

CLTによる木造建築物の設計法の開発（その3）

～防耐火性能の評価～

建築防火研究グループ 上席研究員 成瀬 友宏

目次

- I はじめに
- II CLTの燃えしろを検討するにあたっての課題
 - 1) 木材・製材・集成材・CLTの特徴
 - 2) CLTと燃えしろ
 - 3) CLTの燃えしろを検討するにあたっての課題
- III CLTの防耐火性能の評価
 - 1) CLTの燃えしろに関する実験的検討
 - 2) CLT壁パネルの非損傷性に関する実験的検討
 - 3) CLT等の防耐火性能に関する建築研究所のその他の取り組み
- IV おわりに
- 参考文献

I はじめに

1990年代にオーストリアで開発され、欧米においてはすでに多くの建設実績のある木質構造材料であるクロス・ラミネーテッド・ティンバ（以下、CLTと呼ぶ）を、我が国においても普及させるための研究活動が行われている。これは、CLTの寸法安定性が高いこと、厚みのある製品であることから、断熱性・遮音性・耐火性を持つことが期待され、木材の有効利用にもつながるからである。

独立行政法人建築研究所では、2011年よりCLTを含む木質材料を用いた建物の防耐火設計に関する基準の整備に必要な技術的な知見を収集するための研究を実施しており、本稿では、その概要について紹介するとともに、燃えしろの制定に向けて実施している研究内容について紹介する。

なお、CLTの検討に関しては、平成26年度国土交通省基準整備促進事業において（一社）日本CLT協会と共同研究を締結し、林野庁の事業とも情報を共有しながら進め、別途、国土交通省国土技術政策総合研究所とも共同研究を締結して検討している。

II CLTの燃えしろを検討するにあたっての課題

1) 木材・製材・集成材・CLTの特徴

CLTの特徴を、同じ木材により構成される製材（以下、構造用のもの）、集成材（以下、化粧を含み、構造用のもの）と併せて表1に示す。防耐火性能に関係する特徴（表中に下線を記す）は以下の通りである。

製材は、基本的に木材の性質を有しており、節や割れ等の欠点を含む。

集成材は、乾燥した製材の挽き板や小角材（ラミナ）を使用することで寸法変化が少なく、その配列を調整することで必要な強度を得ることができ、節等の欠点を排除できる。

CLTは、集成材と同様にラミナを用い、図1に示すように、ラミナの繊維方向を交互に積層接着してパネルを構成することで、ラミナの繊維が同じ方向に積層接着する集成材よりさらに寸法安定性が高く、幅方法の寸法に制限がない。CLTのJAS規格（平成25年12月20日農林水産省告示第3079号）では、集成材に比べて広い範囲でラミナの節（死に節・抜け節）、割れや穴等を許容している。

表1 木材・製材・集成材¹⁾・CLTの特徴

	利点	欠点
木材	<ul style="list-style-type: none"> ・美観に優れる ・触れた際に暖かみがある ・加工が容易 ・生産時に要するエネルギーが少ない ・生育時に二酸化炭素を吸収して木材としてストックする ・重量あたりの強度(比強度という)が、鋼材に近く、コンクリートより優れる ・鉄やコンクリートに比べて熱を伝えにくい 	<ul style="list-style-type: none"> ・異方性がある ・繊維直交方向への力に対しては著しく弱い ・含水率の変化による膨張、収縮も異方性があり、繊維に対する方向により乾燥収縮の度合いが著しいために、反りやねじれや生じやすい ・比較的低温(250°C程度)で着火し、燃えた際には断面が欠損し、炭化層を形成する ・強度や美観に影響を及ぼす節や害れ等の欠点を含む ・腐朽、虫による食害、可燃性、樹種による性質の違いや同種でもばらつきがある
製材	(木材に同じ)	<ul style="list-style-type: none"> ・原木の長さや寸法による制限がある ・欠点を排除しにくい
集成材	断面寸法や長さ制限がなく曲線の成形が可能 <ul style="list-style-type: none"> ・乾燥した製材の挽き板や小角材(ラミナ)を使用することで寸法変化が少ない ・ラミナの配列を調整することで必要な強度が得られる ・節等の欠点を排除できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ラミナの原木からの歩留まりが低い(3~4割)といわれている
CLT	<ul style="list-style-type: none"> ・集成材より寸法安定性が高い ・幅方法の寸法に制限がない ・集成材に比べてラミナの原木からの歩留まりは高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・集成材に比べて広い範囲でラミナの節(死に節・抜け節)、割れや穴等を許容している

