

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02303

研究課題名（和文）高強度化された木質構造接合部を対象とした割裂耐力の推定方法の提案

研究課題名（英文）Proposal of a Method for Estimating Cracking Strength of High-Strength Wooden Structural Joints

研究代表者

神戸 渡（Kambe, Wataru）

関東学院大学・建築・環境学部・教授

研究者番号：90453000

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、集成材の梁端部にもうけたドリフトピンを用いた鋼板挿入型接合部を対象として、その割裂耐力とせん断耐力に関する検討を行った。これらの接合部では、割裂破壊とせん断破壊が発生すると言われているが、その破壊性状が明確になっておらず、耐力式の活用も難しい現状である。そこで接合部の試験を行い、詳細な観察を通して破壊性状の分類・定義づけを行った。それらの耐力を推定するために新しく材料試験を行い、それらの5%下限値を得て、耐力式に適用した。その結果、木規準より正しく破壊性状を判定し、且つ木規準よりも精度よく耐力を算出できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現行の木規準には、破壊性状がどのようなものであるかが明確に示されていない。また、割裂破壊定数もしくはせん断強度が用いた場合、どのような荷重変形関係になるのか、その精度はどの程度であるのかが示されていない。そのため設計者が判断に困る現状となっている。

本研究では破壊性状を明確にすることができた。本研究では新たに実施した材料試験の5%下限値を用いて評価することを提案した。この値を用いた場合、破壊形式を正しく判断できるだけでなく、現行の式よりも精度よく耐力が算出することができる。設計者に対して、より設計しやすくなる情報を提供することができた。

研究成果の概要（英文）：This study examines the application of the proof stress formula to joints reinforced with steel plates and drift pins in glued laminated timber beams. Despite reports of splitting and shear failures in these joints, existing knowledge fails to elucidate the precise nature of these failures, hindering effective utilization of strength-bearing formulas. Consequently, tests were conducted varying the drift pin arrangement and beam strength to classify and define fracture properties through meticulous observation. Furthermore, novel material tests were performed to estimate bearing capacity. Traditionally, chair-type shear tests provide conservative estimates for shear failure; however, this study employed inverse symmetry tests for a more accurate assessment. The results demonstrate that, for each fracture type, joint-strength can be more precisely calculated compared to current standard formulas.

研究分野：構造工学

キーワード：集成材 割裂耐力 せん断耐力 接合部 ドリフトピン

1. 研究開始当初の背景

木質構造建築物の構造性能は接合部の性能で決まると言われている。そのため建築物の構造性能を高めるためには、接合部の耐力や変形能力を高める必要がある。近年、注目されている中大規模木造の建物では、固定荷重・積載荷重・地震力等の外力が大きくなり、接合部に発生する応力が大きくなるため、接合部の高強度化が必要となる。そのような高強度化した接合部では、割裂破壊が発生しやすいと言われている。図1は繊維方向と直交する向きに荷重が作用した場合の例、図2は繊維方向と平行する向きに荷重が作用した場合の例である。このように木材の繊維方向へ割れが本研究で対象とする割裂破壊である。これらは破壊力学におけるモードⅠ、モードⅡに当たる。現行の木質構造設計規準・同解説(以下、木規準)¹⁾に示されている接合部の耐力式は、破壊モードとして割裂破壊を十分に考慮できていないため、割裂耐力を推定することが難しい。木規準では割裂が生じないように、ボルトなどの接合具の配置条件を定め、多数本用いる場合は、その本数に応じた低減係数を定めている。しかし、木規準に示されている耐力式が定式化された当時、現在求められているような高強度化は想定されていない。つまり接合具の本数が増えることによる破壊性状の変化を想定していなく、適した低減係数ではない。よって、現行の木規準に示されている耐力式では、高強度化した接合部の設計をするには限界があり、最も問題となる点が割裂破壊に対して危険側の評価になる可能性を孕んでいることである。試験をすると想定よりも小さい耐力となることもあることから、設計耐力が過大に安全側となるような設計をせざるを得ず、合理的な設計の障害となっている。このような問題点があるため、割裂耐力を精度よく推定できる手法の需要が非常に高まっている。



