

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01582

研究課題名（和文）意匠性に配慮した既存木造建築の開口部補強構法の開発

研究課題名（英文）Structural reinforcement design of existing timber architecture

研究代表者

藤田 香織 (Fujita, Kaori)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：20322349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、透光性のある材料を用いた既存木造建築の開口部補強方法の提案、実験的検証、普及のための認定取得を目的としている。現在様々な補強構法が開発、活用されているが、計画・意匠的な要求と構造性能の確保、更にこれを実現するための予算（経済性）との調整は容易でない。本研究では、多くの既存木造建築を対象とした現地調査を踏まえ、計画的に無理なく、意匠性に配慮し、流通材（アクリルと木格子）を用いることで比較的安価な開口部補強構法を提案した。更に実物大の開口部補強の静的水平加力試験によりその性能を検証し、広く活用されることを目的に構造性能を検証する目的として行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

わが国の既存建築物の約6割は木造建築であり、そのほとんどは個人資産である木造戸建て住宅である。既存木造住宅の利活用・改修の際に、計画・意匠的な要求と構造性能の確保とこれを実現するための予算（経済性）との調整がつかず、改修工事を断念あるいは建て替えるという選択が取られることが多い。本研究費により、提案した木格子と透過性のある面材を利用した補強方向は、構造的に有効・計画的に無理なく・意匠的に遜色なく・施工性の良い・経済的にも無理のない、補強構法であり、学術的・社会的な意義は非常に高いといえる。

研究成果の概要（英文）：This research was operated to propose an efficient structural reinforcement device, suitable for Japanese timber architecture. Multiple structural reinforcement devices are available on the market. But to assure structural performance at the same time being affordable, easy to install and aesthetically allowable, is very difficult. We have developed a device using timber lattice and transparent board, and have operated multiple structural experiments to prove the structural performance. We have also installed the device to an existing timber house to experiment the installation efficiency.

研究分野：木質構造

キーワード：伝統木造 耐震 補強構法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

わが国の既存建築物のストックは現在約 74 億 m² (国土交通省発表資料・平成 27 年 1 月 1 日現在) に達しており、その量は年々増加している。既存建築物の約 6 割は木造建築であり、そのほとんどは個人資産である木造戸建て住宅である。既存建築物、特に既存木造住宅の利活用・改修の際に、計画・意匠的な要求と構造性能の確保とこれを実現するための予算 (経済性) との調整がつかず、改修工事を断念あるいは建て替えるという選択が取られることが多い。

また、わが国の国宝・重要文化財建造物は約 5 千棟指定されており、この数は年々増加している。各自治体の指定文化財、昭和 25 年に創設の伝統的建造物群保存地区制度、登録有形文化財制度 (平成 8 年制定) など、歴史的建造物の保護のあり方も多様化している。様々な歴史的建造物の保護や既存建築物の利活用という点で、構造的な安全性の確保の重要性は益々増えている。

既存木造建築の耐震補強をする際に有効な手法として、開口部を耐震壁に置き換える方法がある。構造的には非常に有効な手段であるが、計画・意匠上は不具合を生じるおそれがある。本研究では透光性のあるアクリルなどの材料を利用し、意匠性にも配慮した開口部の補強方法の開発と実用化実験を行う。

2. 研究の目的

本研究は、透光性のある材料を用いた既存木造建築の開口部補強方法の提案、実験的検証、普及のための性能評価と検証を目的としている。現在、様々な補強構法が開発活用されているが、計画・意匠的な要求と構造性能の確保、更にこれを実現するための予算 (経済性) との調整は容易でない。本研究では多くの既存木造建築を対象とした現地調査の実績を踏まえ、計画的に無理なく、意匠性に配慮し、流通材を用いることで比較的安価な開口部補強構法を提案することを目的として実施した。

3. 研究の方法

本研究は、実物大の開口部補強の静的水平加力試験によりその構造性能を明らかにした。2021 年度は、コロナ感染症対策のため当初予定していた追加の壁の実験は断念し、要素実験を行うことで 3 種類の補強壁の静的水平加力試験結果を解析的に検証した。更に、実在の木造戸建て住宅を対象に耐震診断を実施し、1 階の開口部に提案した補強壁を設置する施工実験を実施し、補強壁の適用性に関する検討を行った。

