

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01481

研究課題名（和文）低環境負荷かつ持続可能型材料を有効活用した高耐震高耐火木質スレンダー架構の開発

研究課題名（英文）Development of higher seismic and fire-resistant timber slender frame structure using eco-friendly and sustainable materials

研究代表者

谷口 与史也（Taniguchi, Yoshiya）

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30254387

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、杉材表面にジオポリマーを打設し硬化させた木質複合部材の構造特性と耐火性能を調べた。まず、提案部材の耐火性能について検討した。900℃で45分間の準耐火時間を目標に燃焼試験を実施した。燃焼後の木材の炭化層の深さや残留圧縮強度を比較検討を通じ、提案部材の高い耐火性能を実証した。次に、静的曲げ試験により、提案部材の構造特性を調べた。その結果、提案部材は非強化部材に比べて1.5～2倍の曲げ強度と剛性を有することを明らかにした。また、本実験結果は、木材とジオポリマーの完全接着を想定した曲げ強度と剛性の計算値と概ね一致したことから、本施工法による2材の接着性の高さを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木質構造建築物を対象としたこれまでの研究は、耐震性又は耐火性改善といったいずれかに特化してきた。これに対し本研究では、耐震性能と耐火性能を同時に改善可能、持続性の高い天然資源（木材）と産業副産物（ジオポリマーの材料：スラグ、石炭灰）の有効利用による低環境負荷、小断面化・大スパン化による設計自由度の拡大（意匠性の向上）、並びに、間伐材を母材として検討することによる木材利用促進、などといった効果を複合的に達成しうる新しい木質複合部材及び構造システムの開発となる。

研究成果の概要（英文）：This research clarifies the structural characteristics and fire resistance performance of timber composite members coated with cedar timber with geopolymers mainly based on industrial by-products such as coal ash. Firstly, the fire resistance performance of the proposed members was examined. A combustion test was performed with targeting a quasi-refractory time of 45 min at 900 °C. The residual compressive strength after combustion was measured to demonstrate the high fire resistance performance of the proposed member. Next, the structural characteristics of the proposed members were examined using a static bending loading test. Consequently, the proposed member had 1.5 to 2 times the bending strength and stiffness compared with the nonreinforced member. The calculated bending strength and stiffness of the proposed members, assuming complete adhesion between the timber and the geopolymer, were consistent with the experimental values.

研究分野：建築構造学

キーワード：木質構造 高耐震 高耐火 低環境負荷 ジオポリマー

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築産業への将来にわたる持続可能な資源として木材の利用が活発化している。近年、学校建築や集合住宅などの中大規模木造建築の建設が急速に進んでおり、木造住宅など小規模建築の構造部材に対しても集成材などのエンジニアリングウッドの利用が主流である。ただし、木造建築は、建築基準法の防耐火規定からの制限によって、「燃えしろ設計」や「燃え止まり設計」が採用され火災時も荷重支持能力を保持させる準耐火・耐火構造として設計されるなど。これが部材断面（特に梁せい）を大幅に拡大させ建築の空間利用の自由度を制限している。加えて、これら大断面集成材などの部材製作には、過大な施工期間・コスト・エネルギー消費が課題となる。一方、木材の有効利用と同様に建築産業への低環境負荷型材料の積極利用が注目されている。これに対し応募者らはこれまで、バサルト繊維及びジオポリマーを活用し、従来の木質部材に比べ高強度・高耐火かつ小断面化が可能なグリーンコンポジット部材を開発している。当部材に残る課題（ジオポリマーによる木材被覆の施工性、硬化したジオポリマーの微細ひび割れの発生など）を解決した上で、新しい木質構造システムへの適用を図ることが重要となる。

2. 研究の目的

複合的な高性能化を目指した新しい木質架構の実現に向け、高強度高耐火木質部材の設計施工法の構築を目的とする。具体的には、耐火被覆材としての性能を満たすジオポリマーの調合設計及び被覆厚など形状に関するデータベースを整備する。部材の耐震耐火複合性能を評価し設計施工法を確立する。加えて、高強度高剛性化による部材断面縮小化を検討し設計自由度の拡大の可能性を示す。更には、一般的には構造材として使用不可な中目材（末口径 20cm 程度の間伐材）の使用も含めた開発に着手する。

3. 研究の方法

木材表面に、フレッシュ状態のジオポリマーを直接打設・養生し、硬化させるといった複合部材の施工方法を開発し以下の検討を行った。

(1) ジオポリマーの調合試験：木材表面に打設可能なワーカビリティを有し、硬化過程時に（微細なものも含め）ひび割れが生じないような、かつ、複合部材に適用可能な力学特性を有するジオポリマーの調合設計を提案する。フレッシュ時のフロー試験、テストピースによる圧縮試験から評価した。表 1 にジオポリマーの調合設計表を示す。本研究では、表中の調合 BC をベースに試行錯誤を繰り返して行い、最終的に調合 C-2 及び C-4 により作成し検討を行った。

