

集成材桁に用いる鋼板挿入ドリフトピン接合部の数値モデル化

環境構造工学分野 8023802 安部 隼生
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

近年カーボンニュートラルの観点から土木構造物への木材利用が期待されている。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いが、新たに開発されている床版開閉式構造を取り入れた木製歩道橋¹⁾²⁾は10m程度のスパンであれば、集成材桁のみでも必要な剛性を十分に確保できる。しかし、10m程度の集成材桁であっても、山間地域への搬入や施工においては、複数に分割して継手を設けることが現実的である。集成材梁の接合方法として一般的なのは鋼板挿入ドリフトピン接合部である。これは、建築分野の木質構造物の骨組などに多用されているが、こうした継手はラーメン隅角部の直角接合となるため、直交する2本の部材それぞれの曲げとせん断に抵抗するように円形にドリフトピンが配置されることが多い。木橋の桁の接合の場合は、同一軸上にある部材の曲げに抵抗することに特化してドリフトピンを配置することが効率的であるため、桁の圧縮側と引張側にドリフトピンを集中して配置されることが多い。こうした同一軸上にある桁どうしのドリフトピン継手に対する実験や数値解析は多いとは言えず³⁾、木材にめり込みながら降伏して各種のモードに変形するピンの挙動を数値モデルで再現することは意味がある。そこで、本研究では、木橋の集成材桁において同一軸上で突き合わされた継手部の鋼板挿入ドリフトピン接合部において、想定される荷重に対し、ドリフトピン全体がどのような挙動を示すのか^{4) 5)}を確認するため、構造試験によって得られたデータをFEMソフトで弾塑性解析を行い数値モデル化した。

2. 構造試験

(1) 継手部の設計

各基準に準拠し⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾接合部の設計を行った。今回設計する継手の諸寸法を表-1に示す。

(2) 試験概要

鋼板挿入ドリフトピン接合の挙動を確認することを目的として、鋼板挿入ドリフトピン接合部のドリフトピンが降伏し試験体が破壊を起こすまでの載荷とし、三等分点四点荷重法で試験を実施した。試験概略図を図-1、継手部詳細を図-2、試験時の試験体を図-3に示す。また、本試験では図-1に示すとおり、試験体の集成材の固定端と中央の表と裏それぞれに変位計を計8台設置し変位を測定し、鋼板に設けたドリフトピン用の先孔の近傍にドリフトピンが孔に接触する側の軸方向圧縮ひずみを測定するために図-4に示すようにひずみゲージを貼って軸方向圧縮ひずみを測定した。

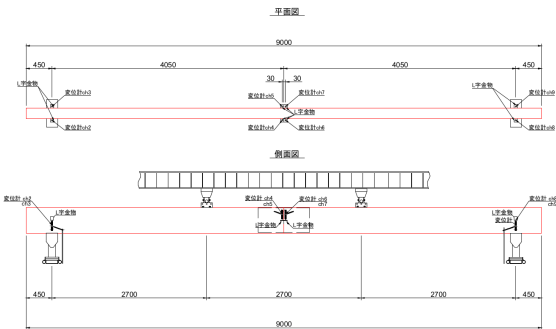


図-1 試験体概略図

表-1 継手の諸寸法と断面定数

集成材（母材） （スギ集成材 E75-F240）	断面	高さ： $h_{\text{木}}$	450mm
		幅： $b_{\text{木}}$	180mm
	密度： ρ		380kg/m ³
	ヤング率： $E_{\text{木}}$		7500N/mm ²
	支圧強度： F_{e0}		19.4N/mm ²
	支圧強度： F_{e90}		9.7N/mm ²
鋼板 （ss400）	厚さ： $t_{\text{鋼板}}$		9mm
	高さ： $h_{\text{鋼板}}$		430mm
	幅： $b_{\text{鋼板}}$		900mm
	ヤング率： $E_{\text{鋼板}}$		206000N/mm ²
ドリフトピン （s45c）	直径： d		16mm
	長さ： ℓ		171mm
	材料強度： F		345N/mm ²

