

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06651

研究課題名(和文) 低環境負荷型被覆材料を用いた高耐震・高耐火木質部材及び接合法の開発

研究課題名(英文) Development of timber elements and joint-systems for higher seismic and fire resistance performance using eco-friendly materials

研究代表者

谷口 与史也 (Taniguchi, Yoshiya)

大阪市立大学・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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高強度・高剛性・高耐火性能を有する新しい木質構造部材を開発する。具体的には、杉材に対しバサルト繊維シートとジオポリマーを用いて補強した複合梁の曲げ載荷試験を通して、無補強部材に対する補強効果について比較検討した。その結果、複合部材の構造特性は無補強部材のそれと比較して、耐力が約1.5倍で曲げ剛性が1.9～2.3倍であり、本補強法による木質部材の高強度高剛性化を実証した。また、実験を基とした破壊力学モデルを構築し、耐力及び剛性の向上効果を精度よく模擬できることを示した。並びに、ジオポリマーで被覆したバサルト繊維シート補強杉材試験片の発熱性試験を通じ、複合材料の不燃性について実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の木質構造研究は、耐震性または耐火性改善といったいずれかに特化しているが、本研究では、耐震性、耐火性、及び、断面縮小による設計の自由度など、木質構造建築が持つ複数の課題を複合的に改善可能な新しい木質構造部材の開発を試みている。更には、当部材の母材に(従来、構造材に使用されない中目材も含む)間伐材を、耐火被覆及び耐震補強にジオポリマー結合材(主材がフライアッシュ及びスラグ骨材)と玄武岩繊維補強材を使用するため、本手法は、建築構造の分野で前例のない天然資源有効活用によるグリーンコンポジットの開発となっている。

研究成果の概要(英文)：New wood structural members with high strength, high rigidity and high fire resistance were developed. Specifically, through a bending load test of a composite cedar wood member reinforced using a basalt fiber sheet and a geopolymer, this reinforcement effect of this method was compared and examined. As the result, the structural characteristics of the composite member were about 1.5 times with bending strength and 1.9 to 2.3 times with bending stiffness comparison to the unreinforced member, demonstrating effectiveness reinforcement for the wooden member. In addition, it was shown that the fracture mechanics model based on the experiment can be constructed, and the model can relatively accurately simulate improvement effect of the strength and the rigidity. On the other hand, the nonflammability of the composite material was verified through the heat generation test using the cedar material (pasted with basalt fiber sheet) test piece coated with geopolymer.

研究分野：建築構造学

キーワード：木質構造 バサルト繊維シート ジオポリマー 曲げ強度 曲げ剛性 グリーンコンポジット

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年において、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。2010年には公共建築物木材利用促進法が施行され、林業再生や森林の適正整備、地球温暖化の防止などへの貢献とともに公共建築物の木造・木質化が図られ、中大規模木造建築物が普及しつつあり、新しい工法も視野に入れた木造建築に関する技術向上が強く求められている。木造建築の近年の架構形式としては、集成材を用いたラーメン構造やCLT工法による壁式構造、異種構造(RC造など)との混構造などが用いられているが、木造建築は可燃性の架構であるためその規模については、建築基準法の防火規定の見地による制限が設けられている。そのため、火災時に部材表面の炭化による耐火被覆層を利用した「燃えしろ設計」、または、集成材内部にモルタル層を配置する「燃え止まり設計」によって、火災時も荷重支持能力を保持させる準耐火構造や耐火構造として設計されるのが一般的である。しかし、これらは、各耐火時間に対応した燃えしろ厚さの確保が部材断面を大幅に拡大させ設計の自由度を低下させる、集成材内にモルタルなどの燃え止まり層を配置するには高い施工技術が必要、などといった課題が残る。また、このような構造用集成材の製作には、多大な施工期間とコストを要することとなる。

### 2. 研究の目的

本研究では、以上に記した背景の下、比較的簡便に施工可能、かつ、断面の縮小化を図りながら高耐震性能(高強度、高剛性)を有し、同時に高耐火性能を持たせた新しい木質構造部材の開発に着手する。具体的には、天然資源である玄武岩を主原料としたバサルト繊維シートと、産業副産物を主材としセメントレスでの製造が可能なアルカリ活性化結合材(ジオポリマー)それぞれを、木質部材の耐震補強材及び耐火被覆材として組合せて利用した複合部材を試作し、木質部材の静的載荷実験及び燃焼性試験を通し、各種性能について比較検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 構造特性評価と破壊力学モデルの構築

