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

小林 玲陽¹·佐々木 貴信²·澤田 圭³·佐々木 義久⁴·山内 秀文⁵

¹非会員 北海道大学大学院 農学院(〒001-0017 北海道札幌市北区北 17 条西 4 丁目) E-mail: kobayashi.rebi.m4@elms.hokudai.ac.jp

 2 正会員 北海道大学教授 大学院農学研究院(〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目) E-mail: tak-sas@for.agr.hokudai.ac.jp

³非会員 北海道大学講師 大学院農学研究院(〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目) E-mail: ksawata@for.agr.hokudai.ac.jp

⁴正会員 北海道大学技術職員 大学院農学研究院(〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目) E-mail: sasaki@for.agr.hokudai.ac.jp

⁵正会員 秋田県立大学教授 木材高度加工研究所(〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1) E-mail: hide@iwt.akita-pu.ac.jp

小型の CLT 同士を接合して大型の CLT として使用できるのならば、国内の CLT の生産量、用途、需要の拡大が期待できる。 CLT をスカーフジョイントで二次接合した実大試験体の面外曲げ試験を行い、破壊性状と接合効率を測定した。二次接合に 1 液型ポリウレタン樹脂接着剤を用いた試験体(以下 PU)とエポキシ樹脂接着剤を用いた試験体(以下 EP)の 2 種類を用意し、それぞれにスカーフ比を変えた試験体を用意した。その結果、EP と PU ともにスカーフ長を大きくすると、接合効率が大きくなった。各条件の最大の接合効率は PU がスカーフ比 1/4 で 20.5%、EP がスカーフ比 1/4 で 86.2%であった。エポキシ樹脂接着剤を用いた CLT 同士の二次接合は十分な接合効率を発揮し、実用可能性が見出せた。

Key Words: Cross Laminated Timber, Scarf Joint, Joint efficiency, Bending performance, Secondary bond

1. はじめに

CLT 製造には大型の製品を製造できる設備が効率的であるが、そのための設備導入は容易ではなく、国内では大規模な CLT 工場はまだ少ない。また、輸送条件によってサイズが制限されることもある。日本国内で CLT 工場の分布は偏っており、日本最大サイズの CLT を製造できる工場は西日本の岡山県と愛媛県にのみ存在している。遠方の地方で大型の CLT が必要な場合、輸送費等が原因で利用が難しくなる可能性がある。

このような地域では、現状では大型のCLTの利用が難しいが、小型のCLT同士を使用現場で接着して十分な強度が得られるならば大型のCLTとして使用できる。また、集成材工場も現在の設備を用いて小型のCLTから大型のCLTを製造できる可能性が生まれる。これにより国内のCLT製品の大型化が可能となり、橋梁の床版や小規模建築への用途や需要の拡大が期待できる。

そこで、本研究では使用に耐えうる強度で現場接合が

可能な CLT 同士の二次接合体を開発することを目的とした. 床版の用途では利用時に主に面外方向から荷重を受けるため, 試験では CLT 同士の二次接合に関して, 面外曲げ強度を調べ,接合効率を評価した.

本試験では CLT 同士の二次接合に特殊な接合形状を 採用し試験を行った. 写真-1,2 は本研究で作製した試験 体であり、図-1 は模式図である. この接合部は軸力を負 担する外層ラミナをスカーフジョイントとしている。ス カーフジョイントは、CLT の積層接着前のラミナの段階 での加工が可能であり、加工がしやすい. また、積層接 着後の CLT の状態でスカーフ部がガイドとなり現場で の二次接合の作業がバットジョイントに比べ行いやすく なると予想される.

2. 試験体

本研究では、ラミナの積層接着にはすべて水性ビニルウレタン系接着剤(光洋産業株式会社 KR-134 に架橋剤



写真-1 接合部のスカーフジョイント



写真-2 実大試験体

AJ-1 を 100:15 で混合)を用いた。スカーフジョイントについては、スカーフ長を大きくするほど接合効率が大きくなる(最大でスカーフ比 1/12)という報告 1,2)があり、本研究でもスカーフ比を変えて試験を行った。スカーフ比は図-1 に記載のとおり、ラミナの厚さを 1 としてスカーフの底辺の長さ(スカーフ長)x との比として 1/x と表す。

また、接合部の形状が異なる2種類用意した. 最外層が先細りになっている CLT 片(図-1 の左の CLT 片)の中間層を張り出しているものを凸型, 凹ましているものを凹型と称す. 内層はバットジョイントも含め, ラミナ幅の半分を張り出している.

