

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249081

研究課題名(和文)大断面木質部材の耐火性能設計の工学モデル

研究課題名(英文)Engineering Approach to the Fire Protection Design of Large Wooden Structural Members

研究代表者

長谷見 雄二 (Hasemi, Yuji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40298138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円

研究成果の概要(和文)：大断面木質部材の主な活用対象となる耐火・準耐火構造の開発上、未解明の、火災加熱される木造部材の自消条件・力学的性能の変化、木材の高温での力学的特性の変化、大スパン木質耐力部材の非損傷性の予測等を課題とした。その結果、については、燃え止まり型耐火構造の自消条件を小型材料試験で予測する方法を誘導し、特殊な材料に依存しない木質耐火構造の開発に成功した。については、木材の力学的性能が温度だけでなく含水率の影響を顕著に受けることを明らかにし、主要樹種について温度・含水率とヤング係数・曲げ強度の関係を把握した。については耐火試験の加熱後断面性能に基づく大スパン部材の非損傷性予測法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Following issues not resolved for the design and development of wooden fireproof and quasi-fireproof constructions are studied: (a) Prediction of the condition for the self-extinguishment of wood under fire exposure, (b) Prediction of the mechanical performance of wood under fire exposure, (c) Prediction of the fire safety performance of wooden beam longer than standard furnace specimen.

The study a) resulted in the development of predictive method of fireproof performance of wooden assembly based on material testing and succeeded in achieving fireproof performance only with wood based materials available in common market. The study b) resulted in the finding of the strong dependence of the mechanical properties of wood on moisture and represented them as functions of temperature and moisture. The study c) resulted in the development of predictive method of fire safety performance of long wooden beam from normal furnace tests.

研究分野：火災工学

キーワード：木質構造 耐火構造 準耐火構造 自消 スパン ヤング係数 曲げ強度 含水率

1. 研究開始当初の背景

木造活用振興の鍵は、大規模木造建築の普及であるが、それに必要な木質耐火・準耐火構造、特に大断面木造の部材開発は停滞していた。これは、木材の火災加熱時の分解・燃焼とそれが部材としての力学的性能・火災拡大抑止性能に及ぼす影響が予測困難だからで、部材開発は大規模な実験により試行錯誤的に行われているのが実情である。また、木造では材の含水状態が防耐火性能に及ぼす影響、材長や拘束条件が火災加熱時の破壊に及ぼす影響等、未解明の課題が多く、耐火試験等の結果の汎用性に疑問も残していた。こうした事態の打開には、火災加熱下における部材の力学的性能に影響する物性の変化を系統的に把握のうえ、部材としての防耐火性能を工学的に予測・設計する手法の開発を促進する必要があった。

2. 研究の目的

大断面木材による耐火・準耐火構造部材を、地域を問わず利用可能な装置による実験や数値計算等の工学的手順により設計できるようにしたい。そのために必要な大断面木造部材の火災加熱時の自消条件・力学的性能の予測、大断面木造に使われる代表的材種の高温物性の把握、耐火試験用試験体と材長・拘束条件が異なる木造部材の火災加熱時の力学的応答の予測を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

研究目的の各項目に関して、以下のように研究を行った。

大断面木造部材の火災加熱時の自消条件・力学的性能の予測については、部材内部の伝熱・分解性状のモデル化による解決を目指して数値計算モデルを構築し、実大断面部材による実験的検証に取り組み、乾燥材については一定の成果を得た。一方、実験では、木材の含水状態によっては水分移動が内部温度変化に大きな影響を与えること、また木材の力学的性能が高温での含水率に従来、想定されていたよりも著しい影響を受ける可能性があることが明らかになった。部材レベルの加熱実験では、木材内部の含水率を動的測定する適当な方法がないため、これら含水率の影響については数値モデルの妥当性の検証もできない。そのため、2~3年度は、耐火炉加熱試験における部材内部の含水率の動的測定法を実験的に検討し、含水率が力学的性能に最も大きい影響を与える条件について含水率の測定法の開発に取り組んだ。一方、耐火構造部材における木材の自消の可能性など、部材内部の温度の数値計算の活用が期待されてきた課題について、計算によらずに効率的に把握する方法として小型試験に基づく予測手法を構想し、実大部材試験体を含む検討により、その妥当性を検証した。木材の高温物性については、主要樹種につ