2) CLTと燃えしろ

建築基準法では、建物の規模・用途・地域(防火地域等)により、部位ごとに、柱・梁等の耐力部材には非損傷性(構造耐力上支障のある変形、溶融、破壊その他の損傷を生じないこと)、



図1 CLTパネルのラミナ構成(日本CLT協会HPより)

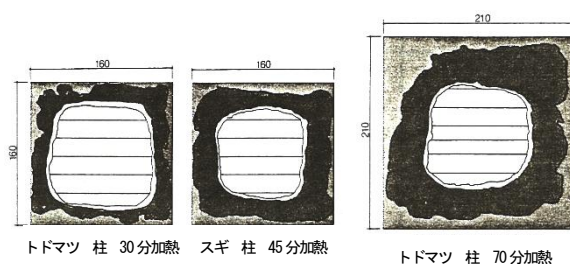


図2 集成材の炭化深さの例²⁾



スギ梁 18cm×36cm 45分加熱(背割り入り) スギ柱 30cm×30cm 45分加熱(背割り入り)

図3 製材の炭化深さの例³⁾

壁、床及び軒裏には、遮熱性(非加熱面の温度が一定以上に上昇しないこと)、外壁及び屋根には遮炎性(非加熱面に火炎を出す亀裂等の損傷を生じないこと)が、その時間とともに要求されている。

木材は、火災時の加熱を受けると、燃焼して耐力を有する断面は欠損するものの表面に炭化層を形成して、内部の温度が上昇しにくくなり炭化が進むには時間がかかる。たとえば、図2に示す通りスギの集成材柱では、加熱後の残存断面から求めた

平均炭化速度は毎分 0.74mm、断面内部の温度が 260℃になる平均速度は 0.77mm であったこと²⁾から、表面から 30mm の深さの温度が 260℃に上昇するには約 39 分かかることになる。

非損傷性についてみた場合、要求時間内で炭化する寸法（耐力を負担できなくなる燃えしろ）を加熱前の断面から差し引いた残りの断面で、柱や梁に生じる荷重（固定荷重と積載荷重）を支えられれば、部材は損傷しないことになる。このように、軸材料である柱や梁、接合部の検証結果をもとに建築基準法では燃えしろの寸法が定められており、1 時間の準耐火性能に対して集成材では 45mm の燃えしろを要求している。

これに対して、製材では、図 3 に示す通り、節や割れ等の欠点を含み、背割り等のある部分では、加熱時に炭化が進むことから³⁾、建築基準法では、製材に 1 時間の準耐火性能に対して 60mm の燃えしろを要求している。

CLT は、現行の建築基準法で燃えしろを定めている柱または梁とは異なるパネル構造であることが特徴であり、壁柱と解釈できるものを除けば、耐力壁や床に対しては燃えしろという考え方は適用できない。床については、45 分準耐火構造の告示（平成 12 年建設省告示第 1358 号）において床の上面の被覆として、厚さが 30mm 以上の木材、60 分準耐火構造の告示（平成 12 年建設省告示第 1380 号）において床の上面の被覆として、厚さが 40mm 以上の木材が定められているものの、床の下面については例示がない。

