

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：17701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07087

研究課題名(和文)次世代の多機能CLTの開発 - 森林資源の活用を促進する革新的な木質構法 -

研究課題名(英文)Development of the multifunctional CLT

研究代表者

鷹野 敦 (TAKANO, Atsushi)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：70778092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、木の材料特性を活かした付加価値の高い「多機能CLT」の開発を行う。まず、CLTに関する文献調査を行い、その材料的・構法的特徴を体系的に整理した。次に、CLTの長所・短所について異なる視点から評価を行い、CLTの特性を客観的に記述した。それらの分析からCLTの断熱性能と耐火性能の向上に注目し、小型試験体による加熱および熱伝導率の予備試験を行った。試験の結果をもとに試験体の改良を繰り返し、多機能化へ向けた基礎的な知見を集積した。今後は、中型の試験を用いた予備試験を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop "Multifunctional CLT" by enhancing the material properties of wood. Firstly, characteristics of CLT in term of a material as well as construction system was studied based on literatures. Secondly, the characteristics were described in accordance with the four aspects in order to objectively understand pros and cons of CLT. Based on these studies, a target of multifunctionalization was set on "Fire proof" and "Thermal insulation". By using small test specimens, preliminary experiments of incubation test and thermal conductivity test have been conducted. The test specimens have continuously improved based upon results. Through the preliminary experiment, basic knowledge regarding the multifunctionalization was obtained.

研究分野：木質材料・構法

キーワード：建築構造・材料 木質材料 CLT 耐火

1. 研究開始当初の背景

林業の活性化や地球温暖化の抑制の為、建物への積極的な木材の利用が国策として進められている。特にCLT(直行集成板)に代表される「塊」としての木材の利用が高い関心を集めている。木を塊として使うことで、本来弱点とされてきた湿度に対する動きや耐火性が改善され、同時に強度や断熱性といった木の持つ良さをより活かすことができる。さらに、建物における木材使用量の増加にも繋がり、より高い環境的効果(炭素貯蔵等)と林業の活性が期待できる。

しかし、CLTは木の良さに基づく多才な材料ではあるが、その構法は発展の途上にある¹⁾。現状では、建物の条件によってCLTの上に断熱材や耐火被覆などを付加する必要がある。つまり、建物各部で求められる性能をCLT単体でまかなえないため、二次部材で補う造り方である。結果、これまで世界中で建設されたCLT建築のほとんどが、二次部材で覆われ木部(CL T)が見えない造り方となっている²⁾。CLT造であることを活かしてきていない。また、この不合理な構法が建物各部で過剰性能を生み、建物の生涯を通じた環境負荷や経済性を悪くする³⁾。さらに、この足し算的な構法は、施工精度への依存度が高く、小さな施工ミスが致命的な問題を引き起こす繊細な造り方である。このような背景から、近年、シンプルで強靱な木質構法の考案が重要な研究テーマとなっている⁴⁾。これに対し、二次部材を合理化する取り組みは散見されるが、CLT自体の改善から構法を見直す発想は未だ無い。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、CLTが厚手のラミナ(挽板)の積層であることに着目し、異なる樹種や加工・改質を加えたラミナを組み合わせることで、構造強度に加え耐火・断熱・調湿・防水・美観等の性能を高めた「多機能CLT(図1)」を開発することである。本課題では、研究全体の基礎となる文献調査に基づくCLTの材料特性の客観的な評価と、多機能化に向けた小型試験体による予備実験に取り組む。

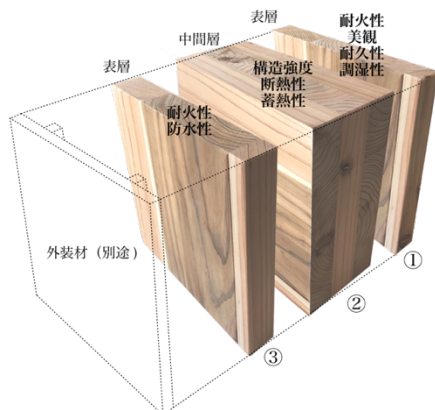


図1 CLTの多機能化のイメージ

3. 研究の方法

研究期間(2年)を5つのステップに分け、1)CLTに関する体系的調査、2)CLTの多角的評価、3)適材適所なCLTの使用と材料としての発展可能性(多機能化)の考察、4)試験体による性能検証、5)多機能CLT試作品の作成と成果のまとめ、の流れで研究に取り組んだ。

Step1:

CLTに関する「材料的・構法的特徴」「法令・規制」及び、使用に際し建物の各部で求められる「性能と仕様」について、文献調査により体系的に整理する。また、国内外のCLT建築の視察を行い、最新の情報を収集する。

Step2:

ステップ1で整理をした情報をもとに、SWOT分析を援用したCLTの多角的分析を行う。CLTの内的要因(Strengths=強み、弱み=Weaknesses)と外的要因(Opportunities=機会、Threats=脅威)を、「材料」と「構法(建物)」の二つの視点から一体的かつシンプルに捉える。SWOT分析における評価尺度として「意匠性」「構造性」「環境性」「経済性」の4つを設定し、様々な視点からCLTの長所・短所を明らかにする(図2)。

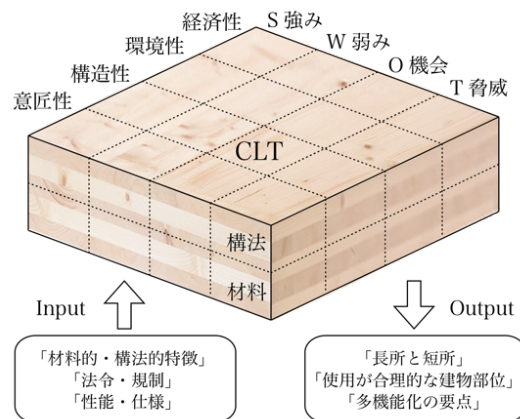


図2 SWOT分析を援用したCLTの多角的分析

Step3:

ステップ2の結果に基づき、1)CLTを使うと合理的な建物部位、2)それらの部位で求められる機能に合わせたラミナの改善方法を検討する。

本課題では、建物部位の中でも機能要件が多い外壁を対象に、構造強度を保持しながら、求められる耐火と断熱の性能を同時に満たす多機能CLTの開発をターゲットとする。

Step4:

耐火・断熱性能を向上させるため、CLTのラミナ構成を改良した小型試験体を作成し、加熱試験及び熱伝導率試験により総合的な評価を行う(図3)。

加熱試験は電気マッフル炉を用い、450×450×90mmのCLT(3層3プライ)に12種類の異なるラミナを付加した試験体を同条件で1時間加熱する。CLT表面の温度変化を測定するとともに、加熱後の付加ラミナの燃焼状況

及び CLT 表面の焦げの状態を目視で確認する。加熱のスケジュールは、JIS A1304 で規定される「加熱時間-温度曲線」に従う。1 時間の加熱後は、炉内の温度が 500 度以下になるまで放置し試験体を取り外す。

熱伝導率試験は、JIS A1412-1 に規定される「保護熱板法」を参照した測定装置を製作し実測する。170×170×90mm の CLT に 6 種類の異なるラミナを付加した試験体を用いる。また、1 次元の定常熱伝導モデルによるシミュレーションを行い、実測の結果と合わせて試験体の熱伝導率及び熱貫流率を概算する。