(2) 複合部材の燃焼試験：図 1 に示すような試験体を準備し、図 2 に示す ISO に基づく加熱曲線を参考に、構造部材の準耐火時間 45 分を目標値として燃焼試験を行った。また燃焼後の供試体の圧縮試験から木材の残存強度を調べた。

(3) 複合部材の曲げ載荷試験：図 3 に試験体概要及び載荷・測定状況を示す。120×120×3000mm の山口県産杉材（機械等級：E70 または E90）を用いて、4 点曲げ載荷試験における圧縮側（図中の試験体上面）に厚さ 20mm のジオポリマーを（打設及び養生することで）被覆した複合部材を製作し試験体とした。実験パラメータは、ジオポリマー被覆面における木材表面の凹凸加工及び防水剤塗布の有無である。これらは、凹凸の有無による二材の接着性、防水剤塗布による（打設から効果に至るまでの）ジオポリマーから木材への水分移動の影響について検討している。

(4) 複合部材に適したジオポリマーの調合に関する再検討：提案する複合部材の施工性向上及び更なる高耐震化（主には剛性の改善）に向けより安定した物性を発揮できる調合設計について検討した。フライアッシュ (FA)、水酸化ナトリウム (NaOH)、練り混ぜ水の質量比をパラメータとした供試体を製作し、各材料試験結果を比較検討した。

表 1 ジオポリマーの調合設計

BC				質量比[%]		FA：フライアッシュ
FA	Sand	NaOHaq	WG			Sand：珪砂
38	44	8	10			NaOHaq：水酸化ナトリウム水溶液
						WG：水ガラス
C - 2						収縮低減 高性能 AE
FA	Sand	NaOHaq	WG			剤 減水剤
38	44	8	10	FA × 5%	FA × 2%	
C - 4						収縮 高性能
FA	Sand	NaOHaq	WG			低減剤 AE 減水剤
38	44	10	8	FA × 5%	FA × 2%	