つぎに、遮熱性・遮炎性についてみた場合、集成材のラミナ内部の温度が 260℃になる平均速度は 0.77mm であったこと²⁾から、表面から 30mm の深さの温度が 260℃に上昇するには約 39 分かかること、CLT の JAS 規格では厚さについて 36mm 以上 500mm 以下と規定しており、実際の建物に用いられる厚さとして 90 mm 程度を想定した場合、十分な遮熱性・遮炎性が期待できる。

そのほか、CLT は木材のラミナを密に接着しているために隙間がほとんどなく、接合部等にすき間がなければ、CLT 内部が延焼経路となることはないことから、延焼防止のためにファイアストップを設ける必要はない。

3) CLT の燃えしろを検討するにあたっての課題

現行の建築基準法では、燃えしろは梁と柱の非損傷性を担保する一つの仕様として告示に定められているが、壁や床の非損傷性・遮熱性・遮炎性に対しては定められていないため、CLT 構造全体に燃えしろを適用することはできない。CLT 構造に燃

えしろを適用できるようにするために、実験等により明らかにすべき主な課題として以下の項目が挙げられる。

- ① ラミナの樹種・厚さ・接着剤の種類・層構成による CLT の炭化速度
要求耐火時間に応じた CLT の燃えしろを定める際に必要となる、基本的な炭化速度の値を求める必要がある。ラミナの樹種・厚さ・接着剤の種類・層構成のほか、ラミナの節等の欠点の影響を含め、炭化速度を測定する必要がある。
- ② CLT パネルの非損傷性に対する燃えしろの考え方の適用可能性
CLT パネルの片側が加熱された際の断面欠損に起因する偏心による、パネルの非損傷性への影響を確認する必要がある。なお、加熱前の CLT 部材の断面から燃えしろを差し引いた断面が、部材に作用する荷重に対して損傷しないかどうかを確認するためには、短期・長期の許容応力度を考慮した上で、検討する必要があるものの、その 1 に示すロードマップにあるとおり、平成 28 年に基準強度の告示を制定する計画にそって実験的な検討が行われているため、現時点では基準強度が定まっていない。
- ③ 部材を構成する CLT パネルの接合部の非損傷性確認
壁と壁、壁と床など部材を構成する CLT パネルの接合部が、加熱により構造耐力上支障のある変形、破壊等の損傷を生じないことを実験により確認する必要がある。
- ④ 部材を構成する CLT パネルの遮熱性・遮炎性確認
部材を構成する CLT パネル及びその目地部分の遮熱性・遮炎性を実験により確認する必要がある。
- ⑤ CLT パネルにより構成する部材により防火区画を構成する際の遮熱性・遮炎性確認
CLT パネルにより構成する部材を組み合わせて防火区画を構成する上で、壁や床の部材の接合方法やその目地処理、CLT 部材を給水管や配電管等が貫通する部分や開口部に設ける防火設備との取り合い部分等の防耐火性能上の問題について、実験により確認する必要がある。

III CLT の防耐火性能の評価

CLT の防耐火性能の検討結果の中で、燃えしろに関する実験を実施し、この結果に基づいて、壁の載荷加熱実験を実施して、CLT 壁の非損傷性を評価した結果を紹介する。

1) CLTの燃えしろに関する実験的検討

日本においてCLTを活用する上で、CLTの燃えしろに影響があると想定される要因として、CLTを構成するラミナの樹種・厚さ・層構成・接着剤の種類をとりあげ、表2に示す通りの条件のもとで炭化速度を実験により測定した。

実験は、図4に示す(独)建築研究所の水平加熱炉で下面からISO 834に規定する耐火加熱標準曲線に沿って加熱した。試験体は、CLTパネル(1000mm×2000mm×147-165mm厚)を表2に示す仕様を組み合わせて作成し、6枚を同時に加熱する実験を6回実施した。その中には、炭化速度の測定結果のばらつきを確認するために同じ条件で実験を実施したものを含む。パネル内には厚さ方向に加熱表面より10mm毎に熱電対を埋め込み、15秒間隔で温度を測定した。

