

CLTの製造における接着技術

技術部 生産技術グループ 宮崎 淳子

■はじめに

CLT (Cross Laminated Timber) はヨーロッパで開発された新しい木質パネルで (図1) , 強度異方性が小さく, 大きな荷重にも耐えられることから, 海外ではCLTを用いて中高層建築物や大規模建築物が建設されています。CLTはラミナを大量に使用し, 新しい木造建築を可能にすることから, 国が掲げる国産材の需要拡大と非住宅建築物の木造化の推進とマッチし, 製造技術や建築方法, 施工技術の開発, 規格や建築基準法の整備が急ピッチで進められてきました。現在, 国内には8つのJAS認定工場があり, CLTの生産量は13千m³ (2019年度) まで増え, 施工事例も年々増加しています。

林産試験場では, 道内でのCLT製造に先立ち, 道産材を用いたCLTの製造方法を検討してきました。ここでは, 林産試での取り組みの成果を交えて, CLTの製造における接着技術について概説します。

■CLTの製造工程

図2は, CLTの製造工程を簡単に示したフロー図です。CLTの製造では, 一般に, ひき板の乾燥, ラミナの製造 (品質チェックと等級区分, 長さカット, たて継ぎ, 仕上げ切削), 積層接着 (接着剤の塗布, ラミナの積層, 圧縮), 出来上がったパネルの加工 (トリミング, 開口部や接合部などの加工) が行われます。その工程は, CLTと同じラミナを原料とする集成材と類似しています。



図1 カラマツCLT (5層5プライ)

ラミナの製造は, 集成材と同様の設備, 方法で行われます。含水率は集成材と同様に12%以下にされ, CLTの規格である直交集成板の日本農林規格 (JAS) に従って節等の欠点のチェック, 等級区分が行われます。ラミナの等級区分機による強度性能の基準は集成材とCLTで異なり, CLTでは4つの等級に区分されています²⁾。

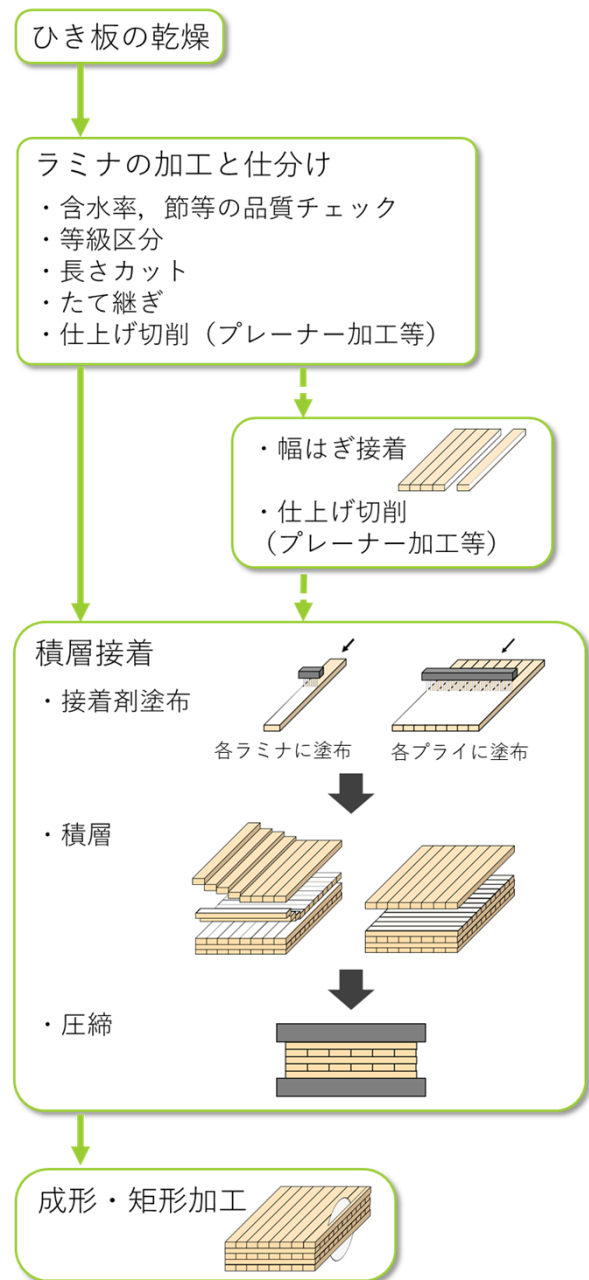


図2 CLTの製造工程

次の積層接着の工程では、ラミナを幅方向に並べて単層とし、各層の繊維方向が直交するように積層し、3~9層のパネルにします。あらかじめ、ラミナの幅方向を接着（幅はぎ接着）してから（図3）、積層する場合もあります。

