

スギ CLT（直交集成板）の実大試験

曲げ及びせん断強度に及ぼす試験体幅の寸法効果

林知行¹，佐々木貴信¹

¹ 秋田県立大学木材高度加工研究所

CLT（Cross Laminated Timber：直交集成板）は1990年代後半に欧州で開発された大型の構造用木質材料であるが、全く新しい製品であるため、基礎特性に未知の部分が残ったままである。特に大型の製品になるほど顕著になる寸法効果（使用材積が増大するほど単位あたりの強度が低下する現象）は構造計算を行う上で重要な特性であるが、実験設備上の理由からこれまでほとんど検討されてこなかった。そこで本研究では、木材高度加工研究所が所有する橋梁用床板の実験装置を用いて、大型のスギ実大 CLT（5層5プライ構成：厚さ150mm，最大長さ3450mm，最大幅2400mm）の曲げ試験およびせん断試験（5層5プライ構成：厚さ150mm，長さ1050mm，最大幅1200mm）を実施し、CLTの幅が寸法効果に及ぼす影響について検討した。その結果、曲げ強度には明確な寸法効果が存在し、JAS規格の品質管理の基本となる300mm幅に対して2400mm幅では約10～15%強度が低下すること、一方で、曲げヤング係数やせん断強度には寸法効果が認められないことが明らかになった。

キーワード：CLT、直交集成板、スギ、実大曲げ試験、実大せん断試験、寸法効果

CLT（Cross Laminated Timber：直交集成板）は1990年代後半に欧州で開発された大型の構造用木質材料で、ここ数年欧米で急激にマーケットを拡大しており、製品規格や建築に関する基規準の整備が進んでいる。

わが国でも、年々増加し続けている国産材資源、特にスギを大量に使えるのではないかと、あるいは中・大規模建築に適した、新しい木造建築構法が実現できるのではないかとといった期待がふくらみ、2013年12月にはJAS規格が整備された。ただ2015年6月現在、構造計算のための基規準や構造物にするための基規準が整備されていない。

CLTの構造用材料としての利点は、大型のパネル製品という点にある。基本的に現場での施工は工場生産された大型パネルを現場に運び込んで組み立てるだけなので、大変容易である。また、断熱性、遮音性、耐火性、耐震性などにも断面の大きさが有利

に働くことになる。

しかしながら、大型であるが故にCLTの製造には多数の原料ひき板が必要となり、使用材積が増大するほど単位あたりの強度が低下する「寸法効果」の現象も大断面の製材や大断面集成材以上に高くなる可能性がある。

このため、構造計算にあたってはCLT製品の寸法が強度性能に与える影響を解明しておく必要があるが、一般的な実大強度試験機では幅1000mmを超えるような大型試験体の強度性能試験は困難であるため、この種の研究例は極めて少ない。

そこで本研究では、木材高度加工研究所が所有する橋梁用床板の実験装置を用いて、大型の実大CLTの曲げ試験およびせん断試験を実施し、CLTの幅が寸法効果に及ぼす影響について検討した。なお、CLTの断面構成は5層5プライのみとした。

試験方法

Em, 真の曲げヤング係数 Eb を求めた。

試験体

曲げ試験.

試験には厚さ 30mm, 幅 105mm のラミナを水性高分子イソシアネート系接着剤で積層接着した 5 層 5 プライ (全厚さ 150mm) の 1) スギ CLT (JAS 規格による強度等級は Mx60-5-5 : 以下 S タイプ) および 2) スギとヒノキの異樹種 CLT (最外層はヒノキ, 内層 3 層はスギ, 同じく強度等級は Mx90-5-5 : 以下 H タイプ) を用いた。

なお, 全ての試験体において, ラミナの幅方向は非接着のままであった. これは CLT の製造を依頼した JAS 認定工場の製造ラインがこの生産方式を採用していたためである。

試験体の長さは S も H タイプも 3,450mm 一定で, 幅は 150mm, 300mm, 600mm, 1,200mm, 2,400mm の 5 種類とした. また, 試験体数は幅 2,400mm が 3 体, 幅 150mm~1,200mm が各 6 体とした。

せん断試験.

試験体の樹種構成は S タイプのみで, 長さは 1,050mm, 幅は 150mm, 300mm, 600mm, 1,200mm であった. 試験体数は各 6 体とした。

試験装置と測定

曲げ試験.