図1 割裂破壊の例

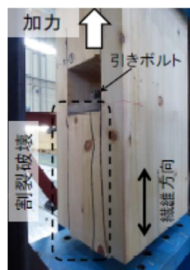


図2 割裂破壊の例

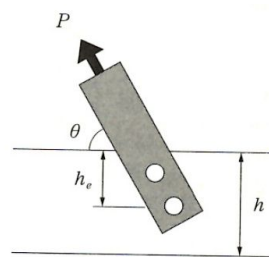


図3 接合部の模式図

2. 研究の目的

木規準¹⁾では、接合部の終局耐力は、割裂破壊もしくはせん断破壊の耐力式の小さい値を採用することとしている。木規準に示されている接合部の模式図を図3、耐力式を式1)～3)に示す。しかし、高強度化した接合部において、どのような破壊性状が割裂破壊もしくはせん断破壊となるかが明確に判断することが難しい現状である。よって、接合部の破壊性状と耐力式が関係性も不明な点が多い現状である。

そこで、接合部の加力試験を通して割裂破壊とせん断破壊を詳細に観察・検討し、耐力の算出方法・設計式の適切な活用方法を提案することが本研究の目的である。

終局耐力 P_{uw}

$$P_{uw} = \min\{P_{uw1}, P_{uw2}\} \quad \dots \text{式1)}$$

$$\text{割裂耐力式 } P_{uw1} = \frac{2}{\sin\alpha} \cdot C_r \cdot l \cdot \sqrt{\frac{h_e}{1 - h_e/h}} \quad \dots \text{式2)}$$

$$\text{せん断耐力式 } P_{uw2} = \frac{2}{3\sin\alpha} \xi \cdot h_e \cdot l \cdot F_s \quad \dots \text{式3)}$$

ここで、 C_r : 割裂破壊定数、 h : 材せい、 h_e : 加力材縁から最も遠い接合具までの距離、 l : 主材厚、 F_s : 木材のせん断強度、 ξ : せん断力比(本研究では1)、 α : 角度(本研究では90°)

3. 研究の方法

研究の方法として、材料試験と接合部の加力試験を行った。材料試験として、木規準¹⁾に準拠した割裂破壊定数を求めるための試験、JISに準拠したせん断強度を求めるための試験²⁾(イス型せん断試験)、日本住宅・木材技術センターの試験方法に準拠した試験(逆せん断試験)³⁾を実施した。接合部の加力試験は、割裂破壊もしくはせん断破壊が優先して発生すると発生すると予測できるものを用意し、試験する。それらの破壊試験を通して、破壊形式の定義を行う。それらの破壊形式の耐力に対して、得られた材料値を耐力式に入力する方法を検討し、その推定精度を検討する。

4. 研究成果

1) 材料試験

割裂耐力式のための材料値である割裂破壊定数 C_r を求めるための材料試験を行う。試験方法は木規準¹⁾に示されている方法に準拠する。試験方法を図4、試験の様子を図5に示す。本研究では試験体の厚さとドリフトピン径をパラメータとする。材厚は60mmと120mmの2種類とする。木規準¹⁾に準拠し、各試験体の端距離はドリフトピン径の15倍、縁距離はドリフトピン径の4倍とする。加力用のドリフトピン径は、16、18、20の3種類とする。試験体数は各パラメータ3体ずつとし、計18体である。割裂破壊定数は、式4)を用いて算出する。本研究では F_u として最大荷重を用いた。

C_r の算出結果一覧として、平均値 $16.3 \text{ N/mm}^{1.5}$ 、5%下限値として $12.6 \text{ N/mm}^{1.5}$ が得られた。この値は木規準の値 $12.6 \text{ N/mm}^{1.5}$ とほぼ同値で合った。5%下限値の算出には式5)を用いた。

