

# スギ及びカラマツによる異樹種積層集成材の製造と強度性能

橋爪丈夫・伊東嘉文・吉田孝久

スギ縦継ぎラミナとカラマツ縦継ぎラミナの強度試験、およびスギ・カラマツ異樹種積層集成材の強度試験を行い、以下の結果を得た。①曲げヤング係数の平均値 ( $MOE_{AVG}$ ) で区分したスギ縦継ぎラミナはロットとして JAS 基準を満たした。 $MOE_{AVG}$  区分カラマツ縦継ぎラミナはロットとして JAS 基準を満たさなかったが、曲げヤング係数の最小値 ( $MOE_{MIN}$ ) で区分すると JAS の基準強度を満たした。② $MOE_{AVG}$  区分したラミナ構成の異樹種積層集成材で曲げ強度・引張り強度で基準強度に満たない試験体があった。 $MOE_{MIN}$  区分したラミナ構成の異樹種積層集成材でも曲げ強度では想定した基準強度を満たしたが、引張り強度では基準に満たない試験体があった。③異樹種積層集成材のめり込み強さ、せん断強さを明らかにした。④スギはヤング係数に対して曲げ強度値、引張り強度値が高い傾向にあり、カラマツには逆の傾向が認められ、お互いが補う形での異樹種積層集成材の意義が認められた。

キーワード: 異樹種積層集成材, スギ, カラマツ, 縦継ぎラミナ, 強度試験

## 1 緒言

我が国の集成材の歴史は昭和20年代後半に始まったとされる<sup>1)</sup>。十分に乾燥し、等級区分されたラミナから製造される集成材は狂い等が少なく、強度的な信頼性が高いことから、その生産量は年々増大を続け、平成17年の生産量は造作用20万2千 $m^3$ 、構造用130万9千 $m^3$ である<sup>2)</sup>。構造用の中でも一般住宅に使用される中断面が59万4千 $m^3$ 、小断面が64万6千 $m^3$ と生産量の95%を占める<sup>2)</sup>。

規格面では昭和49年に集成材の日本農林規格が制定され、昭和61年に構造用大断面集成材の日本農林規格も制定された。その後、数度の改正が行われ現在に至っている<sup>1), 3)</sup>。

本研究は独立行政法人森林総合研究所(以下森林総研)における交付金プロジェクト「スギ等地域材を用いた構造用新材料の開発と評価(平成17~19年度)」(課題番号:200503)によって実施した。

プロジェクトには森林総研に加え、10道府県の林業・林産関係の試験研究機関が参加して行われた。実施課題名:実施道府県は次のとおりである。

- (1) 幅はぎ・台形ラミナ集成材の製造と評価:宮崎・岩手・岡山・宮城・京都
- (2) 異樹種積層集成材の製造と試験方法:北海道, 長野, 富山, 広島, 愛媛
- (3) 耐火性能付与と評価:森林総研
- (4) 接合強度評価:森林総研
- (5) 耐久性評価:森林総研
- (6) 接着技術の高度化と評価:森林総研
- (7) 規格化と建築への適用:森林総研
- (8) 厚物構造用合板の製造と適用:森林総研
- (9) 加工課程における供給拡大条件:森林総研

研究成果は年度ごとに報告、検討が加えられ、特に

(1), (2)の成果は、集成材の日本農林規格の最終改正<sup>3)</sup>につながった。すなわち、従来は使用できなかったL30, L40の低位等級ラミナが使用可能となり、特定対称構成(曲げ性能を優先したラミナ構成)が新設され、異樹種や等級が大きく異なるラミナ構成の集成材が規格化された<sup>3)</sup>。

プロジェクト全体の成果は森林総研により平成20年度中に取りまとめられる予定である。

このプロジェクトの中で当センターはスギ・カラマツ異樹種積層集成材の性能評価を担当した。スギおよびカラマツは本県の代表的な樹種であり、これらの用途拡大に資することを目的とし、縦継ぎスギラミナ、同カラマツラミナの曲げ・引張り・圧縮試験、異樹種積層集成材の曲げ・引張り・圧縮・めり込み・せん断試験を実施した。

なお、本研究におけるラミナおよび集成材のすべての試験体製造は齋藤木材工業株式会社ナガト工場に委託した。

## 2 縦継ぎラミナの強度試験

### 2.1 研究方法

ラミナの強度試験は平成17年度と19年度に行った。表2-1に樹種、試験の種類、ラミナの等級区分の方法、試験体数、実施年度を示した。

#### 2.1.1 ラミナの乾燥と等級区分

スギラミナの乾燥は最高温度90℃、乾燥期間:7~10日で行い、カラマツラミナの乾燥は最高温度95℃、乾燥期間:約4日間で行った。

ラミナの等級区分は連続測定式グレーディングマシンMGFS251<sup>4)</sup>(飯田工業(株)製)を用いて行った。

この装置はラミナがローラー間を通過する間に、長さ方向に5.6cmピッチで分割して曲げヤング係数

(MOE)を連続測定し、連続測定した MOE の平均値 (MOE<sub>AVG</sub>)あるいは下限値 (MOE<sub>MIN</sub>)で等級区分する。本研究におけるラミナの等級区分は平成 17 年度は MOE<sub>AVG</sub>, 平成 19 年度は MOE<sub>MIN</sub>で行った。

表2-1 ラミナの強度試験の整理

樹種	試験の種類	ラミナの等級	等級区分の方法	試験体数	実施年度
スギ	B・T・C	L60	MOE <sub>AVG</sub>	各40以上	17
		L70	〃	〃	〃
カラマツ	B・T・C	L90	MOE <sub>AVG</sub>	〃	〃
		L100	〃	〃	〃
		L110	〃	〃	〃
カラマツ	B・T	L90	MOE <sub>MIN</sub>	〃	19
		L100	〃	〃	〃
		L110	〃	〃	〃
		L125	〃	〃	〃

B: 曲げ試験、T: 引張り試験、C: 圧縮試験  
 MOE<sub>AVG</sub>: 連続測定したMOEの平均値で等級区分  
 MOE<sub>MIN</sub>: 連続測定したMOEの最小値で等級区分

### 2.1.2 曲げヤング係数(MOE)の平均値(MOE<sub>AVG</sub>)で等級区分したスギ及びカラマツラミナの強度試験

平成 17 年度に、カラマツ 3 等級(L110, L100, L90), スギ 2 等級(L70, L60)の 4m ラミナから図 2-1 に示した縦継ぎラミナそれぞれの試験体を製造し、次の試験に供した。

- 1) 曲げ試験: スパン 630mm, 3等分点荷重条件で曲げ試験を行い曲げ強さ(σ<sub>b</sub>), 曲げヤング係数(E<sub>b</sub>)を算出した(写真 2-1)。また、縦振動法により動的ヤング係数(E<sub>fr</sub>)を測定した。
- 2) 引張り試験: 試験体長さ: 2000mm, チャック間隔 1000mm で引張り試験を行い、引張り強さ(σ<sub>t</sub>)を算出した(写真 2-2)。試験に先立ち、E<sub>fr</sub>, 非破壊による E<sub>b</sub> を測定した。
- 3) 圧縮試験: 試験体高さ: 180mm で縦圧縮試験を行い圧縮強さ(σ<sub>c</sub>)を算出した(写真 2-3)。

ラミナの縦継ぎ条件はフィンガー(長さ: 18.63mm, ピッチ: 6mm, 先端厚さ: 0.8mm, 底部幅: 0.6mm, スカーフ傾斜比: 1/8.1)は垂直型で、接着剤はレゾルシノール樹脂系(オオシカディアノール DF60)を用い、圧縮圧はカラマツ: 6.8N/mm<sup>2</sup>, スギ: 4.4N/mm<sup>2</sup>で接合した。試験体数は各条件 40 以上とした。

### 2.1.3 曲げヤング係数(MOE)の下限値(MOE<sub>MIN</sub>)で等級区分したカラマツラミナの強度試験

平成17年度に行った2.1.2の試験の結果、スギでは曲げ、引張り、圧縮ともロットとしてJASの基準を満たしたが、カラマツは曲げと引張りでロットとしてJASの基準を満たさなかった。そこで19年度に、MOE<sub>MIN</sub>で等級区分したカラマツラミナ4等級(L125, L110, L100, L90)