1体のCLTに使用されるラミナ数は、道内で製造されているサイズ（1.2×6m）の5層5プライのもので、ラミナ幅を120mmとして計算すると、130枚にもなります。国内で製造される最大のCLT（3×12m）では、5層5プライで、275枚ものラミナが使用されます。このように、CLTでは1体あたりに使用されるラミナの数量は集成材よりも格段に多く、この大量のラミナを適切な方法で積層接着することが、CLTの製造における重要なポイントになります。

圧縮は、使用する接着剤ごとに決められた条件で行い、接着剤を硬化させて、一体化させます。圧縮装置は、CLTが一度に圧縮できる大面積の平板プレスが用いられ、加圧方式は油圧式が一般的です。また、CLTの幅方向、長さ方向の側面を整えるために、側圧をかける機構が備えられています。なお、幅はぎ接着を行う場合、側圧は必要ありません。

プレスから取り出されたCLTパネルは、養生された後、CNC加工機等で、トリミングや開口部、接合部分のプレカットが行われます。

■CLTの製造で求められるラミナの加工精度

CLTでは、ラミナを幅方向に並べた単層に繊維方向を直交させたラミナをのせるため、単層を構成するラミナの厚さが不均一で、単層内に凹凸があると、十分な圧力で圧縮してもラミナが薄い部分には圧力が伝わらず、接着剤が転写されなかったり、重なったラミナ同士が十分に密着せずに接着強さが発現しなかったりして、接着不良が発生しやすいことがこれまでの研究で分かりました（図4、5）。特にラミナの端部は、プレーナー加工の際に薄くなりやすく、他の場所よりも接着不良が多く発生しました³⁾。

ラミナに求められる厚さの寸法精度は、接着剤によって若干異なります。国内のCLT製造で使用されている接着剤である水性高分子ーイソシアネート系接着剤、レゾルシノール樹脂接着剤を用いて、部分的に薄いラミナを挿入して接着層に隙間のあるCLTを製造し、接着性能を調べた結果、JASの接着性能の基準をクリアした条件は、水性高分子ーイソシアネート系接着剤で厚さムラが0.1 mm以内、レゾルシノール樹脂接着剤で0.3 mm以内であることが示され

ました⁴⁾。なお、接着剤の塗布量は、どちらも200 g/m²で、CLTの一般的な塗布量としました。塗布量を増やすことにより厚さムラの許容範囲を増やせる可能性もありますが、面積の大きなCLTでは、中央付近の接着層の水分が抜けにくいと考えられ、塗布量を増加すると硬化が遅延されることが懸念されます。



図3 幅はぎ接着されたラミナ

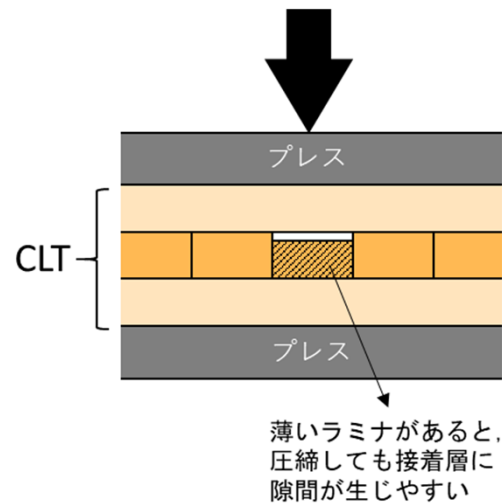


図4 薄いラミナが混在した時に生じる接着不良



図5 接着不良が発生した接着層を割り開いた両断面

（ラミナには接着剤は付着しておらず（矢印・左）、グルースプレッター（接着剤塗布装置）の溝の跡が残存し（矢印・右）、接着剤が伸ばされていないことから、ラミナ同士は密着しなかったことが分かる。）