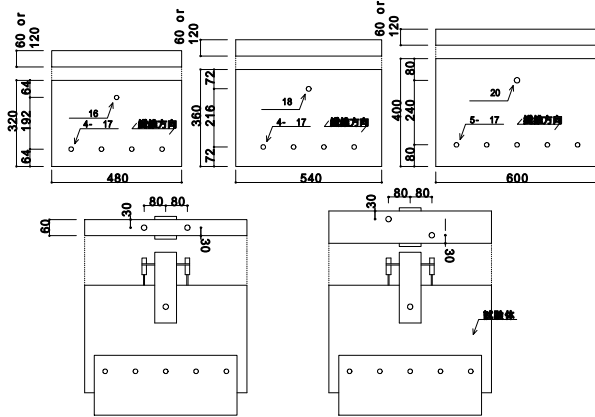


図4 割裂破壊定数のための試験方法

図5 試験の様子

$$C_r = F_u / (2 \cdot l \cdot h_e) \quad \dots \text{式4)}$$

ここで、 F_u : 割裂荷重 (ここでは最大荷重)、 $l \cdot h_e$: 前述と同様。

$$TL = \bar{x} - K \cdot s \quad \dots \text{式5)}$$

ここで、許容限界値 (本研究では5%下限値と呼ぶ) \bar{x} : 平均値、 K : 定数、 s : 標準偏差。

せん断耐力式のための材料値であるせん断強度を求めるための材料試験を行う。加力形式の異なる2種類の試験を実施したが、最終的に選択した試験について説明する。実大部材のせん断強度を得る試験方法が日本住宅・木材技術センターの試験マニュアル³⁾に示されており、そこに示されている逆対称4点荷重法 (以下、逆せん断試験) より、せん断強度を求める。

試験より得られた値は、平均値で 6.22 N/mm^2 、5%下限値で 4.16 N/mm^2 であった。木規準¹⁾に示されている値は 3.0 N/mm^2 であり、1.39倍高い値で合った。

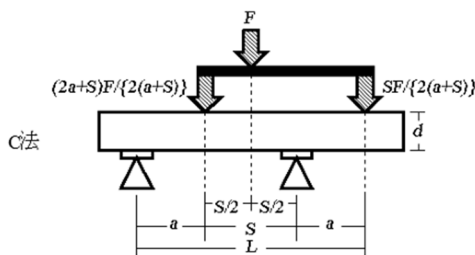


図6 逆せん断試験の概要

図7 試験セットアップ

2) 接合部の加力試験

本研究では、集成材梁の端部にドリフトピンを用いた鋼板挿入型接合部を設けた試験体を用意し、鉛直方向の単調加力試験を行った。試験体のセットアップの状況を図8、ドリフトピン配置の例を図9に示す。集成材にはオウシュウアカマツの集成材を用いた。

試験において、割裂破壊とせん断破壊の視覚的な破壊性状を分類した。図10の左が割裂破壊で、大きく開口し、加力側から最も離れたピンから破壊が発生するものであった。図10の右がせん断破壊であり、割裂と比べると開口が小さく、割裂破壊とは別の場所からの破壊であった。それぞれの破壊における荷重-変形関係の例を図11,12に示す。

試験結果の一覧を表1に示す。表で判定が×となっているものは、実際の破壊形式と推定の破壊形式が一致しないものであり、木規準の値を用いた場合に多く×が見られた。一方で、本研究で提案する値を用いた場合、×であったところが○に更新され、木規準よりも正しく破壊形式を判定できる結果であった。