いて、小型試験装置により、常温から熱分解温度に近い200前後までの範囲でヤング係数、曲げ強度の変化を測定した。一方、これらの物性は、100以下では含水率の影響を顕著に受けることが予想されたため、続いて、乾燥状態、気乾状態前後、繊維飽和点を超える条件の3段階で、常温~90前後の範囲で、これら力学物性の測定を行った。

耐火試験用試験体と材長・拘束条件が異なる木造部材の火災加熱時の力学的応答については、一般的な試験用耐火炉とは異なる炉による加熱実験を行い、その影響の工学的予測法を検討した。

4. 研究成果

大断面木造部材の火災加熱時の自消条件・力学的性能の予測

含水率10%未満の乾燥状態については、数値計算で炭化層深さを再現できた。また、含水率の変化が力学的物性に大きく影響し、火災加熱中の水分移動が顕著となる含水率10%~繊維飽和点(約30%)については、建築構造部材の耐火加熱実験中の内部含水率の測定法を開発し、スギ等、一部材種については、系統的な実験により測定に必要なキャリブレーション方法を誘導した(下図)。

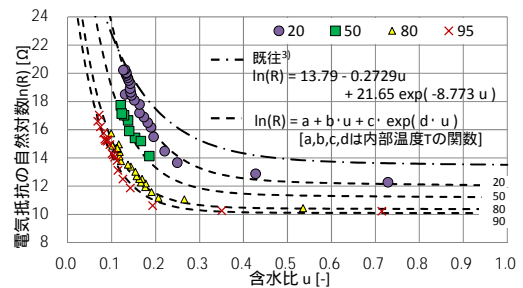


図 スギにおける含水率動的測定装置電気抵抗出力と含水比の関係

これに基づき、実大梁部材の加熱実験における内部含水率の経過を測定したところ、その結果は部材の温度変化から理論的に予想される傾向と一致した。また、測定法として十分な精度に達しているかどうかは明らかではないが、高温での木材内部の熱・水分移動の予測モデルの検証可能性については一定の見通しが得られたといえる。

一方、木質耐火構造の開発上、最大の課題であった自消性の達成条件の把握については、小型試験により部材内部での赤熱燃焼発生条件を把握して、燃えしる層厚・燃え止まり層の性能を設計する方法を構想し、その妥当性を実験的に検証した。これにより、燃えしる層厚には耐火時間によらない最適値が存在することが明らかとなり、従来、開発できていなかった燃え止まり層を市場に流通している難燃処理木材とする1時間及び2時間耐火構造仕様を明らかにした。この開発手順で必要とする実験は、各地の林産試験場等が

保有する装置で十分、行えるため、従来、目立っていた木質耐火構造開発に関する地域格差が軽減されること、本仕様は、柱・梁に関するどの既存耐火構造より軽量であること、製作に特殊な生産技術・材料を必要とせず、部材製作の全工程を集成材工場で行えること等の利点を有する。1時間耐火構造(梁)については、科学研究費とは別の事業により、国土交通大臣認定に必要な性能評価を取得している。



図 小型試験による予測法で開発した1時間耐火構造梁(燃えしろ・中心部は無処理集成材、燃え止まり層は準不燃材料相当難燃処理木材)の加熱実験後の状況

大断面木造に使われる代表的材種の高温物性の把握

スギ、カラマツ、ベイマツ、ケヤキについて、乾燥材のヤング係数、曲げ強度の温度依存性を常温～200 の範囲で実験により明らかにした。次に、スギ、ケヤキについて100未満の範囲で、ヤング係数及び曲げ強度と含水率の関係を実験により明らかにした。これらの実験を通じ、乾燥材では100以下の力学的性能の変化は小さいが、気乾状態程度では加熱時に低温側に水分移動が起こる可能性があり、その場合、荷重を負担する低温部の力学的性能が低下して非損傷性に影響を与える可能性があるとして予想される。

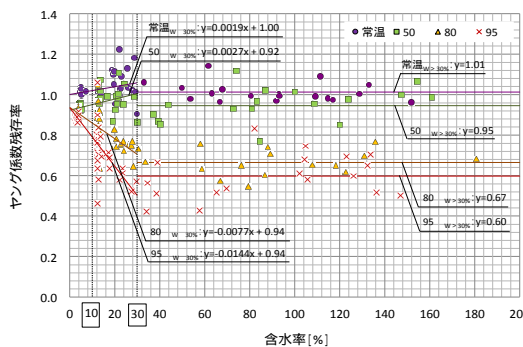


図 スギにおけるヤング係数残存率(ヤング係数を、常温・乾燥時の値で割った値)の温度・含水率依存性

耐火加熱試験用試験体と材長・拘束条件が異なる木造部材の火災加熱時の力学的応答
木造柱・梁の非損傷性は火災加熱による有効

断面減少による力学的破壊で決まると考えられているが、過去、その検証は断面寸法の影響にとどまっていた。本課題では、梁について梁長さをパラメータとする実験を行い、一般的な床炉で試験可能な長さ4mの梁の変形データに基づいて同断面の長さ6m, 8mの梁の変形を予測可能なことを検証し(下図)、

