

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05769

研究課題名（和文）凹凸CLTの接合性能評価とその最適化

研究課題名（英文）Evaluation and optimization of joint performance of the cross laminated timber (CLT) with bricks-joint

研究代表者

山内 秀文 (Yamauchi, Hidefumi)

秋田県立大学・木材高度加工研究所・教授

研究者番号：90279513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：CLTの端部に、CLTの材料構造を利用して凹凸の接合構造を付与することで、小面積で製造したCLTを接合し、大面積で製造したものと同様に利用することを目標に研究を行った。

表層が繊維方向になる方向を接合する目的で種々の検討を行った結果、表層ラミナの繊維方向端部にスカーフ形状を付与して接合することで、CLTの表層繊維方向で実用上問題ない程度の接合性能と接合時の工程負荷を大幅に軽減できることを明らかにした。

さらに、CLTの面方向における接合位置をずらすことの効果を評価し、平均弾性率約8GPaのラミナを用いてCLTを製造する場合に、接合を持たないものと同様の性能が得られる条件を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CLTの利用拡大は、国内森林の有効な利用技術として、また、これまででない中高層など大規模木質構造への適用・技術開発が期待されている。さらにその利用拡大により、地球温暖化抑制手法の一つとしての期待もできる。

CLTはこれまでの木質材料にない大寸法の材料が実現できることが大きな特徴であるが、一方で製造設備が大形化しがちで、輸送や立て込みなどにも困難がある。本研究での研究結果は、人力でハンドリングできる1x2m程度の寸法の材料を組み立て利用しても、大板と同様の力学的要求を満たせる可能性を示唆するもので、その接合形態を規格化するなどにより、CLTの生産と利用に新しい可能性を提示できるものである。

研究成果の概要（英文）：The study aimed to evaluate and optimize the joint performance of bricks-joint CLTs, which give uneven joint structure reminiscent of toy blocks at the end of the CLTs.

As a result of various studies, it was clarified that by changing the end joint structure from butt-joint to scarf-joint, it is clarify the conditions for improving the joining performance to the extent that there is no practical problem, and it could be greatly reduced the labor at the time of jointing, too. Furthermore, the effect of shifting the joint position of the lamina in the plane direction of CLT was evaluated. As a result that by optimizing the combined use of scarf-joint and the shifting, it was cleared that there was conditions under which joined CLTs perform as well as CLT without joint.

研究分野：木質材料学

キーワード：CLT cross laminated timber 凹凸CLT 接合 曲げ性能 直交集成板 接合効率

1. 研究開始当初の背景

近年、中高層の大規模建築での木材利用が促進される中、大型の建築構造用材料として CLT の普及が期待されているが、大面積 CLT の製造整備の導入は容易でなく、また限定された生産拠点からの長距離輸送や立て込み時に重機が必要であるなどの問題がある。申請者らは、ラミナを幅接ぎ方向に並べたものをさらに積層するという CLT (Cross Laminated Timber: 直交集成板) の材料構成の特徴に注目し、ラミナを幅接ぎする際に隣接するラミナの位置をずらしながら配列 (幅接ぎ) し、それを直交層と積層接着することで、強軸側の材端部に凹凸を形成しつつ面内での接合位置をずらした特殊な CLT (以下、凹凸 CLT) を考案した。この凹凸 CLT は、小規模な生産に対応できること、接合継手の自在性が高いこと、「レゴ・ブロック」的に複数の CLT を繋いで大型の部材や空間を形成できること、防腐処理した端部用の小パーツとの組み合わせで防腐性能などを得ることができるなど、多くの特徴を持つ。