本研究では、CLT 同士の二次接合時にスカーフ部の嵌合精度により接合部に空隙が生じる可能性があったため、空隙充填性があり構造用途にて使用実績のあるポリウレタン樹脂接着剤とエポキシ樹脂接着剤を用いた. なお、実大サイズの試験体では、ラミナ寸法の都合上、試験体幅や長さが異なっている.

本研究では、初めにポリウレタン樹脂接着剤を用いた 小試験体の曲げ破壊試験を行い、次にポリウレタン樹脂 接着剤を用いた実大試験体の曲げ破壊試験を行った。そ の後、接着剤による曲げ性能の違いを調べるためにエポ キシ樹脂接着剤を用いた実大試験体の曲げ破壊試験を行 った。各実験では接合効率の検証のため、それぞれの試 験体製造に使用したラミナと同じロットのラミナを用い て二次接合のない試験体(コントロール)も作製した。

以下実大試験体のうち,ポリウレタン樹脂接着剤を用いた試験体をPU接合 (PU),エポキシ樹脂接着剤を用い

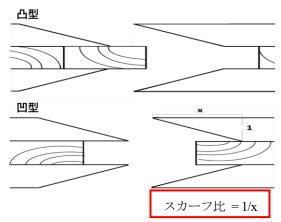


図-1 スカーフジョイント模式図

表-1 試験体接合条件と試験体数

条件		小試験体	実大試験体			
宋件	小品式過失1本	PU	EP 凹型	EP 凸型		
コントロール	С	10	4	4	3	
バット	В	4	3			
スカーフ比 1/1	S1	4	4			
スカーフ比 1/2	S2	4	4	4	6	
スカーフ比 1/3	S3	4	4			
スカーフ比 1/4	S4		4	4	6	

た試験体を EP 接合 (EP) とする.

(1) 小試験体(ポリウレタン樹脂接着剤使用)

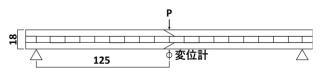
試験に供した試験体は材長約260mm, 材幅(b)約14mm, 厚さ(h) 18mm の 3 層 3 プライのスギ CLT である. 実大試験体は、二次接合のないコントロール(以下 C)、二次接合にバットジョイントを用いた試験体(以下 B)、二次接合にスカーフジョイントを用いた試験体を用意した.

スカーフジョイント試験体はスカーフ比を 1/1, 1/2, 1/3 (以下 S1, S2, S3) と変化させた. 積層接着前のラミナの段階で、スカーフ部はチップソーにて切削加工した. 二次接合部には 1 液型ポリウレタン樹脂接着剤 (サンスター技研株式会社 ペンギンセメント 930) を用い、二次接合時に余剰の接着剤が接合部から溢れる程度の十分な量を塗布した. 二次接合部は凸型である。条件と試験体数は表-1 のとおりである.

(2) 実大試験体 (ポリウレタン樹脂接着剤使用)

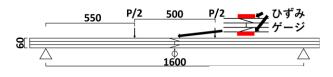
試験に供した試験体は材長約 1,820mm, 材幅 (b) 約 110mm, 厚さ (h) 60mm の 3 層 3 プライのスギ CLT である (写真-2).

実大試験体は、二次接合のないコントロール(以下 C)、 二次接合にバットジョイントを用いた試験体(以下 B)、 二次接合にスカーフジョイントを用いた試験体を用意し



(単位:mm)

図-2 小試験体の曲げ試験方法



(単位:mm)

図-3 実大試験体の曲げ試験方法

た. スカーフジョイント試験体はスカーフ比を 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 (以下 S1, S2, S3, S4) と変化させた. スカーフ部はチップソーにて切削加工した. 二次接合部には 1 液型ポリウレタン樹脂接着剤 (サンスター技研株式会社 ペンギンセメント 930) を用い, 小試験体と同様に十分な量を塗布した. 接着層の厚さは 0.8mm から 1.9mm の間であった. 二次接合部は凹型である. 条件と試験体数は表-1 のとおりである.