曲げ試験では, 図 1 および図 2 に示すように載荷フレーム内に設置した支点 (支間長 3150mm) 上に設置した試験体の 3 等分点で幅方向にそれぞれ線荷重が作用するよう, 載荷梁 (H200x200x8x12) を介して 2 本の油圧ジャッキ (容量 500kN/本) で載荷した. 載荷梁の下面には試験体へのめり込みを考慮して, 10mm 程度の面取りをしたナラ集成材等を加圧板として取り付けた。

試験体の変形は, 支間中央の両側面の高さ 1/2 点に設置した変位計により鉛直変位を測定した. また, 支点の沈下量を補正するための変位計を両端部に設置した. 一部の試験体を除き, 試験体上面の荷重点間にヨークを設置して, 純曲げ区間の変位を測定した. これらの測定結果から見かけの曲げヤング係数



図 1 曲げ試験の状況 (S タイプ, 幅 2400mm)

また, H タイプの試験体については, 縦振動法やたわみ振動法 (T.G.H 法: 日本住宅・木材技術センター, 2011) ¹⁾ による曲げヤング係数 Efr, Eofb, せん断弾性係数 G fb の測定を行った。

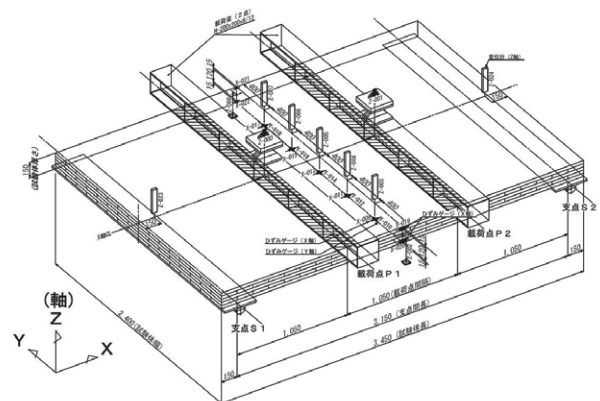


図 2 曲げ試験装置

せん断試験.

面外せん断試験は, 図 3 および図 4 に示すように載荷フレーム内に設置した支点 (支間長 750mm) 上に設置した試験体の 2 等分点で幅方向に線荷重されるように, 載荷梁 (H200x200x8x12) を介して 2 本の油圧ジャッキ (容量 500kN/本) で載荷する 3 点曲げ方式で行った。

この方式は, 形態としては曲げ試験ではあるが, 曲げ破壊に先行してせん断破壊が生じるため, 単板積層材の日本農林規格でも採用されており, 短スバ

ンの水平せん断試験とも呼ばれることがある。

残りの半分がせん断破壊を生じた試験体もあった (図 7)。



図 3 せん断試験の状況 (Sタイプ, 幅 1200mm)

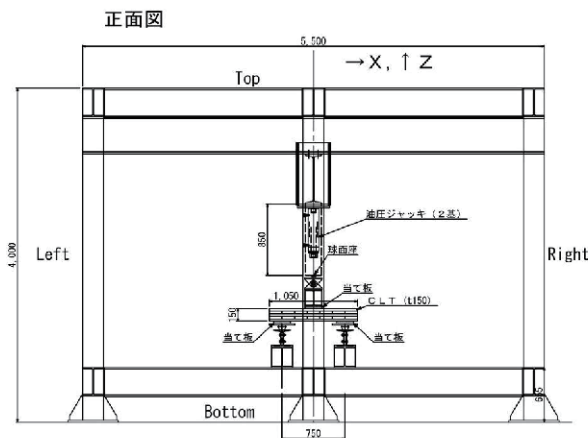


図 4 せん断試験装置の模式図 (試験体の幅は 1,200mm)

結果と考察

曲げ試験

表 1 および表 2 に S タイプおよび H タイプの曲げ試験結果をそれぞれ示す。同様に、図 5 および図 6 に試験体幅と曲げ強度の関係をそれぞれ示す。

S タイプでは、全ての試験体で曲げ破壊が先行したのに対し、H タイプでは、表 2 に示したように、各試験条件において、せん断破壊が先行した試験体や、曲げ破壊が先行したが終局時にせん断破壊が生じた試験体があった。これは、内層のスギラミナと外層のヒノキラミナの強度差に起因する現象であると推察される。