図1に示すような静的4点曲げ載荷実験を通して、当研究で開発した複合部材の構造特性と破壊性状の把握、及び、無補強部材に対する補強効果について比較検討した。並びに、実験を基とした破壊力学モデルを構築し、当補強効果について検討した。

補強方法の詳細として、部材が曲げ載荷を受けた際、引張応力負担側となる方向にバサルト繊維シート(引張強度2700-3200MPa、ヤング係数90GPa程度)を、圧縮応力負担側となる方向に後述のように耐火被覆材として有用であるジオポリマー(圧縮強度51.2MPa、ヤング係数18.9GPa)を、それぞれエポキシ樹脂を用いて杉材に接着補強した。本実験のパラメータは、それぞれの補強量であり、図2に示すような応力状態を仮定し所望の構造特性(同断面寸法の集成材に対し1.5~2.0倍の強度と剛性)が発揮されるような様々なパターンを設定し検討した。補強量の詳細として、バサルト繊維シートについては、1層、2層積層、及び6層積層補強、更には、これにせん断補強(繊維方向を部材軸に直交させて巻き付け補強)を追加した各種パターンとした。ジオポリマーについては、被覆厚さ10、15、20mmの3パターンである。

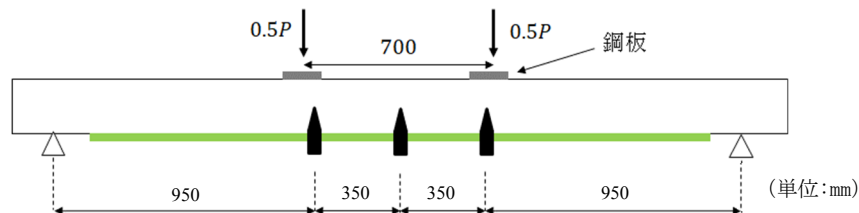
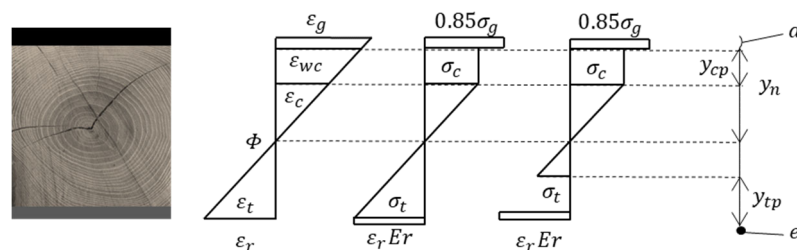


図1 静的載荷実験方法概略



a: GPの補強厚, e: バサルト繊維の補強厚,  $\epsilon_g$ : GPのひずみ,  $\epsilon_{wc}$ : 杉材圧縮縁のひずみ,  $\epsilon_c$ : 杉材の圧縮強度時ひずみ,  $\epsilon_t$ : 杉材引張縁のひずみ,  $y_n$ : 杉材圧縮縁から中立軸までの距離,  $y_{cp}$ : 杉材の圧縮塑性域,  $y_{tp}$ : 杉材の引張破壊(塑性)域

図2 試験体断面図及び応力分布の仮定

## (2) 耐火性能評価

図3に示すように、100×100mm、高さ30mm程度のスギ材を用いて、3種の供試体を各2体製作及び準備した。詳細として、杉材の表面一面にバサルト繊維シートをエポキシ樹脂で接着し、その上から、耐火被覆層としてジオポリマーを15mm厚で塗布した。実験変数はバサルト繊維シートの積層数である。当供試体は、前章で記した静的載荷実験における試験体の一部を、燃焼性試験の規格に準じたサイズに切り出したものとしてモデル化している。