4. 研究成果

4.1 実大試験体による静的水平加力試験

実物大の試験体 3 体について、柱脚固定式の正負交番静的水平加力試験を行った。3 体の試験体は面材の補剛方法および格子接合部の組み方が異なる。既往研究では面材としてアクリル板を用いていたのに対し、本研究ではポリカーボネート板を用いている。ポリカーボネートは熱可塑性プラスチックの 1 種であり、耐衝撃性・耐候性・耐熱性・透明性などの性質を持ち、アクリルと比べると割れを起こしにくく柔軟性や加工性にも優れる材料である。試験体 A1 はビスを使用しない補剛の仕方のものを検討したものであり、試験体 A2 は試験体 H1 と格子接合部の仕様のみを変えたものである。

表 1 試験体一覧

試験体タイプ	略称	格子接合部	面材の接合	面材
ほぞ-ビス打ち型	A1	ほぞ	ビス打ち	ポリカーボネート
相欠き-ビス打ち型	A2	相欠き	ビス打ち	ポリカーボネート
嵌め込み型	H1	相欠き	嵌め込み	ポリカーボネート
既往研究		ほぞ	ビス打ち	アクリル

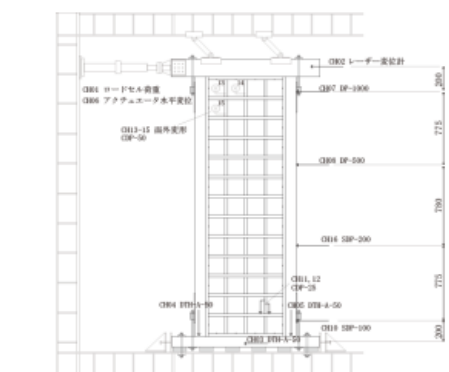


図 1 加力方法

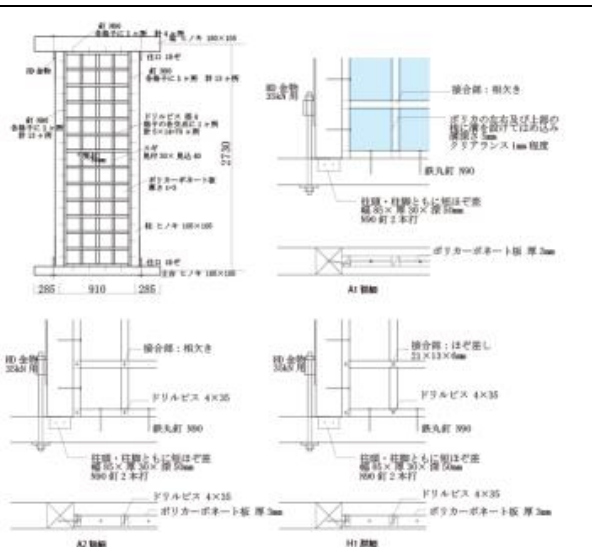


図 2 試験体詳細図

4.2 静的水平加力試験結果

試験体 H1 の荷重変形関係を図 3 に、各試験体および既往研究のアクリル木格子壁試験体の荷重変形包絡曲線を図 4 に示す。荷重変形関係はすべての試験体でほぼ正負対称のスリップ型の履歴を示した。A2 および H1 は変形角 1/15rad 以下の範囲では概ね同様の荷重変形関係を示した。また既往研究のアクリル木格子壁と比較すると、初期の剛性や耐力については試験体

A2, H1 と近い値を取っているが、ポリカーボネート板を用いた試験体 A2, H1 の方がより大きな変形角まで粘り強く水平力に抵抗しており、より高い靱性を発揮している。

嵌め込み型の試験体 A1 は 1/30rad 以降に面材が面外におおきく変形していく様子が確認された。また、面外への変形に伴って縦棧に割裂破壊が生じ、終局時には一部のポリカーボネート板が脱落した。試験体 A2 では 1/100rad の加力サイクルから面材の面外変形が目視で確認された。ポリカーボネート面材は引張ブレース的に作用しており、端部のビスが引っ張り力を支持し切れなくなって徐々に棧にめり込んでいく様子が観察された。目視でめり込みが確認されたのは 1/50rad からであり、最初は端部にのみめり込みによる変形が確認され、1/15rad 程度変形したところで中央部のビスにもめり込み変形が起こっている様子が目視で確認された。終局時にはビス周辺のめり込みや割裂の他、ビスの引き抜けやパンチング破壊も確認された。一方でポリカーボネート板自体は終局に至るまで脆性破壊を生じることはなく、加力後はビス穴の広がりを除いては概ね元の状態に戻っていた。

