

林野庁委託事業

平成 26 年度（1 次補正予算）

森林整備加速化・林業再生総合対策事業

「宮崎県産スギを用いた新たな CLT の開発」

実施報告書

宮崎県木材利用技術センター

平成 28 年 3 月

目 次

はじめに	4
1 事業概要	7
1. 1 事業実施スケジュール	7
1. 2 担当者	7
1. 3 文献	8
2 強度性能	9
2. 1 試験体の概要	9
2. 1. 1 ラミナの曲げ性能	9
2. 1. 2 CLT の製造と試験体の木取り	10
2. 1. 3 試験体の測定	10
2. 2 面外曲げ試験	13
2. 3 面内曲げ試験	17
2. 4 面外せん断試験	21
2. 5 面内せん断試験	25
2. 6 短柱縦圧縮試験	29
2. 7 文献	32
3 長期性能	33
3. 1 面外曲げクリープ試験	33
3. 1. 1 はじめに	33
3. 1. 2 試験体	33
3. 1. 3 短期強度試験	33
3. 1. 4 クリープ試験	37
3. 2 面外曲げクリープ破壊試験 (DOL 試験)	44
3. 2. 1 はじめに	44
3. 2. 2 試験体	44
3. 2. 3 短期強度試験	44
3. 2. 4 DOL 試験	48
3. 3 まとめ	51
3. 4 文献	52
4 接合性能	53
4. 1 ラグスリューボルト接合形式 (パネル工法)	54

4. 1. 1	はじめに	54
4. 1. 2	試験体と試験条件	54
4. 1. 3	試験方法	55
4. 1. 4	破壊性状	56
4. 1. 5	試験結果	57
4. 1. 6	推定値	57
4. 1. 7	まとめ	59
4. 1. 8	文献	59
4. 2	めり込み型接合形式(S造との混構造)	60
4. 2. 1	はじめに	60
4. 2. 2	試験体と試験条件	60
4. 2. 3	試験方法	62
4. 2. 4	試験結果	64
4. 2. 5	破壊性状	67
4. 2. 6	まとめ	68
4. 3	ビス留め接合形式(軸組工法)	69
4. 3. 1	はじめに	69
4. 3. 2	試験体と試験条件	69
4. 3. 3	試験方法	70
4. 3. 4	試験結果	71
4. 3. 5	破壊性状	73
4. 3. 6	まとめ	74
4. 4	ビス留め接合による耐力壁(軸組工法)	75
4. 4. 1	はじめに	75
4. 4. 2	試験体と試験条件	75
4. 4. 3	試験方法	78
4. 4. 4	試験結果	79
4. 4. 5	破壊性状	82
4. 4. 6	まとめ	84
4. 4. 7	文献	84
5	おわりに	85

はじめに

クロスラミネイティッドティンバー(CLT)は、比較的厚い幅広板(厚さ 3cm 程度)を並べることで単層を構成し、層ごとに軸方向を直交するように重ねて接着した大判の集成加工材料である(図 1)。1996 年にドイツ、オーストリアで開発されて以来、欧州や北米のみならず世界中で急速に普及してきた。日本においても、大径材を歩留まり良く製材する上で最も効率的な大量のひき板利用が可能となることや寸法安定性の高さ(異方性がない)、断熱性、遮音性、施工性、耐震性の高さ等から中高層の非住宅建築物の木造化に大きく寄与する新部材として、木材業界や建築業界から早急な普及、一般化が要望されている。この背景には、木材の一般住宅への利用拡大の見通しが極めて厳しい中で、コンクリートや鉄骨系建築物との競争と同時に共存の可能性が考えられること、近年における木質構造を取り巻く情勢変化が著しいこと(人工造林木の再生可能資源であることへの期待等)、さらには「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」や「都市の低炭素化の促進に関する法律」などに見られる制度面からの木材利用への後押しの影響が少なくないこと、等が挙げられよう。

この様な中、我が国においても異例の早さで日本農林規格が制定されたほか(2013 年 12 月:直交集成板の日本農林規格)、全層に CLT を用いた建築物が高知県(スギ)、北海道(カラマツ)、岡山県(スギ)、福島県(スギ)、長崎県(スギ)、奈良県(スギ)に建設されるなど、実用化に向けた取り組みが全国規模で加速している。

宮崎県においても、県内木材、建築関連企業や団体、行政の CLT への期待が近年急速に高まっており、2014 年度には、県産 CLT の供給可能性や CLT 建築物の建設可能性を探るための研究会が設立された。また、県内の集成材工場であるウッドエナジー協同組合では、2015 年度中に全層に県産スギを用いた CLT の製造が開始される予定であり、併せて同社の敷地内にスギ CLT の耐力壁、集成材スラブを用いた木造軸組のオフィスビルが竣工する予定である。さらに、2019 年竣工を目指している宮崎県防災拠点庁舎(10 階建て)の耐震壁にも、宮崎県産スギ CLT の利用が確定している。一方、この様な背景の中で、現時点では CLT の設計基準値(基準強度など)が定められておらず、汎用的な設計法が整備されていないことから、全層に県産スギを用いた CLT のように前例のない仕様で CLT 建築物を建設するには、一部の例外を除いて時刻歴応答解析による特殊な構造計算と個別の大臣認定を取得する必要がある、そのためには材料性能や接合性能を明らかにすることが必要不可欠となる。

そこで、本事業では、宮崎県産スギによる CLT 建築物を一般化するために、全層にスギラミナを用いた CLT の材料性能と接合性能を検討した。具体的な試験項目は、以下の通りである。

- (1) 面外曲げ試験
- (2) 面内曲げ試験
- (3) 面外せん断試験
- (4) 面内せん断試験

- (5) 短柱縦圧縮試験
- (6) 面外曲げクリープ試験
- (7) 面外曲げクリープ破壊試験(DOL 試験)
- (8) ラグスリューボルト接合形式(パネル工法)の開発
- (9) めり込み型接合形式(S 造との混構造)の開発
- (10) ビス留め接合形式(軸組工法)の開発
- (11) ビス留め接合による耐力壁(軸組工法)の開発

ここで、本事業の核となる重要な部分について、以下に言及する。

欧州では、プライを構成する隣り合うラミナ同士を接着する「幅はぎ」は、あまり好まれない傾向がある。その主な理由は、以下の様なものである¹⁾。

(1) 幅はぎをすることで、最外層の表面に予期せぬ割れを生じる可能性が高まる。このため、幅はぎを施さないことで収縮変形による割れを抑制したい。

(2) 欧州では、一部を除き、CLT を現しで使うことは希であるため、CLT に化粧性を求める場面が少ない。

その一方で、CLT 構造物が火災に遭った場合、幅はぎが施されていないときにラミナの隙間から火が回る可能性を危惧する声がある²⁾。また、欧州では接合部の設計において、基本的にスクリービスとブラケットのみで構成し、引きボルトの様なものは性能過剰という認識が主流であり、CLT 自体にも大きな力学的性能を期待していない¹⁾。この点は、特に日欧において地震力の想定が異なる点がベースとなっており、双方における大きな環境の差異に基づいていると言えよう。特に、日本では、幅はぎに CLT のせん断性能を始めとして、一定の力学的性能の向上を期待する声も多いことを考慮すれば、欧州材(スプルース、オウシュウアカマツ等)よりも力学的性質がやや劣るスギ CLT の性能向上を図る上でも、「幅はぎ」を施したラミナによる CLT(以下、幅はぎあり CLT)の性能検証は極めて重要である。加えて、前述したウッドエネルギー協同組合は、この幅はぎあり CLT の製造を行うことになっており、県内関連企業の後押しと言う側面からもこの検証は重要な意味を持つだろう。

以上により、本稿では、「幅はぎあり CLT」と幅はぎを施さないラミナによる CLT(以下、幅はぎなし CLT)の性能比較を中心に検討を進めることとしたい。

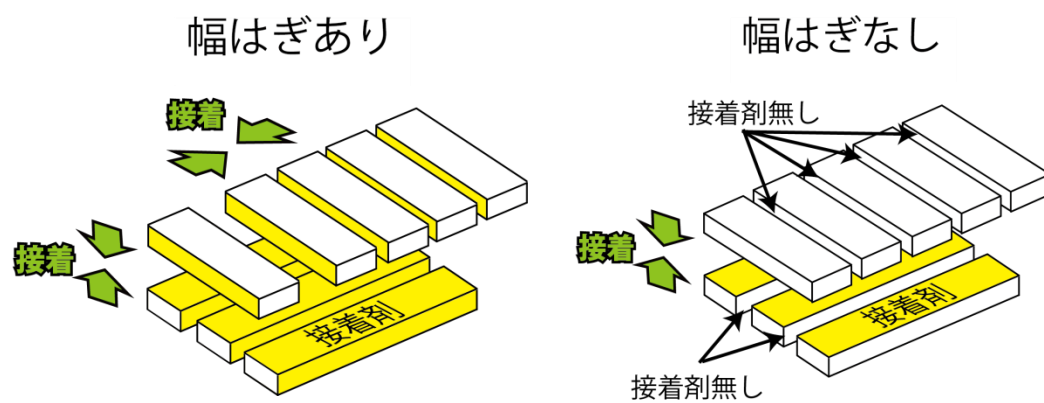


図1 幅はぎありとなしの概略図

1 事業概要

1. 1 事業実施スケジュール

本事業は、以下のスケジュールに従って実施した。

項目	2015年							2016年		
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
全体会議	★			★	★	★		★		★
ラミナの検討とCLT試験体の作成		←————→								
ラミナの曲げ試験			←→							
面外・面内曲げ試験				←————→						
面外・面内外せん断試験					←————→					
縦圧縮試験					←————→					
面外曲げクリープ試験					←————→			————→	————→	————→
面外曲げDOL試験					←————→			————→	————→	————→
接合試験						←————→				
報告書作成									←————→	————→

1. 2 担当者

○総括	荒武 志朗	宮崎県木材利用技術センター木材加工部長
○強度試験リーダー	森田 秀樹	同センター木材加工部主任研究員
同メンバー	深田 学	同センター木材加工部副部長
同メンバー	兒玉 了一	同センター木材加工部主任研究員
○長期性能試験リーダー	荒武 志朗	同センター木材加工部長
同メンバー	深田 学	同センター木材加工部副部長
○接合試験リーダー	中谷 誠	同センター構法開発部主任研究員
同メンバー	川崎 茂樹	同センター構法開発部長
同メンバー	下温湯盛久	同センター構法開発部副部長
同メンバー	蛭原 啓文	同センター構法開発部主任研究員
○アドバイザー	宮武 敦	(国研)森林総合研究所複合材料研究領域集成加工担当チーム長

1. 3 文献

- 1) 渡部博：欧州における CLT 研究開発の現況、木材工業 69(2)、50-54 (2014).
- 2) N.Werther、 M.Merk、 S.Winter： Fire safe service installations in Timber buildings、 WCTE2012、 Final Paper Journal-Strength and Serviceability、 61-69(2012).

2 強度性能

2. 1 試験体の概要

2. 1. 1 ラミナの曲げ性能

CLT 製造に供したラミナの一部を抽出し、曲げ試験を行った。曲げ試験は万能材料試験機(島津製作所、AG-100kNI、容量 100kN)を用いて、直交集成板の日本農林規格(以下、JAS)ラミナの曲げ C 試験に準じ、支点間距離(以下、スパン)525mm、荷重点間距離(以下、ロードスパン)175mm の 3 等分点 4 点荷重方式で実施した。供試ラミナは、幅 100mm、厚さ 25mm、長さ 800mm の縦継ぎがないラミナ(以下、NJ ラミナ)及び長さ方向中央部に縦継ぎがあるラミナ(以下、FJ ラミナ)とした。JAS ではヤング係数の上限がない A 種と上限がある B 種のラミナが規定されているが、今回は B 種ラミナとし、強度等級は M60B 及び M30B とした。図 1 に曲げ試験風景、図 2 に曲げ破壊例を示し、表 1 に試験結果を、表 2 に JAS 基準値を示す。



図 1 ラミナの曲げ試験風景



図 2 ラミナの破壊例 (NJ ラミナ)

表 1 ラミナの曲げ試験結果

ラミナ強度等級	試験体数		密度 kg/m ³	縦振動ヤング係数 kN/mm ²	曲げヤング係数 kN/mm ²	曲げ強さ N/mm ²	含水率 %
M60B(FJラミナ)	30	平均値	450	7.9	7.3	38.7	10.5
		標準偏差	30.2	1.1	0.9	5.4	0.5
		変動係数%	6.7	13.3	12.1	14.0	4.5
M60B(NJラミナ)	30	平均値	442	7.6	7.0	63.5	10.6
		標準偏差	32.5	1.5	1.4	10.9	0.4
		変動係数%	7.4	20.3	20.4	17.1	4.1
M30B(FJラミナ)	30	平均値	443	5.3	4.7	38.6	11.5
		標準偏差	32.3	0.5	0.7	5.7	0.5
		変動係数%	7.3	9.8	13.8	14.7	4.2
M30B(NJラミナ)	30	平均値	388	5.2	4.7	49.4	11.5
		標準偏差	34.5	0.4	0.5	6.3	0.5
		変動係数%	8.9	8.7	11.0	12.7	4.0

表 2 B 種ラミナの JAS 基準値

	曲げヤング係数 (kN/mm^2)			曲げ強さ (N/mm^2)	
	下限値	平均値	上限値	下限値	平均値
M60B	5.0	6.0	9.0	20.0	27.0
M30B	2.5	3.0	6.0	14.5	19.5

JAS 基準値との比較を行った結果、曲げヤング係数において基準値を満足しない試験体が存在し、上限値を上回った試験体数は M60B(FJ)で 1 体、M60B(NJ)で 3 体、M30B(FJ)で 1 体であり、下限値を下回った試験体は M60B(NJ)で 1 体であった。以上の 6 体が JAS 基準値を満足しなかったとは言え、その差は非常に小さく、その他の試験体については基準値を満足し、その割合は全試験体の 95%であった。したがって、CLT 製造に供した今回のラミナは、概ね JAS を満足する品質を有するものと考えられた。

2. 1. 2 CLT の製造と試験体の木取り

宮崎県産スギラミナを用いて、CLT の製造を JAS 認定工場で行った。フィンガージョイント、幅はぎ、積層に使用した接着剤は、水性高分子イソシアネート系接着剤とした。幅はぎあり試験体及び幅はぎなし試験体ともに、まず幅 1800～2200mm、長さ 3000～6000mm の CLT パネルを製造し、そこから面外曲げ試験体(強軸・弱軸)、面内曲げ試験体(強軸・弱軸)、面外せん断試験体(強軸)、面内せん断試験体(強軸・弱軸)、面外曲げ DOL 試験体(強軸)、面外曲げクリープ試験体(強軸)を木取りした。図 3 に幅はぎあり CLT 試験体の木取り図を示し、図 4 に幅はぎなし CLT 試験体の木取り図を示す。なお、短柱縦圧縮試験体(強軸・弱軸)は、面内せん断試験体の予備試験体から採取した。

2. 1. 3 試験体の測定

木取りした試験体に対して、寸法、重量、密度(ρ)、縦振動ヤング係数(E_H)、TGH 法による純曲げヤング係数(E_{ob})及びせん断弾性係数(G_H)の測定を行った。なお、TGH 法による E_{ob} 及び G_H の測定は、構造用木材の強度試験マニュアルに準じて行った。

----- C1 パネル 長さ 4m -----

7層7プライ-強軸（幅2000mm×厚さ175mm×長さ4000mm）

[illegible]

7層7プライ-強軸（幅2000mm×厚さ175mm×長さ4000mm）

[illegible]

7層7プライ-強軸（幅2000mm×厚さ175mm×長さ4000mm）

面内曲げ 2-1			200×4000
面内曲げ 2-1			
面外せん断 3-1 300×1225	面外せん断 3-1 300×1225	面外せん断 3-1 300×1225	
面外せん断 3-1	面外せん断 3-1	面外せん断 3-1	
面外曲げクリープ A1-1			120×4000
面外曲げクリープ A1-2			
面外曲げクリープ A2-1			
面外曲げクリープ A2-2			

----- CLT パネル 長さ 3m -----

7層7プライ-強軸（幅2000mm×厚さ175mm×長さ4000mm）

	面外曲げクリープ A3-1	120×4000
	面外曲げクリープ A3-2	
	面外曲げクリープ A4-1	
	面外曲げクリープ A4-2	
	面外曲げクリープ A5-1	
	面外曲げクリープ A5-2	
	面外曲げクリープ A6-1	
	面外曲げクリープ A6-2	

5層5プライ-強軸（幅2000mm×厚さ150mm×長さ3000mm）

面外曲げ DOL A33	100×2400
面外曲げ DOL A34	
面外曲げ DOL A35	
面外曲げ DOL A36	
面外曲げ DOL A37	
面外曲げ DOL A38	
面外曲げ DOL A39	
面外曲げ DOL A40	
面外曲げ DOL A41	
面外曲げ DOL A42	
面外曲げ DOL A43	
面外曲げ DOL A44	
面外曲げ DOL A45	

11

CLT パネル 長さ 4m

7 層 7 プライ - 弱軸 (幅 2232mm× 厚さ 175mm× 長さ 4030mm)

面外曲げ 1-2	300×4000
面外曲げ 1-2	
面外曲げ 1-2	
面外曲げ 1-2	
面内曲げ 2-2	200×4000
面内曲げ 2-2	
面内曲げ 2-2	
面内曲げ 2-2	

7 層 7 プライ - 強軸 (幅 2232mm× 厚さ 175mm× 長さ 4030mm)

面外せん断 3-1 300×1225	面外せん断 3-1 300×1225	面内せん断 4-1 200×1400
面外せん断 3-1	面外せん断 3-1	面内せん断 4-1
面外せん断 3-1	面外せん断 3-1	面内せん断 4-1
面外せん断 3-1	面外せん断 3-1	面内せん断 4-1
面外せん断 3-1	面外せん断 3-1	面内せん断 4-1
		面内せん断 4-1
		面内せん断 4-1

7 層 7 プライ - 強軸 (幅 2232mm× 厚さ 175mm× 長さ 4030mm)

面外曲げクリープ N1-1	120×4000
面外曲げクリープ N1-2	
面外曲げクリープ N2-1	
面外曲げクリープ N2-2	
面外曲げクリープ N3-1	
面外曲げクリープ N3-2	
面外曲げクリープ N4-1	
面外曲げクリープ N4-2	
面外曲げクリープ N5-1	
面外曲げクリープ N5-2	
面外曲げクリープ N6-1	
面外曲げクリープ N6-2	

7 層 7 プライ - 強軸 (幅 2232mm× 厚さ 175mm× 長さ 4030mm)

面外曲げ 1-1	300×4000
面外曲げ 1-1	
面外曲げ 1-1	
面外曲げ 1-1	
面内曲げ 2-1	200×4000
面内曲げ 2-1	
面内曲げ 2-1	
面内曲げ 2-1	

7 層 7 プライ - 強軸 (幅 2232mm× 厚さ 175mm× 長さ 4030mm)

面外曲げ 1-1	300×4000
面外曲げ 1-1	
面外曲げ 1-1	
面外曲げ 1-1	
面内曲げ 2-1	200×4000
面内曲げ 2-1	
面内曲げ 2-1	
面内曲げ 2-1	

CLT パネル 長さ 6m

7 層 7 プライ - 弱軸 (幅 2232mm× 厚さ 175mm× 長さ 6030mm)

面外曲げ 1-2	300×4000	面内せん断 4-2	200×1400
面外曲げ 1-2		面内せん断 4-2	
面外曲げ 1-2		面内せん断 4-2	
面外曲げ 1-2		面内せん断 4-2	
面内曲げ 2-2	200×4000	面内せん断 4-2	
面内曲げ 2-2		面内せん断 4-2	
面内曲げ 2-2			

5 層 5 プライ - 強軸 (幅 1860mm× 厚さ 150mm× 長さ 6030mm)

面外曲げ DOL N1	100×2400	面外曲げ DOL N15	100×2400
面外曲げ DOL N2		面外曲げ DOL N16	
面外曲げ DOL N3		面外曲げ DOL N17	
面外曲げ DOL N4		面外曲げ DOL N18	
面外曲げ DOL N5		面外曲げ DOL N19	
面外曲げ DOL N6		面外曲げ DOL N20	
面外曲げ DOL N7		面外曲げ DOL N21	
面外曲げ DOL N8		面外曲げ DOL N22	
面外曲げ DOL N9		面外曲げ DOL N23	
面外曲げ DOL N10		面外曲げ DOL N24	
面外曲げ DOL N11		面外曲げ DOL N25	
面外曲げ DOL N12		面外曲げ DOL N26	
面外曲げ DOL N13		面外曲げ DOL N27	
面外曲げ DOL N14		面外曲げ DOL N28	

5 層 5 プライ - 強軸 (幅 1860mm× 厚さ 150mm× 長さ 6030mm)

面外曲げ DOL N29	100×2400	面外曲げ DOL N43	100×2400
面外曲げ DOL N30		面外曲げ DOL N44	
面外曲げ DOL N31		面外曲げ DOL N45	
面外曲げ DOL N32			
面外曲げ DOL N33			
面外曲げ DOL N34			
面外曲げ DOL N35			
面外曲げ DOL N36			
面外曲げ DOL N37			
面外曲げ DOL N38			
面外曲げ DOL N39			
面外曲げ DOL N40			
面外曲げ DOL N41			
面外曲げ DOL N42			

図 4 幅はぎなし CLT 試験体の木取り図

2. 2 面外曲げ試験

7層7プライのCLTパネルから、幅300mm、厚さ175mm、長さ4000mmの面外曲げ試験体を木取りした。このとき、最外層ラミナの繊維方向が長さ方向と同じ試験体を強軸、直交する試験体を弱軸とし、それぞれ6体ずつを試験に供した。

試験は実大強度試験機(東京衡機、WU-1000・TK21、容量1000kN)を用いて、スパン3150mm、ロードスパン1050mmの3等分点4点荷重方式で実施した。このときの加力速度は毎分10mmとした。変位については、試験体中央部の全たわみをSDP-200D(東京測器研究所、容量200mm)を用いて、ロードスパン内に設置したヨーク(スパン900mm)の相対たわみをCDP-50M(東京測器研究所、容量50mm)を用いて計測し、見かけの曲げヤング係数(E_m)及び純曲げヤング係数(E_b)を求めた。図5に面外曲げ試験の設置図を示し、図6に試験風景、図7に幅はぎあり試験体の破壊例、図8に幅はぎなし試験体の破壊例を示す。また、試験結果を表3及び表4に示す。

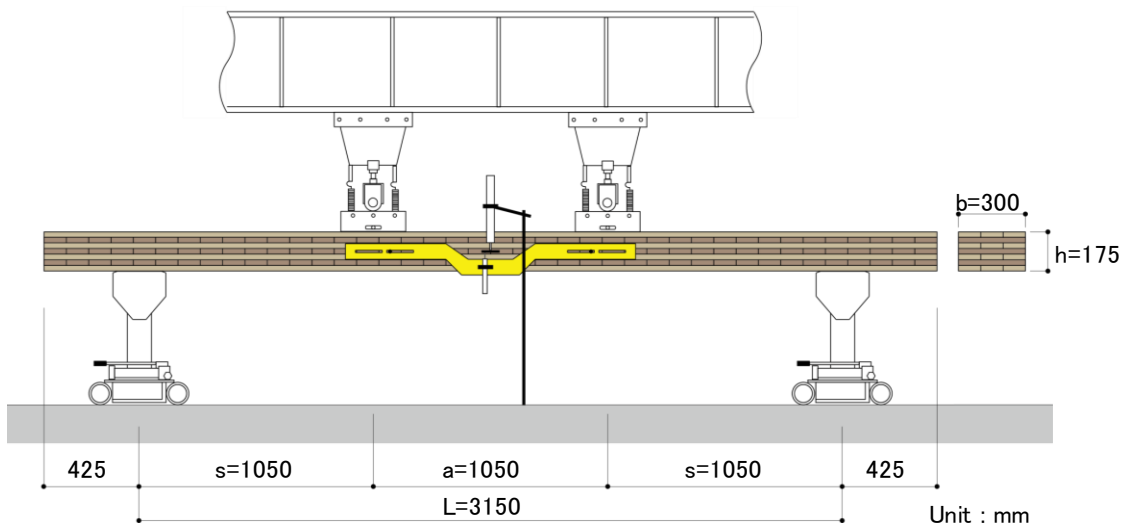


図5 面外曲げ試験 設置図 (強軸)



(a) 強軸



(b) 弱軸

図6 試験風景
13

試験で得られた最大荷重、スパン中央たわみ、ヨーク相対たわみから、曲げ強さ f_b 、見かけの曲げヤング係数 E_m 、純曲げヤング係数 E_b を以下で算出した。

$$f_b = \frac{3P_{\max} \times s}{bh^2} \quad E_m = \frac{\Delta P \times s(3L^2 - 4s^2)}{\Delta \delta \times 4bh^3} \quad E_b = \frac{\Delta P \times 3sy^2}{\Delta \delta_y \times 4bh^3}$$

ここで、 $P_{\max}$: 最大荷重
 L : スパン
 s : 支点－荷重点間距離
 a : 荷重点間距離
 y : ヨーク測定スパン
 b : 試験体の幅
 h : 試験体の厚さ
 ΔP : $P_{\max}$ の 10～40%の荷重増分
 $\Delta \delta$: ΔP に対応するスパン中央たわみの増分
 $\Delta \delta_y$: ΔP に対応するヨーク相対たわみの増分

破壊形態は、幅はぎの有無にかかわらず、全て曲げ破壊を示した(図 7、図 8)。強軸試験体については、引張側のフィンガージョイントが起因となり、全体の破壊に至る形態が多くを占めた。一方、弱軸試験体については、引張側 2 層目の強軸ラミナが曲げ性能に大きく寄与すると考えられたが、幅はぎあり試験体では最外層ラミナの幅はぎ部の木破が認められ、少なくとも初期の剛性には寄与していることが示唆された。

直交集成板の適正製造基準では、初期試験及び抜き取り試験として、直交集成板の曲げ試験が規定されている。強度等級 Mx60、7 層 7 プライ直交集成板では、曲げヤング係数が平均値で 3.6kN/mm² 以上、下限値で 3.0kN/mm² 以上、曲げ強さで 8.2N/mm² 以上と定められている。なお、JAS でも同様の基準値である。図 9 に曲げヤング係数と曲げ強さの関係を示す。全試験体で基準値を上回り、特に強軸試験体は基準値の 2 倍程度の曲げ強さを示した。なお、今回の試験では幅はぎの有無による違いは認められなかった。

以上のことから、本県産スギ CLT の面外曲げ性能は、幅はぎの有無にかかわらず JAS 基準値を十分上回ることが明らかになった

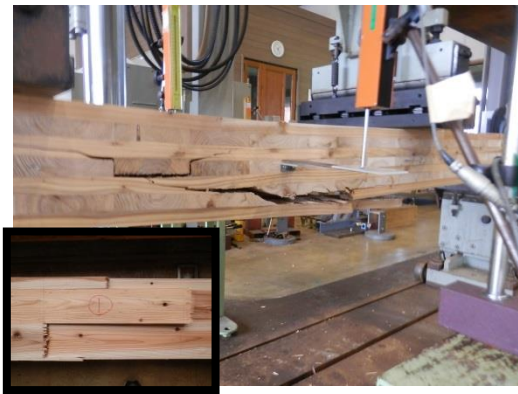


(a) 強軸

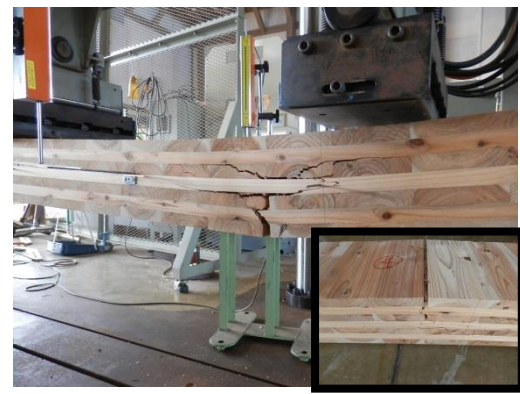


(b) 弱軸

図7 幅はぎあり試験体の破壊例



(a) 強軸



(b) 弱軸

図8 幅はぎなし試験体の破壊例

表3 幅はぎあり試験体の面外曲げ試験結果

面外曲げ試験体（強軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_{tr} kN/mm ²	曲げヤング係数 E_o kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	300	176.69	4005	417	4.3	4.9	5.6	20.3	曲げ
		2	300	176.45	4005	417	4.1	4.7	5.3	20.3	曲げ
		3	300	176.54	4005	415	4.2	4.7	5.1	21.7	曲げ
		4	300	176.42	4005	418	4.3	4.8	5.4	21.7	曲げ
		5	300	176.14	4005	421	3.9	4.6	5.0	18.8	曲げ
		6	300	176.90	4005	425	3.9	4.4	4.7	21.7	曲げ
					平均値	419	4.1	4.7	5.2	20.7	
					標準偏差	3.4	0.2	0.2	0.3	1.2	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	411	3.7	4.2	4.5	18.0	