測定された温度から、260℃になる時間と熱電対の表面からの深さより平均炭化速度を求めた結果を図5にまとめて示す。

図5に示す黒い凡例は、レゾルシノール樹脂系接着剤(RF)、白色は水性高分子イソシアネート系接着剤(API)、灰色はウレタン樹脂系接着剤(PU)で、いずれの凡例もばらつきはあるもののラミナの厚さが増すに従って平均炭化速度は、低下する傾向がみられる。平均炭化速度の値は、RF<API<PUの順である。

また、○の凡例はスギ(C)、□はカラマツ(L)、△がスプルース(S)で、平均炭化速度は、同じ厚さ、同じ接着剤でみると、ばらつきはあるもののS<L<Cの順であることが分かる。

今後CLTパネルに用いられる一般的な仕様と見込まれる厚さ20~30mmのスギのラミナを、集成材で広く使用されている水性高分子イソシアネート系接着剤でCLTパネルを作成すると想定すると、図5に示す結果、そして、残存断面から炭化の状況を確認すると図6に示すような部分的な燃え込みも見られることから、平均炭化速度として毎分1mm、燃えしろとしては製材相当の値が適当と想定される。これは表1に示した製材とCLT

表2 燃えしろに及ぼすラミナの樹種・厚さ・層構成・接着剤の種類の影響確認のための実験条件

ラミナ		接着剤(3種)
樹種(3種)	厚さ・層構成(5種)	
スギ(C)	12mm-13 プライ	レゾルシノール樹脂系(RF)
	15mm-11 プライ	
カラマツ(L)	21mm-7 プライ	水性高分子イソシアネート系(API)
スプルース(S)	27mm-6 プライ	
	30mm-5 プライ	

の特徴(節等の影響)からも伺える。今後、さらにCLTの炭化速度のデータを収集し、燃えしろの寸法を確定する予定である。



図4 水平加熱試験炉と試験終了直後の試験体の状況

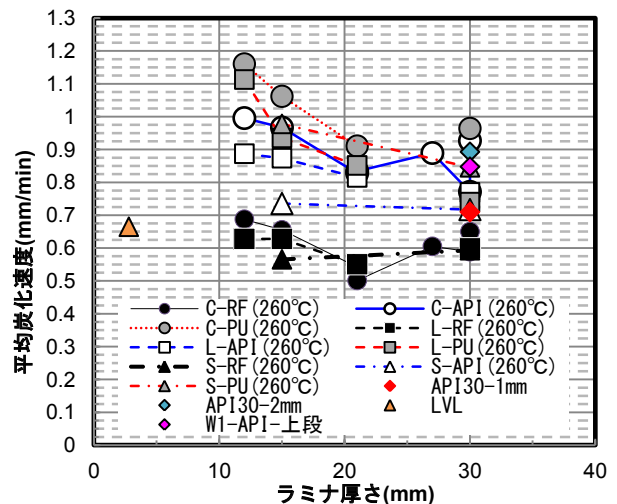


図5 ラミナの樹種・厚さ・層構成・接着剤の種類による炭化速度の測定結果

図の凡例「C-RF」は、スギ(C)-レゾルシノール樹脂系接着剤(RF)を示し、ラミナの厚さは、水平軸の目盛りが示す通りである。



図6 残存断面(スギ API 37mm-6 プライ 120分加熱後)

2) CLT壁パネルの非損傷性に関する実験的検討

CLT構造の壁は耐力壁として用いられ、片側からの加熱を受

けて炭化が進むと偏心荷重作用して曲げ応力が生じる。特に CLT で荷重を負担するのは、荷重の作用する方向に対して平行層（プライの繊維方向が平行な層）であり、その間に荷重支持が期待できない直交層が挟まれることで、断面全体が耐力上有効ではなく、有効な層に限られること、さらに、加熱面の炭化はパネルの荷重を支持する最外層のラミナを消失することを意味し、耐力が大きく低下することが考えられる。実際の CLT 構造では、壁パネルに作用する荷重はあまり大きくはないことが予想されるが、許容応力度をもとに、燃えしろを想定した載荷加熱によるパネルの耐火性能（非損傷性）を実験的に確認した。

