

# 修士論文

## 逆対称4点曲げ試験を用いた CLTの面内せん断性能評価手法の確立

2023年 2月 10日

広島大学大学院 先進理工系科学研究科

建築プログラム 建築構造力学研究室

M213639 山形海斗





# 目次

目次 .....	I
1 序論 .....	2
1.1 研究背景 .....	2
1.2 研究目的 .....	4
2 5層5プライ試験体での検討.....	6
2.1 はじめに.....	6
2.2 試験体概要.....	7
2.3 試験方法.....	9
2.4 計測方法及び特性値の算出.....	10
2.5 試験結果.....	17
2.5.1 破壊性状.....	17
2.5.2 荷重-変位関係 .....	24
2.5.3 せん断強度.....	37
2.5.4 せん断弾性係数.....	45
2.6 本章のまとめ.....	57
3 4層4プライ試験体での検討.....	59
3.1 はじめに.....	59
3.2 試験体概要.....	60
3.3 試験方法・計測方法及び特性値の算出.....	61
3.4 試験結果.....	62
3.4.1 破壊性状.....	62
3.4.2 荷重-変位関係 .....	65
3.4.3 せん断強度.....	73
3.4.4 せん断弾性係数.....	79
3.5 本章のまとめ.....	87
4 3層3プライ試験体での検討.....	89
4.1 はじめに.....	89
4.2 試験体概要.....	90
4.3 試験方法・計測方法及び特性値の算出.....	91
4.4 試験結果.....	94
4.4.1 破壊性状.....	94
4.4.2 せん断強度.....	104
4.4.3 せん断弾性係数.....	110
4.5 逆対称4点曲げ試験の試験条件の確立.....	122

5	逆対称4点曲げ試験と他試験の比較.....	125
5.1	はじめに.....	125
5.2	エ型試験との比較.....	126
5.2.1	エ型試験の概要.....	126
5.2.2	参考文献について.....	127
5.2.3	せん断強度.....	128
5.2.4	せん断弾性係数.....	131
5.2.5	エ型試験と逆対称4点曲げ試験の差異について.....	135
5.3	3点曲げ試験との比較.....	136
5.3.1	3点曲げ試験の概要.....	136
5.3.2	実験概要.....	137
5.3.3	試験方法.....	139
5.3.4	計測方法及び特性値の算出.....	140
5.3.5	破壊性状.....	141
5.3.6	応力-ひずみ関係.....	143
5.3.7	せん断強度.....	144
5.3.8	せん断弾性係数.....	146
5.3.9	3点曲げ試験と逆対称4点曲げ試験の差異について.....	147
5.4	Off-axis法との比較.....	148
5.4.1	Off-axis法の概要.....	148
5.4.2	参考文献について.....	149
5.4.3	せん断強度.....	150
5.4.4	せん断弾性係数.....	151
5.4.5	Off-axis法と逆対称4点曲げ試験の差異について.....	152
5.5	本章のまとめ.....	153
6	結言.....	156
6.1	逆対称4点曲げ試験方法の確立.....	156
6.2	今後の提案.....	159
	謝辞.....	161
	参考文献.....	162

# 第 1 章

## 序論

# 1 序論

## 1.1 研究背景

日本では、戦後、造林された人工林が資源として利用可能な時期を迎える一方、木材価格の下落の影響などにより森林の手入れが十分に行われず、国土保全など森林の公益的機能の低下が懸念される事態となっており、林業の再生を図ることが急務となっている。そこで、木造率が低く、今後の需要が期待できる公共建築物に着目し、2010年に木材需要の拡大を狙いとした公共建築物等木材利用促進法が施行され<sup>1-1)</sup>、2021年には対象が公共建築物から建築物一般に拡大した。中でも、写真1.1-1に示すような中大規模木質構造の開発<sup>1-2),1-3)</sup>は木材利用促進の一翼を担っている。中大規模木造を成立させるには、一定以上の空間確保が可能な構造材料が必要となり、構造を支える材料として集成材やCLT（直交集成板）、LVLなどの木質材料が用いられる。木質構造物が高層化するにつれて構造部材に作用する応力、特にせん断力が増大し、これまで以上にせん断性能の検討が重要になる。

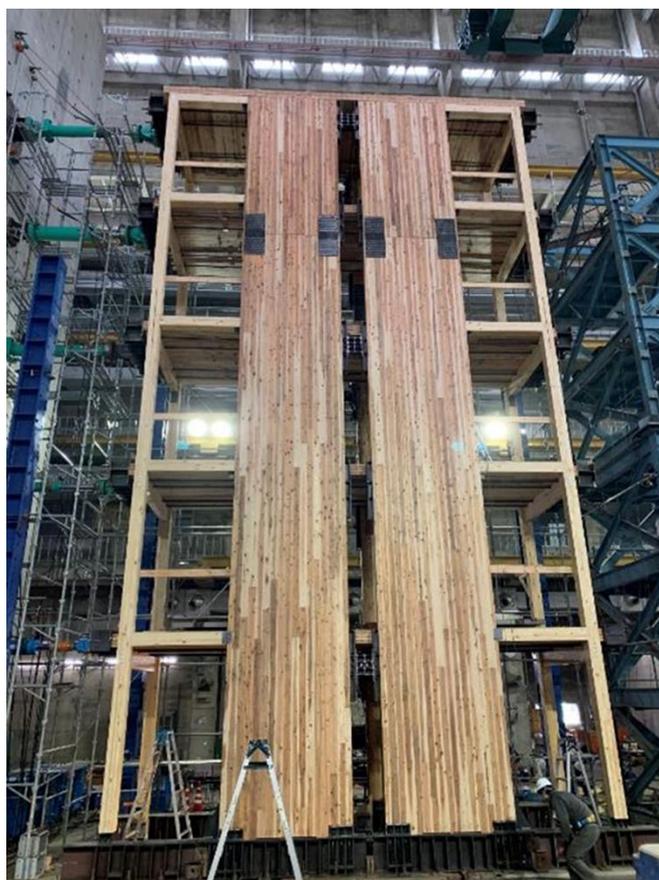


写真 1.1-1 中大規模木質構造の開発

木質材料の中でも、ラミナの繊維方向を直交するように積層接着した CLT は高いせん断性能を有するため、壁に用いることで地震時の水平力に対する抵抗要素としての活用が期待されている。CLT を壁として用いる場合、水平力は CLT の面内方向（幅方向）に作用するため、CLT の面内せん断性能の把握が重要となる。しかし、CLT の面内せん断性能の評価方法は未だ確立していない。CLT 施工マニュアル<sup>1-4)</sup>の設計値に用いられている値は実大水平加力実験<sup>1-5)~1-7)</sup>を参照しているが、試験体が大きいことや実験可能な施設に限られることが課題であり、既往の簡便な試験方法で評価ができればより合理的であると考え。木材のせん断性能の評価方法は複数存在し<sup>例えば 1-8), 1-9)</sup>、変形の計測方法についても多様であることから明確なせん断性能の算出方法も確立されていない。現状用いられている試験方法として、曲げ型の試験方法では一般的な材料試験機で試験が可能であり、中央載荷の3点曲げせん断試験<sup>1-10)~1-12)</sup>や図 1.1-1 に示す逆対称4点曲げせん断試験<sup>1-13)~1-16)</sup>が用いられることが多い。これらの試験方法はラミナを繊維平行方向に積層接着した木質材料である集成材の試験方法として確立され、CLT にも転用が可能であると考え。中でも、逆対称4点曲げ試験は図 1.1-2 に示すように、試験体中央部でせん断応力が最大かつ曲げ応力は 0 となることから、他の試験方法に比べてせん断破壊が発生しやすいと考え、逆対称4点曲げ試験を対象とした。筆者は卒業論文<sup>1-17)</sup>で CLT と集成材の逆対称4点曲げ試験を実施し、集成材で規定される試験条件<sup>1-18)</sup>ではスパンが長いことから CLT では曲げ破壊が生じ、低いせん断強度が得られることを確認した。また、せん断弾性係数は値のばらつきが大きく、計測方法の精査が必要であることがわかった。写真 1.1-2 に示すように既往文献<sup>1-19)</sup>においても曲げ破壊が生じ、せん断弾性係数は CLT 施工マニュアル<sup>1-4)</sup>に記載の値と比べると数倍の値を示すことから、CLT でも曲げ破壊が生じず、せん断強度及びせん断弾性係数を適切に得られる試験方法の確立が急務である。これらの検討が進むことにより、面内せん断性能が把握でき、建物の設計の合理化による中大規模木造の発展に寄与できると考える。

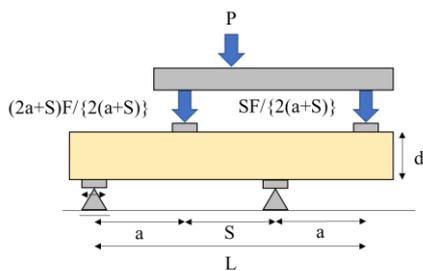


図 1.1-1 逆対称4点曲げ試験

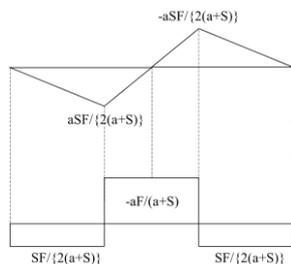


図 1.1-2 逆対称4点曲げ試験の応力分布



写真 1.1-2 既往文献<sup>1-19)</sup>における曲げ破壊

## 1.2 研究目的

本研究の概要を図 1.2-1 に示す。本研究では、CLT の面内せん断性能の評価方法の確立を目的として、逆対称4点曲げ試験を実施する。試験条件としては、試験体の材せい、載荷スパン、載荷方向、層構成をパラメータとし、試験時の試験体のラミナ位置や計測位置などがせん断性能に及ぼす影響を検討する。また、せん断変形の計測方法は既往研究<sup>(例えば1-5),1-6),1-19)</sup>によって複数存在するため、適切な計測方法を検討する。加えて、近年海外での検討がおこなわれている Off-axis 法<sup>(例えば1-20),1-21)</sup>によるせん断試験も実施し、同じ材料を用いた逆対称4点曲げ試験の結果と比較する。また、他の試験方法を用いた既往研究<sup>(例えば1-5),1-20)</sup>の結果と比較することで、逆対称4点曲げ試験の妥当性を検証する。これらの結果から、CLT の面内せん断試験における逆対称4点曲げ試験の適切な試験条件を確立する。

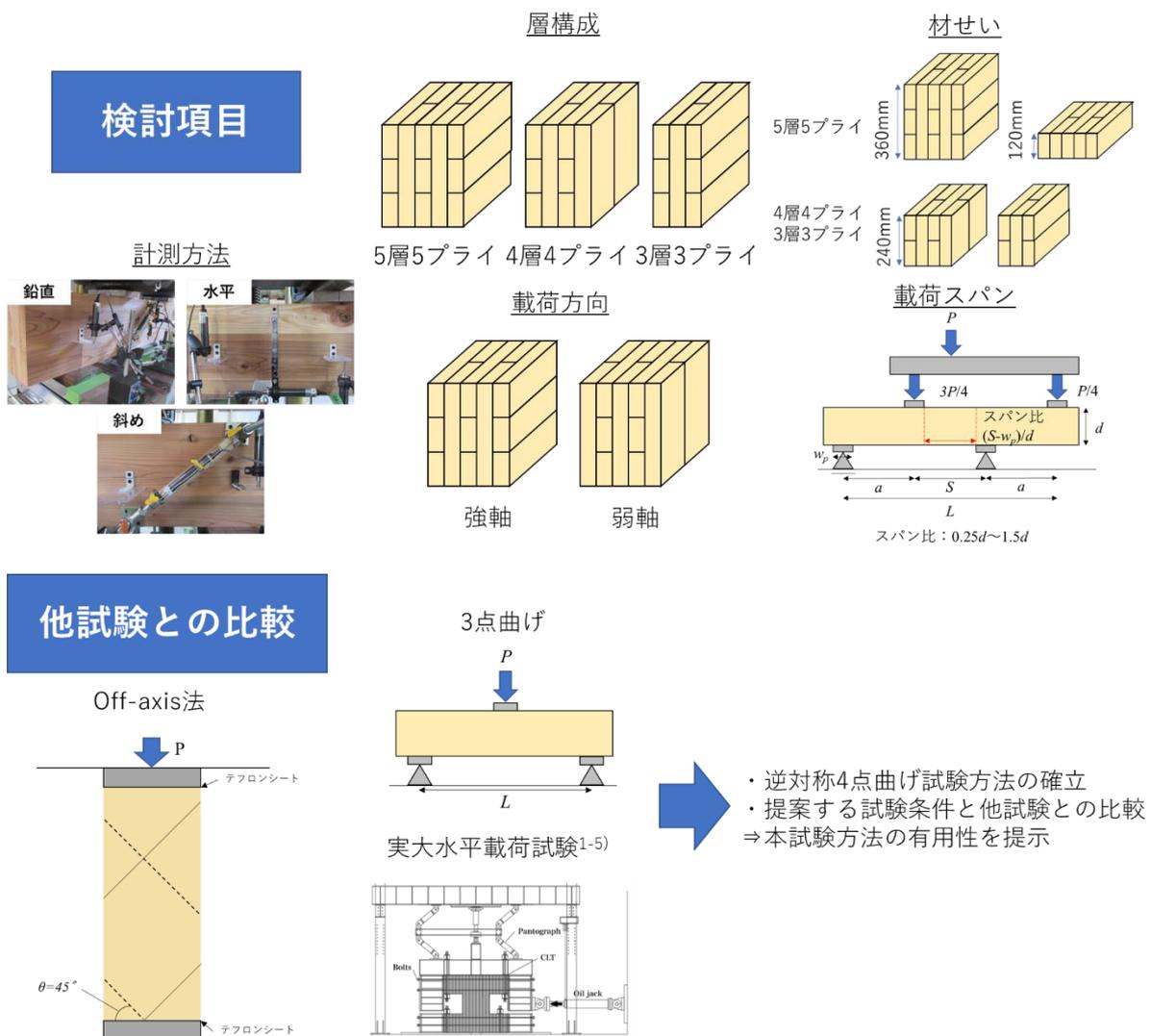


図 1.2-1 研究概要

## 第 2 章

### 5 層 5 プライ試験体での検討

## 2 5層5プライ試験体での検討

### 2.1 はじめに

本章では、一般的な CLT の仕様である 5 層 5 プライ試験体での逆対称 4 点曲げ試験の結果を述べる。スギ試験体では、載荷スパンや材せい、載荷方向の影響を検討し、ヒノキ試験体との比較から、樹種が異なる場合でも適用できるか、差異はどの程度かを検証する。また、逆対称 4 点曲げ試験で用いた試験体の非破壊箇所から Off-axis 法に用いる試験体も採材し、それぞれの結果を比較することで逆対称 4 点曲げ試験の妥当性を検討する。

## 2.2 試験体概要

逆対称4点曲げ試験の試験体の緒元を表2.2-1、表2.2-2に示す。樹種はスギ（等級：S60、密度： $367 \pm 60 \text{kg/m}^3$ 、含水率： $10.1 \pm 0.6\%$ ）とヒノキ（等級S90、密度： $463 \pm 24 \text{kg/cm}^3$ 、含水率： $11.0 \pm 0.5\%$ ）とした。どちらの試験体も幅はぎ接着はしていない。ラミナ厚さは30mm、ラミナ幅は122mmとしている。図2.2-1に示すように、外層ラミナが荷重方向に対して繊維直交方向となる強軸と、平行方向となる弱軸と定義した。図2.2-2に示すように荷重・支持スパン  $S$  から加圧板幅  $w_p$  を差し引き、材せい  $d$  との比  $((S-w_p)/d)$  をスパン比と呼ぶ。加圧板幅  $w_p$  はめり込み耐力を考慮して強軸は  $3d/4$ 、弱軸は  $d/2$  とした。

Off-axis法の試験体については、スギ試験体の材せい360mm及びヒノキ試験体の試験後の非破壊箇所から、図2.2-3のように角度を $30^\circ$ 又は $45^\circ$ として切り出し、写真2.2-1に示すようなOff-axis法の試験体を切り出した。スギ試験体は各試験体から1体採材、ヒノキ試験体は各試験体から $45^\circ$ と $30^\circ$ をそれぞれ1体採材し、同じ材を用いた逆対称4点曲げ試験の結果と比較する。この試験法では、試験体の荷重角度が $45^\circ$ となり強軸と弱軸で違いが生じないこと、スパン比に関わらず同じ寸法で採材していることから、荷重方向及びスパン比についてはパラメータとしていない。また、ヒノキ試験体については、採材角度が $30^\circ$ と $45^\circ$ の場合での差異を検証し、Off-axis法での繊維方向の影響の有無を検討する。採材角度及び試験体の寸法はKhan<sup>2)</sup>らを参考に決定し、試験体は自身で製作した。

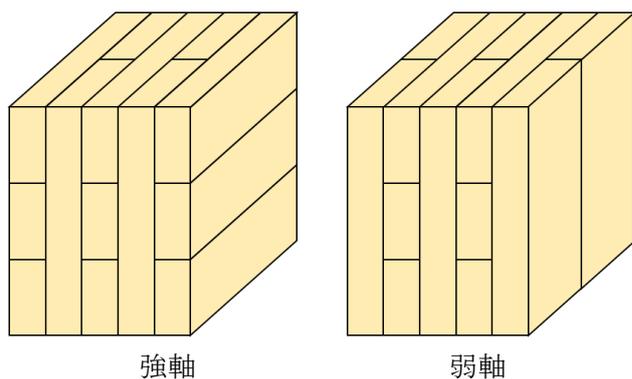
表 2.2-1 逆対称4点曲げ試験体一覧

樹種	材せい (mm)	材幅 (mm)	スパン比 $(S-w_p)/d$	荷重方向	試験体数
スギ	120	150	0.25~1.25	強軸 (S)	各3体 (計60体)
	360		0.5~1.5	弱軸 (W)	
ヒノキ	240	150	0.5	強軸 (S)	12体

※ スギ試験体のスパン比は強軸、弱軸共に $0.25d$ ずつ

表 2.2-2 Off-axis法試験体一覧

樹種	材せい (mm)	材幅 (mm)	採材角度	試験体数
スギ	360	120	$45^\circ$	60体
ヒノキ	240	80	$30^\circ$	各6体 (計12体)
			$45^\circ$	



強軸 弱軸

図 2.2-1 荷重方向の定義

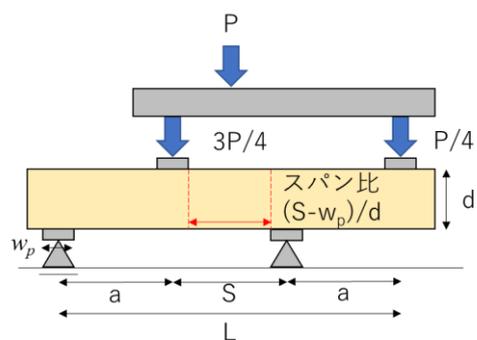


図 2.2-2 スパン比の定義

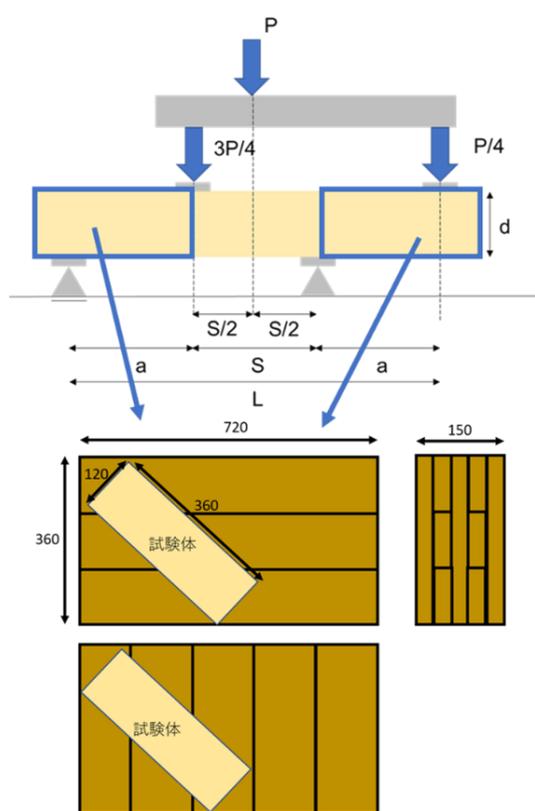


図 2.2-3 試験体の採材方法

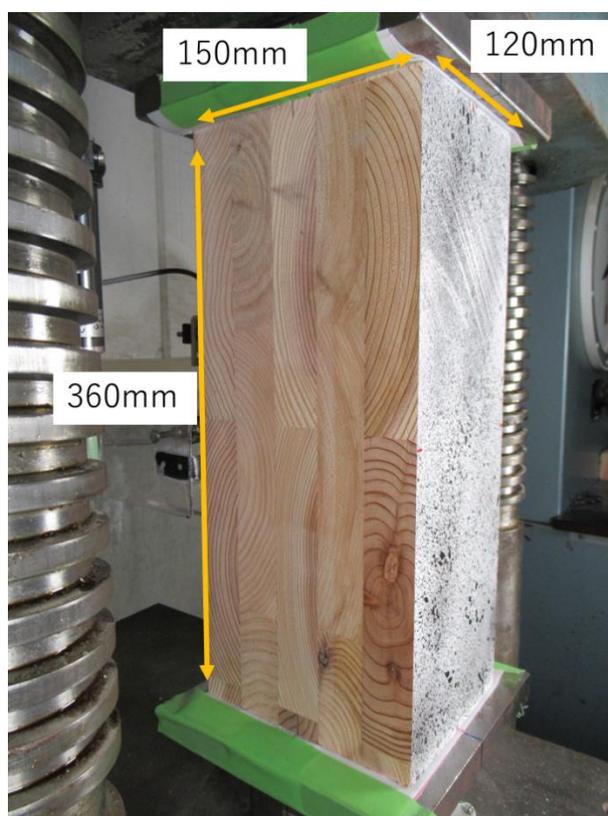


写真 2.2-1 Off-axis 法の試験体

### 2.3 試験方法

図 2.3-1 に示すような逆対称 4 点曲げをおこなった。荷重速度は 1mm/min とし、最大荷重  $P_{max}$  到達後、 $0.8P_{max}$  に荷重が低下するまで荷重した。試験は油圧試験機（UH-F1000kN、島津製作所製）を用いて実施した。写真 2.3-1 に実験の様子を示す。

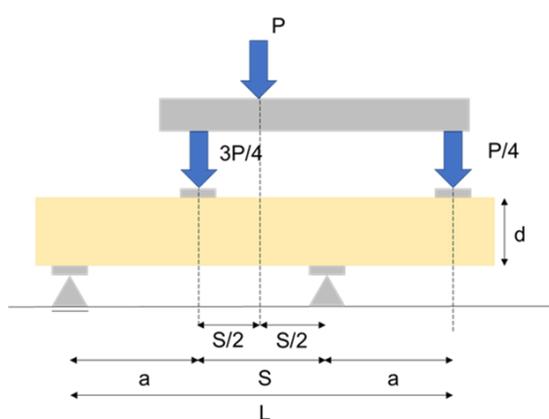


図 2.3-1 逆対称 4 点曲げ試験

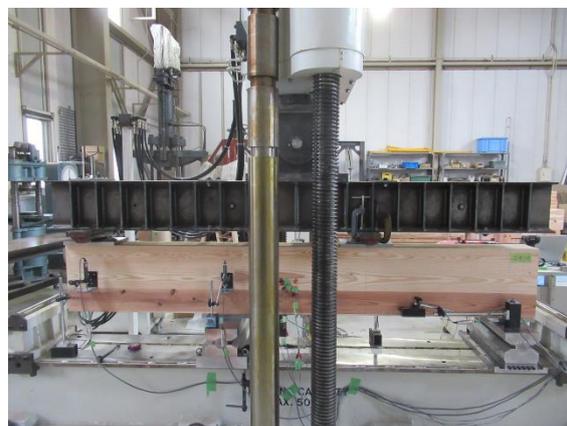


写真 2.3-1 実験の様子

Off-axis 法の試験図を図 2.3-2 に示す。荷重速度は約 1mm/min とした。荷重の際、摩擦による影響を極力抑えるために試験体上下面に厚さ 1mm のテフロンシートを 2 枚挟んだ。写真 2.3-2 に試験の様子を示す。試験はスギ試験体では油圧試験機（A-100-BC、前川試験機製作所製）、ヒノキ試験体では油圧試験機（UH-F1000kN、島津製作所製）を用いて実施した。

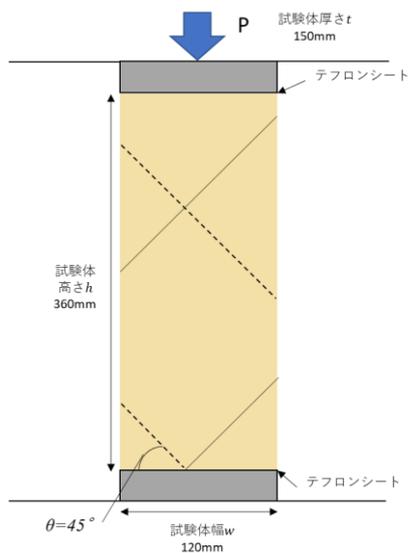


図 2.3-2 Off-axis 法の試験条件



写真 2.3-2 実験の様子

## 2.4 計測方法及び特性値の算出

逆対称4点曲げ試験の計測箇所を図 2.4-1、図 2.4-2 に示す。支点、載荷点での鉛直方向の変形 ( $\delta_{v1}$ 、 $\delta_{v2}$ )、試験体中央の上下面で水平方向の変形 ( $\delta_h$ )、中央の支点及び載荷点での斜め方向の変形 ( $\delta_d$ ) を計測した。また、スギ試験体とヒノキ試験体で水平方向と斜め方向の計測方法が若干異なる仕様となっているため、それぞれでの計測方法の相違点を図 2.4-3 に示す。なお、ヒノキ試験体では、片面では図 2.4-2 に示す水平変形又は斜め変形の計測を各 3 体おこない、逆側の面では後述する画像相関法でのひずみの計測をおこなった。

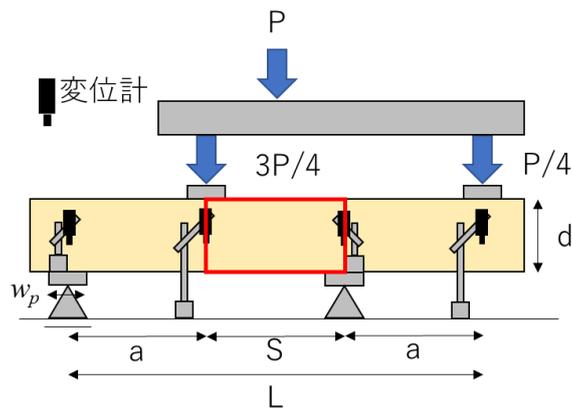


図 2.4-1 変位計設置箇所

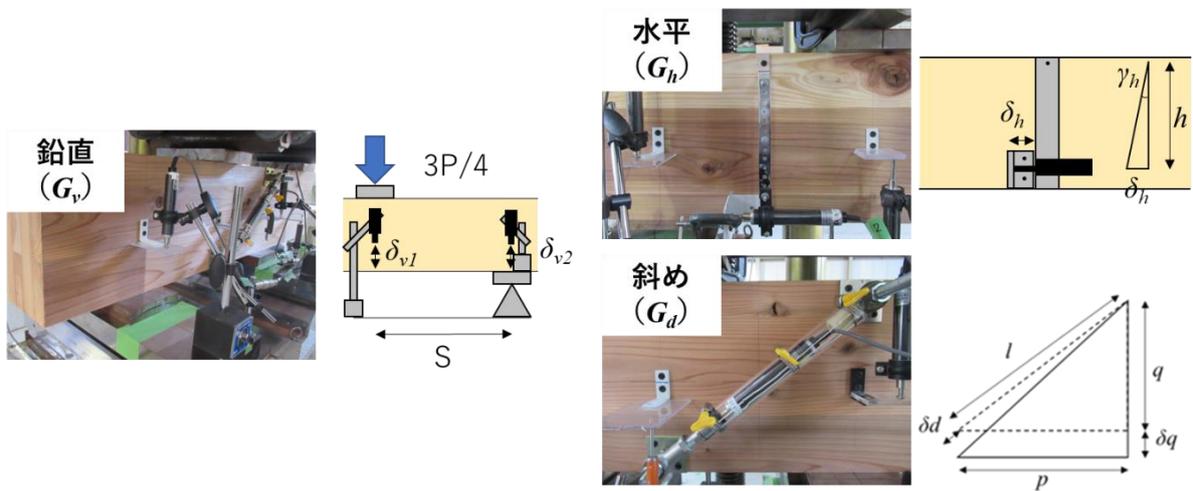


図 2.4-2 試験体中央部のせん断変形計測方法

## 第2章 5層5プライ試験体での検討



図 2.4-3 計測方法の相違点（左：スギ試験体、右：ヒノキ試験体）

## 第2章 5層5プライ試験体での検討

ヒノキ試験体では、写真 2.4-1 に示すように中央部で画像相関法でのひずみの計測をおこなった。計測面はスプレーでランダムパターンを作成して左右から光を照射して撮影した。撮影機材は Panasonic H-FS12032 を使い、フレームサイズは 4592×3448pixel、撮影間隔を 0.5Hz とした。画像の解析には GOM Correlate を使い、全体でのひずみ分布及び写真 2.4-1 の黄矢印の範囲でのひずみを計測した。斜め方向での変位計と画像相関法で計測した変形からせん断弾性係数を算出し、比較する。なお、画像相関法によるひずみのデータとデータロガーで記録した荷重のデータを照合するために、試験開始時は画像相関法の撮影とデータロガーの記録を同時におこなった。また、ひずみのデータと荷重のデータの照合は図 2.4-4 のようにおこなった。図 2.4-4 に示す画像相関法でのひずみデータは左がひずみの元データ、右が荷重データと同じタイミングのデータを抽出したものである。黄色は除いたデータとなり、赤、水色が用いたデータである。撮影間隔を 0.5Hz とした場合、1 秒の値を 2 秒間用いて荷重のデータとタイミングを合わせている。合わせた結果が図 2.4-5 となり、概ね荷重データと同じタイミングとなった。

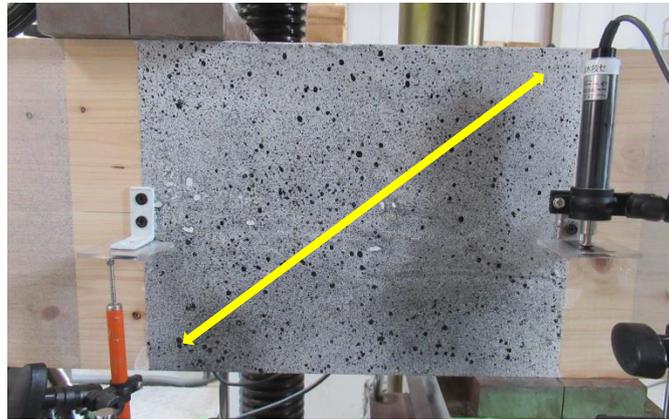


写真 2.4-1 ヒノキ試験体の画像相関法での計測

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	?? (s)	?? 1.epsL	?? 2.epsL	?? 3.epsL	[%]	?? (s)	?? 1.epsL	?? 2.epsL	?? 3.epsL
3	0.033333	0.001158	0.000523	0.000968					
4	0.066667	0.001251	0.000392	0.001102					
5	0.1	0.00102	-0.00029	0.000846					
6	0.133333	-0.00128	-0.00012	-0.00054					
7	0.166667	0.000867	-0.00044	0.000361					
8	0.2	0.001718	0.000254	0.001018					
9	0.233333	0.001577	0.000441	0.001041					
10	0.266667	0.000369	0.000439	0.002286					
11	0.3	0.000208	0.000291	0.002554					
12	0.333333	0.000267	0.000979	0.002663					
13	0.366667	-0.00014	0.001084	0.002166					
14	0.4	0.000598	0.000378	0.003352					
15	0.433333	0.000777	-0.00038	0.003731					
16	0.466667	0.000885	-0.00017	0.004283					
17	0.5	0.000816	-0.00015	0.004494					
18	0.533333	0.000323	0.000483	0.005238					
19	0.566667	0.001043	0.001126	0.005028					
20	0.6	0.000527	0.001025	0.005067					
21	0.633333	0.000496	0.001133	0.005071					
22	0.666667	-0.00049	0.001093	0.005591					
23	0.7	-0.00033	0.001103	0.005429					
24	0.733333	-0.00043	0.001103	0.005421					
25	0.766667	-0.00043	0.001103	0.005421					
26	0.8	-0.00011	0.000988	0.004845					
27	0.833333	-0.00011	0.000988	0.004848					
28	0.866667	0.000098	0.00097	0.004734					
29	0.9	0.000098	0.00097	0.004734					
30	0.933333	0.000098	0.00097	0.004734					
31	0.966667	-0.00072	-2.7E-05	0.004218					
32	1	0.00018	0.00011	0.004334					
33	1.033333	0.000139	-0.00111	0.004671					
34	1.066667	0.000022	-0.00164	0.004865					
35	1.1	-0.00104	-0.00135	0.004534					
36	1.133333	-0.00098	-0.00163	0.004539					
37	1.166667	-0.0007	-0.00212	0.004541					
38	1.2	-0.00042	-0.00187	0.004628					
39	1.233333	-0.00073	-0.00205	0.004804					

図 2.4-4 画像相関法でのひずみデータ

	W	X	Y	Z	A
HH-1.25-3-30	荷重	?? 1.epsL	?? 3.epsL	[%]	
		56.848	0.012548	-0.01789	
		56.696	0.012565	-0.01797	
		56.58	0.012565	-0.01797	
		56.504	0.012703	-0.0178	
		56.304	0.012703	-0.0178	
		56.224	0.012623	-0.01795	
		56.12	0.012623	-0.01795	
		56.032	0.012763	-0.01783	
		55.924	0.012763	-0.01783	
		55.932	0.012612	-0.01795	
		55.816	0.012612	-0.01795	
		55.732	0.012702	-0.01782	
			0.012702	-0.01782	
			0.01254	-0.01791	
			0.01254	-0.01791	

図 2.4-5 荷重データとひずみデータの照合

スギ試験体の Off-axis 法の計測を図 2.4-6 及び写真 2.4-2 に示す。片面では変位計での計測をおこない、逆側の面では画像相関法での計測をおこなった。変位計での計測は、クロスヘッドの変位、試験体の中央に近いラミナ境界付近での水平方向及び鉛直方向の相対変位を計測した。画像相関法での計測では、計測面はスプレーでランダムパターンを作成して左右から光を照射して撮影した。撮影機材は Panasonic H-FS12032 を用い、フレームサイズは 4592×3448pixel、撮影間隔を 0.2Hz とした。画像の解析には GOM Correlate を用い、全体でのひずみ分布及び写真 2.4-3 のように試験体の幅及び高さの半分を範囲として、ラミナ境界付近で黄矢印のようにひずみを計測した。鉛直方向及び水平方向での変位計と画像相関法で計測した変形からせん断弾性係数を算出し、比較する。

ヒノキ試験体の Off-axis 法の計測は、概ねスギ試験体と同じであるが、水平計測高さ及び鉛直計測高さを変更した。これは寸法が異なる点とスギ試験体での画像相関法によるひずみ計測の結果、水平方向の試験体縁にひずみがほとんど生じず、計測が容易になると考えたためである。また、撮影間隔を 0.5Hz としている。これは、計測の精度向上と実験後のデータ処理が容易になるためである。