(3) 実大試験体(エポキシ樹脂接着剤使用)

小試験体の結果を受けて実大 PU 接合試験体の接合効率は高くなると予想されたが,接合効率が低かったため,接着剤を変えた EP 接合試験体を用意した. (1), (2)の結果からスカーフ長を大きくするほど接合効率が大きくなる傾向が見られたので,傾向の確認として S4 以外に S2 を用意した. また,凸型と凹型を用意した.

試験に供した試験体は材長約 1,750mm, 材幅 (b) 約 100mm, 厚さ (h) 60mm の 3 層 3 プライのスギ CLT である. 実大試験体は継手のないコントロール (C) とスカーフ比 1/2 (S2), スカーフ比 1/4 (S4) を用意した. スカーフ部はチップソーにて切削加工した. 二次接合部の接着にはエポキシ樹脂接着剤 (コニシ株式会社 ボンド E セット) を用い, (1), (2) と同様に十分な量を塗布した.

接着層の厚さは 0.4mm から 2.3mm の間であった. 条件と試験体数は表-1 のとおりである.

3. 試験方法

(1) 小試験体

小試験体では、中央集中荷重による面外曲げ試験を行った(図-2). 支点間距離 250mm とし最大荷重(P_{max})を測定し、面外曲げ強度(σ_{max})を求めた.

(2) 実大試験体

表-2 小試験体の面外曲げ試験結果

	曲げ (N/1	接合効率 (%)		
	平均	標準偏差		
С	42.5	6.47		
В	10.4	0.71	24.5	
S1	14.4	0.77	33.9	
S2	18.0	2.4	42.4	
S3	32.4	0.45	76.2	

実大試験体では、4 点曲げ試験による面外曲げ試験を 行った. 支点間距離 1,600mm, 荷重点間距離 500mm と し、スパン中央に変位計を設置し荷重と変位を測定した (図-3).

また,二次接合部の応力伝達の状態を確認するために, PU接合試験体について C, S2, S3, S4 の各 1 体, EP接 合試験体について C, S2, S4 の各 1 体の試験体中央(圧 縮側, 引張側)にひずみゲージを貼付した(図-3).

4. 試験結果

(1) 小試験体(ポリウレタン樹脂接着剤使用)

a) 曲げ強度

小試験体の面外曲げ強度を表-2 に示す. 面外曲げ強度 は以下の式から求めた.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{7} \tag{1}$$

 M_{max} : スパン中央の最大曲げモーメント. [Nmm] Z: 断面係数. $bh^2/6$. [mm³]

また、接合効率は本試験では、以下の値とする.

接合効率(%) =
$$\frac{(二次接合試験体の平均の曲げ強度)}{(コントロールの平均の曲げ強度)} \times 100$$
 (2)

スカーフ長を大きくするほど接合効率が大きくなった. この結果を受けて接合効率を高めるため,実大試験体では S4 を設定した.

(2) 実大試験体(ポリウレタン樹脂接着剤使用)

a) 破壊性状

バットジョイント試験体は引張側の接着層での破壊に伴って、内層から圧縮側まで破壊し破断した(写真-3). スカーフジョイント試験体も引張側のスカーフ部接着層での破壊に伴って内層が破壊されたが、圧縮側では接着層の破壊に至るものが一部あったものの、完全に破断することはなかった(写真-4).



写真-3 PU接合バットジョイント試験体の破壊性状



写真-4 PU接合スカーフ比1/4試験体の破壊性状

b) 応力とひずみの関係

PU 接合試験体の最外縁の応力とひずみの関係、および各試験体のラミナ構成と外層ラミナのヤング率を図4に示す. 二次接合試験体の圧縮側、引張側ともにCに近い傾きが認められたため、応力は伝わっていると考えられる. 試験体のラミナ構成とラミナのヤング係数の図で、上の層が圧縮側で、下の層が引張側である. 二次接合試験体はラミナのヤング係数に関わらず、応力とひずみの関係は引張側の傾きが大きい. これは荷重初期から引張側の接着層に破壊が起こり、圧縮側の応力負担が大きくなってしまったためと推察される.