短期基準せん断力および壁倍率を算定した。短期基準せん断力は $PP_{uu} \times 0.2\sqrt{(2\mu\mu)}$ ないしは PP_{120} によって定まった。7mm 構造用合板片面張りの壁倍率はおよそ 2.5 倍であり今回の実験から得られる壁倍率に基づけば試験体 A2, H1 はそれよりも高い値を持つことを確認した。

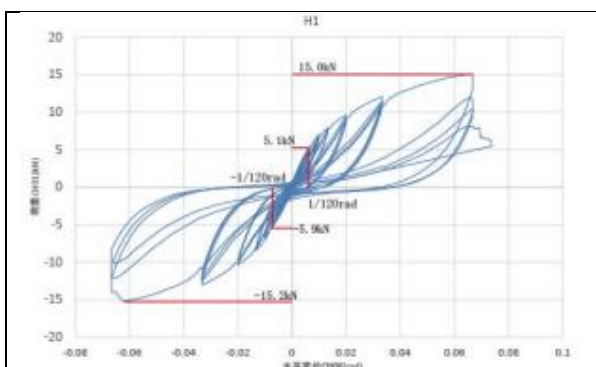


図3 荷重変形関係 (H1 の例)

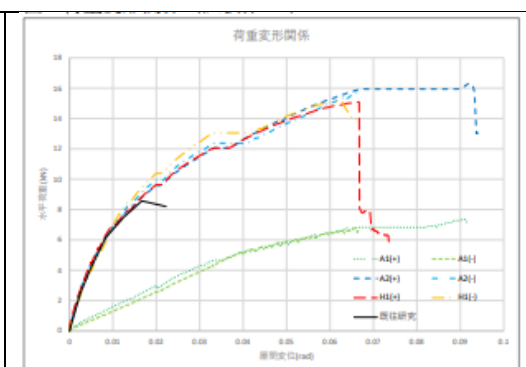


図4 各試験体の荷重変形関係 (包絡線)

表2 短期規準せん断耐力算定表

試験体	P_y	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	$\frac{2}{3}P_{max}$	P_{120}	P_0	壁倍率	
A1	正	5.1	1.7	4.9	1.8	1.7	0.95
	負	5.9	1.6	4.6	1.1	1.1	0.62
A2	正	9.9	5.2	11.0	6.0	5.2	2.9
	負	8.2	5.7	10.1	6.0	5.7	3.2
H1	正	8.2	5.8	10.0	6.9	5.8	3.3
	負	8.8	6.1	8.9	5.6	5.6	3.2



図5 破壊の進行

4.3 静的増分解析

任意形状立体フレームの弾塑性解析ソフトを用いて、試験体を2次元のフレームモデルとし、静的増分解析を行った。解析は変位制御によって行い、頂部変位 182mm(層間変形角 1/15rad)まで、変位増分 0.50mm として解析した。解析モデルは図のように柱梁接合部、棧の交点、釘接合部にそれぞれ節点を定義し、単一節点の回転ばねや節点間の単軸ばねなどを入力することによって作成した。中村・佐藤らが行ったポリカーボネート板を木材にビス接合した要素試験の結果をもとにビス接合部の復元力特性を4折線型で定め、外周部の格子についてはポリカーボネートブレースとビス接合部との直列接続ばねとして節点間の単軸ばねモデルを定めた。また、ブレース置換するにあたってはポリカーボネート板の有効幅 w (mm)を 60mm~180mm の範囲でパラメトリックに解析を行い、実験で得られた荷重変形関係との比較を行った(図8)。

model_0 の解析結果と試験体 A1 の実験結果より、変形角 1/25rad 以下の範囲においては概ね実験結果を再現できることが分かった。1/25rad より変形が大きくなると、実験では棧の抜け出しやポリカーボネート板の干渉による棧の割裂などが生じており、この破壊挙動を考慮することが今後の課題である。ビス打ち型モデルは、変形角 1/50rad 以下の範囲での結果は、図に示すとおり、いずれのモデルにおいても、L1 型の方が L2 型よりも耐力・剛性ともに大きくなるという結果が得られた。有効幅 60mm, 120mm, 180mm の3つのモデルで比較すると、有効幅を 120mm としたモデルが最も実験結果と近い荷重変形関係を示している。特に model_120_1 は 1/100rad 以下の範囲において良く一致しており、model_120_2 は 1/100rad~1/50rad の範囲