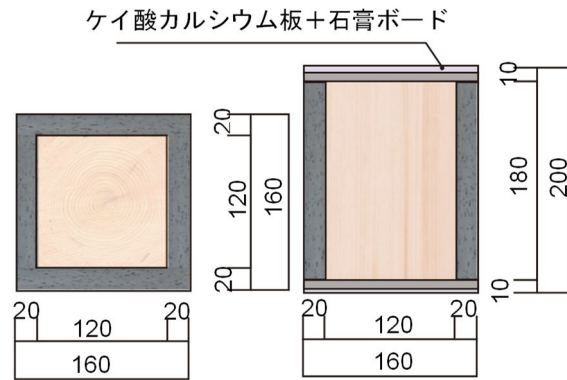


図1 燃焼試験の試験体概要

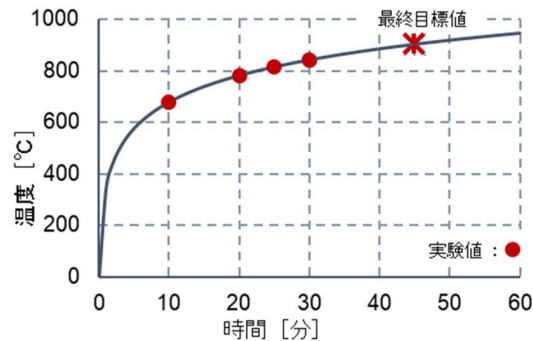


図2 ISO加熱曲線

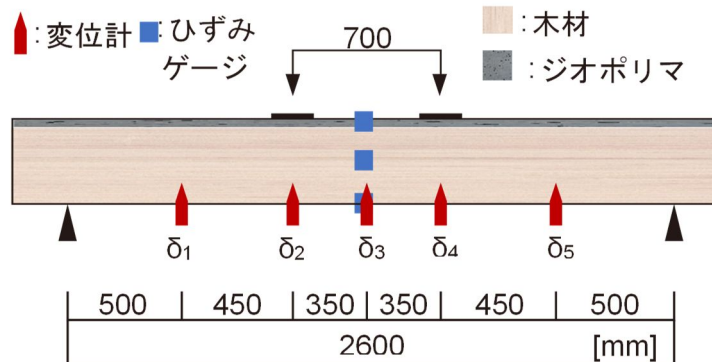


図3 試験体概要及び荷重・測定状況

4. 研究成果

(1) ジオポリマーの調査試験：表 2 にスランプフロー及び圧縮強度・ヤング係数の結果を示し、写真 1 で木材に打設した際の GP 表面の様子を示している。結果より、BC のスランプフローは測定出来ない程粘度が高い。C-4 が最良の結果に至った。木材に打設した GP 表面では、C-2 及び C-4 とともにひび割れの発生が見られず良い結果を示した。力学特性では BC に比べると圧縮強度は 70% 程度であるが、ヤング係数は 90% 程度で収まっている。C-2 と C-4 の比較ではほぼ同程度の値を示している。以上の結果より、施工性では化学混和剤による向上が見られ、力学特性では低減したものの化学混和剤の影響は少ないことが確認できた。よって、以降の試験では施工性が大きく改善された C-4 の調合による GP を木質複合部材用として使用した。

(2) 複合部材の燃焼試験：図 4 に燃焼後供試体の断面図を、図 5 に燃焼試験後に実施した圧縮試験結果を示す。断面図の観察から木材の炭化層を確認し、燃焼時間の増加に従い炭化層のわずかな進行が見られた。同様に、圧縮強度の低下及び縮量の増加といった燃焼による劣化が見られたものの、その劣化程度はわずかであった。実験における燃焼温度は、木材の発火温度を大幅に超えているため、ジオポリマーで被覆したことによる耐火性能の大幅な向上が確認できた。

(3) 複合部材の曲げ荷重試験：図 6 に木材の等級別 (E70 または E90) に曲げモーメント - 曲率関係を示す。なお図中には、ジオポリマーと木材の完全接着を想定した断面解析による計算結果 (破線) も併記している。無補強である試験体 SN と比較して、木材の等級に関わらず、ジオポリマー補強による曲げ耐力及び剛性の向上が確認された。また、実験パラメータの違い (ND: 凹凸加工無し, D: 凹凸加工有り, DWP: 凹凸加工及び防水剤塗布有り) による補強効果の明確

な違いは確認されず、すべてにおいて完全接着を想定した計算値と比較的良好な対応が見られた。よって、本施工法（フレッシュ状態のジオポリマーを木材表面に流し込み、養生・硬化）の採用することで、ジオポリマーと木材の一体性を高めることができ、ジオポリマーによる応力負担を十分に発揮できることを明らかとした。

(4) 複合部材に適したジオポリマーの調合に関する再検討：本提案部材に適するジオポリマーの調合設計を提案するため、各材料の質量比に対するスランプフロー及び各強度についてデータ整備を実施することができた。

表2 スランプフロー及び圧縮強度試験結果

	BC	C - 2	C - 4
スランプフロー [mm]	-	160.2	184.4
圧縮強度 [N/mm ²]	78.1	54.3	54.1
圧縮強度時ひずみ度 [%]	0.48	0.39	0.40
ヤング係数 [N/mm ²]	17470	15926	15577

