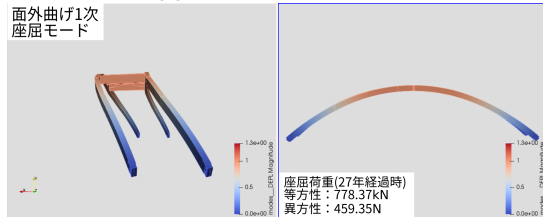


図-15 面外座屈モード

持管理を考えるにあたっても重要な点である。そこで、本解析の追記事項として検討し、雪荷重による危険性について明らかにする。

a) 解析手法

アーチリブ上面に 1.21kN/m (積雪 0.15m)・ 6.81kN/m (雪荷重: 14kN/m) をアーチ円弧等分布載荷、床版上面に 7.73kN/m (積雪 0.15m + 活荷重)・ 41.36kN/m (雪荷重: 14kN/m) を等分布載荷した。

b) 解析結果

解析結果を表-3 に示す。アーチ節点部の応力は、積雪 0.15m + 活荷重の場合では、みなし新設時・27 年経過時共に許容圧縮応力よりも低い値となり、安全であると考えられる。しかし、積雪 4m を想定した場合では新設時は許容値内に収まっていたものの、27 年経過時では許容圧縮応力以上の値となり、危険な状態であったと考えられる。旧橋の供用期間 27 年では積雪による落橋はなかったものの、旧橋と同様の設計がなされている新橋では落橋の可能性は十分に考えられる。そのため、冬季間床版を外すなど対策を講じながら維持管理する必要がある。

(2) 座屈解析

アーチ橋などの設計で多く行われているアーチリブの座屈照査を数値解析によって算出される座屈荷

重の観点から検討し、安全性について確認した。座屈モードは面内座屈モード、面外座屈モードが算出されるが、アーチ 1 本モデルで解析を行う場合は、横構の有無から面外曲げ座屈荷重が低く算出される恐れがある。そのため、アーチ 1 本モデルとアーチ 2 本を横構で連結したモデルで解析を行い、座屈荷重を算出した。

a) 解析手法

アーチ端部に固定線を設け、2 ヒンジアーチとして解析を実施した。算出した座屈モードから座屈荷重を求める場合座屈モードの Time 数 × 載荷荷重となる。そのためアーチ上面に 1kN の荷重を等分布載荷する。

b) 解析結果

解析結果を図-14、図-15 に示す。アーチ 1 本モデルの座屈荷重はアーチ面内モード 1 次: 1157.00kN アーチ面外モード 1 次: 121.63kN であった。アーチ 2 本モデルの座屈荷重はアーチ面内モード 1 次: 3425.26kN アーチ面外モード一次: 778.37kN であった。めおと橋の設計荷重は除雪前提条件で (204.39kN)、秋田県内の想定最大積雪深 4m 時で (1101.65kN) である。解析の結果と比較すると 1 本モデルの面内モードでは、 17.7% とはるかに小さく安全側であることが分かった。しかし積雪 4m 時の設計荷重に対しては面外モードで、設計荷重が大きくなり、面内モードでも座屈荷重の 96% となり、その差は小さく決して安全ではない結果であった。

(3) 振動解析

橋梁全体の固有振動数を算出し、みなし新設時と 27 年供用時の固有振動数の低減から橋梁全体の曲げ剛性の低減を推定した。

a) 解析手法

振動解析では、材料定数に部材の密度を与える必要がある。旧橋の部材では材料試験で密度の算出を行っているため、材料試験を行った部材は測定密度を適用した。旧橋のその他部材に関しては測定密度の中で一番大きいものを適用している。また新橋に関しても密度の測定は行っていない。そのため、一般的なスギ材の密度を適用させた。振動次数は 60 次数まで算出している。算出された固有振動数から水平方向一次振動 (面外モード)、鉛直方向 1 次振動

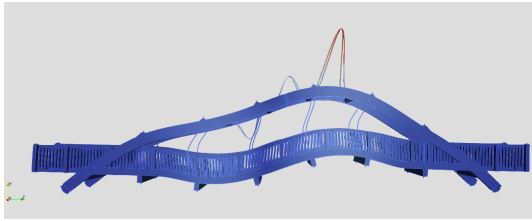


図-16 鉛直逆対称一次モード

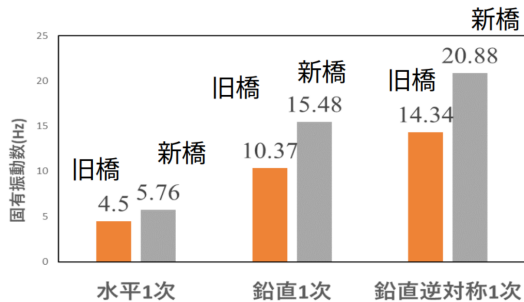


図-17 固有振動数の低減

モード(面内モード), 水平方向2次振動モード(面外モード), 鉛直逆対称1次振動モード(面内モード), 鉛直方向2次振動モード(面内モード), 鉛直逆対称2次振動モード(面内モード)を推定し, 各モードの固有振動数を確認した。