で一致している。model_120_1 においてブレース置換したばねの各ステップにおける挙動を確認すると、およそ 1/300rad 付近でひび割れステップを、1/100rad 付近で降伏ステップを、1/40rad 付近で終局ステップを迎えている。実験で観察された現象としては、目視ではじめて端部ビス接合部のめり込みが観察されたのは 1/50rad 変形時であり、ビスのめり込みが観察され始めるときのビスはおよそ 3~4mm 程度変位している。本解析モデルにおいては終局ステップを迎えるときのビス接合部の変位は L1 モデルで 3.5mm、L2 モデルでは 4.0mm としており、実験の挙動と解析で得られた挙動は概ね対応しているものと考えられる。今回の解析では中央部のブレースは弾性ばねとして入力しているが、実験では 1/15rad 変形時に中央部のビスも椀にめり込んでいるようすが目視で観察されているなど、大変形時には解析モデルに盛り込み切れていない要素も存在するため、今後改善が必要である。

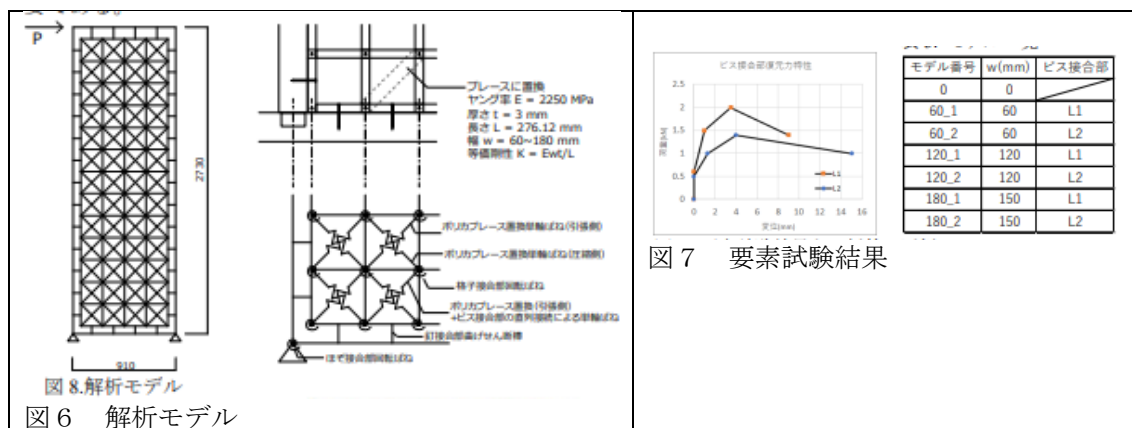


図 8 解析モデル

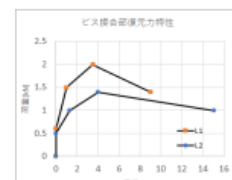


図 7 要素試験結果

モデル番号	w(mm)	ビス接合部
0	0	
60_1	60	L1
60_2	60	L2
120_1	120	L1
120_2	120	L2
180_1	150	L1
180_2	150	L2

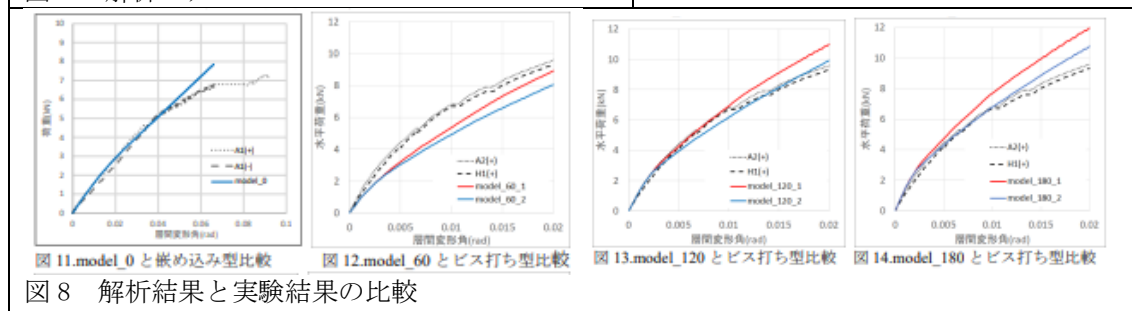


図 8 解析結果と実験結果の比較

4.4 施工実験

設計した透過性のある補強壁の施工実験を明治 40 年頃に建設された T 邸において実施した。T 邸の概要を表 3、図 9 に示す。T 邸は床下や天井裏の調査から、胴差のせいがないことや建物が傾いて床の不陸や柱の傾斜が大きいことなどが確認された。1 階の居間の 4 枚引き違いの開口部の両端部にポリカ木格子耐力壁を新設した。また、補強箇所周辺の床下についても足固めを新設して補強を行った。補強工事は居ながら施工で行い、工期はおよそ 3 週間を要した。