について曲げと引張り試験を追加的に行った。縦継ぎラミナの製造、および試験方法は2.1.2に示したそれと同じである。

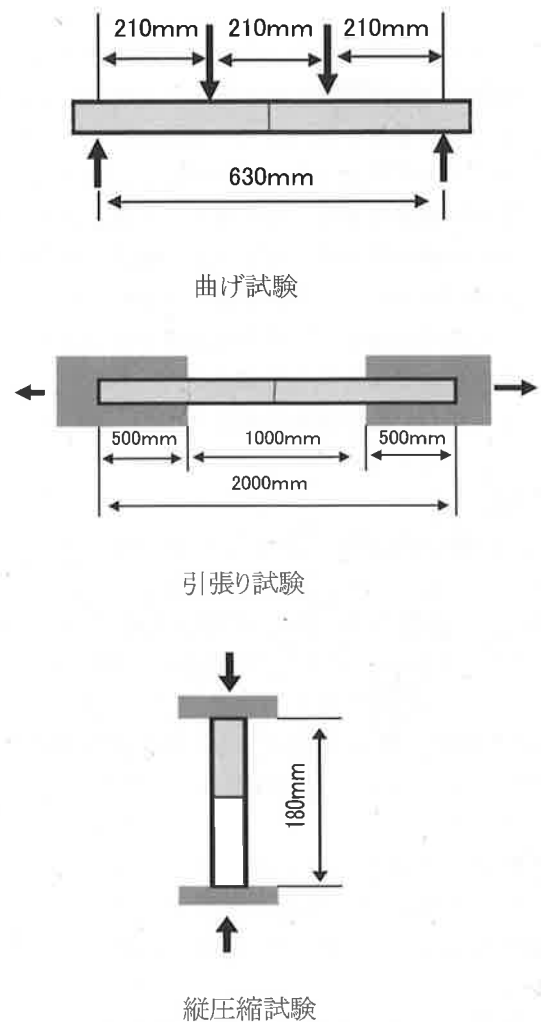


図 2-1 ラミナの強度試験



写真 2-1 ラミナの曲げ試験

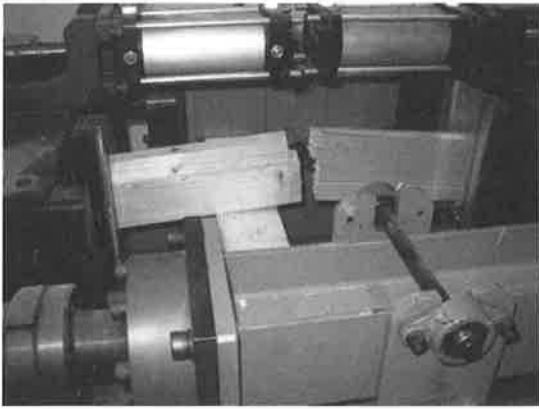


写真 2-2 ラミナの引張り試験



写真 2-3 ラミナの圧縮試験

## 2.2 結果と考察

### 2.2.1 ラミナの強度試験

#### 1) 縦振動ヤング係数(Efr)と曲げヤング係数(Eb)との関係とラミナの等級区分

Efr と Eb との関係を図 2-2 に示した。両者の関係は概略  $E_b = 0.93 \cdot E_{fr}$  の関係にあるといえた。

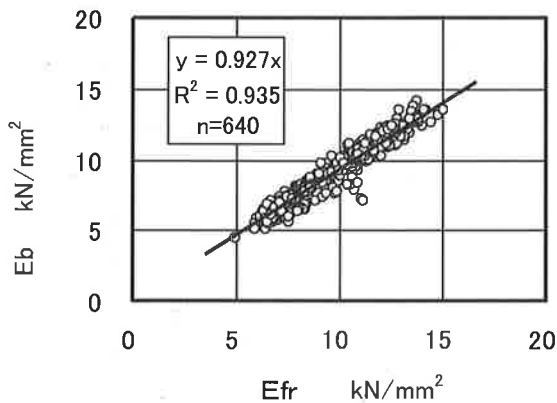


図 2-2 縦継ぎラミナの Efr と Eb との関係

平成 17 年度に  $MOE_{AVG}$  区分した 4m ラミナから製造した曲げ試験、引張り試験用の縦継ぎラミナの機

械等級と  $E_b$  との関係を図 2-3 に示した。さらに平成 19 年度に  $MOE_{MIN}$  により等級区分したカラマツ縦継ぎラミナの機械等級と  $E_b$  との関係を図 2-4 に示した。 $MOE_{AVG}$  等級は  $E_b$  の平均値と対応し、 $MOE_{MIN}$  等級は 5% 下限値と対応しており、グレーディングマシンによるラミナの等級区分は適正になされていたといえる。

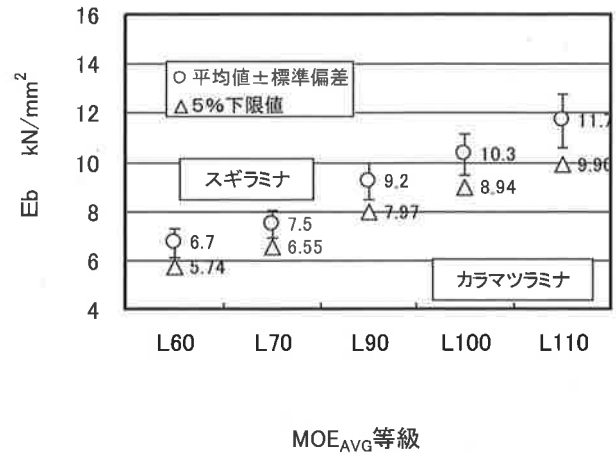


図 2-3  $MOE_{AVG}$  区分ラミナの等級と  $E_b$  との関係

L60~L70:スギラミナ, L90~L110:カラマツラミナ

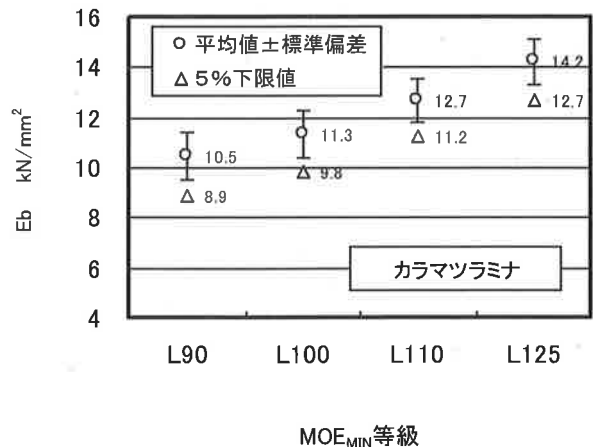


図 2-4  $MOE_{MIN}$  区分カラマツラミナの等級と  $E_b$  との関係

#### 2) ラミナの曲げ試験結果

縦継ぎラミナの曲げ試験の結果を図 2-5、図 2-6、表 2-2、表 2-3 に示した。

図 2-5 に示したように  $MOE_{AVG}$  区分スギラミナは曲げ強さ ( $\sigma_b$ ) の平均値および下限値とも JAS 基準を満たしたが、カラマツラミナのそれは  $\sigma_b$  の平均値、下限値とも JAS 基準を満たさなかった。なお、過去に行った試験<sup>6)</sup>では縦継ぎのない  $MOE_{AVG}$  区分カラマツ

ツラミナの  $\sigma b$  は JAS 基準を満たしており<sup>6)</sup>、本試験の結果は縦継ぎの影響を受けていると考えられる。一方、図 2-6 に示したように MOE<sub>MIN</sub> 区分縦継ぎラミナでは JAS 基準を満たした。これにより、現行 JAS 基準を満たすためにはスギラミナは MOE<sub>AVG</sub> 区分、カラマツは MOE<sub>MIN</sub> で等級区分する必要性が認められた。

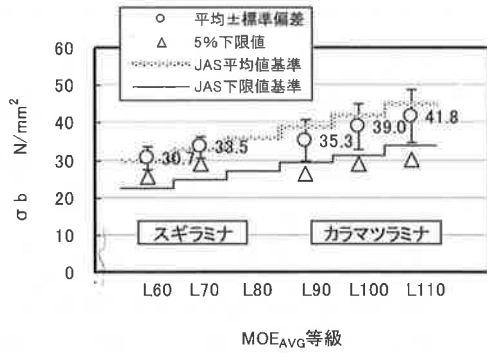


図 2-5 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナの等級と  $\sigma b$  の関係

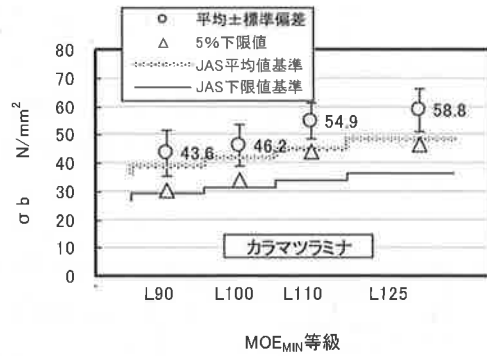


図 2-6 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナの等級と  $\sigma b$  との関係