また、破壊時には引張側接合部で終局的な破壊が起き、 引張側のラミナにかかる応力が抜けたため、引張側のひ ずみが急減する. しかし、全体的としての応力の急減は なく、圧縮側のひずみは徐々に大きくなる. したがって、 応力負担が圧縮側に移ったと推察される.

c) 曲げヤング係数

見かけの曲げヤング係数 (E_m app) を表-3 に示す。見かけのヤング係数は以下の式から求めた.

$$E_{\text{m, app}} = \frac{a(3L^2 - 4a^2)(P_2 - P_1)}{48I(w_2 - w_1)}$$
(3)

a: 支点と荷重点の距離. 550mm.

L:スパン. 1.600mm

P2-P1: 荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分.

P₁はP_{Max}の約10%, P₂は約40%とする. [N]

 w_2 - w_1 : P_2 - P_1 に対応する変位の増分. [mm]

I: 断面 2 次モーメント. *bh*³/12.[mm⁴]

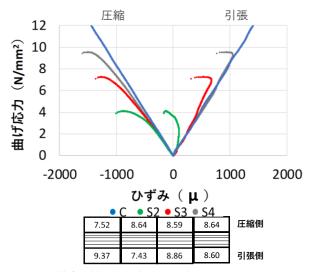
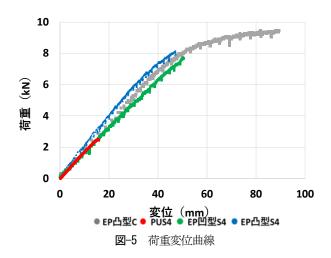


図-4 PU接合の最外縁の応力とひずみの関係とラミナ配置



また、各条件の S4 と EP 凸型接合試験体のコントロールから 1 体ずつの荷重変位曲線を図-5 に示す.

曲げヤング係数はコントロールと二次接合試験体で大きな差は認められなかった.

d) 曲げ強度

PU 接合試験体の曲げ強度を表-3 に示す. スカーフ長を大きくするほど接合効率が大きくなった. しかし, 小試験体の結果と比較して接合効率が大きく低下した. これは実大サイズになると嵌合精度が低下し、接着層の厚さが大きくなることで、曲げ強度が低下したと考えられる.

1 液型ポリウレタン樹脂接着剤は接着厚みの影響による強度低下が懸念されており³⁾,本実験でも接着層が厚くなるほど面外曲げ強度が低下する傾向が見られた.1 液型ポリウレタン樹脂接着剤は発泡性がある.1 液型ポリウレタン樹脂接着剤は、接着剤中のイソシアネート基と木材中空気中の水分が反応して二酸化炭素を発生するためである.接着層が厚くなるにともない気泡が大きくなり接着層強度が低下したと考えられる.

	$\sigma_{ m max}$ $({ m N}/{ m mm}^2)$		$P_{ m max}$ (kN)		接合効率	$E_{ m m,app}$ (kN / mm ²)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	(%)	平均	標準偏差
С	41.4	7.0	9.70	1.7		6.8	0.61
В	3.73	0.63	0.87	0.16	9.00	6.7	0.59
S1	4.37	1.0	1.02	0.25	10.5	6.4	0.44
S2	5.08	1.3	1.18	0.28	12.2	6.4	0.49
S3	7.27	0.79	1.70	0.20	17.5	6.6	0.82
S4	8.51	1.7	1.99	0.39	20.5	6.7	0.73

表-3 PU 接合試験体の面外曲げ試験結果



写真-5 EP 凹型接合 S2 破壊性状 (側面)



写真-6 EP 凹型接合 S2 破壞性状

(3) 実大試験体 (エポキシ樹脂接着剤使用) 凹型

a) 破壊性状

EP 凹型接合試験体の代表的な破壊性状を写真-5, 6, 7 に示す. PU 接合とは異なり, 試験体は完全に破断した(写真-5).

また、PU 接合試験体では接着層内での破壊が主だったのに対し、EP 凹型接合試験体では木部や界面での破壊が主だった(写真-6,7).

b) 応力とひずみの関係

EP 凹型接合試験体の応力とひずみの関係,および各試験体のラミナ構成と外層ラミナのヤング率を図-6に示す.

二次接合試験体の圧縮側、引張側ともに C に近い傾きが認められたため、応力は伝わっていると考えられる. また、破壊の直前に PU 接合で見られたひずみの急激な変化が見られず、脆性破壊をした.