b) 解析結果

本橋の卓越振動モードである鉛直逆対象一次振動モード図を図-16にみなし新設時と27年経過時の固有振動数の比較を図-17示す。

みなし新設時と27年経過時の固有振動数の低減から曲げ剛性の低減を確認する。固有振動数の低減は水平一次振動モード:21.8%, 鉛直対称1次モード:33.0%, 鉛直逆対称1次振動モード:31.3%となった。本橋の卓越振動数として鉛直逆対称一次振動モードの固有振動数を代表値とすると27年での曲げ剛性の低減は30%程度であると推定された。材料試験によって算出されたヤング率と新橋ヤング率との比較ではアーチリブや床桁等主構造部材で10%~20%程度の低下となったが振動解析によって算出された固有振動数では, 30%程度の低下となった。この影響は, 数値解析で考慮した断面欠損の影響であると考えられる。そのため, ヤング率の低減だけではなく, 欠損箇所的位置から橋梁全体の曲げ剛性の低減を推測する診断法も今後, 検討できると考えられる結果となった。

6. まとめ

本研究では27年経過した木橋部材の測定値と架替え後の新橋部材の測定値を比較し, 27年での劣化度について明らかにした。また測定したヤング率を用いて数値解析を行い, 27年経過時の構造性能について検討を行った。

本研究の結果から, 腐朽など劣化が確認された集成材木橋でも, 安全に使用できる程度の剛性を有しており, 長期供用が可能であることが確認できた。しかし, 腐朽による断面欠損などの影響によって構造全体の固有振動数が低減することも確認され, 欠損箇所によっては架替えの検討も行うべきという結果となった。また追加検討として実施した雪荷重に関する検討では, 除雪なしの雪荷重を考慮した場合, 圧縮応力は許容値以上になり座屈荷重を超えていることから除雪の有無による危険性も確認された。今後の課題として, 点検・劣化診断を正確に行える診断法の検討と積雪を考慮した構造形式の考案などを行い, 点検者・管理者にとって木橋が扱いやすいと思われるような提案も継続して行い, 木質構造物の普及促進に力を入れていく必要がある。

参考文献

- 1) 林 知行: 増補改訂版 プロでも意外に知らない<木の知識>, (株) 学芸出版社, pp. 250-259, 2021.
- 2) 秋田県立大学木材高度加工研究所: コンサイス木材百科, (財) 秋田県木材加工推進機構, pp. 164-165, 1998.
- 3) 国土交通省: 令和元年度 国土交通省における木材利用推進状況, pp. 1-3, 2020.
- 4) 国土交通省: 道路統計年報 2020 橋梁の現状, 表 39, 2020.
- 5) 軽部 正彦, 宮武 敦, 鈴木 憲太郎, 加藤 英雄: ボンゴシ材を用いた公園用木橋の落下調査報告, 日本建築学会技術報告集, pp. 89-92, 2001.
- 6) 渡辺 浩, 田中 圭, 森 拓郎, 千田 知弘: 劣化したボンゴシ材の曲げ強度と面圧強度に関する検討, 構造工学論文集, pp. 723-728, 2014.
- 7) (財) 国土技術研究センター: 木歩道橋設計・施工に関する技術資料, pp. 184-232, 2003.
- 8) (財) 日本住宅・木材技術センター: 木橋設計施工の手引き 木橋づくりの新時代, (株) ぎょうせい, pp. 91-111, 1995.
- 9) 小林 敬治: 機械構造動力学, 日本機械学会 宇宙工學部門, URL: <https://www.jsme.or.jp/sed/guide/dynamics5.pdf>
- 10) 農林水産省: 構造用集成材の日本農林規格, pp. 18-20, 2003.
- 11) 浪江 和隆, 焦 鍵, 杉野 未奈, 多幾山 法子, 林 康裕: 応力波伝播法に基づく木材完全非破壊型ヤング係数の推定法の提案, 日本建築学会構造系論文集 78, pp. 833-838, 2013.
- 12) 木材保存剤一性能基準及びその試験方法, JIS K1571:2010.
- 13) 山井 良三郎: 木材の強度特性について, 材料試験 10 巻 98 号, pp. 869-874, 1961.
- 14) 沢田 稔: 直交異方性材料としての木材の弾性および強度, 「材料」第 12 巻 121 号, pp. 749-753, 1963.