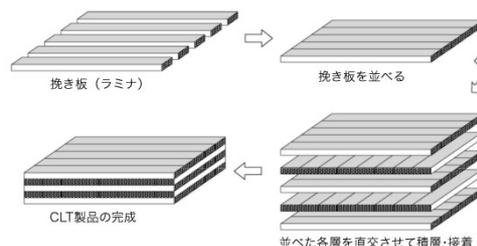


図1 一般的な CLT

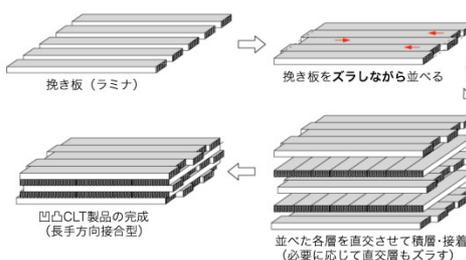


図2 凹凸 CLT

一方、この種の接合部では凹凸部分全面に接着剤を塗布しても、必ず木口同士が突き付け (バットジョイント、以下 BJ) になる接合部が形成される。従来の木材・木質材料の研究、特に集成材ラミナの縦継ぎに関する研究において、かなり以前から BJ には接合性能は期待できないことが示されていること^①から、接合により大面積を構成するという凹凸 CLT の材料コンセプトやそれをを用いた建築工法を実用化に導くためには、予め接合部の性能を定量化しておく必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、上述した凹凸 CLT 同士の接合性能の評価と改良を目的に、強軸方向 (木口同士) の接合を内在した接合凹凸 CLT における接合部の強度特性を実験的に評価すると共に、接合部分の形状・接着条件の最適化を目指して種々の検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 接合端部形状の検討

従来の CLT 構造のまま、ラミナをずらすことのみで接合部を形成すると、縦継ぎ部分は BJ となる。BJ には上述したようにそれのみでは接合性能は期待できないこと、端部のエッジにより嵌合時に積層面にあたる部分の接着剤が拭われる可能性があることなど、性能や施工上での問題が想定された。そこで、高い接合効率が得られる^②ものの工程負荷 (接着時間) などの関係で敬遠されてきたスカーフジョイント (以下、SJ) に着目し、縦継ぎ部におけるラミナ端部の形状効果について検討した。このとき、接合端部形状の影響のみを評価するため、まずは表裏層木口の接合位置を一線に揃えた「サネ」型接合条件 (図3参照) にて検討した。供試材料として予め弾性率で 3 水準

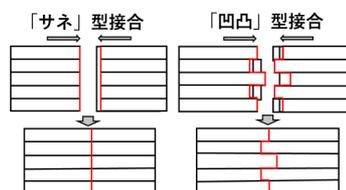


図3 接合端部概要

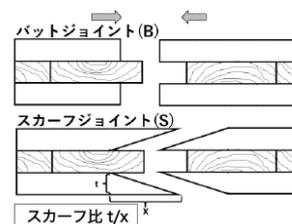


図4 接合端部 2 態

(ラミナの曲げ弾性率で平均 6.5GPa(弱)、8.2GPa(中)、9.7GPa(強))に等級区分した 12mm 厚のスギラミナを気乾状態で用い、水性ビニルウレタン系接着剤(光洋産業(株)製・KR-134)を用いて厚さ 36 mm の 3 層・3 ply の CLT を作成した。最終的な試験体は表裏層の繊維方向が長軸方向(約 900mm)となるように設計し、その強軸(長軸)中央付近に接合部を設けた。接合は BJ(以下、図内では「B」の記号で示す)のほか、SJ を用いたもの(以下、図内では「S」の記号で示す)、および比較対照として二次接合部を持たないもの(以下、図内では「C」の記号で示す)も作成した。このとき、SJ のスカーフ比(図 4 参照)は 1/1、1/2、1/3、1/4(以下、図内ではそれぞれ S1、S2、S3、S4 で示す)とした。各条件で原板を 3 枚作成し、そこから巾 28mm で各 3 枚切出したものを試験体として、支点間距離(スパン) 756mm(試験体厚さの 21 倍)、荷重点をスパンの 3 等分点とした 4 点曲げ試験により力学性能を評価した。