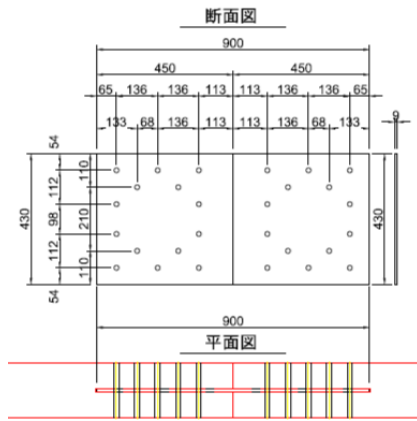


図-2 継手部詳細



図-3 試験時の全体

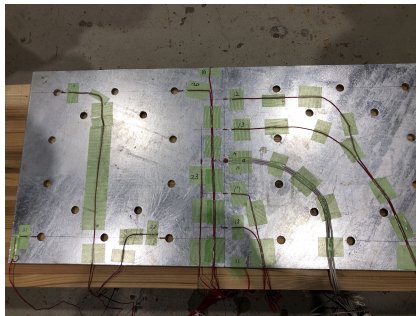


図-4 ひずみゲージ

(3) 試験体

試験体に用いる桁材は E75-F240 集成材で断面厚さ:180mm × h:450mm とする。1 本の長さは 4500mm として、2 本用いて長さ 9000mm の集成材桁とした。中央部に継手部として鋼板挿入ドリフトピン接合部を設けたモデルとした。継手用鋼板は l:900mm × h:430mm、厚さ 9mm の SS400 である。ドリフトピンの直径は d:16mm、l:180mm の S45C を用いた。また、ドリフトピンを打ち込む際の鋼板

の先孔は直径 17mm とし、木材は 16mm とした。集成材桁の鋼板挿入用のスリットは鋼板に対して軸方向の両側に 2mm、高さ方向にそれぞれ 10mm、厚さ方向は 1mm のクリアランスを設けた。

(4) 試験結果

試験結果から得られた破壊後の試験体全体の状態を図-5、図-6 に示す。試験体は梁の引張側のドリフトピンの配置に沿って割裂が起き、破壊した。破壊後のドリフトピンを取り出し確認したところ、図-7 に示すようにスギ集成材梁の引張側に配置されたドリフトピンは変形し、圧縮側に配置されたドリフトピンには大きな変形は確認できなかった。試験体中央部に設置した変位計によって得られた変位を荷重—変位関係で図-8 に示す。このグラフから試験体は 62.76kN で割裂破壊し、試験時に 45kN 載荷時点で大きな破裂音を確認したがグラフを見ても 45kN 付近で傾きが変化していることが確認できる。