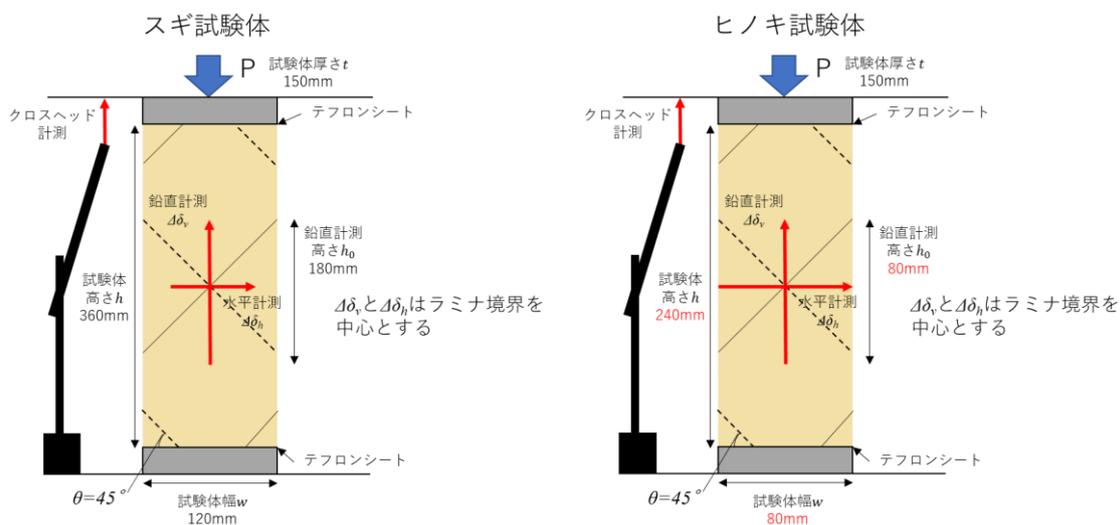


図 2.4-6 Off-axis 法の計測



写真 2.4-2 変位計での計測

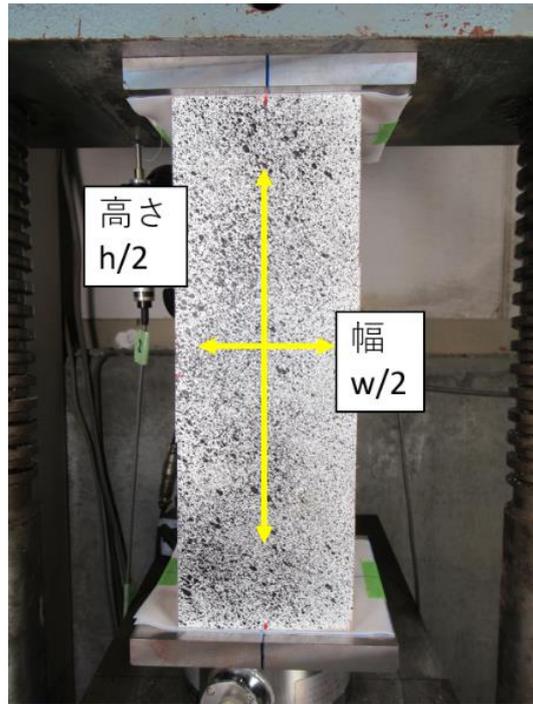


写真 2.4-3 画像相関法での計測

逆対称4点曲げ試験の特性値の算出方法を示す。最大荷重  $P_{max}$  からせん断強度  $f_s$  (式 2.1) を、鉛直方向、水平方向、斜め方向それぞれの変位量からせん断変形角  $\gamma_d$ 、 $\gamma_v$ 、 $\gamma_h$  (式 2.2~2.4)、比例域における荷重とせん断変形角の関係からせん断弾性係数  $G$  (式 2.5) を算出した。せん断弾性係数は各計測方法で算出した値をそれぞれ  $G_h$ 、 $G_d$ 、 $G_v$  と表記する。また、画像相関法より得たせん断弾性係数も同様の方法で算出し、 $G_{DIC}$  と表記する。各計測方法の概要を図 2.4-7 に示す。

$$f_s = \frac{3P_{max}}{4A} \quad (2.1)$$

$$\gamma_h = \frac{\delta_h}{h} \quad (2.2)$$

$$\gamma_d = \frac{\delta_q}{p} = \frac{\sqrt{(l + \delta_d)^2 - p^2} - q}{p} \quad (2.3)$$

$$\gamma_v = \frac{\delta_v}{s} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{s} \quad (2.4)$$

$$G = \frac{\Delta P \Delta \gamma}{2A} \quad (2.5)$$

ここで

- $P_{max}$  : 最大荷重 (kN)
- $A$  : 断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $\delta_h$  : 水平方向変位 (mm)
- $h$  : 水平方向計測高さ (mm)
- $l$  : 斜め方向の計測距離 (mm)
- $\delta_d$  : 斜め方向の変位 (mm)
- $q$  : 鉛直方向の計測距離 (mm)
- $p$  : 水平方向の計測距離 (mm)
- $\delta_1$  : 載荷点の鉛直変位 (mm)
- $\delta_2$  : 支点の鉛直変位 (mm)
- $S$  : 載荷・支持スパン (mm)
- $\Delta P$  : 弾性域の荷重増分 (kN)
- $\Delta \gamma$  : 弾性域のひずみ増分

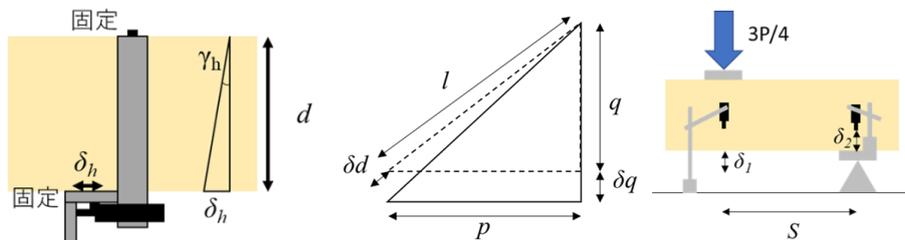


図 2.4-7 各計測方法 (左: 水平、中央: 斜め、右: 鉛直)

Off-axis法の採材角度が $45^\circ$ の場合の特性値の算出方法を示す。Khanら<sup>2-1)</sup>及びBrandner<sup>2-2)</sup>らを参考に最大荷重 $P_{max}$ からせん断強度 $f_s$ (式2.6)を、比例域における荷重と水平方向及び鉛直方向の変位量の関係からせん断弾性係数 $G$ (式2.7)を算出した。なお、繊維方向及び繊維直交方向のヤング係数は木質構造設計基準<sup>2-3)</sup>より仮定した。また、画像関連法より得たせん断弾性係数も同様の方法で算出し、 $G_{DIC}$ と表記する。Off-axis法の採材角度が $30^\circ$ ( $45^\circ$ 以外の任意角度)の場合のせん断強度(式2.8)では、せん断応力を角度 $\beta$ で調整する。

$$f_s = \frac{P_{max}}{2wt} \frac{t}{t_{net}} - 1.15\sigma + 0.13\sigma^2 \quad (2.6)$$

$$\sigma = \frac{P_{max}}{2wt} \frac{E_{90}}{E_{xM}} \quad (2.6.1)$$

$$E_{xM} = \frac{\sum t_{l,xM} E_0 + \sum t_{l,yM} E_{90}}{t} \quad (2.6.2)$$

$$G = \alpha \frac{h_0}{2wt} \frac{\Delta P}{\Delta\delta_h + \Delta\delta_v} \quad (2.7)$$

$$f_s = \frac{P_{max}}{wt} \frac{t}{t_{net}} \sin(\beta) \cos(\beta) - 1.15\sigma + 0.13\sigma^2 \quad (2.8)$$

ここで

- $P_{max}$  : 最大荷重 (kN)
- $w$  : 試験体幅 (mm)
- $t$  : 試験体厚さ (mm)
- $t_{net}$  : 弱軸ラミナの層厚 (mm)
- $E_{90}$  : 繊維直交方向のヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)  
本研究では $E_{90}=0.24\text{kN/mm}^2$ と仮定
- $E_0$  : 繊維平行方向のヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)  
本研究では $E_0=6.0\text{kN/mm}^2$ と仮定
- $t_{l,xM}$  : 平行層の層厚 (mm)
- $t_{l,yM}$  : 直交層の層厚 (mm)
- $\alpha$  : せん断補正係数 (本研究では $\alpha=1.0$ )
- $h_0$  : 鉛直計測高さ (mm)
- $\Delta P$  : 弾性域の荷重増分 (kN)
- $\Delta\delta_h$  : 弾性域の水平変位 (mm)
- $\Delta\delta_v$  : 弾性域の鉛直変位 (mm)
- $\beta$  : 任意の採材角度 (rad)

## 2.5 試験結果

### 2.5.1 破壊性状

CLT の面内せん断破壊は図 2.5-1 に示すように 3 種類のモード<sup>2-4)</sup>があり、下記に詳細を示す。

モードⅠ：CLT が一体となってせん断変形することにより生じるせん断応力度によるせん断破壊

モードⅡ：CLT のラミナの幅はぎ位置で、直交するラミナがせん断変形することで生じるせん断応力度によるせん断破壊

モードⅢ：2つの直交するラミナの交差面がずれ変形やねじり変形することで交差面に生じる、せん断力や回転力によるせん断破壊

これらのモードの内、主に破壊のクライテリアとなるのはモードⅠ及びモードⅢである。

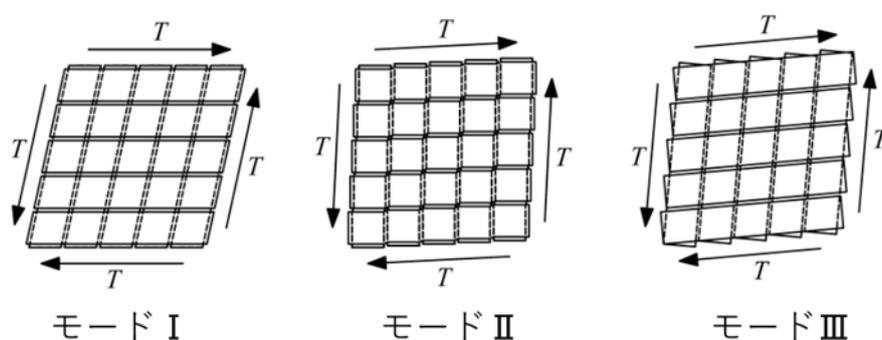


図 2.5-1 CLT のせん断破壊モード<sup>2-4)</sup>

## 第2章 5層5プライ試験体での検討

逆対称4点曲げ試験の破壊性状を写真 2.5-1～写真 2.5-10 に示す。強軸試験体では、写真 2.5-1 に示すラミナ境界で水平方向のずれ（モードⅢ）、写真 2.5-2 に示すラミナのせん断破壊（モードⅠ）が見られた。弱軸試験体では、写真 2.5-3 に示すラミナ境界の鉛直方向のずれ（モードⅢ）、写真 2.5-4 に示す試験体上面でのローリングシア（モードⅢ）などのせん断破壊がみられた。また、強軸ではスパン比 1.25*d*、弱軸ではスパン比 1.5*d* の試験体の一部で写真 2.5-5、写真 2.5-6 に示す曲げ破壊が内側の支点及び載荷点の裏側でみられた。なお、写真 2.5-7、写真 2.5-8 には材せいの違いによる比較、写真 2.5-9、写真 2.5-10 にはスギとヒノキの樹種による比較を示すが、どちらも特に違いはみられなかった。また、せん断破壊をした試験体では、スパンによる破壊性状の違いはみられなかった。このことから、破壊性状については、材せいや樹種の影響は受けず、強軸試験体ではモードⅠの破壊もみられたことから、載荷方向による影響があると考えられる。また、スパン比 1.25*d* 以上で曲げ破壊が生じていることから、スパン比は 1.0*d* 以下とすることが適正と考える。



写真 2.5-1  
強軸試験体（ラミナ境界のずれ）

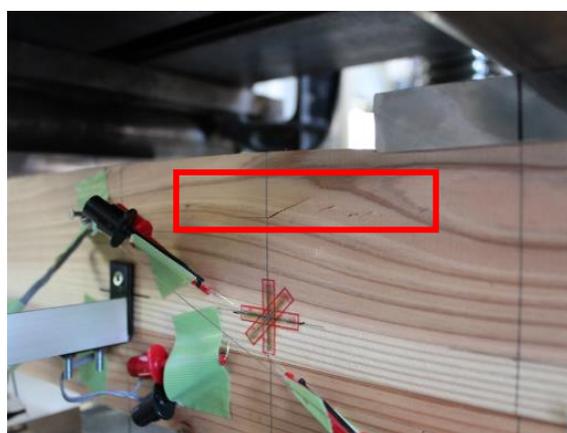


写真 2.5-2  
強軸試験体（ラミナのせん断破壊）

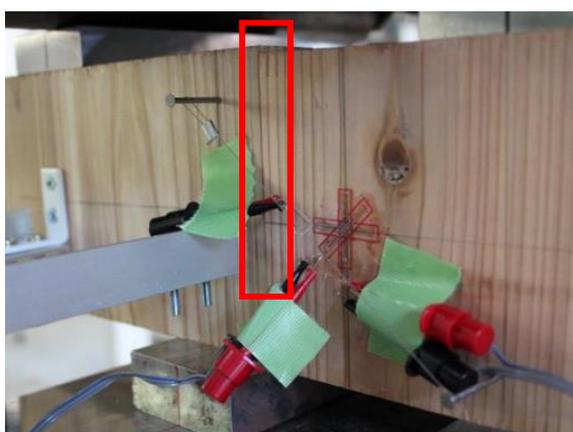


写真 2.5-3  
弱軸試験体（ラミナ境界のずれ）

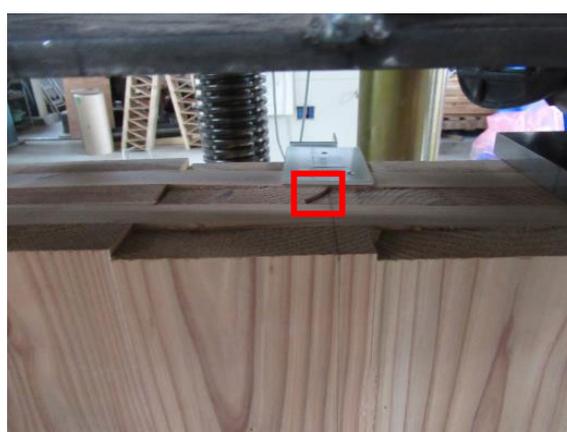


写真 2.5-4  
弱軸試験体（ローリングシア）

第2章 5層5プライ試験体での検討



写真 2.5-5 強軸試験体の曲げ破壊



写真 2.5-6 弱軸試験体の曲げ破壊

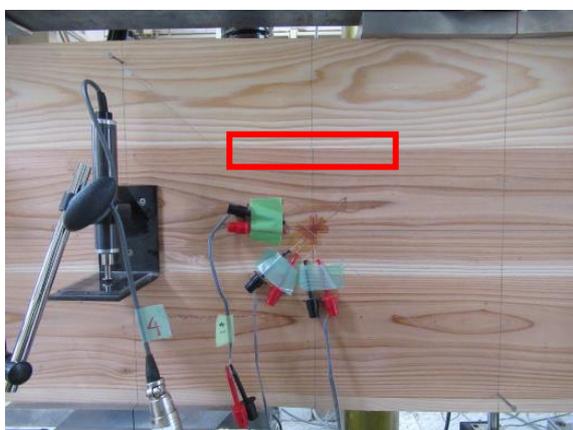


写真 2.5-7 強軸試験体 材せい 360mm

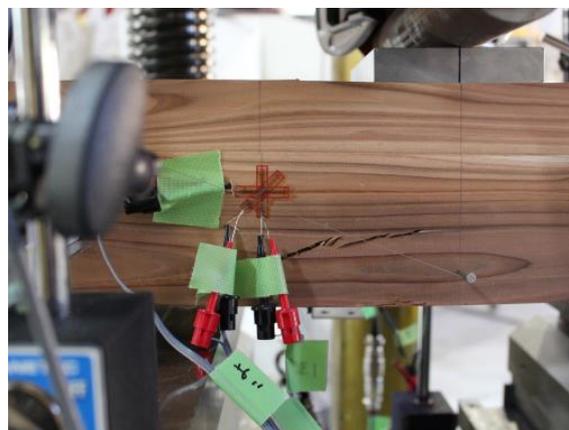


写真 2.5-8 強軸試験体 材せい 120mm



写真 2.5-9 強軸試験体 スギ

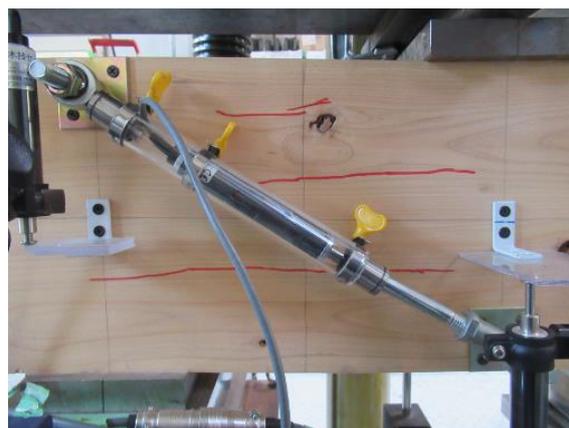


写真 2.5-10 強軸試験体 ヒノキ

ヒノキ試験体の画像相関法によるひずみ分布を図 2.5-2、図 2.5-3 に示す。図 2.5-2 に示す X 方向のひずみ分布では、試験体の高さ方向 (Y 方向) の中央付近でひずみが大きくなっていることがわかる。図 2.5-3 に示す Y 方向のひずみ分布では、試験体中央付近に加えて、支点、载荷点付近でひずみが集中していることがわかる。

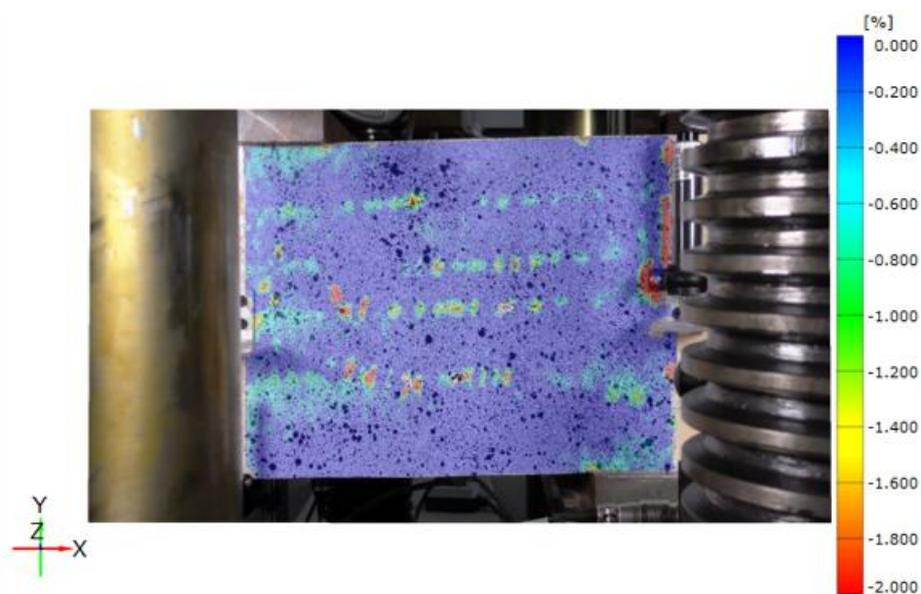


図 2.5-2 X 方向の画像相関法によるひずみ

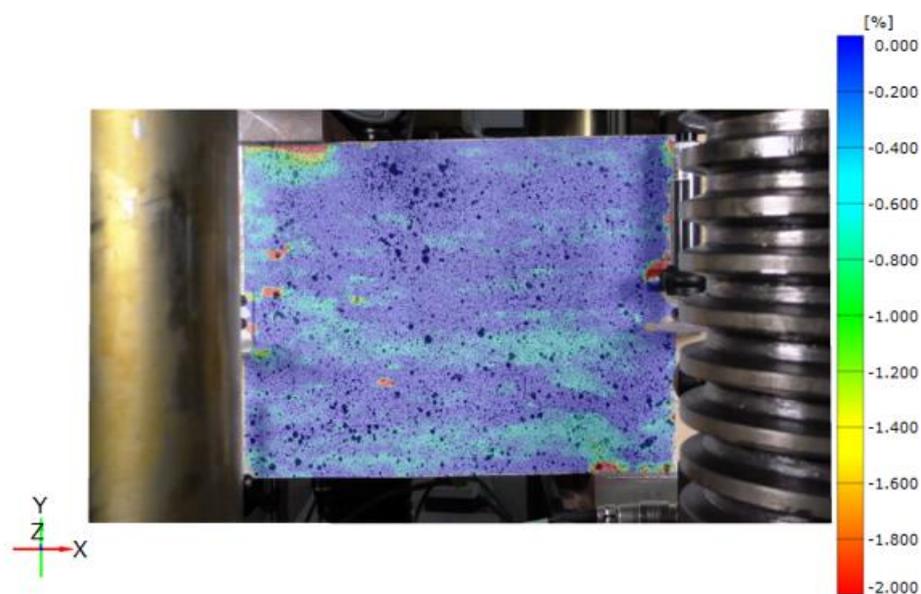


図 2.5-3 Y 方向の画像相関法によるひずみ

## 第2章 5層5プライ試験体での検討

Off-axis 法での破壊性状を写真 2.5-11～写真 2.5-14 に示す。各層の境界がずれるようなモードⅢの破壊がすべての試験体でみられた。この破壊性状は既往研究<sup>2)</sup>でも同様の結果が得られており、本研究の試験体のような幅はぎ接着がない試験体はモードⅢ、幅はぎ接着がある試験体はモードⅠとなる結果が示されている。写真 2.5-11 のスギ試験体、写真 2.5-12 のヒノキ試験体どちらも同様の破壊が生じた。なお、写真 2.5-13、写真 2.5-14 に示すようにヒノキ試験体の採材角度が異なる場合においても、破壊性状は同様であった。図 2.5-4、図 2.5-5 に画像相関法でのひずみ分布を示す。45°、30° ともにラミナ境界でひずみが集中し、破壊していることがわかる。画像相関法においても採材角度による違いはあまりみられなかった。また、ヒノキ試験体では写真 2.5-15、写真 2.5-16 に示すような接着層の剥離が 1 体ずつ生じた。剥離面に角度による差はみられなかった。スギ試験体では剥離がみられず、この要因としては、後述する荷重-変位関係において、ヒノキ試験体の方が断面は小さいが荷重はスギ試験体より大きくなっていったため、接着層の負担する応力がスギ試験体より大きくなっていったためであると考えられる。しかし、ヒノキ試験体の中でも、最大荷重が剥離した試験体より大きい接着層の剥離が生じなかった試験体もあり、他の要因も存在すると考える。



写真 2.5-11

Off-axis 法の破壊性状 スギ



写真 2.5-12

Off-axis 法の破壊性状 ヒノキ



写真 2.5-13 Off-axis 法の破壊性状 45°



写真 2.5-14 Off-axis 法の破壊性状 30°

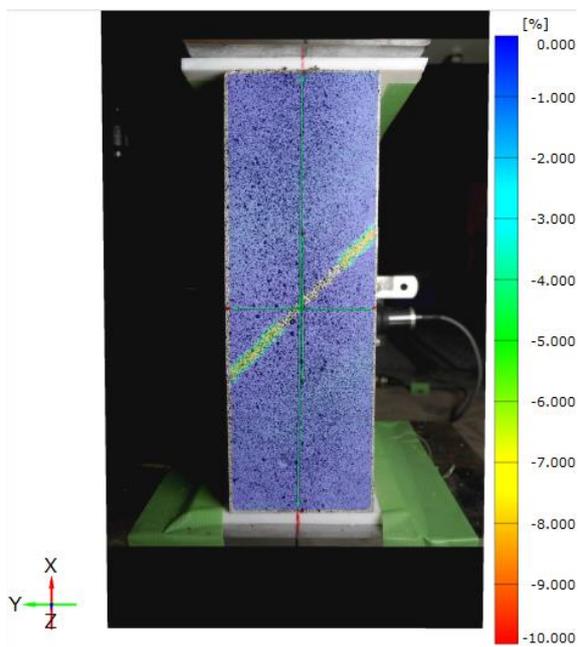


図 2.5-4 画像相関法のひずみ 45°

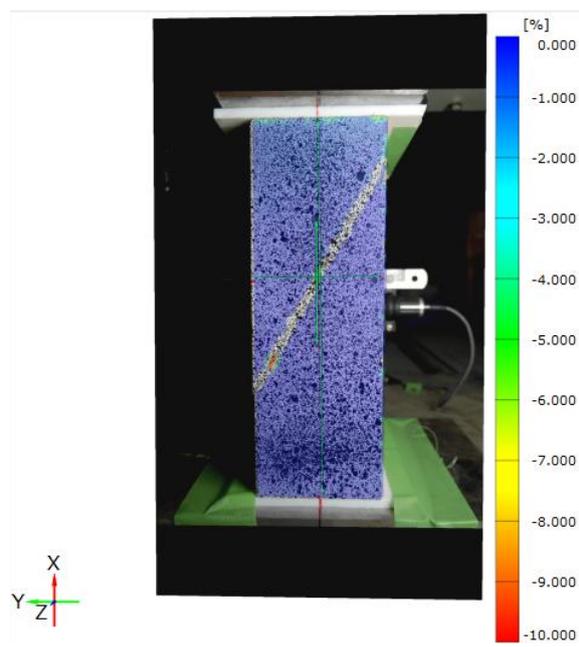


図 2.5-5 画像相関法のひずみ 30°

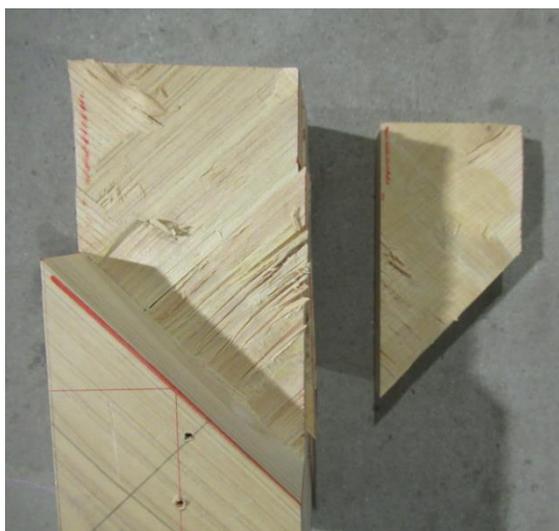


写真 2.5-15 接着層の剥離 45°

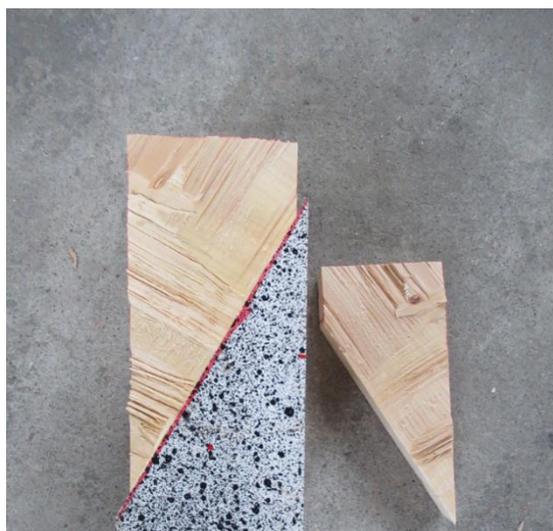


写真 2.5-16 接着層の剥離 30°

2.5.2 応力-ひずみ関係

図 2.5-6～図 2.5-8 にスギ試験体の逆対称4点曲げ試験の応力-ひずみ関係を示す。水平方向では、弱軸の試験体の方が高い剛性を示していることがわかる。また、材せいによる違いはあまりみられない。斜め方向では、水平方向と対照的に強軸の試験体の方が高い剛性を示した。また、材せいが小さい方が若干高い剛性を示した。鉛直方向では、いくつかの試験体は、適切にひずみが計測できていなかった。この要因としては、加力時に軸がずれることで試験体全体がねじれていた可能性が考えられる。

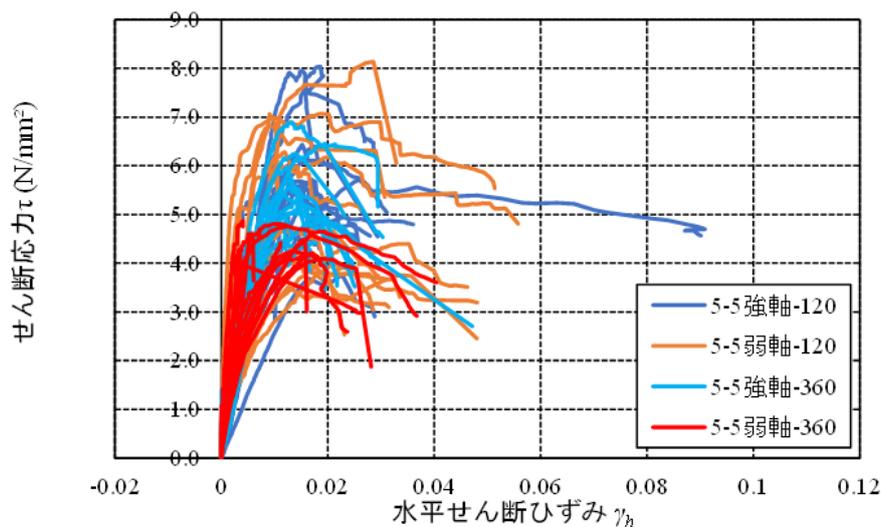


図 2.5-6 応力-ひずみ関係 水平方向

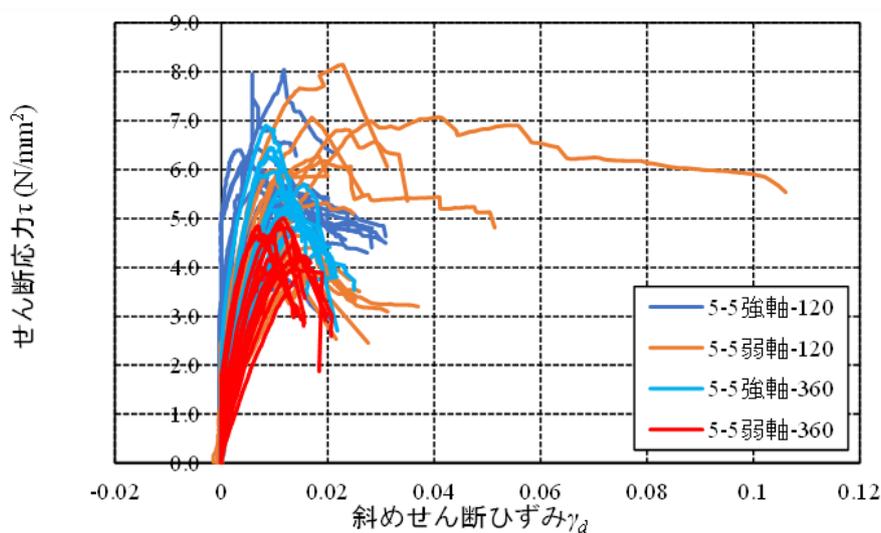


図 2.5-7 応力-ひずみ関係 斜め方向

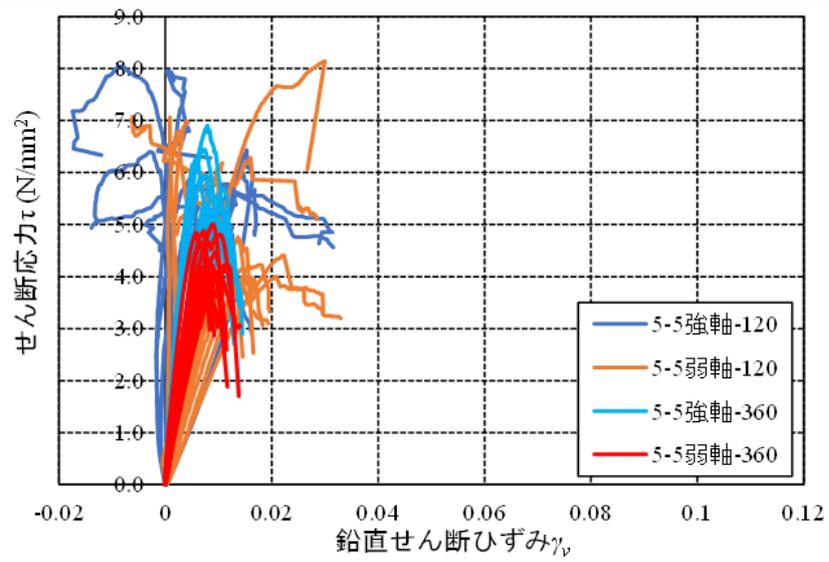


図 2.5-8 応力-ひずみ関係 鉛直方向

図 2.5-9～図 2.5-12 にヒノキ試験体の逆対称 4 点曲げ試験の応力-ひずみ関係を示す。図 2.5-9～図 2.5-11 に示す変位計での計測では、斜め方向での計測で 1 体計測ミスがあったが、それ以外では概ね同様の応力-ひずみ関係を示した。また、図 2.5-12 に示す画像相関法と変位計による応力-ひずみ関係の比較では、画像相関法の方が若干ばらつきはあるが変位計と近い推移を示した。