面外曲げ試験体（弱軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_{tr} kN/mm ²	曲げヤング係数 E_o kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	300	175.37	4005	419	3.2	1.9	2.0	11.2	曲げ
		2	300	175.57	4005	422	2.5	1.5	1.6	12.3	曲げ
		3	300	175.76	4005	422	3.0	1.8	2.1	12.4	曲げ
		4	300	175.19	4005	429	3.3	1.9	1.9	12.0	曲げ
		5	300	175.89	4005	418	2.6	1.6	1.7	13.1	曲げ
		6	300	175.22	4005	423	3.0	1.8	2.0	13.9	曲げ
					平均値	422	2.9	1.8	1.9	12.5	
					標準偏差	4.0	0.3	0.2	0.2	0.9	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	413	2.2	1.4	1.4	10.3	

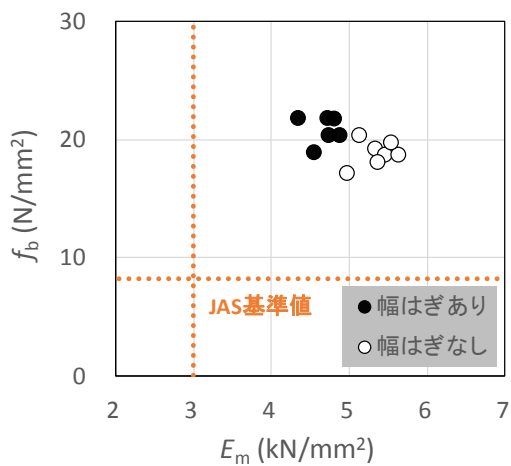
表 4 幅はぎなし試験体の面外曲げ試験結果

面外曲げ試験体（強軸）

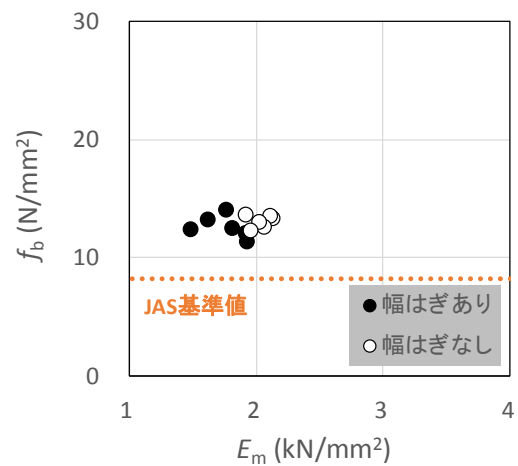
層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	曲げヤング係数 E_m kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	301	175.96	4001	425	4.6	5.3	6.0	19.1	曲げ
		2	301	176.15	4001	425	4.6	5.1	5.8	20.3	曲げ
		3	301	175.67	4000	434	4.8	5.5	5.8	18.6	曲げ
		4	301	175.41	4000	431	4.5	5.4	6.0	18.0	曲げ
		5	301	175.96	4000	435	5.0	5.7	6.0	18.6	曲げ
		6	301	175.87	4001	430	4.5	5.0	5.2	17.0	曲げ
		7	301	175.96	4000	427	4.6	5.5	5.7	19.6	曲げ
					平均値	429	4.7	5.4	5.8	18.8	
					標準偏差	4.0	0.2	0.2	0.3	1.1	
					K (n=7)	2.251	2.251	2.251	2.251	2.251	
					5% 下限値	421	4.3	4.8	5.2	16.3	

面外曲げ試験体（弱軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	曲げヤング係数 E_m kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	300	176.02	4001	416	3.3	2.1	2.2	13.2	曲げ
		2	300	177.04	4001	430	3.2	2.1	2.2	13.4	曲げ
		3	300	175.82	4001	421	3.3	2.1	2.2	12.5	曲げ
		4	301	176.00	4001	427	3.1	1.9	2.1	13.5	曲げ
		5	301	175.98	4001	423	3.1	2.0	2.1	12.9	曲げ
		6	300	176.95	4001	422	3.2	2.0	2.0	12.2	曲げ
					平均値	423	3.2	2.0	2.1	12.9	
					標準偏差	4.9	0.1	0.1	0.1	0.5	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	412	3.0	1.8	1.9	11.7	



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 9 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

2. 3 面内曲げ試験

7層7プライのCLTパネルから、幅200mm、厚さ175mm、長さ4000mmの面内曲げ試験体を木取りし、面内方向加力の曲げ試験に供した。このとき、最外層ラミナの繊維方向が長さ方向と同じ試験体を強軸、直交する試験体を弱軸とし、それぞれ6体ずつを試験体とした。

試験は実大強度試験機を用いて、スパン3600mm、ロードスパン1200mmの3等分点4点荷重方式で実施した。このときの加力速度は毎分10mmとした。変位については、試験体中央部の全たわみをSDP-200D(東京測器研究所、容量200mm)を用いて、ロードスパン内に設置したヨーク(スパン900mm)の相対たわみをCDP-50M(東京測器研究所、容量50mm)を用いて計測し、見かけの曲げヤング係数(E_m)及び純曲げヤング係数(E_b)を求めた。図10に面内曲げ試験の設置図を示し、図11に試験風景、図12に幅はざあり試験体の破壊例、図13に幅はざなし試験体の破壊例を示す。また、試験結果を表5及び表6に示す。

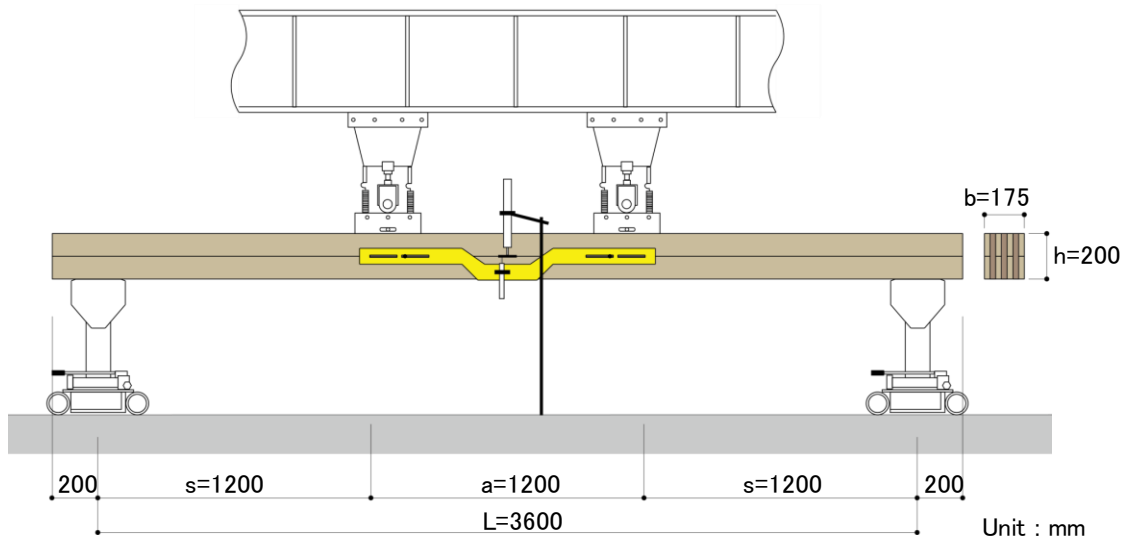


図10 面内曲げ試験 設置図 (強軸)



(a) 強軸



(b) 弱軸

図11 試験風景

破壊形態は、幅はぎの有無にかかわらず、全て曲げ破壊を示した(図 12、図 13)。強軸及び弱軸試験体ともに、強軸ラミナが曲げの多くを負担すると考えられ、強軸ラミナのフィンガージョイントが破壊に含まれる場合が多くを占めた。また、弱軸試験体の幅はぎ位置が直線的に並ぶ状況においては、その位置で破壊に至る試験体が多く見られた(図 14)。特に製造精度が高かった幅はぎなし試験体は、突き付け位置がほぼ同一直線上に並んでいたため、この傾向が強かった。なお、面内曲げ試験の特徴として、面外曲げ試験に比べてさらに脆性的であり、最大荷重を示した後、一気に耐力がゼロになる試験体が多く観察された。

図 15 に曲げヤング係数と曲げ強さの関係を示す。図中には参考までに、面外曲げの JAS 基準値を図示している。いわゆる平使いの面外曲げ試験結果に比べて、縦使いの面内曲げ試験結果は比較的低い曲げ強さを示しているものの、全試験体が基準値を上回った。また、曲げ強さについては幅はぎの有無による違いは認められなかった。



(a) 強軸

(b) 弱軸

図 12 幅はぎあり試験体の破壊例



(a) 強軸

(b) 弱軸

図 13 幅はぎなし試験体の破壊例



(a) 幅はぎあり試験体



(b) 幅はぎなし試験体

図 14 幅はぎ部付近の破壊例 (▶は幅はぎ又は突き付け位置)

表 5 幅はぎあり試験体の面内曲げ試験結果
面内曲げ試験体 (強軸)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	曲げヤング係数 E_a kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	176.19	200	4005	427	4.10	3.8	4.1	18.9	曲げ
		2	176.41	200	4005	420	3.90	3.5	3.9	17.9	曲げ
		3	176.43	200	4005	421	4.30	4.0	4.5	16.3	曲げ
		4	176.73	199	4005	422	4.20	3.9	4.2	16.4	曲げ
		5	176.60	200	4005	421	3.90	3.5	3.7	16.5	曲げ
		6	176.38	201	4005	422	3.90	3.5	3.4	17.0	曲げ
					平均値	422	4.05	3.7	4.0	17.2	
					標準偏差	2.49	0.18	0.2	0.4	1.0	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	416	3.6	3.2	3.1	14.7	

面内曲げ試験体 (弱軸)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	曲げヤング係数 E_a kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	175.88	200	4005	428	2.50	2.2	2.3	13.6	曲げ
		2	175.97	200	4005	425	2.60	2.3	2.5	16.0	曲げ
		3	175.77	200	4005	424	2.50	2.2	2.4	14.6	曲げ
		4	176.14	200	4005	422	2.30	2.0	2.0	13.4	曲げ
		5	175.85	200	4005	423	2.30	2.2	2.3	15.1	曲げ
		6	175.90	200	4005	423	2.20	2.1	2.1	12.4	曲げ
					平均値	424	2.40	2.2	2.3	14.2	
					標準偏差	1.85	0.15	0.1	0.2	1.3	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	420	2.0	1.9	1.8	11.2	

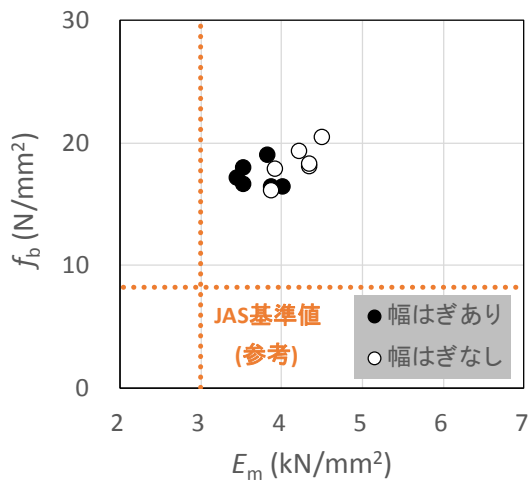
表 6 幅はぎなし試験体の面内曲げ試験結果

面内曲げ試験体（強軸）

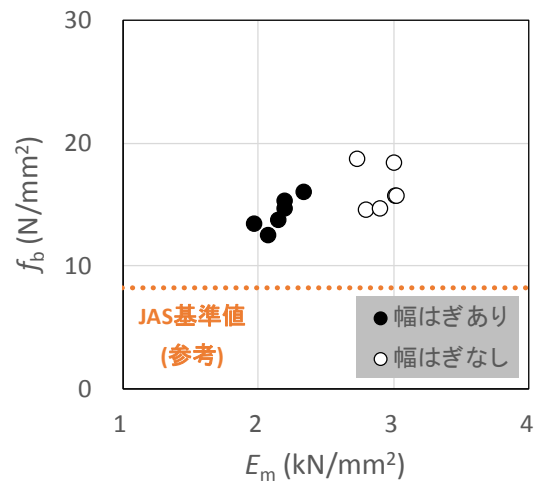
層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_{tr} kN/mm ²	曲げヤング係数 E_m kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	175.95	201	4000	428	4.60	4.4	4.6	18.0	曲げ
		2	176.09	201	4001	433	4.44	4.2	4.5	19.2	曲げ
		3	175.50	200	4000	430	4.51	3.9	4.0	16.0	曲げ
		4	175.92	200	4000	428	4.72	4.4	4.7	18.2	曲げ
		5	176.14	200	4000	424	4.79	4.5	4.9	20.4	曲げ
		6	176.34	201	4001	424	4.35	3.9	4.2	17.8	曲げ
					平均値	428	4.57	4.2	4.5	18.3	
					標準偏差	3.45	0.17	0.2	0.3	1.5	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	420	4.2	3.6	3.7	14.8	

面内曲げ試験体（弱軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_{tr} kN/mm ²	曲げヤング係数 E_m kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_b kN/mm ²	曲げ強さ f_b N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	177.07	200	4001	420	3.20	3.0	3.2	15.6	曲げ
		2	176.50	200	4001	422	3.21	2.8	2.9	14.4	曲げ
		3	176.82	200	4001	425	3.24	2.9	2.9	14.5	曲げ
		4	176.69	200	4001	422	3.21	3.0	3.1	15.6	曲げ
		5	175.95	200	4001	423	3.32	3.0	3.0	18.3	曲げ
		6	175.86	201	4001	417	3.09	2.7	2.9	18.6	曲げ
					平均値	422	3.21	2.9	3.0	16.2	
					標準偏差	2.74	0.07	0.1	0.1	1.8	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5% 下限値	415	3.0	2.6	2.7	11.9	



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 15 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

2. 4 面外せん断試験

7層7プライのCLTパネルから、幅300mm、厚さ175mm、長さ1225mmの面外せん断試験体を木取りした。このとき、最外層ラミナの繊維方向が長さ方向と同じ強軸試験体6体を試験に供した。

試験は実大強度試験機を用いて、スパン875mmの中央集中荷重方式で実施した。このときの加力速度は毎分3mmとした。変位については、試験体中央部の全たわみをSDP-200D(東京測器研究所、容量200mm)を用いて、スパン内に設置したヨーク(スパン875mm)の相対たわみをCDP-50M(東京測器研究所、容量50mm)を用いて計測し、せん断弾性係数(G)を求めた。図16に面外せん断試験の設置図を示し、図17に試験風景、図18に幅はぎあり試験体の破壊例、図19に幅はぎなし試験体の破壊例を示す。また、試験結果を表7及び表8に示す。

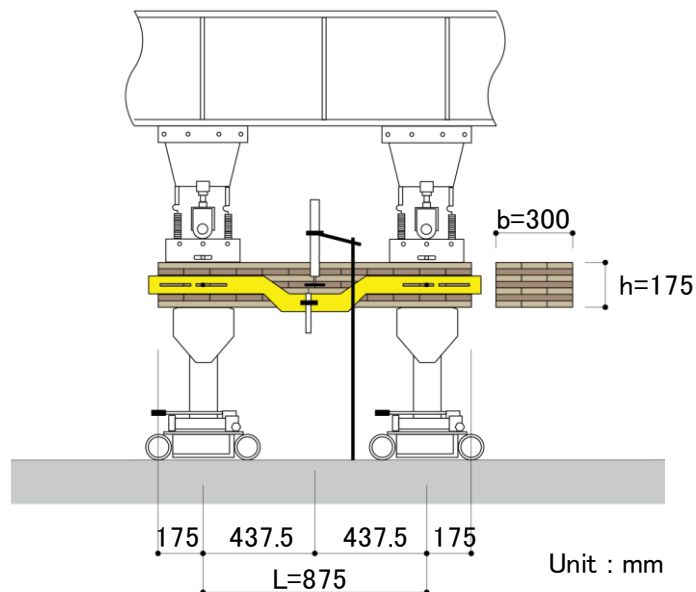


図16 面外せん断試験 設置図



図17 試験風景

試験で得られた最大荷重、スパン中央たわみから、せん断強さ f_s 、せん断弾性係数 G を以下で算出した。

$$f_s = \frac{3P_{\max}}{4bh} \quad G = \frac{6L}{\frac{20bh}{\Delta P / \Delta \delta} - \frac{5L^3}{E_b h^2}}$$

ここで、 $P_{\max}$: 最大荷重

L : スパン

b : 試験体の幅

h : 試験体の厚さ

ΔP : $P_{\max}$ の 10～40% の荷重増分

$\Delta \delta$: ΔP に対応するスパン中央たわみの増分

E_b : 面外曲げ試験で得られた純曲げヤング係数の平均値

破壊形態は、幅はぎあり試験体が主にせん断破壊、幅はぎなし試験体がせん断と曲げの複合破壊を示した。幅はぎあり試験体については、最大荷重を示した時点では最外層の強軸ラミナに破壊が認められず、弱軸ラミナにのみせん断破壊が認められた(図 18)。一方、幅はぎなし試験体でも初期破壊は弱軸ラミナのせん断破壊であったが、最大荷重時には最外層の強軸ラミナの曲げ破壊も同時に発生した(図 19)。すなわち、他の試験と異なり、幅はぎの有無が破壊形態の違いとして明確に現れた。なお、今回は、中央集中荷重方式による曲げ型試験法でせん断強さが評価可能であり、同様の試験の場合に曲げ破壊が多くを占めるスギ製材及び集成材とは明らかに異なる傾向を示した。

直交集成板の適正製造基準では、初期試験及び抜き取り試験として直交集成板のせん断試験が規定されており、強度等級にかかわらず、せん断強さ 1.5N/mm^2 以上が適合基準として定められている。図 20 にせん断弾性係数とせん断強さの関係を示す。幅はぎあり及び幅はぎなし試験体ともに、全て基準値を上回った。なお、幅はぎあり試験体のせん断強さが幅はぎなし試験体より大きい値を示したが、有意な差は認められなかった。

以上のことから、本県産スギ CLT の面外せん断性能は、幅はぎの有無にかかわらず JAS 基準値を十分上回ることが明らかになった



図 18 幅はぎあり試験体の破壊例



図 19 幅はぎなし試験体の破壊例

表 7 幅はぎあり試験体の面外せん断試験結果

面外せん断試験体（強軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_{cb} kN/mm ²	せん断弾性係数 G_{90} kN/mm ²	せん断弾性係数 G kN/mm ²	せん断強さ f_c N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	300	175.76	1225	423	3.8	6.3	0.30	0.38	2.5	せん断
		2	300	175.59	1225	421	4.1	5.0	0.32	0.37	2.5	せん断
		3	300	175.72	1225	411	3.9	4.9	0.31	0.37	2.7	せん断
		4	300	175.76	1225	418	3.8	4.3	0.32	0.34	2.6	曲げ+せん断
		5	300	175.66	1225	418	4.0	5.7	0.31	0.37	2.4	せん断
		6	300	175.69	1225	429	4.2	5.1	0.33	0.44	2.8	せん断
					平均値	420	4.0	5.2	0.32	0.38	2.6	
					標準偏差	5.9	0.2	0.7	0.01	0.03	0.1	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5%下限値	406	3.6	3.6	0.29	0.30	2.2	
							※TGH法		※TGH法		※実験	

表 8 幅はぎなし試験体の面外せん断試験結果

面外せん断試験体（強軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_{ob} kN/mm ²	せん断弾性係数 G_b kN/mm ²	せん断弾性係数 G kN/mm ²	せん断強さ f_s N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	301	176.17	1226	432	4.8	6.5	0.32	0.44	2.6	せん断+曲げ
		2	300	175.96	1225	427	4.8	5.6	0.34	0.41	2.2	せん断+曲げ
		3	301	176.01	1225	438	4.7	5.9	0.33	0.48	2.4	せん断+曲げ
		4	301	175.8	1225	423	4.6	5.7	0.33	0.40	2.6	せん断+曲げ
		5	301	175.56	1226	435	4.8	6.4	0.34	0.51	2.4	せん断+曲げ
		6	301	175.76	1226	425	4.6	5.6	0.33	0.45	2.2	せん断+曲げ
					平均値	430	4.7	5.9	0.33	0.45	2.4	
					標準偏差	5.9	0.1	0.4	0.01	0.04	0.2	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5%下限値	416	4.5	5.0	0.31	0.35	2.0	
							※TGH 法		※TGH 法		※実験	

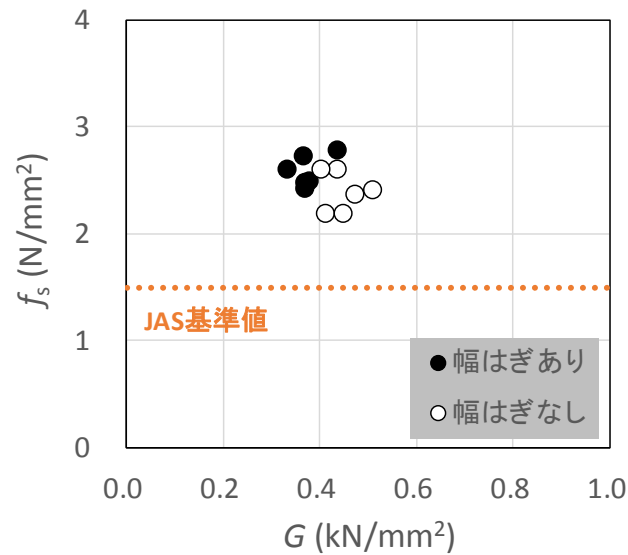


図 20 せん断弾性係数とせん断強さの関係

2. 5 面内せん断試験

7層7プライのCLTパネルから、幅200mm、厚さ175mm、長さ1400mmの面内せん断試験体を木取りし、面内方向加力の曲げ試験に供した。このとき、最外層ラミナの繊維方向が長さ方向と同じ試験体を強軸、直交する試験体を弱軸とし、幅はぎあり試験体6体、幅はぎなし試験体8体を供試体とした。

試験は実大強度試験機を用いて、スパン1000mmの中央集中荷重方式で実施した。このときの加力速度は毎分3mmとした。変位については、試験体中央部の全たわみをSDP-200D(東京測器研究所、容量200mm)を用いて、スパン内に設置したヨーク(スパン1000mm)の相対たわみをCDP-50M(東京測器研究所、容量50mm)を用いて計測し、せん断弾性係数(G)を求めた。図21に面内せん断試験の設置図を示し、図22に試験風景、図23に幅はぎあり試験体の破壊例、図24に幅はぎなし試験体の破壊例を示す。また、試験結果を表9及び表10に示す。

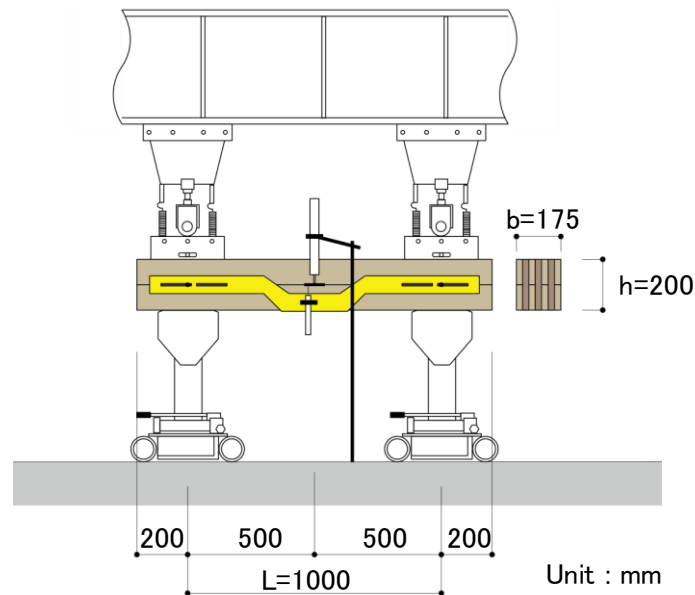
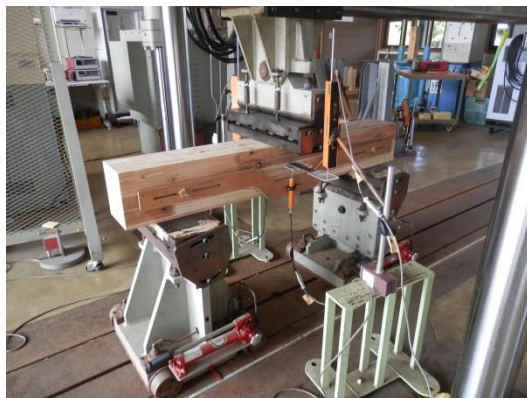


図21 面内せん断試験 設置図 (強軸)



(a) 強軸



(b) 弱軸

図22 試験風景

破壊形態は、幅はぎの有無にかかわらず、全て曲げ破壊を示した(図 23、図 24)。強軸試験体はフィンガージョイントの影響が強く見られた。また、弱軸試験体は、幅はぎ位置が直線的に並んだ位置で破壊に至る試験体が多く見られ、特に幅はぎなし試験体で顕著であった。このような場合、フィンガージョイントに関係なく破壊が生じた。

図 25 にせん断弾性係数とせん断強さの関係を示す。図中には参考までに、面外せん断の JAS 基準値を図示しているが、全試験体が基準値を上回った。また、面内せん断強さについては幅はぎの有無による違いは認められなかった。



図 23 幅はぎあり試験体の破壊例

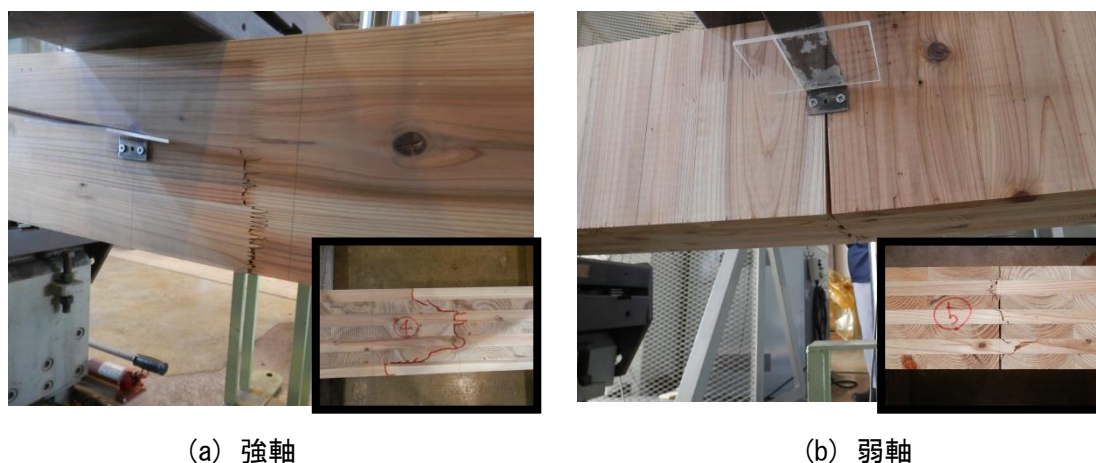


図 24 幅はぎなし試験体の破壊例

表 9 幅はざあり試験体の面内せん断試験結果

面内せん断試験体（強軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_{ob} kN/mm ²	せん断弾性係数 G_b kN/mm ²	せん断弾性係数 G kN/mm ²	せん断強さ f_s N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	176.45	199	1400	423	4.0	3.8	0.95	0.95	2.6	曲げ
		2	176.23	200	1400	428	3.9	3.9	0.88	0.93	2.7	曲げ
		3	175.75	199	1400	446	4.1	4.4	0.83	1.29	2.3	曲げ
		4	175.71	199	1401	418	3.9	4.1	0.79	1.08	2.1	曲げ
		5	175.98	200	1401	441	4.0	4.0	0.89	1.16	2.6	曲げ
		6	175.96	200	1400	434	3.9	3.9	0.86	1.00	2.5	曲げ
					平均値	432	4.0	4.0	0.87	1.07	2.5	
					標準偏差	10.7	0.1	0.2	0.05	0.14	0.2	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5%下限値	407	3.7	3.5	0.74	0.74	2.0	

※TGH法

※TGH法

※実験

面内せん断試験体（弱軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_{ob} kN/mm ²	せん断弾性係数 G_b kN/mm ²	せん断強さ f_s N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	176.03	200	1401	415	2.6	2.5	0.90	1.9	曲げ
		2	175.86	200	1400	424	2.4	2.5	0.73	2.0	曲げ
		3	175.8	200	1401	425	2.6	2.8	0.84	1.8	曲げ
		4	176.03	200	1401	431	2.6	2.5	0.89	1.9	曲げ
		5	175.96	200	1401	427	2.7	2.8	0.79	1.8	曲げ
		6	175.66	200	1401	419	2.9	2.8	0.82	2.2	曲げ
					平均値	423	2.6	2.7	0.83	1.9	
					標準偏差	5.8	0.1	0.2	0.06	0.2	
					K (n=6)	2.336	2.336	2.336	2.336	2.336	
					5%下限値	410	2.3	2.3	0.68	1.6	