新たに設置した耐力壁を有効に機能させるためには既存の軸組に対して適切にせん断力の伝達が行われるようにする必要があり、既存の軸組を露出させるために天井や床の一部を解体する必要がある。今回の場合は天井面のレベルに胴差の下端があったため、天井の解体は行わず、居間の床板を 5 枚分解体し、人が入って作業できるだけのスペースを確保した。

ポリカ木格子壁を用いて耐震補強設計を行うにあたっては、壁・柱・建具・引抜金物等がそれぞれ干渉しないような収まりを検討するとともに、金物の引抜耐力が十分であるか等も適切に検討する必要がある。今回のように天井を解体せず、胴差上端にアプローチせずに補強を行う場合などは金物の耐力が限定される。本構法の汎用性を高めていくためには壁周辺の部材や金物などを含めてより詳細に収まりの検証などを行っていく必要がある。また、今回の対象住宅のように不陸が大きい住宅の補強を行うにあたっては、水平・垂直の基準の決定などに高度な判断力が必要とされることや、柱や建具を水平・垂直にするのに相応の施工技術と時間を要することが明らかとなった。

本研究では、木格子とポリカーボネート面材の組み合わせによる開口部補強構法について、実大試験体の静的加力試験および 2 次元のフレームモデルによる弾塑性解析モデルの提案と、既存の木造軸組住宅への施工実験を行うことで、総合的に本構法の有効性と改善点を明らかにすることができた。

表3 T邸概要

項目	内容
建物名称	T邸
所在地	東京都文京区弥生
竣工年	明治40年
構法	在来軸組構法
建物仕様	軽い建物
地域係数	1
軟弱地盤係数	1
1階形状割増係数	1.15
基礎形式	玉石基礎
床仕様	II
1階床面積	72.05㎡
2階床面積	50.51㎡

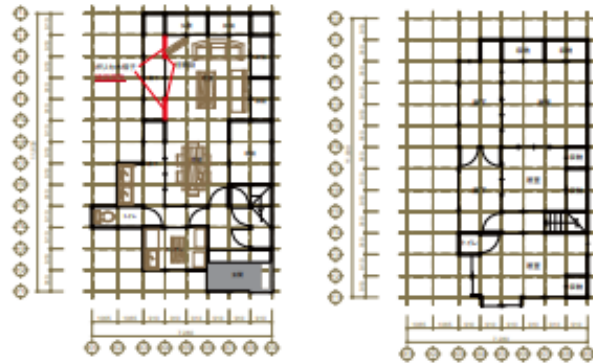


図9 T邸平面図

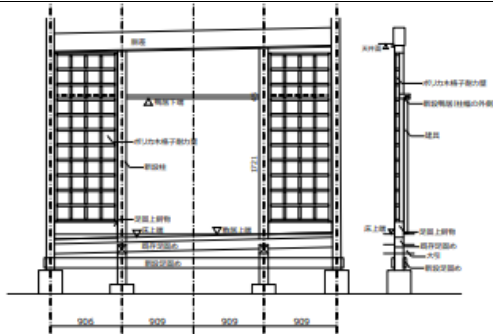


図10 補強壁設置図



(左：改修前、右：改修後)

図11 T邸補強前後の写真

参考文献

[1] 高橋壮太郎 他：透過性を保持した既存木造戸建住宅の開口部補強に関する研究：その1、その2 日本建築学会大会学術講演梗概集，2005年2006年

謝辞

本研究を実施するにあたり、関係大学の学生諸氏にご協力頂きました。以下の卒論・修士論文を作成しました。本報告書は特に(文6)をもとに作成しています。ここに記して謝意を表します。