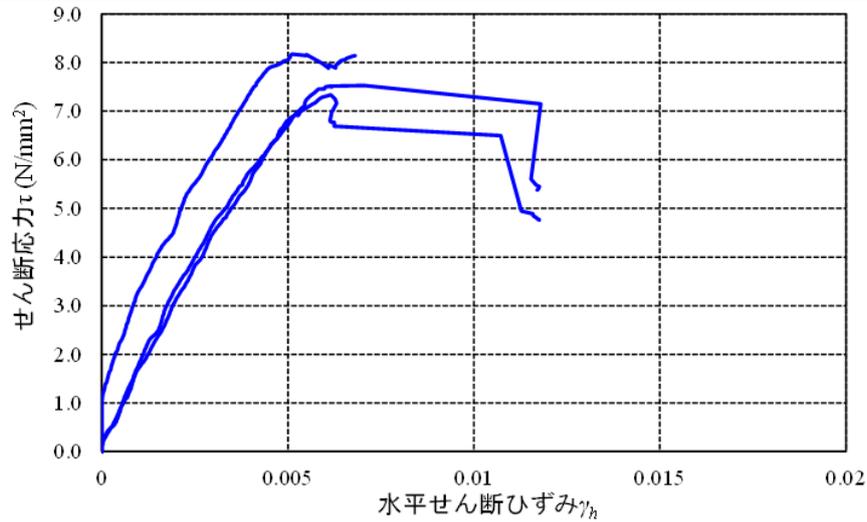


図 2.5-9 応力-ひずみ関係 水平方向

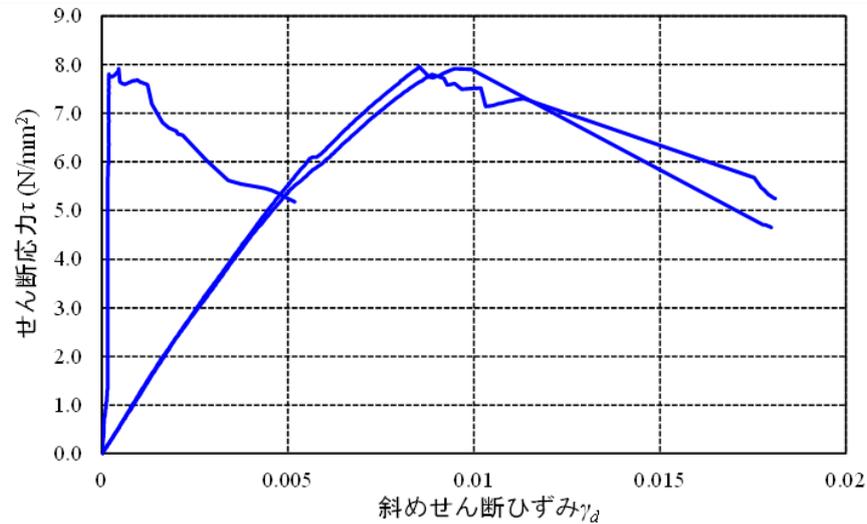


図 2.5-10 応力-ひずみ関係 斜め方向

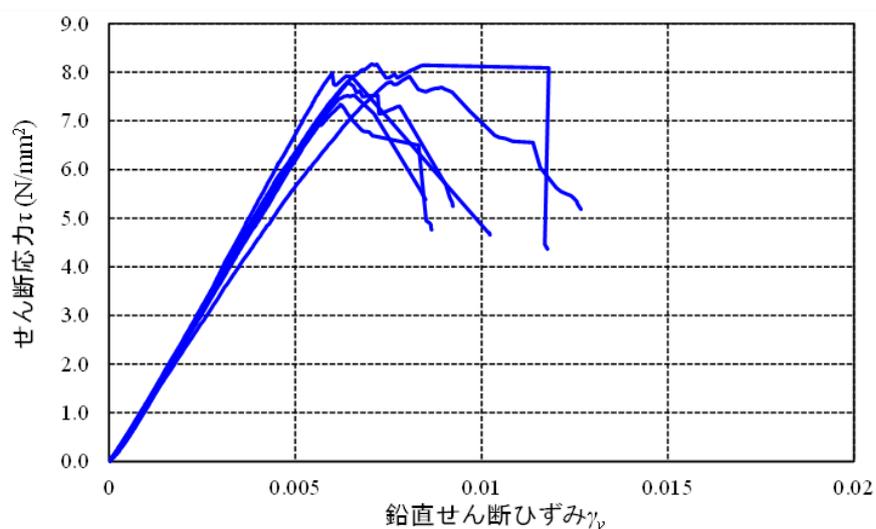
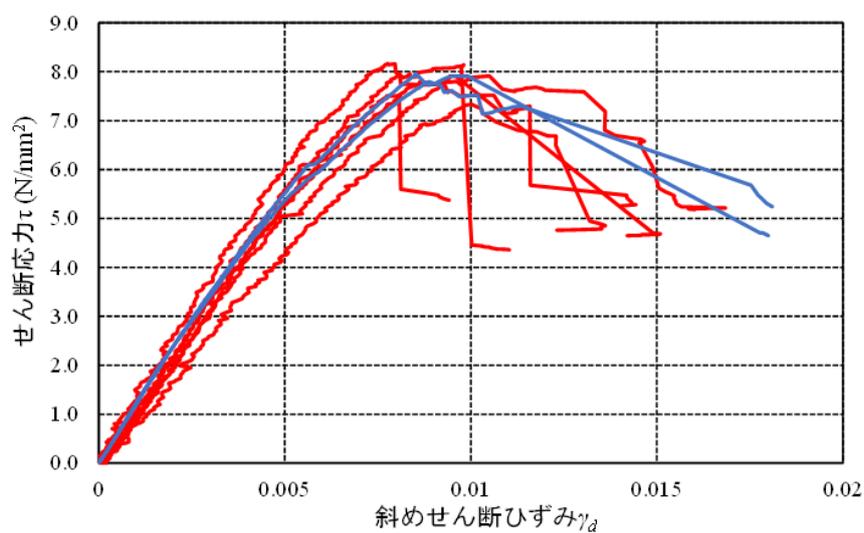


図 2.5-11 応力-ひずみ関係 鉛直方向



— 画像相関    — 変位計

図 2.5-12 応力-ひずみ関係 画像相関法と変位計の比較

※変位計での計測ミス試験体を除く

図 2.5-13～図 2.5-16 にスギ試験体の Off-axis 法の荷重-変位関係、荷重-ひずみ関係を示す。図 2.5-13 に示すクロスヘッド変位では、強軸、弱軸ともに同様の推移をした。多くの試験体で最大荷重到達後、徐々に荷重が低下し、 $0.8P_{max}$  手前で荷重が上下した。図 2.5-14 に示す鉛直方向で計測したひずみでは、50kN 程度までは変位が出る試験体と出ない試験体がみられた。水平方向で計測したひずみでは、70kN 程度までは変位が出る試験体はあまりみられなかった。また、全体的に弱軸の方が若干剛性は高い傾向がみられた。図 2.5-15 に示す画像相関法でのひずみでは、鉛直方向、水平方向ともに変位計とあまり変わらない推移をした。図 2.5-16 に示す変位計と画像相関法でのひずみの比較でもあまり変わらない推移となり、若干変位計の方が剛性は高い傾向がみられた。

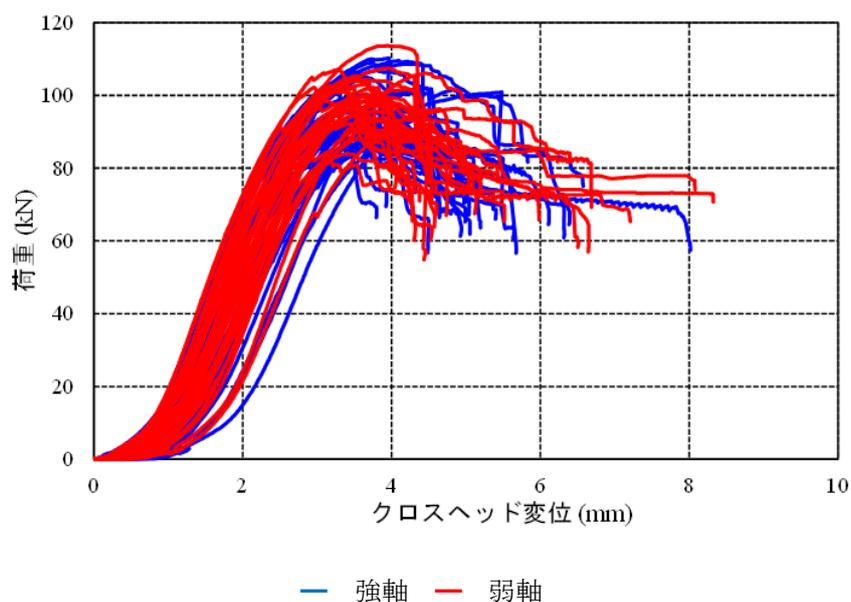


図 2.5-13 スギ Off-axis 法のクロスヘッド変位

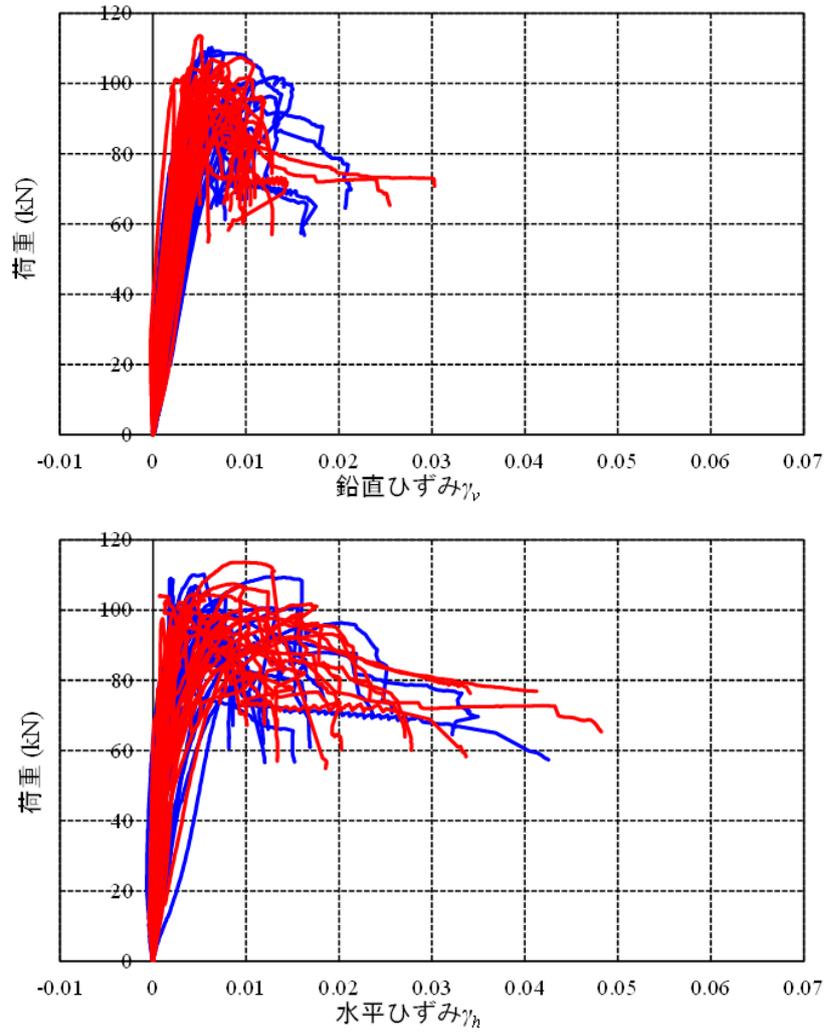


図 2.5-14 スギ Off-axis 法のひずみ 変位計

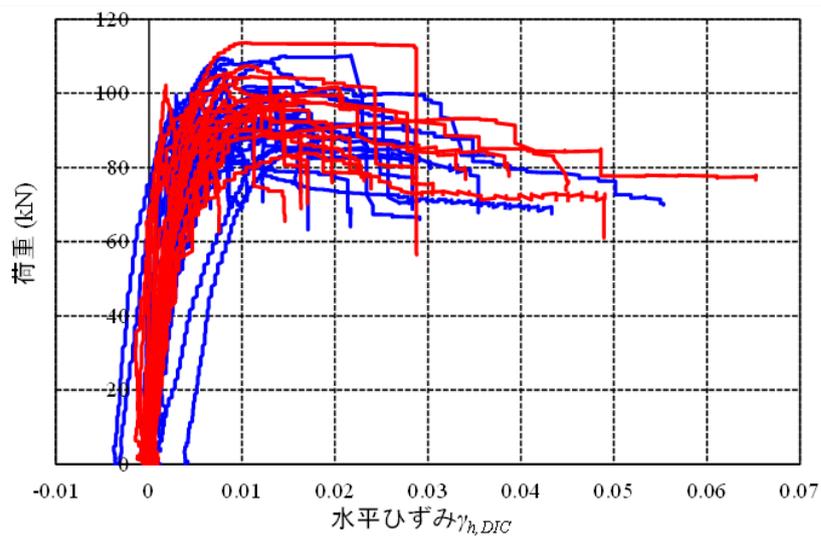
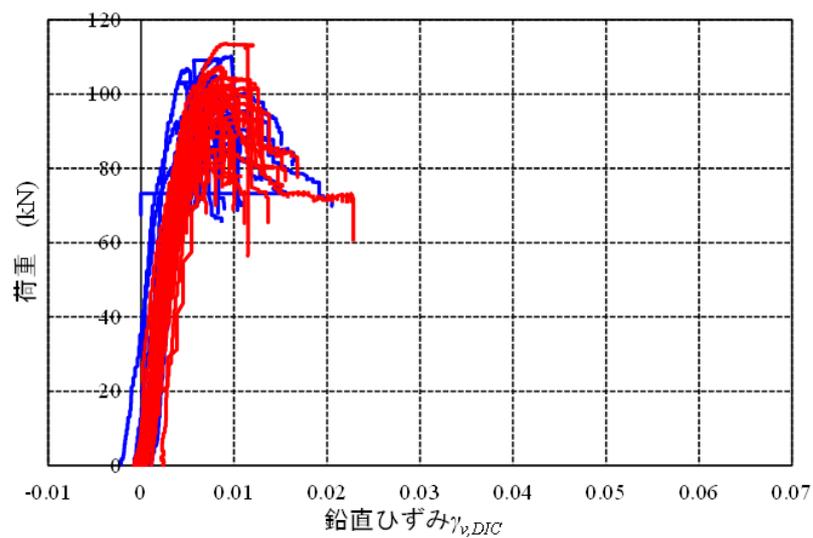
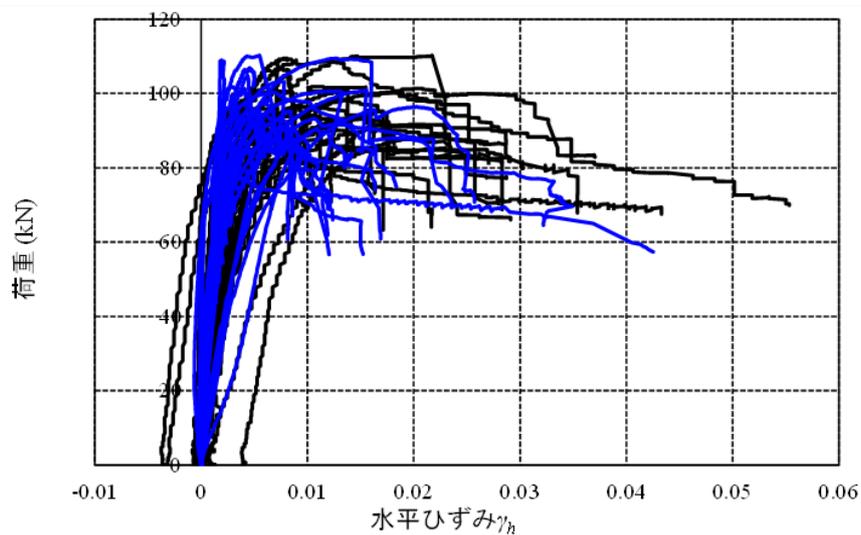
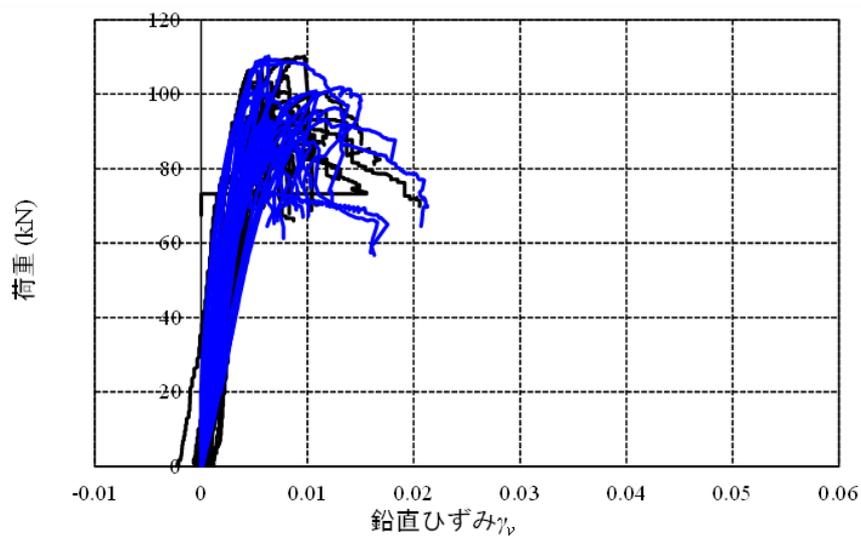


図 2.5-15 スギ Off-axis 法のひずみ 画像相関



— 画像相関 — 変位計

図 2.5-16 計測方法の比較

図 2.5-17～図 2.5-21 にヒノキ試験体の Off-axis 法の荷重-変位、荷重-ひずみ関係を示す。図 2.5-17 に示すクロスヘッド変位では、採材角度によらず最大荷重までは同様の推移をしたが、最大荷重後 45° では荷重が増減し、30° では概ね緩やかに低下した。この理由としては、30° の方が載荷方向と繊維が平行方向に近いいためより変形しやすくなるが、45° では繊維直交方向に働く応力が大きくなるため変形しにくくなっていたと考える。図 2.5-18 に示す変位計でのひずみは、鉛直方向では 1 体を除くほぼすべての試験体で同様の推移がみられた。水平方向では全体的に最大荷重まではあまり変形が計測できなかった。これについては、試験体の寸法が小さいため変形が小さく、うまく計測できなかったと考えられる。本研究では逆対称 4 点曲げ試験の残材から採材する都合上、試験体幅を 80mm としたが、既往文献<sup>2-1)</sup>では試験体幅を 300mm としており、十分な幅を確保してラミナ境界を複数含むことが必要である可能性が考えられる。Off-axis 法の適切な試験条件については今後検討していきたい。図 2.5-19 に示す画像相関法でのひずみは、鉛直方向のひずみでは 30° の方が高い剛性を示した。水平方向のひずみでは、概ね変位計と同様に最大荷重まではひずみは計測できなかった。図 2.5-20、図 2.5-21 に示す採材角度での計測方法の比較では、30° の鉛直方向は画像相関法の方が全体的に高い剛性を示したが、他では概ね近い推移を示し、画像相関法による計測の妥当性を確認できた。

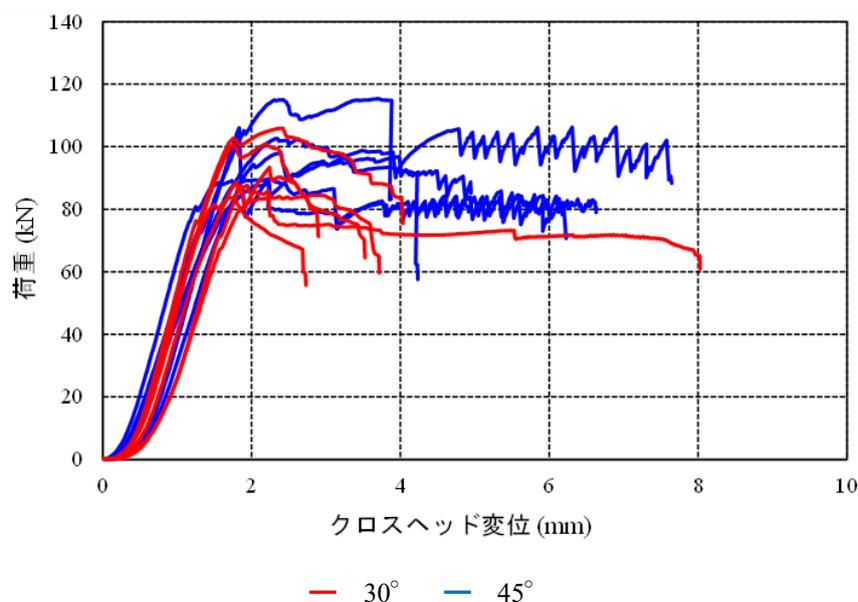


図 2.5-17 ヒノキ Off-axis 法のクロスヘッド変位

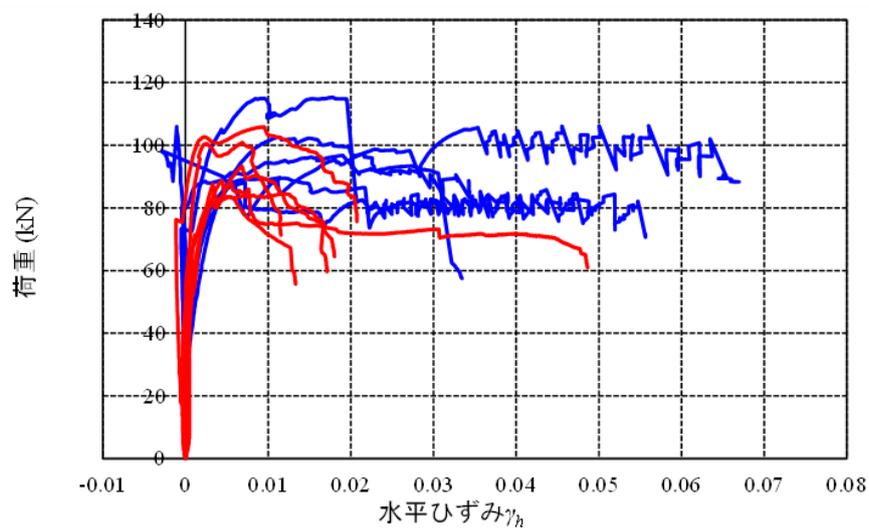
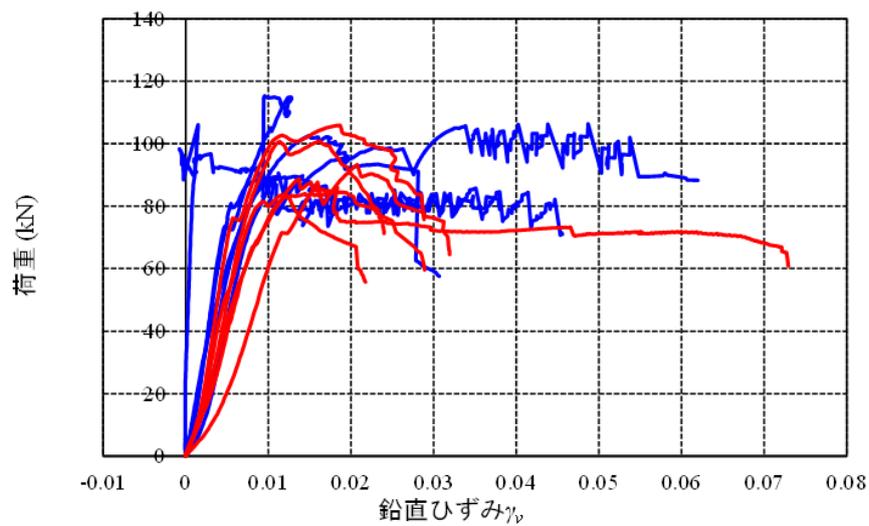


図 2.5-18 ヒノキ Off-axis 法のひずみ 変位計

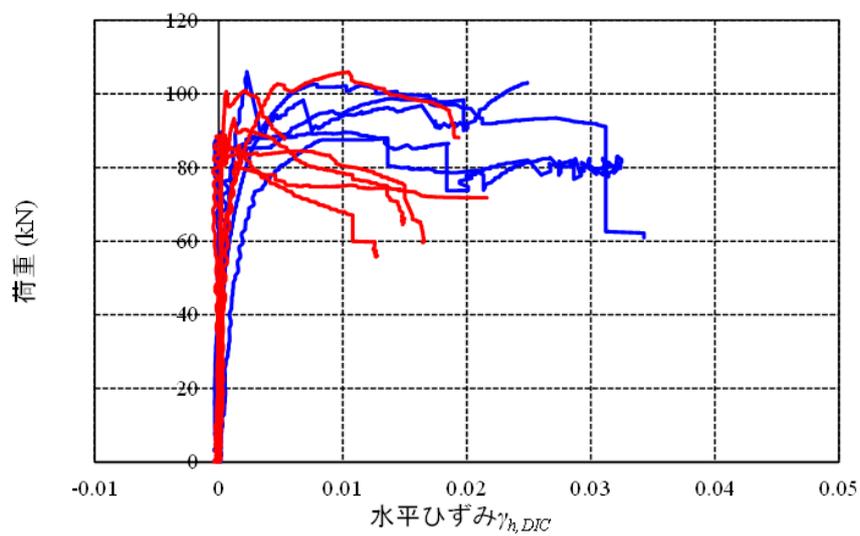
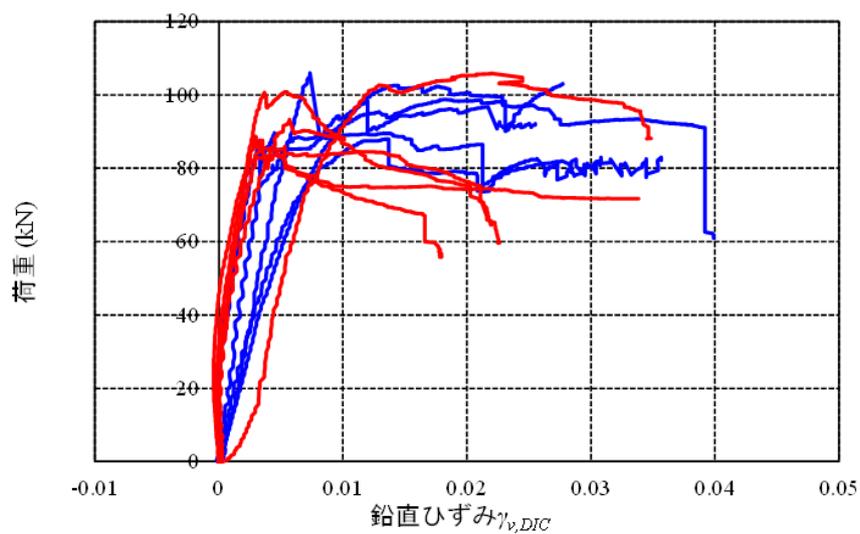


図 2.5-19 ヒノキ Off-axis 法のひずみ 画像相関

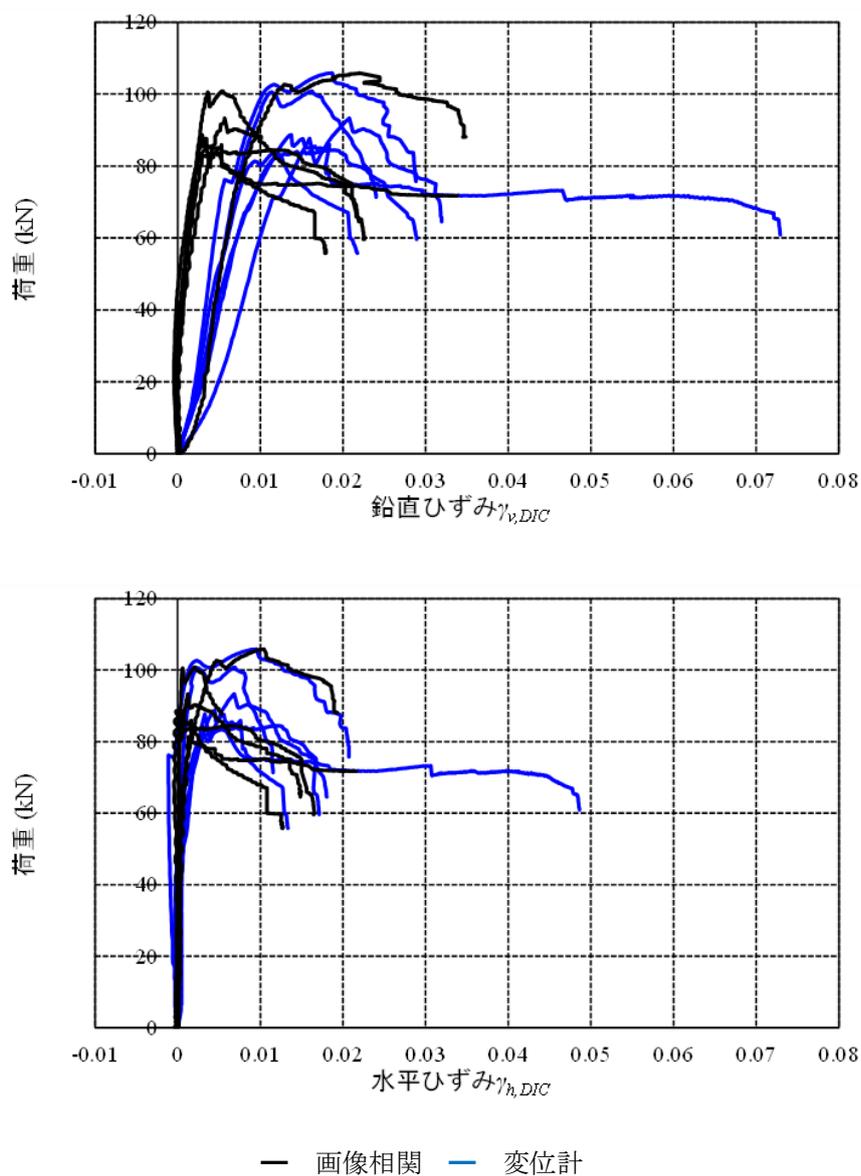


図 2.5-20 計測方法の比較 30°

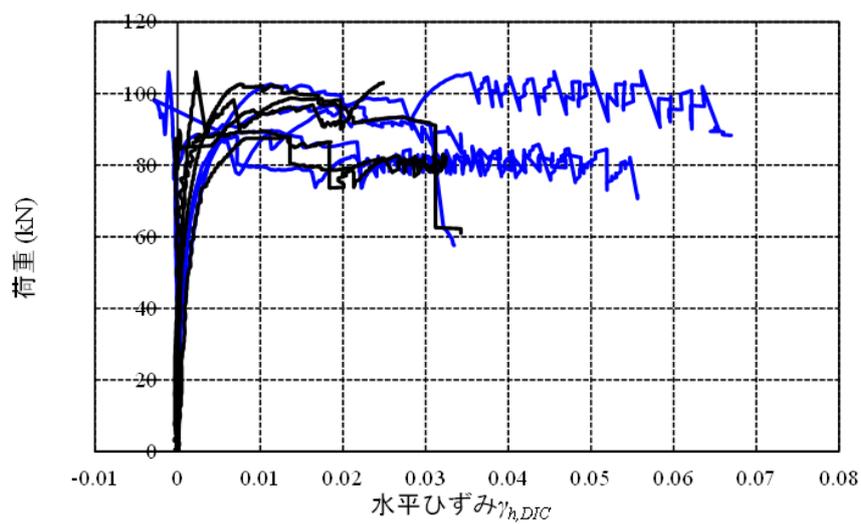
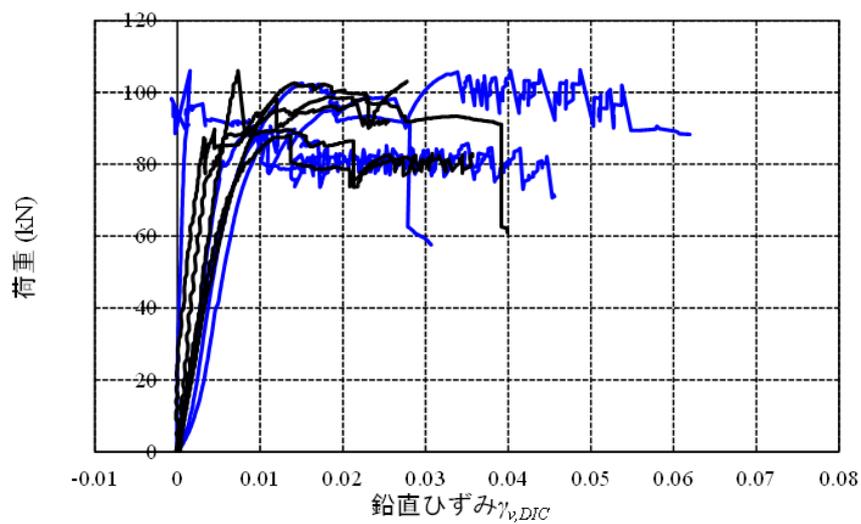


図 2.5-21 計測方法の比較 45°

### 2.5.3 せん断強度

スギ試験体の逆対称4点曲げ試験のせん断強度を図 2.5-22 及び表 2.5-1、表 2.5-2 に示す。荷重方向及び材せいで分け、CLT 施工マニュアル<sup>2-5)</sup>に示された値を基準値として示し比較する。表 2.5-1 及び表 2.5-2 には平均値、5%下限値 (信頼区間 75%)、変動係数を示す。基準値と比較すると、平均値で 1.50～2.59 倍の値を示し、下限値では 1.00～2.42 倍の値を示した。また、全体的に強軸が弱軸より高い値を示した。変動係数は高い条件でも 20%未満となり、ばらつきは大きくない結果であった。材せい 360mm の弱軸の試験体ではスパンの影響が小さくほぼ横ばいの値を示したが、材せい 120mm の試験体では図 2.5-22 の赤枠に示すように、スパン比が小さい場合で高い値を示すものがみられた。この要因としては、図 2.5-23 に示す荷重箇所とラミナ境界の位置が影響していると考えられる。高いせん断強度が得られた試験体では、図 2.5-23 上に示すように支点と荷重点が同じラミナにかかり、中央部で縦圧縮によるストラットが増大し、本来のせん断性能より過大評価になったためと考えられる。図 2.5-23 下に示すように支点と荷重点が同一ラミナにかからず、せん断区間内にラミナ境界が入る場合では、高いせん断強度は得られなかったことから、適切にせん断強度を評価するにはせん断区間内にラミナ境界が入るように荷重位置を調整する必要があることがわかった。

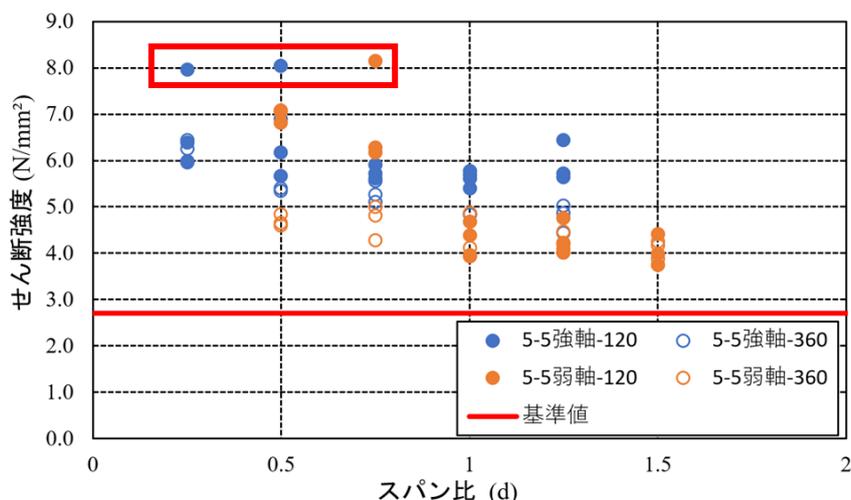


図 2.5-22 せん断強度とスパン比の関係

表 2.5-1 材せい 120mm せん断強度

スパン比 ( <i>d</i> )	強軸			弱軸		
	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.25	6.78	3.52	15.25			
0.50	6.63	2.71	18.75	6.98	6.53	2.07
0.75	5.75	5.30	2.48	6.87	3.39	16.08
1.00	5.60	4.98	3.46	4.33	3.16	8.62
1.25	5.93	4.54	7.42	4.33	3.10	9.00
1.50				4.05	2.99	8.29

表 2.5-2 材せい 360mm せん断強度

スパン比 ( <i>d</i> )	強軸			弱軸		
	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.25	6.22	5.43	4.00			
0.50	5.88	3.10	15.00	4.70	4.31	2.67
0.75	5.32	4.59	4.38	4.69	3.51	8.04
1.00	5.12	3.56	9.65	4.32	2.79	11.28
1.25	4.79	3.85	6.24	4.26	3.65	4.56
1.50				4.10	3.49	4.70