図-5 破壊後の試験体 1

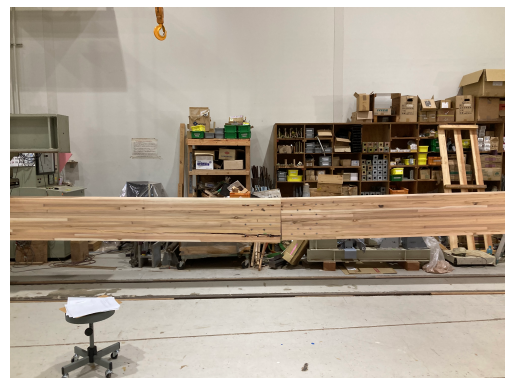


図-6 破壊後の試験体 2



図-7 破壊後のドリフトピン

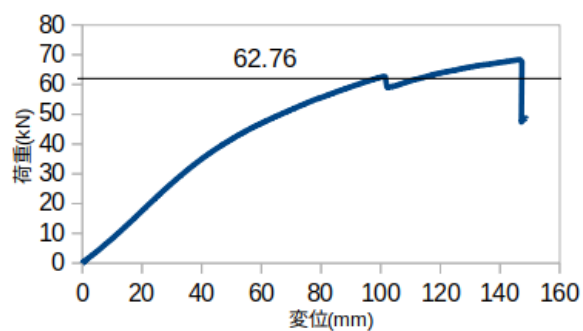


図-8 試験体中央部の荷重—変位関係

また図-9 に示すドリフトピンの No.1,3,12,14 の接触による軸方向圧縮ひずみひずみゲージによって測定したものの荷重—ひずみ関係のグラフを図-10,11, 12,13 に示す．これらのグラフから試験体の梁の圧縮側のドリフトピンは引張側のドリフトピンに比べて大幅に小さい値を示している．これは梁が圧縮による変形によって集成材の断面どうしが接触しめり込み，中立軸位置が圧縮側に移動したことで梁圧縮側の変位が小さくなったと考えられる．

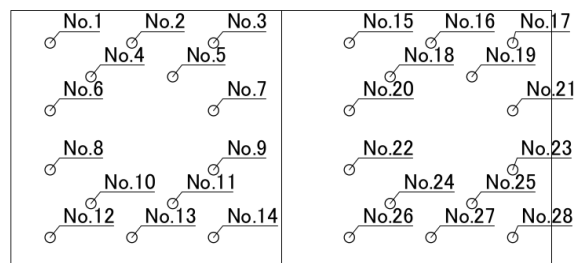


図-9 ドリフトピンの番号

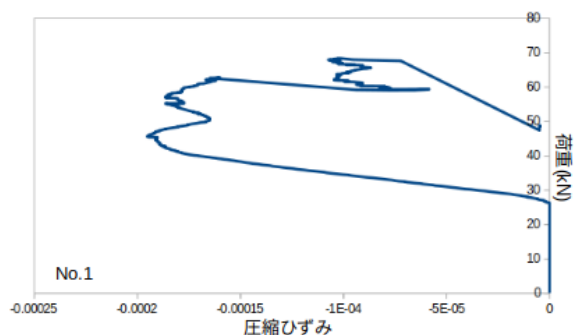


図-10 荷重—ひずみ関係 (pin1)

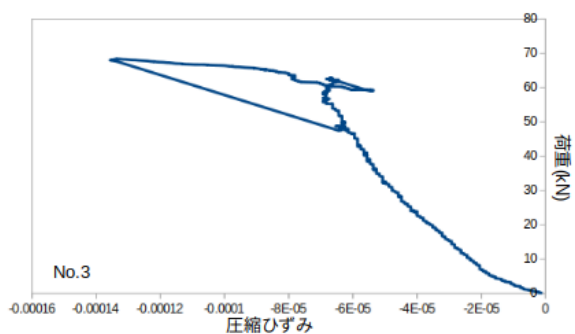


図-11 荷重—ひずみ関係 (pin3)

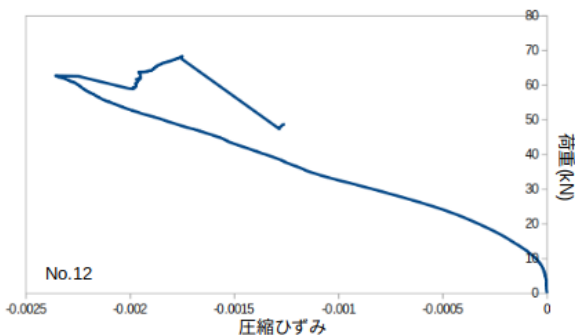


図-12 荷重—ひずみ関係 (pin12)