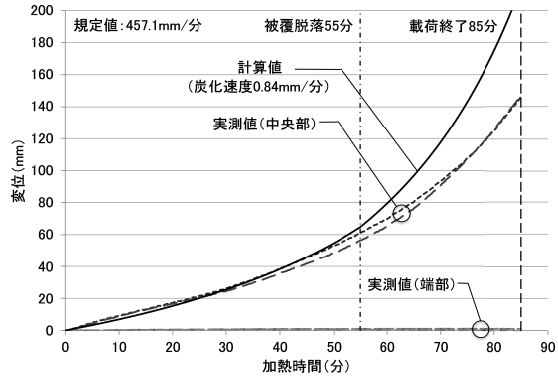


図 長さ8mの梁の載荷加熱時の変位と短い梁の試験データに基づく予測値の比較

材長が異なる梁の非損傷性を曲げ変形から予測可能であることを明らかにした。同時に材長が大きい場合等、部材変形が大きくなることにより部材の拘束条件の影響が現れやすくなることも判明したため、代表的な条件として真壁が柱・梁の非損傷性の改善に役立つことを実験的に明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

山口智世, 上川大輔, 長谷見雄二, 安井昇, 高瀬椋, 宮林正幸, 鈴木淳一、燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究(小型試験に基づく燃えしろ・燃え止まり層の設計法の検討)、日本建築学会環境系論文集(2016年6月採用決定)(査読有)

遠藤智紀, 長谷見雄二、安井昇、加來千紘、鈴木淳一、鈴木達朗 スパンの異なる木質床部材における防耐火性能予測に関する研究、2015年度日本建築学会関東支部研究発表会優秀研究報告集、査読有、2016年3月

角田彩乃、安井昇、鈴木淳一、長谷見雄二、荒木康弘、板垣直行、木仕上げ大壁による準耐火構造の開発のための載荷加熱実験、日本建築学会技術報告集、査読有、第46号、p1001、2014年10月

加來千紘、長谷見雄二、安井昇、保川みずほ、上川大輔、亀山直央、小野徹郎、腰原幹雄、火災加熱が木材の力学的性能に及ぼす影響 -加熱した針葉樹材及び広葉樹材の高温時及び加熱冷却後のヤング係数・曲げ強度の測定-、日本建築学会構造系論文集、査読有、第701号、p1065、2014年7月

〔学会発表〕(計 19 件)

Yuji Hasemi, Naoyuki Itagaki, Tomoyo Yamaguchi, Development of wood based "Fireproof" buildings in Japan, World Conference on Timber Engineering, Vienna, オーストリア, 2016 年 8 月

Chihiro Kaku, Yuji Hasemi, Daisuke Kamikawa, Tatsuro Suzuki, Noboru Yasui, Influence of moisture Content on the Structural Properties of Wood under High Temperature, World Conference on Timber Engineering, Vienna, オーストリア, 2016 年 8 月

Chihiro Kaku, Tatsuro Suzuki, Yuji Hasemi, Daisuke Kamikawa, Noboru Yasui, Influence of water content on mechanical properties of wood under heating, 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 茨城県つくば市, 2015 年 10 月

鈴木達朗、加來千紘、上川大輔、安井昇、長谷見雄二、鈴木淳一、火災加熱される木質部材内部の水分移動計測手法の開発研究、日本建築学会大会学術講演会、福岡大学、2016 年 8 月

高瀬棕、上川大輔、長谷見雄二、安井昇、宮林正幸、燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計に関する研究(その 3 自消性に対する加熱時間の影響の検討)、日本建築学会大会学術講演会、福岡大学、2016 年 8 月

遠藤智紀、長谷見雄二、安井昇、加來千紘、鈴木淳一、鈴木達朗 スパンの異なる木質床部材における防耐火性能予測に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、福岡大学、2016 年 8 月