また、ラミナのねじれが大きいと、積層されたラミナ同士がしっかりと重ね合わされず、ラミナ間に空隙が生じるため（図6）、圧縮されるまでの間に接着剤が乾き、接着不良が発生しやすいことが分かりました⁵⁾。特にカラマツはねじれが大きいので、たて継ぎの間隔を短くするなどして、ねじれを軽減させることが必要です。

■CLTに使用される接着剤

表1に、日本でCLTに使用されている接着剤の種類と接着条件および使用環境を示します。いずれも構造用集成材の製造に用いられてきた接着剤で、接着強さと接着耐久性は構造用途として十分な性能を有し、十分な使用実績があります。

水性高分子-イソシアネート系接着剤は、屋内で使用される構造材に用いられてきたのに対し、レゾルシノール樹脂接着剤は、耐水性、耐熱性が高く、屋外の風雨にさらされる環境でも使用されてきました。CLTにおいても、それぞれの接着剤が使用できる環境は、集成材の使用環境と同じです。

これらの接着剤は、いずれも主剤と硬化剤を混合して使用され、主剤に硬化剤を加えると硬化が始まります。接着剤によって硬化速度が異なるため、それぞれの硬化速度を配慮して積層接着が行われます。十分な接着性能を発揮させるためには、ラミナに接着剤を塗布してから圧縮を開始するまでの時間である「堆積時間」、接着剤を硬化させてラミナを一体化させるために必要な「圧縮時間、温度」について、それぞれの接着剤で指定されている条件に従い、適切に接着操作を行う必要があります。

■水性高分子-イソシアネート系接着剤を用いたCLTの製造

(1) 従来の水性高分子-イソシアネート系接着剤従来の構造材の製造に用いられてきた一般的な水性高分子-イソシアネート系接着剤の堆積時間は10分以内とされており、大面積のCLTを積層するには、接着剤塗布からプレス開始までを迅速に行わなければならないため、ラミナの搬送、接着剤の塗布、圧縮までの工程が全て自動化されたラインでの使用が適していると考えられます。

ラミナの搬送機を導入せず人手を併用して積層する場合、あらかじめラミナを幅はぎ接着して単層を一体化することで、短時間での積層が可能になります。幅はぎ接着した後、接着前に再度プレーナー

で仕上げなければならないため、作業工程は増えますが、塗布装置と冷圧プレスがあればCLTを製造することができるため、小規模生産に向けた製造方法であると考えられます。



図6 ねじれの大きいラミナを用いたカラマツCLTにおける圧縮前の側面の様子。
(ねじれのため、ラミナ同士が密着せずに隙間がある。)

表1 CLTに使用される接着剤

	水性高分子-イソシアネート系接着剤	レゾルシノール樹脂接着剤
堆積時間	10分以内	15～30分以内
プレス条件	室温 40～60分	室温 6時間～
		加熱 20～40分
使用環境※	使用環境BまたはC	使用環境A