※TGH法

※TGH法

表 10 幅はぎなし試験体の面内せん断試験結果

面内せん断試験体（強軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_{ob} kN/mm ²	せん断弾性係数 G_b kN/mm ²	せん断弾性係数 G kN/mm ²	せん断強さ f_s N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	177.06	200.02	1400	426	4.4	4.6	0.78	0.84	2.1	曲げ
		2	175.87	200.87	1400	427	4.1	4.1	0.84	0.71	1.9	曲げ
		3	175.67	200.81	1400	433	4.7	4.7	0.86	1.25	2.9	曲げ
		4	175.8	200.49	1400	419	4.5	4.5	0.86	1.23	1.9	曲げ
		5	175.88	200.86	1400	427	4.5	4.5	0.85	1.08	2.3	曲げ
		6	176.03	200.64	1400	416	4.4	4.5	0.84	0.97	2.8	曲げ
		7	175.64	200.02	1400	425	4.4	4.5	0.80	1.03	2.0	曲げ
		8	175.94	200.97	1400	430	4.4	4.6	0.84	1.23	2.9	曲げ
					平均値	425	4.4	4.5	0.83	1.04	2.4	
					標準偏差	5.4	0.2	0.2	0.03	0.20	0.5	

※TGH法

※TGH法

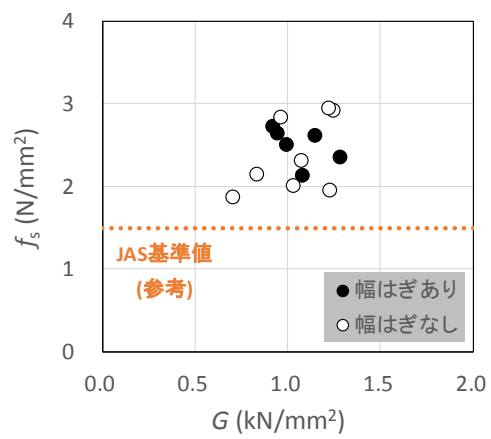
※実験

面内せん断試験体（弱軸）

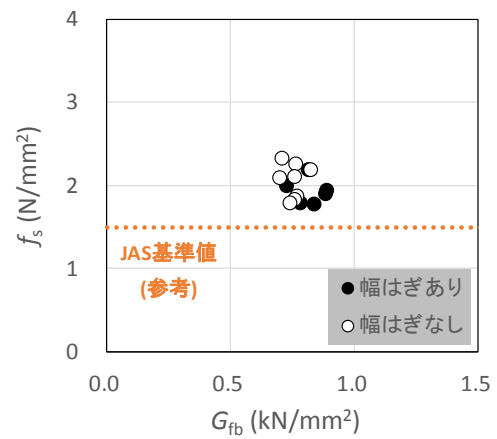
層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_v kN/mm ²	純曲げヤング係数 E_{ob} kN/mm ²	せん断弾性係数 G_b kN/mm ²	せん断強さ f_s N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	176.78	199.82	1400	419	3.0	2.8	0.77	1.9	曲げ
		2	176.78	200.34	1400	427	3.2	3.2	0.77	2.2	曲げ
		3	176.73	199.93	1400	418	3.1	3.4	0.71	2.3	曲げ
		4	176.7	199.92	1400	408	3.4	3.4	0.71	2.1	曲げ
		5	176.4	199.92	1400	418	2.9	2.8	0.76	1.8	曲げ
		6	176.62	199.95	1400	414	3.2	3.4	0.75	1.8	曲げ
		7	176.71	199.87	1400	417	3.2	3.1	0.83	2.2	曲げ
		8	176.8	200.04	1400	411	3.1	3.0	0.76	2.1	曲げ
					平均値	416	3.1	3.1	0.76	2.0	
					標準偏差	5.6	0.1	0.2	0.04	0.2	

※TGH法

※TGH法



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 25 せん断弾性係数とせん断強さの関係

2. 6 短柱縦圧縮試験

面内せん断試験体の予備試験体から、短柱縦圧縮試験体を採取した。このとき、最外層ラミナの繊維方向が長さ方向と同じ試験体を強軸、直交する試験体を弱軸とし、それぞれ4体ずつを試験体とした。

試験は実大圧縮試験機(前川試験機製作所、A-200-B1、容量 2000kN)を用いて、手動加力で実施した。試験体長さは、短辺の5倍の875mmとした。変位については、試験体中央部の4面にCDP-50(東京測器研究所、容量 50mm)を取り付け、標点間距離 220mm で計測した。最大荷重から縦圧縮強さ(σ_c)を、4面の変位の平均値を用いて縦圧縮ヤング係数(E_c)を求めた。図 26 に短柱縦圧縮試験の設置図を示し、図 27 に試験風景、図 28 に幅はぎあり試験体の破壊例、図 29 に幅はぎなし試験体の破壊例を示す。また、試験結果を表 11 及び表 12 に示す。

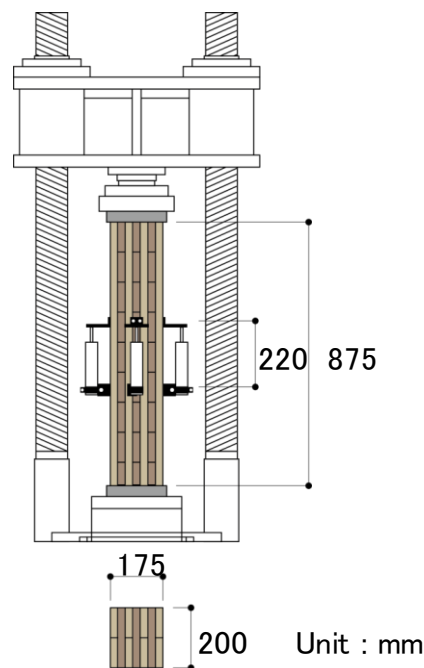


図 26 短柱縦圧縮試験 設置図 (強軸)



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 27 試験風景

破壊形態は、全試験体で圧縮破壊を示した。強軸試験体と弱軸試験体の典型的な破壊例を図 30 に示す(幅はぎあり試験体)。強軸試験体は、強軸ラミナのフィンガージョイント及びその周辺にコンプレッションフェラーが生じる試験体が多く観察された。一方、弱軸試験体は、弱軸ラミナには破壊が認められず、内層の強軸ラミナにコンプレッションフェラーが生じる試験体が多く見られた。また、幅はぎなし試験体の弱軸では、これに加えて接着層に沿った破壊も多く観察された。

今回の条件は短柱圧縮となるが、加力に伴う変形(加力直交方向の変形)が非常に大きく、その傾向は強軸試験体より弱軸試験体、幅はぎあり試験体より幅はぎなし試験体で顕著であった(図 28、図 29)。

図 31 に縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強さの関係を示す。CLT の縦圧縮強さの基準値は存在しないため、既存材料の JAS 基準値との比較を行うと、無等級製材の縦圧縮強さ 17.7N/mm^2 に対しては、強軸試験体の全てがこれを上回った。また、E55-F200 集成材の縦圧縮強さ 13.3N/mm^2 に対しては、弱軸試験体を含む全試験体で上回った。



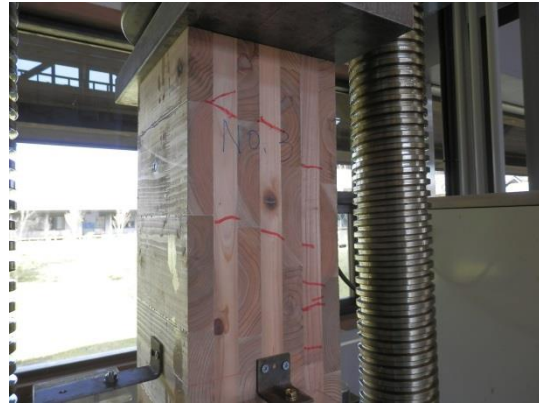
図 28 幅はぎあり試験体の破壊例



図 29 幅はぎなし試験体の破壊例



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 30 強軸試験体と弱軸試験体の典型的な破壊例(幅はぎあり試験体)

表 11 幅はぎあり試験体の短柱縦圧縮試験結果

縦圧縮試験体 (強軸)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_{tr} kN/mm ²	縦圧縮ヤング係数 E_c kN/mm ²	縦圧縮強さ σ_c N/mm ²	破壊形態
7	強軸	1	200	176.17	875	423	4.1	3.7	20.2	圧縮
		2	200	175.89	875	405	3.5	3.3	17.9	圧縮
		3	200	176.02	875	425	4.2	4.0	19.9	圧縮
		4	200	175.99	875	415	3.7	3.4	17.7	圧縮
					平均値	417	3.8	3.6	18.9	
					標準偏差	9.0	0.3	0.3	1.3	
					K (n=4)	2.681	2.681	2.681	2.681	
					5%下限値	393	3.0	2.8	15.4	

縦圧縮試験体 (弱軸)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦振動ヤング係数 E_{tr} kN/mm ²	縦圧縮ヤング係数 E_c kN/mm ²	縦圧縮強さ σ_c N/mm ²	破壊形態
7	弱軸	1	201	175.29	875	416	2.6	2.2	14.2	圧縮
		2	200	175.27	875	422	2.5	1.9	14.3	圧縮
		3	200	175.23	875	420	2.3	2.1	13.4	圧縮
		4	199	175.3	875	421	2.3	1.8	13.8	圧縮
					平均値	420	2.4	2.0	13.9	
					標準偏差	2.6	0.1	0.2	0.4	
					K (n=4)	2.681	2.681	2.681	2.681	
					5%下限値	413	2.0	1.5	12.8	

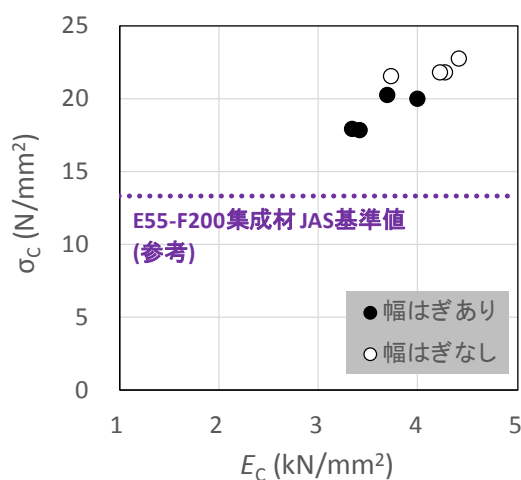
表 12 幅はぎなし試験体の短柱縦圧縮試験結果

縦圧縮試験体（強軸）

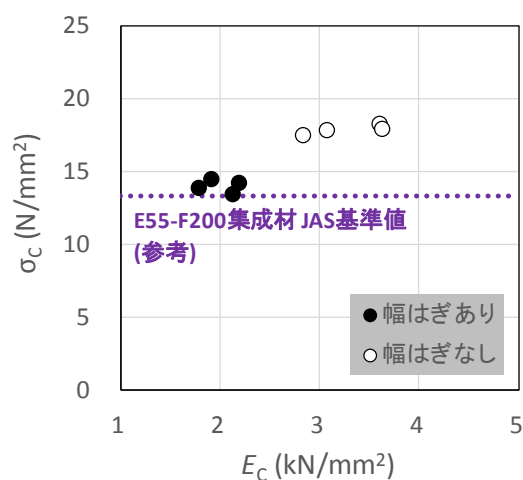
層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦圧縮ヤング係数 E_c kN/mm ²	縦圧縮強さ σ_c N/mm ²	最大荷重 kN	破壊形態
7	強軸	1	175	200	875	425	4.4	22.7	795.0	圧縮
		2					4.3	21.7	760.0	圧縮
		3					4.2	21.7	759.0	圧縮
		4					3.7	21.5	752.0	圧縮
						平均値	4.2	21.9	766.5	
						標準偏差	0.3	0.6	19.3	
						K (n=4)	2.681	2.681	2.681	
						5% 下限値	3.4	20.4	714.7	

縦圧縮試験体（弱軸）

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 ρ kg/m ³	縦圧縮ヤング係数 E_c kN/mm ²	縦圧縮強さ σ_c N/mm ²	最大荷重 kN	破壊形態
7	弱軸	1	175	200	875	425	3.6	18.2	636.0	圧縮
		2					3.6	17.9	625.0	圧縮
		3					3.1	17.7	621.0	圧縮
		4					2.8	17.4	608.0	圧縮
						平均値	3.3	17.8	622.5	
						標準偏差	0.4	0.3	11.6	
						K (n=4)	2.681	2.681	2.681	
						5% 下限値	2.2	16.9	591.5	



(a) 強軸



(b) 弱軸

図 31 縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強さの関係

(注) 参考の JAS 基準値は、E55-F200 集成材

2. 7 文献

- 1) 北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場：平成 26 年度受託研究報告書、道産 CLT の材料性能と接合性能の検討、1-91(2015)
- 2) 公益財団法人日本合板検査会：平成 25 年度地域木材産業等連携支援事業 直交集成板の適正製造基準、1-45(2014)

3 長期性能

3. 1 面外曲げクリープ試験

3. 1. 1 はじめに

宮崎県産スギを用いて製造された CLT のクリープ特性を明らかにするために、面外曲げクリープ試験(以下、クリープ試験)を実施した。この場合、試験は建築基準法 37 条に関する技術的基準(平成 12 年建設省告示 1446 号)が定めるクリープ評価法¹⁾(以下、告示法)にしたがって実施した。また、試験における負荷荷重を決定するために、同一パネルから切り出したマッチング試験体を用いて、事前に短期強度試験(曲げ試験等)を実施した。

3. 1. 2 試験体

試験用 CLT のラミナには全て宮崎県産スギを供試し、クリープ試験、短期強度試験とも同一仕様とした。具体的には、ラミナ構成を異等級構成 Mx60、B 種構成(曲げヤング係数の上限値を定めたラミナのみを使用した CLT)とし、表層ラミナの繊維方向が長さ方向となる強軸仕様とした。接着剤には、ラミナの積層方向、幅方向、縦継ぎともに水性高分子イソシアネート系接着剤を用いた。ただし、幅方向については、冒頭でも述べたように、実用上の比較をするために接着しない場合についても検討した(以下、接着する場合を「幅はざあり」、接着しない場合を「幅はざなし」と記す)。試験体の層構成は 7 層 7 プライとし、幅はざありでは 2 枚の CLT パネル(短辺 2000mm、長辺 4000mm)から 10 体、幅はざなしでは 1 枚の CLT パネル(短辺 2232mm、長辺 4030 mm)から 10 体を採取した(何れもクリープ試験用、短期強度試験用各 5 体)。

3. 1. 3 短期強度試験

短期強度試験では、まず動的試験による非破壊指標として、縦振動ヤング係数(以下、 E_v)、TGH 法による曲げヤング係数(以下、 E_{ob})、同法によるせん断弾性係数(以下、 G_{fb})を測定し、続いて、曲げ試験を実施して最大荷重(以下、 P_{max})、曲げ強さ(以下、 f_b)、並びに見かけの曲げヤング係数(以下、 E_m)を得た。

これらのうち曲げ試験(P_{max} 、 f_b 、 E_m を求めるための試験)は、実大強度試験機(東京衡機、WU-1000・TK21、容量 1000kN)を用いて実施した。この場合、試験条件は、試験体幅を除き、「直交集成板の日本農林規格」に従った(以下、JAS 規格)。具体的には、試験体長さを 4025mm(試験体厚さ 175mm の 23 倍)、スパンを 3675mm(試験体厚さ 175mm の 21 倍)とし、3 等分点 4 点荷重で加力した(図 1 参照)。なお、試験体幅は、JAS 規格に従えば、300mm であるが、クリープ試験条件と併せて、ここでは 120mm 幅とした(クリープ試験装置の仕様による)。また、変位(たわみ)は、試験体中央下部に変位計(東京測器研究所、DP-1000C、容量 1000mm)を設置し、1 秒間に 1 回の割合で測定した。このとき、加力開始から最大荷重に至るまでの時間は 2~3 分であった。

以上の試験で得られた P_{max} から以下に示す(1)式を用いて f_b を算出し、比例域における荷重とスパン中央のたわみの関係 $\Delta P / \Delta \delta$ から(2)式を用いて E_m を算出した。

$$f_b = \frac{3p_{max} \times s}{bh^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$E_m = \frac{\Delta p \times s(3L^2 - 4s^2)}{\Delta \delta \times 4bh^3} \dots\dots\dots (2)$$

- ここで、 P_{max} : 最大荷重
 L : スパン
 s : 支点から荷重点までの距離
 b : 試験体の幅
 h : 試験体の厚さ
 Δp : 最大荷重の 10～40%までの荷重増分
 $\Delta \delta$: Δp に対応するスパン中央たわみ δ の増分

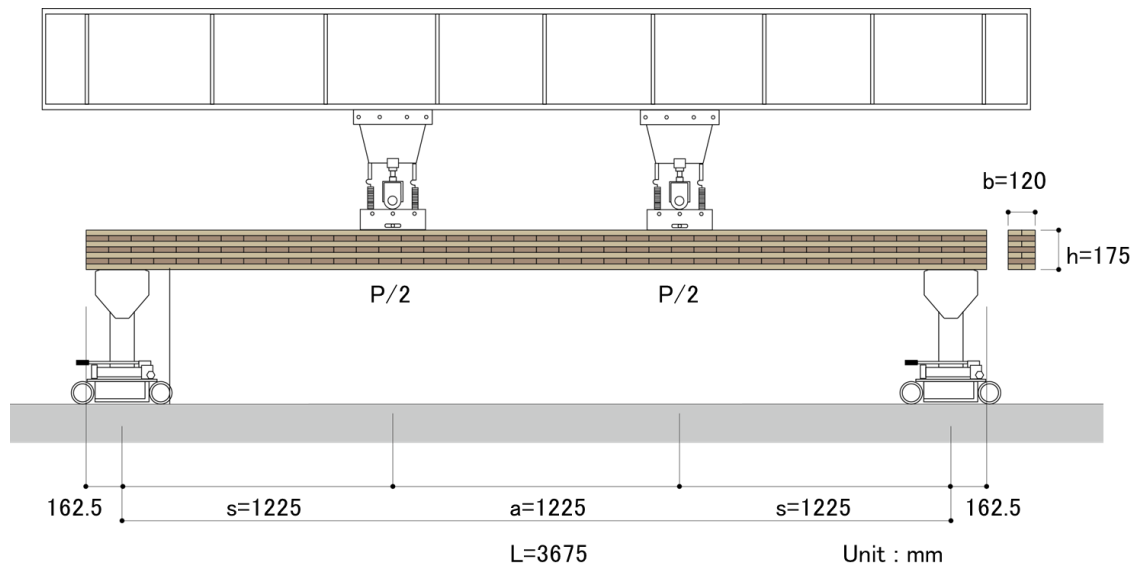


図 1 面外曲げ試験条件

表 1 に幅はぎあり CLT、表 2 に幅はぎなし CLT の密度、含水率(全乾法による)、並びに短期強度試験結果(E_{fr} 、 E_{ofb} 、 G_{fb} 、 f_b 、 P_{max} 、 E_m)を示す。また、図 2 に E_m と E_{fr} 及び E_{ofb} の関係を示し、図 3 に E_{fr} と E_{ofb} の関係を示す。なお、ここで示す短期強度試験体は、後述するクリープ試験体のマッチング試験体であり、すなわち、同一パネルの中で隣り合う部分から切り出したものである(例えば、表 1 の A1-2 は後述する表 3 の A1-1 に対応する)。

表 1、2 及び図 2 を見ると、明確な $E_m > E_{fr}$ の傾向と $E_{ofb} > E_m$ の傾向が看取される。これらのうち、前者($E_m > E_{fr}$)については CLT の層構成上の特性、すなわち外層ラミナ(2 枚)と内層ラミナ(5 枚)のヤング係数の大きな差異(外層は M60B、内層は M30B)から容易に推察可能な結果と言える。一方、後者($E_{ofb} > E_m$)については、 E_{ofb} 、 E_m とともに曲げヤング係数であり、その違いは動的挙動と静的挙動のみであることから、一般に言われる動的弾性率 > 静的弾性率(スギでは 5%程度の差異²⁾)の考え方がそのまま適用されると捉えて良いだろう。

表 1 幅はぎあり CLT の短期強度試験結果(クリープ試験のマッチング試験体)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 kg/m ³	含水率 %	E_{fr} kN/mm ²	面外方向				
									E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²	f_b N/mm ²	P_{max} kN	E_m kN/mm ²
7	強軸	A1-2	119.63	176.85	4006	421	12.8	3.80	4.95	0.25	23.8	24.2	4.83
		A2-2	119.23	176.65	4004	410	11.8	4.21	5.52	0.24	22.1	22.4	4.91
		A3-2	119.97	176.85	4006	414	11.3	4.15	5.66	0.24	19.5	19.9	4.86
		A4-2	120.33	175.74	4005	422	13.3	4.01	5.52	0.29	20.6	20.8	4.79
		A5-2	120.26	175.33	4005	425	13.1	4.04	5.61	0.30	21.6	21.7	5.00
		平均値	119.88	176.28	4005	418	12.5	4.04	5.45	0.26	21.5	21.8	4.88
		標準偏差	0.46	0.70	0.84	6.10	0.86	0.16	0.29	0.03	1.62	1.64	0.08
		変動係数	0.4%	0.40%	0.02%	1.5%	6.9%	3.9%	5.3%	11.2%	7.5%	7.5%	1.7%

表 2 幅はぎなし CLT の短期強度試験結果(クリープ試験のマッチング試験体)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 kg/m ³	含水率 %	E_{fr} kN/mm ²	面外方向				
									E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²	f_b N/mm ²	P_{max} kN	E_m kN/mm ²
7	強軸	N1-2	120.00	175.95	4001	432	10.4	4.54	5.65	0.32	17.6	17.8	5.34
		N2-2	119.73	176.05	4001	433	10.9	4.55	5.67	0.32	20.3	20.5	5.27
		N3-2	119.66	175.98	4001	433	10.4	4.11	5.75	0.31	15.3	15.4	4.90
		N4-2	119.85	175.99	4001	428	10.7	4.38	5.16	0.32	20.0	20.2	5.05
		N5-2	119.94	175.95	4000	431	10.5	4.52	5.49	0.32	21.5	21.7	5.34
		平均値	119.84	175.98	4001	432	10.6	4.42	5.54	0.32	18.9	19.1	5.18
		標準偏差	0.14	0.04	0.45	2.29	0.22	0.19	0.24	0.01	2.48	2.52	0.20
		変動係数	0.1%	0.02%	0.01%	0.5%	2.1%	4.2%	4.2%	1.8%	13.1%	13.2%	3.8%

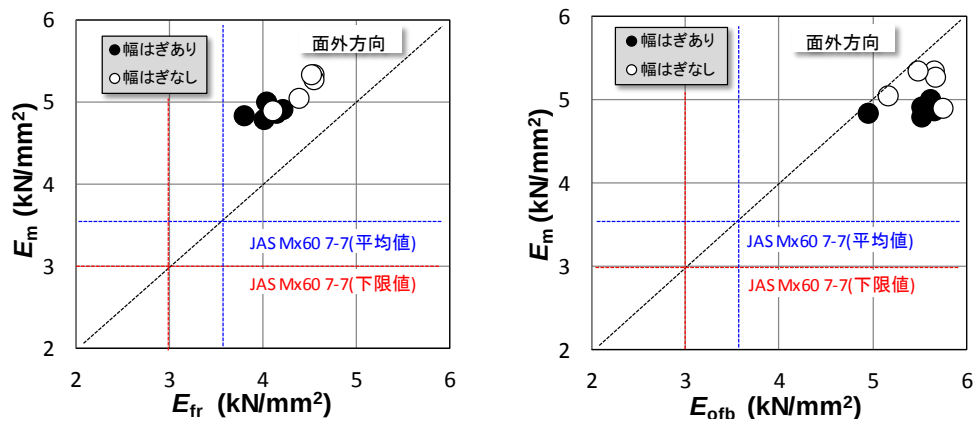


図 2 見かけの曲げヤング係数(E_m)と縦振動ヤング係数(E_{fr})及び TGH 法による曲げヤング係数(E_{ofb})の関係

表 1、2 及び図 3 を見ると、明確な $E_{ofb} > E_{fr}$ の傾向が看取される。この関係においても主として前述した $E_m > E_{fr}$ と同様の説明、すなわち CLT の層構成上の特性による影響が主体と考えられる(前者がたわみ振動、後者が縦振動)。

ここで、幅はぎありとなしでは、全体に「幅はぎなし $>$ 幅はぎあり」の傾向を示している。ただし、この結果はラミナの選別結果に依存する可能性もある。また、試験体数も少なく有意差が得られるほどの差異ではない。

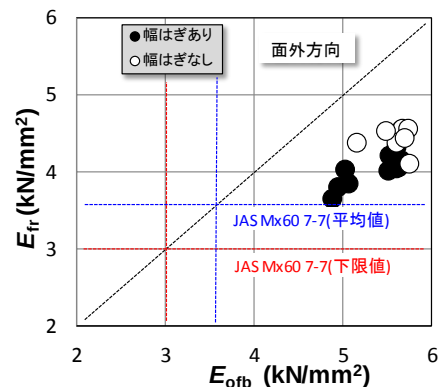


図 3 E_{fr} と E_{ofb} の関係

図4に f_b と E_m 及び E_{ofb} の関係を示す。同図を見ると、何れも相関性は殆ど認められない。また、図には示していないが、 f_b と E_{fr} の関係も同様であった。本研究では試験体数も少なく、結論的な表現は差し控えるべきであるが、現状ではこの種の非破壊指標と強度の関連からクリープ試験における荷重レベルを決定することは困難な様である。一方、同図、及び表1、2から、 f_b についても幅はぎありと幅はぎなしの値を比較すると、前述した非破壊指標とは逆に「幅はぎあり>幅はぎなし」の傾向を示している(平均値ではそれぞれ 21.5N/mm^2 、 18.9N/mm^2)。ただし、同図にも示すように、何れも直交集成板の日本農林規格(以下、JAS規格)に示された曲げ強さの基準値 8.2N/mm^2 を遙かに上回っていることから、この条件下(7層7プライ、強軸方向)では、幅はぎありと幅はぎなしのどちらでも曲げ強さの面から実用上の支障を来すことはないと考えて良い。

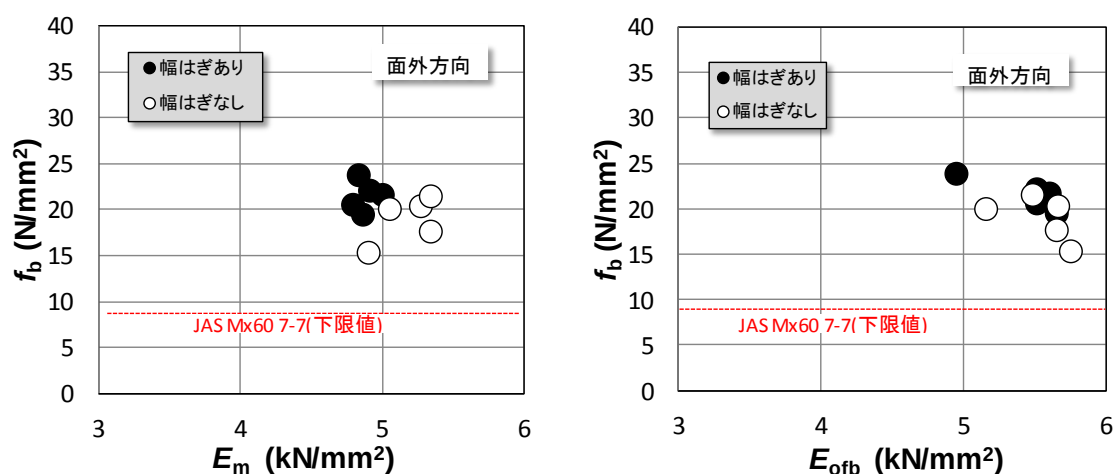


図4 曲げ強さ(f_b)と E_m 及び E_{ofb} の関係



幅はぎありCLT



幅はぎなしCLT

図5 破壊形態の一例(クリープ短期試験体)

3. 1. 4 クリープ試験

クリープ試験条件を図 6、同試験の状況を図 7 に示す。試験は、幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT の各 5 体の試験体に対し、短期強度試験と同一の条件、すなわちスパン 3675 mm、荷重点間 1225 mm の 3 等分点 4 点荷重の条件で実施中である。この場合、変位は、図 6 に示す試験体中央上部の変位計(東京測器研究所、SDP-100C、容量 100mm)で中央たわみを測定するとともに、梁背方向の収縮や支点めり込みの影響を除去するため、2 カ所の支点変位も測定した(東京測器研究所、CDP-50、容量 50mm)。なお、評価対象としての全たわみは、支点収縮量の平均値を中央たわみから差し引いた値とした。