表 2-2 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナの曲げ試験結果

樹種	等級	試験体数	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Eb kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma b$ N/mm <sup>2</sup>	
スギ	L60	45	平均	361	9.1	6.9	6.5	30.7
			最小	309	8.0	5.0	4.5	22.9
			最大	413	10.4	8.1	8.0	37.9
			CV %	7.0	5.2	8.0	9.7	10.2
	L70	42	平均	369	9.3	8.0	7.4	33.5
			最小	327	8.5	6.6	6.0	28.5
カラマツ	L90	42	平均	457	8.7	10.2	9.3	35.3
			最小	413	8.0	8.7	8.2	22.8
			最大	536	9.3	13.2	11.7	51.1
			CV %	6.2	3.3	8.2	7.8	15.5
	L100	41	平均	496	9.3	11.0	10.1	39.0
			最小	439	8.5	9.4	8.8	27.8
L110	43	最大	554	10.3	12.9	11.7	54.8	
		平均	510	9.3	12.7	11.4	41.8	
		最小	464	8.5	11.2	9.9	25.5	
			最大	601	10.5	14.8	13.4	57.6
			CV %	5.6	5.5	6.5	7.5	17.0

Efr: 縦振動法によるヤング係数, Eb: 曲げ試験時に測定した曲げヤング係数  
 $\sigma b$ : 曲げ強さ, CV: 変動係数

表 2-3 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナの曲げ試験結果

樹種	等級	試験体数	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Eb kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma b$ N/mm <sup>2</sup>	
カラマツ	L90	51	平均	504	9.8	10.5	10.3	43.6
			最小	413	8.7	8.0	7.6	27.0
			最大	579	12.8	12.6	12.3	59.0
			CV %	7.3	11.5	10.0	8.2	18.3
	L100	52	平均	512	10.1	11.9	11.5	46.2
			最小	450	8.7	8.2	9.3	30.4
			最大	596	12.1	13.5	13.1	63.2
			CV %	6.5	9.2	8.5	6.7	16.1
	L110	53	平均	552	10.8	13.5	12.7	54.9
			最小	480	9.2	11.2	11.2	36.4
			最大	620	13.2	15.2	14.2	71.3
			CV %	5.3	10.4	7.0	5.8	11.8
L125	47	平均	562	10.7	15.1	14.5	58.8	
		最小	510	9.3	13.7	12.7	45.0	
		最大	622	12.6	16.9	16.3	71.6	
		CV %	5.2	8.4	5.3	5.5	12.7	

Efr: 縦振動法によるヤング係数, Eb: 曲げ試験時に測定した曲げヤング係数  
 $\sigma b$ : 曲げ強さ, CV: 変動係数

3) ラミナの引張り試験結果

縦継ぎラミナの引張り試験結果を図 2-7, 図 2-8, 表 2-4, 表 2-5 に示した。MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナではスギは概ね JAS 基準を満たしているといえるが、カラマツは平均値, 下限値とも基準を満たさなかった。なお、縦継ぎのない MOE<sub>AVG</sub> 区分カラマツラミナの試験<sup>6)</sup>においても引張り強さ( $\sigma t$ )は JAS 基準を満たさなかった。図 2-8 に示したように L90 と L100 で平均値が逆転したが、MOE<sub>MIN</sub> 区分カラマツラミナの  $\sigma t$  は  $\sigma b$  と同様、概略基準を満たしているといえた。

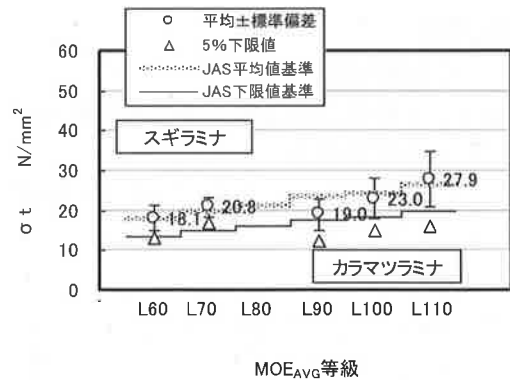


図 2-7 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナの等級と  $\sigma t$  との関係

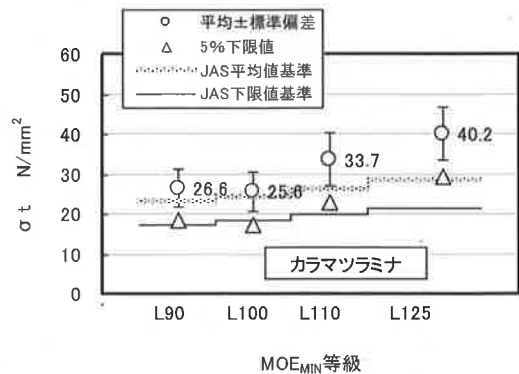


図 2-8 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナの等級と  $\sigma t$  との関係

表 2-4 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナの引張り試験結果

樹種	等級	試験体数		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	σ t N/mm <sup>2</sup>
スギ	L60	41	平均	366	8.4	7.1	18.1
			最小	322	7.3	6.2	9.5
			最大	409	10.1	8.2	26.7
			CV %	6.2	7.2	6.9	17.1
	L70	41	平均	363	8.5	7.9	20.8
			最小	328	7.7	6.5	14.6
			最大	399	9.8	8.8	25.8
CV %	5.5	5.2	7.2	11.0			
カラマツ	L90	45	平均	448	8.7	9.6	19.0
			最小	406	8.0	8.0	8.5
			最大	498	9.4	11.3	28.6
			CV %	5.3	3.3	7.1	20.8
	L100	43	平均	491	8.8	11.1	23.0
			最小	440	7.9	9.3	13.5
			最大	559	10.0	12.6	35.3
			CV %	6.2	6.2	6.8	21.6
	L110	45	平均	503	9.2	12.5	27.9
			最小	466	8.1	6.9	14.5
			最大	574	11.4	14.1	44.2
			CV %	4.5	8.1	9.7	25.3

Efr: 縦振動法によるヤング係数  
σ t: 縦引張り強さ、CV: 変動係数

表 2-5 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナの引張り試験結果

樹種	等級	試験体数		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	σ t N/mm <sup>2</sup>
カラマツ	L90	48	平均	482	9.7	11.1	26.6
			最小	417	8.5	8.4	16.4
			最大	562	12.9	13.6	35.9
			CV %	7.1	11.1	9.5	18.3
	L100	47	平均	491	9.9	11.9	25.6
			最小	434	8.6	9.9	16.6
			最大	548	12.8	13.9	36.7
			CV %	6.7	12.2	8.0	19.4
	L110	49	平均	527	10.6	13.4	33.7
			最小	466	8.6	11.8	20.1
			最大	592	13.1	15.5	51.7
			CV %	5.5	11.4	6.8	19.5
	L125	47	平均	544	10.5	15.1	40.2
最小			502	8.9	13.3	26.6	
最大			587	12.2	16.8	52.9	
CV %			4.2	9.2	5.4	16.3	

Efr: 縦振動法によるヤング係数  
σ t: 縦引張り強さ、CV: 変動係数

#### 4) ラミナの圧縮試験の結果

ラミナの圧縮試験の結果を図 2-9、表 2-6 に示した。図に示すように圧縮強さ(σ c)は MOE<sub>AVG</sub> 等級に対応していた。集成材の JAS にはラミナの圧縮強さの規定はないため JAS との関連で考察はできなかった。

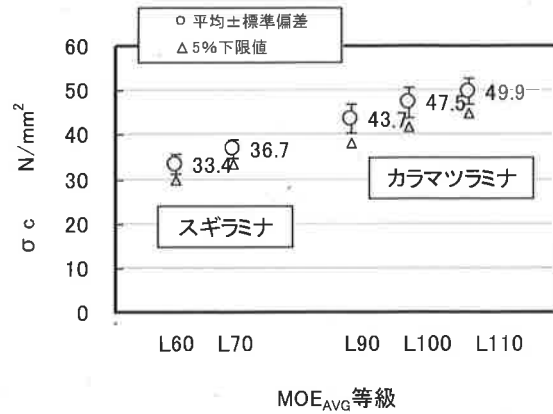


図 2-9 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナの圧縮試験結果

表 2-6 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナの縦圧縮試験結果

樹種	等級	試験体数		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	σ c N/mm <sup>2</sup>
スギ	L60	42	平均	362	8.6	7.0	33.4
			最小	324	7.7	6.0	29.1
			最大	403	9.6	8.1	37.9
			CV %	5.6	5.3	7.3	6.6
	L70	43	平均	372	8.8	8.0	36.7
			最小	334	8.1	6.5	32.1
			最大	416	10.6	8.9	43.3
CV %	5.9	6.2	6.1	5.8			
カラマツ	L90	42	平均	465	8.2	10.0	43.7
			最小	401	7.7	8.0	36.1
			最大	566	9.5	11.2	51.7
			CV %	6.8	4.4	6.9	7.7
	L100	42	平均	492	8.7	11.0	47.5
			最小	448	7.9	9.2	41.3
			最大	551	10.3	12.9	55.8
			CV %	5.6	6.6	6.6	7.3
	L110	43	平均	500	8.8	12.2	49.9
			最小	438	7.9	10.0	42.6
			最大	565	10.1	15.1	55.5
			CV %	5.2	4.8	7.7	6.1