- 文1 梶濱 次郎：木格子の構造性能に関する研究－実態調査と解析的検証－、2018年度東京大学・卒業論文、2018年12月
- 文2 川嶋 浩太：木格子と面材による補強構法の開発と解析的性能評価、2018年度東京大学大学院・修士論文、2019年1月
- 文3 南谷 幹人：透過性を保持した既存木造戸建て住宅の開口部補強に関する研究～静的水平加力試験と解析的検証～、2019年度東京大学・卒業論文、2019年12月
- 文4 中村 勇介：透過性のある耐震補強要素の解析モデル構築のための接合部要素試験、2019年度九州大学卒業論文、2020年2月
- 文5 新谷 怜也：合成繊維を用いた接合部補強に関する基礎的研究-接着された合成繊維シートと木材の剥離および引張性能に着目して-、2019年度舞鶴工業高等専門学校専攻科特別研究論文、2020年2月
- 文6 梶濱 次郎：透光性を保持した既存木造住宅の開口部補強構法に関する研究－木格子とポリカーボネート面材の構造性能評価と施工実験－、2020年度東京大学大学院・修士論文、2021年1月
- 文7 中村 勇介：透過性を有する耐震要素のフレーム解析モデルの構築と妥当性の検証、2021年度九州大学修士論文、2021年2月
- 文8 高橋 玲音：木造建築の接合部に用いる合成繊維補強に関する研究-部材内に接着面を持つ接合部を想定した引張強度の評価について-、2020年度舞鶴工業高等専門学校専攻科特別研究論文、2021年2月
- 文9 長瀬 朝暉：合成繊維を用いた接合部補強に関する実験的研究、2021年度舞鶴工業高等専門学校専攻科特別研究論文、2022年2月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 齊藤 響 / 西濱 惇矢 / 福島 佳浩 / 藤田 香織	4. 巻 781
2. 論文標題 貫継手の形状と寸法に関する研究 中世以降の仏堂建築を対象として	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会計画系論文集	6. 最初と最後の頁 827-837
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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 南谷 幹人 / 梶濱 次郎 / 藤田 香織 / 小泉 雅生 / 清家 剛 / 佐藤 利昭 / 渡部 昌弘
2. 発表標題 透光性を保持した既存木造建築の開口部補強に関する研究 その1 木格子・ポリカーボネート板嵌め込み型耐力壁の静加力試験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶濱 次郎 / 南谷 幹人 / 藤田 香織 / 小泉 雅生 / 清家 剛 / 佐藤 利昭 / 渡部 昌弘
2. 発表標題 透光性を保持した既存木造建築の開口部補強に関する研究 その2 木格子・ポリカーボネート板ビス打ち型耐力壁の静加力試験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南谷幹人、梶濱次郎、藤田香織、小泉雅生、清家 剛、佐藤利昭
2. 発表標題 透光性を保持した既存木造建築の開口部補強に関する研究 その1 木格子・ポリカーボネート板嵌め込み型耐力壁の静加力試験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶濱次郎、南谷幹人、藤田香織、小泉雅生、清家 剛、佐 藤利昭、渡部昌弘
2. 発表標題 透光性を保持した既存木造建築の開口部補強に関する研究 その2 木格子・ポリカーボネート板ビス打ち型耐力壁の静加力試験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 佑樹、佐藤 弘美、藤田 香織
2. 発表標題 石川県の既存木造建築における木格子建具の実態調査
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集、構造III
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaori Fujita, Kota Kawashima, Hiromi Sato, Masahiro Watabe, Toshiaki Sato, Tsuyoshi Seike and Masao Koizumi
2. 発表標題 Seismic Reinforcement of Existing Timber Architecture Using Permeable Structural Wall Part 1 Outline of Research
3. 学会等名 Proceedings of the 12th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kota Kawashima, Kaori Fujita, Hiromi Sato, Masahiro Watabe, Toshiaki Sato, Tsuyoshi Seike and Masao Koizumi
2. 発表標題 Seismic Reinforcement of Existing Timber Architecture Using Permeable Structural Wall Part 2 Modeling and Result of Analysis of Timber-acrylic Wall
3. 学会等名 Proceedings of the 12th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA) (国際学会)
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
研究分担者	佐藤 利昭 (Sato Toshiaki) (00637887)	九州大学・人間環境学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	渡部 昌弘 (Watabe Masahiro) (30706651)	舞鶴工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (54301)	
研究分担者	清家 剛 (Seike Tsuyoshi) (60236065)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 (12601)	
研究分担者	小泉 雅生 (Koizumi Masao) (60336526)	東京都立大学・都市環境科学研究科・教授 (22604)	
研究分担者	佐藤 弘美 (Sato Hiromi) (60508274)	金沢工業大学・建築学部・講師 (33302)	

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
---------	---------