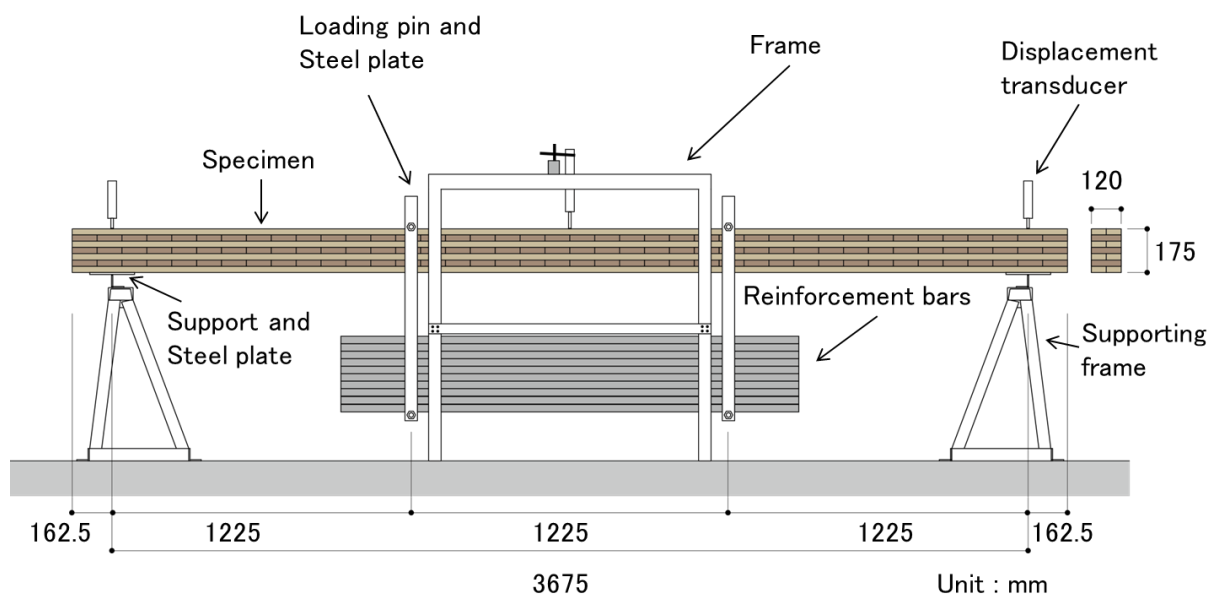


図 6 面外曲げクリープ試験条件

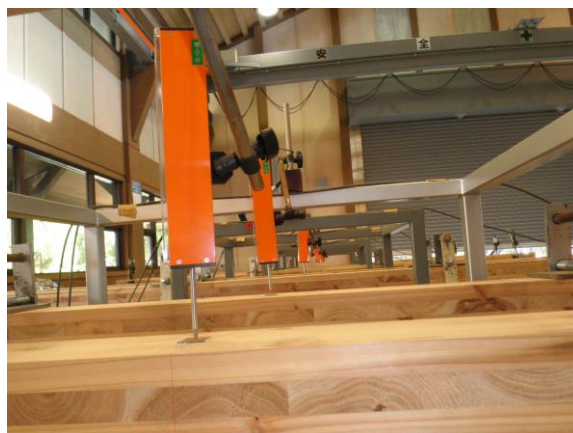


図 7 面外曲げクリープ試験の状況

表3に幅はぎありクリープ試験体、表4に幅はぎなしクリープ試験体の短期性能(E_{fr} 、 E_{ofb} 、 G_{fb})を示す。各値をみると、平均的には前述したマッチング試験体と同様の値を示しているが、個別にみると、必ずしも同様とは言えない(表 1、2 も併せて参照)。これは、木材が生物資源であるが故に得られた結果と考えられるが、いずれにせよ、この結果は、この種の試験において正確な荷重レベルを予測することが如何に難しいかを示している。この様に、マッチング試験体とクリープ試験体と同じ様な力学的性能を有するものとは言えないが、ここでは同一と仮定して検討を進める。

表3 幅はぎあり CLT の短期性能(クリープ試験体)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 kg/m ³	E_{fr} kN/mm ²	面外方向		
								E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²	E_{ofb}/G_{fb}
7	強軸	A1-1	119.96	176.78	4006	415	3.85	5.06	0.25	20.6
		A2-1	119.64	176.93	4006	416	3.65	4.88	0.25	19.7
		A3-1	120.38	177.06	4006	420	4.31	5.61	0.25	22.5
		A4-1	120.55	175.61	4006	427	4.06	5.64	0.29	19.7
		A5-1	119.83	175.41	4004	423	4.02	5.03	0.31	16.3
		平均値	120.07	176.36	4006	420	3.98	5.24	0.27	19.77
		標準偏差	0.38	0.78	0.89	5.00	0.25	0.35	0.03	2.22
		変動係数	0.3%	0.44%	0.02%	1.2%	6.2%	6.7%	10.5%	11.2%

(注) E_{fr} :縦振動ヤング係数、 E_{ofb} :TGH 法による曲げヤング係数、 G_{fb} :TGH 法によるせん断弾性係数、 f_b :曲げ強さ、 E_m :曲げヤング係数

表4 幅はぎなし CLT の短期性能(クリープ試験体)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 kg/m ³	E_{fr} kN/mm ²	面外方向		
								E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²	E_{ofb}/G_{fb}
7	強軸	N1-1	120.44	176.02	4001	428	4.84	6.06	0.31	19.9
		N2-1	120.03	176.10	4001	424	4.78	6.20	0.30	20.7
		N3-1	119.94	175.85	4001	434	4.56	5.74	0.31	18.4
		N4-1	119.80	176.02	4000	428	4.38	5.60	0.33	17.1
		N5-1	119.77	176.01	4000	434	4.44	5.70	0.31	18.2
		平均値	120.00	176.00	4001	429	4.60	5.86	0.31	18.82
		標準偏差	0.27	0.09	0.55	4.50	0.20	0.26	0.01	1.43
		変動係数	0.2%	0.05%	0.01%	1.0%	4.4%	4.4%	3.4%	7.6%

荷重レベルは、以下のように算出した。

告示法では、荷重レベルは、以下の式により決定することとしている⁴⁾。

$$\text{荷重レベル} = (2/3) \times K1 \times K2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、K1: 含水率の強度調整係数

K2: 荷重継続時間の強度調整係数

一方、構造用集成材に関する既往の含水率の強度調整係数³⁾(湿潤環境で 7/8、乾燥環境で 1.0)を引用すれば、荷重レベルは以下のとおりとなり、使用環境を湿潤条件とした場合には 0.32、乾燥環境とした場合には 0.37 となる。

$$\text{荷重レベル} = (2/3) \times (7/8) \times (1.1/2) = 0.32 \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{荷重レベル} = (2/3) \times 1.0 \times (1.1/2) = 0.37 \dots \dots \dots (5)$$

今回、安全側評価となるように荷重レベルを設定すれば、負荷荷重は表 1 と表 2 に示された各マッチング試験体の $P_{\max}$ から、以下の様に算出される。

(a) 幅はぎあり CLT

$$\text{A1-1: } P_{\max} 24.2\text{kN} \times 0.37 = 8.954\text{kN}$$

$$\text{A2-1: } P_{\max} 22.4\text{kN} \times 0.37 = 8.288\text{kN}$$

$$\text{A3-1: } P_{\max} 19.9\text{kN} \times 0.37 = 7.363\text{kN}$$

$$\text{A4-1: } P_{\max} 20.8\text{kN} \times 0.37 = 7.696\text{kN}$$

$$\text{A5-1: } P_{\max} 21.7\text{kN} \times 0.37 = 8.029\text{kN}$$

(b) 幅はぎなし CLT

$$\text{N1-1: } P_{\max} 17.8\text{kN} \times 0.37 = 6.586\text{kN}$$

$$\text{N2-1: } P_{\max} 20.5\text{kN} \times 0.37 = 7.585\text{kN}$$

$$\text{N3-1: } P_{\max} 15.4\text{kN} \times 0.37 = 5.698\text{kN}$$

$$\text{N4-1: } P_{\max} 20.2\text{kN} \times 0.37 = 7.474\text{kN}$$

$$\text{N5-1: } P_{\max} 21.7\text{kN} \times 0.37 = 8.029\text{kN}$$

ここでは、これらの荷重を各試験体に負荷した。この場合、荷重の負荷方法は、図 6 に示したように、鉄筋による実荷重によった。また、試験環境は温湿度無調整とした。試験は、2015 年 12 月 3 日に開始し、現在も継続中である。

図 8 に全たわみ、図 9 に相対クリープ(初期たわみに対するその後のたわみの比)、図 10 に含水率(高周波含水率計による値)、及び図 11 に温度と相対湿度の変動を示す。なお、これらの図は、負荷 2 カ月経過時点(2015 年 12 月 3 日～2016 年 2 月 3 日)までの傾向を示している。

図 8、9 を見ると、概ね製材と同様に負荷初期の急増(1 次クリープ)とその後の安定化(2 次クリープ)が認められるが、幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT では、比較的明確な傾向の

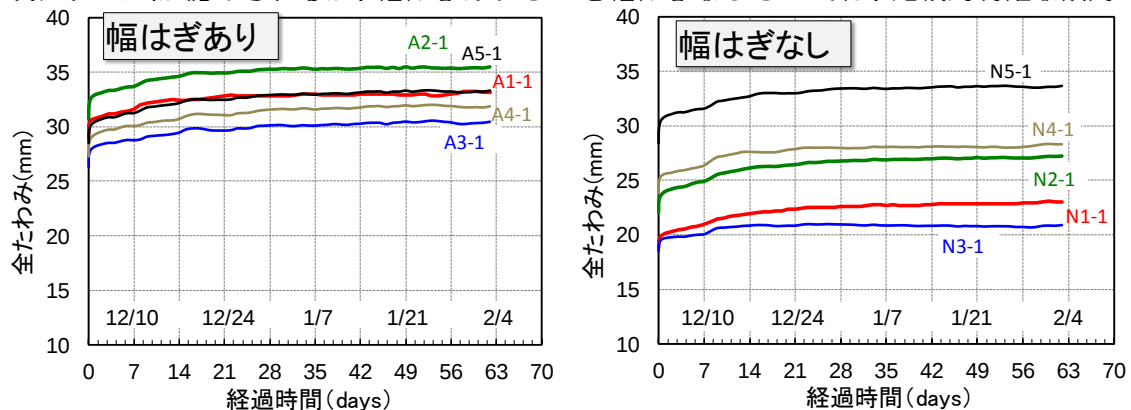


図 8 全たわみの変動

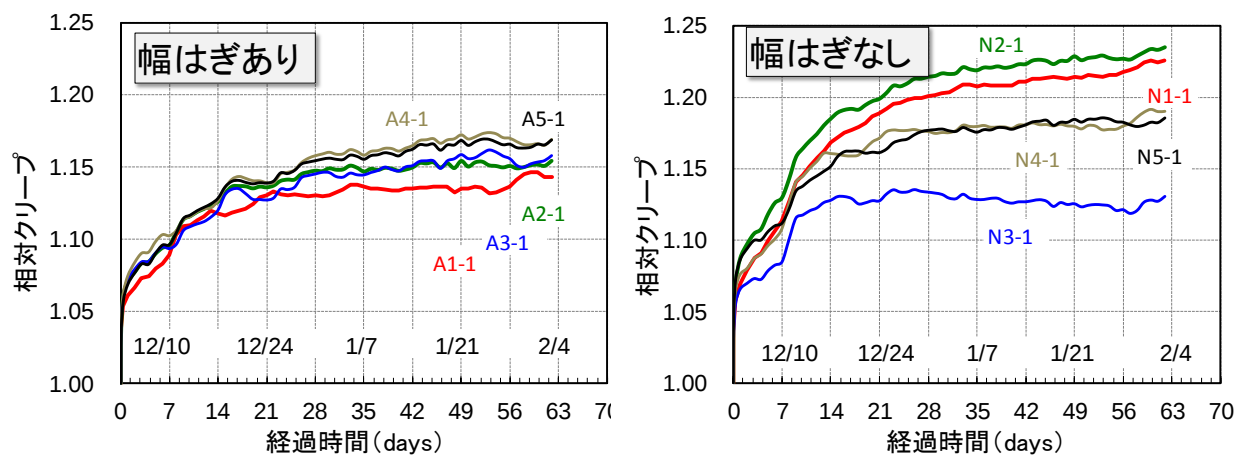


図9 相対クリープの変動

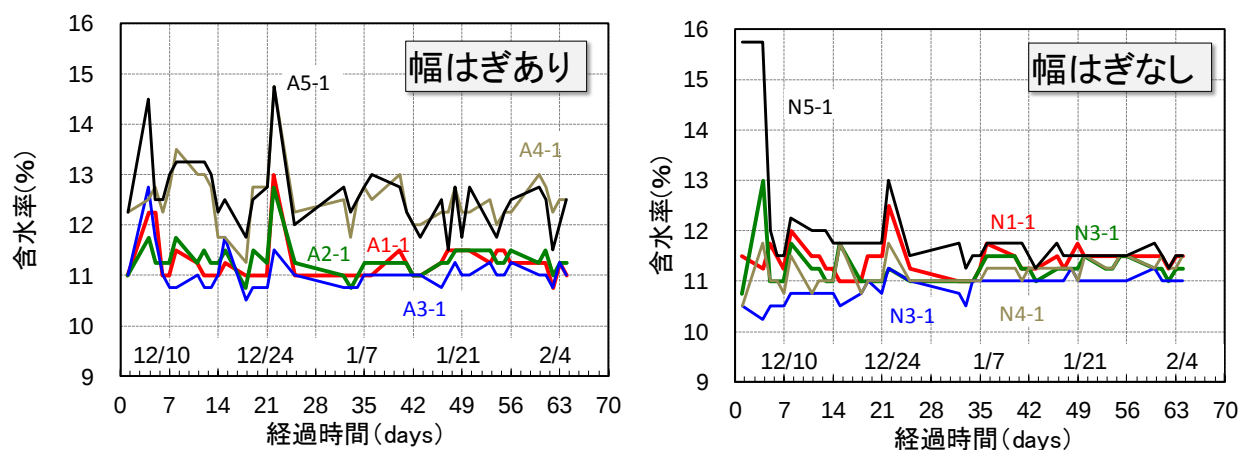


図10 含水率の変動

差異が認められる。具体的には、前者の場合、個々の試験体による差異があまり認められないのに対して、後者では著しい差異が認められる。この差異は、図8右図の初期変位を見れば、試験体のヤング係数(表3、4参照)に依存しているとも考えられるが、さらに、同変位の影響をアジャストした相対クリープ(図9参照)でも著しいことを考慮すれば、試験体のヤング係数よりも、製造上の差異、すなわち、「幅はぎありとなし」そのものが関与している可能性が高い。ただし、現時点では未だ試験期間も短いので、今後も注意深く傾向を見た上で結論づけたい。

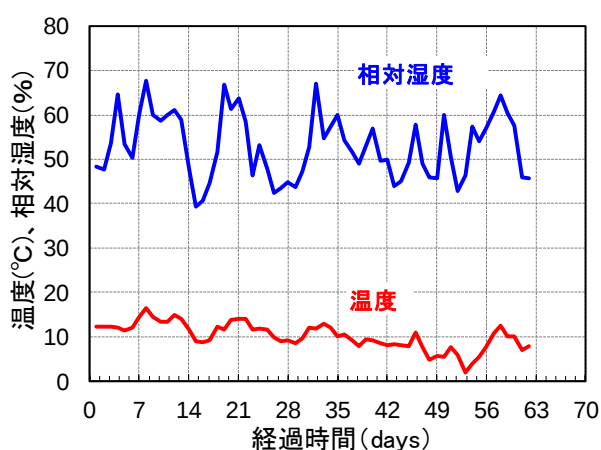


図11 温度と相対湿度の変動

図 10 における含水率の変動を見ると、当然のことながら図 11 における相対湿度の変動に依存している。また、図 8、9 におけるクリープの増加と回復は、多少の傾向の差異はあるものの、製材や集成材と同様に概ね図 11 における相対湿度の低下と上昇に対応している⁵⁾。

次に、以下の 2 つの方法により、荷重継続時間 50 年に対するクリープ調整係数 (以下、クリープ調整係数) の予測を行う。

(a) Power 則

$$\log \delta_c(t) = a \log t + b \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\delta_c(t)$: 負荷 t 日経過後のクリープたわみ

a 、 b : 定数

(6)式で得られた定数 a と b を変換し、次式を得る。

$$\delta_c(t) = At^N \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 A : $b = \log A$ により得られる定数。

N : 定数、ただし、 $a = N$

(7)式をベースとした次式により、クリープ調整係数を得る。

$$\delta_{50}/\delta_0 = 1 + ct_{50}^N \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 δ_{50}/δ_0 : クリープ調整係数(Power 則)

δ_{50} : 50 年後の予測たわみ(Power 則)

δ_0 : 初期たわみ

c : A/δ_0

t_{50} : 50 年(18250 日)

(b) 告示法(平成 12 年建設省告示 1446 号)

まず、経過時間 t 分ごとに測定されたたわみ δ_t に対する初期たわみ δ_0 の比(クリープたわみ比 K_t)を計算する。次に、クリープたわみ比 K_t の常用対数 $\log_{10}K_t$ と経過時間の常用対数 $\log_{10}t$ について線形回帰分析を行い、回帰直線の切片および傾きを算出する。

$$K_t = \delta_0 / \delta_t$$

$$\log_{10}K_t = e + f \cdot \log_{10}t \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 K_t : t 分後のたわみに対する初期たわみの比(相対クリープの逆数)

δ_t : t 分後のたわみ(mm)

e : $\log_{10}K_t$ と $\log_{10}t$ の回帰直線の切片

f : $\log_{10}K_t$ と $\log_{10}t$ の回帰直線の傾き

(9)式で得られた定数 e と f を次式に代入し、荷重継続時間 50 年に対するクリープたわみ比 K_{50y} を算出する。

$$K_{50y} = 10^e \times t_{50y}^f = 10^e \times 26280000^f \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 t_{50y} : 50 年分の時間 t で 26280000 分

K_{50y} : 荷重継続時間 50 年に対するクリープたわみ比

次に、(10)式で得られた荷重継続時間 50 年に対するクリープたわみ比 K_{50y} の逆数により、クリープ調整係数を得る。

$$\delta_{50y}/\delta_0 = 1/K_{50y} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 δ_{50y}/δ_0 : クリープ調整係数(告示法)

δ_{50y} : 50 年後の予測たわみ(告示法)

図 12 にクリープたわみの実測値と全期間(負荷 1 分以降)の同値から求めた Power 則及び告示法による相対クリープの予測値(各時点におけるクリープ調整係数)との関係を示す(それぞれ、(8)式、(11)式参照)。同図を見ると、幅はぎありに対する告示法の当てはまりが比較的良いものの、それ以外では、Power 則、告示法の何れも、曲線の後半部で実測値との乖離が認められる。木質材料を対象としたこれまでの研究においても、全期間の実測値による解析では同様の結果が得られており⁶⁾、24 時間以降の実測値を対象として解析することにより、安全側、且つ適合性の高い予測値が得られている。

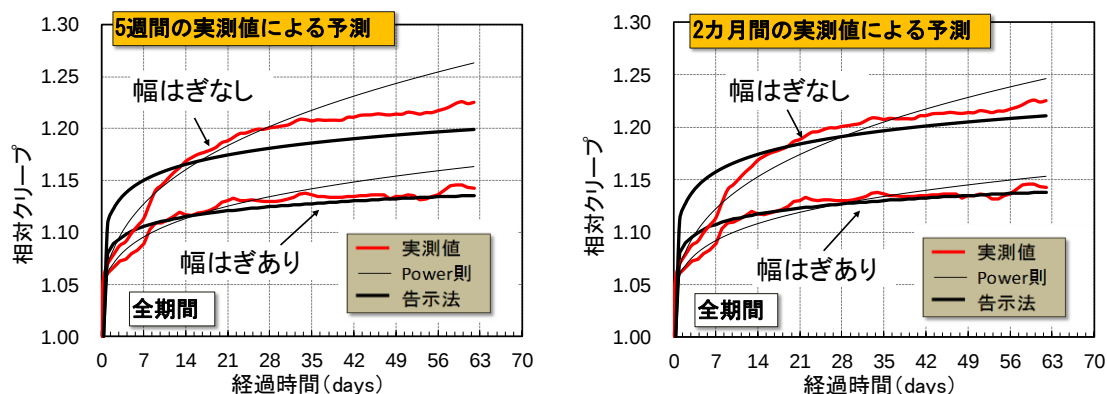


図 12 曲げクリープたわみの実測値と予測値との関係(全期間)

(注 1) 予測値は、各経過時間におけるクリープ調整係数

(注 2) 負荷 1 分以降の実測値による予測

そこで、この例を参考に、負荷 24 時間以降の実測値から Power 則及び告示法を用いて相対クリープの予測値を算出し、実測値との関係を求めた結果を図 13 示す。同図をみると、幅はぎの有無にかかわらず、明らかに図 12 に示した全期間の実測値からの予測よりも相対クリープが精度良く予測できる結果となっている。

測定期間(5 週間、2 カ月)で比較すると、5 週間の実測値による解析では(図 12、13 の左図)、全体に予測値が実測値から安全側に乖離する傾向を示しており、特に Power 則ではこの傾向が著しい。このクリープ試験期間を 5 週間以上とする規程は、平成 12 年建設省告示 1446 号に示されているが、少なくとも今回の結果を考慮すれば、5 週間の実測値からクリープ調

調整係数を求めることは推定精度の面から推奨すべきではない。今後、データ蓄積を待った上で適正な試験期間を検討すべきであろう。

解析法(Power 則、告示法)で比較すると、各図に示される様に後者の適合性が高い結果となっており、Power 則では、全体に曲線の後半部でやや安全側に離れる傾向が看取される。

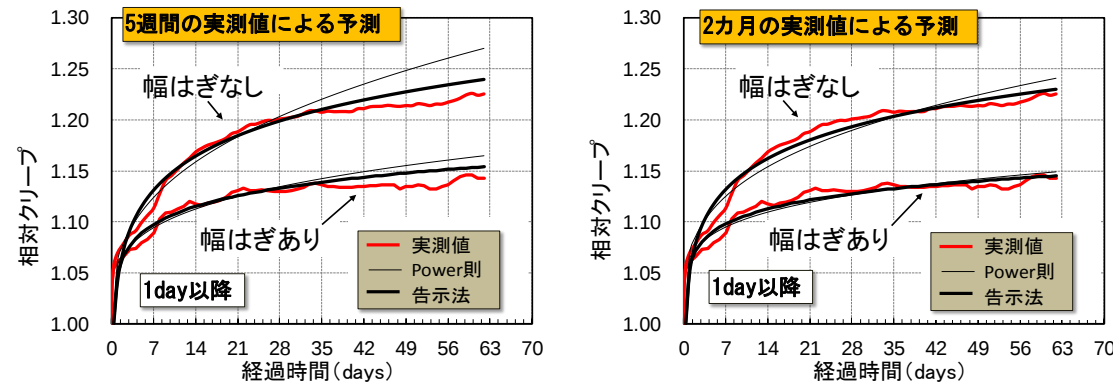


図 13 曲げクリープたわみの実測値と予測値との関係(負荷 24 時間以降)
(注) 負荷 24 時間以降の実測値による予測

以上の結果を踏まえて、表 5 に Power 則と告示法で計算した全試験体のクリープ調整係数を示す。同表から、全体に、幅はぎなし>幅はぎあり、Power 則>告示法、5 週間>2 カ月(算定対象期間)の傾向が認められる。特に、幅はぎなし CLT では、試験期間 5 週間の実測値から Power 則を用いてクリープ調整係数を予測した場合、変形増大係数の 2(平成 12 年建設省告示 1459 号)を大きく上回る試験体も見られる。この点で、幅はぎなし CLT に対する幅はぎあり CLT の長期性能上の優位性が認められるが、この結論は、前述した結果からより信頼できる推定精度を確保した上で下すべきであろう。すなわち、クリープ調整係数の推定精度を向上させるには、負荷 24 時間以降の実測値を用いて解析すること、解析法として告示法を用いること、さらには、前述したように試験期間を 5 週間よりも大幅に長くすることが必要と考えられる。

表 5 幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT のクリープ調整係数

幅はぎあり CLT	A1-1		A2-1		A3-1		A4-1		A5-1	
	5週間	2カ月	5週間	2カ月	5週間	2カ月	5週間	2カ月	5週間	2カ月
Power 則	1.71	1.48	1.71	1.51	1.63	1.55	1.74	1.64	1.87	1.69
告示法	1.31	1.28	1.34	1.30	1.32	1.32	1.36	1.35	1.37	1.36

幅はぎなし CLT	N1-1		N2-1		N3-1		N4-1		N5-1	
	5週間	2カ月	5週間	2カ月	5週間	2カ月	5週間	2カ月	5週間	2カ月
Power 則	3.05	2.33	2.52	2.06	1.66	1.34	2.20	1.74	1.84	1.63
告示法	1.58	1.53	1.57	1.52	1.31	1.23	1.46	1.39	1.41	1.37

(注1) 何れも負荷初日(1~500分)の測定データを除外して求めた値

(注2) 5週間、2カ月： 算定対象期間

(注3) 告示法：平成12年建設省告示1446号により定められたクリープ評価法

3. 2 面外曲げクリープ破壊試験 (DOL 試験)

3. 2. 1 はじめに

宮崎県産スギ CLT に対する荷重継続時間が強度に及ぼす影響を検討するために、面外曲げクリープ破壊試験(以下、Duration of Load: DOL 試験)を実施した。この場合、試験は建築基準法 37 条に関する技術的基準(平成 12 年建設省告示 1446 号)が定めるクリープ評価法¹⁾に準じて実施した。また、試験における負荷荷重を決定するために、同一パネルから切り出したマッチング試験体を用いて、事前に短期強度試験(曲げ試験等)を実施した。

3. 2. 2 試験体

CLT のラミナには、クリープ試験と同様に全て宮崎県産スギを供試し、DOL 試験、短期強度試験とも同一仕様とした。具体的には、ラミナ構成を異等級構成 Mx60、B 種構成とし、表層ラミナの繊維方向が長さ方向となる強軸仕様とした。この場合、接着剤には、ラミナの積層方向、幅方向、縦継ぎともに水性高分子イソシアネート系接着剤を用いた。試験体の層構成は 5 層 5 プライ(幅 100mm、厚さ 150mm、長さ 2400 mm)とし、幅はぎありでは 3 枚の CLT パネル(短辺 2000mm、長辺 3000 mm)から 42 体、幅はぎなしでは 2 枚の CLT パネル(短辺 1860mm、長辺 6030 mm)から 42 体を採取した(何れも長期試験用 30 体、短期試験用 12 体)。

3. 2. 3 短期強度試験

短期強度試験においても、クリープ試験と同様に、まず動的試験による非破壊指標として、 E_{fr} 、 E_{ofb} 、 G_{fb} を測定し、その後曲げ試験を実施して P_{max} 、 f_b 、 E_m を求めた。なお、 E_{ofb} と G_{fb} については、面外方向と面内方向の比較も併せて行った。ここで、曲げ実験に使用した試験機は、クリープ試験の短期試験で用いた試験機と同様であるが(3.1.3 項参照)、試験条件は、DOL 試験機の仕様に合わせ、スパンを 2000mm、中央集中荷重とした(図 14 参照)。この場合、変位(たわみ)は、試験体中央下部に変位計(東京測器研究所、DP-1000C、容量 1000mm)を設置し、1 秒間に 1 回の割合で測定した。このとき、加力開始から最大荷重に至るまでの時間は 1～5 分であった。

以上の試験で得られた P_{max} から以下に示す(12)式を用いて f_b を算出し、比例域における荷重とスパン中央のたわみの関係 $\Delta P / \Delta \delta$ から(13)式を用いて E_m を算出した。

$$f_b = \frac{3p_{max} \times L}{2bh^2} \dots \dots \dots (12)$$

$$E_m = \frac{\Delta p L^3}{\Delta \delta \times 4bh^3} \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 P_{max} : 最大荷重

L : スパン

b : 試験体の幅

h : 試験体の厚さ

Δp : 最大荷重の 10～40%までの荷重増分

$\Delta \delta$: Δp に対応するスパン中央たわみ δ の増分

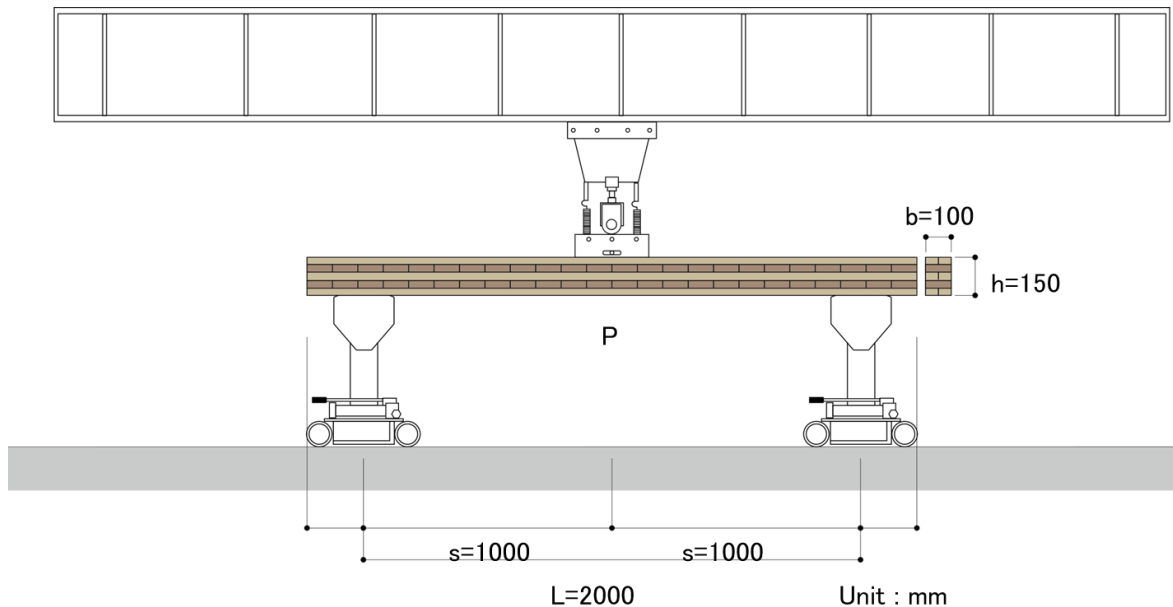


図 14 面外曲げ試験条件

表 6 に幅はぎあり CLT、表 7 に幅はぎなし CLT の密度、含水率(全乾法による)、並びに短期強度試験結果(E_{fr} 、 E_{ofb} 、 G_{fb} 、 f_b 、 P_{max} 、 E_m)を示す。また、図 15 に面内方向と面外方向の E_{ofb} 及び各方向の G_{fb} の関係を示す。なお、ここで評価する短期強度試験体は、後述する DOL 試験体のマッチング試験体であり、同一パネルから切り出したものであるが、クリープ試験の場合とは異なり、DOL 試験体の隣り合う部分から切り出したものではない(これに伴う荷重レベルの算定方法については後述する)。