Efr: 縦振動法によるヤング係数  
σ c: 縦圧縮強さ、CV: 変動係数

#### 5) 曲げヤング係数(Eb)と曲げ強さ(σ b)、引張り強さ(σ t)、圧縮強さ(σ c)との関係

Eb と σ b、σ t、σ c との関係を図 2-10、図 2-11、図 2-12 にそれぞれ示した。図における原点を通る回帰式の傾きは Eb に対する強さそれぞれの平均値の比(σ b/Eb、σ t/Eb、σ c/Eb)を表しており、それぞれにおいてカラマツよりもスギのほうが大きい。このことが、MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナが JAS 基準を満たせなかった原因と考えられ、カラマツという樹種特性について、乾燥温度の影響を含め検討する必要がある。

なお、ラミナは等級区分されたものから比較的狭い範囲で選定しているため、Eb の範囲が狭く、相関係数は強くないが、図中に決定係数 R<sup>2</sup> も示した。

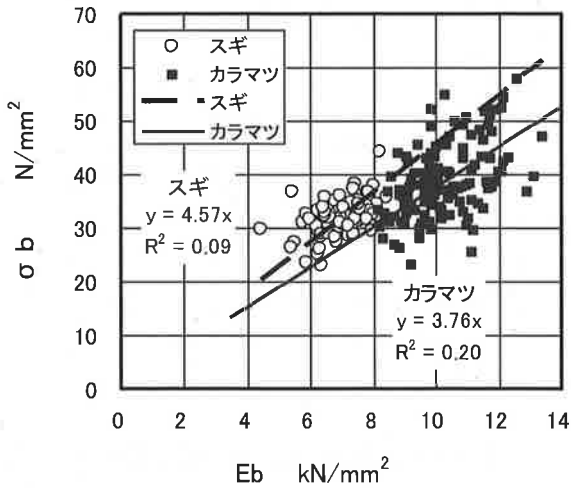


図 2-10 縦継ぎラミナの Eb と  $\sigma_b$  との関係

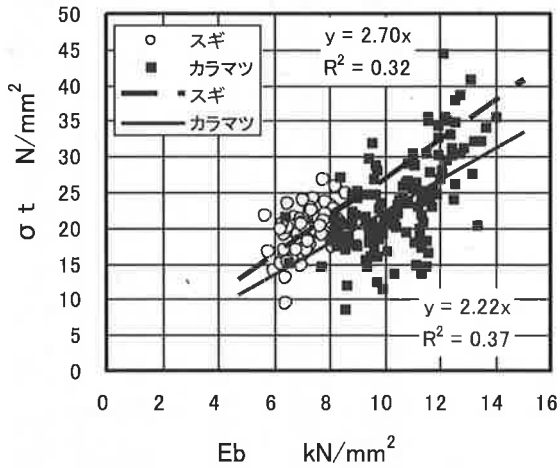


図 2-11 縦継ぎラミナの Eb と  $\sigma_t$  との関係

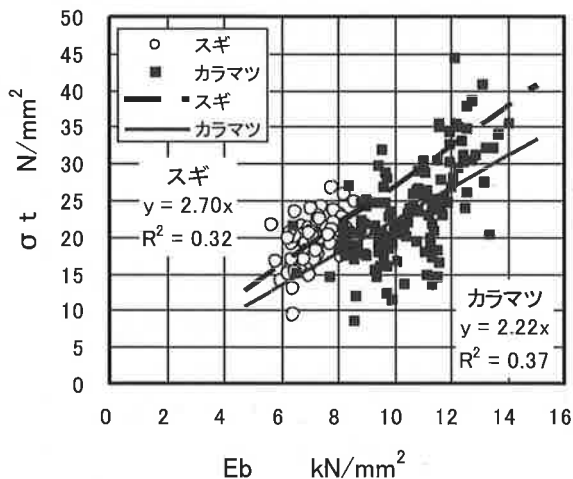


図 2-12 縦継ぎラミナの Eb と  $\sigma_c$  との関係

### 3 集成材の強度試験

#### 3.1 研究方法

集成材の強度試験は平成17, 18, 19の3ヶ年にわたって行った。表3-1にその概要を示した。

表 3-1 集成材種類, 強度試験の区分, ラミナ構成, ラミナの等級区分, 試験体数, 実施年度

種類	試験の種類	ラミナ構成	ラミナの等級区分	試験体数	実施年度
異樹種10層	B・T・C	構成1	MOE <sub>AVG</sub>	各6(Bは8)	17
	B・T	構成1	MOE <sub>MIN</sub>	各3	19
カラマツ10層	B・T	構成2	〃	各3	〃
異樹種5層	めり込み	構成3、4	MOE <sub>AVG</sub>	各30	18
	せん断	〃	〃	各30	〃
	非破壊	〃	〃	各30	〃

B: 曲げ試験, T: 引張り試験, C: 圧縮試験  
 MOE<sub>AVG</sub>: 連続測定したMOEの平均値で等級区分  
 MOE<sub>MIN</sub>: 連続測定したMOEの最小値で等級区分  
 めり込み: 縦使い, 平使いの2種類  
 せん断: JISいす型, 実大いす型, 3点曲げ, 5点曲げの4種類  
 非破壊: たわみ振動法によりせん断弾性係数Gを算出した。

#### 3.1.1 集成材の製造

##### 1) 曲げ, 引張り及び縦圧縮試験用集成材の製造

平成17年度はMOE<sub>AVG</sub>で等級区分したラミナを用い, 図3-1の構成1に示したスギ・カラマツ異樹種積層集成材を製造し, 曲げ, 引張り, 圧縮試験を行った。その結果, 集成材の曲げ強さで1/2が, 引張り強さでは全数がJASの基準強度以下であったので, 19年度に, MOE<sub>MIN</sub>で等級区分したラミナで異樹種積層集成材を製造し, 曲げ, 引張り試験を追加した(図3-1, 構成1)。さらに, カラマツ単一樹種集成材(構成2)の試験を追加した。製造した構成1の異樹種積層集成材はJASの強度等級E95-F270に極めて近く, 構成2のカラマツ集成材のJAS等級はE95-F270である。よって, 本研究における集成材の強度評価はE95-F270の基準値と比較することによって行った。

集成材の製造条件は, 接着剤: レゾルシノール・フェノール樹脂接着剤, 接着剤メーカー: (株)オーシカ(型番: デイアノール D-300), 圧縮圧力: 0.8N/mm<sup>2</sup>(スギ+カラマツ), 圧縮時間: 18 時間, プレス方式: 油圧式冷圧プレス, 接着温度: 15°C以上とした。

##### 2) せん断, めり込み試験用集成材の製造

せん断, めり込み試験用に製造した2種類の異樹種積層集成材のラミナ構成を図3-2に示した。幅120mm, 高さ150mm, 長さ6000mmの異樹種積層集成材から, 試験材を図3-3に示したように切り出した。

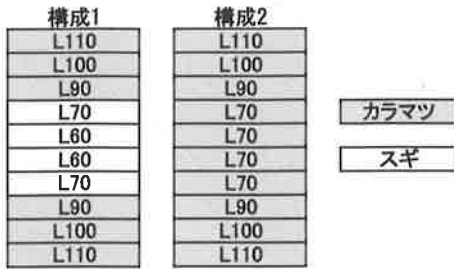


図 3-1 集成材のラミナ構成(曲げ, 縦圧縮, 縦引張り試験用)

平成 17 年度は  $MOE_{AVG}$  で等級区分したラミナを用い, 構成 1 の集成材を製造した。平成 19 年度は  $MOE_{MIN}$  で等級区分したラミナを用い, 構成 1, 構成 2 の集成材を製造した。