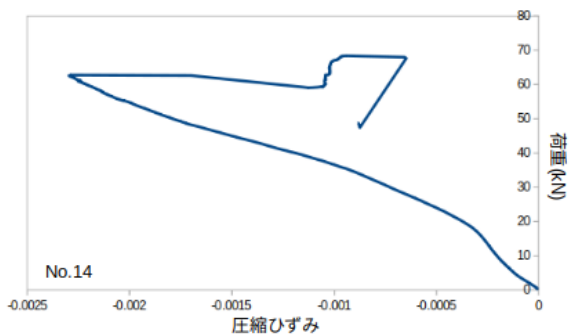


図-13 荷重—ひずみ関係 (pin14)

3. 数値解析

(1) 解析モデル

今回の破壊試験の変形挙動を FEM ソフトの salome __ meca を用いて再現し、検討を行う。解析モデルは試験体と同様の大きさのモデルを四面体要素で約 499 万要素に分割したもので、図-14、図-15 に示す。

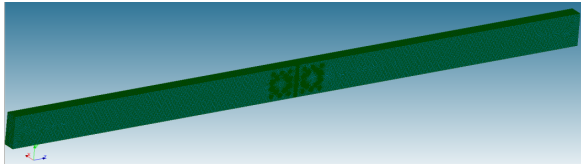


図-14 全体の解析モデル

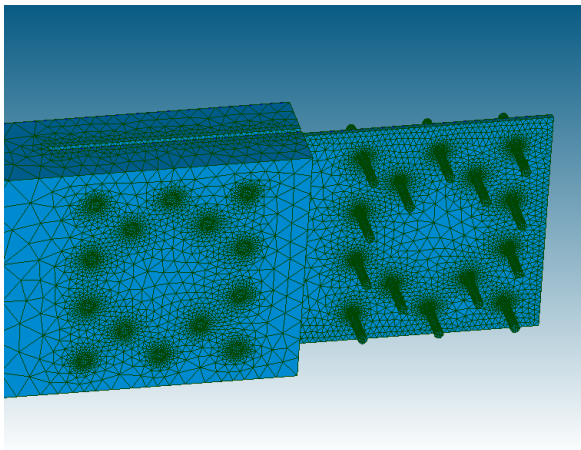


図-15 継手部の解析モデル

スギ集成材梁は応力波測定器 (FAKKOP) を用いて試験体の集成材のラミナごとのヤング率を測定し、その平均を用いた。ヤング率は直交異方性弾性としてとして、 $E_{zz}=9951.5\text{MPa}$, $E_{xx} = E_{yy} = \frac{E_{zz}}{25}$ とした。ポアソン比は $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.016$ とした。鋼板は SS400 とし、 $E = 206\text{GPa}$, ポアソン比は $\nu = 0.3$ とし、降伏点を $\sigma_Y=235\text{MPa}$ とした。ドリフトピンは S45C とし、 $E = 206\text{GPa}$, ポアソン比は $\nu = 0.3$, 降伏点を $\sigma_Y=345\text{MPa}$ とした。降伏条件はフォン・ミーゼスの降伏条件を用いる。応力—ひずみ関係はバイリニアモデルを用い、降伏後のヤング率を降伏前のヤング率 E に対し、降伏後のヤング率 E_t を $\frac{E}{1000}$ とした。

鋼板にはドリフトピンを打ち込むための先孔が設

けられているが、集成材の変形によりドリフトピンと鋼板の要素表面どうしの接触を、接触解析を用いずに簡易にモデル化するため、接触する面にごく僅かな要素を挿入し鋼板と同じヤング率を与え応力の伝達を再現した。鋼板に貼られたひずみゲージの有効長が 5mm であったことから解析では、孔の端から 5mm の要素の節点で確認した。また、試験結果から得られたスギ集成材梁の断面同士の接触についても梁上端から 120mm までを結合し、それより下の隙間には本解析の応力等に影響を与えないよう $E = 1\text{MPa}$ の要素を挿入した。