幅の広い試験体では、断面の半分が曲げ破壊し、

表 1 Sタイプの曲げ試験結果

| 幅 mm | | 密度 | ヤング | ヤング | 曲げ強度 | 破壊 形態 |
|---------------|------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------|
| | | ρ kg/m ³ | 係数 E_m kN/mm ² | 係数 E_b kN/mm ² | f_b N/mm ² | |
| 150 (n=6) | 平均値 | 414 | 6.30 | 6.34 | 27.4 | 曲げ 6 |
| | 標準偏差 | 9.14 | 0.49 | 0.66 | 3.48 | |
| | 変動係数 | 2.2% | 12.7% | 7.7% | 10.4% | |
| 300 (n=6) | 平均値 | 417 | 6.38 | 6.67 | 26.1 | 曲げ 6 |
| | 標準偏差 | 17.1 | 0.22 | 0.27 | 3.5 | |
| | 変動係数 | 4.1% | 3.5% | 4.0% | 13.6% | |
| 600 (n=6) | 平均値 | 413 | 6.34 | 6.94 | 25.8 | 曲げ 6 |
| | 標準偏差 | 5.16 | 0.21 | 0.08 | 3.12 | |
| | 変動係数 | 1.3% | 3.3% | 1.1% | 12.1% | |
| 1200 (n=6) | 平均値 | 411 | 6.36 | 6.88 | 24.9 | 曲げ 6 |
| | 標準偏差 | 5.07 | 0.12 | 0.03 | 2.9 | |
| | 変動係数 | 1.2% | 1.9% | 0.4% | 11.8% | |
| 2400 (n=3) | 平均値 | 417 | 6.37 | - | 23.4 | 曲げ 3 |
| | 標準偏差 | 6.9 | 0.52 | - | 0.52 | |
| | 変動係数 | 1.7% | 2.2% | - | 1.6% | |

表 2 Hタイプの面外曲げ試験結果

| 幅 mm | | 密度 | ヤング | ヤング | 曲げ強度 | 破壊 形態 | T.G.H法 | | |
|---------------|------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | | ρ kg/m ³ | 係数 E_m kN/mm ² | 係数 E_b kN/mm ² | f_b N/mm ² | | 縦振動 E_{fr} kN/mm ² | E_{ofb} kN/mm ² | G_{fb} N/mm ² |
| 150 (n=6) | 平均 | 444 | 9.0 | 10.0 | 35.8 | 曲げ 4, せん断 2 | 6.33 | 9.8 | 244 |
| | 標準偏差 | 4.8 | 0.25 | 0.36 | 3.72 | | 0.21 | 0.19 | 8.16 |
| | 変動係数 | 1.1% | 2.8% | 3.6% | 10.4% | | 1.1% | 3.4% | 1.9% |
| 300 (n=6) | 平均 | 441 | 9.07 | 9.45 | 35.2 | 曲げ 4, せん断 2 | 6.45 | 10.31 | 244 |
| | 標準偏差 | 3.5 | 0.34 | 0.62 | 2.06 | | 0.16 | - | - |
| | 変動係数 | 0.8% | 3.8% | 6.6% | 5.8% | | 2.5% | - | - |
| 600 (n=6) | 平均 | 446 | 8.88 | 9.84 | 29.1 | 曲げ 5, せん断 1 | 6.46 | 9.86 | 237 |
| | 標準偏差 | 2.6 | 0.21 | 0.46 | 1.52 | | 0.15 | 0.18 | 14.9 |
| | 変動係数 | 0.6% | 2.4% | 4.7% | 5.2% | | 2.3% | 1.8% | 6.3% |
| 1200 (n=6) | 平均 | 444 | 8.82 | 10.2 | 31.7 | 曲げ 5, せん断 1 | 6.43 | 9.87 | 255 |
| | 標準偏差 | 5.0 | 0.12 | 0.43 | 1.46 | | 0.06 | 0.39 | 13.2 |
| | 変動係数 | 1.1% | 1.4% | 4.2% | 4.6% | | 0.9% | 4.0% | 5.2% |
| 2400 (n=3) | 平均 | 439 | 9.01 | 10.0 | 29.6 | 曲げ 3 | 6.36 | - | - |
| | 標準偏差 | 2.32 | 0.14 | 0.25 | 1.89 | | 0.30 | - | - |
| | 変動係数 | 0.53% | 1.6% | 2.5% | 6.4% | | 4.8% | - | - |

