

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04532

研究課題名(和文)木質耐火構造における燃え止まりメカニズムの解明とそれに基づく2時間耐火CLT開発

研究課題名(英文)Elucidation of flame-die-out mechanism in fireproof wooden structure and development of 2-hour fireproof Cross Laminated Timber (CLT)

研究代表者

原田 寿郎 (Harada, Toshiro)

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

研究者番号：50353818

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)：CLTを中層の木造建築物の壁や床に使用するには2時間耐火の性能を付与する必要がある。本研究では石膏ボードなど無機材料で被覆する方法と難燃処理木材で被覆する方法について検討した。前者では、ケイ酸カルシウム板と石膏ボードを組合せ、被覆層の厚さを60mm程度とする方法が最も合理的であることを示した。後者では、被覆材の仕様を厚さ30mmの難燃処理木材3層と厚さ10mmの表層用の無処理木材を積層接着して一体化した難燃処理木質パネルでの被覆が有効であることを示した。これにより、CLTの壁構造や床構造に2時間耐火性能を付与できる仕様を提示することができた。

研究成果の概要(英文)：In order to use the CLT for the wall and floor of a mid to high-rise wooden building, it is necessary to give 2-hour fireproof performance to CLT structures. In this study, the method of covering with inorganic materials such as gypsum board and the method of covering with fire-retardant impregnated wood were investigated.

In the former case, it was shown that the combination of the calcium silicate board and the gypsum board (total thickness of the covering layer was about 60 mm) is most appropriate. In the latter case, the effective specification of the covering material was a fire-retardant impregnated wood panel in which a three layers of 30 mm thick fire-retardant impregnated wood and a 10 mm thick untreated wood layer were laminated and bonded together with adhesives.

According to these results, we can present specifications to make CLT wall and floor structures 2-hour fireproof.

研究分野：木質防耐火、木材加工

キーワード：建築構造・材料 CLT 耐火構造 難燃処理

1. 研究開始当初の背景

2000年の改正建築基準法の施行により木質構造であっても性能を満たせば耐火建築物に使用することができるようになった。これを受け、無機材料で木材を被覆するメンブレン型や難燃処理木材を燃え止まり層に配置する方法などにより木質の1時間耐火構造が実用化され、耐火建築物が建設されるに至っている。この動向は、2010年の公共建築物等木材利用促進法の制定によりますます加速し、新たな木質材料として期待される直交集成板（CLT）のJAS制定とも相まって、大型の中層建築物への木材利用の期待が膨らんでいる。

中層建築物や大規模建築物では耐火性能の付与が不可欠となるが、耐火構造では火災終了後も建築物が自立することが求められる。性能評価では、一定時間の加熱終了後も荷重を负荷したまま試験体を炉内に放置して試験を継続するので、木質材料の場合、自然に炎が消え、構造的に必要とされる断面積を残して燃え止まるための工夫が必要となる。

研究代表者らはこれまでに、木材への難燃薬剤の注入処理により内装用準不燃材料を開発したほか、難燃薬剤を注入した木材を荷重支持部の周りに配置する手法により、石膏ボード等は使用せず、スギ材のみで構成される1時間耐火構造の集成材の柱、梁の開発に成功した。この耐火集成材は、無処理木材（表層）、難燃処理木材（燃え止まり層）、無処理木材（荷重支持部）からなる構成（図1）で、特許を取得するとともに、梁・柱で1時間耐火構造の国土交通大臣認定を取得しており、東京都文京区の防火地域に建設された野菜倶楽部 *oto no ha Café* の構造部材として実用に供されている。また、CLTについても同様の手法により、1時間耐火性能を付与できることを明らかにした。日本では、5階建て以上の中層木造建築物の実現に向けては、2時間耐火構造の木質材料の開発が必須となる。



図1 耐火集成材の構成

軸組構造や枠組み壁工法では、木質構造材料に1時間耐火性能を付与するいくつかの方式が実用化されているが、木質材料の耐火構造に求められる「燃え止まり」のメカニズムは未解明であり、また、今後、中層木造建築物の構造材料として期待されるCLTに2時間耐火性能を付与する仕様は開発の途上で、これらの課題解決が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

(1) 燃え止まりのメカニズム解明については、耐火加熱時の木材の熱分解に関する計算式の検討は行われているものの、現象を十分に説明するには至っていない。その理由は、木材の燃焼は、単なる熱伝導モデルでは解析できず、木材の燃焼時の現象が複雑に絡み合っているからである。本研究では、既存の1時間耐火試験結果を基に、水分の蒸発、熱分解による潜熱・発熱および物性値の変化、赤熱燃焼による発熱、炭化物の焼失などを考慮した解析モデルを提示し、耐火性能を付与した木質材料の耐火加熱試験における燃え止まりのメカニズムを明らかにする。