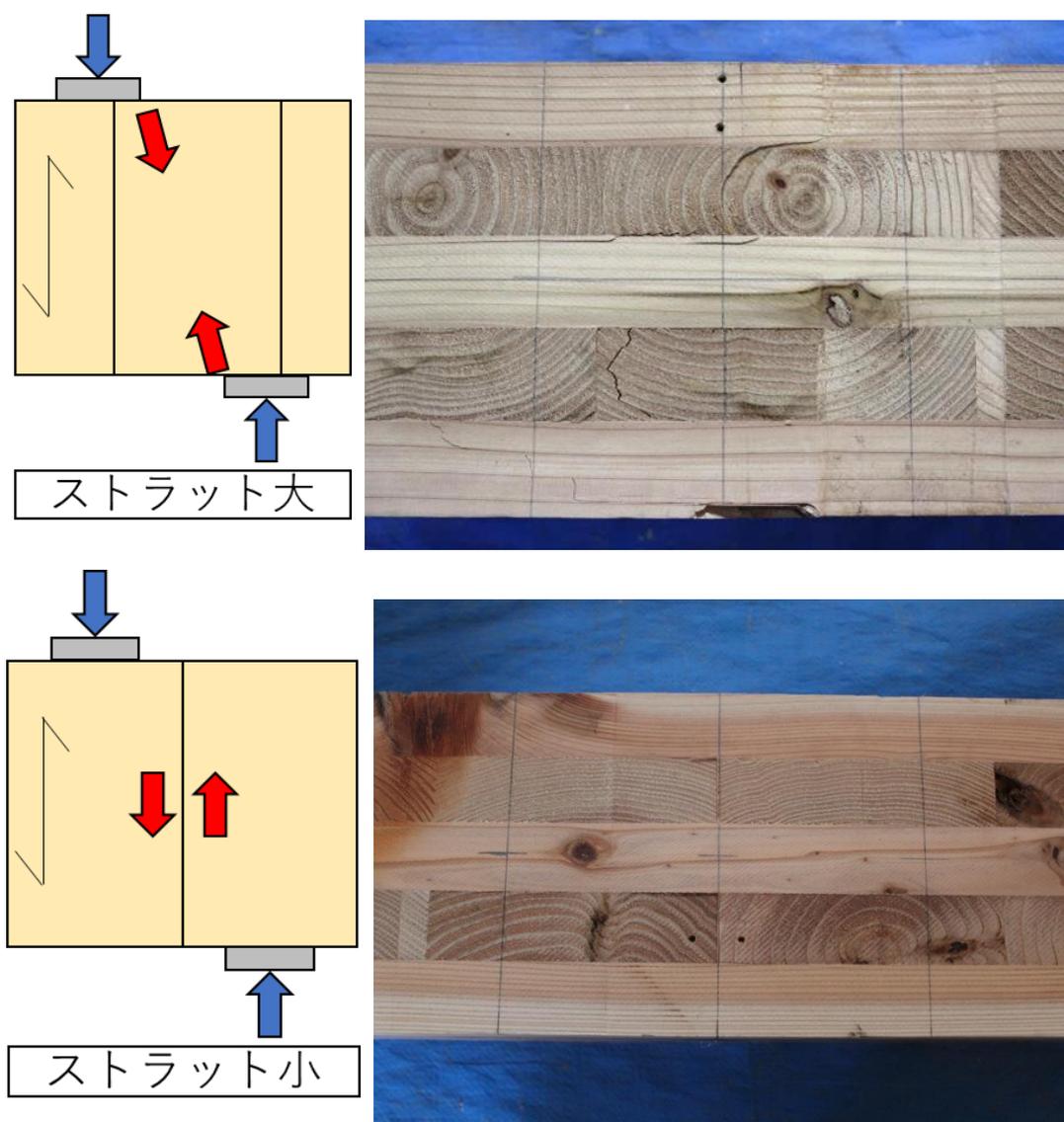


図 2.5-23 載荷位置とラミナ配置の影響

スギ試験体の Off-axis 法で得られたせん断強度及び逆対称 4 点曲げ試験で得られたせん断強度との比較を図 2.5-24、図 2.5-25 に示す。なお、先述の荷重位置によって高いせん断強度が得られた試験体については除いている。それぞれ平均値、5%下限値（信頼区間 75%）、変動係数を併せて示し、基準値と比較する。Off-axis 法では基準値と比較すると約 2.5 倍の値を示した。また、変動係数は約 7%とばらつきは小さい結果となった。また、逆対称 4 点曲げ試験では荷重方向による影響がみられたが、Off-axis 法では平均値、下限値共に荷重方向に関わらず近い値を示した。逆対称 4 点曲げ試験と Off-axis 法の平均値を比較すると、弱軸荷重では 1.51 倍、強軸荷重では約 1.20 倍の値を示した。また、図 2.5-25 は各試験体での試験方法によるせん断強度を示し、ほぼすべての試験体で Off-axis 法によるせん断強度の方が高い値を示すことがわかる。

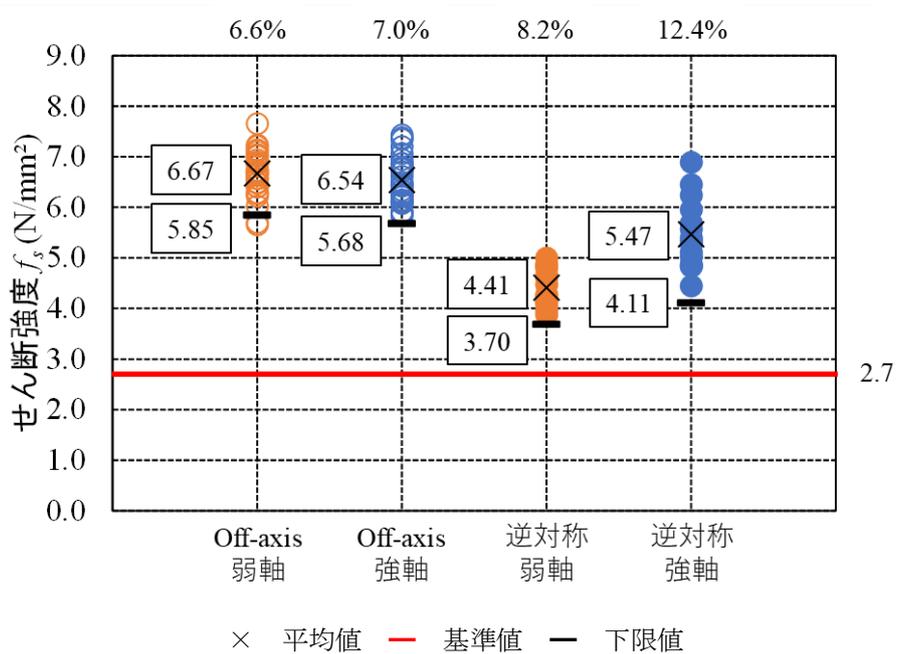


図 2.5-24 スギ-Off-axis 法と逆対称 4 点曲げのせん断強度の比較

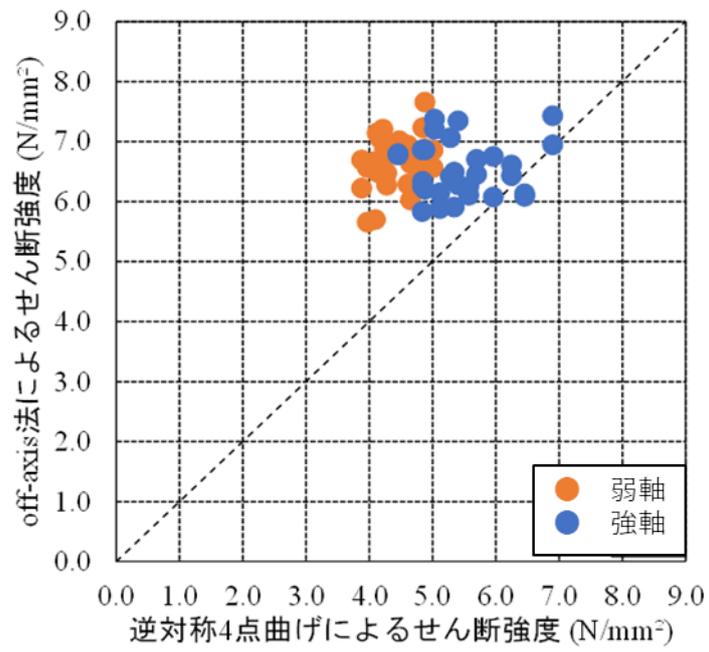


図 2.5-25 スギ各試験体での比較

ヒノキ試験体の Off-axis 法で得られたせん断強度及び逆対称 4 点曲げ試験で得られたせん断強度との比較を図 2.5-26、図 2.5-27 に示す。図 2.5-26 よりヒノキ試験体についても Off-axis 法によるせん断弾性係数は逆対称 4 点曲げ試験の結果より若干高い値を示した。また、変動係数はスギ試験体とは異なり、逆対称 4 点曲げ試験の結果よりばらつきが大きくなった。図 2.5-27、図 2.5-28 より 45° の試験体では、すべて Off-axis 法による値が逆対称 4 点曲げ試験の値を上回る結果となった。対して、30° では概ね逆対称 4 点曲げ試験の結果に近い値を示したことから、逆対称 4 点曲げ試験での試験体中央部の主応力方向は 30° に近いことが考えられる。また、基準強度と比較すると概ね 2 倍以上の値が得られた。図 2.5-29 にスギ試験体とヒノキ試験体の基準強度との比率を示す。スギ試験体とヒノキ試験体の 45° を比較すると、概ね同じように Off-axis 法の値の方が高いことがわかる。スギ試験体は 45° のみであるため、ヒノキ試験体の 30° との比較は適切ではないが、ヒノキ試験体の 30° はスギ試験体と比較しても逆対称 4 点曲げ試験に近い値を得られていることがわかる。

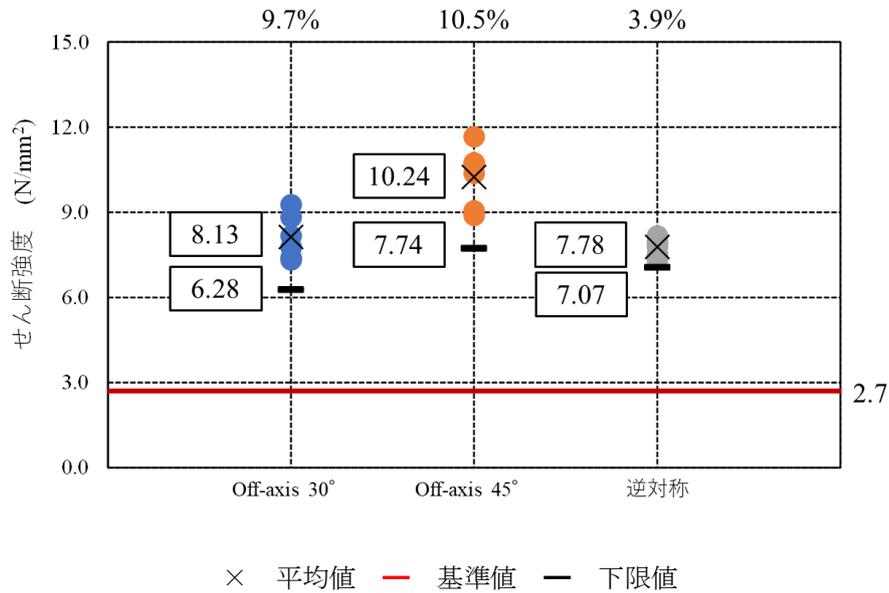


図 2.5-26 ヒノキ-Off-axis 法と逆対称 4 点曲げのせん断強度の比較

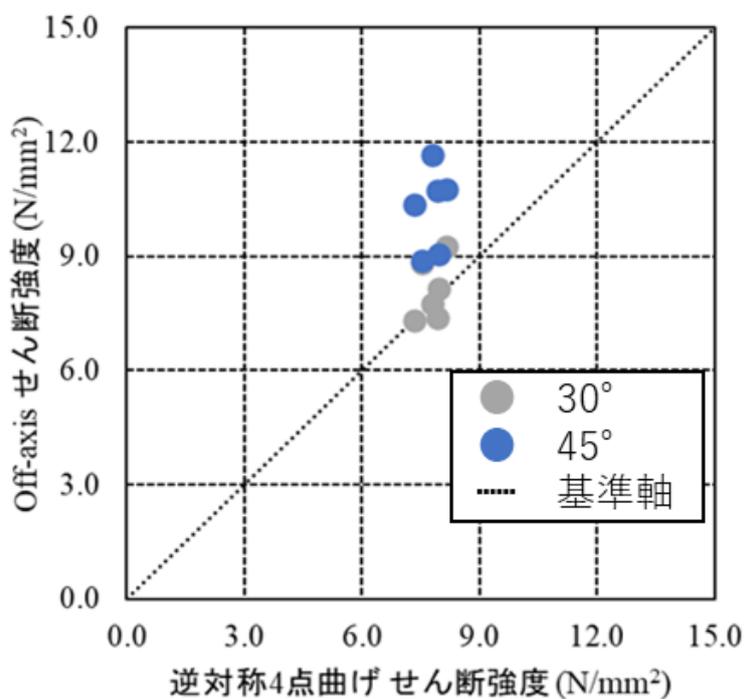


図 2.5-27 ヒノキ-各試験体での比較

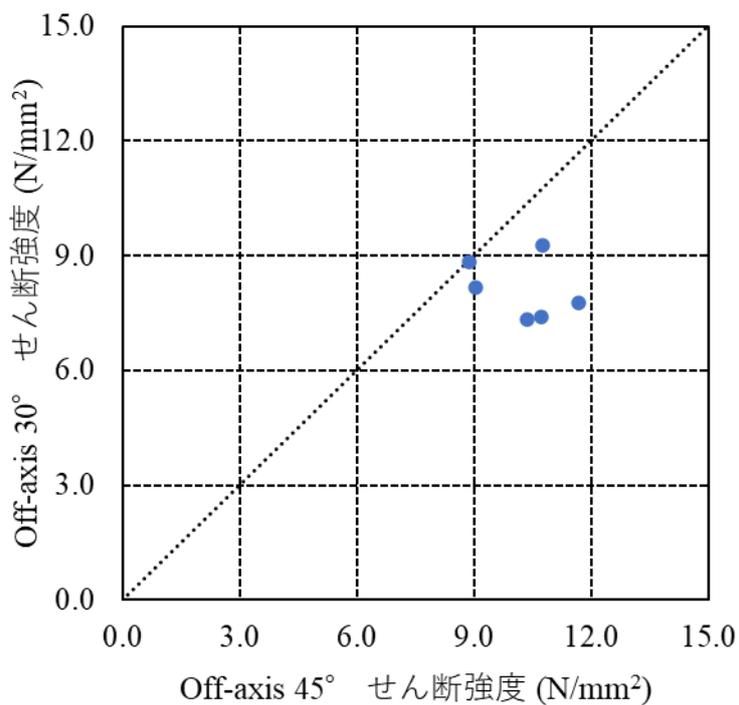


図 2.5-28 採材角度での比較

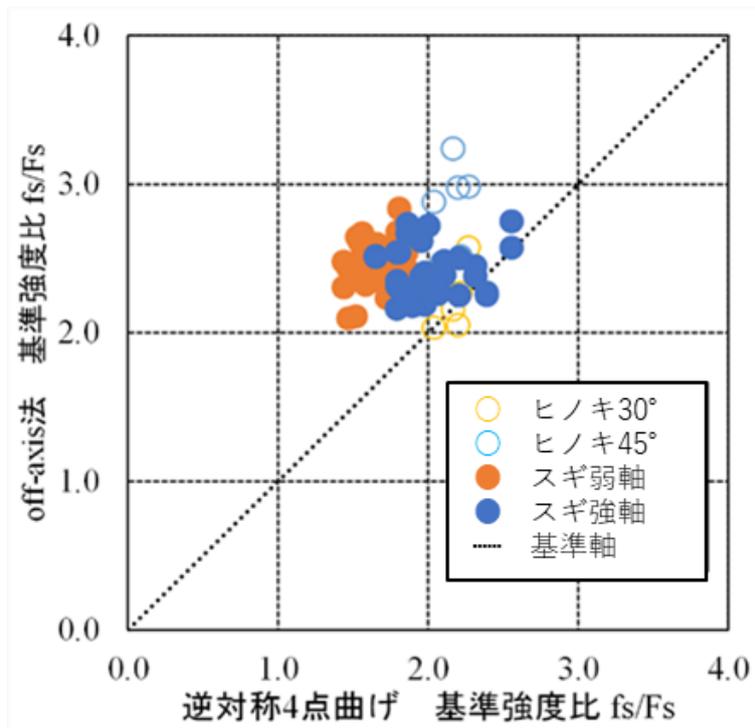


図 2.5-29 樹種ごとの基準強度との比率

### 2.5.4 せん断弾性係数

スギ試験体の各計測方法でのせん断弾性係数とスパン比の関係を図 2.5-30～図 2.5-32 及び表 2.5-3、表 2.5-4 に示す。一部試験体では、計測時のビスのゆるみなどの問題があり、異常に高い値がみられたため除いている。なお、本項以降でせん断弾性係数の妥当性を論じる際の基準として、CLT 施工マニュアル<sup>2-5)</sup>に示された値を基準値 ( $G = 500\text{N/mm}^2$ ) として比較する。

図 2.5-30 より、 $G_h$ では材せいに関わらず強軸より弱軸の方が高い値を示した。基準値と比較すると、平均値で 0.54～2.53 倍とばらつきが大きい結果となった。また、全体的に強軸試験体では基準値を下回る結果となっていることから、計測方法に問題があったと考える。

図 2.5-31、図 2.5-32 より、 $G_v$ 及び  $G_d$ では  $G_h$ と対照的に強軸の方が高い値を示す傾向がみられた。基準値と比較すると、 $G_v$ の平均値は 0.44～2.35 倍、 $G_d$ の平均値は 0.35～1.49 倍の値を示し、 $G_d$ が全体的に低めの値を示したが、他の計測方法に比べて基準値に近い値を示した。 $G_v$ 及び  $G_d$ では材せいによる影響はあまりみられなかった。スパン比とは若干負の相関を示したことから、曲げの影響を受けている可能性が考えられる。また、スパン比 0.5d においてばらつきが大きく、計測方法の改善が必要であると考えられる。

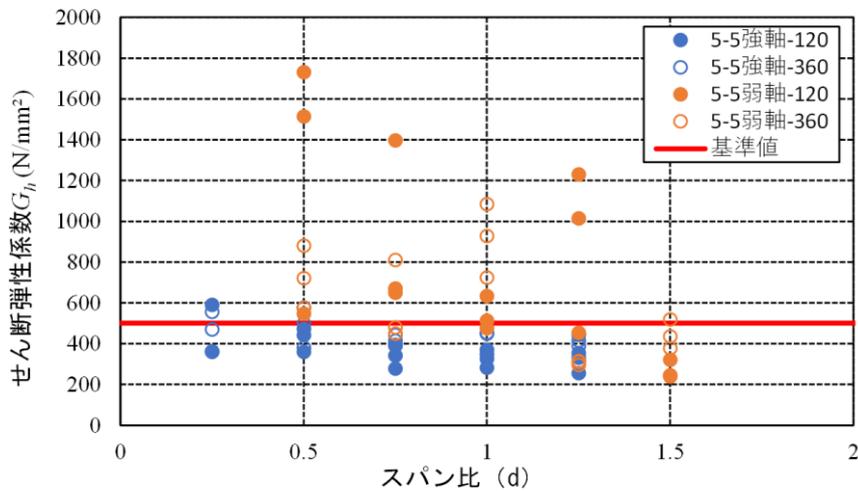


図 2.5-30 水平せん断弾性係数  $G_h$  とスパン比の関係

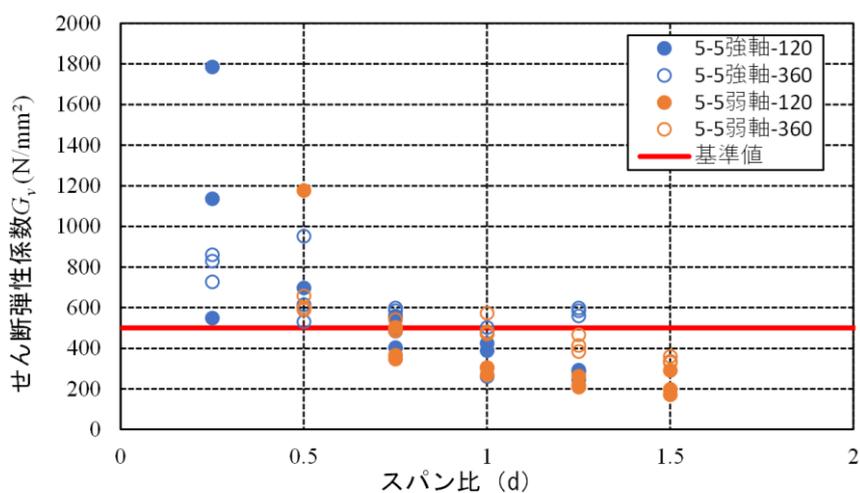


図 2.5-31 鉛直せん断弾性係数  $G_v$  とスパン比の関係

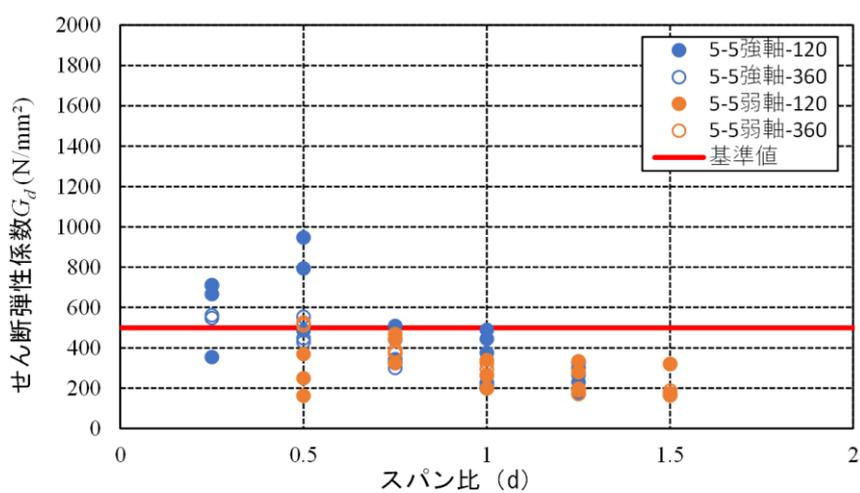


図 2.5-32 斜めせん断弾性係数  $G_d$  とスパン比の関係

表 2.5-3 材せい 120mm のせん断弾性係数 (平均値)

スパン比	$G_h$		$G_d$		$G_v$	
	強軸 (N/mm <sup>2</sup> )	弱軸 (N/mm <sup>2</sup> )	強軸 (N/mm <sup>2</sup> )	弱軸 (N/mm <sup>2</sup> )	強軸 (N/mm <sup>2</sup> )	弱軸 (N/mm <sup>2</sup> )
0.25	493	/	577	/	843	/
0.5	424	1264	743	260	698	1177
0.75	338	906	431	412	480	406
1.0	326	541	437	267	359	293
1.25	314	899	222	269	275	231
1.5	/	268	/	272	/	221

表 2.5-4 材せい 360mm のせん断弾性係数 (平均値)

スパン比	$G_h$		$G_d$		$G_v$	
	強軸 (N/mm <sup>2</sup> )	弱軸 (N/mm <sup>2</sup> )	強軸 (N/mm <sup>2</sup> )	弱軸 (N/mm <sup>2</sup> )	強軸 (N/mm <sup>2</sup> )	弱軸 (N/mm <sup>2</sup> )
0.25	462	/	607	/	806	/
0.5	486	726	477	518	699	616
0.75	416	580	318	378	581	507
1.0	417	912	213	295	484	509
1.25	475	307	315	185	424	422
1.5	/	444	/	173	/	342

図 2.5-33～図 2.5-35 に各試験体の計測方法ごとの比較を示す。図 2.5-33、図 2.5-34 に示すように  $G_h$  と  $G_d$  及び  $G_v$  では計測方法と荷重方向で値の大小が異なることが分かる。対して、図 2.5-35 に示す  $G_d$  と  $G_v$  の比較では比較的近い値を示した。これらの傾向については図 2.5-36 に示すように、計測方法によって算出されるせん断ひずみの方向が異なることが要因の一つとして考える。 $G_h$  は荷重方向に対して直角方向で計測するが、 $G_d$  及び  $G_v$  では荷重方向に対して平行方向で計測している。そのため、外層の繊維方向が異なる場合、計測値に違いが生じていると考える。このことから、CLT 施工マニュアル<sup>2-5)</sup>ではせん断弾性係数は強軸、弱軸共に同じ値を設計値としているが、実際には外層ラミナの方角によって値が変動する可能性があると考えられる。

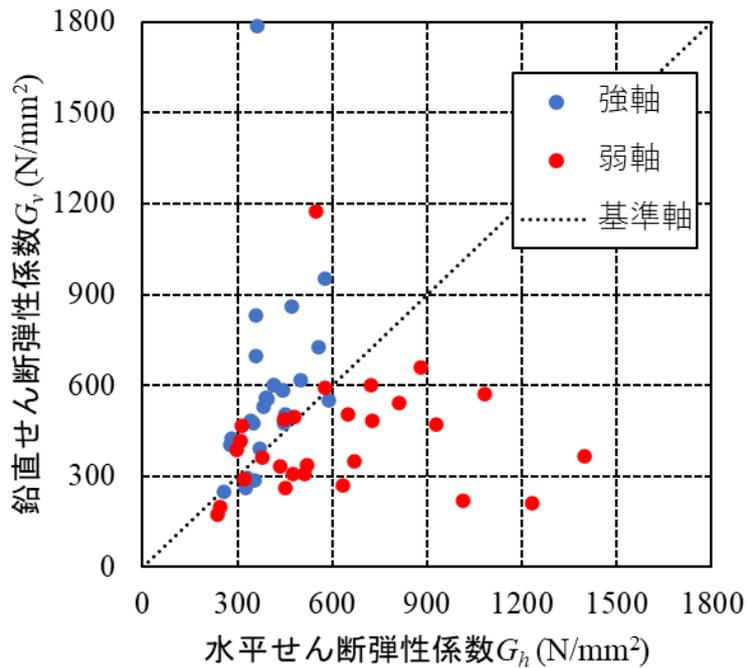


図 2.5-33  $G_h$  と  $G_v$  の比較

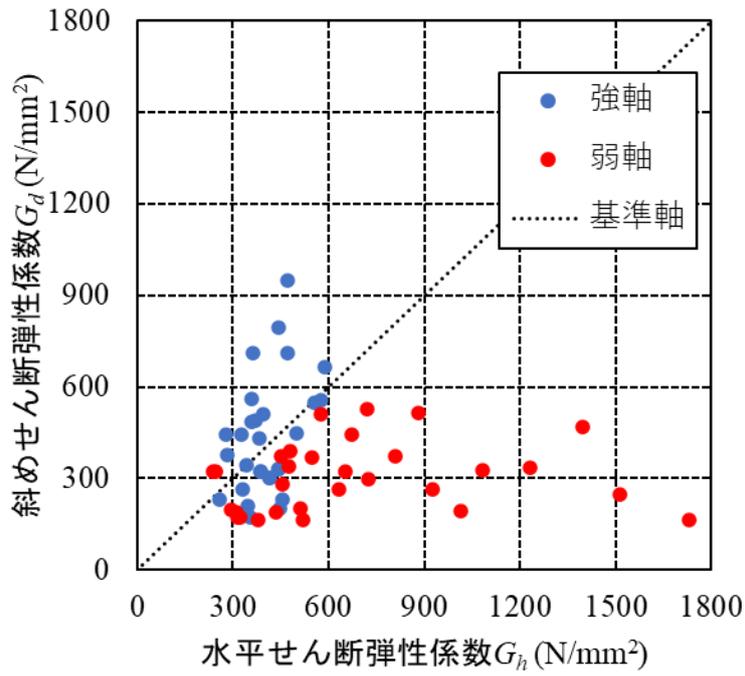


図 2.5-34  $G_h$ と  $G_d$ の比較

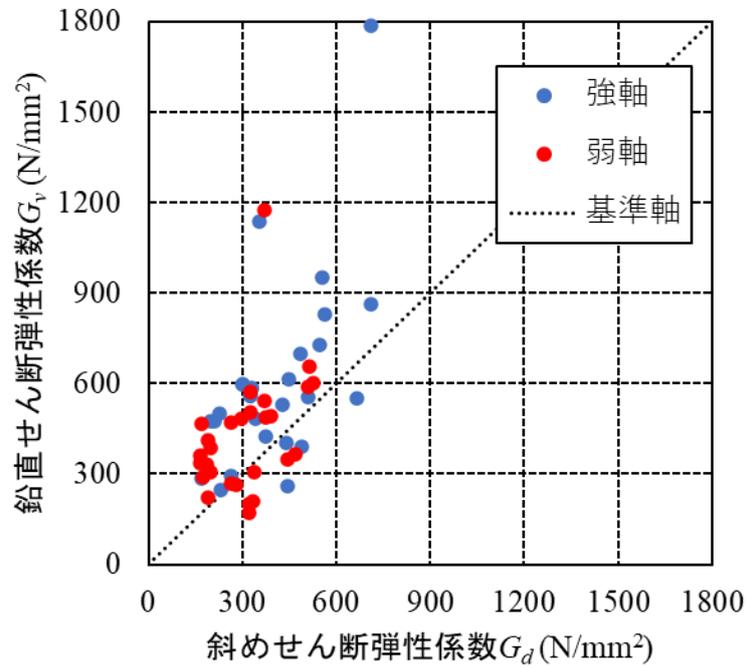
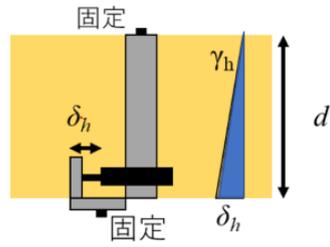


図 2.5-35  $G_v$ と  $G_d$ の比較

載荷方向と平行方向に計測



載荷方向と直角方向に計測

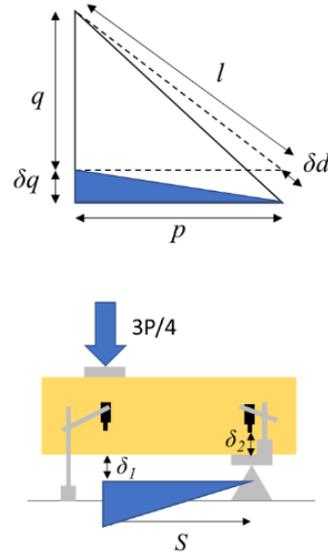


図 2.5-36 せん断変形角（青三角）の方向

スギ試験体の Off-axis 法で得られたせん断弾性係数及び逆対称 4 点曲げ試験で得られたせん断弾性係数との比較を図 2.5-37 に示す。なお、ここで用いる逆対称 4 点曲げのせん断弾性係数は鉛直方向の値  $G_v$  を用いている。図 2.5-37 に示すように強軸、弱軸共に平均値及び下限値は逆対称 4 点曲げ試験の結果に近い値を示した。また、Off-axis 法では強軸と弱軸の差異は小さくなり、繊維方向による影響が小さくなったと考える。図 2.5-38 に示す各試験体での逆対称 4 点曲げ試験と Off-axis 法での結果を併せたグラフでは、同じ材を用いた場合でも試験方法と载荷方向によって値の大小が異なることがわかる。このことから、逆対称 4 点曲げ試験ではラミナの繊維方向の影響を受けることがわかり、繊維方向の影響が小さくなるような計測方法の検討が必要であると考え。また、図 2.5-39 に示す Off-axis 法での画像相関法による計測と変位計での計測を比較したグラフでは、画像相関法の方が若干低い値を示す傾向がみられるが、ばらつきはほぼ変わらない結果を示したことから、画像相関法での計測も有用性があると考え。しかし、画像相関法の場合においても、ランダムパターンの作成や計測精度によっても変動するため、ばらつきを抑えることができる計測方法の検討が必要であると考え。

また、図 2.5-37 に示す黒塗りの値については、Off-axis 法での計測の際にラミナ位置が影響して極端に高い値を示した試験体であり、写真 2.5-17～写真 2.5-19 にラミナ位置の詳細を示す。写真 2.5-17 は極端に高い値を示した黒塗りの試験体であり、水平方向に変形を計測していた変位計設置のビス位置が同一ラミナに打たれていることがわかる。対して、写真 2.5-18 に示す試験体はビス位置がラミナ境界をまたいでいることから、適切に変形が計測できていた。そのため、写真 2.5-17 のように試験体中央にラミナ境界がない場合、写真 2.5-19 に示すように計測位置をラミナ境界に合わせて移動させることで変形を計測した。よって、逆対称 4 点曲げ試験においても、変形の計測にラミナ境界が大きく関与している可能性が考えられる。以降に示す 3 章及び 4 章ではラミナ境界にも注意した検討をおこなう。