通常の CLT との比較を通して、改良型 CLT の性能を明らかにする。試験結果をもとに試験体を改善し、再度性能を検証するというサイクルを繰り返す。

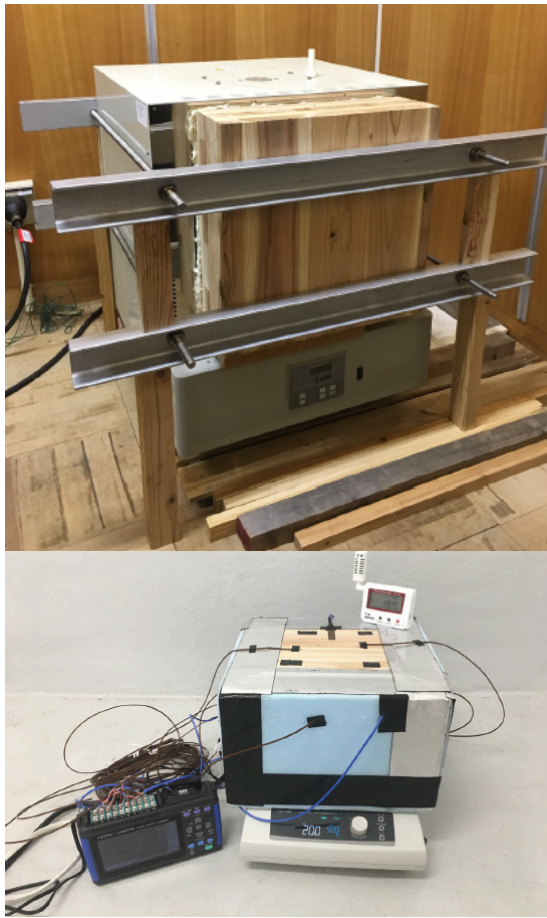


図3 加熱試験(上)と熱伝導率測定(下)のセットアップ

表1 小試験体による加熱試験の結果

| | ファルカタ13+18 | 炭化コルク30 | 竹集成材30 | アカガシ30 | 炭化コルク50 | スギ30 | 桐30 | 炭化コルク30 + アカガシ15 | ファルカタ13+18 + アカガシ15 | ファルカタ13+18 + 竹集成材15 | 炭化コルク30 + 竹集成材15 | 炭化コルク30 + スギ15 |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| 側面図 | | | | | | | | | | | | |
| 実験日 | 2018.02.15 | 2018.03.13 | 2018.03.27 | 2018.03.28 | 2018.03.29 | 2018.03.30 | 2018.04.03 | 2018.04.05 | 2018.04.10 | 2018.04.11 | 2018.04.12 | 2018.04.13 |
| 天気 | 雨時々曇 | 晴時々曇 | 曇後晴 | 晴 | 晴 | 晴時々薄曇 | 快晴 | 晴時々曇一時雨 | 晴 | 曇一時雨 | 晴 | 薄曇一時雨 |
| 平均気温 | 12.2℃ | 15.3℃ | 16.6℃ | 17.1℃ | 18.1℃ | 18.3℃ | 20.0℃ | 20.9℃ | 12.0℃ | 20.8℃ | 21.8℃ | 20.2℃ |
| 平均湿度 | 91% | 75% | 62% | 64% | 63% | 68% | 69% | 79% | 70% | 77% | 71% | 62% |
| 試験体の重さ | 10.95kg | 10.02kg | 13.21kg | 14.5kg | 10.29kg | 11.61kg | 11.2kg | 12.81kg | 13.68kg | 12.83kg | 11.71kg | 10.87kg |
| 加熱終了時の CLT表面温度 | 93.3℃ (CH2) | 201.6℃ (CH2) | 66.5℃ (CH1) | 53.1℃ (CH2) | 142.9℃ (CH2) | 77.2℃ (CH1) | 104.2℃ (CH1) | 80.2℃ (CH1) | 31.4℃ (CH1) | 36.1℃ (CH1) | 61.6℃ (CH1) | 88.6℃ (CH1) |
| 放置した時間 | 1時間44分 | 1時間18分 | 56分 | 1時間48分 | 2時間22分 | 1時間 | 1時間16分 | 1時間34分 | 59分 | 1時間19分 | 1時間13分 | 2時間24分 |
| 炉から外す直前の CLT表面の温度 | 328.9℃ (CH1) | 334.5℃ (CH1) | 143.3℃ (CH1) | 231.9℃ (CH1) | 305.9℃ (CH2) | 167.6℃ (CH1) | 247.4℃ (CH1) | 151.8℃ (CH1) | 97.9℃ (CH1) | 113.4℃ (CH1) | 135.3℃ (CH1) | 379.5℃ (CH1) |
| CLT表面の焦げ | あり | あり | なし | あり | あり | なし | なし | なし | なし | なし | なし | あり |

Step5:

ステップ 4 の結果に基づき、最終試作品を作成し、多機能 CLT の開発に関する成果をまとめる。

4. 研究成果

紙面の関係上、ここでは小型試験体を用いた加熱及び熱伝導率試験の結果を以下にまとめる。

4.1. 加熱試験

12 体の試験体を用いた加熱試験の結果の概要を表 1 にまとめる。1 時間の加熱終了時の CLT の表面温度、炉内が 500 度以下となるまでの時間、炉から試験体を外す直前の CLT 表面温度について、試験体毎に大きな差が確認出来る。低比重のラミナ（炭化コルクやファルカタ）は断熱性能を向上させる反面、燃焼が早く、CLT への影響が大きいことが確認出来る。他方、アカガシのような高比重のラミナを付加した場合、1 時間の加熱直後でもアカガシ自体の燃焼はなく、CLT への熱の伝わりも少ない。しかし、一度燃焼が始まると割れなどによるラミナの変形が起り、CLT 表面へと燃焼が進行した。アカガシの 30mm 厚のラミナはクセが強く、板状に製材することも困難であったが、CLT として積層した後も、加熱によって予期せぬ動きをすることが確認された。竹の集成材（30mm 厚）は燃え抜けることなく、CLT 表面への影響も少なかった（図 4）。竹集成材に割れなどは発生せず、炉内温度の低下も早かった。