図 3-2 集成材のラミナ構成(めり込み, せん断試験用) ラミナの等級区分は  $MOE_{AVG}$  で行い, 試験は平成 18 年度に実施した。

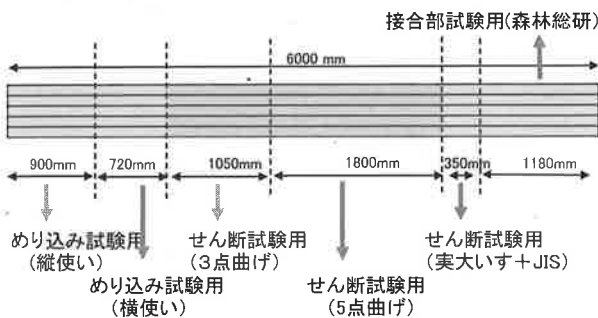


図 3-3 せん断, めり込み試験用集成材の区分  
接合部試験は別途森林総研が担当した。

### 3.1.2 集成材の強度試験

#### 1) 曲げ試験

試験は実大材曲げ試験機((株)島津製作所製 UH-1000kNA)によりスパン 5400mm, 上部荷重点間距離 1200mm の 3 分点 4 点荷重条件, クロスヘッドスピード:10mm/min で行った(図 3-4, 写真 3-1)。次式により曲げ強さ ( $\sigma_b$ ) と曲げヤング係数 ( $E_b$ ) を算出した。

$$\sigma_b = a \cdot P_m / 2Z [N/mm^2]$$

$$E_b = a \{ (3L^2 - 4a^2) \Delta P \} / (48I \Delta y) [kN/mm^2]$$

ここで,

a: 支点-加力点間距離 (mm),  $P_m$ : 最大荷重 (N),  
L: スパン (mm), Z: 断面係数 =  $bh^2/6$ , b: 幅 (mm), h: 高さ (mm),  $\Delta P$ : 比例域における上位荷重と下位荷

重との差 (N),  $\Delta y$ :  $\Delta P$  に対応するスパン中央部の変位 (mm)

である。

#### 2) 引張り試験

森林総研にて, 前川試験製作所製 100t 実大材引張り試験機を用い, 寸法: 105 × 300 × 4000mm, チャック部分: 両端 500mm で実施した(図 3-5, 写真 3-2, 写真 3-3)。次式により引張り強さ ( $\sigma_t$ ) と引張りヤング係数 ( $E_t$ ) を算出した。

$$\sigma_t = P_m / A [N/mm^2]$$

$$E_t = \Delta P \cdot \ell / (\Delta \ell \cdot A) [kN/mm^2]$$

ここで,

$P_m$ : 最大荷重 (N), A: 断面積 ( $mm^2$ ),  $\Delta P$ : 比例域における上限荷重と下限荷重の差 (N),  $\ell$ : 評点距離 (mm),  $\Delta \ell$ :  $\Delta P$  に対応する伸び (mm)

である。

#### 3) 縦圧縮試験

試験は実大材圧縮試験機((株)島津製作所製 UH-2000kNA)を用い, 集成材: 寸法: 120 × 300 × 720mm で行った(図 3-6, 写真 3-4)。最大荷重から縦圧縮強さ ( $\sigma_c$ ) を算出した。

$$\sigma_c = P_m / A [N/mm^2]$$

ここで,

$P_m$ : 最大荷重 (N), A: 断面積 ( $mm^2$ )

である。

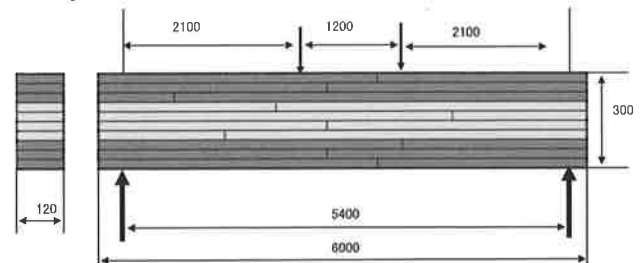


図 3-4 曲げ試験用集成材とスパン条件 (mm)

各層に 1 箇所縦継ぎ部を配置した。

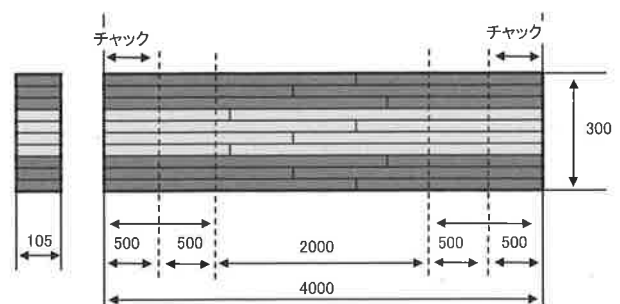


図 3-5 引張り試験用集成材とスパン条件 (mm)

中央 2000mm 区間内の各層に縦継ぎ部を配置した。

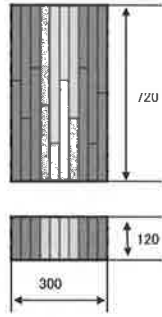


図 3-6 縦圧縮用試験材(単位:mm)



写真 3-3 集成材の引張り破壊



写真 3-1 集成材の曲げ試験



写真 3-4 集成材の圧縮試験

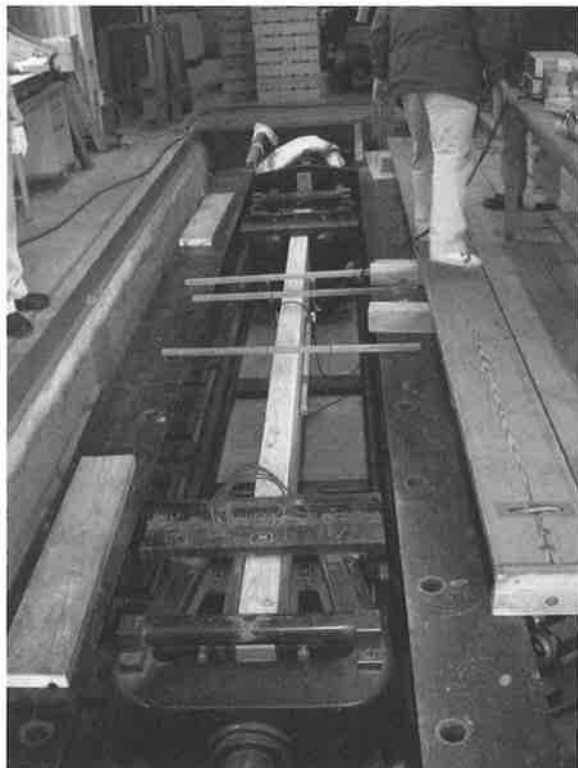


写真 3-2 集成材の引張り試験全景

#### 4)たわみ振動試験

たわみ振動試験は、3点曲げせん断試験材(1050mm)と5点曲げせん断試験材(1800mm)を切り出す前の2850mmの試験材で縦振動法により縦振動ヤング係数( $E_{fr}$ )を測定し、たわみ振動法によりせん断弾性係数( $G$ )を測定した(図 3-7)。計算ソフトは森林総研作製のものを用いた。

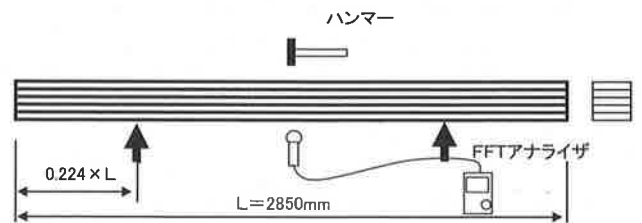


図 3-7 たわみ振動試験



#### 4) むり込み試験

むり込み試験体は 120×150×900mm(縦使い), 150×120×720mm(平使い)の 2 種類とした(図 3-8 写真 3-5, 写真 3-6)。試験方法は ISO 方式(全長=材せいの 6 倍, 材中間部上下加圧, 加圧板の幅は 90mm)とし, むり込み強さ( $f_c, 90$ ), むり込み降伏強さ( $f_c, 90, y$ ), むり込み剛性( $K_c, 90$ )を次式により求めた。

$$\text{むり込み強さ}(f_c, 90) = F_{ult} / (b \cdot l) [N/mm^2]$$

$$\text{むり込み降伏強さ}(f_c, 90, y) = F_y / (b \cdot l) [N/mm^2]$$

$$\text{むり込み剛性}(K_c, 90) = (\Delta F / \Delta w) / (b \cdot l) [kN/mm^3]$$

ここで,

$F_{ult}$ : 試験体が破壊したときの荷重, あるいは試験体に 20mm の変形が生じたときの荷重  $F_{20mm}$  の小さい方の荷重,  $F_y$ : 荷重変形曲線と, これの直線部分を延長し, さらに変形の増加方向に 2mm ずらした直線との交点における荷重,  $b$ : 試験体の幅,  $l$ : 加圧板の長さ(90mm),  $\Delta F / \Delta w$ : 荷重-変形曲線直線部分の荷重と変形の比である(以上図 3-9 参照)。



写真 3-5 むり込み試験(縦使い)

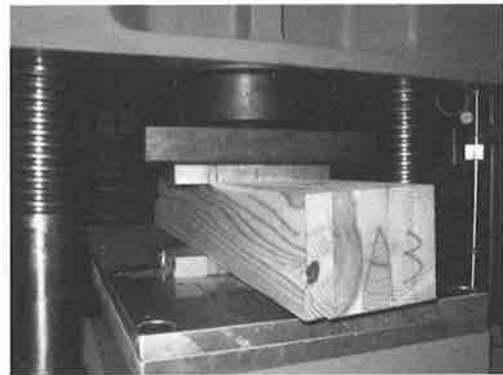


写真 3-6 むり込み試験(平使い)