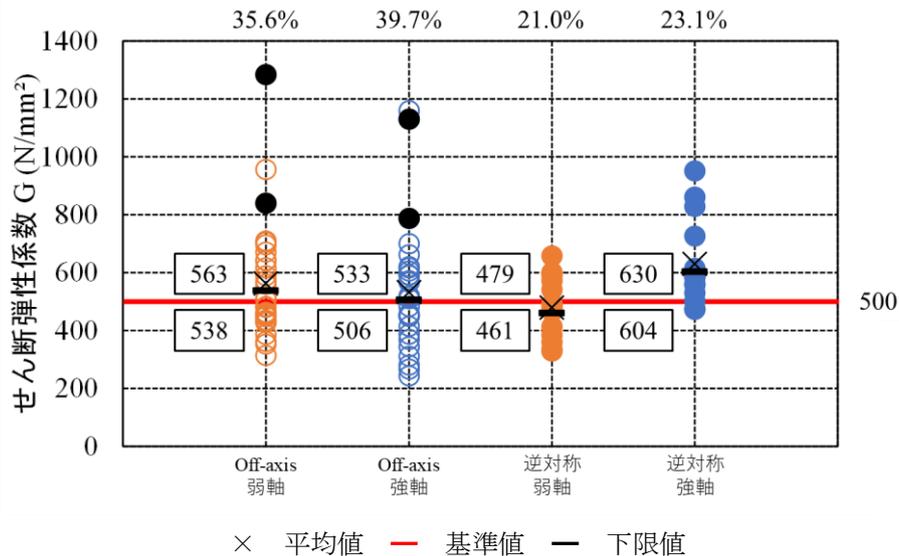


図 2.5-37 Off-axis 法と逆対称 4 点曲げのせん断弾性係数の比較

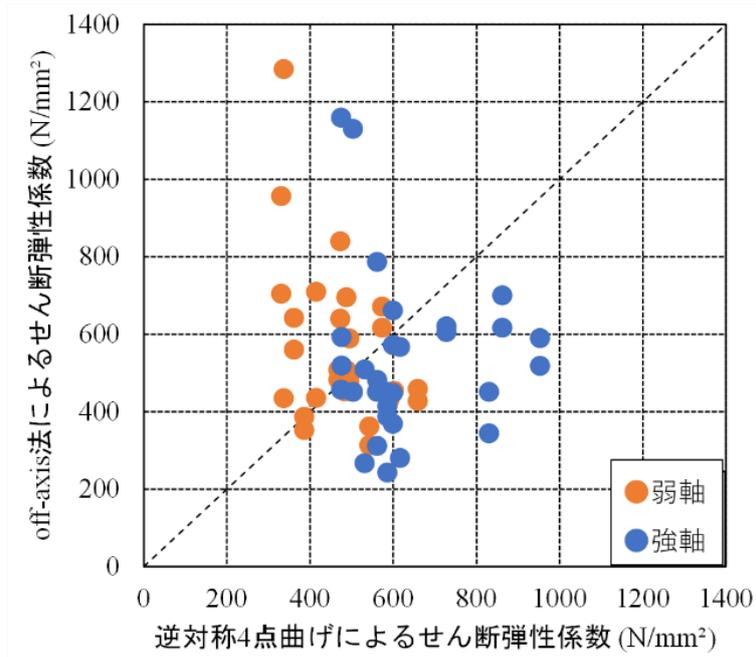


図 2.5-38 試験体ごとの Off-axis 法と逆対称 4 点曲げのせん断弾性係数の比較

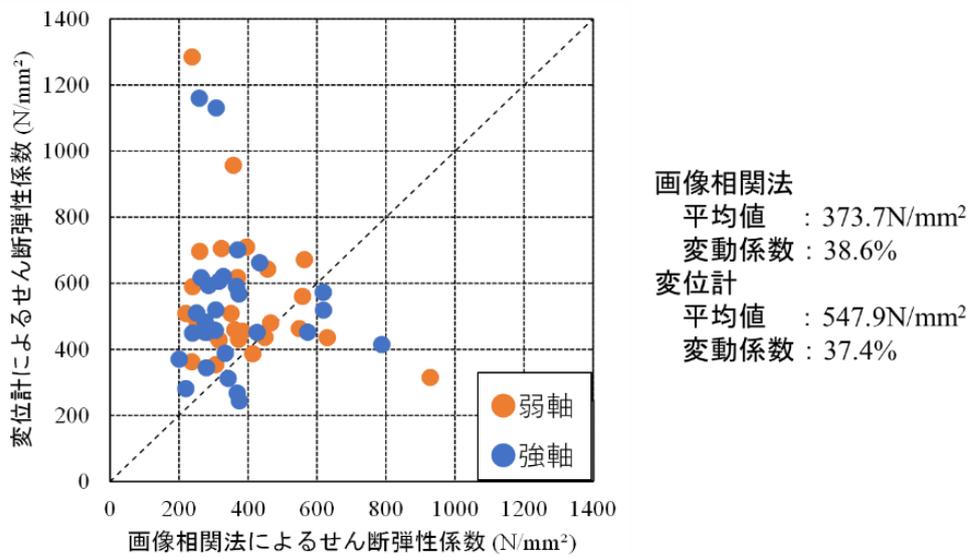


図 2.5-39 画像相関法と変位計による計測の比較



写真 2.5-17  
同一ラミナでの計測

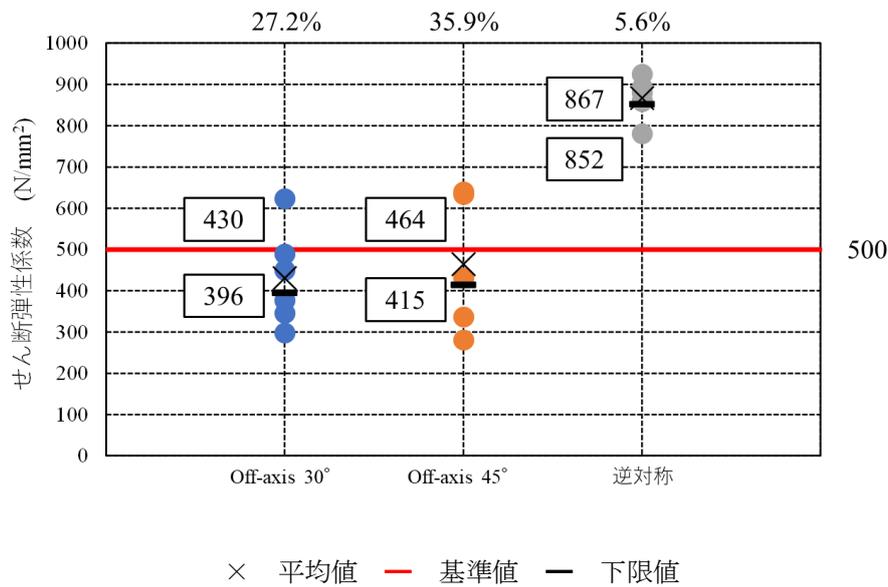


写真 2.5-18  
ラミナ境界を含む計測



写真 2.5-19  
計測位置の調整

ヒノキ試験体の Off-axis 法で得られたせん断弾性係数及び逆対称 4 点曲げ試験で得られたせん断弾性係数との比較を図 2.5-40、図 2.5-41 に示す。なお、Off-axis 法の内 1 体は変位計の設置ミスによって異常に高いせん断弾性係数が得られたため除いている。図 2.5-40 に示すヒノキ試験体のせん断弾性係数の比較では、逆対称 4 点曲げ試験は全試験体で計測している鉛直変位から算出したせん断弾性係数  $G_v$  を用いている。Off-axis 法によるせん断弾性係数は逆対称 4 点曲げの結果と比較して、全体的に低い値を示し、ばらつきが大きくなった。スギ試験体に比べて大きく差ができている要因としては、試験体寸法が小さかったため、全体に占めるラミナ境界の割合が大きくなり、変形が大きく算出されたためと考える。図 2.5-41、図 2.5-42 より採材角度に関わらず逆対称 4 点曲げの値より小さい値を示し、角度の違いが及ぼす影響はあまりみられなかった。図 2.5-43 に示す画像相関法との比較では、全体的に画像相関法が高い値を示し、ばらつきは大きくなった。また、 $45^\circ$  の方が画像相関法と変位計の違いは小さくなった。



× 平均値 — 基準値 — 下限値  
 図 2.5-40 ヒノキ試験体のせん断弾性係数

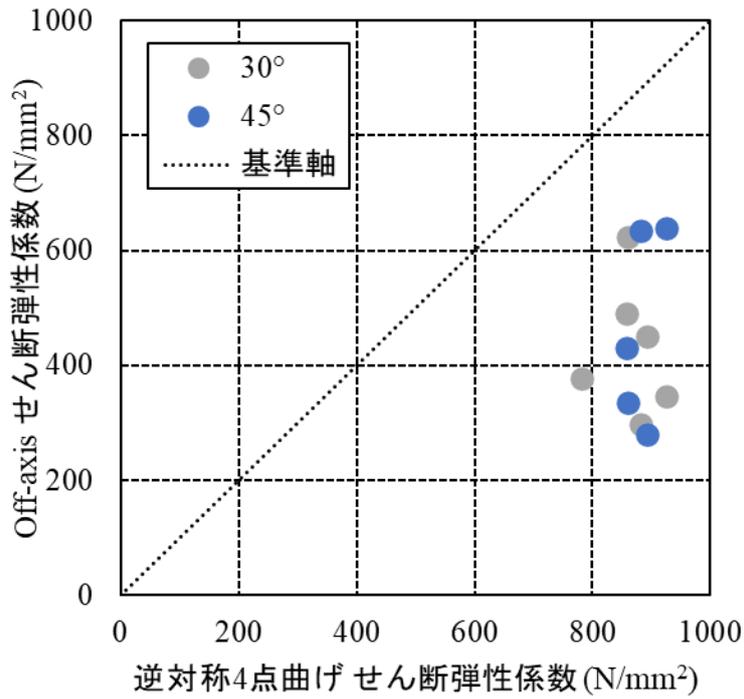


図 2.5-41 ヒノキ-各試験体での比較

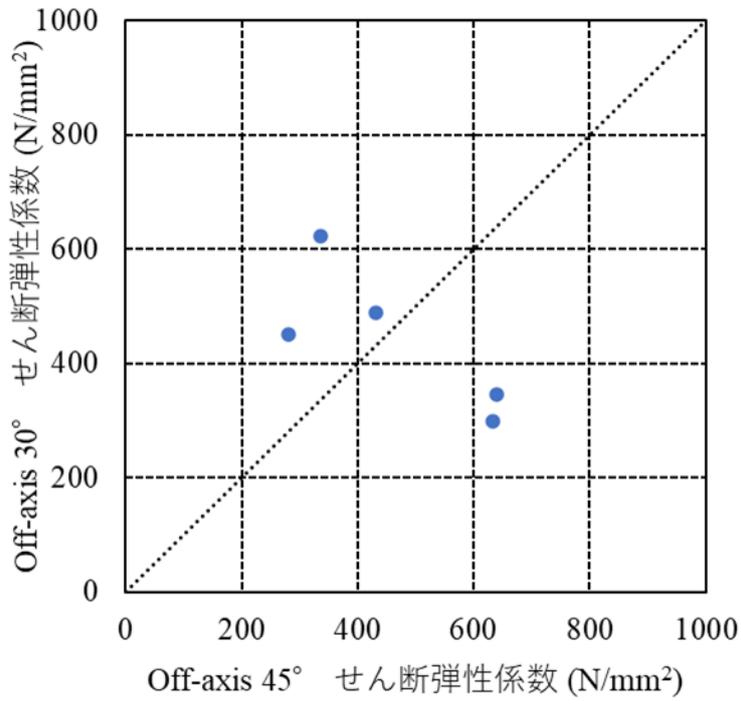


図 2.5-42 採材角度の違い

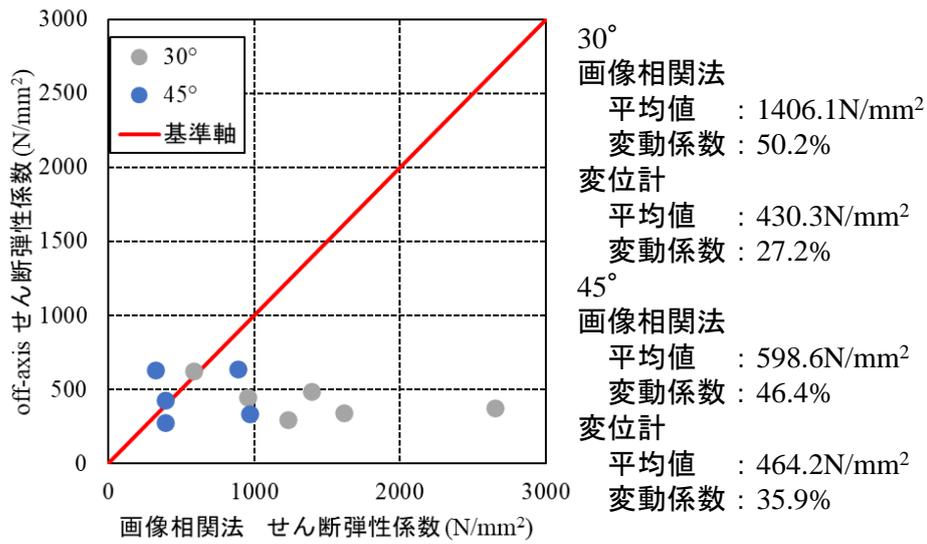


図 2.5-43 画像相関法と変位計による計測の比較

## 2.6 本章のまとめ

本章では、5層5プライのスギ及びヒノキのCLTを用いて逆対称4点曲げ試験を実施した。スパン比、材せい、載荷方向をパラメータとして、それぞれがせん断強度及びせん断弾性係数に及ぼす影響を検討した。また、Off-axis法によるせん断実験も実施し、結果を比較した。その結果、以下のことがわかった。

### 逆対称4点曲げ

破壊性状については、スパン比が $1.25d$ 以上になると曲げ破壊が生じる試験体がみられた。せん断破壊が見られた試験体では、強軸載荷の試験体でラミナがせん断破壊するモードⅠ、又はラミナの境界がずれるモードⅢの破壊、弱軸載荷ではモードⅢの破壊やローリングシアがみられた。せん断破壊した試験体の中ではスパン比による差はなく、スパン比を $1.0d$ 以下とすることで破壊性状としては適切であると考えられる。

せん断強度については、CLT施工マニュアル<sup>2-5)</sup>の値と比較すると、平均値で1.50～2.59倍の値を示し、下限値では1.00～2.42倍の値を示した。また、全体的に強軸が弱軸より約1.3倍高い値を示した。変動係数は高い条件でも20%未満となり、ばらつきは大きくない結果であった。また、スパン比が短く支点と載荷点在同一ラミナにかかる試験体で極端に高い値がみられた。これは、同一ラミナに載荷することで試験体中央部に作用する縦圧縮によるストラットが増大したためと考えられる。スパン比が短くても、同一ラミナで載荷していない試験体については極端に高いせん断強度を示さなかったことから、載荷時にせん断区間内にラミナ境界が入り、同一ラミナに載荷しないような載荷位置を検討する必要があることがわかった。

せん断弾性係数については、スギ試験体では計測方法と載荷方向によって値の大小が異なることがわかった。また、スパン比と若干負の相関がみられたことや、CLT施工マニュアル<sup>2-5)</sup>に記載の値より低い値を示す試験体もみられたこと、ばらつきが大きいことから、計測方法の改善が必要であると考えられた。そのため、水平方向及び斜め方向の計測方法を改善して実施したヒノキ試験体での計測では、CLT施工マニュアル<sup>2-5)</sup>の値に比べて約1.7倍の値を示し、ヒノキ試験体で実施した計測方法の改善効果がみられた。画像相関法を用いたせん断弾性係数では、変位計の計測よりも小さい値を示す傾向がみられたが、変動係数はほぼ同等であり逆対称4点曲げ試験の画像相関法での計測の有用性を確認した。

### Off-axis法

Off-axis法との比較では、逆対称4点曲げ試験の結果と比較して平均値で約1.2倍のせん断強度が得られた。また、逆対称4点曲げ試験では載荷方向による差がみられたが、 $45^\circ$ でのOff-axis法では繊維方向の影響を受けにくくなり、全体的にばらつきが小さい結果を示した。せん断弾性係数では若干ばらつきが小さくなり、載荷方向に関わらず逆対称4点曲げ試験と同等の値が得られた。しかし、ヒノキ試験体では逆対称4点曲げ試験よりばらつきが大きくなり、試験体寸法による影響が示唆された。

## 第3章

### 4層4プライ試験体での検討

### 3 4層4プライ試験体での検討

#### 3.1 はじめに

本章では、2章で荷重方向によるせん断性能の差異について、図 3.1-1 に示すような4層4プライのCLTでの検討をおこなった。4層4プライは2章で用いた5層5プライのような左右対称構成ではなく、表裏で繊維方向が異なる左右非対称構成となっていることから、両面で同じ方法を用いてせん断弾性係数を算出することで、同じ応力下での繊維方向によるせん断弾性係数の違いを検討できると考えたためである。また、4層4プライについても Off-axis 法による検討をおこなった。2章の5層5プライと比較することで、層構成の違いが及ぼす影響を検討する。

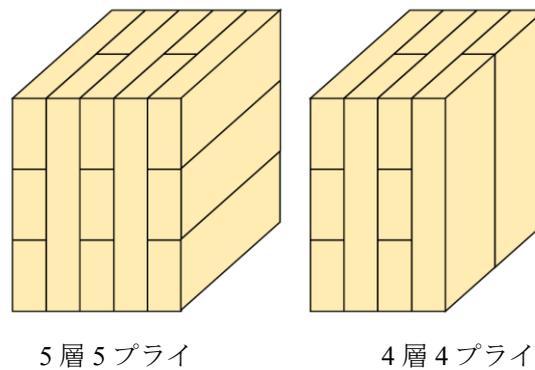


図 3.1-1 層構成の違い

### 3.2 試験体概要

試験体の緒元を表 3.2-1 に示す。樹種はスギ（等級：S60 相当、密度： $438 \pm 36 \text{ kg/m}^3$ 、含水率： $11.6 \pm 0.7\%$ ）とした。幅はぎ接着はしておらず、ラミナ厚さは 30mm、ラミナ幅は 122mm としている。4層4プライでは表裏で繊維方向が異なるため、図 3.2-1 に示すように载荷方向に対して繊維が直交となる面を pe 面、繊維が平行となる面を pa 面と定義し、破壊性状及びせん断弾性係数では各面の差異を確認する。加圧板幅  $w_p$  は  $d/2 = 120\text{mm}$  とし、スパン比は 2 章で曲げ破壊が生じず、同一ラミナへの载荷がないように  $0.5 \sim 1.0d$  とした。

Off-axis 法の試験体の緒元を表 3.2-2 に示す。2 章と同様に試験後の材料の非破壊箇所から角度を  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  として切り出した。各試験体から 1 体採材し、同じ材を用いた逆対称 4 点曲げ試験の結果及び 2 章のスギ試験体の結果と比較する。

表 3.2-1 逆対称 4 点曲げ試験体一覧

樹種	材せい (mm)	材幅 (mm)	スパン比 ( $S-w_p$ ) / $d$	計測方法	試験体数
スギ	240	120	$0.5d$	水平方向 斜め方向	各 3 体 (計 18 体)
			$0.75d$		
			$1.0d$		

表 3.2-2 Off-axis 法試験体一覧

樹種	材せい (mm)	材幅 (mm)	採材角度	試験体数
スギ	240	80	$30^\circ$	各 17 体 (計 34 体)
			$45^\circ$	

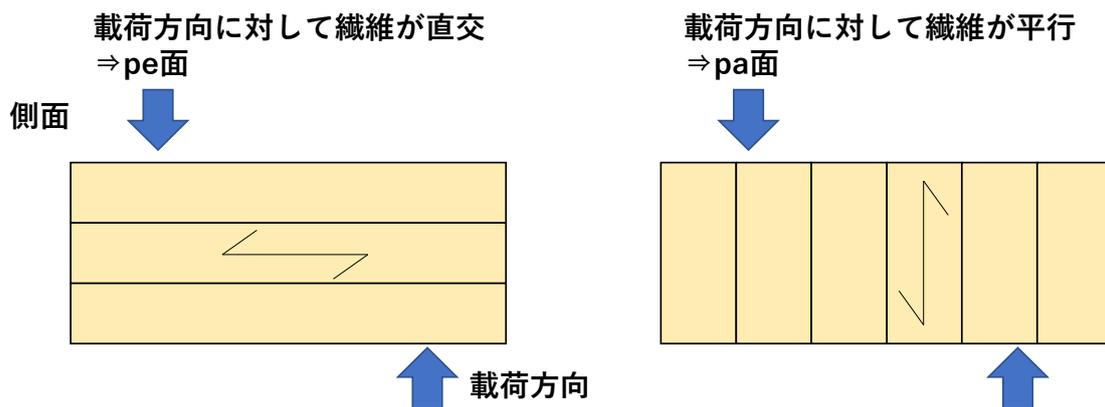


図 3.2-1 計測面の定義

### 3.3 試験方法・計測方法及び特性値の算出

逆対称4点曲げ試験の試験方法は2.3と同様とした。

計測方法は図 3.3-1 に示すように表裏両面で水平計測又は斜め計測を各スパン比で3体ずつ実施した。それぞれの計測方法は2.4のヒノキ試験体と同様とし、画像相関法による計測はおこなっていない。

特性値の算出は2.4と同様とした。



斜め変位又は水平変位を片面ずつ計測  
鉛直変位は各面4点ずつ計測、計8点

図 3.3-1 試験の様子

Off-axis 法の試験方法、計測方法、特性値の算出は2.4のヒノキ試験体と同様とした。

### 3.4 試験結果

#### 3.4.1 破壊性状

逆対称4点曲げ試験の破壊性状を写真 3.4-1～写真 3.4-4 に示す。Pe 面では5層5プライの強軸でみられたようなラミナがせん断破壊するモードⅠ、ラミナ境界がずれるモードⅢがみられた。Pa 面では5層5プライの弱軸でみられたようなラミナ境界がずれるモードⅢ、ローリングシアがみられた。なお、2.5.1 では一部曲げ破壊もみられたが、本章ではすべての試験体がせん断破壊となり、スパン比による違いはみられなかった。

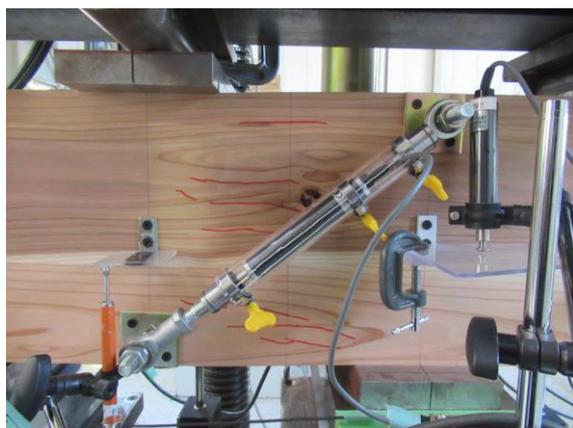


写真 3.4-1

Pe 面のせん断破壊 モードⅠ



写真 3.4-2

Pe 面のせん断破壊 モードⅠ



写真 3.4-3

Pa 面のせん断破壊 ラミナ境界のずれ

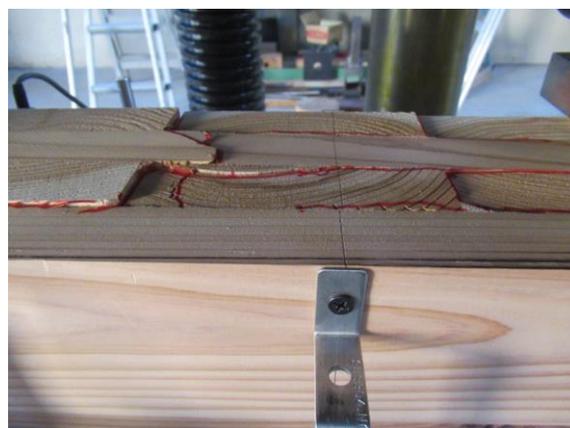


写真 3.4-4

Pa 面のせん断破壊 ローリングシア

### 第3章 4層4プライ試験体での検討

Off-axis 法の破壊性状を写真 3.4-5～写真 3.4-8 に示す。2.5.1 と同様にラミナ境界での破壊となり、採材角度による違いはあまりみられなかった。図 3.4-1、図 3.4-2 に Off-axis 法の画像相関法でのひずみ分布を示す。破壊性状と同様にラミナ境界でひずみが集中し、破壊したことがわかる。また、写真 3.4-7 に示す前章のヒノキ試験体と同様の接着層の剥離がみられた。写真 3.4-8 では前章ではみられなかった年輪に沿った破壊がみられた。しかし、これらの破壊については、ラミナ境界の位置が試験体の縁近くにあったために小さいラミナに載荷したためであると考えられる。

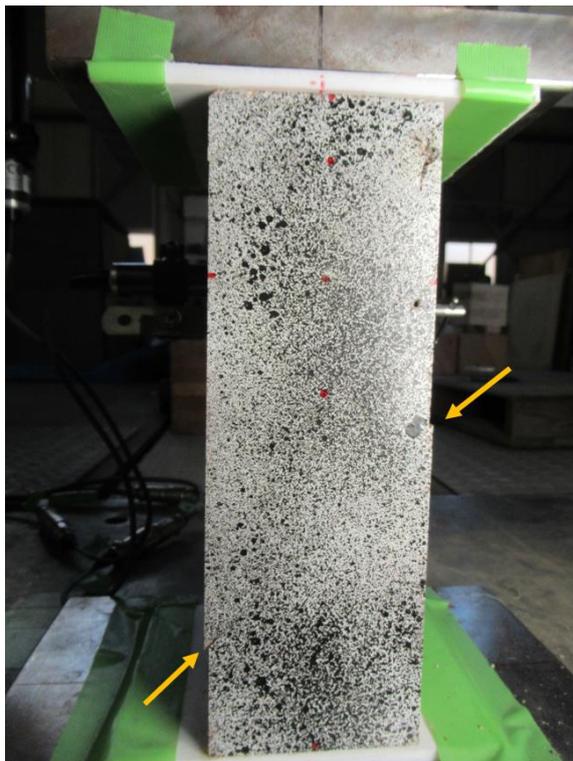


写真 3.4-5 Off-axis 法のせん断破壊 45°



写真 3.4-6 Off-axis 法のせん断破壊 30°

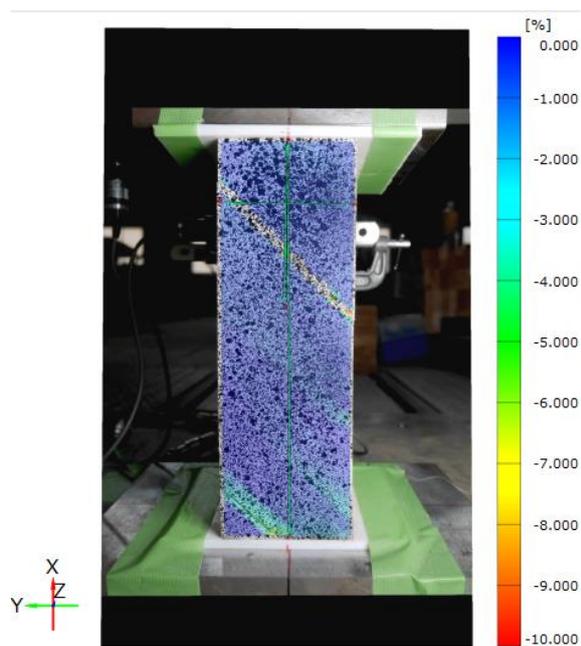


図 3.4-1 Off-axis 法の画像相関法 45°

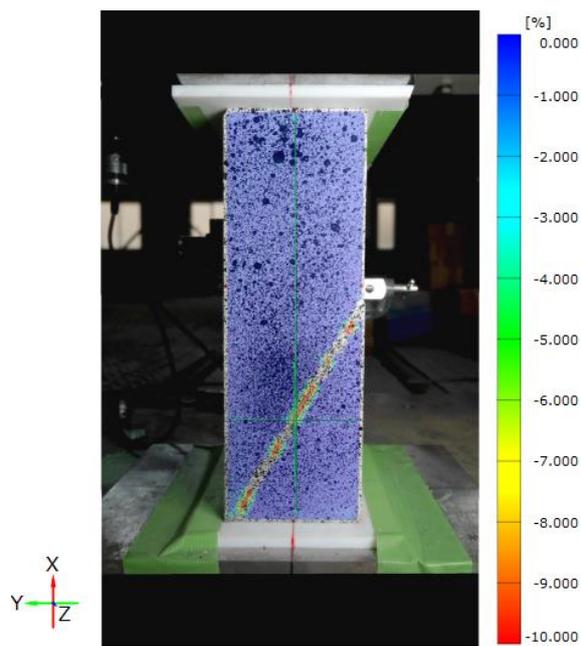


図 3.4-2 Off-axis 法の画像相関法 30°



写真 3.4-7 接着層の剥離



写真 3.4-8 年輪に沿った破壊

3.4.2 応力-ひずみ関係

図 3.4-3～図 3.4-5 に逆対称 4 点曲げ試験の応力-ひずみ関係を示す。それぞれ pa 面と pe 面に分け、スパン比で色分けしている。図 3.4-3 に示す水平方向では、pa 面では概ね変形を計測できているが、pe 面では、pa 面の約 2 倍の剛性となり、 $0.5P_{max}$  付近から計測値に乱れが生じている。図 3.4-4 に示す鉛直方向では、水平方向とは対照的に pe 面の方がばらつきは小さい結果となった。また、pa 面ではスパン比の増大に伴って剛性が低下していることがわかる。図 3.4-5 に示す斜め方向では、1 体を除いてばらつきは小さい結果となった。低い剛性となった試験体については写真 3.4-9 に示すようにビス位置がラミナ境界と被り、変形しやすくなっていたためである。また、鉛直方向の pa 面と同様にスパン比の増大に伴って剛性が低下する傾向がみられた。

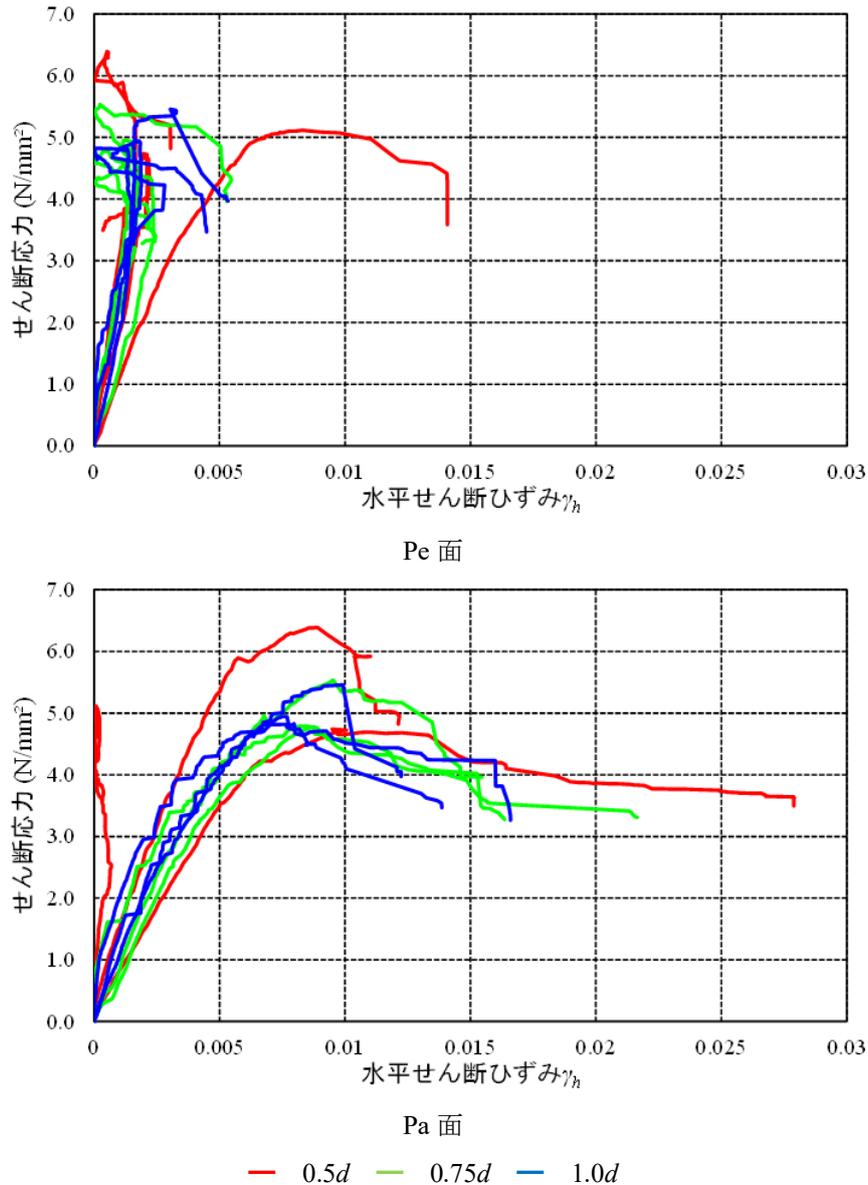
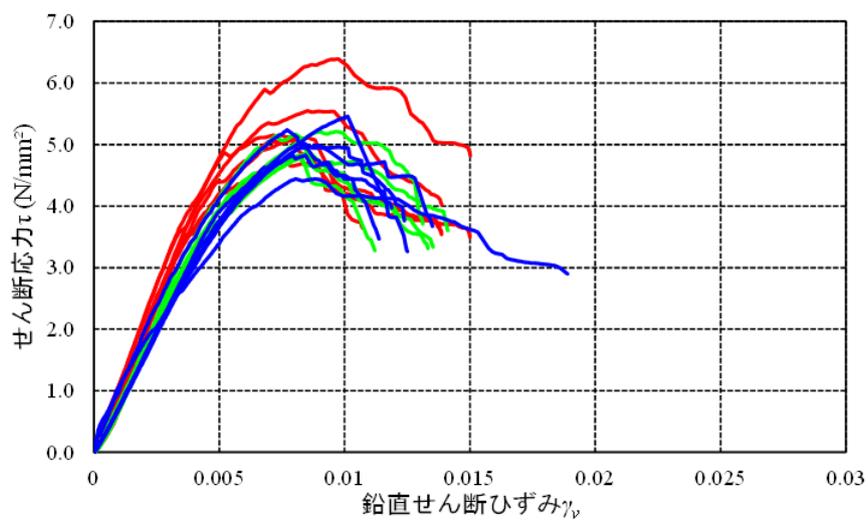
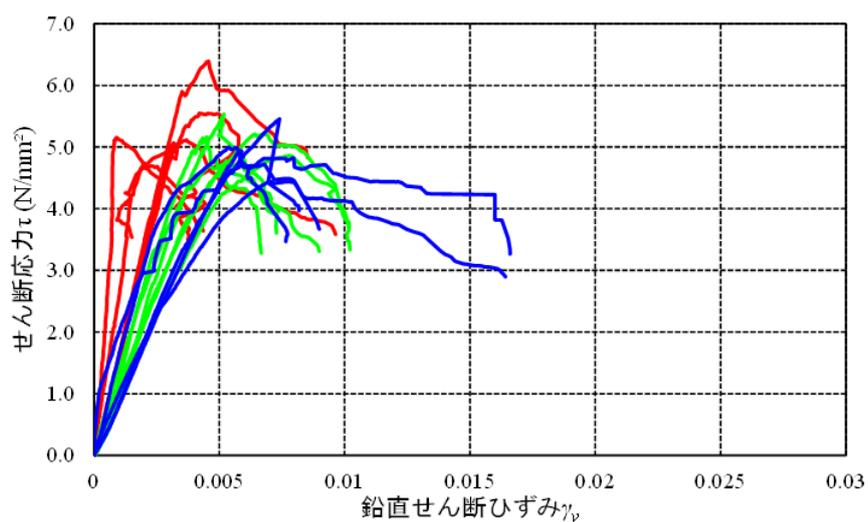


図 3.4-3 応力-ひずみ関係 水平方向



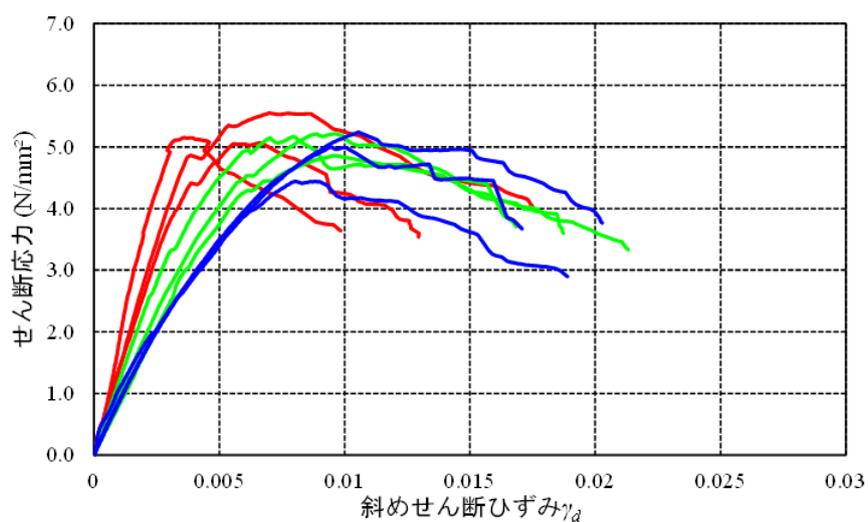
Pe 面



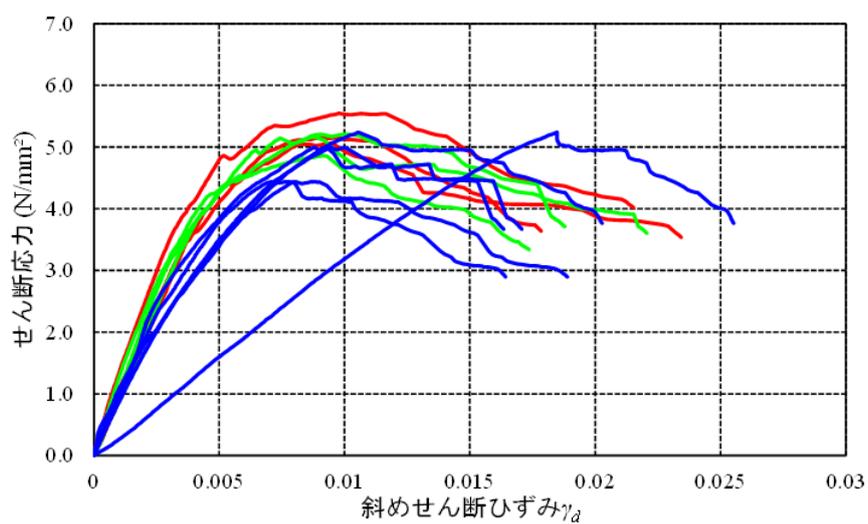
Pa 面

— 0.5d — 0.75d — 1.0d

図 3.4-4 応力-ひずみ関係 鉛直方向



Pe 面



Pa 面

— 0.5d — 0.75d — 1.0d

図 3.4-5 応力-ひずみ関係 斜め方向



写真 3.4-9 計測のビス位置不良

図 3.4-6～図 3.4-10 に Off-axis 法の荷重-変位、荷重-ひずみ関係を示す。図 3.4-6 に示すクロスヘッド変位では、 $30^\circ$  の方が比較的高い耐力を示したが、剛性はあまり変わらない推移を示した。図 3.4-7 に示す変位計でのひずみでは、2 章のヒノキと同様に水平ひずみは最大荷重付近まであまり変形が計測できなかつた。鉛直ひずみでは、 $30^\circ$  の方が若干低い剛性を示した。図 3.4-8 に示す画像相関法でのひずみでは、水平方向は変位計と同様の推移を示した。鉛直方向は変位計とは対照的に、 $30^\circ$  の方が若干高い剛性を示した。図 3.4-9、図 3.4-10 に示す角度別の計測方法の比較でも、水平方向は同様の推移を示すが、鉛直方向は角度によって計測値の大小に差異がみられた。