図4に燃焼性試験の状況を示す。実験は、ISO 5660に準じたコーンカロリメーターによる発熱性試験とした。試験方法の詳細として、供試体を試験機に水平に設置し、バサルト繊維シートが2層又は3層で接着されその上からジオポリマーで被覆された面に対して、コーン型のヒーターにより輻射熱量を均一に与えた。その時の酸素の消費量から発熱量を測定した。なお、ヒーターの放射熱強度は、指定性能評価機関が定めた50kW/m<sup>2</sup>とした。試験時間は20分間とし、試験中に生じた総発熱量及び発熱速度、並びに、試験後の供試体の質量減少率などを基に、表-3に示す判定方法に従い、各供試体の耐火性能（「不燃」、「準不燃」、「難燃」、「区分外」のいずれか）を判定した。

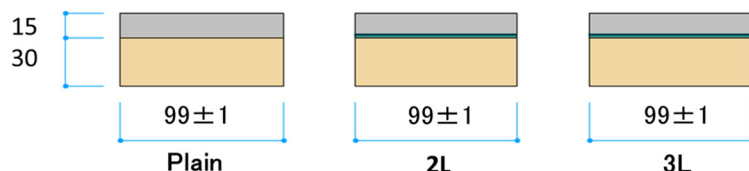


図3 供試体概要

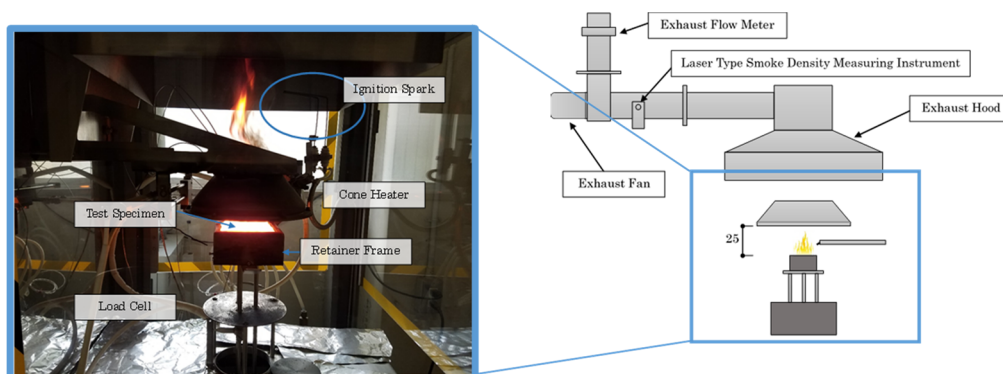


図4 燃焼性試験状況

表1 判定方法

判定区分	要求時間	条件
不燃材料	20分	1. 加熱開始後、要求時間の総発熱量が8MJ/m <sup>2</sup> 以下である。
準不燃材料	10分	2. 加熱開始後、要求時間内に貫通する亀裂が無いこと。
難燃材料	5分	3. 加熱開始後、要求時間内の最大発熱速度が10秒以上継続して200kW/m <sup>2</sup> を超えないこと。

## 4. 研究成果

### (1) 構造特性評価と破壊力学モデルの構築

成果の一例として、杉材に対し、バサルト繊維シートを6層積層、及び、ジオポリマーの被覆厚を10、15、20mmとして補強した、複合部材の静的載荷実験結果を報告する。

図5に複合部材の荷重変形関係を示す。複合部材の破壊過程及び耐力は、ジオポリマーの被覆厚に関わらず概ね同様であった。まず、荷重初期段階では荷重と変位の関係が比例関係（弾性）で推移し、最大耐力の1/3～2/3程度（施工性によってばらつきが見られる）に達すると圧縮補強材であるジオポリマーが圧壊または木材との接着界面で剥離した。ジオポリマーの応力負担の喪失によって一時的な荷重低下は見られるものの、引張側補強材のバサルト繊維シートの効果によって、その後も緩やかな上昇勾配を示し最大耐力に到達した。最終的に最大耐力時にバサルト繊維シートの剥離、または木材の引張破壊によって終局した。また、複合部材の構造特性について無補強部材と比較すると、耐力は約1.5倍で曲げ剛性は1.9～2.3倍であった。よって、本補強法によって木質部材の高強度高剛性化が十分に可能であることを明らかにした。

図6に、曲げ剛性の実験値と計算値の比較を示す。計算値については、図1に示した応力分布を基に算出した精算値、及び、各補強材を木材と等価な断面に置き換えた際の断面2次モーメントを用いて算出した略算値の2種を併記している。精算値は実験値に対して92～96%の精