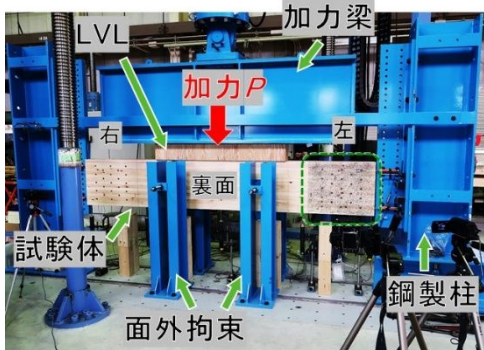


図8 試験のセットアップ

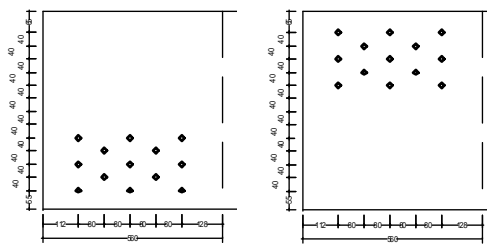


図9 ドリフトピン配置の例

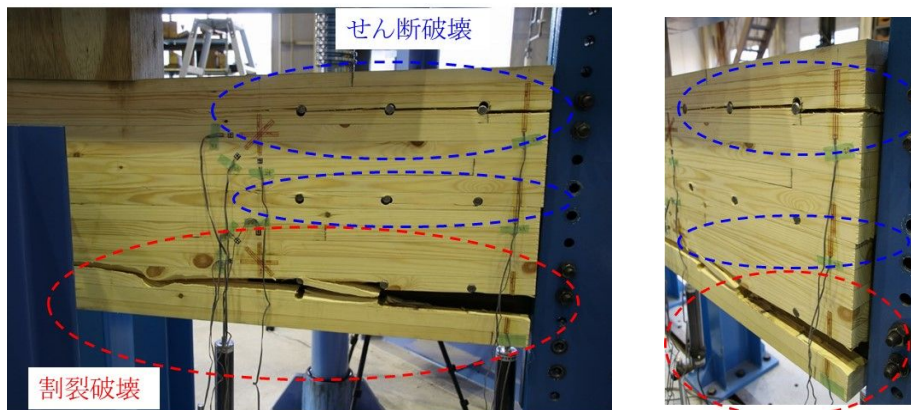


図10 割裂破壊とせん断破壊の例

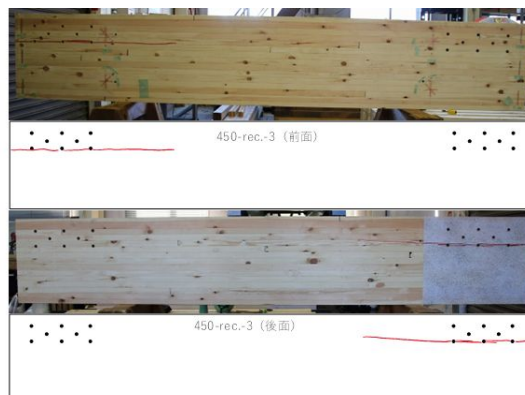
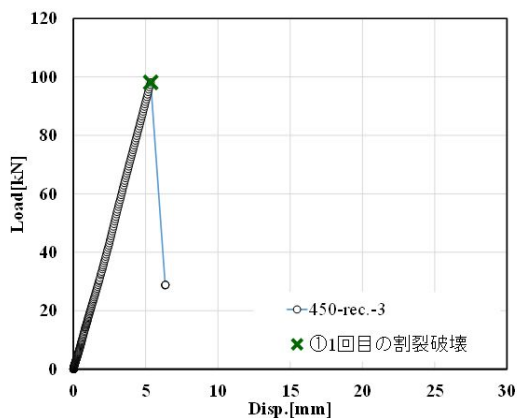


図11 荷重-変形関係と破壊状態 (割裂破壊)

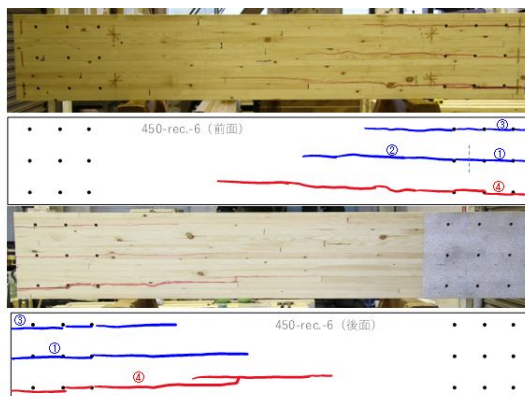
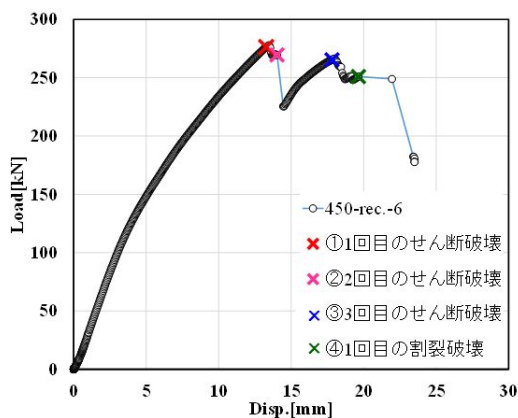