(2) 実大での性能評価

(1) の検討結果におけるラミナ寸法の影響と、垂直部材を想定した接合作業性を評価する目的で、サネ型構造にて厚さ 60 mm の 3 層・3 ply の CLT を作成した。供試材料としてスギを用い、層間接着には(1)と同様に水性ビニルウレタン接着剤を用いた。ラミナ端部の接合部には 1/2 および 1/4 のスカーフジョイントを採用し、嵌合部は図 5 に示すように凸型と凹型の 2 形態について評価した。組となる長さ約 900mm、巾約

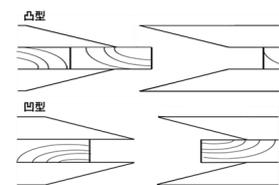


図 5 実大試験体の嵌合 2 態

500mm の CLT の端部をエポキシ樹脂にて嵌合し、最終的に長さ約 1800mm とした。嵌合時の圧縮圧力は現場施工を意識して自重のみとし、試験体を垂直に立て置き、1/2 の試験体自重を接合部に作用させることで嵌合させた。比較対照として接合部を持たない CLT も作成した。CLT 原板から巾 100mm の試験体を切出し、スパン 1600mm、荷重点間距離 500mm の 4 点曲げ試験により力学性能を評価した。

(3) 凹凸形状の効果とその最適化

凹凸 CLT の最も大きな特徴である「凹凸」型接合(図 1 参照)の効果を評価した。凹凸 CLT には位置がずれた接合部が複数存在することになるが、「ずらす」ことの影響や効果の検討は、その最小単位である隣接 2 枚のラミナ間のずれ関係の積算で評価できると考えられる。そこで、図 6 のように試験体上下面で接合部をズラした試験体を作成することとした。

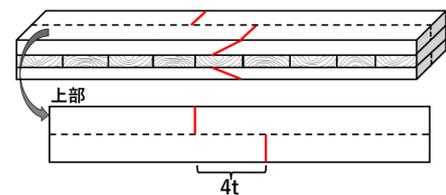


図 6 凹凸型条件でのずらし量

供試材料および接着剤は(1)と同様である。二次接合部の接合形態は BJ およびスカーフ比 1/2、1/4 の SJ を用いた 3 条件とし、接合部のずらし量はラミナ厚(12mm)の 4 倍とした(以下、図内では「4t」と表示する)。また、スカーフ比 1/4 のものについてはずらし量を 2 倍、6 倍としたものも作成し、ずらし量の影響も評価した。試験は(1)と同様の条件で 4 点曲げ試験を行った。

4. 研究成果

(1) 接合端部形状の検討

図 7 にサネ型 CLT の曲げ弾性率に及ぼす接合端部形状の影響を示した。B や S1 の一部で弾性率が C の値より低くなるのがみられるものの、概ね C と同等の値を示しており、接合部の嵌合を確実に形成できた場合には、ラミナの接合端部形状は弾性率に対しては大きな影響を及ぼさなかった。

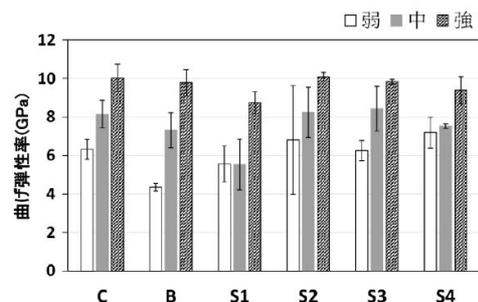


図 7 曲げ弾性率に及ぼす接合端部形状の影響

図 8 に曲げ強度に及ぼす接合端部形状の影響を示した。B および S1 の接合性能は低く、最大でも C の曲げ強度に対して 50%程度の接合効率（各条件の強度値/C の強度値）に止まった。SJ を用いた場合、S1 から S4 に向かって SJ のテーパ長が長くなるに従って曲げ強度が向上する傾向が見られた。また、同じ接合効率を得るためには、ラミナの等級が大きくなるにつれて大きなテーパ長が必要となる傾向が見られた。S4 では強等級のラミナ