実験は、図 7 に示す（独）建築研究所の壁載荷加熱試験炉で CLT パネルに鉛直方向の載荷を行いながら炉内側から ISO 834 に規定する耐火加熱標準曲線に沿って加熱した。試験体は、CLT パネル（スギ ラミナ厚 30mm API 接着剤 Mx60-5-5, 1000mmWx3000mmHx150mm 厚）を 2 枚の並べて載荷し、その両脇には耐力を負担しない同じ仕様の CLT パネルを設置して、非損傷性、遮熱性、遮炎性を確認した。載荷荷重は、CLT の短期・長期の許容応力度が示されていないことから、次の方法で想定した。

1) JAS 規格に定められた曲げ弾性係数の平均値

2) 実測したラミナの曲げ弾性係数の平均値

を用いて、燃えしろ（60 分間、炭化速度毎分 1mm あるいは 0.85mm）を除いた残存断面に含まれる平行層から有効断面二次モーメントを求め、座屈長さとして断面二次半径より有効細長比を求めた。有効細長比が 100 以上であることから座屈応力から荷重を算出した。

これらの条件のもと載荷加熱実験を 3 回実施した。パネル内には厚さ方向に加熱表面より 10mm 毎に熱電対を埋め込み、15 秒間隔で温度をパネルの面内方向及び面外方向の変位とあわせて測定した。

図 8 に変位の測定結果の一例を示す。荷重の作用方向に平行層の最外層のラミナ 30mm が炭化するに従って面内方向の変位（赤線で示す）が増加し、温度の測定結果から直交層のラミナが炭化し始めると考えられる 38 分以降は、直交層が炭化するが面内方向の変位に大きな変化は見られない。このことから、直交層は荷重支持にあまり寄与していないことが分かる。

3 回の実験から、70 分、74 分、77 分間の加熱に対して非損傷性・遮熱性・遮炎性を有していることが確認できた。なお、短期許容応力度から求められる載荷荷重は、実験における載荷荷重に対して、安全率を見込むため小さくなる。これらの結果



図 7 CLT 壁パネルの載荷加熱実験中と加熱終了後の様子

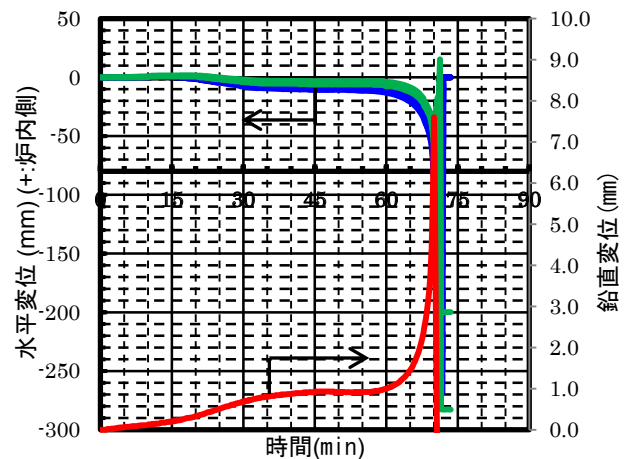


図 8 CLT 壁パネルの載荷加熱実験による変位の一例

から、パネルの破損が予想される 3 層 3 プライで両面加熱を受ける場合を除いて、CLT 壁パネルに燃えしろを想定した際の非損傷性について、1 時間の要求時間に対しては問題とはならないものと評価される。また、平均炭化速度は、毎分 0.84mm 程度となった。

3) CLT 等の防耐火性能に関する建築研究所のその他の取り組み

建築研究所では、CLT の燃えしろおよび CLT 壁パネルの非損傷性に関する実験的検討以外にも、CLT パネル表面に被覆材を設け、燃えしろを低減する実験を実施している。