図12 荷重-変形関係と破壊状態 (せん断破壊)

図13にそれぞれの破壊形式における予測値と実験値の比較を示す。同図に示す通り、計算値が安全側で且つ、精度よく推定できていることがわかる。図14に木規準における設計値(黒点)と本研究で提案した値を用いた場合の設計値(赤点)と実験値の比較を示す。同図に示す通り、黒点よりも赤点の方が45度の線により近づいており、本研究で検討した方法の方が設計値としての精度が向上していることが見て取れた。

3) まとめ

本研究では、接合部で発生する割裂破壊とせん断破壊に対して、耐力の算出方法・設計式の適切な活用方法を提案すること目的として検討を進めた。接合部試験における破壊挙動を詳細に観察することで、割裂破壊とせん断破壊の特徴を定義することができた。その特徴に対して、別途行った材料試験の5%下限値を設計式に入力することで、接合部における破壊性状を木規準の値を用いた場合より、正しく判定できることを示した。その計算値は実験値と正の相関があり、かつ木規準の値を用いた場合より計算精度精度が高いことを示した。

表1 試験結果一覧

		実験値[kN]		木規準に対する検討			材料試験の5%下限値に対する検討		実験値 vs 設計値の判定
		割裂破壊	せん断破壊	割裂破壊 (Cr=12.0)	せん断破壊 (Fs=3)	実験値 vs 設計値の判定	割裂破壊 (Cr=12.6)	せん断破壊 (Fs=4.16)	
2期	450-rec.-2	278	-	260.2	161.7	×	273.2	224.2	×
	450-rec.-3	98	-	73.7	60.9	×	77.4	84.4	○
	450-rec.-4	224	-	128.0	111.3	×	134.4	154.3	○
	450-rec.-5	335	323	260.2	161.7	○	273.2	224.2	○
	450-rec.-6	249	276	260.2	161.7	○	273.2	224.2	○
	600-rec.-2	442	-	388.6	228.9	×	408.0	317.4	×
	600-rec.-3	174	-	95.6	94.5	×	100.4	131.0	○
	600-rec.-4	257	-	165.2	161.7	×	173.5	224.2	○
	600-rec.-5	346	475	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.-6	354	437	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
3期	600-rec.7-1	399	435	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.7-2	358	417	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.8-1	399	465	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.8-2	419	419	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.9-1	435	459	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.9-2	401	458	388.6	228.9	○	408.0	317.4	○
	600-rec.10-1	222	-	125.5	128.1	○	131.8	177.6	○
	600-rec.10-2	236	-	125.5	128.1	○	131.8	177.6	○
	600-rec.11-1	311	-	165.2	161.7	×	173.5	224.2	○
	600-rec.11-2	294	-	165.2	161.7	×	173.5	224.2	○
1期	450-rec.-1	290	271	260.2	161.7	○	273.2	224.2	○
	600-rec.-1	380	421	326.6	220.5	○	343.0	305.8	○

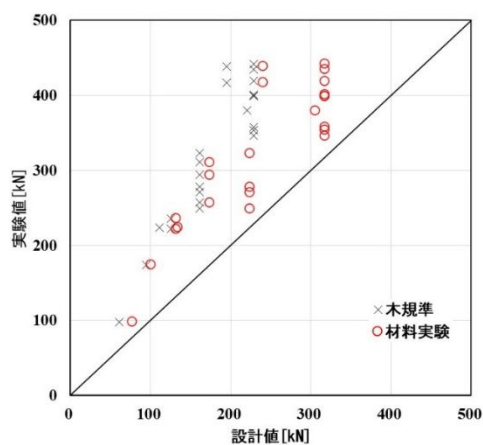
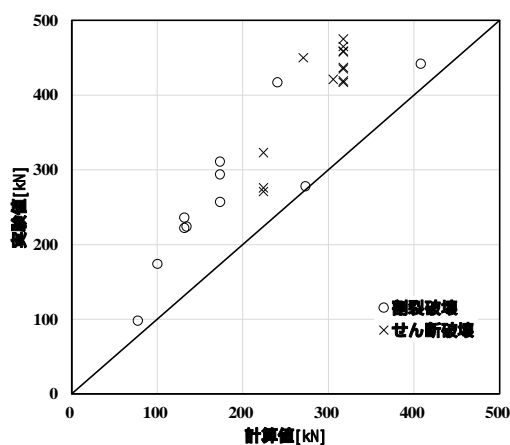