図 5 および図 6 より、試験体幅が広がるほど曲げ強度が低下する寸法効果が確認できる。S タイプでは JAS 規格の基本となる 300mm 幅に対して 2400mm 幅では約 10%曲げ強度が低下し、H タイプの場合も同様に約 15%曲げ強度が低下することが明らかになった。

なお、図 6 において幅 600mm の試験体の強度が低く分布していることが分かる。この要因は明らかではないが、最外層や内層の強軸方向のラミナの幅が試験体の幅方向に対して対称でなく、片側端部の

ラミナ幅が 20mm, 反対側で 55mm となっていたことが, 強度低下の要因の一つではないかと推察される。

フィンガージョイントの有無が曲げ強度に及ぼす影響が大きくなり, ばらつきが大きくなるものと推察された。

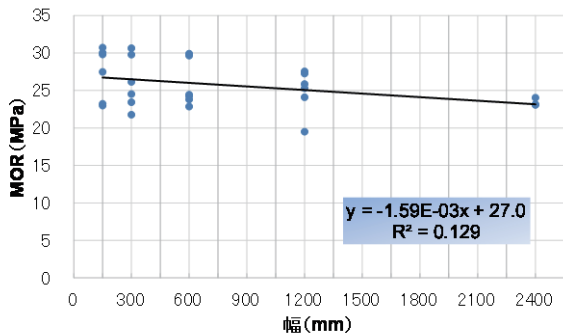


図5 試験体幅と曲げ強度の関係 (Sタイプ)

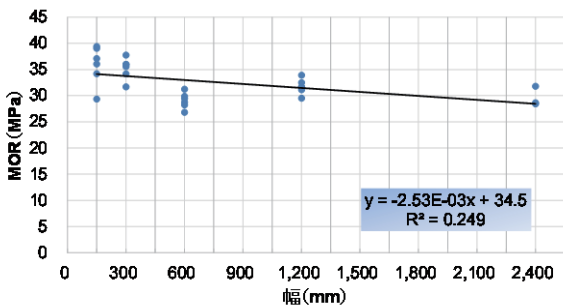


図6 試験体幅と曲げ強度の関係 (Hタイプ)



図7 曲げとせん断破壊が同時に生じた試験体

試験体の曲げ破壊は荷重点間の引張側最外層のフィンガージョイントや節がきっかけとなっており, 隣り合うラミナ同士でフィンガージョイントの位置が近接している場合などは, これらが連鎖的に破壊して進行していくようであった。

したがって, 幅の小さい試験体では荷重点間のフ

せん断試験

表3にせん断試験の結果を示す。また, 図8に試験体幅とせん断強度の関係を示す。試験で得られた最大荷重 P_{max} からせん断強さ f_s を(1)式より求めた。

$$f_s = \frac{3 \times P_{max} / 2}{2bh} \quad (1)$$

ここで, P_{max} : 最大荷重, b : 試験体幅 (mm), h : 試験体厚さ (mm)

せん断試験では, ほとんどの試験体でせん断破壊が先行したが, 幅150mm および幅600mm の各1体ずつで曲げ破壊が生じた。また, せん断破壊と同時に曲げ破壊が生じているケースも認められた。したがって, 本実験の載荷条件では曲げ破壊の可能性もあり得ると推察される。

図8では, 幅の小さい試験体ほどばらつきが大きくなる傾向が認められる。また, 試験体幅によらずせん断強度の平均値はほぼ一定であり, 寸法効果は認められなかった。

表3 スギCLTのせん断試験結果

| 幅 mm | | 密度 | 曲げ強度 | 破壊形態 |
|---------------|------|-----------------------------|----------------------------|-------------|
| | | ρ kg/m ³ | f_s N/mm ² | |
| 150 (n=6) | 平均値 | 408 | 2.38 | せん断5 曲げ1 |
| | 標準偏差 | 15.1 | 0.22 | |
| | 変動係数 | 3.7% | 9.4% | |
| 300 (n=6) | 平均値 | 414 | 2.45 | せん断6 |
| | 標準偏差 | 8.66 | 0.17 | |
| | 変動係数 | 2.1% | 6.9% | |
| 600 (n=6) | 平均値 | 409 | 2.43 | せん断5 曲げ1 |
| | 標準偏差 | 6.31 | 0.1 | |
| | 変動係数 | 1.5% | 3.9% | |
| 1200 (n=6) | 平均値 | 410 | 2.34 | せん断6 |
| | 標準偏差 | 4.63 | 0.09 | |
| | 変動係数 | 1.1% | 3.7% | |