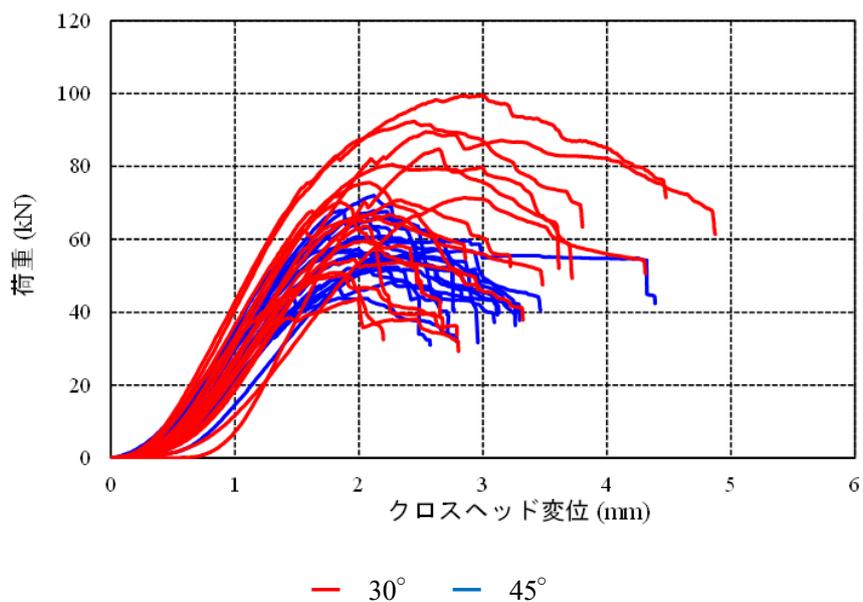


図 3.4-6 Off-axis 法のクロスヘッド変位

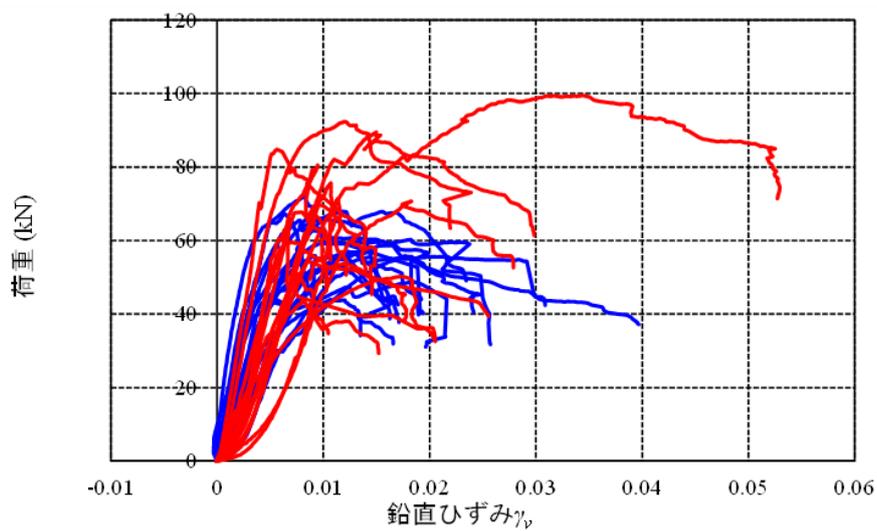
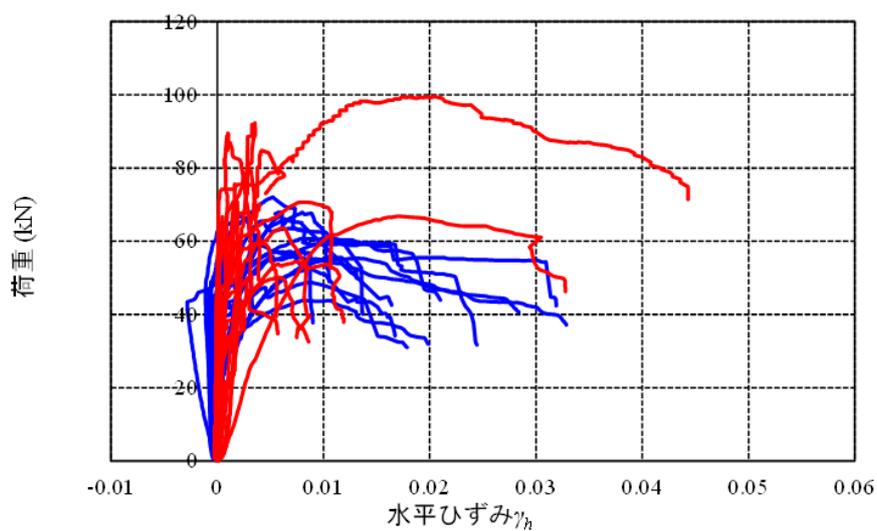


図 3.4-7 Off-axis 法のひずみ 変位計

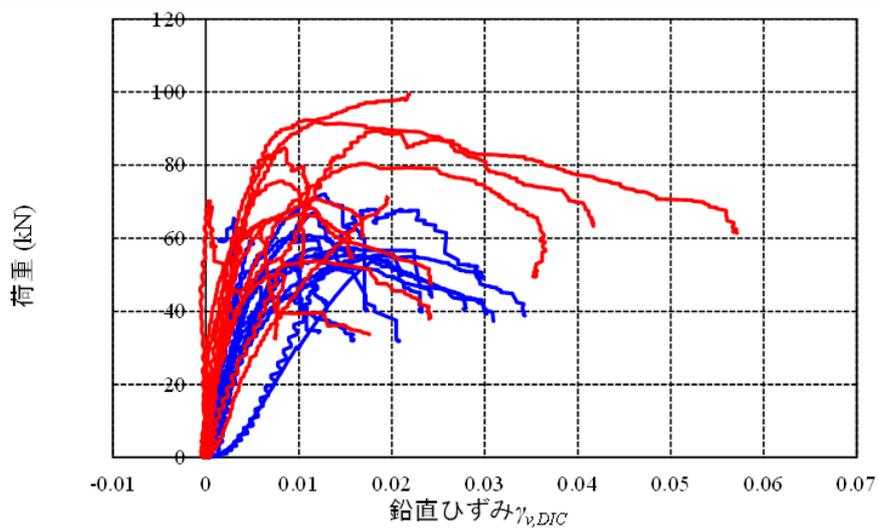
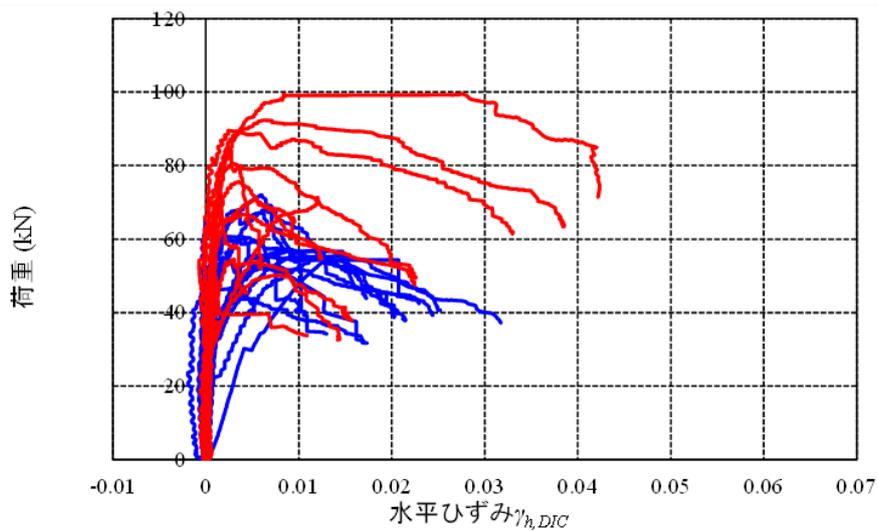


図 3.4-8 Off-axis 法のひずみ 画像相関

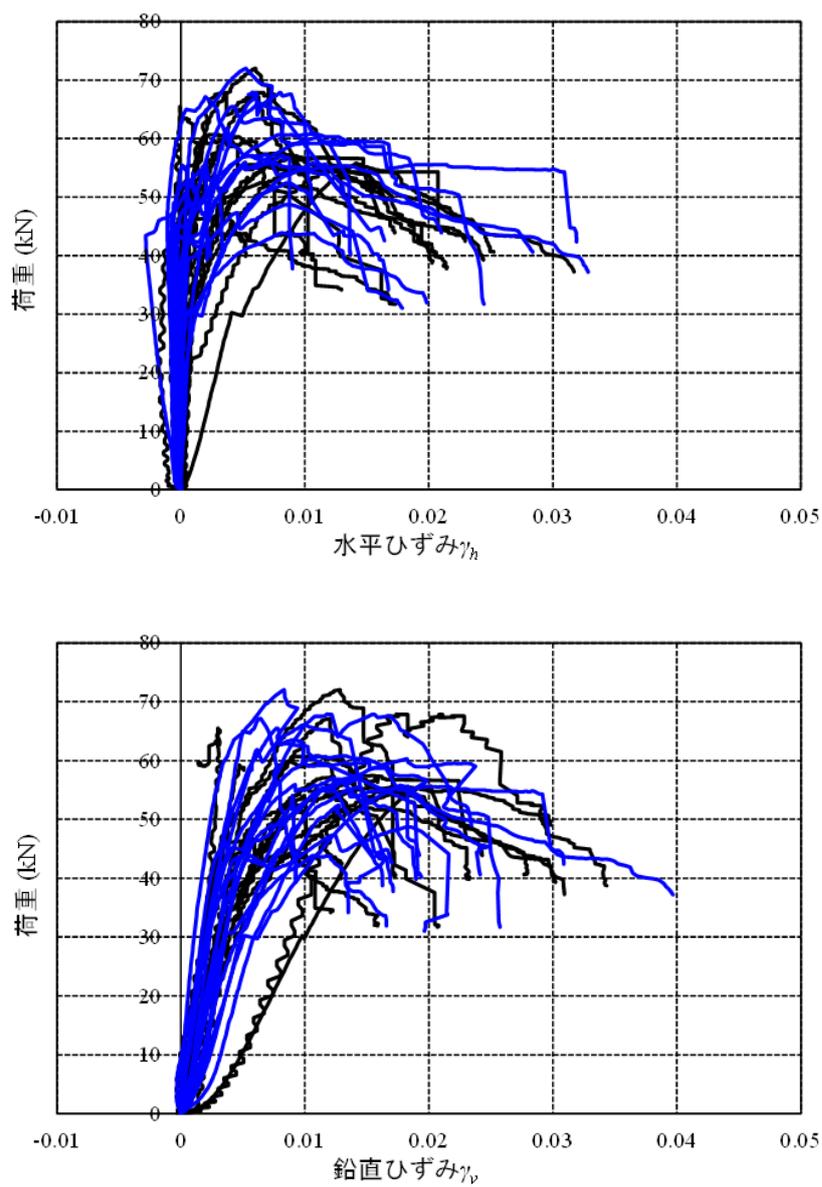


図 3.4-9 計測方法の比較 45°

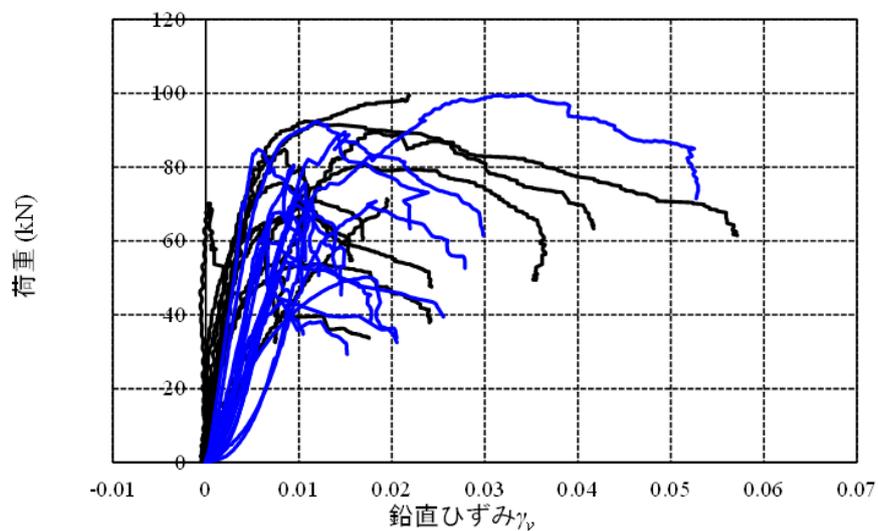
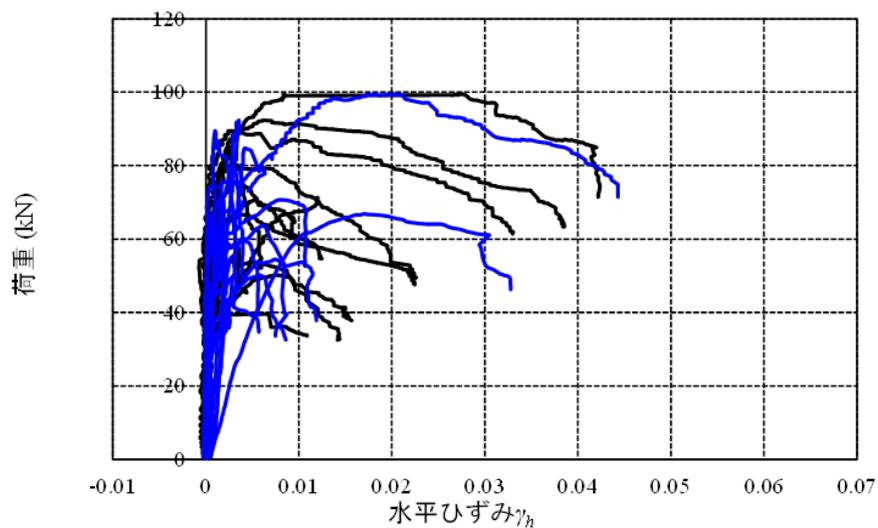


図 3.4-10 計測方法の比較 30°

### 3.4.3 せん断強度

2.5.3 と本章のせん断強度とスパン比の関係を図 3.4-11 に示す。载荷方向、材せい、層構成で分け、CLT 施工マニュアル<sup>3-1)</sup>に示された値を基準値として示し、比較する。なお、2.5.3 で载荷時に同一ラミナに载荷していた試験体は除いている。表 3.4-1 には 4 層 4 プライの平均値、5%下限値（信頼区間 75%）、変動係数を示し、表 3.4-2 にはスパン比ごとの各層構成での値を示す。

図 3.4-11 及び表 3.4-1 より、4 層 4 プライは 5 層 5 プライの強軸及び弱軸の間付近のせん断強度を示した。また、スパン比 0.5d 以外の試験体はばらつきが小さく、ほぼ横ばいの値を示した。スパン比 0.5d の試験体が若干高いせん断強度を示した理由については不明であるが、5 層 5 プライの値と比較して大きく値が外れていないことから、特に問題はないと考える。4 層 4 プライのせん断強度は基準値と比較すると、平均値で 1.9 倍、下限値で 1.5 倍程度を示した。また、全試験体でのスパン比とせん断強度の傾向は若干負の相関がみられるが、4 層 4 プライでは概ね横ばいの値を示した。一般にせん断応力はスパンの影響を受けないことから、全体の近似直線で負の相関を示すのはスパン比以外で層構成による影響が生じていると考える。

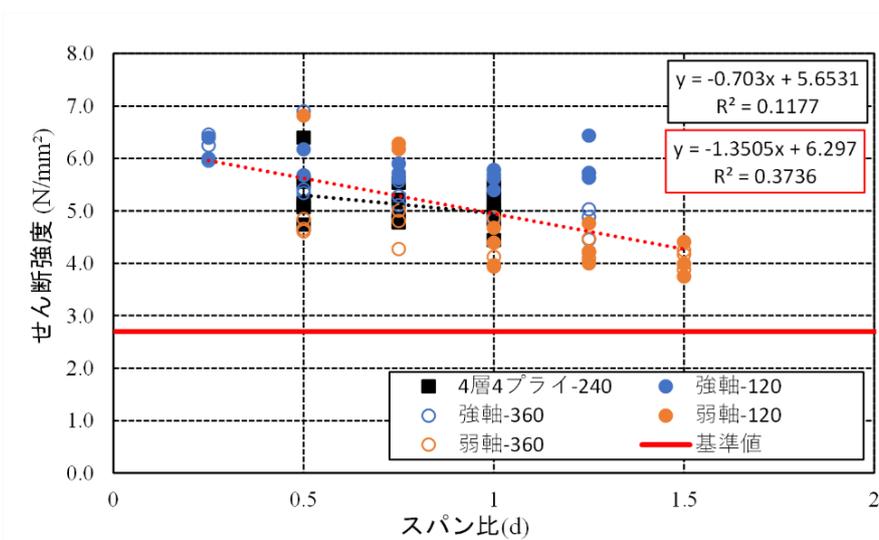


図 3.4-11 せん断強度とスパン比の関係

表 3.4-1 4 層 4 プライのせん断強度

スパン比 (d)	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.50	5.34	3.98	10.84
0.75	5.06	4.36	5.94
1.0	4.98	4.17	7.01

表 3.4-2 各層構成のせん断強度

スパン比 ( $d$ )	層構成	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.50	5層5プライ強軸	6.25	3.81	16.75
	4層4プライ	5.34	3.98	10.84
	5層5プライ弱軸	5.84	2.91	21.46
0.75	5層5プライ強軸	5.53	4.86	5.24
	4層4プライ	5.06	4.36	5.94
	5層5プライ弱軸	5.78	2.51	24.21
1.0	5層5プライ強軸	5.36	4.37	7.92
	4層4プライ	4.98	4.17	7.01
	5層5プライ弱軸	4.33	3.42	8.97

せん断性能に影響を及ぼす要因の一つとして、全層厚に対する直交層の厚さの割合が考えられる。CLT 施工マニュアル<sup>3-1)</sup>に示された面内せん断基準強度の算定式(式3.1)では、モードⅠ～Ⅲの中で最も弱い応力度で破壊するが、概ねモードⅠ又はモードⅢがクライテリアとなる。図3.4-12に示すモードⅠ～Ⅲをみても、2章及び本章で実施した構成の場合、モードⅢで破壊する想定となっている。想定破壊モードのモードⅢやpe面でみられたモードⅠの場合、直交層の割合は関与せず、直交層の割合とはほぼ横ばいの関係を示す。

しかし、2.5.3及び本章の結果では直交層の割合とせん断強度は正の相関を示し、破壊モードとしては想定されないモードⅡに類似した傾向を示す。モードⅡではラミナの繊維直交方向のせん断強度と直交層の割合が影響する。ラミナの繊維直交方向のせん断強度については、5層5プライは同じマザーボードから採材したこと、5層5プライと4層4プライは共にS60(4層4プライはJASではないためS60相当)であることから、大きな差が生じているとは考えにくい。直交層の割合が最も大きな要因であると考えられる。2章と本章ではパラメータが3つのみであるため、後述する4章の3層3プライの結果と併せて正確な傾向の把握をおこなう。

$$F_s = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{v\_lam\_0} \\ f_{v\_lam\_90} \cdot \frac{t_{net}}{t_{gross}} \\ \frac{bn_{ca}}{2t_{gross}} \cdot k_{5th} \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{v\_tor}} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

ここで、

$f_{v\_lam\_0}$  : ラミナの繊維方向のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{v\_lam\_90}$  : ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{v\_tor}$  : 接着された直交する2つのラミナの交差面のねじりせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_R$  : ローリングシア強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$n_{ca}$  : 直交集成板の直交接着層の数

$b$  : ラミナの幅 (mm)

$t_{net}$  : 直交層の厚さの合計 (mm)

$t_{gross}$  : 直交集成板の厚さ (mm)

$m$  : 各層のラミナの幅方向の数のうち最小の値

$k_{5th}$  : 95%下側許容限界値算出係数 (3/4)

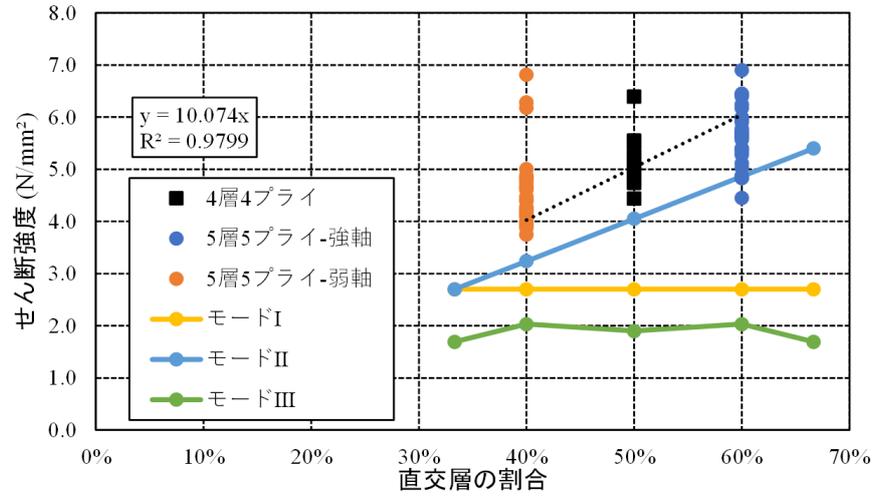


図 3.4-12 せん断強度と直交層の割合の関係

Off-axis法で得られたせん断強度及び逆対称4点曲げ試験で得られたせん断強度との比較を図 3.4-13、図 3.4-14 に示す。それぞれ平均値、5%下限値（信頼区間 75%）、変動係数を併せて示し、基準値と比較する。図 3.4-15 に採材角度の違いによる比較を示す。図 3.4-13、図 3.4-14 より、Off-axis 法によるせん断強度は逆対称 4 点曲げ試験に比べて高い値を示した。図 3.4-14 では、採材角度に関わらず、ほぼすべての試験体で逆対称 4 点曲げ試験より高い値を示したことがわかる。しかし、変動係数は Off-axis 法の方が高く、ばらつきが大きいことから下限値は逆対称 4 点曲げとあまり変わらない結果となった。また、図 3.4-15 より、採材角度の違いによる傾向はあまりみられない。2 章のヒノキ試験体では 45° が高い値を示したのに対して、本章ではあまり変わらない結果を示した要因として、層構成の違いが考えられる。2 章では 5 層 5 プライであったため、30° で採材する場合、繊維に対して平行方向に近い角度で載荷する層が 1 層多くなることから、繊維方向にずれやすくなるため 45° より低いせん断強度を示したと考える。本章では 30° で採材する場合でも、抵抗する層数と変形しやすい層数が同じであるため、45° とあまり変わらない結果になったと考える。

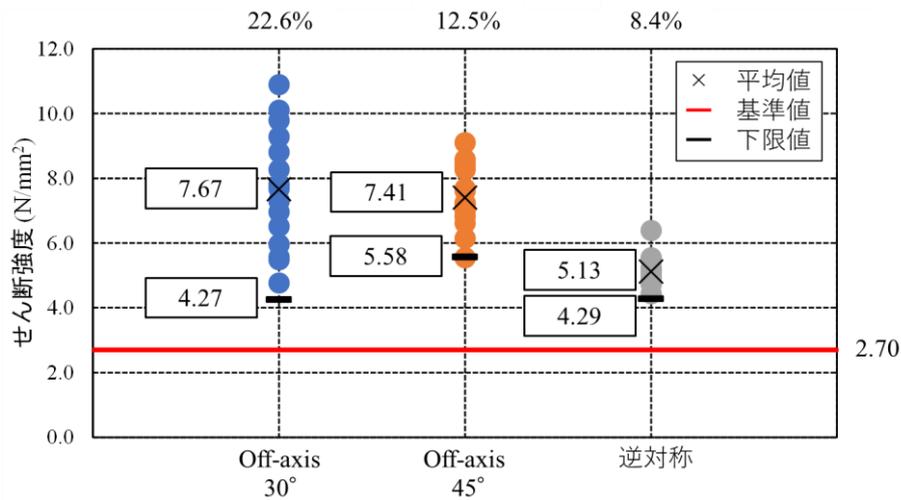


図 3.4-13 Off-axis 法と逆対称 4 点曲げのせん断強度の比較

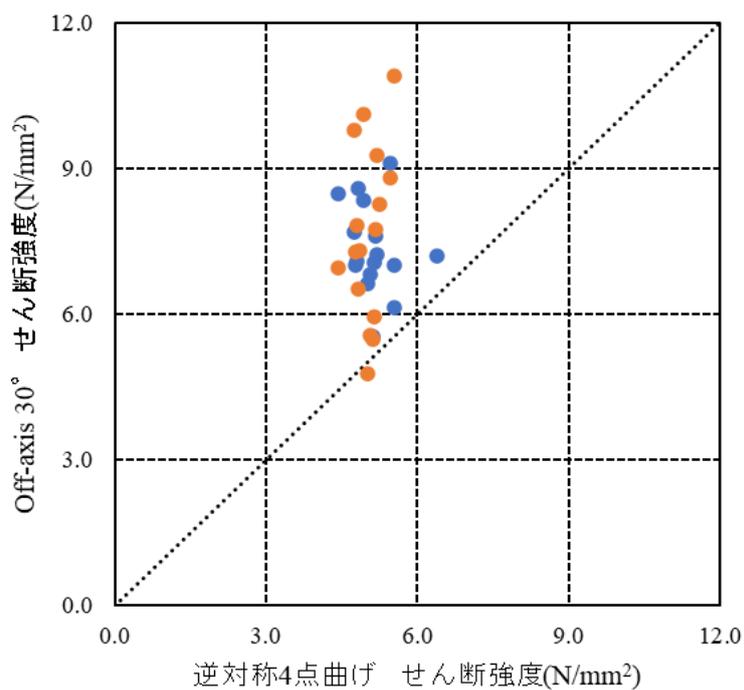


図 3.4-14 試験方法の比較

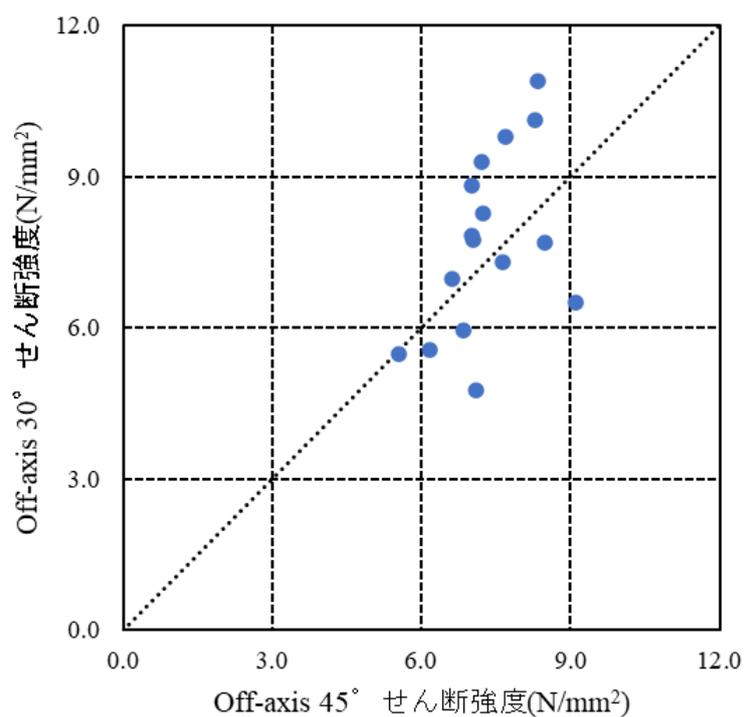
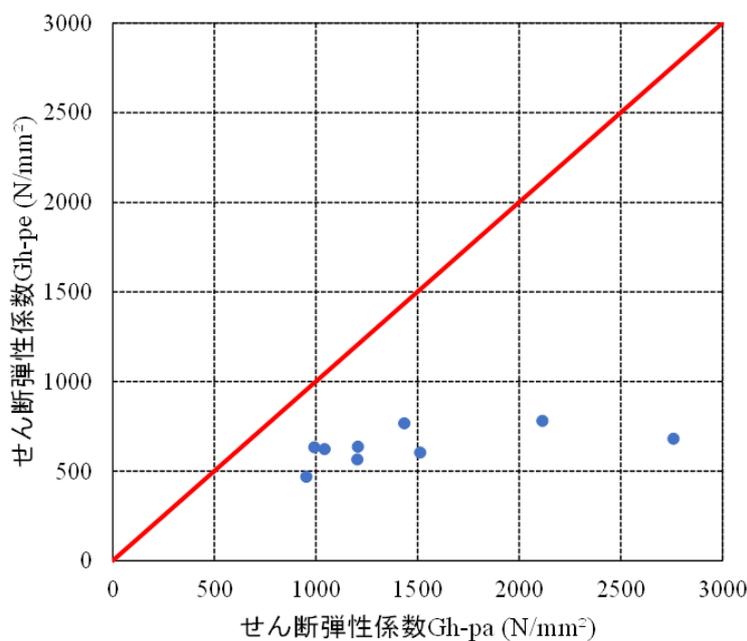


図 3.4-15 採材角度での比較

## 3.4.4 せん断弾性係数

図 3.4-16～図 3.4-18 に pa 面と pe 面の各計測方法でのせん断弾性係数を示す。縦軸を pe 面、横軸を pa 面としている。 $G_h$  では pa 面が pe 面に比べてかなり高い値を示した。対して、 $G_v$  では pe 面の方が高い値を示した。これらについては、写真 3.4-10 に示すように各面の繊維方向（青矢印）に対して、計測方向（黄矢印）が繊維直交方向となっていたため、変形量が小さくなり、高いせん断弾性係数を示したと考える。そのため、水平方向及び鉛直方向については、計測する層と繊維平行方向に計測する必要があると考える。 $G_d$  では、各面での値の差が小さく  $500\sim 1000\text{N/mm}^2$  のせん断弾性係数を示した。これは、斜め方向の計測では計測範囲が広く、どの方向に変形しても計測することができるため、繊維方向の影響を受けにくいためと考える。これらの結果から、計測方法は斜め方向での計測が適切であると考えられる。