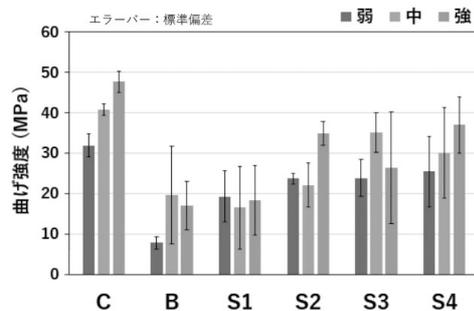


図 8 曲げ強度に及ぼす接合端部形状の影響

を用いた場合でも接合効率は 78%に達しており、破壊形態もほぼ木部破壊となることから、SJ を適用すれば「サネ」型接合でもかなり高い性能が得られることが明らかになった。

(2) 実大での性能評価

表 1 実大試験体による曲げ試験結果(凸型接合試験体)

	σ_{max} (MPa)		P_{max} (kN)		接合効率 (%)	$E_{m,app}$ (GPa)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		平均	標準偏差
C	43.6	2.7	10.0	0.56		6.68	0.66
S2	21.6	4.2	4.92	0.95	49.6	6.63	0.37
S4	31.0	6.5	7.06	1.5	71.2	7.05	0.54

表 2 実大試験体による曲げ試験結果(凹型接合試験体)

	σ_{max} (MPa)		P_{max} (kN)		接合効率 (%)	$E_{m,app}$ (GPa)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		平均	標準偏差
C	36.0	4.1	8.01	0.90		6.50	0.17
S2	14.3	3.2	3.18	0.72	39.7	6.36	0.44
S4	31.0	3.3	6.91	0.74	86.2	6.48	0.13

表 1、2 に実大試験体にて測定した曲げ性能を一覧で示した。

(1) の結果と同様に、曲げ弾性率には接合端部形状の影響は見られなかった。一方、曲げ強度を見ると、嵌合部の形状影響はほとんど見られず、(1) の結果と同様に S4 の強度値が S2 に比べ高くなって、凹型試験体の S4 では接合効率が 85%を超えた。この試験体の 75%信頼水準の 5%下限値である 20.7MPa を直交集成板の日本農林規格 (JAS) ⑨に照らすと、作成に使用したラミナの平均ヤング率 6.1GPa、下限値 3.7GPa という値から、M60A という区分に近く、この区分における異等級 3 層・3ply の CLT の基準曲げ強度は 15.5MPa であることから、強軸方向ラミナの端部縦継ぎにスカーフジョイントを用いることで、「サネ」型接合条件でも実用上は十分な性能が得られる可能性があることが明らかになった。

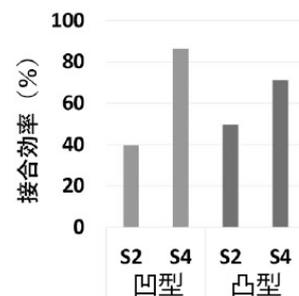


図 9 実大試験体の接合効率

(3) 凹凸形状の効果とその最適化

凹凸 CLT をモデル化して端部接合位置をズラして作成した「凹凸」型試験体でも、曲げ弾性率

に関しては(1)(2)の結果と同様に、接合条件による差は見られず、各条件の曲げ弾性率の平均値はCの平均値とほぼ同等の値を示した。次に曲げ強度の結果を図10に示した。端部接合をBJとした場合、接合位置のずらし量4tでは曲げ強度の向上はほとんど見られなかった。SJを適用した試験体で同じずらし量を与えたS2(4t)とS4(4t)を比較すると、(1)の検討と同様にスカーフジョイントのテーパー長が長くなると曲げ強度も向上する傾向が見られた。さらに同じテーパー長でずらし量を変化させたS4(2t)、S4(4t)、S4(6t)を比較すると、中・高等級ではずらし量が大きくなるほど曲げ強度が向上することが明らかになった。これらの結果を考察する一助として、図11にサネ型試験体と凹凸型試験体における典型的な破壊型を示した。