図13 実験値と計算値の比較 (材料試験の5%下限値) 図14 実験値と設計値の比較

参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計規準、2006
- 2) 日本産業規格、JIS Z 2101、木材の試験法、2019.
- 3) 日本住宅・木材技術センター、構造用木材の強度試験マニュアル、2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 神戸 渡、落合陽、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、中島昌一、小川敬多	4. 巻 52
2. 論文標題 集材材端部に設けたドリフトピンを用いた鋼板挿入型接合部における割裂破壊とせん断破壊の特徴	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 関東学院大学工学総合研究所報	6. 最初と最後の頁 17 26
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鈴木賢人、神戸渡、落合陽、岡本滋史、小林研治、澤田圭、瀧野敦夫、中島昌一	4. 巻 69B
2. 論文標題 大断面集材材梁端部におけるドリフトピンを用いた鋼板挿入型接合部に対する破壊性状の分析の評価に関する考察 - 円形配置と矩形配置における検討 -	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 85 98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijjse.69B.0_85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 神戸 渡、落合 陽、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、中島昌一
2. 発表標題 高強度化された木質構造接合部の割裂耐力に関する研究 その2 ドリフトピンを用いた接合部の繊維直交方向加力試験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神戸 渡、落合 陽、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、中島昌一
2. 発表標題 高強度化された木質構造接合部の割裂耐力に関する研究 その3 割裂破壊とせん断破壊に対する検討
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神戸 渡、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、中島昌一、落合 陽
2. 発表標題 集成材梁端部に設けたドリフトピンを用いた鋼板挿入型の接合部における破壊性状 - 割裂破壊・せん断破壊に着目した検討 -
3. 学会等名 第26回 木質構造研究会 技術発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬川昌大、神戸 渡、鈴木賢人、落合陽
2. 発表標題 ドリフトピンを用いた鋼板挿入型を適用した集成材梁の割裂破壊試験
3. 学会等名 2021年度日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神戸 渡、落合 陽、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、中島昌一
2. 発表標題 高強度化された木質構造接合部の割裂耐力に関する研究 その4 実大接合部試験における割裂破壊とせん断破壊の特徴
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野里惟、塩野谷健琉、北見留衣、中澤豪人、神戸渡、鈴木賢人
2. 発表標題 ドリフトピンを用いた鋼板挿入型接合部における割裂破壊とせん断破壊に関する考察
3. 学会等名 第27回 木質構造研究会 技術発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 98. 神戸 渡、田中 圭、藤田健司、落合 陽、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、中島昌一
2. 発表標題 高強度化された木質構造接合部の割裂耐力に関する研究 その5 実大の逆対称せん断試験による検証
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 97. 神戸 渡、田中 圭、落合 陽、鈴木賢人、瀧野敦夫、澤田 圭、岡本滋史、小林研治、小川敬多、中島昌一
2. 発表標題 集成材梁端部に設けたドリフトピンを用いた鋼板挿入型接合部の割裂破壊とせん断破壊の評価に関する考察
3. 学会等名 第74回 日本木材学会大会
4. 発表年 2024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
研究分担者	瀧野 敦夫 (Takino Atsuo) (10403148)	大阪工業大学・工学部・准教授 (34406)	
研究分担者	澤田 圭 (Sawata Kei) (10433145)	北海道大学・農学研究院・講師 (10101)	
研究分担者	岡本 滋史 (Okamoto Shigefumi) (20769806)	大阪公立大学・大学院生活科学研究科・講師 (24405)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	鈴木 賢人 (Suzuki Kento) (80757055)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	小林 研治 (Kobayashi Kenji) (90576240)	静岡大学・農学部・准教授 (13801)	
研究分担者	中島 昌一 (Nakashima Shoichi) (90734210)	国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・主任研究員 (82113)	
研究分担者	落合 陽 (Ochiai Yo) (90822346)	東京都市大学・建築都市デザイン学部・講師 (32678)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関