(2) CLTに2時間耐火の性能を付与する方法として石膏ボード等無機材で被覆する方法について検討し、有効な仕様を明らかにするとともに、実用化に向け、所期の性能を有する耐火CLT構造を効率的に製造する技術を開発する。

(3) CLTに2時間耐火の性能を付与する方法として、石膏ボード等を使用せず、難燃処理した木材で被覆する方法について検討し、有効な仕様を明らかにするとともに、実用化に向け、所期の性能を有する耐火CLT構造を効率的に製造する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 被覆材料および木質構造材料の構成や厚み、物性を変化させた場合に、火災時の内部温度推移がどのようになるか予測することが可能になれば、耐火構造の木質材料に必須とされる耐火試験時の「燃え止まり」を実現するための部材の構成断面を科学的な知見に基づいて設計することができる。このため、小型炉での耐火試験を基に耐火被覆等の仕様と断熱性などの耐火性能との関係を検証するとともに、1次元の熱伝導解析により耐火試験時の部材内部温度を予測する方法を検討する。

(2) CLTへの2時間耐火性能付与技術開発の第1ステップとして石膏ボード等の無機材料による被覆について検討する。まずは、60cm×60cm程度の試験体を用いた小型炉での試験により、有効な仕様を検討する。2時間耐火CLTの実用化に向けては、指定性能評価機関での実大寸法の試験体による性能評価が必須であることから、小型試験から明らかとなった有効な仕様による壁での2時間耐火の実大加熱試験を建材試験センターで実施し、性能を検証する。

(3) 次に石膏ボード等の無機材料を用いず、難燃処理した木材での被覆によりCLT構造に2時間耐火性能を付与する仕様を検討するため、実大の壁試験体及び床試験体を作製して、建材試験センターにおいて2時間耐火の実大加熱試験を実施して性能を検証する。

4. 研究成果

(1) 燃え止まりメカニズムの解明については、CLTを無機材料で被覆した試験体に対する2

時間加熱試験（ISO834 の標準加熱温度に従って 2 時間加熱したのち自然放冷）の結果を基に、CLT および被覆材料からなる試験体の厚み方向の熱移動を、空間的には中央差分、時間的には 4 次精度のルンゲクッタ法を用いた一次元の非定常熱伝導解析モデルによる熱伝導解析を行ったところ、内部温度の変化について、実測値と比較的よく一致する解析結果（図 2）が得られた。

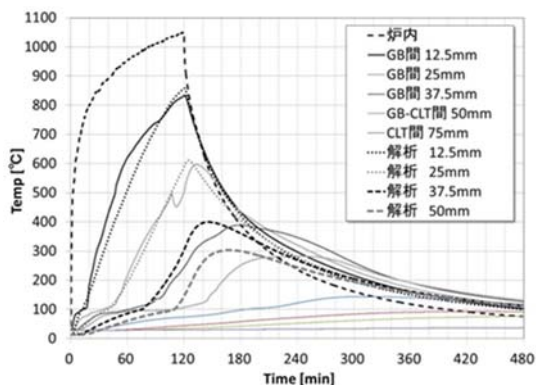


図 2 石膏ボード被覆型 CLT の内部温度の推移と推計値の比較
一次元の非定常熱伝導解析モデルによる熱伝導解析と実験値は比較的よく一致

(2) 無機材料での被覆により CLT に 2 時間耐火性能を付与する検討については、60 cm×60 cm 程度の試験体を用いた小型炉での試験の結果から、2 時間耐火の構造としては、ケイ酸カルシウム板を加熱側に配置し、内側に結晶水を多く含む石膏ボードを配置し、被覆の層厚を 60 mm 程度とする方法が最も合理的であることが明らかとなった。この結果に基づいて、実大寸法の壁試験体を作製し、2 時間耐火試験を行った（図 3）。



図 3 CLT 壁構造の実大加熱試験

2 時間加熱、6 時間放置後も耐火性能に問題はなく、試験終了時の試験体観察においても、ケイ酸カルシウム板は、亀裂はあるものの脱落は見られず、加熱側の CLT 表面は 260°C 以下で（図 4、表 1）、ネジ穴を含め、炭化は認

められなかったことから、2 時間耐火性能を満たす性能が得られた。

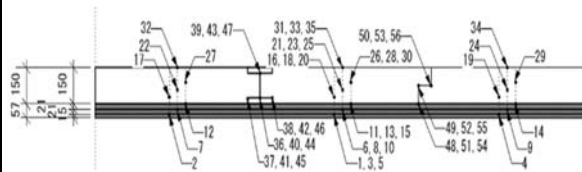


図 4 無機材料被覆壁試験体の断面（水平断面、下が加熱側）と熱電対の挿入位置（・が挿入位置、数字は熱電対の番号）

表 1 無機材料で被覆した CLT 壁構造の 2 時間耐火試験において内部に取り付けた熱電対の最高温度

温度測定位置	No.	最高温度 (°C)
ケイ酸カルシウム板の裏面	1	720.4
石膏ボードと石膏ボードの間	9	362.8
石膏ボードと CLT 板の間	14	144.8
CLT の加熱側から深さ 30 mm	19	83.3
CLT の加熱側から深さ 60 mm	22	64.1
CLT の加熱側から深さ 90 mm	29	44.4
試験体の非加熱面	35	21.0
スプライン継手の加熱面側	41	96.5
相欠き継手	49	84.0