(2) 解析結果

試験によって得られたそれぞれのひずみと解析によって得られたひずみを荷重—ひずみ関係のグラフとして図-16,17, 18,19 に示す。これらのグラフを見ると、試験時に確認できた梁の圧縮側に配置された No.1,3 のドリフトピンが鋼板の先孔に接触した際の軸方向圧縮ひずみよりも、引張側に配置された No.12,14 のドリフトピンが鋼板の先孔に接触した軸方向圧縮ひずみの方が大幅に大きいという挙動の再現ができていることが確認できる。

梁の引張側のドリフトピン (No.12,14) では、降伏後の傾きが大体一致していることから弾塑性解析によって試験時の鋼板に働く応力挙動がある程度の精度で再現できている。No.12 では実験値が約 10kN あたりまではほぼ線形で、解析値では約 20kN までほぼ線形となっており、No.14 では実験値が約 15kN までほぼ線形で、解析値は約 25kN までほぼ線形となっており、両方ともそれ以降は降伏が始まっていると考えられる。実験値と解析値での降伏までの荷重の差はそれぞれ約 10kN ほどの差を確認することができた。このことから梁の引張側の圧縮ひずみは解析値が実験値より少し剛性が高くなっているという結果が得られた。梁の圧縮側では、62kN 時点での最終的なひずみの値は大体一致しているが、そこに至るまでのひずみ挙動はあまり再現ができていないことが確認できる。

また、弾塑性解析によるドリフトピン全体の降伏

モード（破壊形状）を図-20 に示す．図-7 に示したドリフトピンの降伏モードと比べても同じ降伏モードを示しているのが分かる．

これらの結果から試験結果のひずみの挙動の高精度の再現には至らなかったが，ある一定の荷重をかけた際のドリフトピンの降伏モードの再現や推測は可能なモデルであると考えられる．今回，梁圧縮側の圧縮ひずみが梁引張側よりも大幅に小さい挙動を接触条件を用いずに再現できていた理由として，試験時に梁の断面どうしの接触による中立軸位置の移動を考慮し要素の結合を行ったことで，弾塑性のみでも再現可能となったと考えられる．図-21 に示すように，試験時の中立軸位置は梁の圧縮側に移動していることも確認できたため，あらかじめ結合して解析を行ったことで再現できていることは妥当であると考えられる．ただ，圧縮側のひずみの挙動として再現できていない．その理由として，試験体の加工時に生じた初期不整によるドリフトピンごとの荷重—ひずみ曲線のばらつきが原因だと考えられる．今回集成材の加工から試験までの期間が少し空いたことから木材が収縮し，先孔が鋼板とずれる現象が起きた．ドリフトピンを打ち込む際に無理やり打ち込んだり，先孔を少し広げたことで初期不整が増え，試験結果のドリフトピンごとの荷重—ひずみ曲線にばらつきが出たと考えられる．また，試験と解析結果の妥当性として，鋼板がドリフトピンより降伏点が低く，ドリフトピンが降伏して曲がっている試験結果から鋼板の先孔は接触による応力で降伏していると考えられるため，傾きが変化し，降伏した挙動を示しているのは試験結果と解析結果共に妥当であると考えられる．今回の試験体の割裂破壊は試験時にドリフトピンを打ち込む際にできた小さな割れ集成材梁のドリフトピン用の先孔の拡大が大きく作用していると考えられる．本解析において試験時よりも解析結果のほうが剛性が高くなっている理由としても小さな割れが原因の1つだと考えられる．

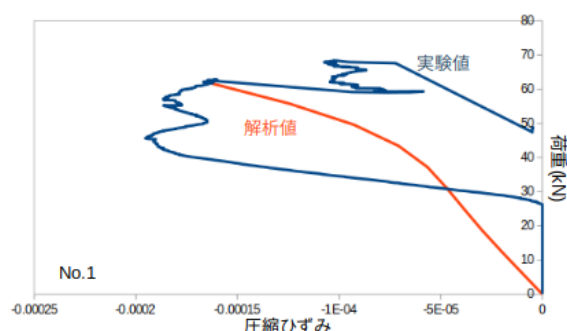


図-16 解析の荷重—ひずみ関係 (pin1)