図 3.4-16 各面でのせん断弾性係数  $G_h$

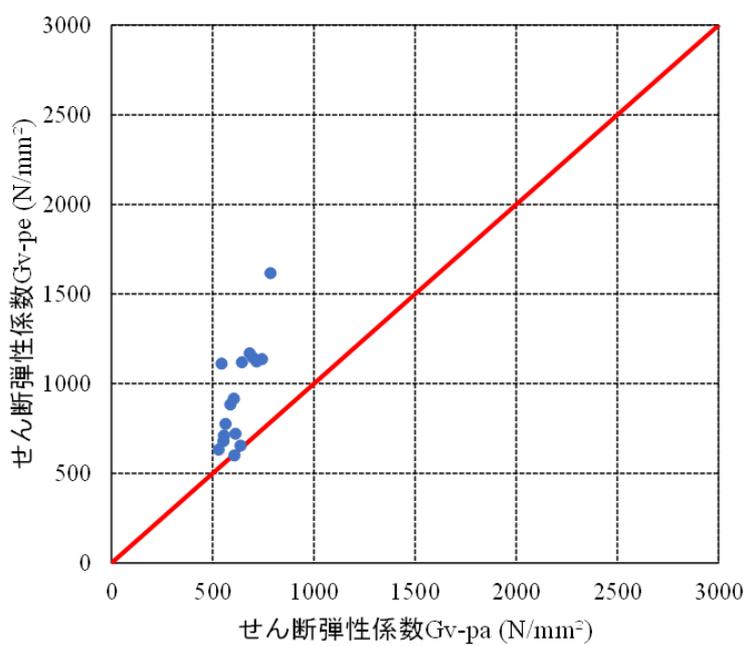


図 3.4-17 各面でのせん断弾性係数  $G_v$

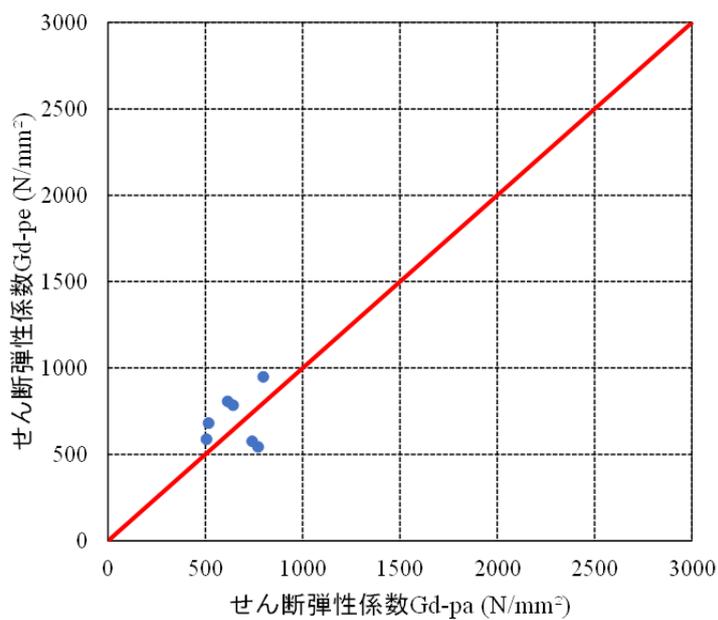


図 3.4-18 各面でのせん断弾性係数  $G_d$

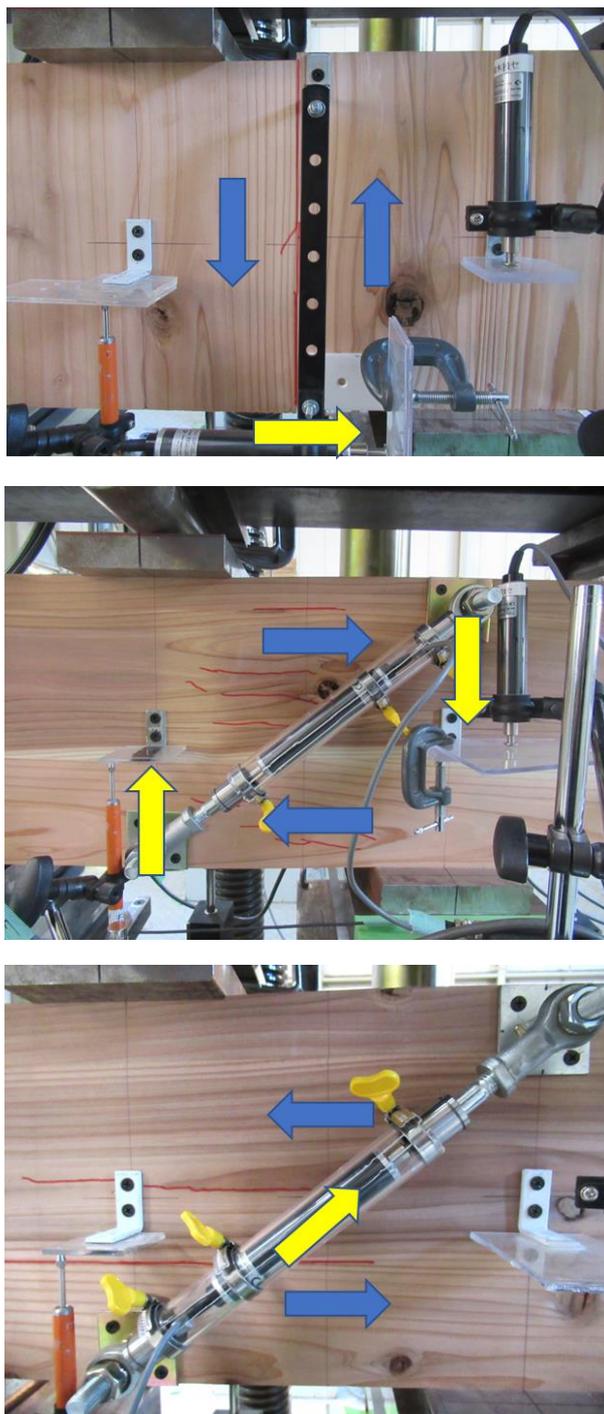


写真 3.4-10 各面の計測方向

図 3.4-19～図 3.4-21 及び表 3.4-3、表 3.4-4 に各計測方法でのせん断弾性係数を示す。なお、繊維直交方向に計測した値は極端に高い値を示したことから、 $G_h$  と  $G_v$  では繊維平行方向に計測した面の値を用い、 $G_d$  では両面の差が小さかったため両面の平均値を用いている。図 3.4-19～図 3.4-21 より、本研究の値は 5 層 5 プライの結果に近い値を示し、どの計測方法でも  $500 \sim 1200 \text{ N/mm}^2$  と基準値より高い値を示した。せん断強度では強軸と弱軸の間付近の値を示したが、せん断弾性係数ではその傾向はみられない。材せいについても、5 層 5 プライの値とあまり相関性はみられないことから、材せいの影響は小さいと考える。スパン比については、 $G_v$ 、 $G_d$  では負の相関がみられ、スパン及び曲げの影響を受けていると考える。しかし、 $G_v$ 、 $G_d$  は  $G_h$  に比べて値のばらつきが小さく、より基準値に近い値を示していることから、せん断変形の計測方法として適当であると考え。特に、 $G_d$  は最も高い値で  $1000 \text{ N/mm}^2$  程度であるため、より適した計測方法であると考え。また、値のばらつきが異なる要因として、計測範囲の違いが考えられる。 $G_h$  は試験体中央での計測であるのに対し、 $G_v$ 、 $G_d$  では内側の支点・載荷点間での広い範囲（平行層及び直交層のラミナ境界をより多く含む）の計測であるため、CLT 全体の変形を含むことが要因であると考え。また、表 3.4-4 に示す  $G_d$  の層構成ごとの値では、4 層 4 プライでは 5 層 5 プライに比べて高い値を示した。これは、2 章と異なる計測方法を用いていることが要因と考える。

以上の結果から、せん断弾性係数はスパン比と負の相関があること、他の試験条件はあまり影響を及ぼさないこと、計測方法は広い範囲で計測することで基準値に近く、安定した値を得られることが示唆された。

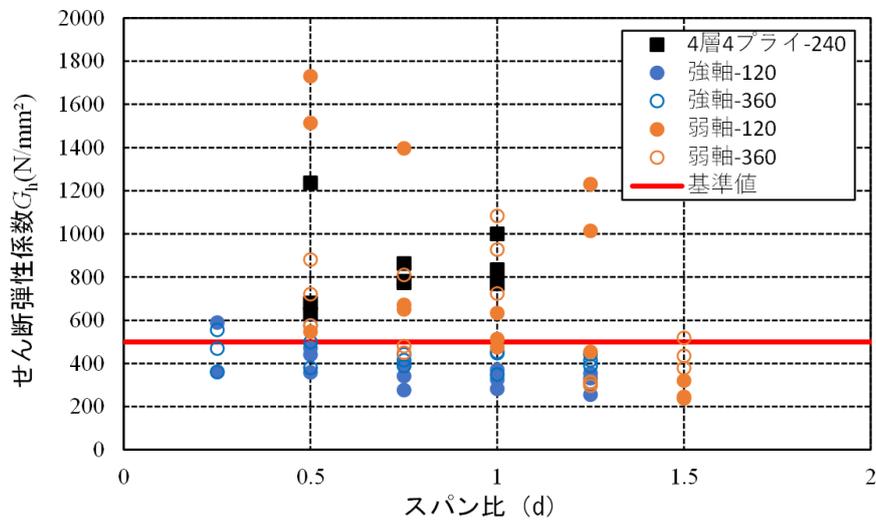


図 3.4-19 せん断弾性係数  $G_h$  とスパン比の関係

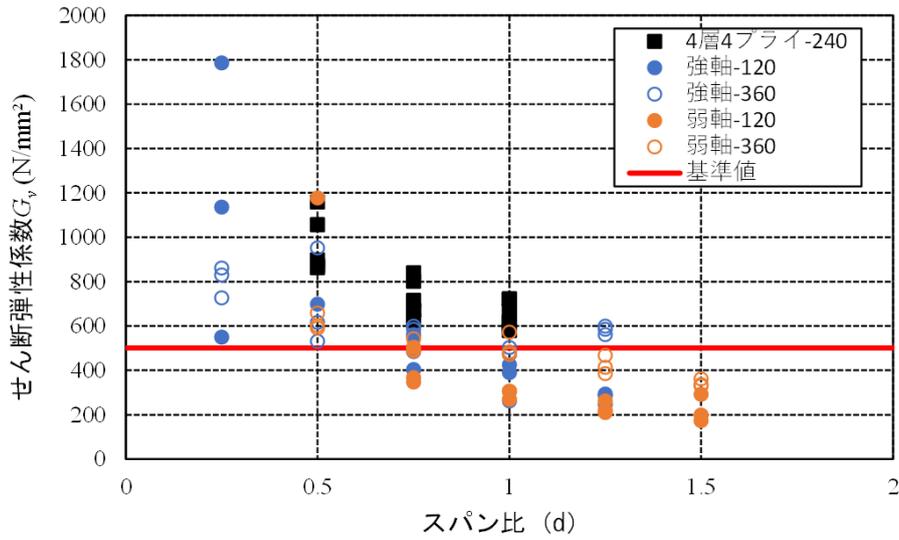


図 3.4-20 せん断弾性係数  $G_v$  とスパン比の関係

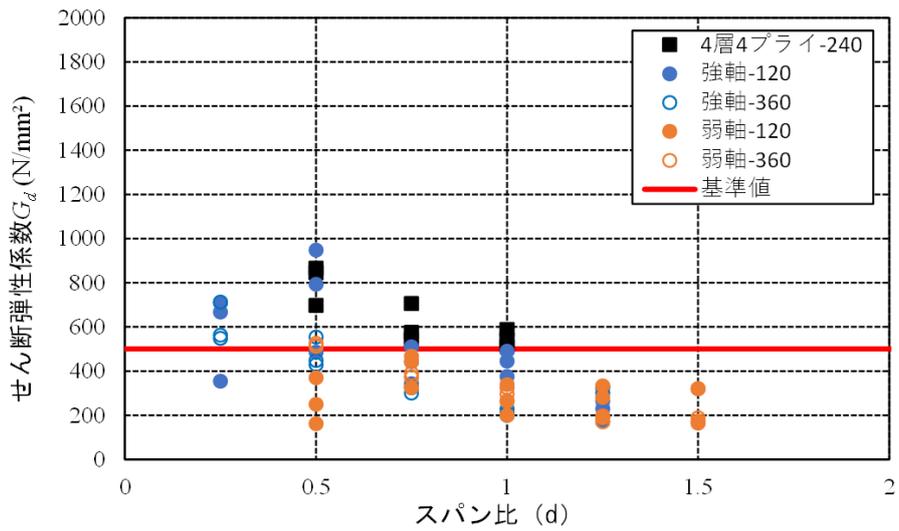


図 3.4-21 せん断弾性係数  $G_d$  とスパン比の関係

表 3.4-3 4層4プライのせん断弾性係数

スパン比 ( $d$ )	$G_h$		$G_d$		$G_v$	
	平均値 ( $N/mm^2$ )	下限値 ( $N/mm^2$ )	平均値 ( $N/mm^2$ )	下限値 ( $N/mm^2$ )	平均値 ( $N/mm^2$ )	下限値 ( $N/mm^2$ )
0.50	737	684	803	759	722	711
0.75	627	602	608	567	602	593
1.0	648	624	548	531	570	558

表 3.4-4 各層構成のせん断弾性係数  $G_d$ 

スパン比 ( $d$ )	層構成	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.50	5層5プライ強軸	477	445	14.2
	4層4プライ	803	759	11.5
	5層5プライ弱軸	518	514	1.3
0.75	5層5プライ強軸	318	311	5.0
	4層4プライ	608	567	14.2
	5層5プライ弱軸	378	374	2.5
1.0	5層5プライ強軸	213	206	6.7
	4層4プライ	548	531	6.8
	5層5プライ弱軸	295	281	10.2

※材せい360mmの値を代表値として示す

Off-axis法で得られたせん断弾性係数及び逆対称4点曲げ試験で得られたせん断弾性係数との比較を図3.4-22に示す。なお、ここで用いる逆対称4点曲げのせん断弾性係数は鉛直方向の値 $G_{v-pa}$ を用いている。図3.4-22に示すように、Off-axis法では逆対称4点曲げ試験より若干低い値を示した。また、ばらつきOff-axis法の方が大きく、特に画像相関法ではいくつかの試験体で逆対称4点曲げの値と比べて3倍程度の値を示した。図3.4-23に示す採材角度と計測方法ごとの違いでは、一部大きく外れる試験体もあるが、概ね計測方法や採材角度による影響はみられない。2章の5層5プライでも近い値は示すが、ばらつきが大きい結果となっていたことから、せん断弾性係数の算出において逆対称4点曲げ試験の方が有用性は高いと考えられる。

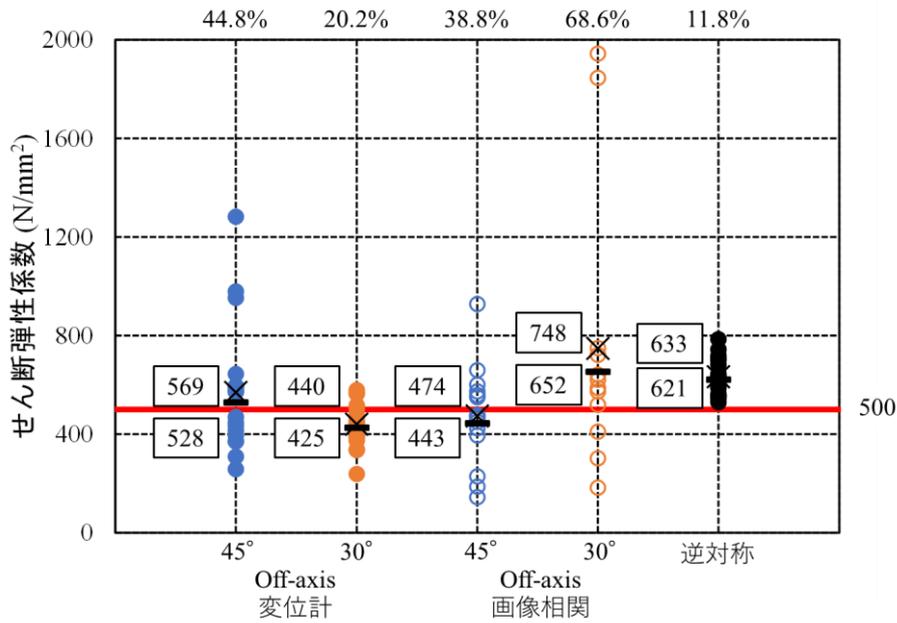


図 3.4-22 Off-axis 法と逆対称の比較

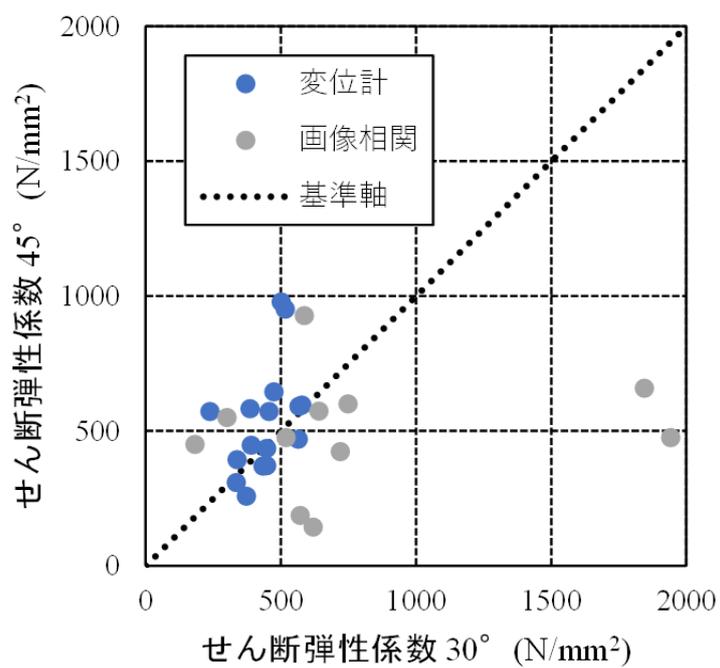


図 3.4-23 角度ごとの計測方法の違いによる比較

### 3.5 本章のまとめ

本章では、4層4プライのスギ CLT を用いて逆対称4点曲げ試験及び Off-axis 法によるせん断試験を実施した。スパン比、材せい、載荷方向をパラメータとして、それぞれがせん断強度及びせん断弾性係数に及ぼす影響を検討した。また、表裏で同じ応力が作用した際の変形の差異を検証した。その結果、以下のことがわかった。

#### 逆対称4点曲げ

破壊性状は5層5プライと同様にモードⅠ又はモードⅢの破壊がみられた。また、スパン比を0.5～1.0*d*と設定し、この範囲では曲げ破壊は生じなかった。また、載荷位置についても同一ラミナに支点・載荷点がかからない載荷となっており、適切にせん断破壊が生じていたと判断した。2章の結果と併せて、スパン比は0.5～1.0*d*での載荷が適切であると判断する。

せん断強度については、CLT 施工マニュアル<sup>3-1)</sup>の値と比較すると、平均値で1.9倍、下限値で1.5倍程度の値を示した。全体の変動係数も10%未満となり、ばらつきは大きくない結果となった。また、2章の結果と併せて、材せい及びスパン比はあまり影響を与えないことがわかった。層構成は4層4プライの結果が5層5プライの強軸と弱軸の間付近の値を示すことから、全体の厚さにおける直交層の割合と正の相関を示し、せん断強度に影響を及ぼす可能性が示唆された。

せん断弾性係数については、4層4プライの表裏で繊維方向が同じ方法を用いて計測をおこない、繊維方向と計測方法の影響を検討した。その結果、繊維方向と同じ方向に計測をする必要があることがわかり、鉛直方向、水平方向の計測については繊維方向に合わせた計測が必要になることがわかった。斜め方向については、鉛直、水平どちらに変形しても計測が可能であることから、繊維方向の影響を受けにくく、表裏両面の計測結果に差異はあまりみられず、ばらつきも小さかった。また、繊維方向にあった計測をすることで、比較的 CLT 施工マニュアル<sup>3-1)</sup>の値に近い値を示すことがわかった。斜め方向( $G_d$ )の計測が最もばらつきが小さい点、CLT 施工マニュアル<sup>3-1)</sup>の値に近い値を示した点、繊維方向による影響も受けにくい点から適切に変形を計測できる方法であると考えられる。

以上の結果から、材せいはあまり影響を及ぼさないことから240mm以上(ラミナ2枚以上)であること、スパン比は本研究の0.5～1.0*d*の範囲であれば、曲げや同一ラミナでの載荷を避け、極端な値を示さないこと、層構成は直交層の割合が影響すること、計測方法は斜め方向の計測をおこなうことが適切な試験条件であると考えられる。

#### Off-axis 法

Off-axis 法との比較では、せん断強度は2章と同様に Off-axis 法の方が逆対称4点曲げ試験の結果より高い値を示した。せん断弾性係数については、逆対称4点曲げ試験の結果と同等又は若干低い値を示した。しかし、せん断強度、せん断弾性係数ともに変動係数が高くなり、逆対称4点曲げの方が有用である可能性が示唆された。

## 第4章

### 3層3プライ試験体での検討

## 4 3層3プライ試験体での検討

### 4.1 はじめに

本章では、2章、3章での検討で課題となった、せん断強度と直交層の割合の相関性の検討及びせん断変形の細分化を目的として、3層3プライでの逆対称4点曲げ試験を実施した。また、2章、3章の結果と併せて、各試験条件や密度、含水率等がせん断性能に及ぼす影響を検討し、実験的検討としての逆対称4点曲げ試験の試験条件を確立する。

## 4.2 試験体概要

逆対称4点曲げ試験の試験体の緒元を表4.2-1に示す。樹種はスギ(等級:S60、密度:  $410 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ 、含水率:  $11.8 \pm 1.2\%$ )とした。幅はぎ接着はしておらず、ラミナ厚さは30mm、ラミナ幅は122mmとしている。載荷方向の定義、加圧板幅  $w_p$  は2.2と同様である。また、せん断区間内のラミナ境界の位置や数が及ぼす影響を検証するために、写真4.2-1に示すようにラミナ境界を中央に配した場合とラミナ中央がせん断区間内の中央になるよう配した場合の試験体を用いた。

表 4.2-1 逆対称4点曲げ試験体一覧

樹種	材せい (mm)	材幅 (mm)	スパン比 ( $S-w_p$ ) / $d$	載荷方向	せん断区間内の ラミナ層数	試験体数
スギ	240	90	0.5 $d$	強軸	2層・3層	2層:各4体
			0.75 $d$	弱軸		3層:各3体 (計14体)

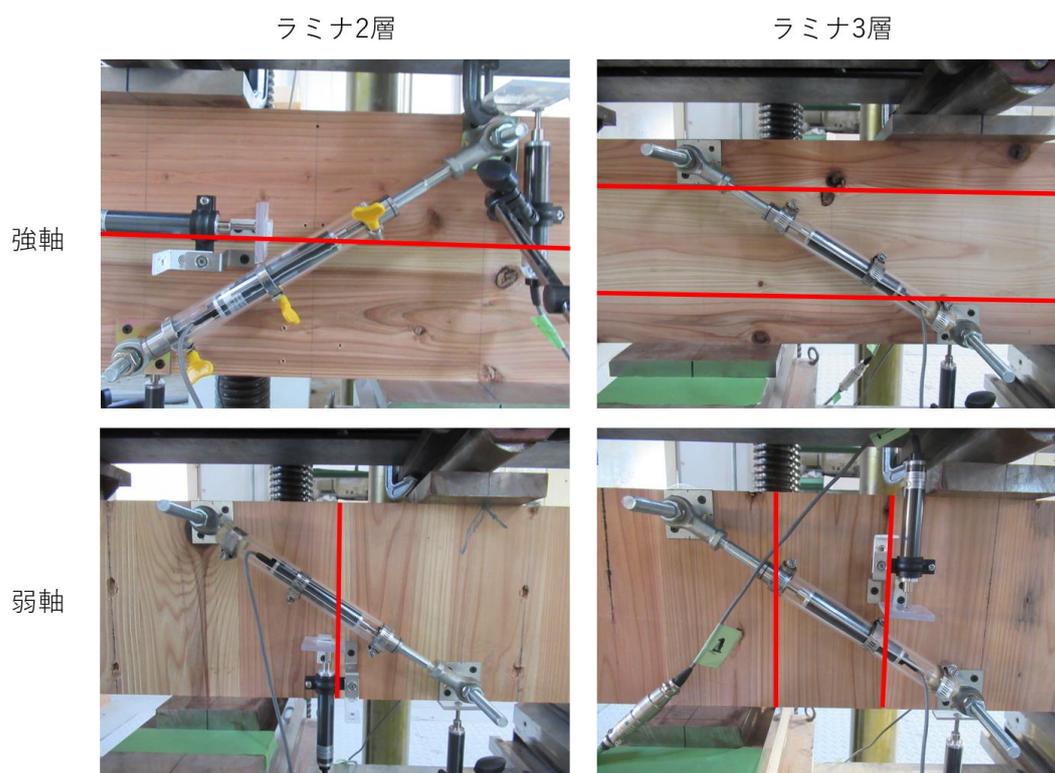


写真 4.2-1 せん断区間内のラミナ境界

### 4.3 試験方法・計測方法及び特性値の算出

試験方法は2.3と同様とした。

計測方法は斜め方向の計測については2.3と同様でおこなった。水平方向の計測は、2.3では写真 4.3-1 のように直線上の試験体上下で計測していたが、本章では写真 4.3-2 に示すようにせん断区間内のラミナ境界をまたぐように配した。鉛直方向の計測も写真 4.3-3 に示すように直線上の配置で計測していたが、写真 4.3-4 に示すように支点・載荷点の逆側の面に変位計を当てて計測した。また、ラミナ境界のずれを確認するため、写真 4.3-5、写真 4.3-6 に示すようにラミナ境界中央で計測をおこなった。また、全14体中12体は水平方向の計測と斜め方向の計測を片面ずつおこない、2体は両面の変形量が同等かを検証するのを目的として、両面を斜め方向の計測とした。



写真 4.3-1 3章の水平方向の計測

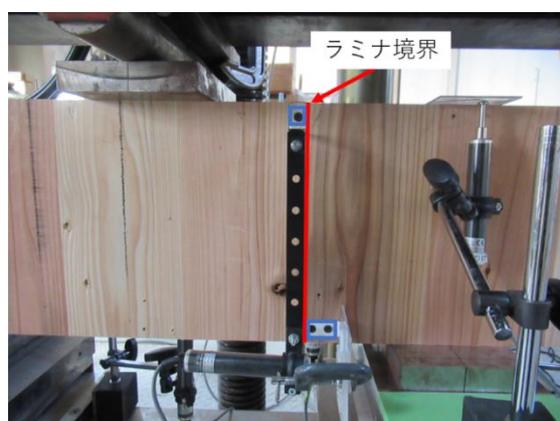


写真 4.3-2 本章の水平方向の計測

※水色の枠はビスの固定位置

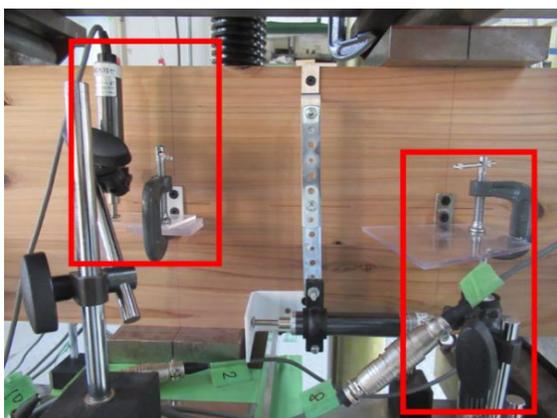


写真 4.3-3 3章の鉛直方向の計測

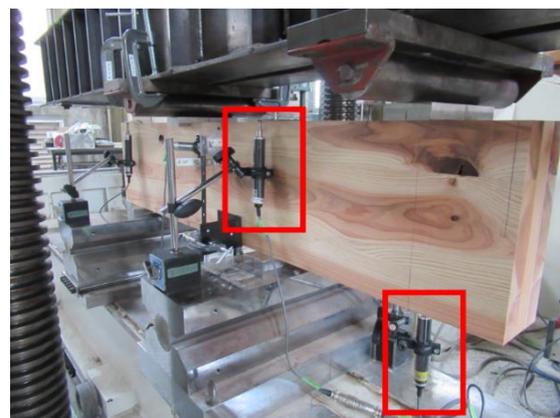


写真 4.3-4 本章の鉛直方向の計測

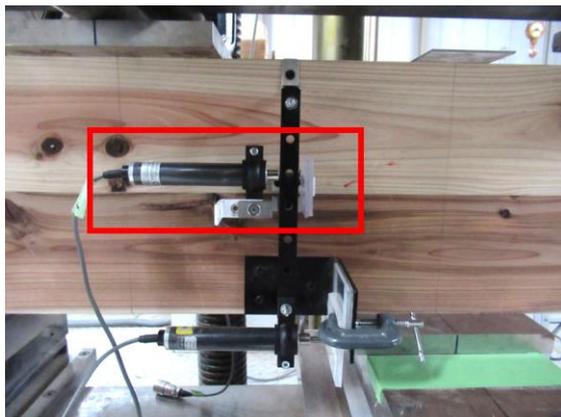


写真 4.3-5 ラミナ境界での計測（強軸）



写真 4.3-6 ラミナ境界での計測（弱軸）

特性値の算出では、水平方向、斜め方向、鉛直方向から算出するせん断弾性係数は3.3と同様である。本章で追加したラミナ境界のずれは図4.3-1に示すように計測し、計測距離30mmと変形量からラミナ境界のせん断変形角 $\gamma_b$ （式4.1）、せん断弾性係数 $G_b$ を算出した。

$$\gamma_b = \frac{\delta_b}{w} \quad (4.1)$$

ここで、

$\delta_b$  : ラミナ境界の変位 (mm)

$w$  : ラミナ境界の計測距離 (本研究では30mm) (mm)

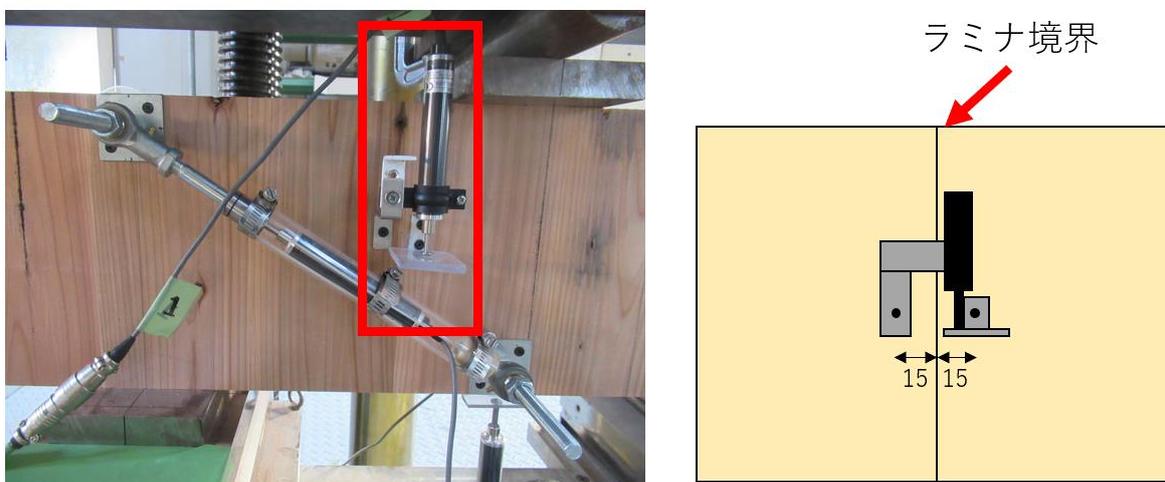


図 4.3-1 ラミナ境界のずれの計測位置

## 4.4 試験結果

### 4.4.1 破壊性状

破壊性状を写真 4.4-1～写真 4.4-5 に示す。強軸試験体では写真 4.4-1～写真 4.4-3 に示すようにモードⅠまたはモードⅢの破壊が見られた。弱軸試験体では写真 4.4-4、写真 4.4-5 に示すようにモードⅢの破壊がみられ、2.5.1、3.4.1 と同様の破壊性状がみられた。なお、強軸試験体では、せん断区間内のラミナ層数が 2 層の場合モードⅠの破壊のみがみられたが、3 層の場合はモードⅠとモードⅢの両方がみられた。これは、せん断基準強度算定式<sup>4)</sup>のモードⅢ式（式 4.2）における「 $m$ ：各層のラミナの幅方向の枚数の内最小の値」が変わり、その影響でモードⅠとモードⅢの大小が逆転したためと考える。弱軸試験体では、ラミナ層数の違いに関わらず、同様のモードⅢの破壊がみられた。

$$F_s = \frac{bn_{ca}}{2t_{gross}} \cdot k_{sth} \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{v_{tor}}} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \quad (4.2)$$

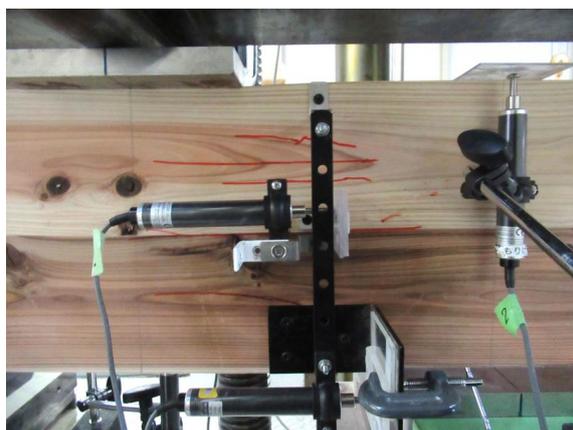


写真 4.4-1

強軸の破壊性状 (2層 モードⅠ)



写真 4.4-2

強軸の破壊性状 (3層 モードⅢ)

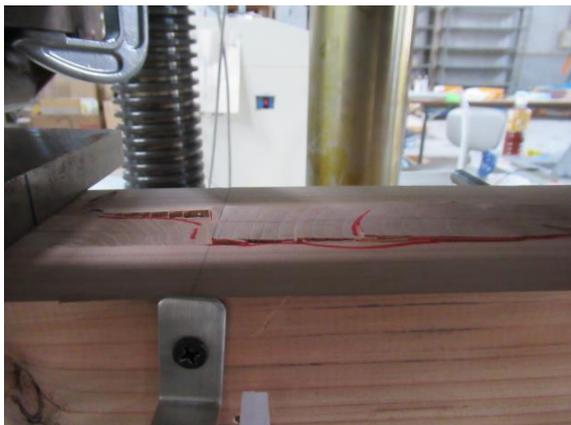


写真 4.4-3  
強軸のローリングシア (3層)



写真 4.4-4  
弱軸の破壊性状 (2層 モードⅢ)

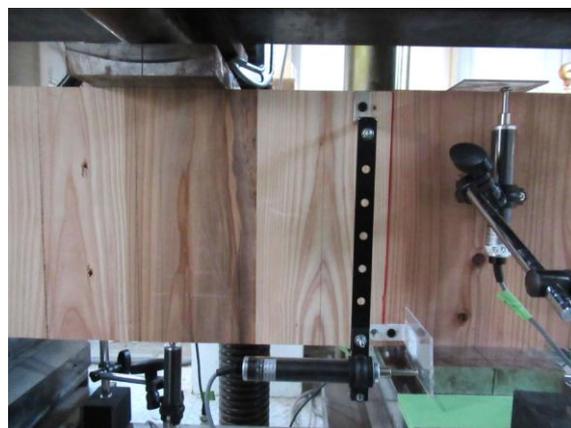


写真 4.4-5  
弱軸の破壊性状 (3層 モードⅢ)

4.4.2 応力-ひずみ関係

図 4.4-1～図 4.4-4 に応力-ひずみ関係を示す。図 4.4-4 に示す境界せん断ひずみ  $\gamma_b$  のグラフのみ、ひずみの値が他と大きく異なるため、横軸を変更している。水平ひずみ以外は概ね最大荷重まで直線的に推移し、いずれも強軸の方が高い剛性を示した。また、水平ひずみの弱軸ではあまり変形が計測できず、異常に高い剛性となった。このことから、2.5.4、3.4.2 でもみられたが、水平方向の計測を用いて弱軸の試験体のせん断弾性係数を適切に算出するのは難しいといえる。これは、3.4.4 で述べた繊維直交方向の変形のしにくさに起因しており、これは鉛直方向の計測でも同様である。本章の鉛直ひずみは強軸の方が高い剛性を示すが、水平ひずみ程の差異はなかった。ラミナ境界のひずみでは、計測区間が短く変形は大きいことから、他のひずみに比べてかなり大きいひずみが計測された。ラミナ境界では強軸、弱軸の差異は小さく、载荷方向に関わらずラミナ境界の変形は同等であると考えられる。

図 4.4-5～図 4.4-12 に各载荷方向のラミナ層数での比較を示す。図 4.4-5～図 4.4-8 に示す強軸試験体では、水平せん断ひずみは層数によって異なるが、他はあまり大きな差異はみられなかった。なお、境界せん断ひずみの2層の試験体では、1体初期の剛性が高いものがみられたが要因はわからない。図 4.4-9～図 4.4-12 に示す弱軸では、全体的に3層の試験体が若干高いが概ね同様の推移を示した。

図 4.4-13 に両面で斜め方向の計測をおこなった試験体の応力-ひずみ関係を示す。なお、どちらの試験体もラミナ層数は2層としている。強軸では初期にずれが生じているものの、以降の挙動は概ね同様である。弱軸では若干片面が高い剛性となっているが、その要因としては試験体中央部に節が存在し、その影響で異なる挙動を示したと考える。そのため、本研究では左右対称構成の場合は両面に概ね均等に応力が作用していると考えられる。