※ 使用環境：直交集成板の日本農林規格に定義されるCLTが使用される環境の区分²⁾。

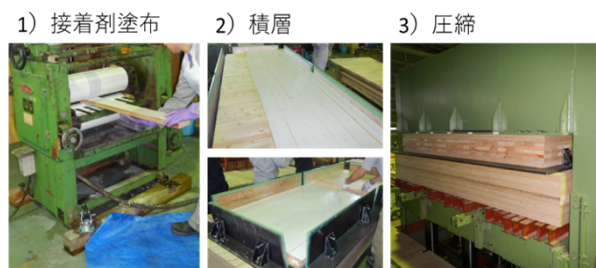


図7 カラマツCLTの製造試験

- 1) グルースプレッターによる接着剤塗布
- 2) 側面を整えるための治具を用いた積層
- 3) 合板用冷圧プレスによる圧縮

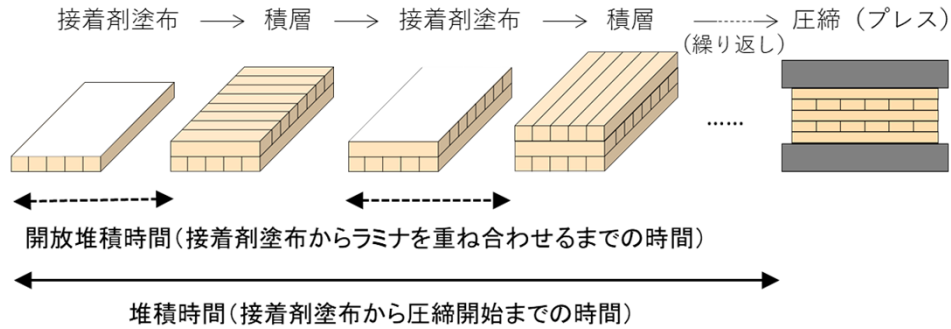


図8 開放堆積時間と堆積時間

著者らは、道産材を用いたCLTの製造方法を検討するために、グルースプレッダー（接着剤塗布装置）と合板用の冷圧プレス、CLTの側面を整えるための治具を用いて、水性高分子－イソシアネート系接着剤によるCLT製造試験を行いました（図7）。その結果、堆積時間8分で積層したにもかかわらず、接着不良が発生しました。この原因は、接着剤を塗布してからラミナを貼り合わせるまでの時間（開放堆積時間、図8）が長かったためにラミナに塗布された接着剤が乾燥したためではないかと考えられました。開放堆積時間による接着性能への影響を調べるため、接着剤が塗布された面を下に向けて積層して開放堆積時間を短縮したCLTと塗布面を上にして積層したCLTについて、接着層のはく離率を比較した結果、塗布面を下にした方がはく離率は低く、接着性能は改善されることが分かりました（表2）⁶⁾。

圧縮条件は樹種によって異なり、圧縮圧力は0.7～1.0MPa、圧縮時間は40～60分くらいで行われます。密度が高い樹種では、高い圧力で長めに圧縮することが推奨され、トドマツでは0.7～0.8MPa、40分程度圧縮されるのに対し、カラマツでは1.0MPa、60分程度圧縮されます。

(2) 堆積時間が延長された水性高分子－イソシアネート系接着剤

直交集成板のJASに規定されるCLTのプライ数は最大で9プライとされています。自動化された量産工場であっても、堆積時間10分で9プライを積層するには、時間の余裕がほとんどなく、小さなトラブルも許容できない状況でした。また、搬送装置を使用せずに人手を併用して積層する場合は、CLTのサイズやプライ数には、堆積時間による限界があります。そこで、CLTに適した堆積時間の長いタイプの水性高分子－イソシアネート系接着剤が接着剤メーカーによって開発されました。

表2 塗布面を上あるいは下にして積層したCLTのはく離率の比較

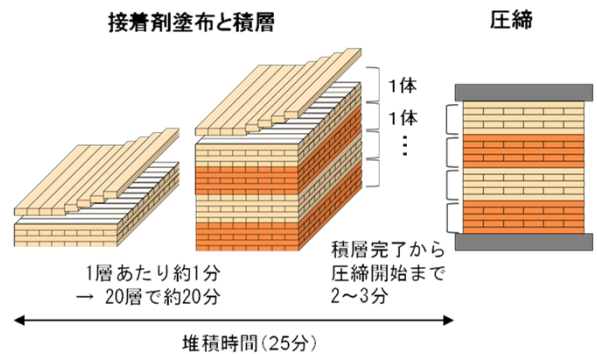
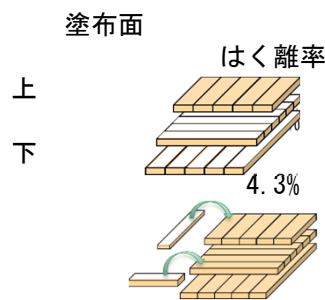