表 6、7 の各ヤング係数を比較すると、クリープ試験体(7 層 7 プライ)と同様に(表 1、2 参照)、 E_{fr} 、 E_m 、 E_{ofb} の順に大きくなっている(曲げは面外方向、この傾向の要因についての考察は 3.1.3 節を参照)。

図 15 のうち、面内 E_{ofb} と面外 E_{ofb} 及び面内 G_{fb} と面外 G_{fb} の関係を見ると、 E_{ofb} では面外 $>$ 面内を示し G_{fb} では逆に面内 $>$ 面外の傾向を示している。これらのうち、前者については CLT の層構成上の特性、すなわち外層ラミナ(2 枚)と内層ラミナ(5 枚)のヤング係数の大きな差異(外層は M60B、内層は M30B)の影響が面外方向で顕著となることを考慮すれば、容易に推察可能である。一方、後者については、せん断強度は、TR 面が LR、または LT 面の 1/10 程度しかないことを考慮すれば、せん断応力を生じる面に TR 面しか存在しない部分が存在する面外方向の G_{fb} が低いのは当然の結果と言えよう。

ここで、幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT を比較すると、各ヤング係数(E_{fr} 、 E_{ofb} 、 E_m)では大きな差は認められないが、 G_{fb} では、面外方向において、幅はぎなし $>$ 幅はぎありの傾向が認められる。この原因は明確ではないが、少なくとも弱軸面の一体化がせん断剛性の向上効果に寄与することは無い様である。

表 6 幅はぎあり CLT の短期性能 (DOL 試験のマッチング試験体)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 kg/m ³	含水率 %	E_{fr} kN/mm ²	面外方向		面内方向		f_b N/mm ²	E_m kN/mm ²
									E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²	E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²		
5	強軸	A1	100.20	150.88	2398	417	10.9	4.69	6.26	0.27	4.73	0.68	30.0	5.07
		A2	99.15	150.90	2398	415	11.0	4.67	6.18	0.28	4.82	0.57	28.2	5.15
		A3	100.16	150.80	2397	411	10.7	4.80	6.05	0.28	4.77	0.81	31.1	5.24
		A4	100.19	150.95	2398	414	10.7	5.00	6.38	0.28	5.31	0.52	25.1	5.63
		A5	99.56	151.48	2400	414	11.4	4.54	6.06	0.29	4.40	0.64	23.6	5.04
		A6	100.20	151.75	2403	417	11.1	4.20	6.09	0.28	3.97	0.61	25.1	4.96
		A7	99.93	151.44	2403	415	11.2	4.63	6.36	0.29	4.66	0.55	18.7	5.39
		A8	99.85	151.20	2401	428	11.8	4.77	6.43	0.30	4.82	0.59	28.4	5.26
		A9	100.15	150.86	2400	400	11.1	4.46	6.08	0.30	4.57	0.65	24.9	5.09
		A10	100.20	150.68	2400	411	10.8	4.71	6.27	0.32	4.67	0.64	21.5	5.41
		A11	100.24	151.12	2400	418	11.4	4.86	6.89	0.31	4.64	0.65	30.5	5.70
		A12	100.16	151.30	2402	419	11.5	4.86	6.82	0.29	4.82	0.61	28.0	5.27
		平均値	100.00	151.11	2400	415	11.1	4.68	6.32	0.29	4.68	0.63	26.3	5.27
		標準偏差	0.33	0.33	2.00	6.39	0.34	0.21	0.28	0.01	0.31	0.07	3.79	0.23
		変動係数	0.3%	0.22%	0.08%	1.5%	3.0%	4.5%	4.4%	4.5%	6.6%	11.8%	14.4%	4.4%

(注) 含水率: 全乾法による値、 E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{ofb} : TGH法による純曲げヤング係数、 G_{fb} : TGH法によるせん断弾性係数、 f_b : 曲げ強さ、 E_m : 曲げヤング係数

表 7 幅はぎなし CLT の短期性能 (DOL 試験のマッチング試験体)

層数	軸	No.	幅 mm	厚さ mm	材長 mm	密度 kg/m ³	含水率 %	E_{fr} kN/mm ²	面外方向		面内方向		f_b N/mm ²	E_m kN/mm ²
									E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²	E_{ofb} kN/mm ²	G_{fb} kN/mm ²		
5	強軸	N1	99.86	151.30	2400	422	11.1	4.76	6.23	0.36	4.20	0.67	34.5	5.30
		N2	100.35	151.71	2401	426	11.3	4.64	5.55	0.36	4.18	0.70	22.3	5.03
		N3	100.08	151.54	2400	438	11.0	4.95	6.00	0.37	4.58	0.69	33.0	5.61
		N4	100.03	151.54	2400	413	10.4	4.67	6.16	0.35	4.30	0.56	19.7	4.94
		N5	100.13	151.23	2400	423	10.6	4.94	6.32	0.36	4.72	0.66	22.4	5.11
		N6	99.97	151.10	2400	425	10.5	4.97	6.54	0.34	4.52	0.70	26.7	5.44
		N7	100.27	151.57	2400	427	11.1	4.82	6.46	0.34	4.47	0.63	33.1	5.38
		N8	99.83	151.08	2400	430	10.8	4.69	6.66	0.34	4.52	0.62	30.8	5.78
		N9	99.88	151.20	2400	448	10.8	5.06	6.72	0.38	5.03	0.74	27.5	5.37
		N10	100.02	151.51	2400	428	11.4	5.01	6.47	0.35	4.49	0.66	28.1	5.54
		N11	100.59	151.20	2400	435	10.9	5.27	6.59	0.39	4.89	0.66	38.6	6.17
		N12	100.03	151.22	2400	430	11.3	4.52	5.65	0.37	4.30	0.56	23.2	5.14
		平均値	100.09	151.35	2400	429	10.9	4.86	6.28	0.36	4.52	0.65	28.3	5.40
		標準偏差	0.22	0.21	0.29	8.85	0.31	0.21	0.38	0.02	0.26	0.05	5.80	0.35
		変動係数	0.2%	0.14%	0.01%	2.1%	2.9%	4.4%	6.1%	4.2%	5.8%	8.0%	20.5%	6.4%

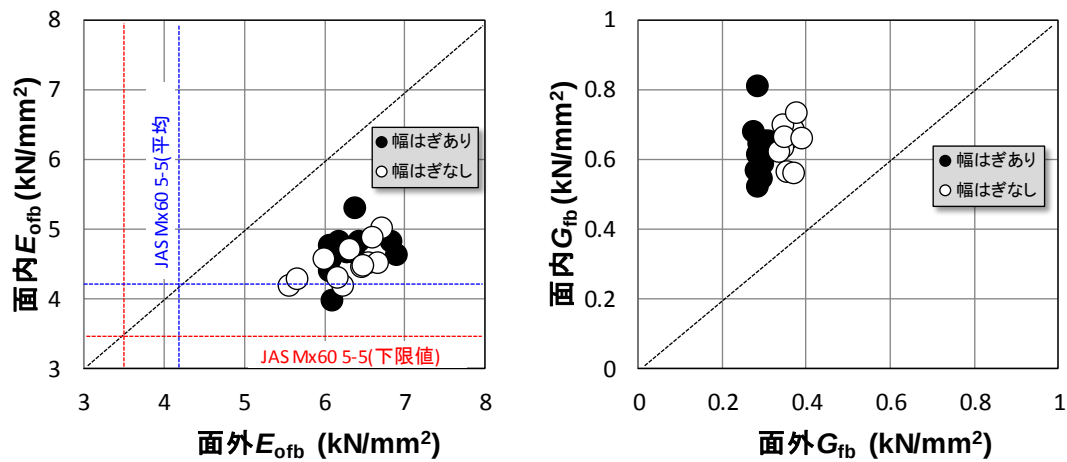


図 15 面内方向と面外方向の E_{ofb} の関係、及び各方向 G_{fb} の関係

図 16 に f_b と E_m 及び E_{ofb} の関係を示す。同図を見ると、クリープ試験のマッチング試験体(7 層 7 プライ)同様に、 f_b と E_m 、 E_{ofb} との相関性は殆ど認められない。また、図には示していないが、 f_b と E_{fr} の関係も同様であった。このことから、この種の非破壊指標と強度の関連から DOL 試験における荷重レベルを精度良く推定することは困難であり、現状では、通常行われている様に、マッチング試験体の曲げ破壊荷重を元に荷重を決定する以外に方法は無いのかもしれない。

一方、同図、及び表 1、2、6、7 から、 f_b について幅はぎありと幅はぎなしの値を比較すると、クリープ試験のマッチング試験体(7 層 7 プライ)とは逆に僅かに「幅はぎなし > 幅はぎあり」の傾向を示している(平均値ではそれぞれ 28.3 N/mm^2 、 26.3 N/mm^2)。ただし、同図に示すように、何れも JAS 規格に示された曲げ強さの基準値 9.8 N/mm^2 遙かに上回っていることから、この条件下(5 層 5 プライ、強軸方向)においても、幅はぎありと幅はぎなしのどちらでも曲げ強さの面から実用上の支障を来すことはないと考えて良い。

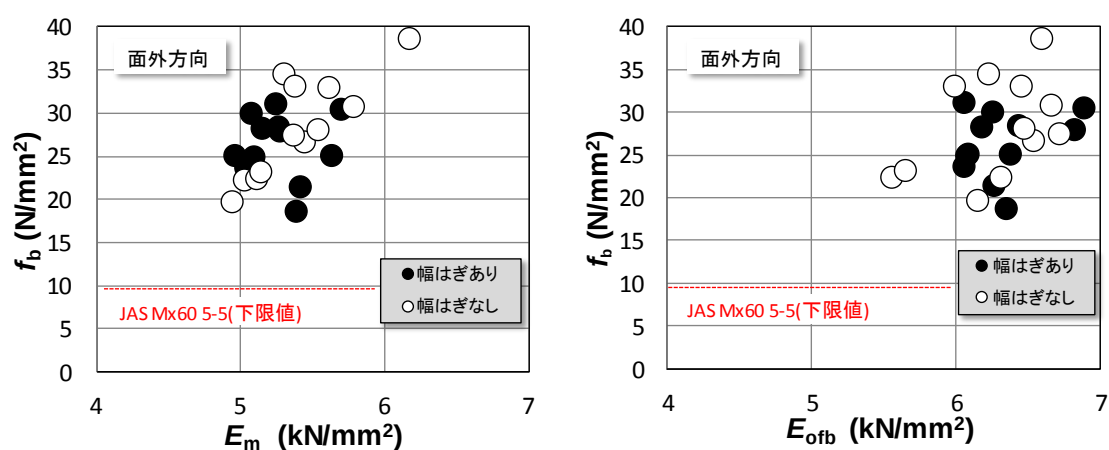


図 16 曲げ強さ (f_b) と E_m 及び E_{ofb} の関係



幅はぎありCLT



幅はぎなしCLT

図 17 破壊携帯の一例 (DOL 短期試験体)

3. 2. 4 DOL 試験

DOL 試験条件を図 18、同試験の状況を図 19 に示す。試験は、幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT に対し、短期強度試験と同一の条件、すなわちスパン 2000 mm の中央集中荷重下で実施している。この場合、試験体数は、幅はぎあり、幅はぎなし共に 30 体とし、同図に示す DOL 試験機 8 台を用いて負荷している。ここで、試験体に負荷する荷重は、マッチング試験体 12 体の $P_{\max}$ 平均値(幅はぎありで 19.7kN、幅はぎなしで 21.2kN)に 3 つの荷重レベル (90%、85%、80%) を乗じた以下の値とした。

(a) 幅はぎあり CLT

荷重レベル 90% の負荷荷重 = $P_{\max} 19.7 \text{ kN} \times 0.90 = 17.7 \text{ kN}$

荷重レベル 85% の負荷荷重 = $P_{\max} 19.7 \text{ kN} \times 0.85 = 16.8 \text{ kN}$

荷重レベル 80% の負荷荷重 = $P_{\max} 19.7 \text{ kN} \times 0.80 = 15.8 \text{ kN}$

(b) 幅はぎなし CLT

荷重レベル 90% の負荷荷重 = $P_{\max} 21.2 \text{ kN} \times 0.90 = 19.1 \text{ kN}$

荷重レベル 85% の負荷荷重 = $P_{\max} 21.2 \text{ kN} \times 0.85 = 18.0 \text{ kN}$

荷重レベル 80% の負荷荷重 = $P_{\max} 21.2 \text{ kN} \times 0.80 = 17.0 \text{ kN}$

DOL 試験機は、モーメントアームにより錘荷重の約 10 倍の荷重を加えることが出来るもので、図 18 に示すように薄板円盤(鋼製、5kg または 10kg)を錘として用いた。なお、試験体に加わる実荷重を決定するに当たっては、予めロードセルを用いて錘荷重と実荷重の関

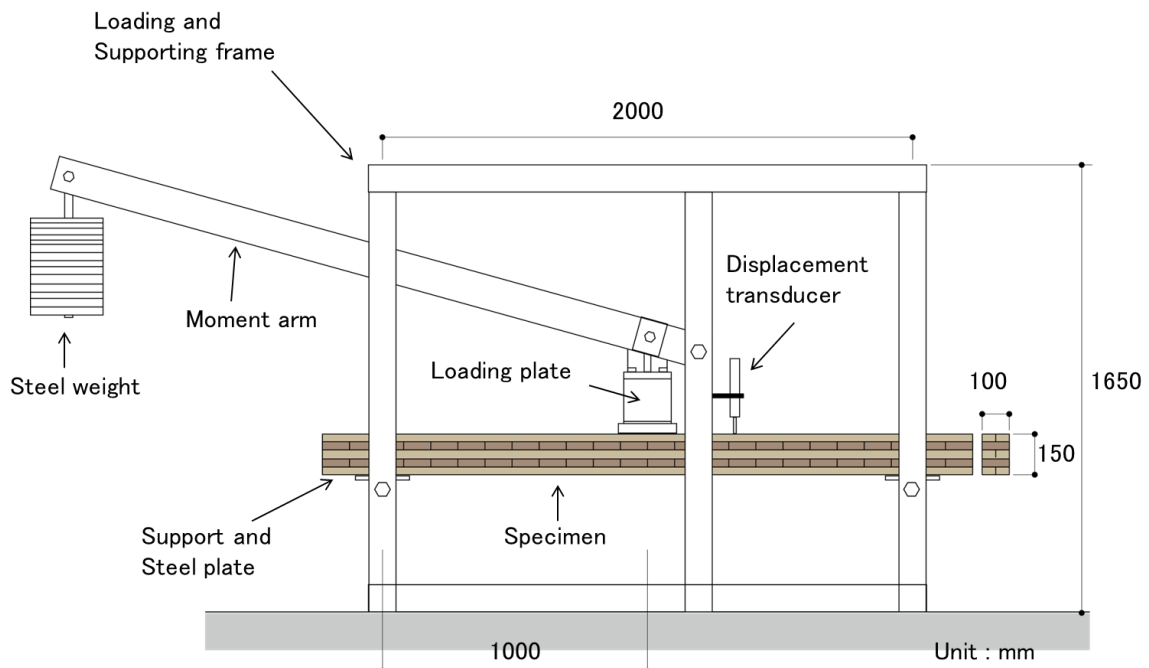


図 18 DOL 試験条件



図 19 DOL 試験の状況

係を求め、両者の回帰直線から錘の必要量を計算して負荷した(この場合の相関係数は、何れも 1.00 であった)。

変位(たわみ)は、図 18 に示した様に、試験体上部中央付近に設置した変位計(東京測器研究所、CDP-50、容量 50mm)を用いて測定した。この場合、測定時間間隔は 1 分間とし、たわみが急激に増加するまでの時間を破壊時間とした。試験体数は荷重レベル 90%、85%、80%ともに 10 体とした(幅はぎあり、幅はぎなし各 30 体)。

DOL 試験は、2015 年 10 月 19 日に開始し、2016 年 2 月 22 日時点で、幅はぎありでは荷重レベル 90%、85%を終了、幅はぎなしでは荷重レベル 90%を終了した。幅はぎありの荷重レベル 80%及び幅はぎなしの 85%、80%条件については、今後も試験を継続した上で改めて報告したい。また、ここでは、試験期間の都合上、負荷 40 日前後を過ぎても破壊に至らなかった試験体は一端除荷し、打ち切りデータとして評価している。したがって、荷重継続時間の強度調整係数⁷⁾については、後日、全試験体を破壊に至らしめた上で検討する予定である。

表 8 と表 9 に幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT の荷重継続時間測定結果を示し、図 20 に荷重レベルと荷重継続時間 t (分)の常用対数(以下、破壊時間)との関係を示す。ここで、図 20 中の青い線(現行値)は、現行の許容応力度体系における木材全般の設計値を示し、赤い線(Madison curve)は Wood により行われた米国農務省林産研究所(FPL)の無欠点小試験体による荷重レベルと破壊時間の関係を示す。また、表 8、9、図 20 の「打ち切り」は、上述した様に負荷 40 日前後を過ぎても破壊に至らなかった試験体であるが、ここでは破壊したと見なして一端除荷している。

図 20 を見ると、何れの荷重レベルも破壊時間の平均値は現行値や Madison curve に対して大きく右側に位置しており、すなわち想定破壊時間よりも長い時間で破壊している。また、個々の値においても、各荷重レベルともに 10 体中 1 体のみが想定破壊時間よりも短い時間で破壊しており(負荷 1~15 分で破壊)、これまでのスギ⁸⁾やカラマツ⁹⁾を供試した実験例と比べてやや安全側の結果となっている。この場合、幅はぎありと幅はぎなしの傾向に

明確な差は認められない。この結果から、少なくとも本条件の範囲内では(5 層 5 プライ、強軸方向、幅はぎあり荷重レベル 90%、85%、幅はぎなし荷重レベル 90%)、幅はぎの有無にかかわらず、宮崎県産スギ CLT の荷重継続時間調整係数を製材や集成材と同様と考えることに大きな問題はないと推察される。

表 8 荷重継続時間の測定結果(幅はぎあり CLT)

荷重レベル	No.	開始時	破壊時	破壊形態	荷重比	logt	t(min)	t(hour)	t(day)
90%	A13	2015/10/19 09:51	2015/10/27 16:40	曲げ	0.90	4.08	11929	199	8.3
	A14	2015/10/19 09:52	2015/11/30 09:16	打ち切り	0.90	4.78	60444	1007	42.0
	A15	2015/10/19 09:54	2015/11/30 09:19	打ち切り	0.90	4.78	60445	1007	42.0
	A16	2015/10/19 09:55	2015/10/22 14:09	曲げ	0.90	3.66	4574	76	3.2
	A17	2015/10/19 09:57	2015/11/10 03:12	曲げ	0.90	4.50	31275	521	21.7
	A18	2015/10/19 09:58	2015/10/29 16:27	曲げ	0.90	4.17	14789	246	10.3
	A19	2015/10/19 10:00	2015/10/21 08:43	曲げ	0.90	3.45	2803	47	1.9
	A20	2015/10/19 10:01	2015/11/30 09:25	打ち切り	0.90	4.78	60444	1007	42.0
	A21	2015/10/26 14:34	2015/11/30 09:20	打ち切り	0.90	4.70	50086	835	34.8
	A22	2015/10/26 14:29	2015/10/26 14:31	曲げ	0.90	0.30	2	0	0.0
	A23	2015/10/26 14:51	2015/11/30 09:23	打ち切り	0.90	4.70	50072	835	34.8
	A28	2015/11/10 09:41	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.90	4.96	90739	1512	63.0
85%	A25	2015/11/02 10:58	2015/11/07 05:31	曲げ	0.85	3.84	6873	115	4.8
	A26	2015/11/02 10:47	2015/11/06 17:21	曲げ	0.85	3.79	6154	103	4.3
	A24	2015/11/09 13:18	2015/11/09 13:33	曲げ	0.85	1.18	15	0	0.0
	A27	2015/11/09 13:24	2016/01/01 12:40	曲げ	0.85	4.88	76276	1271	53.0
	A31	2015/11/09 13:52	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.85	4.96	91928	1532	63.8
	A29	2015/11/30 10:57	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.85	4.79	61863	1031	43.0
	A30	2015/11/30 11:00	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.85	4.79	61860	1031	43.0
	A32	2015/11/30 11:01	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.85	4.79	61859	1031	43.0
	A33	2015/11/30 11:03	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.85	4.79	61857	1031	43.0
	A34	2015/11/30 11:04	2016/01/12 10:00	打ち切り	0.85	4.79	61856	1031	43.0

表 9 荷重継続時間の測定結果(幅はぎなし CLT)

荷重レベル	No.	開始時	破壊時	破壊形態	荷重比	logt	t(min)	t(hour)	t(day)
90%	N13	2016/01/12 11:48	2016/02/22 09:00	打ち切り	0.90	4.77	58872	981	40.9
	N14	2016/01/12 11:50	2016/02/19 17:00	曲げ	0.90	4.74	55030	917	38.2
	N15	2016/01/12 11:51	2016/01/12 11:52	曲げ	0.90	0.00	1	0	0.0
	N16	2016/01/12 11:54	2016/01/20 15:00	曲げ	0.90	4.07	11706	195	8.1
	N17	2016/01/12 13:10	2016/02/22 09:00	打ち切り	0.90	4.77	58790	980	40.8
	N18	2016/01/12 13:11	2016/02/04 18:00	打ち切り	0.90	4.52	33409	557	23.2
	N19	2016/01/12 13:13	2016/02/22 09:00	打ち切り	0.90	4.77	58787	980	40.8
	N20	2016/01/12 13:15	2016/02/22 09:00	打ち切り	0.90	4.77	58785	980	40.8
	N21	2016/01/12 11:57	2016/01/12 19:39	曲げ	0.90	2.66	462	8	0.3
	N22	2016/01/13 09:20	2016/02/22 09:00	打ち切り	0.90	4.76	57580	960	40.0

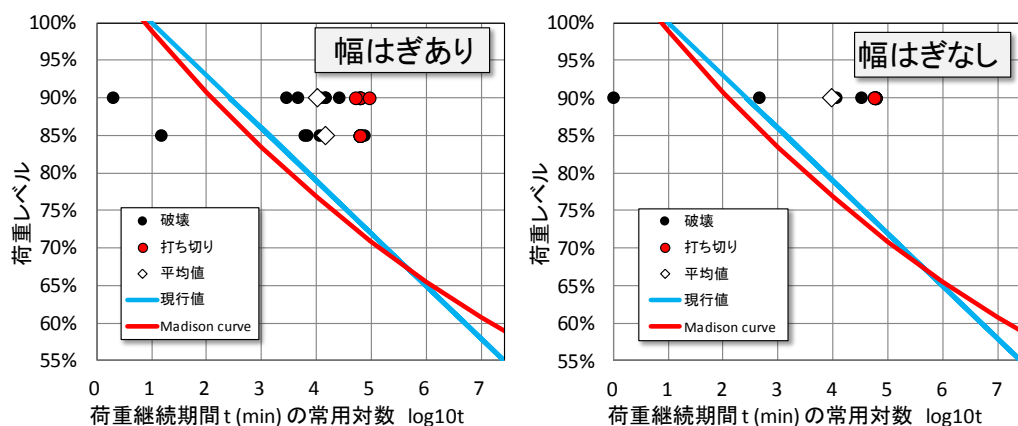


図 20 荷重レベルと荷重継続時間 t (分) の常用対数との関係

図 21 と 22 に DOL 試験における破壊形態の例を示す。各図から、それぞれの破壊形態には大きな差異は無く、何れも引張側最外層に存在するフィンガージョイント、又は節近傍の引張り破壊から中央付近のせん断破壊に至っている様子が看取される。ただし、2 層目以降の弱軸部の破壊形態をみると、幅はぎあり CLT では集成材等と同様の形態を示しているが、幅はぎなし CLT では、一部に幅方向に隣り合うラミナ間の分離が認められる。



図 21 破壊形態の一例（幅はぎあり CLT）



図 22 破壊形態の一例（幅はぎなし CLT）

3. 3 まとめ

宮崎県産スギを用いて製造された CLT のクリープ特性とクリープ破壊特性を明らかにするために、それぞれ面外曲げクリープ試験(以下、クリープ試験)及び面外曲げクリープ破壊試験(以下、DOL 試験)を実施した。試験体の仕様は Mx60、B 種構成、強軸仕様とし、クリープ試験には 7 層 7 プライ、DOL 試験には 5 層 5 プライを供試した。なお、試験に際しては、「幅はぎ」を施したラミナによる CLT(以下、幅はぎあり CLT)と「幅はぎ」を施さないラミナによる CLT(以下、幅はぎなし CLT)の性能比較を中心に検討を進めた。結果の概要は、以下のとおりである。

(1) クリープ曲線の傾向に、幅はぎありと幅はぎなしの差異は認められず、何れも製材同様に負荷初期の急増(1 次クリープ)とその後の安定化(2 次クリープ)が認められた。

- (2)幅はぎあり CLT の相対クリープは、試験体間で大きな差異は認められなかったが、幅はぎなし CLT のそれは、試験体間で非常に大きな差異(ばらつき)を示した。
- (3)クリープ調整係数の推定精度を向上させるには、負荷 24 時間以降の実測値を用いて解析すること、解析法として平成 12 年建設省告示 1446 号が定めるクリープ評価法(告示法)を採用すること、さらには、試験期間を告示に示された最低試験期間(5 週間)よりも大幅に長くとることが必要との結果を得た。
- (4)負荷 24 時間～2 カ月の実測値からクリープ調整係数を求めた結果、幅はぎあり CLT では Power 則 1.58、告示法 1.32 となり、幅はぎなし CLT では Power 則 1.82、告示法 1.41 となった。すなわち、「幅はぎなし CLT > 幅はぎあり CLT」の結果となったが、何れも平成 12 年建設省告示 1459 号の変形増大係数 2 の範囲内には収まった。
- (5) DOL 試験では、今回の実験条件では(幅はぎあり荷重レベル 90%、85%と幅はぎなし荷重レベル 90%)何れも 10 体中 1 体のみが想定破壊時間(現行値、Madison curve による)よりも短い時間で破壊し(負荷 1～15 分で破壊)、これまでのスギ⁸⁾やカラマツ⁹⁾を供試した実験例と比べてやや安全側の結果となった。この場合、幅はぎありと幅はぎなしの傾向に明確な差は認められなかった。

3. 4 文献

- 1) 日本ツーバイフォー建築協会：“2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針”、工業調査会、2007、pp.195- 224.
- 2) 高橋徹、中山義雄：“木材科学講座 3 物理”、海青社、1992、pp.88.
- 3) 日本ツーバイフォー建築協会：“2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針”、工業調査会、2007、pp.247- 248.
- 4) 日本ツーバイフォー建築協会：“2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針”、工業調査会、2007、pp.151- 152.
- 5) 荒武志朗、有馬孝禮：木材学会誌 41(4)、359-366(1995).
- 6) 大橋義徳、松元和茂ほか：木材学会誌 54(4)、174-182(2008).
- 7) 日本ツーバイフォー建築協会：“2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針”、工業調査会、2007、pp.243- 244.
- 8) 藤田和彦：第 45 回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集、福山、2015、pp.25-26.
- 9) 大橋義徳、松元和茂ほか：第 65 回日本木材学会大会研究発表要旨集、東京、2015、pp.160.