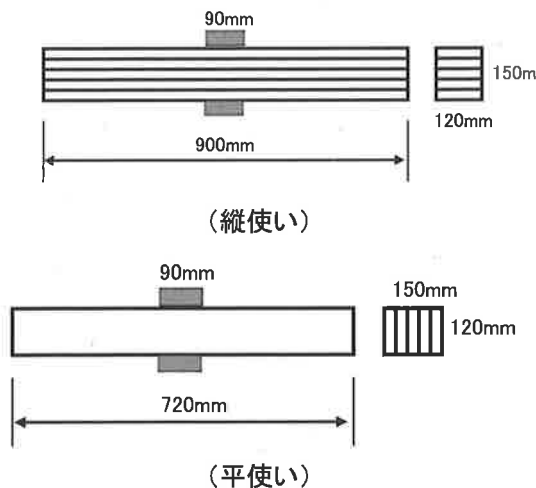


図 3-8 むり込み試験法

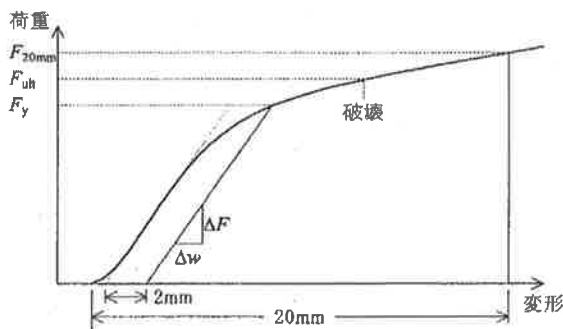


図 3-9 むり込み試験における荷重-変位曲線と  $F_y$  等の決定方法<sup>5)</sup>

#### 5) せん断試験

##### (1) JIS いす型試験

JIS いす型試験片の作成方法を図 3-10 に示した。JIS に基づく小試験体を内層ラミナから切り出したため試験材は全て L60 のスギラミナである(図 3-2 参照)。

##### (2) 実大いす型試験

実大いす型試験片の作製方法を図 3-11 に示した。図に示すようにこの場合もせん断面は L60 のスギラミナである。試験の様子を写真 3-7 に示した。

##### (3) 3 点曲げせん断試験

3 点曲げ ISO 方式の試験材寸法は 120×150×1050mmとし, スパンは材せいの 5 倍(750mm)として, 中央集中荷重の曲げ試験を行った(図 3-12)。試験の様子を写真 3-8 に示した。

##### (4) 5 点曲げせん断試験

5 点曲げせん断試験は 120×150×1800mm の試験材を用い, スパンを材せいの 10 倍(1500mm)とした 4 等分点 5 点荷重で曲げ試験を行った(図 3-13)。試験の様子を写真 3-9 に示した。

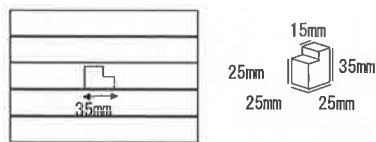


図 3-10 JIS いす型試験片の作製

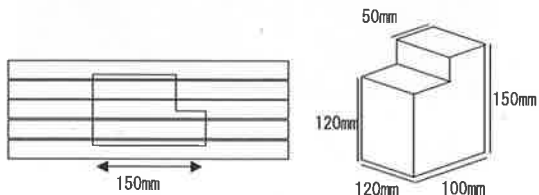


図 3-11 実大いす型試験片の作製

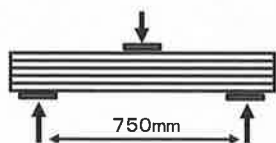


図 3-12 3点曲げせん断試験

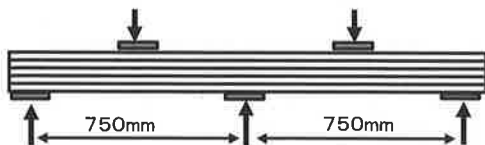


図 3-13 5点曲げせん断試験

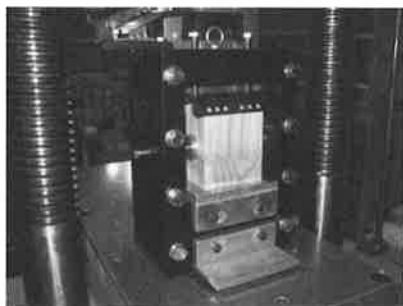


写真 3-7 実大ブロックせん断試験



写真 3-8 3点曲げせん断試験

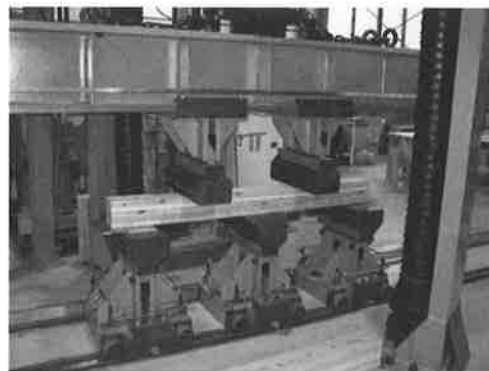


写真 3-9 5点曲げせん断試験

### 3.2 結果と考察

#### 3.2.1 集成材の曲げ, 引張り, 圧縮強度試験の結果

3.1.1 に示したとおり本研究における集成材の強度評価は E95-F270 の基準値と比較することによって行った。

平成 17 年度に実施した  $MOE_{AVG}$  区分ラミナで製造した集成材の強度試験の結果を図 3-14 に示した。曲げ試験結果では 8 試験体中 3 体が E95-F270 の基準強度 ( $27N/mm^2$ ) を下回った。引張り試験では 6 試験体とも基準強度 ( $18.6N/mm^2$ ) に満たなかった。圧縮試験では 6 試験体すべてが基準強度 ( $21.6N/mm^2$ ) 以上 (基準強度のほぼ 2 倍) であった。

この結果を受けて平成 19 年に  $MOE_{MIN}$  区分ラミナで製造した集成材の曲げ試験, 引張り試験の結果を図 3-15, 図 3-16 に示した。図に示したとおり曲げ試験では構成 1 の異樹種積層集成材, 構成 2 のカラマツ集成材とも JAS の基準強度を上回った。一方, 引張り試験では, 異樹種積層集成材が 1 体, カラマツ単一集成材は 3 体とも僅かであるが基準強度を下回った。

表 3-2 から表 3-7 に集成材の曲げ, 引張り, 圧縮試験の結果を示した

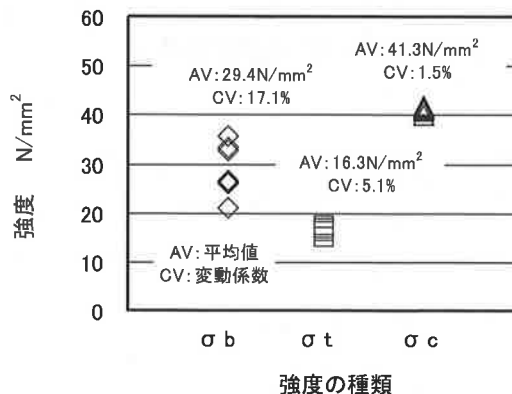


図 3-14  $MOE_{AVG}$  区分ラミナ構成異樹種積層集成材 (構成 1) の強度 (17 年度)

$\sigma_b$ : 曲げ強さ,  $\sigma_t$ : 引張り強さ,  $\sigma_c$ : 圧縮強さ

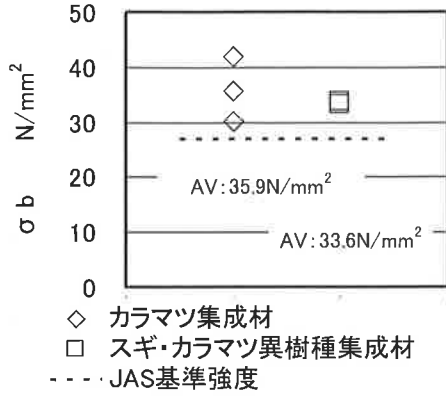


図 3-15 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナ構成集成材の曲げ強さ

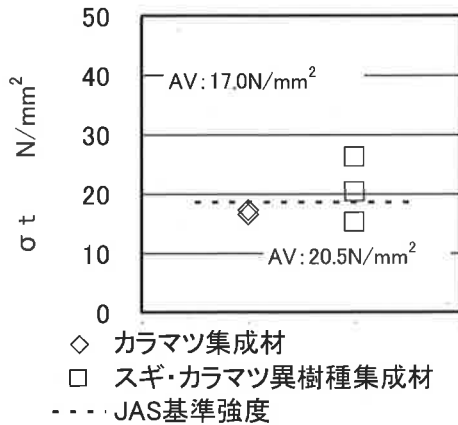


図 3-16 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナ構成集成材の引張り強さ

表 3-2 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナを使用した異樹種積層集成材の曲げ試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Eb kN/mm <sup>2</sup>	σb N/mm <sup>2</sup>
構成1	1	441	9.4	9.54	10.82	21.1
	2	434	9.2	9.52	10.71	26.1
	3	442	9.4	9.79	11.18	26.7
スギ カラマツ	4	441	9.6	10.17	11.31	32.9
	5	440	9.2	9.77	11.43	35.7
	6	430	9.4	9.79	11.17	26.3
	7	444	9.0	9.47	9.90	33.3
	8	443	9.2	9.46	9.98	32.9
平均値		440	9.3	9.7	10.8	29.3
CV %		1.1	2.0	2.5	5.4	17.1