外層ラミナのヤング率との関係を見ると、ラミナのヤング係数の大きい方が、応力とひずみの関係の傾きが大きくなった.



写真-7 EP 凹型接合 S2 破壊性状

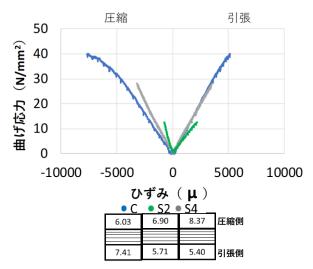


図-6 EP 凹型接合の最外縁の応力とひずみの関係とラミナ配置

c) 曲げヤング係数

PU 接合と同様に曲げヤング係数はコントロールと二次接合試験体で大きな差は認められなかった.

d) 曲げ強度

EP 凹型接合試験体の面外曲げ試験の結果を表4 に示す. PU 接合と同様にスカーフ長を大きくすると接合効率が大きくなった. これは, エポキシ樹脂接着剤は発泡性がなく, 硬化収縮も少ないので十分な接着強度と接着性能が得られたためと考えられる.

また、PU接合試験体に比べ強度のばらつきも小さく

	$\sigma_{\rm max}$ $({ m N}/{ m mm}^2)$			P _{max} (kN)	接合効率 (%)	$E_{ m m, app}$ $({ m kN / mm^2})$	
	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-4 EP 凹型接合試験体の面外曲げ試験結果



写真-8 EP 凸型接合 S2 破壞性状 (側面)



写真-9 EP 凸型接合 S2 破壊性状

PU 接合よりも安定した曲げ性能が得られた.

(4) 実大試験体 (エポキシ樹脂接着剤使用) 凸型

a) 破壊性状

EP 凸型接合試験体の代表的な破壊性状を写真-8,9,10に示す.EP 凹型とは異なり,試験体は完全に破断することはなく,圧縮側に亀裂を生じる試験体が確認された(写真-8).

EP 凹型接合と同様 EP 凸型接合で木部や界面での破壊が主だったが、EP 凸型接合の方が木部の破壊割合は大きかった(写真-9, 10).

b) 応力とひずみの関係

EP 凸型接合試験体の応力とひずみの関係を図-7 に示す. PU 接合, EP 凹型接合と同様に二次接合試験体の圧縮側, 引張側ともに C に近い傾きが認められたため, 応力は伝わっていると考えられる. EP 凹型接合と同様に,破壊の直前に PU 接合で見られたひずみの急激な変化が見られず, 脆性破壊をした.

外層ラミナのヤング率との関係を見ると、EP 凹型接合 と同様、ラミナのヤング係数の大きい方が、応力とひず



写真-10 EP 凸型接合 S2 破壞性状

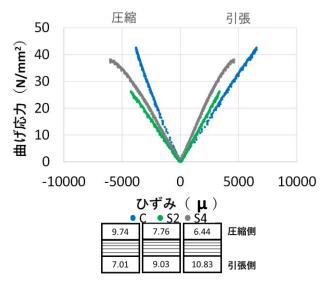


図-7 EP 凸型接合の最外縁の応力とひずみの関係とラミナ配置

みの関係の傾きが大きい.

c) 曲げヤング係数

PU 接合, EP 凹型接合と同様に曲げヤング係数はコントロールと二次接合試験体で大きな差は認められなかった.

d) 曲げ強度

EP 凸型接合試験体の面外曲げ試験の結果を表-5 に示す. PU 接合, EP 凸型接合と同様にスカーフ長が大きくなるほど接合効率が大きくなった.

	$\sigma_{ m max}$ $({ m N}/{ m mm}^2)$			P _{max} (kN)	接合効率	$E_{ m m,app}$ (kN / mm ²)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	(%)	平均	標準偏差
С	43.6	2.7	10.0	0.56	\setminus	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-5 EP 凸型接合試験体の面外曲げ試験結果