4 接合性能

ヨーロッパにおいて建築材料として一般化しつつある CLT を、地震国である我国で普及させるためには、安全で最適な接合部の開発が不可欠である。ヨーロッパではロングビスや鋼板とビスを組み合わせた接合形式が多く採用されている。一方、日本において既に建築されている CLT 建築物には、引きボルト接合、ラグスクリーボルト(以下、LSB)接合、そして鋼板とビスによる鋼板添え板接合などが用いられたが、接合部の設計方法については未だ研究段階にある。

現在、我国において CLT が使用される主な工法として、以下に示す 3 種類が考えられている。

- ① CLT を壁、床(天井)に用いるパネル工法
- ② CLT を鉄骨造(以下、S 造)や鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)など他構造と組み合わせた混構造
- ③ CLT と軸組工法を組み合わせた工法

①パネル工法は、CLT の発祥国であるヨーロッパなどを中心に欧米で用いられる工法であり、日本初の CLT 建築物である高知県のおおとよ製材の社員寮である 3 階建ての建築物に用いられている。パネル工法は、CLT の使用方法として最も合理的であると考えられ、S 造や RC 造で建築されている中層建築物に替わるものとして期待されている。しかしながら、現在、我国では時刻歴応答解析による高度な構造設計が必要とされる。2016 年度の建築基準法告示の改定により、簡便な設計になることが期待されている。

②CLT と他構造を組み合わせた混構造は、ヨーロッパでは中層建築物のコアとなるエレベーター部分を RC 造で立ち上げ、その周りを CLT により構築する建築方法などで用いられている。日本においては、RC 造の耐震補強への利用、そして高層建築物の床材料としての利用が試みられている。また、宮崎県においては 10 階建て S 造の耐力壁としての利用が検討されている。

③CLT と軸組工法を組み合わせた工法は、日本特有の建築形式である在来軸組工法に耐力壁として CLT を利用する工法である。一般的な住宅に用いられる木造軸組工法は、壁を多く設けることの出来ない建築物には不向きとされている。しかしながら、CLT を壁材料として用いることで高強度の耐力壁を構築できることから、低層の事務所建築物や店舗など比較的広い内部空間を必要とする建物への適応が試みられている。

本事業では、宮崎県産スギを用いて製造された幅はぎあり CLT を用いて、以上の 3 種類の工法に適した接合形式及び耐力壁の開発を目的とした。

第 4.1 節ではパネル構法に適した接合具であるラグスクリーボルトを用いた接合形式の開発、第 4.2 節では CLT と S 造を組み合わせた工法における CLT のめり込み性能を活かした新たな接合形式の開発、第 4.3 節では CLT を軸組構法の耐力壁に利用するための接合形式の開発、そして第 4.4 節では第 4.3 節で開発した接合形式を用いた耐力壁の開発を行った。

4. 1 ラグスリューボルト接合形式(パネル工法)

4. 1. 1 はじめに

宮崎県木材利用技術センターでは、スギ CLT を用いたパネル工法に適した接合具として、大型のネジ型接合具であるラグスリューボルト(以下、LSB)を用いた接合部の開発を行っており、幅はぎなしの CLT を用いた LSB 単体そして 2 本の引き抜き性能に関する研究成果をこれまでに報告している¹⁾。

CLT の接合部において、ラミナ横方向の繋ぎ目に接合部が配置される場合、幅はぎの有無そしてラミナ横方向の透き間が耐力へ及ぼす影響が懸念される。日本農林規格(以下、JAS 規格)において“ラミナの横方向の接合の透き間”として、原則ないこととされているが、局所的なものであれば 6mm 以下、明らかに接合部となる部分においても 3mm 以下であれば良いものとされている²⁾。そこで、本研究では、LSB 接合について幅はぎの有無、そしてラミナの横方向の透き間が LSB の引抜き性能に及ぼす影響を考察した。

4. 1. 2 試験体と試験条件

供試試験体の CLT は、材料が宮崎県産スギ、強度性能が Mx60 そして構成が 5 層 5 プライとした。寸法は、幅 100mm、厚さ 150mm、長さ 580mm とした。LSB は、ネジ山の外径が 25mm、ネジ谷径が 20mm、ネジ山ピッチが 10mm、ネジ有効長さが 140mm(全長 200mm)とした。

試験体は、中央層(強軸方向)の中央部付近がラミナ横方向の接合となるように配置し、LSB はこの接合の中央部にあけた直径 22mm の先穴にインパクトレンチを用いて埋め込んだ。また、LSB の埋め込み口には、直径 35mm、深さ 30mm の座掘を施した。試験体製作状況を図 1 に示す。

試験条件は、ラミナ幅方向の繋ぎ目を接着する幅はぎありと、接着しないが透き間を設けない幅はぎなし、そして幅はぎなしでラミナの横方向に接合に透き間(最大 3.5mm までランダム)があるもの 3 条件とした。試験体数は幅はぎあり 5 体、幅はぎなし(透き間なし)5 体、幅はぎなし(ラミナの横方向の透き間あり)15 体とした。図 2 に幅はぎなし(ラミナの横方向の透き間あり)試験体の断面、そして図 3 に LSB を埋め込んだ試験体の写真を示す。図 2 において材中央部の丸で示した部分が LSB を埋め込む位置である。ラミナ横方向の接合の透き間の幅は、透き間ゲージを用いて測定した(図 4 参照)。



図 1 試験体の製作(先穴の製作)



図 2 幅はぎなし(ラミナの横方向の透き間あり)試験体断面



図 3 LSB を埋め込んだ試験体



図 4 透き間の測定

4. 1. 3 試験方法

試験は、CLT に埋め込んだ LSB を下方にし、LSB の雌ネジと接合したハイテンションボルトを専用治具により試験機に緊結し、反力側を 3 本のボルト留めとして、上方に加力することで LSB に引張力を負荷した。図 5 に試験方法の概要、図 6 に試験時の写真を示す。LSB の引き抜き量は、CLT 試験体の両側面に取り付けた一対の変位計(東京測器研究所、CDP-50、容量 50mm)を用いて、LSB と緊結したハイテンションボルトに取り付けた変位計受けにより、CLT と LSB の相対変位を測定した。LSB の引き抜き量は、一対の変位計の測定結果の平均値とした。試験は万能材料試験機(島津製作所、AG-100kNI、容量 100kN)を用い、加力スピードは 1mm/min. の単調加力とした。

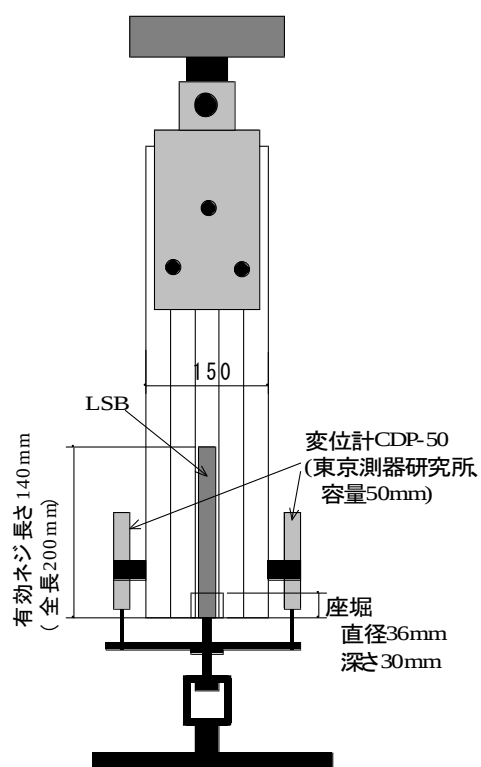


図5 試験方法の概要

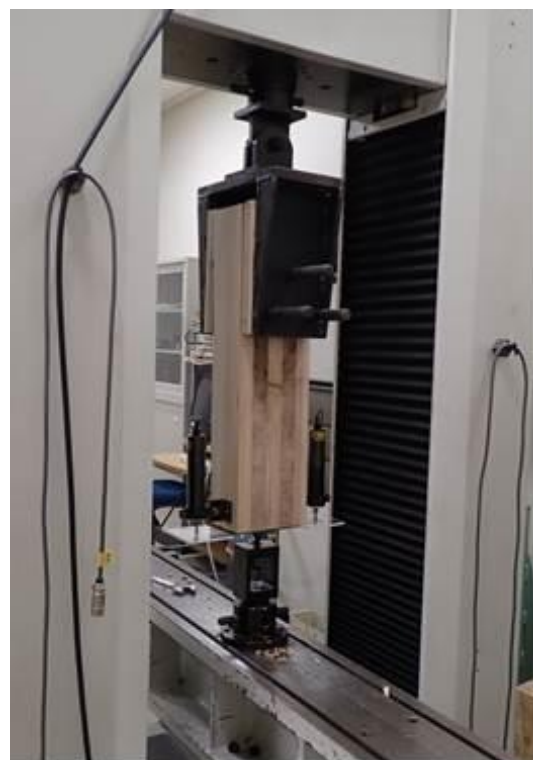


図6 試験方法

4. 1. 4 破壊性状

本試験では、全ての試験体が LSB の引き抜きにより破壊した。ラミナ横方向の接合に透き間のある試験体についても、他の試験体と同様に、ネジ山と木材の間の縦せん断により破壊に至った。LSB の引き抜き破壊性状を図7と図8に示す。図7はラミナ横方向の透き間が1.1mmの試験体の破壊性状である。図8に示すように、せん断破壊した木部がネジ山の間に残存するようにして LSB が引き抜けて破壊に至った。



図7 LSBの引き抜き破壊



図8 透き間あり試験体の破壊性状

4. 1. 5 試験結果

図 9 に代表的な荷重と引き抜き量の関係を示す。荷重と引き抜き量の関係は、加力初期において直線的に増加し、降伏した後引き抜き破壊が生じると、荷重が低下する挙動を示した。図 9 は、ラミナ横方向の接合に透き間が 2.6mm 試験体の結果であるが、他の試験体も同様の荷重と引き抜き量の関係を示した。最大引き抜き荷重時の LSB の引き抜き量は、幅はぎの有無や透き間の大きさの影響は見られず、引き抜き量が約 1.7mm において最大荷重を示した。

図 10 に最大引き抜き荷重、図 11 に降伏荷重、そして図 12 にすべり係数と幅はぎの有無そして透き間の大きさの関係を示す。ここで、降伏荷重は完全弾塑性解析により算出した値であり、すべり係数は加力初期における最大荷重(P_{max})の 10%~40%までの荷重と引き抜き量の関係より算出した初期剛性の値である。最大引き抜き荷重、降伏荷重(P_y)そしてすべり係数(K_s)とともに、ラミナ横方向の接合の透き間が広がるほど、若干ではあるが低下する傾向が見られた。また、幅はぎの有無の影響では、幅はぎなし試験結果が幅はぎありよりも若干大きな値となった。これについては今後考察が必要であるが、幅はぎ接着の影響なく引き抜き破壊を生じた破壊性状より、幅はぎの有無が LSB の引き抜き性能に及ぼす影響は無いものと考えられた。

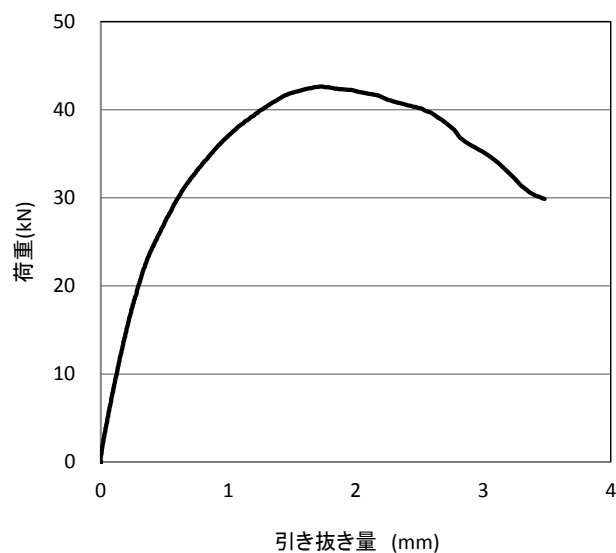


図 9 代表的な荷重と引き抜き量の関係

4. 1. 6 推定値

LSB の引き抜き性能は、主に LSB のネジ山と CLT の木部の間の縦せん断によると考えられる。このため、ラミナ横方向の接合に透き間がある場合、木部のせん断面積が低減すると考えられる。そこで、透き間によるせん断面積の低減を考慮して算出した推定値の結果を図 10 から図 12 に実線で示す。ここで、基準となる透き間ゼロの値は、幅はぎありとなしの試験結果の平均値とした。図 10 と図 11 より推定値は最大引き抜き荷重と降伏荷重の実験値を推定できており、図 12 よりすべり係数においてもその傾向を推定できていると考える。この推定値より、JAS で規定されている最大の透き間 3mm の場合、透き間の無い CLT と比較して、本試験に用いた直径 25mm の LSB では、引き抜き性能の値は 7.6%程度低下すると推定される。

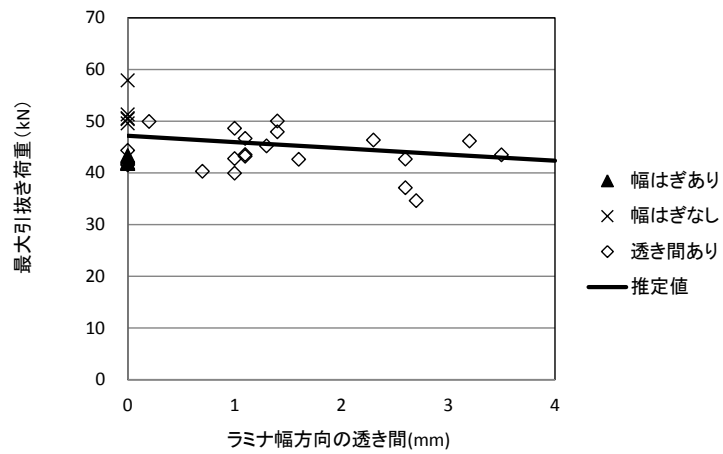


図 10 最大引き抜き荷重と幅はぎおよび透き間の影響

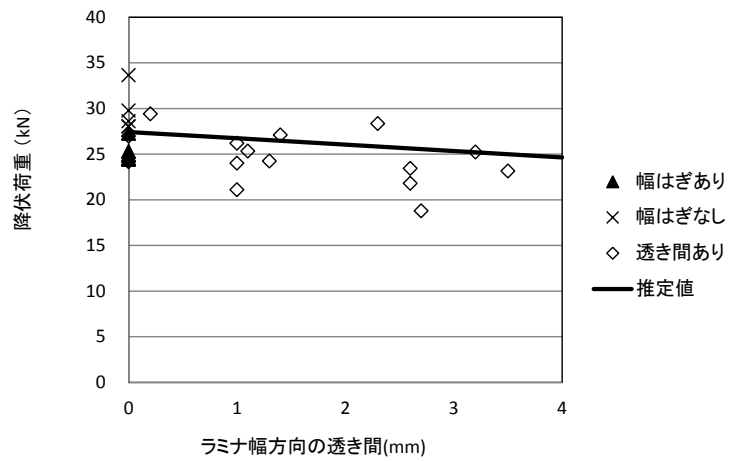


図 11 降伏荷重と幅はぎおよび透き間の影響

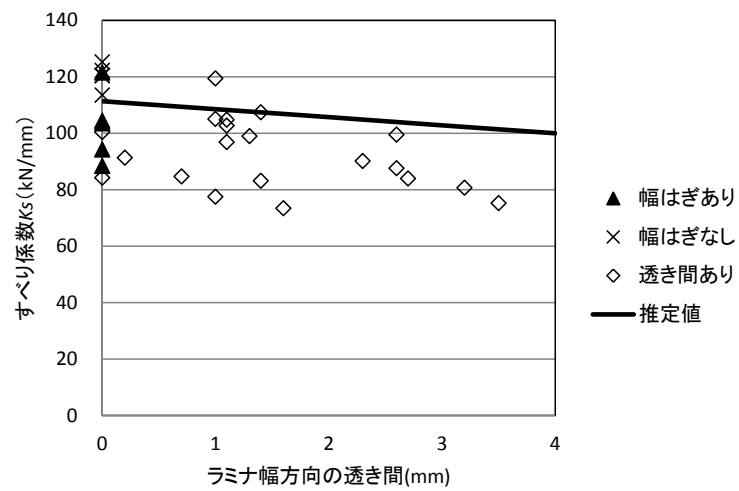


図 12 すべり係数と幅はぎおよび透き間の影響

4. 1. 7 まとめ

本試験結果より、ラミナ横方向の繋ぎ目に LSB を埋め込み使用する場合、幅はぎの有無による LSB の引き抜き性能への影響は無いと考えられた。しかしながら、幅はぎがなくラミナ横方向の透き間に埋め込まれた場合、その透き間の大きさに応じて引き抜き性能が低下することが分かった。そして、その透き間の大きさに応じて LSB のネジ山と CLT の間のせん断面積が低減すると仮定した推定値が、試験結果の傾向を推定できることが分かった。この推定結果より、JAS で規定されている最大の透き間 3mm の場合、透き間のない CLT と比較して、引き抜き性能が 7.6%程度低下すると推測された。また、この低減率は使用する LSB の直径が細くなるほど大きくなると推測される。このため、幅はぎありの CLT を用いることで、幅はぎなしでのラミナ間の透き間を検討する必要がなく、安全で効率的な接合部を構成できると考える。

4. 1. 8 文献

- 1)中谷誠、森拓郎、鈴木圭：CLT からのラグスクリーボルトの引き抜き性能 縁端距離、埋め込み深さと繊維方向の影響．構造工学論文集 61B、pp.223-228、2015
- 2)直交集成板の日本農林規格：農林水産省告示第 3079 号

4. 2 むり込み型接合形式(S造との混構造)

4. 2. 1 はじめに

CLT の構造材としての利用方法として、他構造との組み合わせが注目されており、高層ビルの床に CLT を使用する取り組み、また RC 造の耐震補強に CLT を使用する取り組みが行われている。本事業では、S 造による中・高層建築物への CLT の活用として、耐力壁への利用を想定した接合形式の提案を行う。S 造への適用としては、図 13 に示すように CLT の四隅に専用の接合金物をはめ込み、この接合金物と S 造の上下の鉄骨フレームを緊結する耐力壁としての利用が考えられる。この構造は、地震力などの水平力に対して、接合金物の CLT へのめり込み、そして CLT 自体のせん断性能により抵抗することになる。このため、CLT への接合金物のめり込み性能が、耐力壁の耐震性能に大きく依存する。本事業では、CLT のめり込み性能を試験により明らかにするとともに、実際の接合部を考慮し、想定される接合金物を取り付けた試験体について試験を実施した。また、水平力により CLT 壁体には図 13 に赤線で示す対角方向に圧縮力が作用すると推測されることから、対角方向である斜め方向の圧縮性能についても試験により確認した。

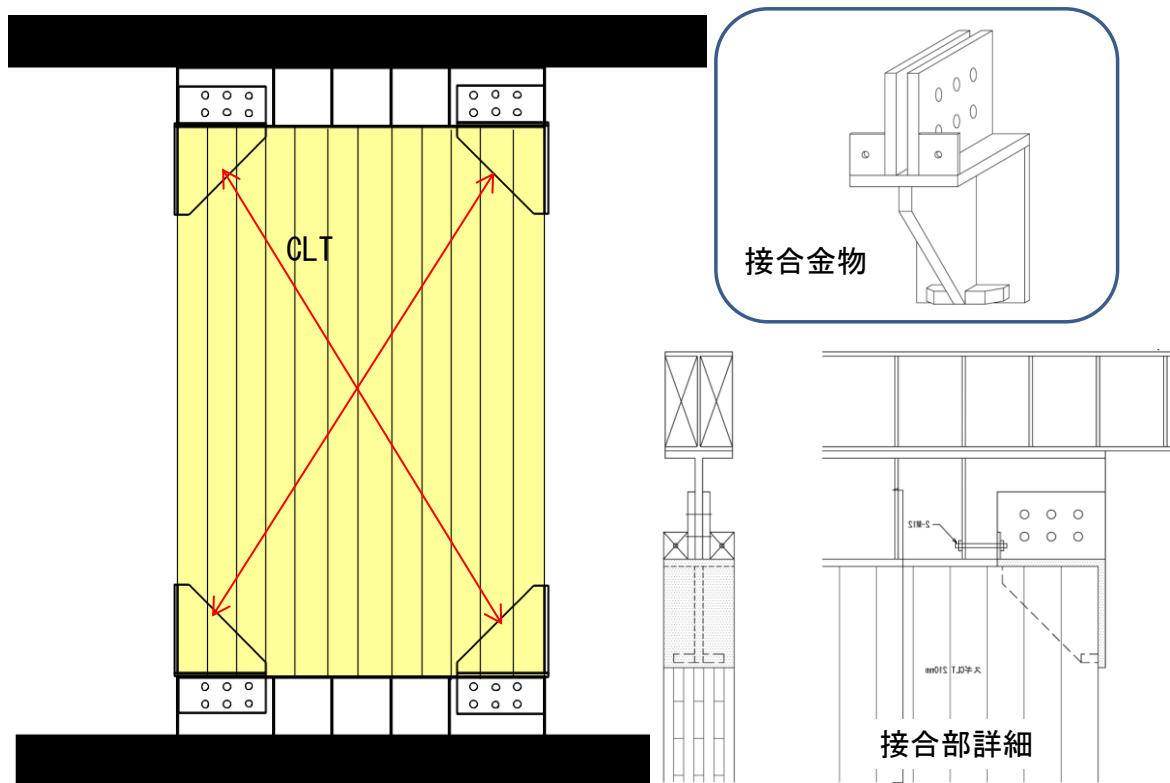


図 13 S 造に組み込んだ CLT 耐力壁のイメージ図

4. 2. 2 試験体と試験条件

供試試験体の CLT は、樹種がスギ、強度性能が Mx60、ラミナ構成が 7 層 7 プライ、そして

各ラミナ厚さ 30mm の総厚さ 210mm とした。試験条件は、CLT の強軸方向と弱軸方向のめり込み性能を明らかにするスリットなし試験体 2 条件、CLT に実際の接合金物として想定される L 型の接合金物をはめ込んだスリットあり試験体(強軸方向と弱軸方向)2 条件、そして斜め方向のめり込み性能を確認するため試験体 1 条件の合計 5 条件とした。斜め方向試験体の形状は、実際に想定される高さ 2.6m、長さ 1.8m の耐力壁の対角方向が圧縮試験機の加力方向となるように設定した。試験体名は、JN(以下、弱軸スリットなし)、JS(以下、弱軸スリットあり)、KN(以下、強軸スリットなし)、KS(以下、強軸スリットあり)そして BO(以下、斜め試験体)とした。スリットなし試験体の概要図を図 14、スリットありを図 15 そして斜め試験体を図 16 に示す。また、接合金物の概要図を図 17 に示す。

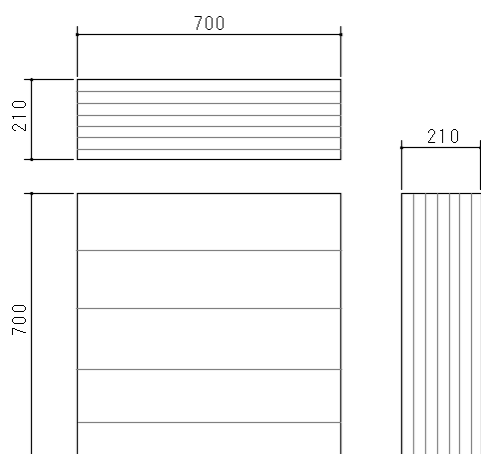


図 14 スリットなし試験体図
(弱軸: JN 試験体)

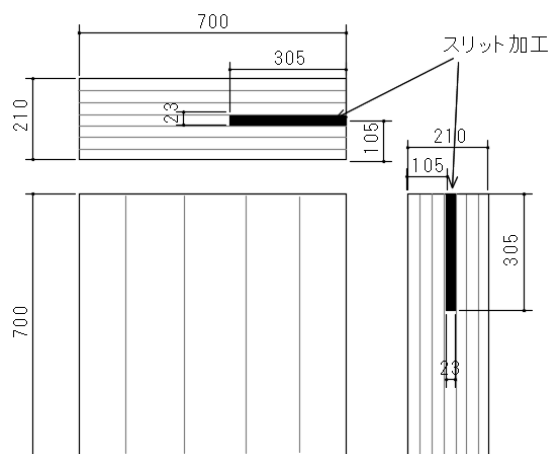


図 15 スリットあり試験体図
(強軸: KN 試験体)

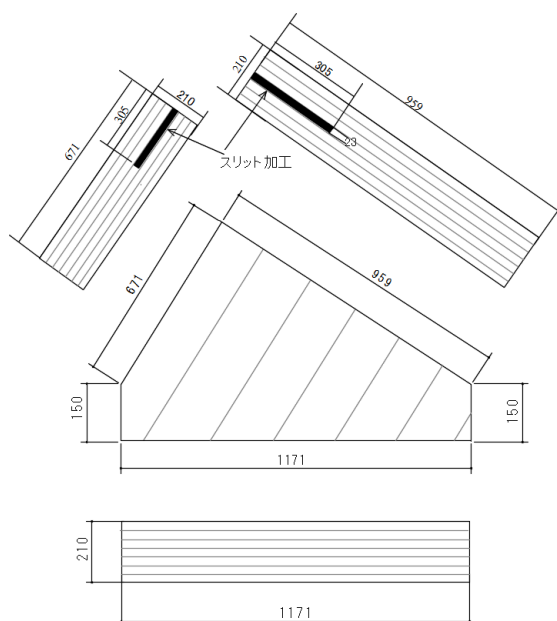


図 16 斜め試験体図(B0 試験体)

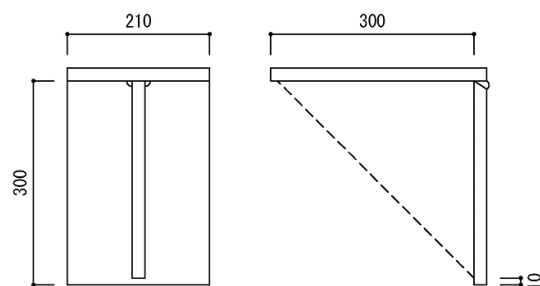


図 17 接合金物概要図

4. 2. 3 試験方法

本試験は、実大圧縮試験機(前川試験機製作所、A-200-B1、容量 2000kN)を用いて実施した。スリットなし試験体は、試験機上方の加力盤と試験体の間に長さ 300mm、幅 220mm、厚さ 32mm の鋼板を挟み込み、上方から加力することでめり込み試験を実施した。このとき、加力位置は CLT の材端部から長さ 300mm、幅は CLT の幅と同じ 210mm とした(図 18 参照)。スリットあり試験体は、試験体スリットにはめ込んだ L 型接合金物と試験機上方の加力盤との間に厚さ 32mm の鋼板を挟み込み、上方から加力することで実施した。両試験共に CLT 端部への加力による試験体の回転を抑制するため、加力側とは反対側の端部に押さえ込み用の治具を設けた。斜め試験体は、試験体スリットにはめ込んだ L 型接合金物と試験機上方の加力盤との間に専用の加力治具を挟み込み、垂直方向に試験体を加力できるようにした(図 20 参照)。また、試験体の横すべりを抑制するために、反力治具を試験体の両端に設けた。各試験条件の変位測定値を図 18 から図 20 に示す。各試験体とも、加力軸方向に設けた変位計 1(#1)と変位計 2(#2)の変位測定値の平均値をめり込み変形量とした。また、CLT 端部を圧縮することで生じる端部からの距離によるめり込む量の違いを各変位計により確認した。図 21 に弱軸スリットなし試験体の試験方法、図 22 に斜め方向試験体の試験方法の写真を示す。

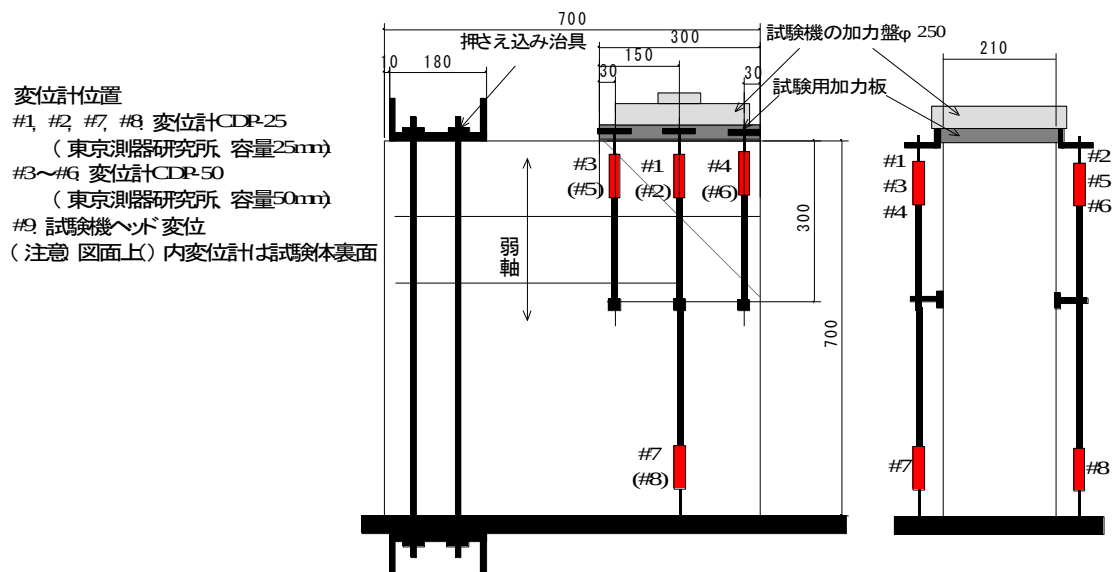


図 18 スリットなし試験体図(弱軸:JN 試験体)