注) No. は図 4 に示した熱電対の番号

(3) 薬剤を注入して難燃化した木材で CLT を被覆することで 2 時間耐火性能を付与する検討については、まず CLT 壁構造において実大載荷加熱試験を実施して性能を検証したが、難燃処理した厚さ 40 mm のスギラミナを幅接ぎせず、ネジ止めで 2 層、交互に積層するといったかなり挑戦的と思われる試験体仕様で臨んだため、2 時間耐火の性能を付与するには至らなかった。

この教訓を踏まえ、床構造の検討に際しては、難燃処理ラミナを幅接ぎ後に積層してパネル化し、パネル同士は雇い実あるいは片側スプライン継ぎ手で突きつけるなどにより隙間が生じにくい仕様で試験体を作製し、2 時間耐火試験を実施したところ（図 5）、燃え止まりが確認できた（図 6）。



図 5 CLT 床構造の実大加熱試験

この結果、難燃処理木材で被覆した CLT 床構造においては、被覆材としては難燃処理木

質パネルを一体化して作製し、難燃処理層 90 mm + 無処理層 10 mm の被覆厚さがあれば、2 時間耐火試験で燃え止まること、パネル同士の接合には難燃処理した木材を用いた雇い実や片側スプラインが有効であること、パネルの留め付けに当たっては、パネルに座掘りしてからパネリードで CLT に留め付け、ネジ穴を木材で埋める施工方法を採用すれば、被覆材の現場施工が可能であることなどが明らかとなった。



図 6 耐火試験後の難燃処理木質パネルの炭化状況

これにより、難燃処理木材による被覆で CLT に 2 時間耐火性能を付与可能な仕様を提示することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① 上川大輔、原田寿郎、稲田達夫、倉富洋、塩崎征夫、村田忠、矢埜和彦、被覆型 CLT2 時間耐火構造開発に向けた小型炉実験と実大耐火試験、木材保存、査読有、vol. 42、No. 6、2016、pp. 294-302

〔学会発表〕(計 5 件)

① 上川大輔、原田寿郎、宮武敦、新藤健太、服部順昭、安藤恵介、宮林正幸、2 時間耐火 CLT 壁の開発—無機被覆型への実大載荷加熱試験と熱伝導解析—、第 67 回日本木材学会大会、2017

② 上川大輔、原田寿郎、宮武敦、新藤健太、服部順昭、安藤恵介、宮林正幸、被覆型 CLT 壁の 2 時間耐火試験と熱伝導解析、第 34 回日本木材加工技術協会年次大会、2016

③ 原田寿郎、上川大輔、宮武敦、新藤健太、服部順昭、安藤恵介、宮林正幸、石膏ボードとケイ酸カルシウム板で被覆した CLT 壁の 2 時間耐火加熱試験の結果、2016 年度日本建築学会大会、2016

④ Daisuke Kamikawa、Toshiro Harada、Tatsuo Inada、Yoh Kuratomi、Ikuo Shiozaki、Tadashi Murata、Fireproof tests and heat conduction analyses for development of 2-hour fire resistant structures、WCTE2016 World Conference on Timber Engineering、2016

⑤ 上川大輔、原田寿郎、稲田達夫、倉富洋、塩崎征夫、村田忠、被覆型 CLT2 時間耐火構造の開発に向けた小型炉試験と熱伝導解析、第

33 回日本木材加工技術協会大会、2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 寿郎 (Harada, Toshiro)
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
研究者番号：5 0 3 5 3 8 1 8

(2) 研究分担者

新藤 健太 (Shindo, Kenta)
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
研究者番号：1 0 4 1 4 4 8 4

宮武 敦 (Miyatake, Atsushi)
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
研究者番号：2 0 3 5 3 8 7 8

上川 大輔 (Kamikawa, Daisuke)
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
研究者番号：3 0 4 0 9 6 5 1

安藤 恵介 (Ando, Keisuke)
東京農工大学・(連合) 農学研究科(研究員)・
講師
研究者番号：7 0 2 6 2 2 2 7

服部 順昭 (Hattori, Nobuaki)
東京農工大学・(連合) 農学研究科(研究員)・
名誉教授
研究者番号：9 0 1 1 5 9 1 5

(3) 研究協力者

宮林 正幸 (Miyabayashi, Masayuki)
(有) ティー・イー・コンサルティング一級
建築士事務所