これらの結果を踏まえ作成した低比重と高



図4 竹の集成材を用いた試験体：加熱後の CLT 表面

表2 実測とシミュレーションを用いて求めた各試験体の熱貫流率

| 断熱層素材 | 各層の仕様 | 既知 熱伝導率 (W/mK) | 理論値 熱貫流率 (W/m ² K) | シミュレーション 熱伝導率 (W/mK) | 測定値 熱貫流率 (W/m ² K) | 熱貫流率誤差 (W/m ² K) |
|----------|-------|-------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| スギ | スギ | 0.116 | 0.661 | 0.120 | 0.658 | -0.003 |
| | スギ | 0.116 | | 0.100 | | |
| | CLT | 0.116 | | 0.120 | | |
| 炭化コルク | スギ | 0.116 | 0.503 | 0.090 | 0.464 | -0.039 |
| | 炭化コルク | 0.041 | | 0.050 | | |
| | CLT | 0.116 | | 0.090 | | |
| ファルカタ | スギ | 0.116 | 0.633 | 0.100 | 0.561 | -0.072 |
| | ファルカタ | 0.090 | | 0.083 | | |
| | ファルカタ | 0.090 | | 0.083 | | |
| | CLT | 0.116 | | 0.100 | | |
| キリ | スギ | 0.116 | 0.631 | 0.100 | 0.546 | -0.085 |
| | キリ | 0.091 | | 0.073 | | |
| | CLT | 0.116 | | 0.100 | | |
| キリ(スリット) | スギ | 0.116 | 0.548 | 0.090 | 0.546 | -0.002 |
| | キリ | 0.091 | | 0.070 | | |
| | CLT | 0.116 | | 0.090 | | |
| キリ(中空) | スギ | 0.116 | 0.583 | 0.090 | 0.546 | -0.037 |
| | キリ | 0.091 | | 0.070 | | |
| | CLT | 0.116 | | 0.090 | | |

比重ラミナを組み合わせた試験体（炭化コルク 30mm+アカガシ 15mm, ファルカタ 31mm+竹集成材 15mm など）では、CLT 表面温度の上昇も少なく、焦げ目もつかないことが確認された。多くの場合、高比重ラミナまで燃焼は到達しておらず、炉内温度の低下も比較的早かった。低比重ラミナが加熱初期の熱の伝わりを軽減するとともに、高比重ラミナによる熱の吸収により、燃焼を抑制すると考えられる。

本予備実験により、各ラミナ構成の耐火性能の概要を把握することができた。今後は、各ラミナの加工性や経済性も勘案し、準耐火または耐火の部材として、それぞれ総合的により効率の良い試験体を試作し、中型の試験体により予備試験を行う予定である。

4.2. 熱伝導率試験

6 体の試験体を用いた熱伝導率試験の結果の概要を表 2 にまとめる。各試験体の熱貫流率を見ると、試験体に用いた材料の一般的な熱伝導率を用いて計算した理論値に対して、実測とシミュレーションを併用して確認した測定値が若干低い値を示しているが、概ね一致している。この結果から、自作の測定設備がある程度機能することを確認できた。ただし、実測では試験体内の熱伝導が定常化せずシミュレーションで結果を補っており、試験のセットアップに改善の余地が大きく残る。

炭化コルクや桐といった熱伝導率の小さなラミナを付加すると、杉のラミナのみで構成する場合に比べ、当然、部材の熱貫流率は改善されるが、4.1 で述べた通り、耐火性能は低下する。単純にラミナの樹種を変えるだけでは耐火と断熱のバランスは取れない。先述の通り、高比重ラミナとの組み合わせを精査す

ることが重要である。同時に、ラミナに加工を加え、熱伝導率を提言しながら耐火性能は保持するような手立ての検討が次の課題として挙げられる。

4.3. 今後の展望

上述の小型試験体を用いた予備試験による検証を継続し、耐火と断熱性能及び、加工性や経済性のバランスのとれたラミナ構成の絞り込みを行う。予備試験の結果をもとに、H30 年度中に、中型試験体による詳細な加熱試験と熱貫流率試験を行う予定である。

[引用文献]

- 1) 腰原幹雄 他: 都市木造のヴィジョンと技術. オーム社, 2012
- 2) Kallio M: *Wooden multistory construction, Stora Enso Building Solutions, 2014/2*
- 3) Takano A, et al.: *The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland, Building and Environment 89: pp.192-202, 2015*
- 4) Cronhjort Y. et al.: *Timber Building Details for Leaner Design process, SBE16 Hamburg, 2016*

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷹野 敦 (TAKANO Atsushi)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号: 70778092