例えば、CLT パネルのラミナの厚さや構成により、最外層のラミナに耐力を期待したい場合や、内装制限や遮音上の要求から、壁や天井を防火材料で仕上げる必要がある場合、その防火

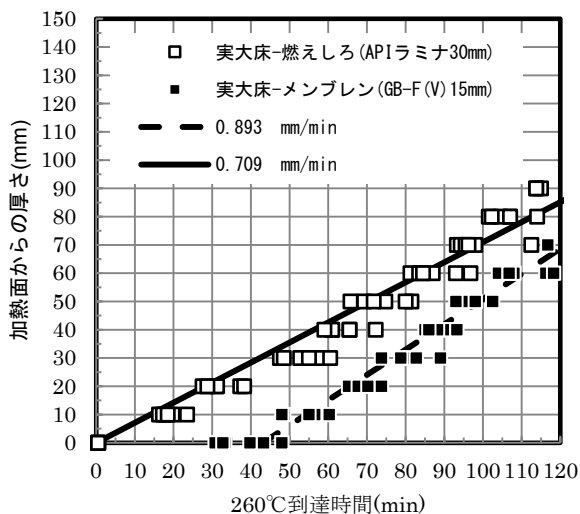


図9 CLT内の温度上昇(強化せっこうボード15mm)

材料がどの程度の燃えしろに相当するかを実験的に検討した。

実験は、CLTの燃えしろに関する実験的検討と同様に、図4に示す(独)建築研究所の水平加熱炉で下面からISO 834に規定する耐火加熱標準曲線に沿って加熱した。試験体は、CLTパネル(1000mmx1000mmx150mm厚)の下面に、せっこうボード12.5mm、強化せっこうボード12.5mmと15mm、ケイ酸カルシウム板(0.8FK)12mm、金属サイディング、窯業系サイディング16mmをそれぞれ張り、パネル内には厚さ方向に加熱表面より10mm毎に熱電対を埋め込み、15秒間隔で温度を測定して、温度が上昇し始める時間を平均炭化速度毎分1mmで除して、各材料が燃えしろに相当する厚さとして求めた。

結果の一例として、強化せっこうボード15mmを張ったCLTパネル内部の温度を図9に示す。この結果から、CLT内の温度は、おおよそ43分時点から上昇し始めることから、平均炭化速度を毎分1mmと想定すると燃えしろ43mmに相当することが分かる。そのほかの被覆についても、それぞれに相当する燃えしろ寸法を算出した。

このほかにも、建築研究所では、

- ・CLT床パネルの非損傷性に関する実験的検討
- ・CLTパネルの接合部、区画貫通部の実験的検討
- ・LVLパネルの燃えしろおよび非損傷性に関する実験的検討

等を実施して、CLTを含む木質材料を用いた建物の防耐火設計に関する基準の整備に必要な技術的知見を収集するための研究を行っている。検討の結果については、別の機会に詳しく紹介したい。

IV おわりに

CLTパネル構造に対して燃えしろの考え方が適用できるかどうかについて実験による検討を行い、今後日本において使用されることが予想されるCLTの仕様に対する燃えしろの値について、具体的な数値を定めるための知見が蓄積できた。また、壁パネルに燃えしろの考え方を適用し、載荷加熱実験を実施した結果、非損傷性・遮熱性・遮炎性が期待できる結果が得られたことを紹介した。今後も引き続き、建築基準法で木製パネル構造の燃えしろに関する基準整備に必要な技術的知見を収集して行く予定である。

参考文献

- 1) 集材材建築物設計の手引、日本集材材構造協同組合編著、大成出版社、2012.3
- 2) 中村賢一、最上滋二、構造用集成材の耐火性能実験、建築研究資料、No.56 1985.12
- 3) 成瀬ほか、構造用製材の耐火性能 その1：スギとカラマツの炭化速度、日本建築学会大会学術講演概要集 2004年