Efr: 縦振動法によるヤング係数

Eb: 曲げ試験時に測定された曲げヤング係数

σb: 曲げ強さ、CV: 変動係数

表 3-3 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナを使用した異樹種積層集成材の曲げ試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Eb kN/mm <sup>2</sup>	σb N/mm <sup>2</sup>
構成1 スギ	1	445	11.1	10.32	10.9	33.8
	2	450	9.6	10.90	11.4	33.3
構成2 カラマツ	3	452	11.6	10.53	11.3	33.7
平均値		449	10.8	10.6	11.2	33.6
CV %		0.8	9.7	2.8	2.5	0.8

Efr: 縦振動法によるヤング係数

Eb: 曲げ試験時に測定された曲げヤング係数

σb: 曲げ強さ、CV: 変動係数

表 3-4 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナを使用したカラマツ集成材の曲げ試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Eb kN/mm <sup>2</sup>	σb N/mm <sup>2</sup>
構成2 カラマツ	1	479	9.8	11.04	11.1	41.8
	2	464	10.1	10.82	11.2	30.2
	3	481	10.4	11.23	11.6	35.7
平均値		475	10.1	11.0	11.3	35.9
CV %		2.0	3.0	1.9	2.5	16.2

Efr: 縦振動法によるヤング係数

Eb: 曲げ試験時に測定された曲げヤング係数

σb: 曲げ強さ、CV: 変動係数

表 3-5 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナを使用した異樹種積層集成材の引張り試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Et kN/mm <sup>2</sup>	σt N/mm <sup>2</sup>
構成1	1	445	9.2	9.4	10.6	17.3
	2	423	9.8	9.6	11.2	16.2
	3	440	9.8	9.4	10.8	16.1
スギ カラマツ	4	447	9.2	9.5	10.7	14.8
	5	441	9.4	9.6	11.1	16.8
	6	440	8.8	9.7	11.2	16.6
平均値		439	9.4	9.5	10.9	16.3
CV %		1.9	4.1	1.3	2.4	5.1

Efr: 縦振動法によるヤング係数、Et: 引張試験時に測定したヤング係数

σt: 引張り強さ、CV: 変動係数

表 3-6 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナを使用した異樹種積層集成材の引張り試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Et kN/mm <sup>2</sup>	σt N/mm <sup>2</sup>
構成1 スギ	1	456	11.8	10.7	10.5	20.3
	2	469	11.9	10.3	10.1	15.1
構成2 カラマツ	3	464	12.4	10.7	10.7	26.0
平均値		463	12.0	10.5	10.4	20.5
CV %		1.4	2.8	2.3	3.3	26.5

Efr: 縦振動法によるヤング係数、Et: 引張試験時に測定したヤング係数

σt: 引張り強さ、CV: 変動係数

表 3-7 MOE<sub>MIN</sub> 区分ラミナを使用したカラマツ集成材の引張り試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	Et kN/mm <sup>2</sup>	σt N/mm <sup>2</sup>
構成2 カラマツ	1	493	11.0	10.8	10.8	17.2
	2	480	10.6	10.9	10.6	16.5
	3	488	10.6	10.7	10.7	17.4
平均値		487	10.7	10.8	10.7	17.0
CV %		1.4	2.0	0.8	0.6	2.6

Efr: 縦振動法によるヤング係数、Et: 引張試験時に測定したヤング係数

σt: 引張り強さ、CV: 変動係数

表 3-8 MOE<sub>AVG</sub> 区分ラミナを使用した異樹種積層集成材の縦圧縮試験結果

構成	No.	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>
構成1	2	441	9.7	9.6	40.2
	3	448	9.8	9.4	41.7
スギ カラマツ	4	453	9.6	9.5	41.2
	5	450	9.5	9.6	40.9
	6	449	9.1	9.7	41.8
平均値		447	9.6	9.5	41.3
CV %		1.3	2.8	1.3	1.5

Efr: 縦振動法によるヤング係数  
σ<sub>c</sub>: 圧縮強さ、CV: 変動係数

### 3.2.2 集成材のたわみ振動試験結果

5層集成材のたわみ振動試験の結果を表3-9に示した。密度、縦振動ヤング係数、せん断弾性係数(G)の3者とも構成3が構成4を下回った。これは図3-2に示したとおり構成3と構成4の中間層がそれぞれスギのL70とカラマツL90であり、樹種による密度の違いと等級の違いが反映したものと考えられる。Efrとせん断弾性係数の比(Efr/G)は構成3が9.80、構成4が10.41であった。

表 3-9 5層異樹種積層集成材のたわみ振動試験結果

構成	試験 体数	密度 kg/m <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	せん断 弾性係数 N/mm <sup>3</sup>
構成3	30	平均	452	0.966
		最小	428	0.869
		最大	479	1.067
		CV %	3.0	5.2
構成4	30	平均	479	1.002
		最小	455	0.852
		最大	502	1.128
		CV %	2.5	5.7

Efr: 縦振動法によるヤング係数

### 3.2.3 むり込み試験結果

むり込み試験の結果を表3-10、表3-11に示した。むり込み強さについてみると、いずれの条件でも最小値は8N/mm<sup>2</sup>以上であり、カラマツ集成材の基準強度(7.8N/mm<sup>2</sup>)を満たしているものと判断できた。むり込み強さ(f<sub>c,90</sub>)について集成材の種類、荷重方向別に図3-17に示した。縦使い、平使いともカラマツラミナが2層の構成3が同4層の構成4を僅かに下回った。同一構成で比較すると、平使いと縦使いの差異はほとんどなかった。

表 3-10 集成材(構成3)のむり込み試験結果

構成	荷重 方向	試験 体数	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水 率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	むり込み 剛性 N/mm <sup>3</sup>	むり込み 降伏強さ N/mm <sup>2</sup>	むり込み 強さ N/mm <sup>2</sup>
構成3	縦 使い	30	平均	457	11.2	9.2	4.6	7.6
			最小	434	10.4	8.3	4.1	6.2
			最大	488	13.1	11.1	6.2	9.4
			CV %	3.3	4.8	6.1	9.2	10.4
	平 使い	30	平均	449	11.1	9.4	5.3	7.3
			最小	422	10.4	8.4	4.1	6.1
			最大	467	11.9	10.7	6.8	9.2
			CV %	2.6	3.3	5.2	11.4	9.9

Efr: 縦振動法によるヤング係数  
CV: 変動係数

表 3-11 集成材(構成4)のむり込み試験結果

構成	荷重 方向	試験 体数	密度 kg/m <sup>3</sup>	含水 率 (%)	Efr kN/mm <sup>2</sup>	むり込み 剛性 N/mm <sup>3</sup>	むり込み 降伏強さ N/mm <sup>2</sup>	むり込み 強さ N/mm <sup>2</sup>
構成4	縦 使い	30	平均	489	10.5	10.3	5.1	7.6
			最小	461	10.0	9.0	4.0	5.6
			最大	519	11.2	11.7	6.1	10.6
			CV %	2.9	2.8	5.9	11.4	15.4
	平 使い	30	平均	473	10.5	10.4	5.3	8.5
			最小	448	9.9	8.7	3.4	6.7
			最大	502	11.3	14.4	7.1	12.4
			CV %	3.1	3.2	9.3	13.8	14.2

Efr: 縦振動法によるヤング係数  
CV: 変動係数

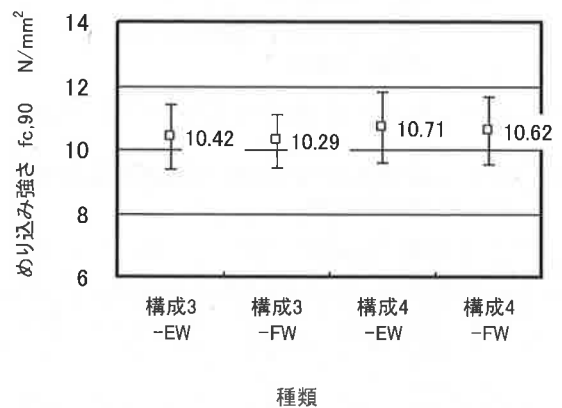


図 3-17 むり込み強さの比較(平均値と標準偏差)