菊地大悟郎、安井昇、高橋蓮、佐藤章、長谷見雄二、加來千紘、損傷の激しい木造土壁の防耐火性能(水平加力後の木造土壁の防耐火性能に関する研究)、日本建築学会大会学術講演会、福岡大学、2016 年 8 月

高瀬棕、山口智世、安井昇、長谷見雄二、上川大輔、宮林正幸、燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計に関する研究(その 1 木材の自消条件から見た燃えしろ・燃え止まり層の最適設計の検討)、日本建築学会大会学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015 年 9 月

山口智世、高瀬棕、板垣直行、長谷見雄二、安井昇、燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計に関する研究(その 2 実大部材への適用及び数値的設計手法の開発可能性の検証)、日本建築学会大会学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015 年 9 月

鈴木達朗、加來千紘、長谷見雄二、安井昇、上川大輔、長尾博文、腰原幹雄、亀山直央、木材の含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響(その 1 針葉樹材(スギ)の高温時ヤング係数・曲げ強度の把握)、日本建築学会大会学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015 年 9 月

加來千紘、鈴木達朗、長谷見雄二、安井昇、上川大輔、長尾博文、腰原幹雄、亀山直央、木材の含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響(その 2 広葉樹材(ケヤキ)の高温時ヤング係数・曲げ強度の把握)、日本建築学会大会学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015 年 9 月

高瀬棕、山口智世、安井昇、長谷見雄二、上川大輔、宮林正幸、燃え止まり型スギ耐火部材の適正設計に関する基礎研究 赤熱燃焼の定性的な予測とモデル化手法に関する検討、日本建築学会関東支部研究発表会、日本大学理工学部、2015 年 3 月

鈴木達朗、加來千紘、長谷見雄二、安井昇、上川大輔、長尾博文、腰原幹雄、亀山直央、加熱される木材の含水率が力学的性能に及ぼす影響、日本建築学会関東支部研究発表会、日本大学理工学部、2015 年 3 月

高橋蓮、安井昇、関口佳織、高田峰幸、長谷見雄二、加來千紘、神戸麻千子、水平加力後の木造土壁の防耐火性能に関する研究、日本建築学会関東支部研究発表会、日本大学理工学部、2015 年 3 月

山口智世、小宮祐人、上川大輔、長谷見雄二、安井昇、宮林正幸、木材の燃焼過程のモデル化に向けた熱物性値の把握、日本建築学会大会学術講演会、神戸大学、2014 年 9 月

原崇之、安井昇、鈴木淳一、角田彩乃、長谷見雄二、水上点晴、火災加熱の状況が木製床及び屋根の防耐火性能に与える影響、日本建築学会大会学術講演会、神戸大学、2014 年 9 月

Yuji Hasemi, Noboru Yasui, Kotofumi Kato, Naoyuki Itagaki, Jun'ichi Izumi, Tatsuo Osaka, Teruhiko Kaku, Tomohiro Naruse, Ichiro Hagiwara, Koji Kagiya, Jun'ichi Suzuki, Full-scale fire tests of 3-storey wooden school building, World Conference on Timber Engineering, Quebec City, カナダ, 2014 年 8 月

Chihiro Kaku, Yuji Hasemi, Influence of fire exposure on the mechanical properties of wood, World Conference on Timber Engineering, Quebec City, カナダ, 2014 年 8 月

Yuji Hasemi, Regional disaster planning reconsidered in historic districts, International Seminar on Traditional Area-based Fire Disaster Mitigation Planning, 台南市、台湾、2013 年 12 月

〔産業財産権〕

建築基準法に基づく 1 時間耐火構造性能評価性能評価機関名：一般財団法人ベターリビング

性能評価番号：KE-C002-15「スギ集成材・強化せっこうボード・難燃処理合板被覆ノスギ構造用集成材はり」

取得年月日：平成 27 年 5 月 28 日

6 . 研究組織

(1)研究代表者

長谷見 雄二 (HASEMI Yuji)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40298138

(2)研究分担者

板垣 直行 (ITAGAKI Naoyuki)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：00271891

鈴木 淳一 (SUZUKI Jun'ichi)

国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官

研究者番号：10453846

腰原 幹雄 (KOSHIHARA Mikio)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：50334321

原田 和典 (HARADA Kazunori)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：90198911

小野 徹郎 (ONO Tetsuro)

椋山女学園大学・生活科学部・教授

研究者番号：30024300

平成 26 年度末・退職時まで