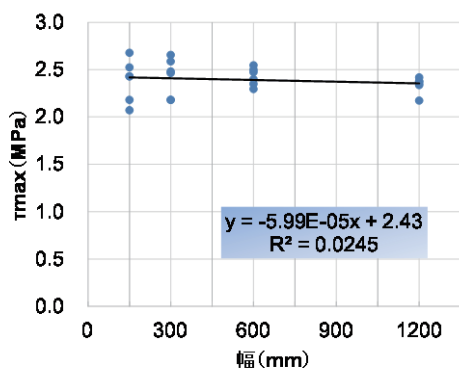


図8 試験体幅とせん断強度の関係



図9 せん断破壊の状況

せん断破壊は図9に示すように、荷重点と支点間の位置で生じており、内層の直交層ラミナがせん断破壊する形式であった。本試験の CLT はラミナ間の幅はぎ接着がされていないため、これらの直交層ラミナは水平方向にせん断変形し易い状態にあり、せん断強度に対して圧倒的に影響を及ぼしていると考えられる。このため、パネル幅を変化させても、その影響（寸法効果）が顕著に表れなかったものと推察される。

新藤ら(2015)は、せん断スパン比を一定にして、層構成の異なるスギ CLT のせん断試験を行い、積層数が多くなるほどせん断強度が低下する傾向があることを示している。すなわち、図10で模式的に示すようにせん断スパン内部に存在する直交層ラミナの数が増えるほど、せん断強度は低下するのではないかと考えられる。この問題に関しては、今後検証を行いたい。

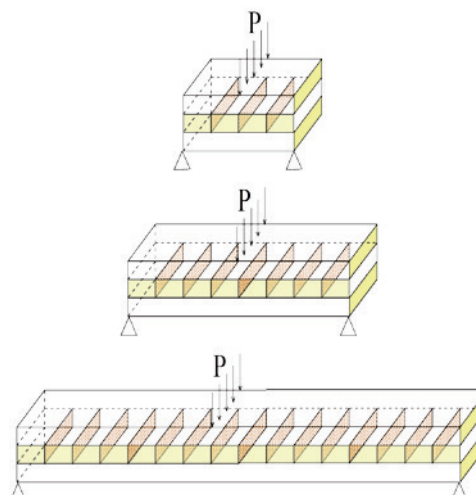


図10 スパン梁せい比と直交層ラミナ数の関係

文献

- (公財)日本住宅・木材技術センター(2011).『構造用木材の強度試験マニュアル』.
 新藤健太ほか(2015).「層構成の異なるスギ CLT の面外せん断性能」『第65回日本木材学会大会要旨集』D17-P-S15.

平成27年6月30日受付
 平成27年7月31日受理

Short Report

Full-size Bending and Bending–Shear Tests of Sugi Cross Laminated Timber
Effects of specimen width on the bending and shear strength

Tomoyuki Hayashi¹, Takanobu Sasaki¹

¹ *Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University*

Cross laminated timber (CLT) is a large structural wood-based panel product, which has been developing in Europe in the late 1990s. Because CLT is a newly developed product, some of its basic strength properties remain unknown. In particular, size effects that decrease the strength properties of the products as their volume increases have been scarcely studied because testing equipment that can accommodate large-sized panel products is scarce in Japan. Therefore, we conducted a series of full-size bending and bending-shear tests for Sugi CLT (5-layered and 5-ply construction, thickness 150 mm, length 3450 mm, and maximum width 2400 mm) using the experimental apparatus at the Institute of Wood Technology; this apparatus was originally designed to test floorboards of timber bridges. As a result of the tests, clear size effects on the bending strength were observed; the average bending strength of the specimen with a width of 2400 mm was 10%–15% lower than that of the specimen with a width of 300 mm, which is the specimen width normally used in quality control tests, as stipulated in the Japanese Agricultural Standard for CLT. In contrast, no size effects were observed in the cases of the bending Young's modulus and the shear strength.

Keywords: Cross-laminated timber, Sugi, Full-size test, Bending strength, Shear strength, Size effect