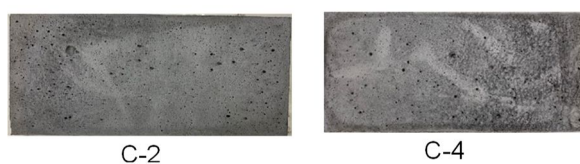


写真1 木材表面に他打設した硬化後のジオポリマー

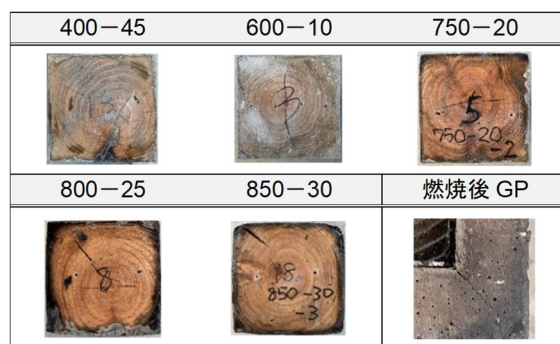


図4 燃焼後の試験体断面

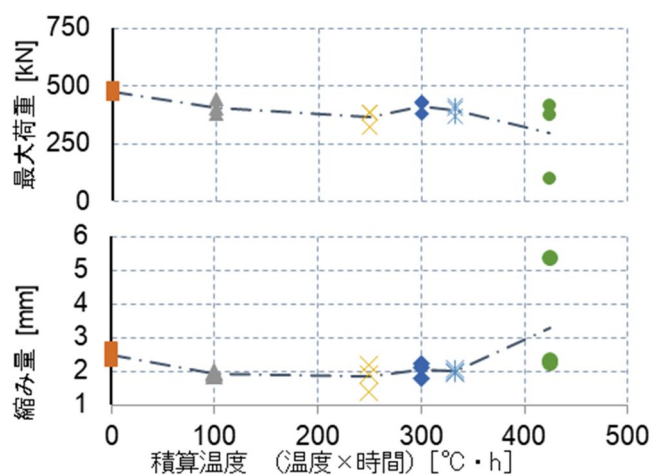
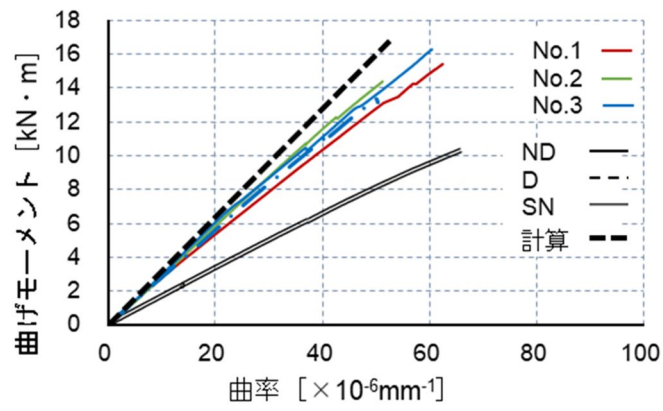
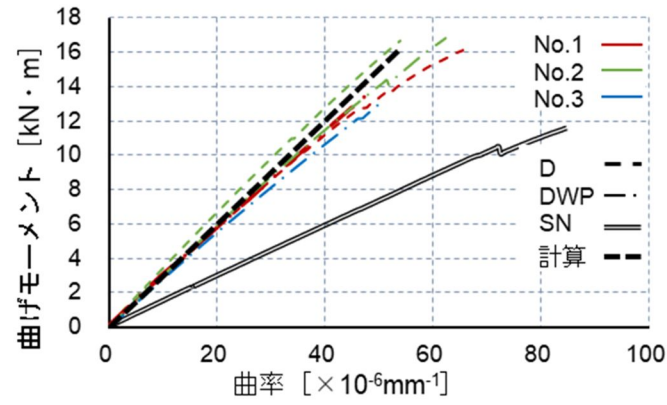


図5 積算温度に対する最大圧縮荷重及び縮み量



(a) E70 を用いた試験体



(b) E90 を用いた試験体

図6 曲げモーメント - 曲率関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Tian, H. Oda, Y. Suzuki, Y. Taniguchi, S. Pareek
2. 発表標題 Evaluation of Fire Resistance and Structural Characteristics of Timber-Geopolymer Composite Member
3. 学会等名 18th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田野, 織田英樹, 鈴木裕介, 谷口与史也, Sanjay PAREEK
2. 発表標題 ジオポリマーで被覆した木質複合部材における施工性・耐火性・力学特性の評価
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田野, 織田英樹, 鈴木裕介, 谷口与史也, パリーク サンジェイ
2. 発表標題 ジオポリマーで被覆した木質系複合部材における施工性・力学特性・耐火性の評価 - その1 調合設計と曲げ試験 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 織田英樹, 田野, 鈴木裕介, 谷口与史也, パリーク サンジェイ
2. 発表標題 ジオポリマーで被覆した木質系複合部材における施工性・力学特性・耐火性の評価 - その2 燃焼試験と耐火性の評価 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 織田英樹, 鈴木裕介, 谷口与史也, Sanjay PAREEK
2. 発表標題 木材表面に対するジオポリマー接着性能及び合成梁の曲げ性能評価
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木裕介, 織田英樹, 谷口与史也, Sanjay PAREEK
2. 発表標題 木材表面に対するジオポリマー接着性能及び合成梁曲げ性能の実験研究 - その1 試験体概要と荷重変位関係の考察 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 織田英樹, 鈴木裕介, 谷口与史也, Sanjay PAREEK
2. 発表標題 木材表面に対するジオポリマー接着性能及び合成梁曲げ性能の実験研究 - その2 実験結果と付着強度の比較 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 裕介、谷口 与史也、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 ジオポリマー板材で補強した杉製材の曲げ特性評価に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 裕介、谷口 与史也、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 ジオポリマー板材で補強した杉製材の曲げ剛性の定量評価に関する実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021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	Sanjay PAREEK (Pareek Sanjay) (20287593)	日本大学・工学部・教授 (32665)	
研究分担者	荒木 慶一 (Araki Yoshikazu) (50324653)	名古屋大学・環境学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	石山 央樹 (Ishiyama Hiroki) (90634436)	大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授 (24405)	
研究分担者	鈴木 裕介 (Suzuki Yusuke) (90635400)	大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授 (24405)	

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