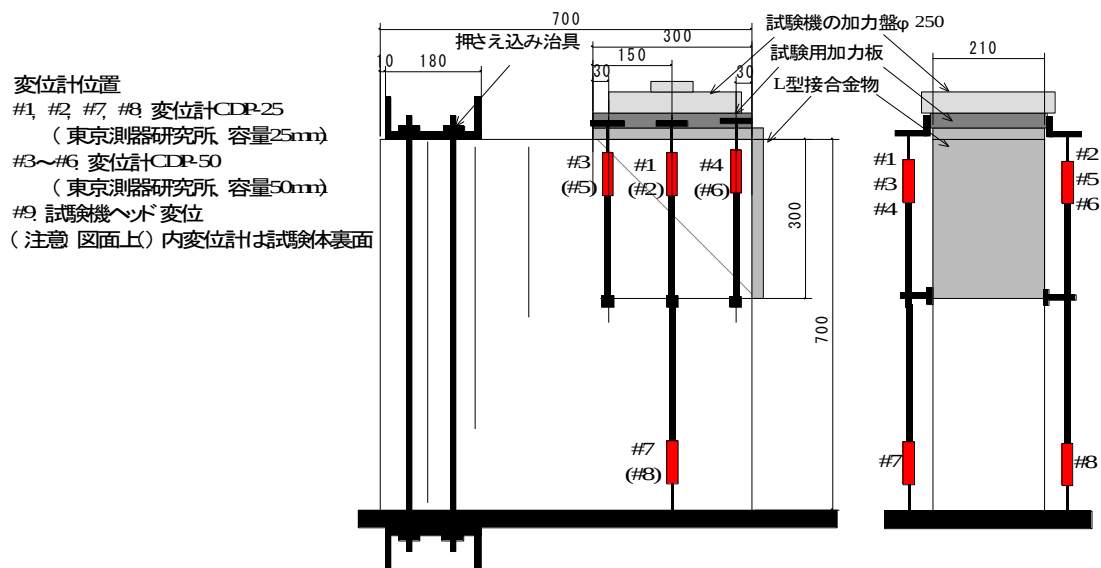


図 19 スリットあり試験体図(弱軸:KS 試験体)

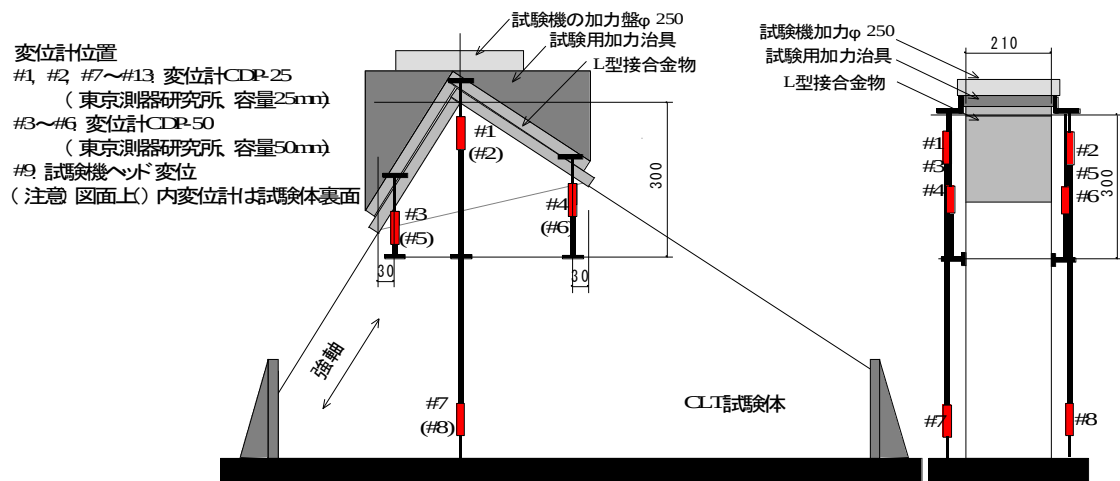


図 20 斜め試験体図(B0 試験体)



図 21 試験方法 1(弱軸スリットなし)



図 22 試験方法 2(斜め試験体)

4. 2. 4 試験結果

各試験条件の試験結果を表 1 から表 5、そして図 23 から図 27 に示す。最大圧縮荷重($P_{\max}$)はスリットなし弱軸方向が強軸方向に対して 18%低く、スリットあり試験体では弱軸方向が強軸方向に対して 37%低いことが分かった。これは、弱軸方向スリットあり試験体では、3層ある強軸ラミナのうち1層をスリット加工によりほぼ全て失うことによると考えられる。最大荷重時の変形量($\delta_{P_{\max}}$)は、弱軸方向が強軸方向より大きく、全体の幅方向に対する弱軸ラミナ幅の割合が大きいほど、その値が大きくなることが分かった。剛性は、最大荷重($P_{\max}$)の 10%~40%までの荷重と変形量の関係より算出した。弱軸方向が強軸方向よりも低く、強軸方向のスリットありなし(表 2 と表 4)の値に大きな差が無いことから、強軸方向の面積が大きく影響していると考えられる。斜め方向試験結果は表 5 と図 27 に示す通り、最大荷重では 1300kN を超える高強度で高剛性な接合形式であることが分かった。

表 1 JN 試験体結果(弱軸スリットなし)

	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	剛性 $K(0.1-0.4P_{\max})$	$P_{\max}/A$
	kN	mm	kN/mm	N/mm ²
JN-01	1179	4.13	581	18.7
JN-02	1157	4.54	435	18.4
JN-03	1105	4.38	493	17.5
JN-04	1184	5.64	555	18.8
JN-05	1101	4.14	559	17.5
JN-06	1124	4.32	617	17.8
平均	1142	4.52	540	18.1

(注) 加圧板面積 $A = 210\text{mm} \times 300\text{mm}$

表 2 KN 試験体結果(強軸スリットなし)

	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	剛性 $K(0.1-0.4P_{\max})$	$P_{\max}/A$
	kN	mm	kN/mm	N/mm ²
KN-01	1412	3.57	873	22.4
KN-02	1362	3.14	883	21.6
KN-03	1420	3.59	937	22.5
KN-04	1392	3.48	895	22.1
KN-05	1358	3.38	792	21.6
KN-06	1421	3.63	917	22.6
平均	1394	3.47	883	22.1

表 3 JS 試験体結果 (弱軸スリットあり)

	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	剛性 $K(0.1-0.4P_{\max})$	$P_{\max}/A$
	kN	mm	kN/mm	N/mm ²
JS-01	852	3.99	428	13.5
JS-02	783	3.54	421	12.4
JS-03	826	2.46	523	13.1
JS-04	786	4.52	392	12.5
JS-05	742	8.49	471	11.8
JS-06	854	7.70	544	13.6
平均	807	5.12	463	12.8

表 4 KS 試験体結果 (強軸スリットあり)

	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	剛性 $K(0.1-0.4P_{\max})$	$P_{\max}/A$
	kN	mm	kN/mm	N/mm ²
KS-01	1321	2.73	854	21.0
KS-02	1315	3.11	903	20.9
KS-03	1199	3.34	701	19.0
KS-04	1335	2.69	969	21.2
KS-05	1234	3.58	743	19.6
KS-06	1310	2.98	831	20.8
平均	1285	3.07	834	20.4

表 5 B0 試験体結果 (斜め方向試験体)

	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	剛性 $K(0.1-0.4P_{\max})$	$P_{\max}/A$
	kN	mm	kN/mm	N/mm ²
B0-01	1380	6.35	476	21.9
B0-02	1312	5.72	445	20.8
B0-04	1368	6.18	1094	21.7
B0-05	1283	5.89	429	20.4
B0-06	1348	4.78	552	21.4
B0-07	1273	8.53	452	20.2
平均	1327	6.24	575	21.1

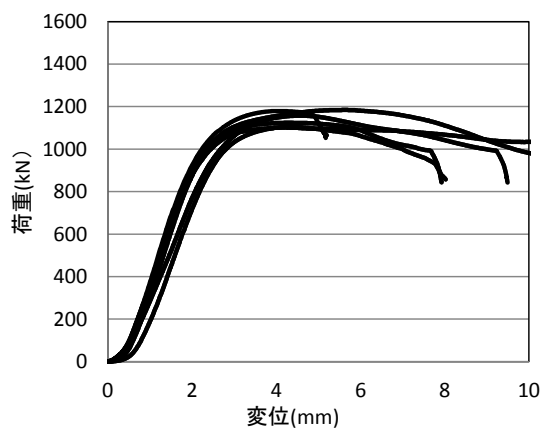


図 23 JN 試験体の荷重とめり込み変位の関係

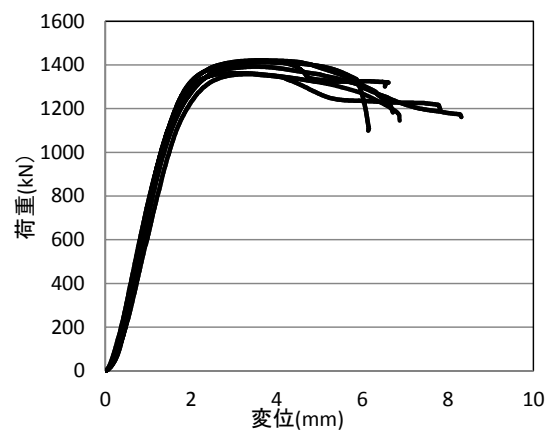


図 24 KN 試験体の荷重とめり込み変位の関係

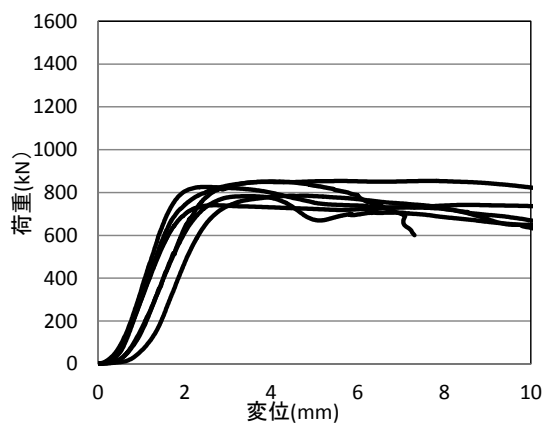


図 25 JS 試験体の荷重とめり込み変位の関係

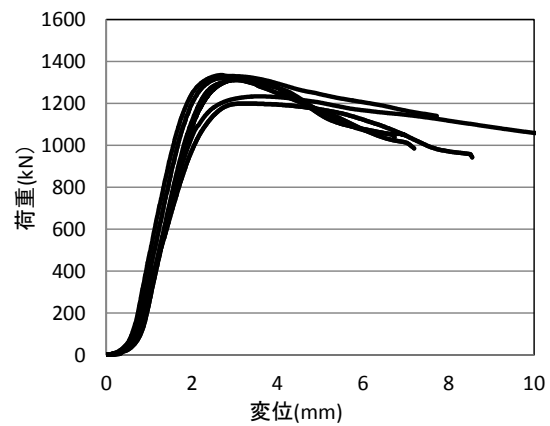


図 26 KS 試験体の荷重とめり込み変位の関係

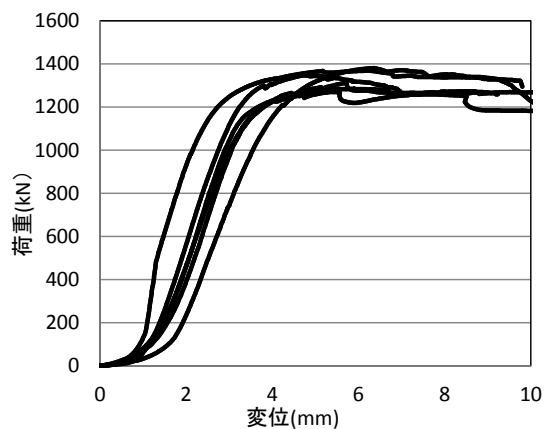


図 27 B0 試験体の荷重とめり込み変位の関係

4. 2. 5 破壊性状

各試験条件の破壊性状の詳細を図 28 から図 37 に示す。

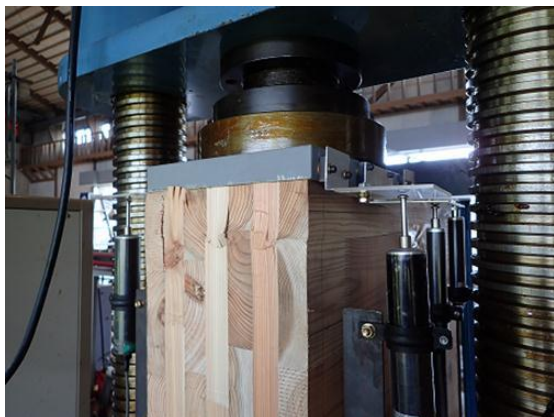


図 28 JN 試験体破壊性状 1
加力部分ラミナの座屈破壊(終局状態)



図 29 JN 試験体破壊性状 2
ラミナの剥離破壊(終局状態)



図 30 KN 試験体破壊性状 1
加力部分ラミナの座屈破壊(終局状態)



図 31 KN 試験体破壊性状 2
圧縮治具の大きなめり込み破壊(終局状態)



図 32 JS 試験体終局状態 1
金物裏側 CLT ラミナの座屈破壊(終局状態)



図 33 JS 試験体破壊性状 2
接合金物の大きなめり込み(終局状態)



図 34 KS 試験体破壊性状 1
接合金物の大きなめり込み(終局状態)



図 35 KS 試験体破壊性状 2
CLT 外層の圧縮破壊(終局状態)



図 36 B0 試験体破壊性状 1
めり込みからのラミナ剥離(終局状態)



図 37 B0 試験体破壊性状 2
CLT 弱軸側の大きなめり込み

4. 2. 6 まとめ

本試験により、S 造による中・高層建築物の耐力壁に CLT を利用した場合に想定されるめり込み型接合方法の性能を明らかにした。これにより、第 2 章において CLT のせん断性能が明らかであることから、想定される耐力壁の耐震性能を推定できるようになると考える。

4. 3 ビス留め接合形式(軸組工法)

4. 3. 1 はじめに

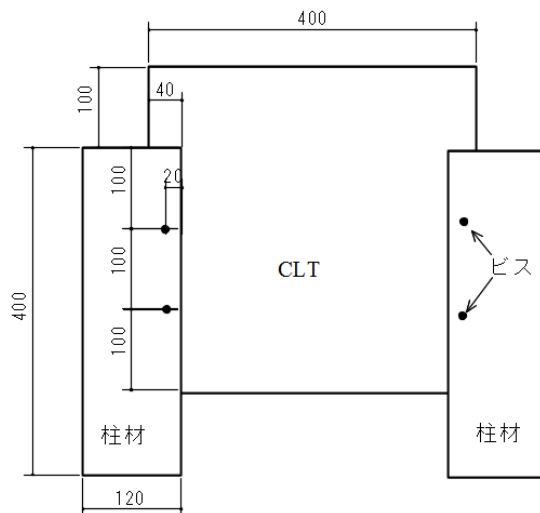
日本特有の CLT の利用方法として、軸組工法と CLT を組み合わせた工法が利用されている。CLT を用いることで、これまで困難であった強固な耐力壁を構成できることから、S 造で建築されてきた 3 階建までの低層事務所建築物、店舗建築物そして公共建築物などへの利用が期待される。

本研究では、軸組工法に幅はぎありの CLT を組み合わせた耐力壁の接合形式として、CLT と柱部材のビス留め接合を開発し、そのせん断性能を試験により明らかにした。

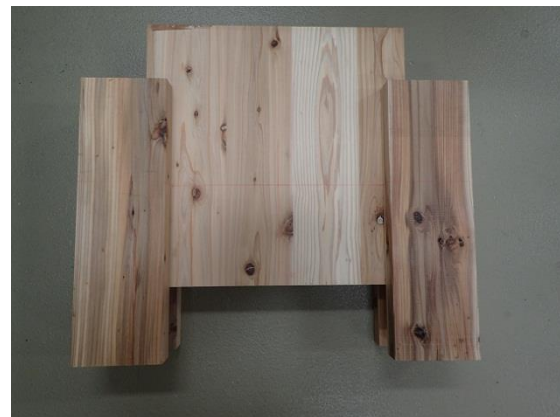
4. 3. 2 試験体と試験条件

供試試験体の CLT は、樹種がスギ、強度性能が $Mx60$ 、ラミナ構成が 3 層 3 プライであり、1 プライのラミナ厚さは 15mm で総厚さは 45mm とした。また、柱材はスギ同一等級集成材 E65-F255 の 120 角とした。試験体の概要図を図 38 に示す。

試験条件は、CLT と柱の取り付け接合形式により 2 条件とした。ひとつが凹状の加工を施した柱材に CLT を落とし込みビス留めする形式の O 試験体(図 39 参照)。そしてもうひとつが、柱の片方の面から 45mm 描き込み、そこに CLT を添えてはめ込むみビス留めする形式の H 試験体(図 40 参照)とした。前者が、2 面せん断のビス留め接合となり、後者が 1 面せん断のビス留め接合となる。ビスはパネリード II(東日本パワーファスニング、P6×L110)、全長は 110mm を使用し、図 38(i)に示すように各柱に 100mm ピッチで 2 本、合計 4 本のビスを用いた。試験体数は各条件 6 体とした。

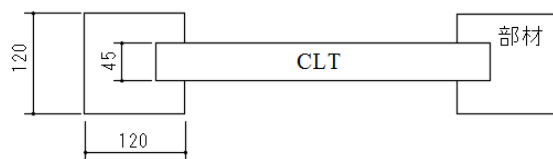


(i) 試験体側面概要図



(ii) 試験体側面写真

図 38 試験体側面

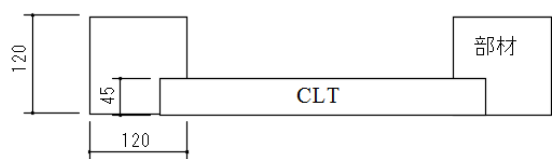


(i) 試験体上方概要図



(ii) 試験体上方写真

図 39 0 試験体概要図及び写真



(i) 試験体上方概要図



(ii) 試験体上方写真

図 40 H 試験体概要図及び写真

4. 3. 3 試験方法

ビスのせん断試験は、万能材料試験機(島津製作所、AG-100kNI、容量 100kN)を用いて実施した。CLT パネルを上方から加力し、CLT と柱材との間にせん断力を作用させることで試験を行った。荷重は試験機上方のロードセルにより、CLT と柱材との相対せん断変形量を一对の変位計(東京測器研究所、CDP-50、容量 50mm)により測定した(図 41 と図 42 参照)。

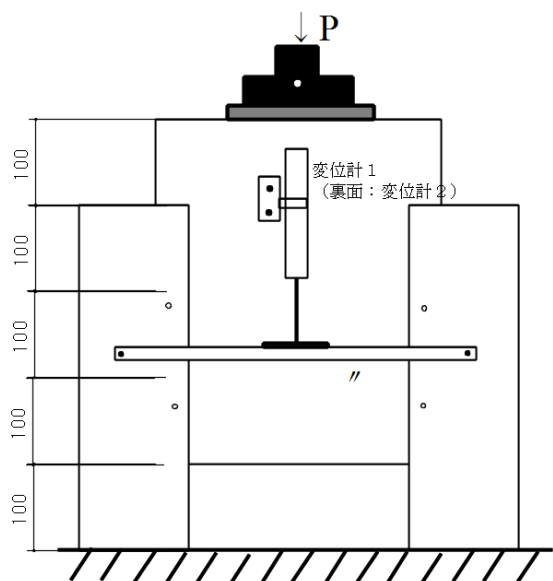


図 41 ビスせん断試験方法



図 42 試験風景

4. 3. 4 試験結果

ビス 1 本当たりに換算した詳細な試験結果を表 6 と表 7 に示す。O 試験体は、H 試験体より最大荷重($P_{\max}$)が 35%、降伏荷重(P_y)が 51%、初期剛性(K)が 37%高い値となった。本試験結果より導かれたビス 1 本当たりの短期基準せん断耐力は、O 試験体では 2.58kN、H 試験体では 1.70kN となり、O 試験体が約 51%高い値であった。

表 6 O 試験体の全試験結果

試験体名	$2/3P_{\max}$	P_y	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	δ_y	K	μ
			最大荷重	最大荷重時 変位	降伏変 位	初期剛 性	塑性率
			kN	Mm	mm	kN/mm	
01	3.47	3.04	5.20	14.3	1.90	1.60	7.24
02	3.80	3.52	5.70	18.2	2.58	1.37	6.80
03	3.50	3.33	5.25	18.5	2.53	1.32	6.00
04	4.20	3.79	6.31	20.7	2.47	1.53	7.48
05	3.40	3.11	5.10	20.3	1.68	1.85	9.39
06	3.32	3.00	4.98	17.6	2.05	1.47	7.05
平均	3.61	3.30	5.42	18.3	2.20	1.52	7.33
標準偏差	0.33	0.31	0.50	2.32	0.38	0.19	1.13
短期基準せん断耐力		2.58					

表 7 H 試験体の全試験結果

試験体名	$2/3P_{\max}$	P_y	$P_{\max}$	$\delta_{P_{\max}}$	δ_y	K	μ
			最大荷重	最大荷重時 変位	降伏変 位	初期剛 性	塑性率
			kN	Mm	mm	kN/mm	
01	2.92	2.47	4.38	25.3	2.75	0.90	7.84
02	2.57	1.91	3.85	10.3	1.50	1.27	10.5
03	2.67	2.26	4.00	16.0	2.24	1.01	7.61
04	2.67	2.26	4.01	20.3	1.93	1.17	9.55
05	2.71	2.23	4.07	13.7	2.28	0.98	7.63
06	2.50	1.98	3.74	9.85	1.48	1.33	17.0
平均	2.67	2.18	4.01	15.9	2.03	1.11	10.0
標準偏差	0.15	0.21	0.22	6.00	0.49	0.17	3.60
短期基準せん断耐力		1.70					

各条件の荷重とせん断変位量の関係を図 43 と図 44 に示す。図 43 に示すように O 試験体はせん断変形量が 20mm においてビスの破断音が発生すると共に、急激に荷重が低下する結果となった。これに対し、H 試験体では急激な荷重低下は発生せず、ビスが曲げ変形しながらせん断変形量が増大する結果となった。

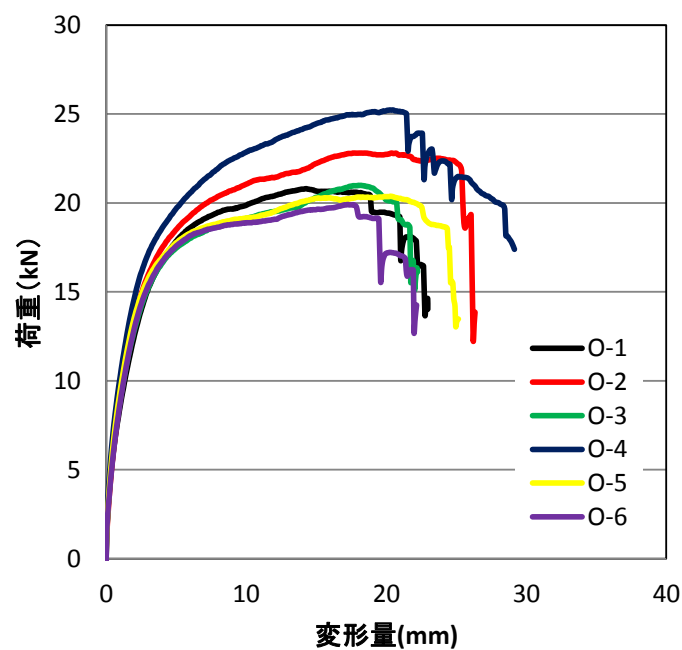


図 43 O 試験体の荷重と変位の関係

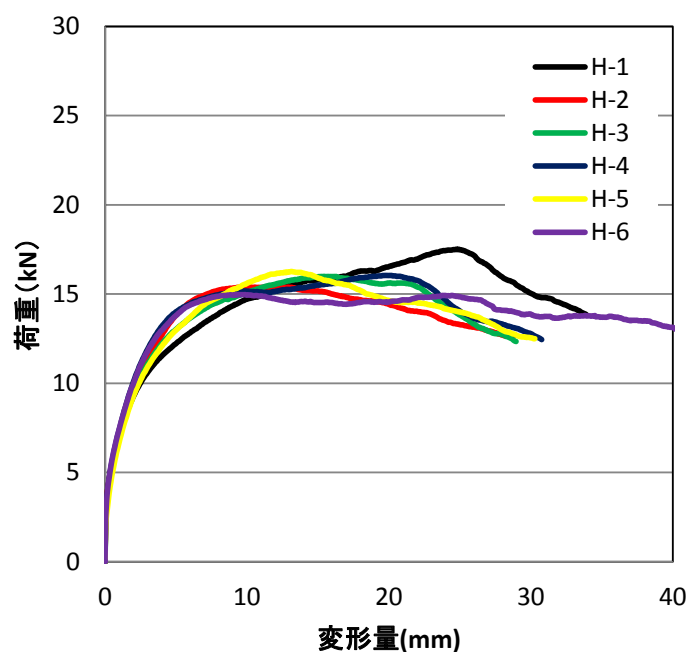


図 44 H 試験体の荷重と変位の関係

4. 3. 5 破壊性状

各試験条件の破壊性状を以下に示す。O 試験体は試験終局状態においてビス頭の CLT へのめり込みが見られた(図 45(iv))。また、せん断変形量 20mm 程度においてビスのせん断破壊が生じた(図 45(ii)参照)。そして、せん断破壊が生じなかったビスについても大きな曲げ変形が見られた(図 45(iii)参照)。CLT と柱材にはビスによるめり込み破壊が見られた(図 45(ii)参照)。

H 試験体は終局状態においてビス頭の CLT へのめり込みが見られた(図 46(iv))。また、ビスの大きな曲げ変形と CLT と柱材にめり込み破壊が見られた(図 46(ii)と (iv)参照)。



(i) 解体後の試験体



(ii) 曲げ折れたビスと CLT と柱材へのめり込み

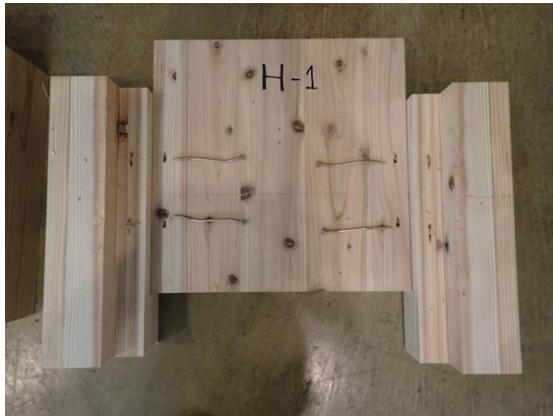


(iii) 大きく曲げ変形したビス



(iv) めり込んだビス(終局状態)

図 45 O 試験体の破壊性状



(i) 解体後の試験体



(ii) 曲げ変形したビスと CLT と柱材へのめり込み



(iii) 大きく曲げ変形したビス



(iv) めり込んだビス(終局状態)

図 46 H 試験体の破壊性状

4. 3. 6 まとめ

軸組工法に CLT を組み合わせた耐力壁の接合部として、ビスを用いる 2 種類の接合形式を開発した。柱に CLT を落とし込みビス留めする O 試験体は、欠き込んだ柱にはめ込む H 試験体より耐力、剛性ともに高い結果となった。これは、O 試験体ではビスが 2 面せん断になり、H 試験体の 1 面せん断よりもビスのせん断性能が高いことによる。ただし、破壊性状より変形性能は H 試験体の方が優れていることが分かった。このため、耐力壁として用いた場合、O 試験体の接合形式では高耐力で高剛性、H 試験体の接合形式では高靱性の壁体が期待できる。

4. 4 ビス留め接合による耐力壁(軸組工法)

4. 4. 1 はじめに

第 4.3 節において柱材と CLT のビス留め接合形式を二通り開発し、そのせん断性能を確認した。本節ではこれら二通りの接合形式を用いた軸組工法に CLT を組み合わせた耐力壁について、耐震性(水平せん断性能)と破壊性能を明らかにすることを目的に試験を実施した。

4. 4. 2 試験体と試験条件

供試試験体の詳細図を図 47 に示す。試験条件は、柱と CLT との接合方法として第 4.3 節で検討した二通りの接合形式とした。試験体は、凹状の加工を施した柱材に CLT を落とし込みビス留めする形式の TYPE1(落とし込み工法)と、柱の片側面に加工した欠き込に CLT をはめ込む TYPE2(はめ込み工法)とした。各部材の詳細図面を図 48 から図 50 に示す。

部材は、柱と土台は 120mm 角のスギ同一等級集成材(E65-F255)、梁は 120mm×180mm のスギ異等級対称構成集(E65-F225)とした。また、CLT は樹種がスギ、等級が Mx60、構成が 3 層 3 プライで総厚さが 45mm(1 プライ 15mm 厚)とした。各部材の含水率は表 8 の通りであった。

柱と基礎及び梁は、ホールダウン(カネシン、フレックスホールダウン U60)も用いて緊結した。柱材と CLT は、パネリード II(東日本パワーファスニング、P6×L110)のビスを 100mm ピッチに打ち込むことで接合した。