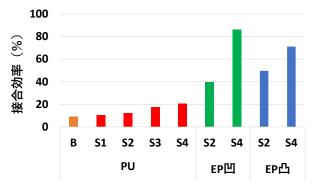


図-8 PU 接合試験体および EP 接合試験体の接合効率

5. 実大試験体の接合性能

(1) PU 接合試験体と EP 接合試験体の接合効率の比較 検討

実大試験体の PU 接合と EP 接合の接合効率をまとめ て図-8 に示す. PU接合, EP接合ともに弾性率に大きな 差はなく、応力が十分に伝わっていたため、初期の接着 性能は発揮されている. しかし、破壊時の面外曲げ強度 に差が大きい. この面外曲げ強度の差は接合部の接着強 度の差と考えられる. PU 接合は小試験体では、嵌合精度 も高くできた. しかし、PU 接合試験体は嵌合精度の追求 が難しく接着層が厚いため、気泡を含みせん断強度が下 がったと考えられる. 接合部の嵌合精度を向上すること が解決方法であり、CLTの製造方法の工夫を考える必要 がある.一方,エポキシ樹脂接着剤は発泡がなく,内部 凝集力が高い. よって EP 接合は PU 接合よりも嵌合精 度を高めなくても接合効率は大きい. しかし、EP接合は 接着剤硬化時に接着剤の木材への浸透が起こり、隙間を 埋める作業を何度か行わなければならないという点で作 業性に劣る. 本研究は現場接合での作業性の良さも追及 しているので改善の必要がある. エポキシ樹脂接着剤の 粘度を調整する等の工夫が考えられる.

(2) 曲げ性能の評価

本試験で接合効率が一番大きかった条件は、EP 凹型接

合の S4 であった. 曲げ性能を評価するために, EP 凹型接合の S4 における面外曲げ強度の 75%信頼水準の 5%下限値 ($TL_{75,95}$) と直交集成板の日本農林規格の基準曲げ強度 47 を比較した. EP 凹型接合の S4 に使用したラミナのヤング係数は平均が $6.10~\rm{kN/mm^2}$, 下限値が $3.71~\rm{kN/mm^2}$ であり, 直行集成板の日本農林規格に記載の M60A という区分に近い. M60A で構成される異等級の 3層3プライの CLT は Mx60-3-3 という強度等級であり, 基準曲げ強さは $15.5~\rm{N/mm^2}$ である. EP 凹型接合の S4 において $TL_{75,95}$ は, $20.7~\rm{N/mm^2}$ であるので、本試験の試験体は基準曲げ強さを上回った. よって、スカーフジョイントを用いた本接合法は有効である可能性が高い.

6. まとめ

本研究では、現場接合を目的とした CLT 同士のスカーフジョイントによる二次接合試験体の面外曲げ強度について検討した。 直行集成板の日本農林規格との比較により、エポキシ樹脂接着剤を用いてスカーフ比を 1/4 以上にすれば CLT 同士の二次接合においても、十分な面外曲げ強度が得られると結論づけた.

参考文献

- 1) 沢田稔, 柳下正, 森稔: 林業試験場研究報告, No. 116, pp. 85-96, 1959.
- 2) 星通, 森稔: 林業試験場研究報告, No.153, pp.73-93, 1963.
- 3) 小泉章夫, ヨルゲン・イェンセン, 佐々木貴信, 飯島泰男, 田村靖夫: 木材学会誌, Vol. 44, No. 2, pp. 109-115, 1998
- 4) 日本農林規格 JAS 3079, 2019.

(Received October 16, 2020) (Accepted January 31, 2021)

BENDING PERFORMANCE OF SECONDARY-BONDED CROSS-LAMINATED TIMBER WITH SCARF-JOINTS

Rebi KOBAYASHI, Takanobu SASAKI, Kei SAWATA, Yoshihisa SASAKI, and Hidefumi YAMAUCHI

If members of small cross laminated timber (CLT) could be jointed to each other to form larger CLT member in a practical way, increase in domestic production, application, and demand for CLT are expected. In this study, bending tests were conducted on full-scale specimens of scarf jointed CLT to observe the failures and to evaluate the joint efficiency. Two types of adhesives (polyurethane resin (PU) and epoxy resin (EP)) were used to adhere the joints. Four kinds of scarf ratios (the ratio of the lamina thickness to the scarf base length) were tested (1/1, 1/2, 1/3, 1/4). As a result, the joint efficiency was increased as the scarf ratios were increased in both cases adhered with PU and EP. The maximum joint efficiency of the specimens with a scarf ratio of 1:4 was 20.5% in PU and 86.2% in EP in average. It was concluded that the scarf jointed CLT adhered with EP had sufficient joint efficiency and showed the potential to be used practical.