構成3、構成4: 図3-2 参照

EW: 縦使い, FW: 平使い

### 3.2.4 せん断試験結果

せん断試験の結果を表3-12と表3-13に示した。せん断強さの試験方法別比較を図3-18に示した。

いす型試験でみると実大いす型試験で得られたせん断強さとJISいす型せん断試験で得られたそれとの比は約0.65であった。構成3、構成4ともにせん断部位の内層はL60のスギラミナであり、その差異は少なかった。

次に曲げ型せん断試験で見ると3点曲げせん断試験では曲げ破壊が多く、5点曲げせん断試験ではせん断

破壊が多かった。破壊形態別のせん断強さの差異はほとんど認められなかった。図3-18に示すように試験方法による結果の差は明らかであるが、構成による差異は認められなかった。3点曲げ試験の結果得られたせん断強さと、5点曲げ試験で得られたその平均値の比は構成3, 構成4とも0.73であった。

せん断強さの変動係数はいす型試験, 特にJISいす型試験の結果が大きく、曲げ型せん断試験の結果が小さかった。平均値で見るとJISいす型試験結果と5点曲げせん断試験の結果が符合し、実大いす型試験と3点曲げせん断試験で同程度の値が得られた。

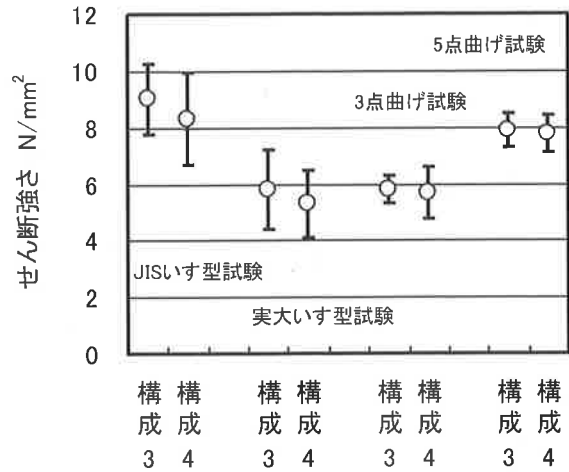


図 3-18 試験方法別せん断強さの比較 (平均値と標準偏差)

表 3-12 集成材(構成 3)のせん断試験結果

構成	試験の種類	n		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	せん断強さ N/mm <sup>2</sup>
構成 3	JIS	30	平均	399	11.3	-	9.0
			最小	329	9.9	-	5.8
			最大	470	12.9	-	11.9
			CV %	8.5	6.6	-	14.1
	実大ブロック	30	平均	451	10.9	-	5.8
			最小	428	10.2	-	1.8
			最大	479	12.0	-	8.4
			CV %	3.2	3.8	-	24.7
	3点曲げ	30	平均	451	11.2	9.5	5.8
			最小	428	10.5	8.4	4.5
			最大	482	11.8	10.3	6.7
			CV %	3.1	3.3	5.3	8.6
	5点曲げ	30	平均	451	10.9	9.5	7.8
			最小	428	10.2	8.8	6.8
			最大	479	12.0	10.7	9.1
			CV %	3.2	3.8	5.5	8.1

n: 試験体数, Efr: 縦振動法によるヤング係数  
CV: 変動係数

表 3-13 集成材(構成 4)のせん断試験結果

構成	試験の種類	n		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	Efr kN/mm <sup>2</sup>	せん断強さ N/mm <sup>2</sup>
構成 4	JIS	30	平均	410	11.1	-	8.3
			最小	347	8.8	-	3.6
			最大	474	14.6	-	11.4
			CV %	8.0	8.9	-	20.1
	実大ブロック	30	平均	478	10.4	-	5.3
			最小	444	9.8	-	3.0
			最大	505	11.3	-	8.2
			CV %	3.3	3.0	-	22.9
	3点曲げ	30	平均	474	10.7	10.5	5.7
			最小	446	10.0	9.6	2.8
			最大	497	11.3	12.1	7.1
			CV %	3.1	2.8	5.3	16.3
	5点曲げ	30	平均	478	10.4	10.7	7.7
			最小	444	9.8	9.6	6.9
			最大	505	11.3	12.2	9.4
			CV %	3.3	3.0	4.5	9.0

n: 試験体数, Efr: 縦振動法によるヤング係数  
CV: 変動係数

#### 4 まとめ

平成 17 年から 19 年の 3 ヶ年にスギとカラマツラミナの強度試験, スギ・カラマツ異樹種積層集成材の強度試験を行った。主な結果は次のとおりである。

①MOE<sub>AVG</sub> 区分したスギ縦継ぎラミナは曲げ, 引張りともロットとして JAS 基準を満たした。カラマツ縦継ぎラミナは曲げと引張りで基準値未満のデータが認められ, ロットとして JAS の基準を満たさなかった。MOE<sub>MIN</sub> 区分カラマツ縦継ぎラミナの曲げ, 引張り試験を行った結果, 曲げ強度, 引張り強度ともロットとして JAS の基準強度を満たした。

②最外層, 外層, 中間層にそれぞれに MOE<sub>AVG</sub> 区分したカラマツラミナ, 内層に同スギラミナを配置した 10 層異樹種積層集成材の曲げ(8 体), 引張り・圧縮(各 6 体)の強度試験を行った。曲げでは 3 体が想定した E95-F270 の JAS 基準強(27.0N/mm<sup>2</sup>)未満, 引張りでは 6 試験体とも基準強度(18.6N/mm<sup>2</sup>)未満(基準強度の 9割程度)であり, 圧縮ではすべてが基準強度(21.6N/mm<sup>2</sup>)以上であった。

③MOE<sub>MIN</sub> 区分したラミナで製造したスギ・カラマツ異樹種積層集成材およびカラマツ単独集成材の強度試験の結果, 曲げ強度はいずれも想定した JAS の基準を満たしたが, 引張り強度では JAS の基準に満たない試験体があった。

④スギ・カラマツ異樹種積層集成材のめり込み強さの最小値は 8N/mm<sup>2</sup> 以上であり, カラマツ集成材の基準強度(7.8N/mm<sup>2</sup>)を満たしていた。

⑤JIS いす型せん断試験, 実大いす型せん断試験, 3点曲げせん断試験, 5点曲げせん断試験の結果, 平均値で見ると JIS いす型試験結果と5点曲げせん断

試験の結果で同程度の値が得られ、実大いす型試験と3点曲げせん断試験で同程度の値が得られた。

⑥ラミナの強度試験から、スギはヤング係数に対する曲げ、引張り等の強度値の比が大きく、ヤング係数に対する強度値が高い傾向が認められたのに対して、カラマツには逆の傾向が認められ、お互いが補う形での異樹種積層集成の効果が認められた。

⑦スギ・カラマツ異樹種積層集成材の強度性能がカラマツ単一樹種集成材より劣ることはなかった。

## 5 今後の課題

MOE<sub>AVG</sub> 区分したカラマツラミナの強度性能は曲げと、引張りにおいて JAS 基準を満たさなかった。その原因はヤング係数に対する各強さの比が、スギに比べて小さいことによる。この原因がカラマツ本来の性質なのか、乾燥条件によるものか早急に検討する必要がある。

## 6 謝辞

本研究は材料の手配から、縦継ぎラミナの製造、集成材、試験体の製造までを齋藤木材工業(株)ナガト工場に委託した。大変な便宜をお送り頂いた齋藤健工場長に感謝致します。

また、資金的にも、技術的にもご援助、ご指導頂いた森林総研の関係者各位、並びにプロジェクト参加機関の多くの方々に感謝致します。

## 引用文献

- 1) 金子吉汪:最近の集成材工業の動向:日本木材加工技術協会発行最新木材工業辞典, 160-161(1999)
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター:木材需給と木材工業の現況(平成17年版), 133(2006)
- 3)平成19年9月25日農林水産省告示第1152号:集成材の日本農林規格
- 4)橋爪丈夫, 齋藤健, 野田道雄, 石原茂久:連続測定式グレーディングマシンの特性とその調整, 木材学会誌, 43(2), 141-148(1997)
- 5) (財)日本住宅・木材技術センター:地域材性能評価事業報告書, 構造用木材の強度試験法, 40-438 (2000)
- 6)橋爪丈夫, 吉田孝久, 武田孝志, 石原茂久:カラマツラミナの性質と集成材の強度性能(第4報)ラミナの曲げ・引張り強度特性, 木材学会誌, 44(1), 49-58(1998)