試験体数は、各試験条件 1 体の合計 2 体とした。

表 8 各部材の含水率(%)

	梁	柱 1(ジャッキ側)	柱 2(中央)	柱 3	土台
TYPE1	13.5	11	15.5	11	14.5
TYPE2	13	11.8	10	11.8	12

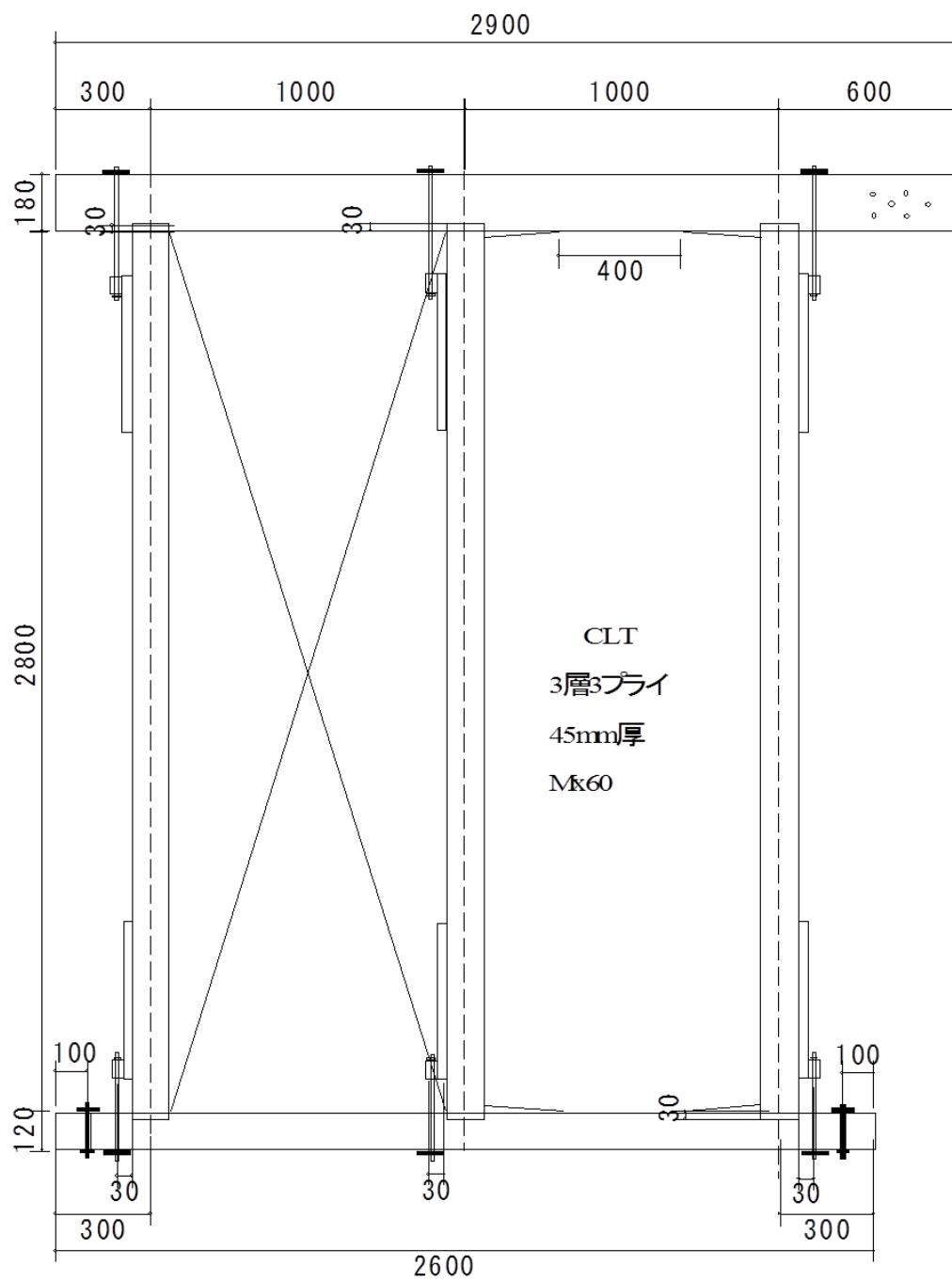


図 47 試験体図面

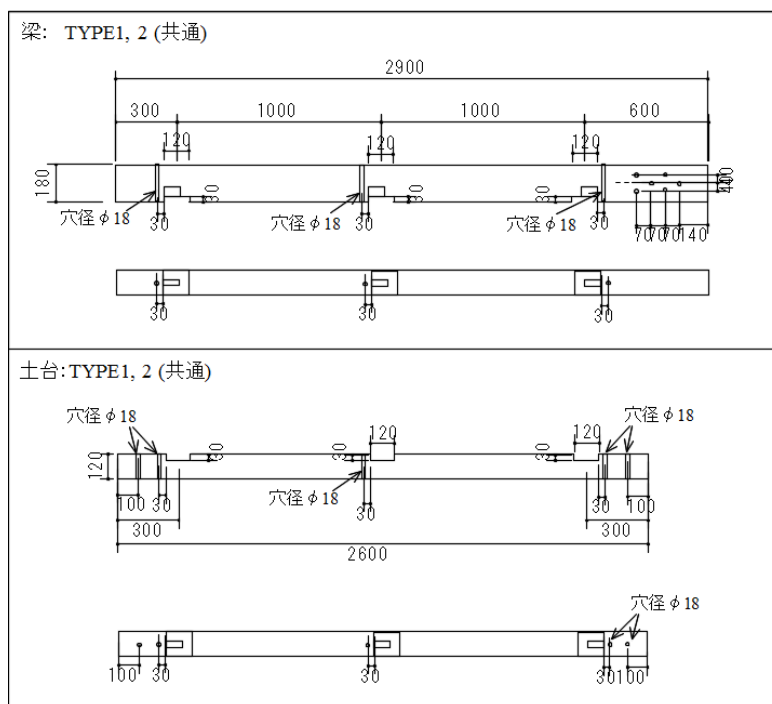


図 48 部材詳細その 1 (梁と土台)

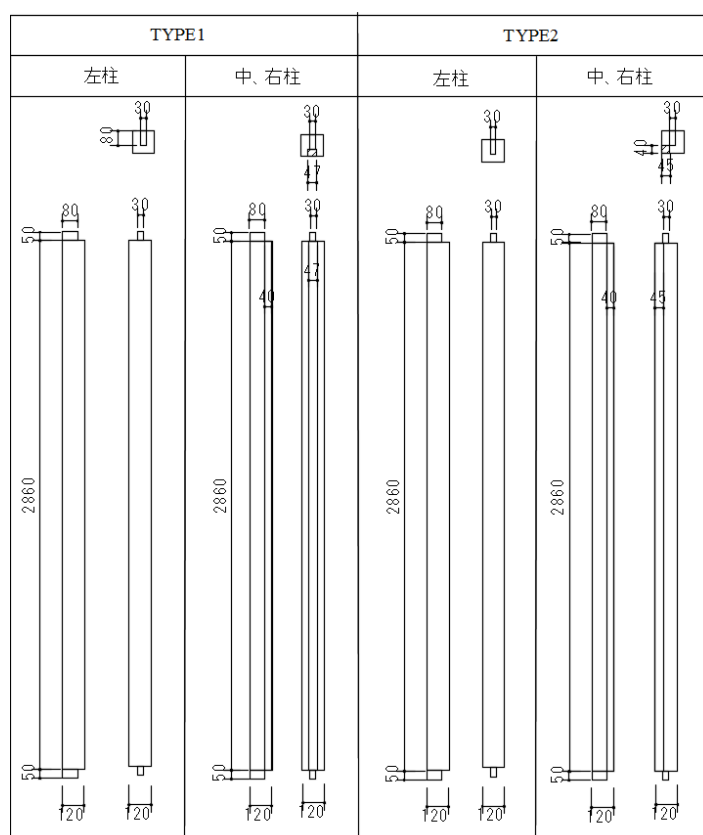


図 49 部材詳細その 2 (柱材)

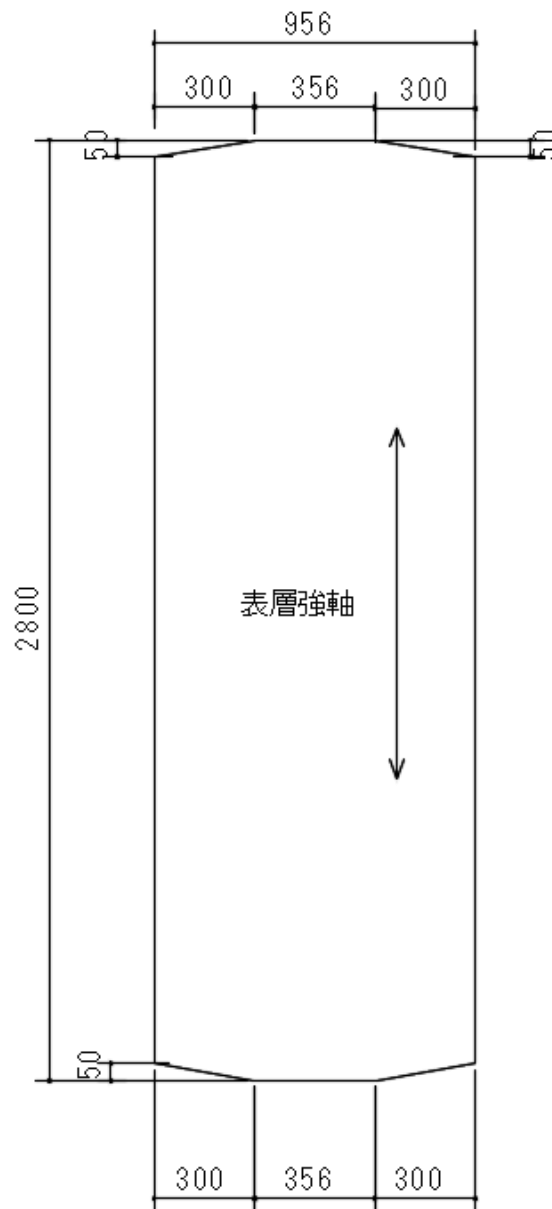


図 50 部材詳細その 3 (CLT)

4. 4. 3 試験方法

試験は、柱脚固定式試験法を採用し、土台を試験装置に緊結して梁端部を水平方向に加力することで行った。試験方法と変位計位置の概要を図 51 に示す。試験は実大壁せん断試験機(理研機器、MP-6ALS-S、容量押し 500kN、引き 250kN)により行った。加力は正負交番繰り返し加力とし、繰り返し履歴は変位計 1 の測定値から算出したせん断変形角が $1/450$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/150$ 、 $1/100$ 、 $1/75$ 、 $1/50\text{rad}$ の正負変形時とし、繰り返し回数は 3 回とした。加力は最大荷重に達した後、最大荷重の 80%に荷重が低下するまで、もしくは見かけのせん断変形角が $1/15\text{rad}$ 以上に達するまで実施した。

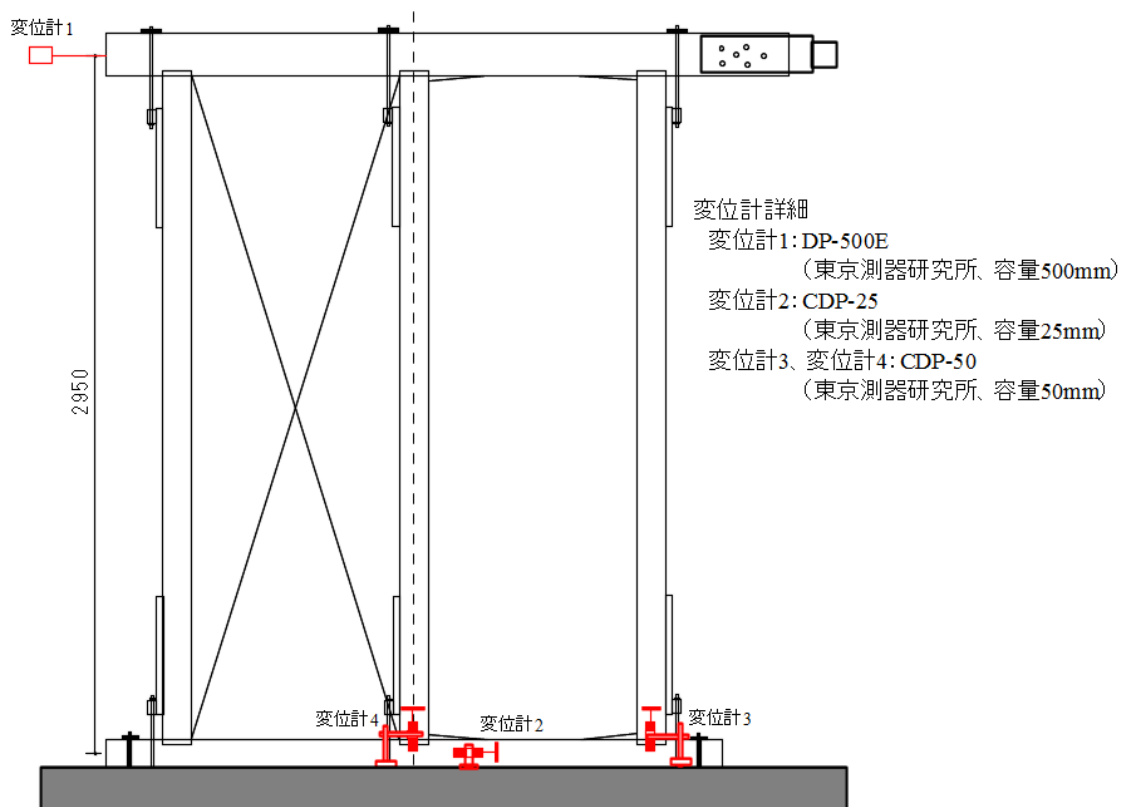


図 51 試験方法の概要

4. 4. 4 試験結果

本試験結果より各種特性値の算出を行った。各種特性値は「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」((財)日本住宅・木材技術センター発行、2008 年版)¹⁾p.570～572 を参考に、試験荷重と見かけのせん断変形角(γ)の関係より、完全弾塑性モデルを用いて算出した。見かけのせん断変形角の算出方法は以下の通りとした。

$$\text{見かけのせん断変形角 } \gamma = (\#1 - \#2) / 2950$$

ここで、#1(変位計 1)と #2(変位計 2)の位置は図 51 の通りである。

特性値の算出結果を表 9 と表 10、荷重と変形量の関係を図 52 と図 53 に示す。ここで、参考壁倍率の算出は、試験体数が 1 体であるため試験結果のばらつきが考慮されておらず、また「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」p.572～574 における、使用環境や施工性の影響による低減係数(α)も考慮していない。

表 9 と表 10 より、ビス 1 本当たりのせん断性能が高かった TYPE1 試験体の壁倍率が、TYPE2 試験体よりも低い値となった。これは図 52 に示すように、最大荷重後に急激に耐力が失われたことにより靱性が乏しいことが決定要素となり、低い壁倍率となった。急激に耐力が失われた原因は、ホールダウン金物の引張破壊であった。図 53 の TYPE2 試験体についても終局時に急激に耐力が低下しているが、これは建物の変形限界である 1/15(0.67rad)を超えており、靱性のある壁体であると考えられる。

表 9 TYPE1 試験体解析結果 (落とし込み工法)

	(単位)		参考値:短期基準せん断耐力 P_o (kN)	参考値:壁倍率
1) P_y	(kN)	33.1	14.8	7.55
2) $P_u \times (0.2/Ds)$	(kN)	14.8		
3) $2/3 \times P_{max}$	(kN)	35.1		
4) P_{120}	(kN)	15.8		
P_{max} : 最大耐力	(kN)	52.6		
P_u : 終局耐力	(kN)	46.7		
K : 初期剛性	(kN/rad)	1987		
μ : 塑性率		1.75		
Ds : 構造特性係数		0.63		
δ_y : 降伏変形角	($\times 10^{-3}$ rad)	16.6		
δ_v : モデル降伏点変形角	($\times 10^{-3}$ rad)	23.5		
δ_u : 終局変形角	($\times 10^{-3}$ rad)	41.2		

表 10 TYPE2 試験体解析結果 (はめ込み工法)

	(単位)		参考値:短期基準せん断耐力 P_o (kN)	参考値:壁倍率
1) P_y	(kN)	30.6	15.8	8.08
2) $P_u \times (0.2/Ds)$	(kN)	18.0		
3) $2/3 \times P_{max}$	(kN)	36.8		
4) P_{120}	(kN)	15.8		
P_{max} : 最大耐力	(kN)	55.1		
P_u : 終局耐力	(kN)	49.2		
K : 初期剛性	(kN/rad)	1608		
μ : 塑性率		2.18		
Ds : 構造特性係数		0.55		
δ_y : 降伏変形角	($\times 10^{-3}$ rad)	19.0		
δ_v : モデル降伏点変形角	($\times 10^{-3}$ rad)	30.6		
δ_u : 終局変形角	($\times 10^{-3}$ rad)	66.7		

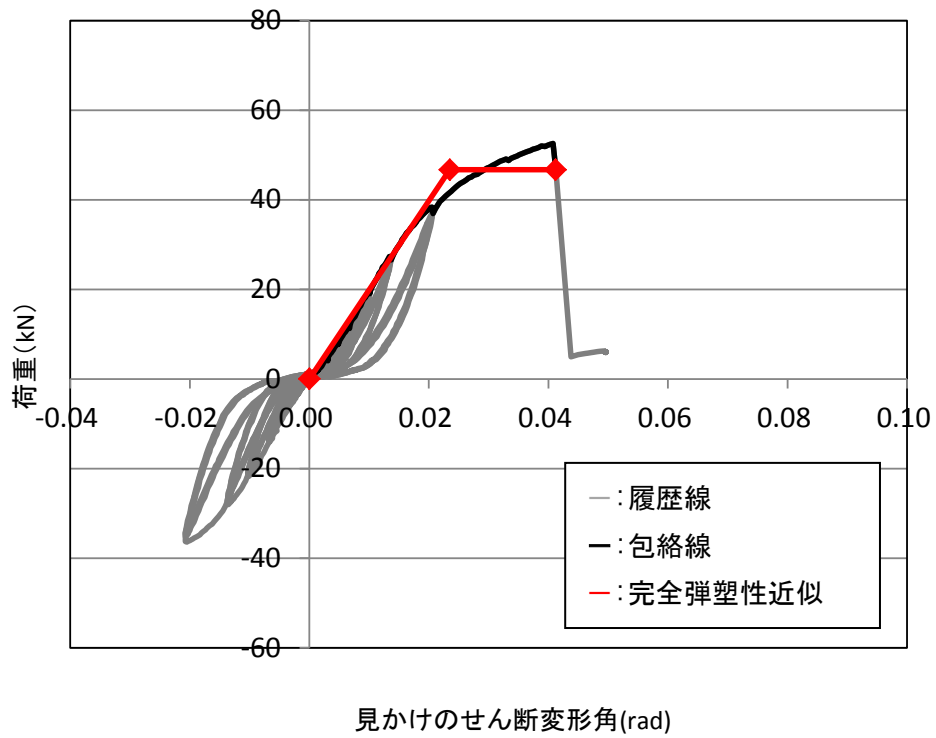


図 52 TYPE1 試験体結果 (落とし込み工法)

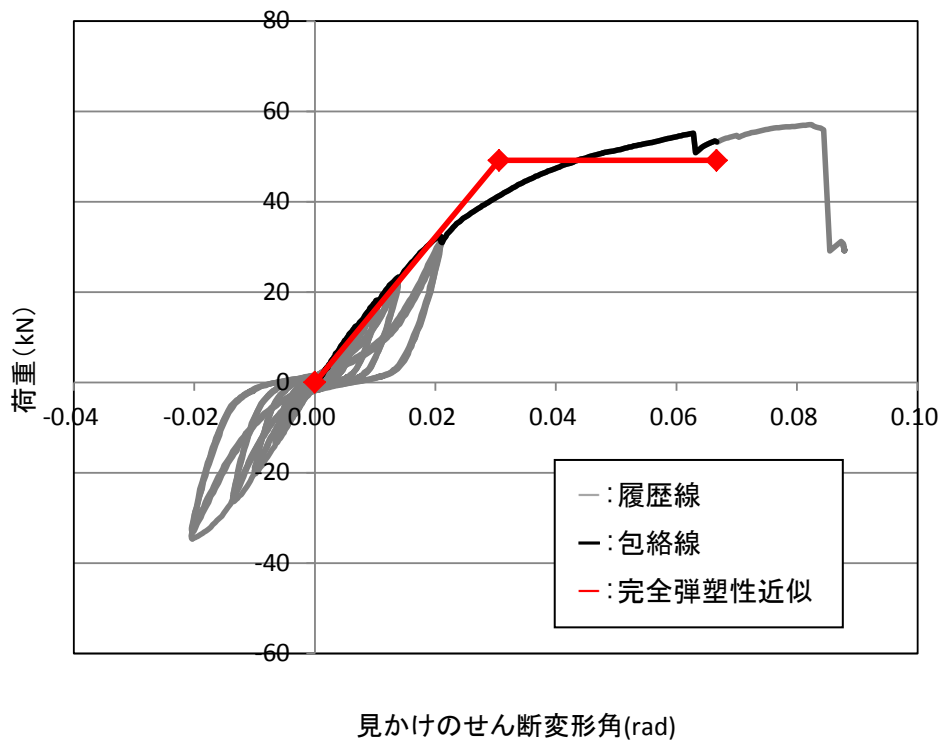


図 53 TYPE2 試験体結果 (はめ込み工法)

4. 4. 5 破壊性状

TYPE1 試験体の破壊性状は、CLT と柱材のビス接合においてせん断による微少な変形が生じた後、柱脚のホールダウン金物のボルトが破断し荷重が大きく低下した。これにより柱が梁を突き上げることで梁の曲げ破壊を生じた。TYPE1 試験体の破壊性状を図 54 に示す。



(i) 試験前



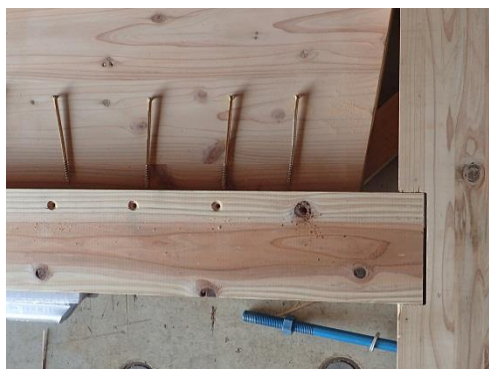
(ii) 終局状態



(iii) 柱脚部の破壊



(iv) 梁材の曲げ破壊



(v) ビスの微少な曲げ変形



(vi) 支圧によるビス穴の微少な変形

図 54 TYPE1 試験体の破壊性状

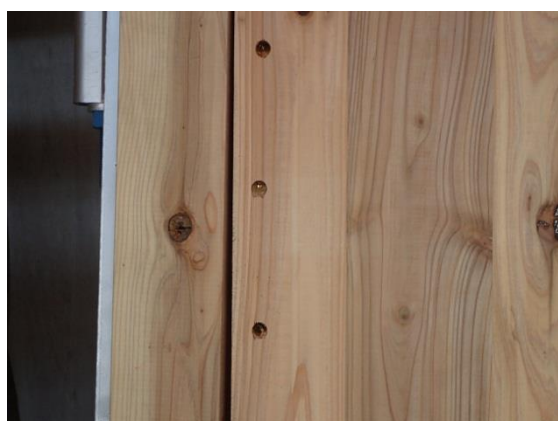
TYPE2 試験体の破壊性状は、CLT と柱材のビス接合に大きなせん断変形が生じた後、梁材の柱材の突き上げによる曲げ破壊により終局状態となった。ただし、終局時の変形量は $1/15$ を超える $1/12$ 程度の大きな変形であった。TYPE2 試験体の破壊性状を図 55 に示す。



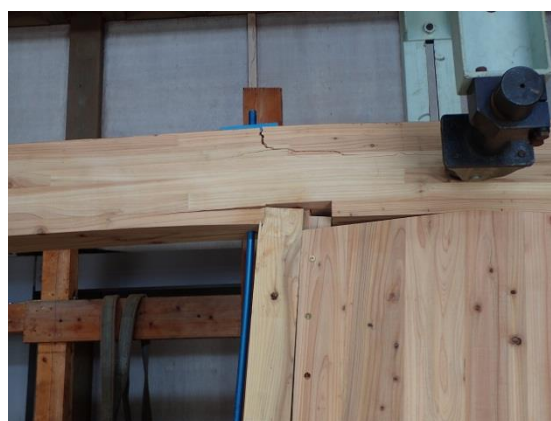
(i) 試験前



(ii) 終局状態



(iii) CLT へのビス頭のめり込み



(iv) 梁材の曲げ破壊



(v) ビスの曲げ変形と柱材の割裂破壊



(vi) CLT のビス穴の変形

図 55 TYPE2 試験体の破壊性状

4. 4. 6 まとめ

本試験により、壁倍率 8 倍程度の高耐力壁を開発することが出来た。特に TYPE2 試験体は、終局時にビスが大きく変形するなど、ビスのせん断性能を十分に発揮した靱性のある高耐力壁となった。ただし、落とし込み仕様の TYPE1 試験体はホールダウンの引張破壊となった。高強度な耐力壁の場合には、各接合部を固定する接合方法にも高耐力が必要とされる。特に柱脚の引き抜き耐力は、その壁倍率に応じて大きくなる。本試験においても、ビスのせん断性能が十分発揮される前にホールダウンが引張破壊するなど、今後改良が必要であると考え。はめ込み仕様の TYPE2 試験体については、今後施工性を見据えた各部材間のクリアランスを考察することで、利用しやすい高耐力壁になると考える。

4. 4. 7 文献

- 1) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計 2008 年版:(財)日本住宅・木材技術センター編、2009、pp.570-574

5 おわりに

本事業の最大の目的は、一つには、非住宅等への需要が大きく期待されている CLT として宮崎県産スギを展開させるための各種設計基準値を明らかにすること、もう一つは、本事業名「宮崎県産スギを用いた新たな CLT の開発」のうち「新たな CLT」が意味する「幅はぎを施したラミナで構成された CLT」(以下、幅はぎあり CLT)の性能を確認し、一般的に使用されている幅はぎを施さないラミナによる CLT(以下、幅はぎなし CLT)との性能比較からその優位性を確認することにあつた。その背景には、幅はぎあり CLT の性能に関するデータが現状では皆無に近いこと、今年度中に県内集成材企業(ウッドエネルギー協同組合)が幅はぎあり CLT による JAS(直交集成板の日本農林規格)認定を取得する見込みであること、さらには宮崎市に建設予定の 10 階建て鉄骨造建築物(宮崎県防災拠点庁舎)の耐力壁に幅はぎあり CLT を用いる計画であること等から、県内関連企業のバックアップのみならず、早急な設計基準値の確認が必要であつたことが挙げられる。

結果として、各種力学的性能や接合性能(LSB の引き抜き性能)に関しては、幅はぎあり CLT と幅はぎなし CLT の間に顕著な差異は認められなかったが、その一方で、長期性能(面外曲げクリープ性能)に関しては、比較的明確な幅はぎあり CLT の優位性が認められ、幅はぎなし CLT に比べて試験体間のばらつきが極めて少ない安定した傾向を示した。ただし、何れの CLT も、曲げ強さについては全条件で JAS 基準値を大幅に上回り、せん断強さについても全条件で「直交集成板の適正製造基準」に示された適合基準を上回った。さらに縦圧縮強さについても、強軸試験体ではスギ製材(無等級材)の基準強度を上回り、クリープ調整係数(負荷 50 年後の相対クリープ)も建設省告示 1459 号の変形増大係数の範囲内に収まった。これらの結果を総合的に見れば、前述したように幅はぎあり CLT の力学的優位性は認められるものの、幅はぎなし CLT を用いた場合も含めて、宮崎県産スギを用いた CLT の力学的性能は、構造部材としての要求性能を十分に満たすと結論づけて良いだろう。

この報告書の作成を開始してまもなく、国土交通省が CLT を用いた建物の構造設計法や技術的な基準などの告示案についてのパブリックコメントを公示し、2016 年 4 月ごろには交付・施行の見込みとなった。これにより CLT を取り巻く状況は大きく転換することが期待されるが、その一方で、CLT を構造部材として一般化するためには、材料分野、構造分野の双方から解決すべき課題も山積している。その意味から、本研究で得られた成果は CLT の材料特性や構造特性を新たな視点から捉えるものであり、各種の課題解決の一助になるはずである。今後、あらゆる場面で今回の成果が活用されることを期待するとともに、将来的な宮崎県産スギ CLT の普及と宮崎県産材の需要拡大に貢献出来れば幸いである。

最後に、本事業の実施に当たっては、様々な研究者、事業者、行政担当者のご尽力を賜り、事業の推進に関するご助言、ご協力をいただいた。この場を借りて関係各位に厚くお礼を申し上げる。とりわけ、試験全般に渡って多くのご助言を賜った(国研)森林総合研究所複合材料研究領域集成加工担当チーム長の宮武敦氏と(地独)北海道立総合研究機構林産試験場技術部研究主査の大橋義徳氏には重ねて深甚の謝意を表したい。