度で、略算値は84~87%の精度で模擬できており、いずれも精度よくかつ安全側で評価できることを確認した。よって、事前に仮定した力学モデルによって、当補強効果を定量的に評価できることを明らかにした。

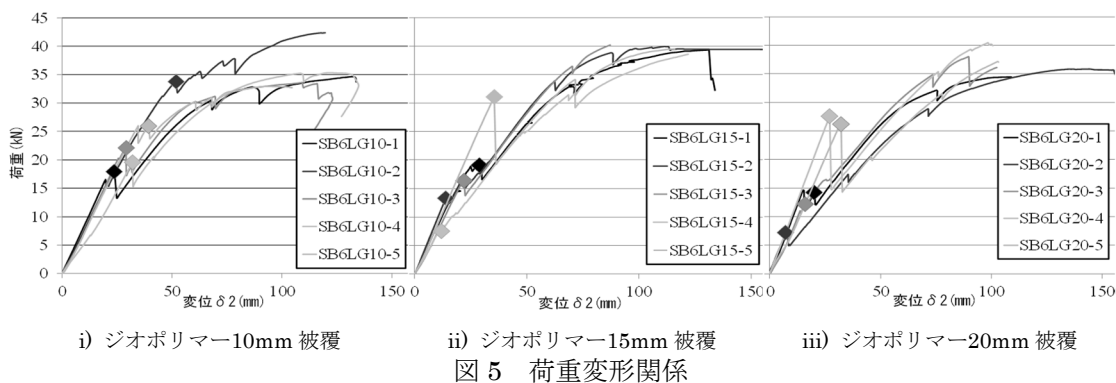


図5 荷重変形関係

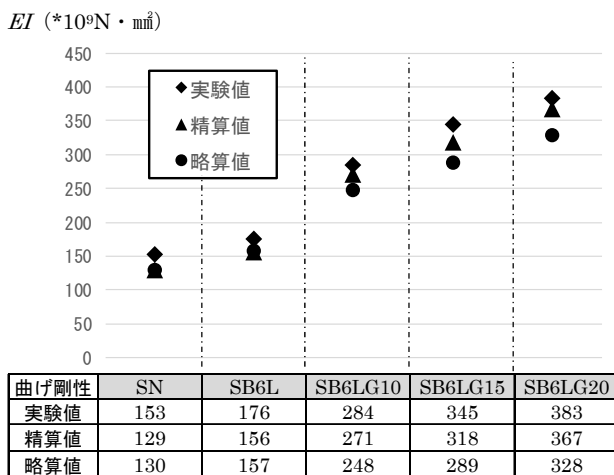


図6 曲げ剛性の実験値と計算値の比較

## (2) 耐火性能評価

実験結果として、図7及び図8に試験時間20分間以内における各試験体の総発熱量及び発熱速度の推移を示す。図中には、判定基準である要求性能を赤の破線で併記している。

図より、Plainは試験時間20分間において総発熱量及び発熱速度ともに、ほとんど上がらず不燃材料と判定されたため、ジオポリマーが耐火性能に極めて優れることを実証した。バサルト繊維シートを貼付けた供試体に関しては、試験時間10分経過までは要求性能を満たしたため、準不燃材料と判定された。なお、シートの貼付け層数が2層から3層となることで、総発熱量及び発熱速度が上昇する時間が早まる結果となった。バサルト繊維は玄武岩100%で生成された材料で不燃であるため、シート接着の際に用いたエポキシ樹脂が影響したものと考えられる。貼付け層数が増えると使用するエポキシ樹脂塗布量が増加するための結果である。以上、ジオポリマーの優れた耐火性能(15mm以上の被覆で不燃材料と判定)と、それに対するバサルト繊維シート貼付けに用いたエポキシ樹脂の塗布量が及ぼす影響について明らかにした。