図9 堆積時間延長型接着剤を用いたときの1プレス当たりのCLT製造数（試算）

この堆積時間延長タイプの水性高分子－イソシアネート系接着剤を用いて、5層5プライ、130（厚）×1050（幅）×3500（長）mmカラマツCLTの製造試験を行った結果、堆積時間を25分にしても良好な接着性能が得られました⁷⁾。堆積時間が長くなることによって、積層できるラミナ数が増え、1回のプレスで製造できるCLT数を増やすことができます。前述のカラマツCLTの製造時に1体当たりの積層時間を計測し、堆積時間25分で積層できる5層5プライのCLT数を試算した結果、1回のプレスで最大4体を同時に製造でき（図9）、生産量の

増加によって、製造コストは約3割削減されることが示されました⁷⁾。ただし、この試算結果は、積層時間のみから算出した1プレスあたりの製造可能量です。実際には、プレスの最大の開口高さや、ラミナからはみ出した接着剤によってCLT同士が貼り合わされることを防止する方策など、検討すべき点がありますが、CLTの製造コスト低減のためのアイデアの一つとして可能性があるのではないかと考えています。

■ レゾルシノール樹脂接着剤を用いたCLTの製造

レゾルシノール樹脂接着剤の堆積時間は、15～30分と比較的長いので、人手による積層が行われている工場でも使用されています。

圧縮では、高周波プレスを用いた加熱接着が行われます。この接着剤は室温でも硬化するので、冷圧プレスでも接着できますが、6時間以上圧縮しなければならぬため、量産には向きません。高周波プレスを用いて、接着剤を加熱し、硬化促進することによって、プレス時間を20～40分程度に短縮することができます。

これまで、集成材の製造で高周波プレスは用いられてきました。集成材の製造では接着層に高周波電界を集中させることができるため、接着層のみを選択的に加熱することが可能ですが、CLTでは材料の形状や大きさから、接着層の選択加熱は難しく、材料全体が加熱されます。このように集成材とCLTとでは高周波による熱の伝わり方が異なるため、集成材で蓄積されたノウハウをそのままCLTに活用することはできません。林産試験場では、現在、カラマツおよびトドマツCLTについて高周波プレスによる最適な接着条件を明らかにするための研究を進めています⁸⁾。

■ おわりに

林産試験場では、2014年ごろから道産カラマツ、トドマツを用いたCLTの製造技術に関する研究を行ってきました。はじめは、合板用の実大冷圧プレスを用いて自らの手作業で製造したCLTの性能を調

べ、製造技術における課題を整理し、手作業を伴う小規模生産スタイルや、積層接着の工程が自動化された量産スタイルにおける適切な接着技術を検討してきました。現在は、次の段階として、生産性の向上を目指した接着技術の検討を行っています。

ここ数年で、日本でもCLTを用いた中高層建築物が建設されてきており、CLTの需要の増加が期待されます。今後も引き続き、効率的なCLTの製造方法の確立を目指して検討を進めます。

■ 参考文献

- 1) 農林水産省：令和元年木材需給報告書（2020）
< <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500217&tstat=000001014476&cycle=7&year=20190&month=0&tclass1=000001014477&tclass2=000001138748> > .
- 2) 直交集成板の日本農林規格（2019 改訂） .
< https://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/attach/pdf/kikaku_itiran2-327.pdf > .
- 3) 宮崎淳子，大橋義徳，松本和茂，古田直之，高梨隆也，野田康信：第65回日本木材学会大会研究発表要旨集（2015） .
- 4) 宮崎淳子，宮本康太，塔村真一郎，大橋義徳，松本和茂，古田直之，高梨隆也，石原亘：第70回日本木材学会大会講演要旨集（2020） .
- 5) 宮崎淳子，大橋義徳，松本和茂，高梨隆也，古田直之：林産試だより2018年6月号
< <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/1806/1806-2.pdf> > .
- 6) 宮崎淳子：第36回木材接着研究会講演要旨集，pp.23-36（2015） .
- 7) 宮崎淳子，大橋義徳，松本和茂，古俣寛隆，石川佳生，渡辺誠二：林産試だより2020年6月号。
< <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/2006/2006-3.pdf> > .
- 8) 宮崎淳子，古田直之，大橋義徳，中村神衣，松本和茂，佐古生樹，上山隆志：第69回日本木材学会大会講演要旨集（2019） .