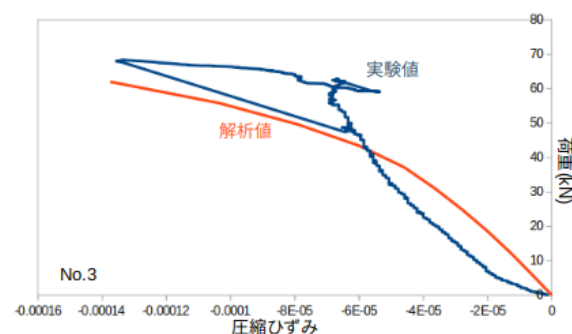


図-17 解析の荷重—ひずみ関係 (pin3)

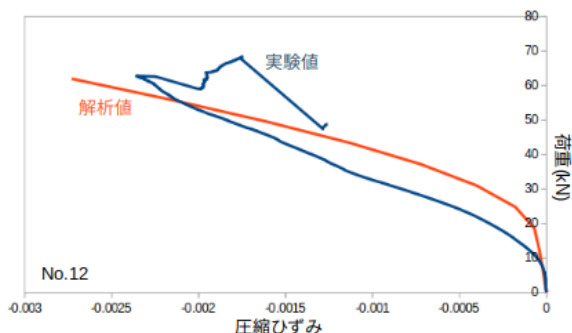


図-18 解析の荷重—ひずみ関係 (pin12)

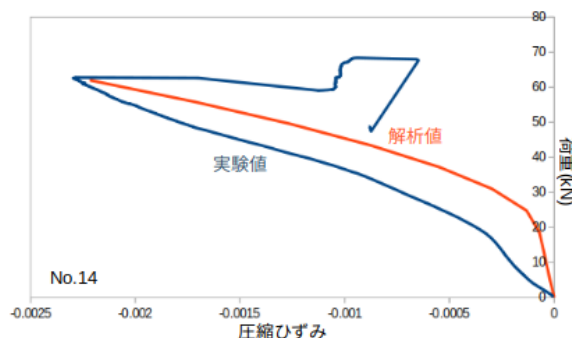


図-19 解析の荷重—ひずみ関係 (pin14)

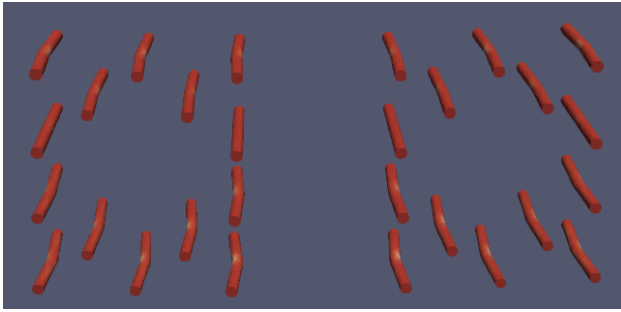


図-20 解析のドリフトピンの降伏モード

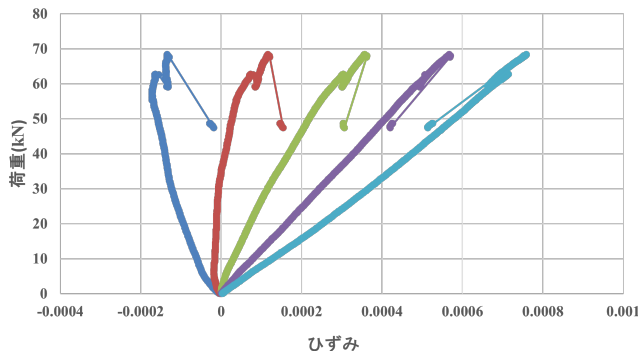


図-21 試験時の支間中央ひずみ

4. まとめ

本研究では、集成材桁を想定した鋼板挿入ドリフトピン接合部の荷重に対するドリフトピン全体がどのような挙動を示すのかを載荷試験によって確認し、挙動を再現できる数値モデル化を検討した。載荷試験では、梁の引張側に配置されたドリフトピンが降伏することが確認された。鋼板のほうがドリフトピンより降伏点が高いためドリフトピンが降伏していることから、接触されている鋼板の孔も圧縮によって降伏していることが考えられる。