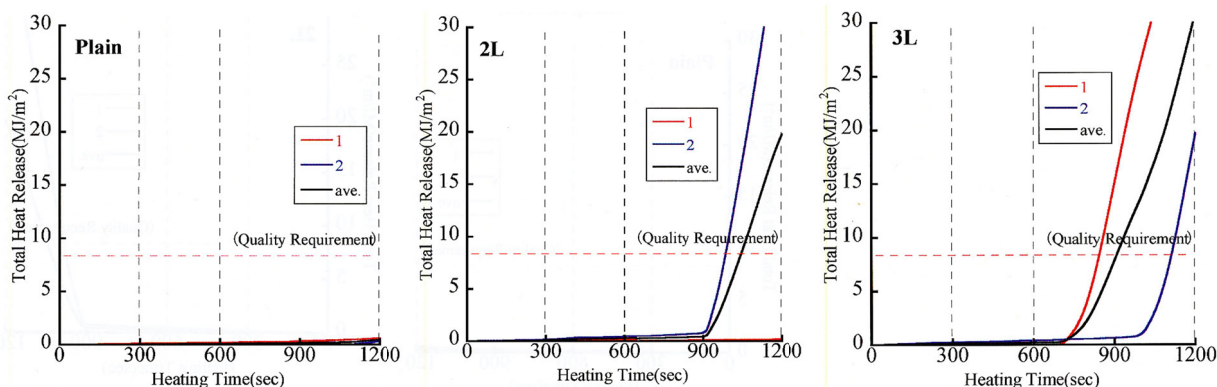


図7 総発熱量の推移



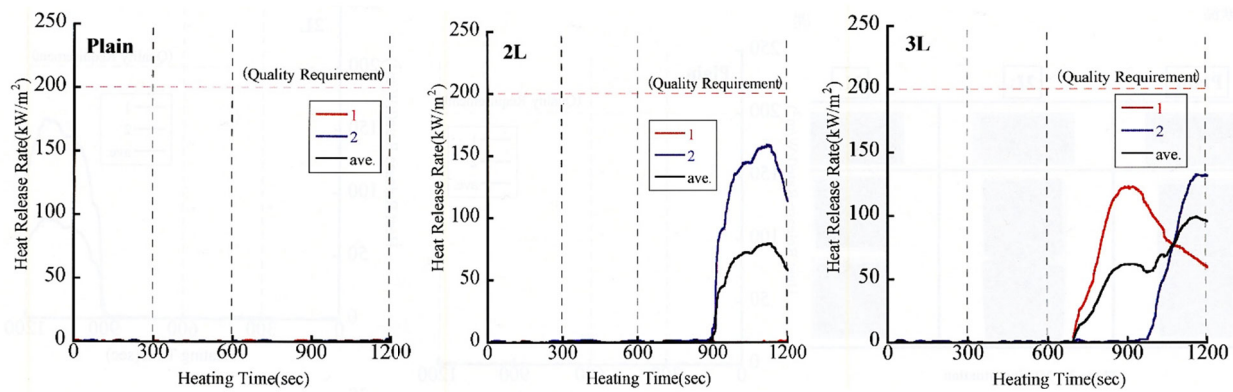


図 8 発熱速度の推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西水真音、鈴木裕介、谷口与史也、荒木慶一、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 バサルト繊維シート及びジオポリマーを用いた低環境負荷型木質複合部材の曲げ破壊挙動
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木裕介、西水真音、谷口与史也、荒木慶一、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 バサルト繊維シート及びジオポリマーを用いた低環境負荷型木質複合部材の曲げ破壊挙動 その1 実験概要及び実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西水真音、鈴木裕介、谷口与史也、荒木慶一、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 バサルト繊維シート及びジオポリマーを用いた低環境負荷型木質複合部材の曲げ破壊挙動 その2 破壊モードの分析と曲げ剛性の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西水真音、鈴木裕介、谷口与史也、荒木慶一、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 すぎ材の曲げ性能に対するバサルト繊維シート積層補強方法とその効果に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西水真音、鈴木裕介、谷口与史也、荒木慶一、PAREEK Sanjay
2. 発表標題 バサルト繊維シートの積層補強によるすぎ材の曲げ性能に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西水真音、鈴木裕介、谷口与史也
2. 発表標題 バサルト繊維シートで補強した重ね梁の曲げ性状に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西水真音、鈴木裕介、谷口与史也
2. 発表標題 杉材のバサルト繊維シートによる補強効果に関する実験研究
3. 学会等名 日本建築学会
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	S a n j a y P A R E E K  (Pareek Sanjay)  (20287593)	日本大学・工学部・教授    (32665)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	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	鈴木 裕介  (Suzuki Yusuke)  (90635400)	大阪市立大学・大学院工学研究科・講師    (24402)	