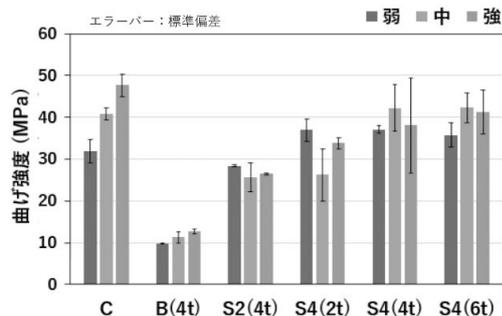


図10 曲げ強度に及ぼす凹凸形状の効果

サネ型条件 (S4)



凹凸型条件 (S4(6t))

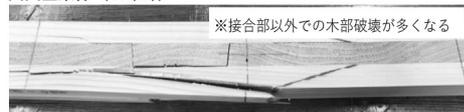


図11 曲げ試験時の破壊性状

サネ型試験体では端部接合形状に関わらず、ほとんどの試験体が接合部で破壊したのに対し、凹凸型試験体では接合部以外で木部破壊する試験体が見られ、特にS4(6t)に関しては、ほとんど試験体で接合部と無関係な場所で破壊が生じており、接合位置をずらすことで、接合部を起点として発生するであろう破壊が試験体全体の破壊に直結しなくなることが示唆された。図12にスカーフジョイントを用いた各接合条件での接合効率を示した。弱等級の結果を見ると、凹凸型の導入で接合効率が大幅に向上し、S4(2t)で接合効率が100%に達した。ややバラツキはあるものの、中等級でも弱等級と同様に凹凸型の導入で接合効率が向上し、S4(4t)で100%の接合効率が得られた。強等級についてもずらし量によって接合効率が向上する傾向ははっきりと見られるが、接合効率は最大となったS4(6t)でも87%に留まった。以上の結果から、使用するラミナの等級により最適な接合形態が異なること、より力学性能が高いラミナの性能を十分に発揮させるためには、スカーフのテーパー長をより長くする、接合のずらし量を大きくするなど、さらなる条件の検討が必要であることが明らかになった。しかしながら、弱・中等級ラミナを用いた凹凸型では100%の接合効率が得られること、JAS基準に照らしても十分に高い性能を持つことなど、CLTの強軸接合に凹凸構造を導入することの効果は明確であり、凹凸CLTが当初想定したような利用法に適用できる可能性が高いことを明らかにできた。

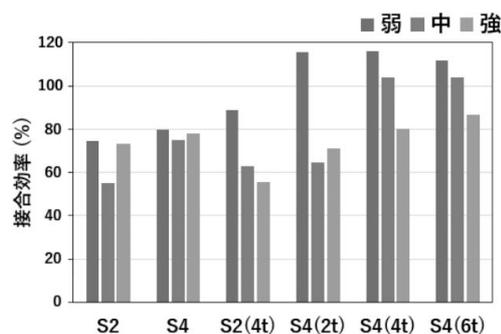


図12 凹凸形状接合による接合効率

<引用文献>

- ① 菅野養作、実用木材加工全書<集成材>、森北出版(株)、p.30-31、1965
- ② 沢田稔、柳下正、森稔、林業試験場研究報告、No. 116、pp. 85-96、1959
- ③ 農林水産省、直交集成板の日本農林規格、農林水産省告示 3079 号、2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小林 玲陽, 佐々木 貴信, 澤田 圭, 佐々木 義久, 山内 秀文	4. 巻 19
2. 論文標題 CLT同士のスカーフジョイントによる二次接合の曲げ性能	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 木材工学論文報告集	6. 最初と最後の頁 52-59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林玲陽, 佐々木貴信, 澤田圭, 佐々木義久, 山内秀文
2. 発表標題 CLT同士のスカーフジョイントによる二次接合の曲げ性能
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐々木 貴信 (Sasaki Takanobu) (00279514)	北海道大学・農学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	林 知行 (Hayashi Tomoyuki) (60370285)	秋田県立大学・木材高度加工研究所・教授 (21401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------