数値解析では、弾塑性解析を行い試験時の挙動の再現を試みた。その結果、試験時に得られた軸方向圧縮ひずみの高精度な再現には至らなかったが、梁の引張側に配置されたドリフトピンの荷重に対する降伏モードや、鋼板の軸方向圧縮ひずみはある程度の挙動の再現ができていると考えられる。試験結果から得られた中立軸位置の移動をあらかじめ集成材どうしの接触面の要素を結合したことが再現できたことに大きく影響したと考えられる。また、本解析では試験時の破壊挙動が弾塑性解析のみで再現可能

であるか検討したが、梁の圧縮側では初期不整による試験結果の妥当性の問題や、梁の引張側では解析結果が少し剛性が高いという結果から、挙動の再現という観点では少し課題の残る結果となった。

今回数値モデル化を検討した破壊形状として、ドリフトピンを打ち込む際にできた小さなひび割れや、先孔を少し広げたことで応力を負担できていないドリフトピンが生まれたことなどの初期不正によってドリフトピンの変形によるめり込みなどから梁の引張側のドリフトピン付近の応力が集中した箇所で割裂破壊が起きたと考えられる。

このように今回の試験結果は鋼板挿入ドリフトピン接合部の様々な破壊挙動の一例であると考えられるため、本研究結果の妥当性を確認するために、今後は複数回における試験を行い、今回の破壊挙動の再現性や試験結果の異なる場合での数値モデル化や、接触による複雑な挙動の高精度な再現ができる解析手法の検討を行い、材料定数を変更するだけで試験結果の予測ができるような解析手法の提案を目指していきたい。

参考文献

- 1) 及川大輔, 野田龍, 後藤文彦, 森岡吉己: 雪荷重の軽減を目的とした床版持ち上げ型木橋の屋外暴露試験, 第73回木材学会大会講演概要集, 2023/3.
- 2) 及川大輔, 野田龍, 後藤文彦, 青木由香利, 森岡吉己: 雪荷重の軽減を目的とした床版閉閉式木橋の積雪軽減性能について, 土木学会論文集, 80巻, 28号, p. 1-8, 2024/3.
- 3) 薄木征三, 佐々木貴信, 長谷部薫, 大原真也: 鋼板・樹脂およびピンによる集成材主桁の接合, 構造工学論文集, Vol. 44A, p. 1241-1250, 1998.
- 4) 野口昌宏, 坂田弘安, 宮澤健二: 木質鋼板単体ボルト接合のせん断力 - すべり量関係算定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻 第647号, p157-164, 2010.
- 5) 蒲池健, 稲山正弘, 安藤直人: 鋼板挿入式ボルト・ドリフトピン接合部における荷重 - すべり特性の評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻 第627号, p795-802, 2008.
- 6) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説 - 許容応力度・許容耐力設計法, 2006.
- 7) 日本建築学会: 木質構造接合部設計事例集, 2012.
- 8) 日本住宅・木材技術センター: 木造化推進標準設計施工マニュアル作成等報告事業報告書, 1991.
- 9) (財) 林業土木コンサルタンツ: 実務者のための木橋の設計と施工, pp.78-79, 2005.
- 10) (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, 2003.
- 11) (財) 日本住宅・木材技術センター: 木橋設計施工の手引 木橋づくり新時代, pp.39-68, 1995.