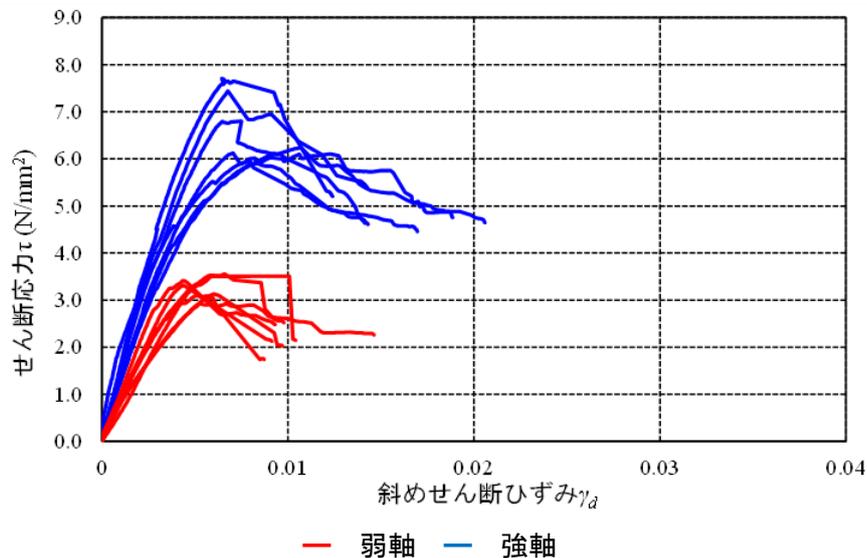


図 4.4-1 応力-ひずみ関係 斜め方向

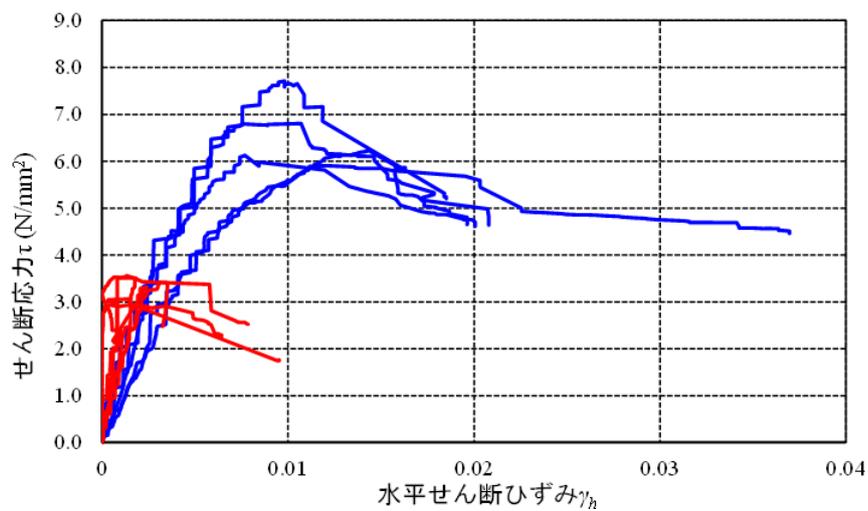


図 4.4-2 応力-ひずみ関係 水平方向

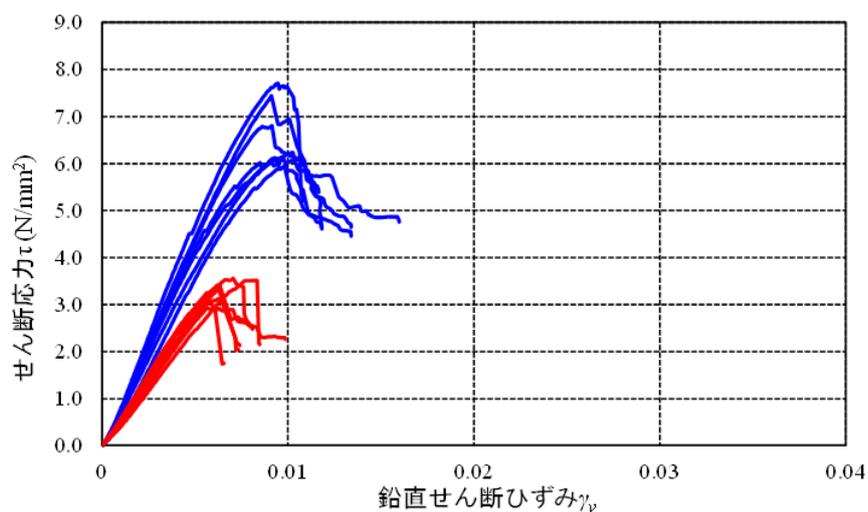


図 4.4-3 応力-ひずみ関係 鉛直方向

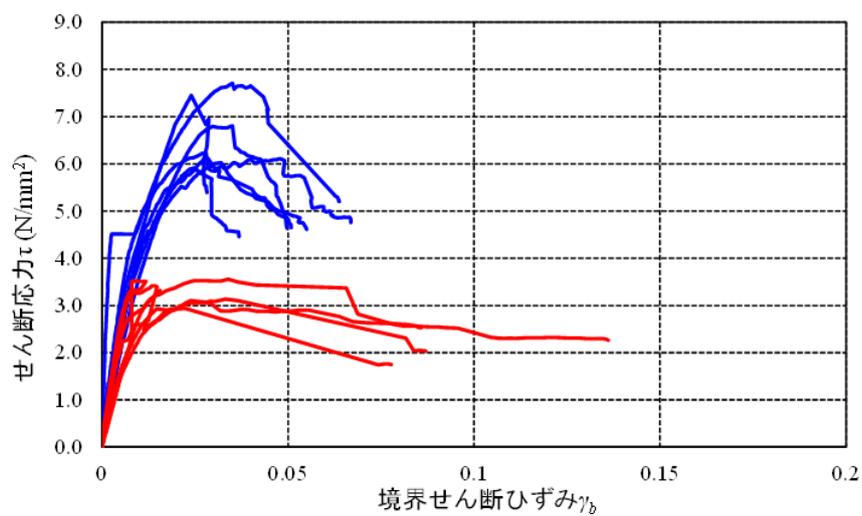


図 4.4-4 応力-ひずみ関係 ラミナ境界

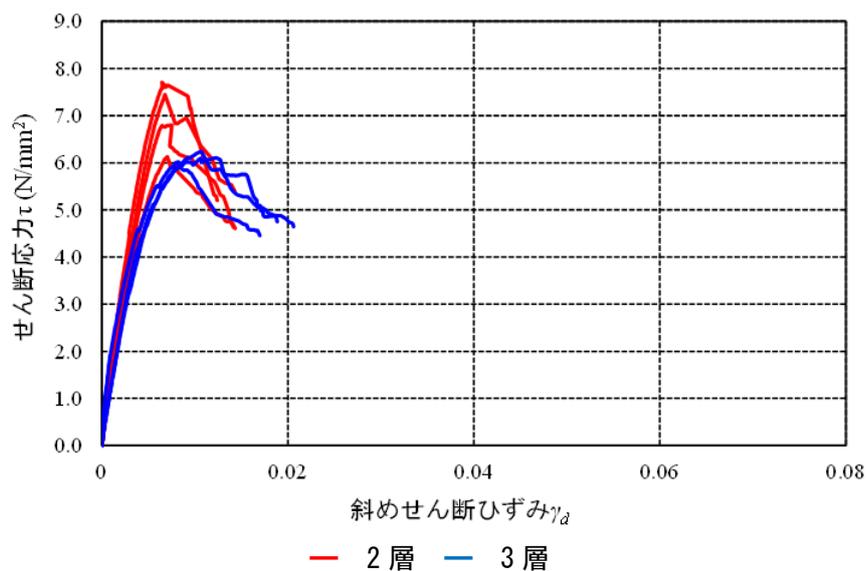


図 4.4-5 強軸のラミナ層数の比較 斜め方向

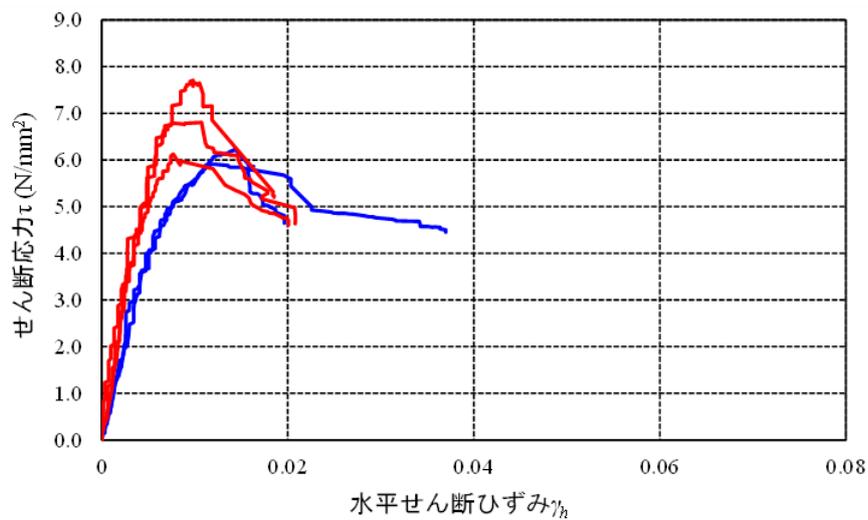


図 4.4-6 強軸のラミナ層数の比較 水平方向

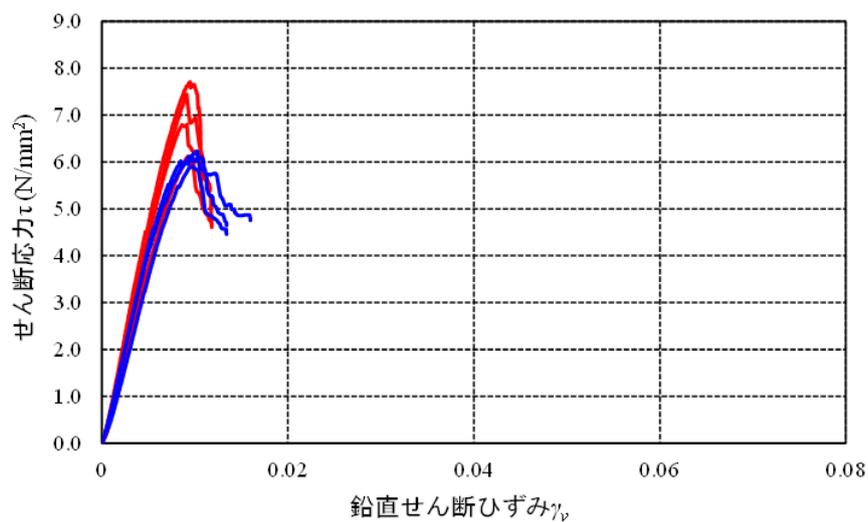


図 4.4-7 強軸のラミナ層数の比較 鉛直方向

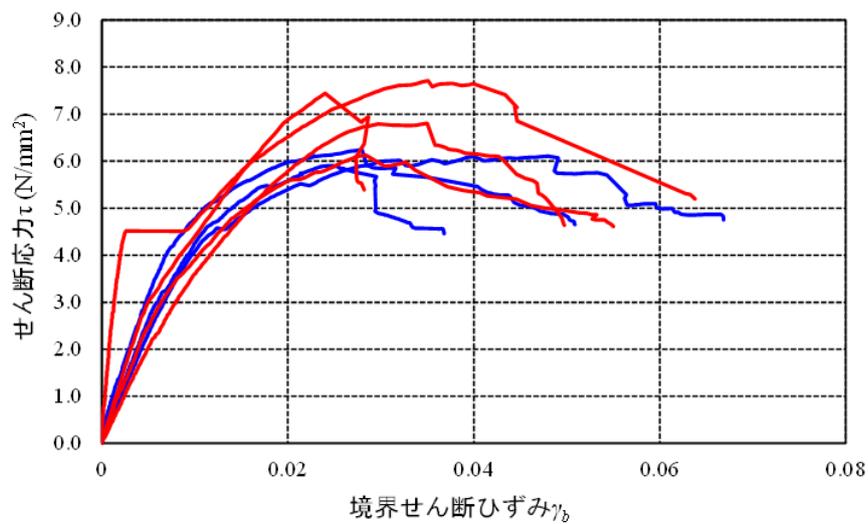


図 4.4-8 強軸のラミナ層数の比較 ラミナ境界

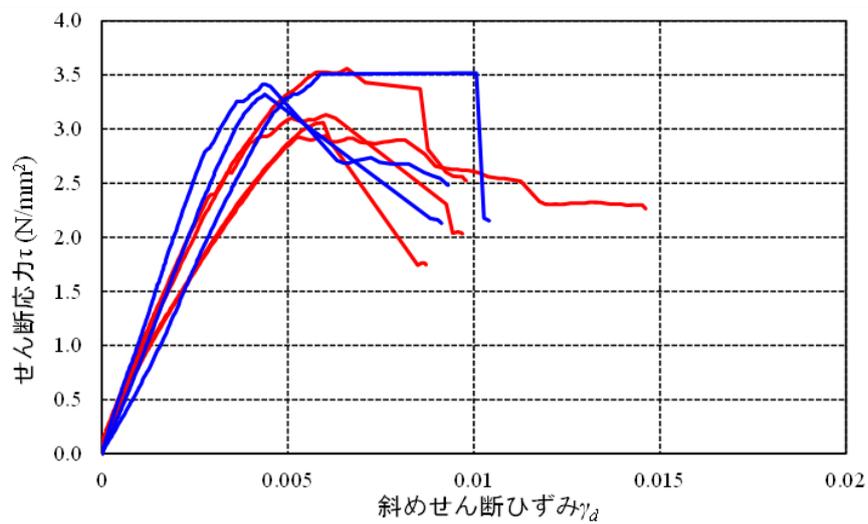


図 4.4-9 弱軸のラミナ層数の比較 斜め方向

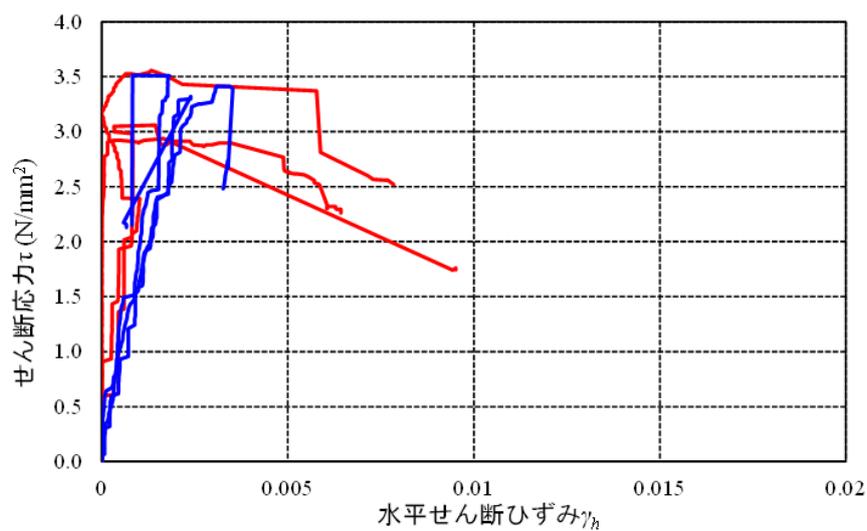


図 4.4-10 弱軸のラミナ層数の比較 水平方向

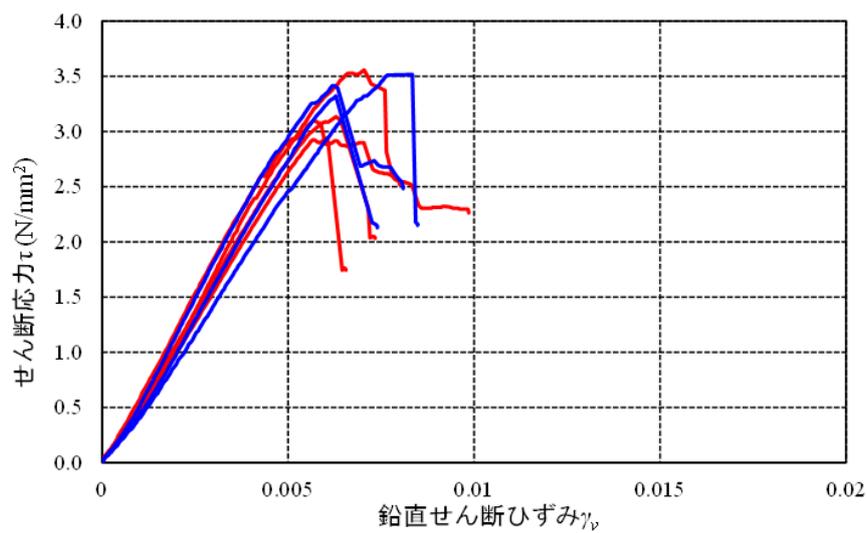


図 4.4-11 弱軸のラミナ層数の比較 鉛直方向

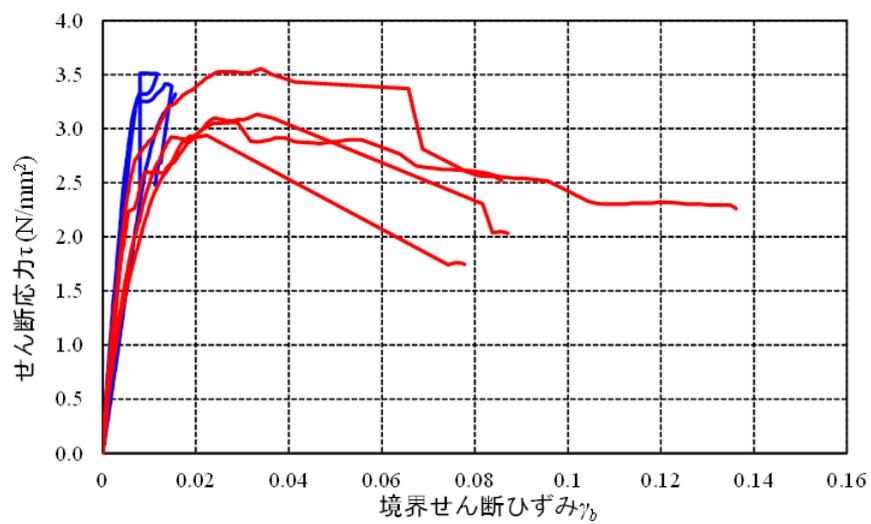
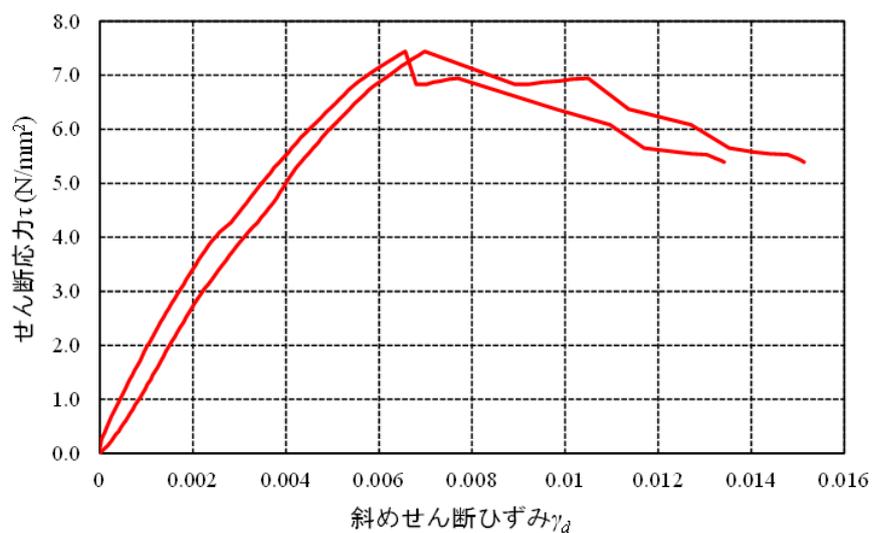
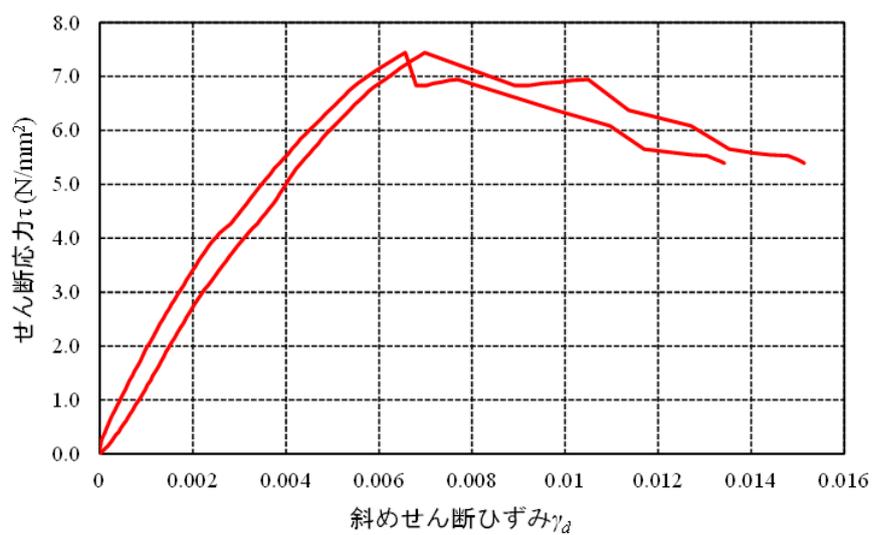


図 4.4-12 弱軸のラミナ層数の比較 ラミナ境界



強軸



弱軸

図 4.4-13 両面での斜め方向計測の比較

4.4.3 せん断強度

2章～4章のせん断強度とスパン比の関係を図4.4-14に示す。載荷方向、材せい、層構成で分け、CLT施工マニュアル<sup>4)</sup>に示された値を基準値として示し、比較する。なお、2.5.3で載荷時に同一ラミナに載荷していた試験体は除いている。表4.4-1には3層3プライの平均値、5%下限値（信頼区間75%）、変動係数を示し、表4.4-2には各層構成での値を示す。近似直線、近似式、決定係数は黒が4層4プライのみの値、赤が2～4章の結果を併せた値を示す。

図4.4-14及び表4.4-1より3層3プライの値は同じスパン比の他構成と比較すると、強軸は高い値、弱軸は低い値を示した。特に弱軸では基準値と比較して、平均値で1.22倍、下限値で1.00倍と他の構成に比べてかなり低い値を示した。また、全試験体での近似直線ではスパン比と負の相関がみられるが、4層4プライでは若干横ばいになっている。一般にせん断応力はスパンの影響を受けないことから、全体の近似直線で負の相関を示すのはスパン比以外で層構成による影響が生じていると考える。

その他の試験条件として、材せいについては2.5.3、3.4.3であまり傾向がみられず、本章の試験体を含めても相関性はあまりみられない。そのため、材せいとしては小さすぎる場合、同じラミナに載荷することで縦圧縮によるストラットが増大する恐れがあること、大きすぎる場合は材積が増大することから、費用を抑え実験も容易な240mm程度が望ましいと考える。スパン比については、せん断破壊が生じる範囲で同じラミナを載荷する恐れが少ない範囲が望ましい。本章の0.5～1.0dはほぼ横ばいのせん断強度を示し、すべてせん断破壊であったことから適切なスパン比であったと考える。

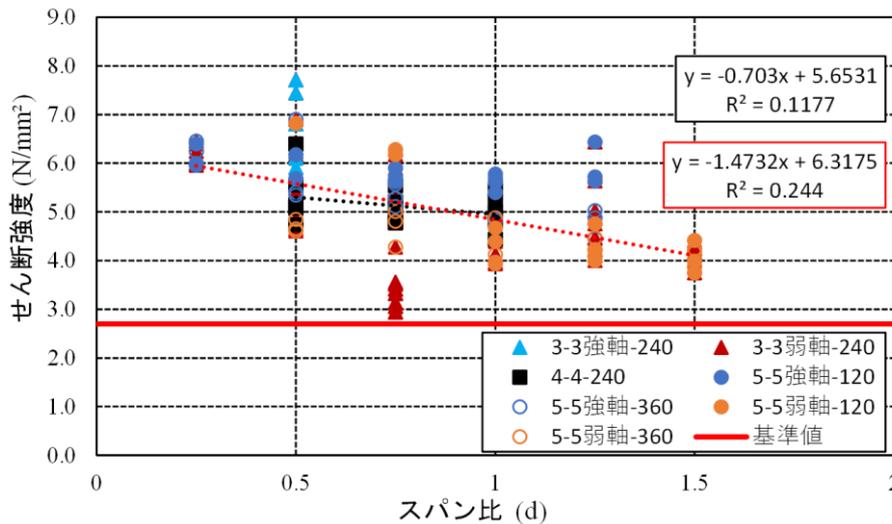


図 4.4-14 せん断強度とスパン比の関係

表 4.4-1 4層4プライのせん断強度

スパン比 ( $d$ )	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.50	5.34	3.98	10.8
0.75	5.06	4.36	5.9
1.0	4.98	4.28	7.0

表 4.4-2 各層構成のせん断強度

スパン比 ( $d$ )	層構成	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	下限値 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
0.50	5層5プライ強軸	5.88	3.10	15.0
	4層4プライ	5.34	3.98	10.8
	5層5プライ弱軸	4.70	4.31	2.7
0.75	5層5プライ強軸	5.32	4.59	4.4
	4層4プライ	5.06	4.36	5.9
	5層5プライ弱軸	4.69	3.51	8.0
1.0	5層5プライ強軸	5.12	3.56	9.7
	4層4プライ	4.98	4.28	7.0
	5層5プライ弱軸	4.32	2.79	11.3

※材せい360mmの値を示す

せん断強度と直交層の割合の関係を図 4.4-15、図 4.4-16 及び表 4.4-3 に示す。横軸を全層厚に対する直交層の厚さの割合とし、モードⅠ～Ⅲは CLT 施工マニュアル<sup>4-1)</sup>に示された各面内せん断破壊モードの基準強度の計算値を示す。せん断基準強度はモードⅠ～Ⅲの最も低い値で決まり、5層5プライや3層3プライでは強軸、弱軸が同じせん断強度となる。しかし、実験値では5層5プライの強軸は弱軸の約1.3倍の値、3層3プライでは約2倍の値を示し、4層4プライでは強軸と弱軸の間付近の値を示した。また、破壊性状は、ラミナのせん断破壊のモードⅠ又は層がずれるモードⅢを示した。しかし、実験値は直交層の割合と正の相関を示すモードⅡと近い傾向を示した。モードⅡの算定式では CLT の厚さに対する直交層の厚さが影響することから、CLT の面内せん断強度はモードⅠ又はⅢであっても直交層の割合が影響する可能性が示唆された。なお、本研究で実施した直交層の割合の範囲は、5層7プライ以外での CLT の JAS<sup>4-2)</sup>を含んでおり、5層7プライは強軸で71%、弱軸で29%であることから、本研究で概ね全体の傾向を把握できていると考える。

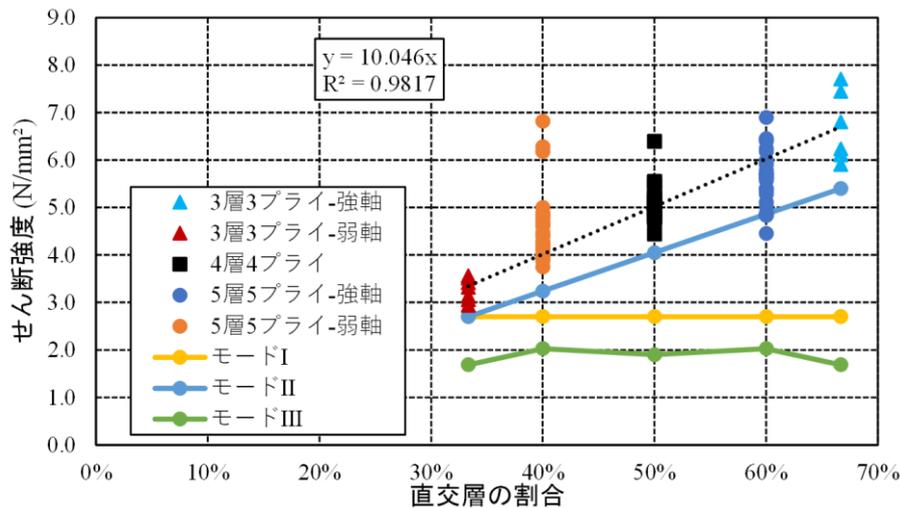


図 4.4-15 せん断強度と直交層の割合

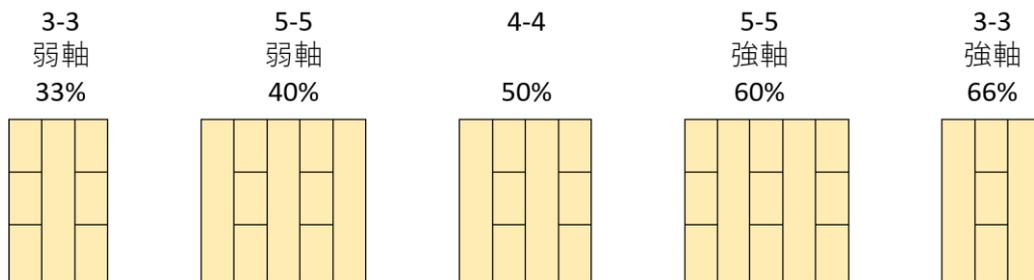


図 4.4-16 各試験体の直交層の割合

表 4.4-3 各試験条件の平均値比較

	3-3 弱軸	5-5 弱軸	4-4	5-5 強軸	3-3 強軸
3-3 弱軸		0.74	0.64	0.56	0.49
5-5 弱軸	1.35		0.86	0.76	0.67
4-4	1.56	1.16		0.88	0.77
5-5 強軸	1.77	1.31	1.13		0.88
3-3 強軸	2.02	1.50	1.29	1.14	

※各値は縦軸/横軸を示す 3層3プライ⇒3-3のように表記する

図 4.4-17 に3層3プライ試験体のせん断区間内のラミナ層数の比較を示す。図中に平均値、下限値、変動係数を併せて示す。強軸、弱軸ともに、ラミナ層数が2層より3層の方がばらつきは小さく、下限値は高い値を示した。この要因としては、層数が多くなることでラミナ境界が増えるため、境界でのずれが生じやすくなり下限値側の値をとりやすくなったためと考えられる。特に強軸の2層についてはモードIの破壊も多くみられたことから、ラミナ境界がずれにくくなっていたと考える。

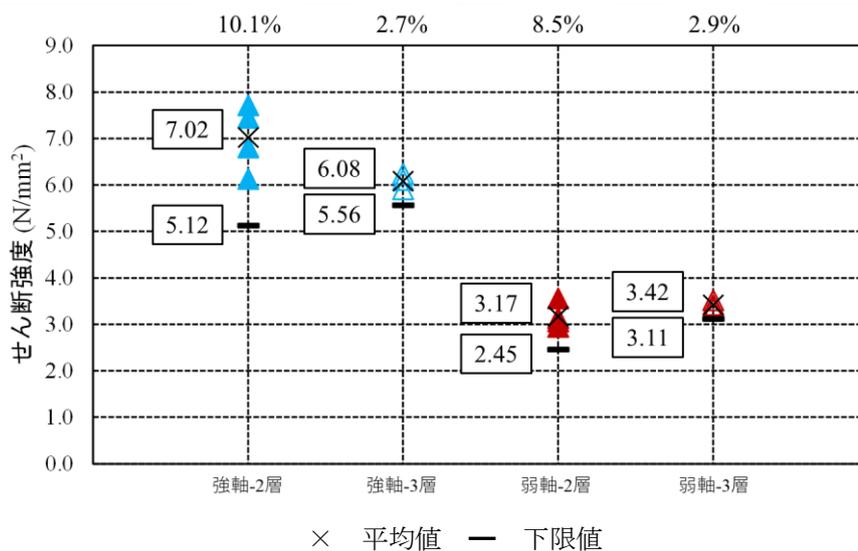


図 4.4-17 せん断区間内のラミナ層数の比較

図 4.4-18 にせん断強度と気乾密度の関係、図 4.4-19 にせん断強度と全乾法で算出した含水率の関係を  
 を示す。それぞれ近似式、決定係数を示し、黒は4層4プライの値、赤は全試験体を併せた値を示す。  
 どちらもあまり相関は見られず、ほぼ横ばいの結果となった。近似直線の傾きや決定係数の値からも、  
 本研究の結果では密度及び含水率とせん断強度には相関がないと考える。

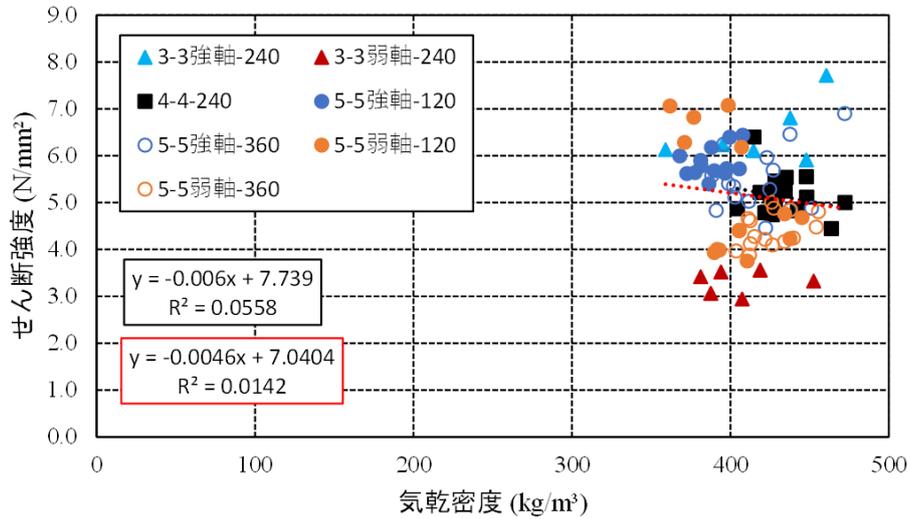


図 4.4-18 せん断強度と気乾密度の関係

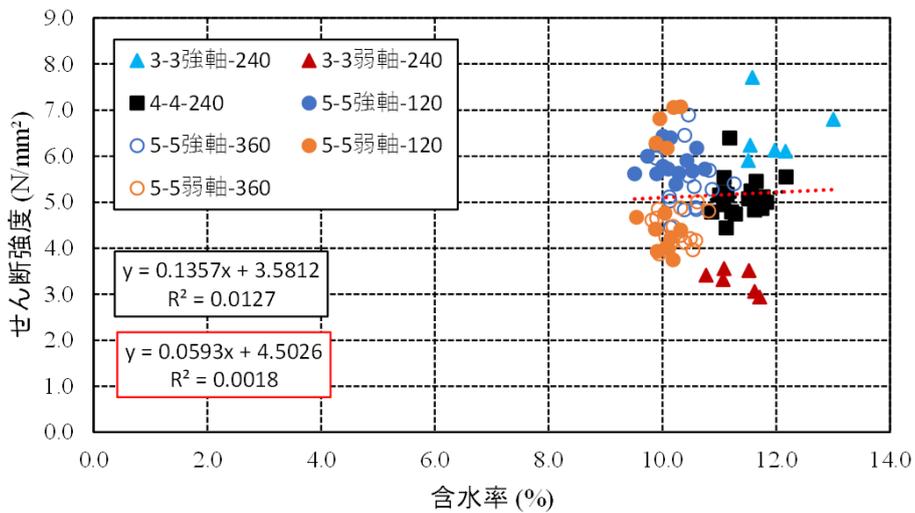


図 4.4-19 せん断強度と含水率の関係

4.4.4 せん断弾性係数

各計測方法でのせん断弾性係数とスパン比の関係を図 4.4-20～図 4.4-22 に示す。CLT 施工マニュアル<sup>4)</sup>に示された値を基準値として示し、比較する。一部試験体では、計測時のビスのゆるみなどの問題があり、異常に高い値がみられたため除いている。

3層3プライでは、図 4.4-20 に示す  $G_h$  のばらつきが大きくなったものの、図 4.4-21、図 4.4-22 に示す  $G_v$ 、 $G_d$  では2、3章と同様の値を示した。図 4.4-23～図 4.4-26 に各せん断弾性係数のせん断区間のラミナ層数の比較を示す。平均値、下限値、変動係数を図中に併せて示す。なお、 $G_h$  の一部については、先述の計測時の問題によって値が適切に算出されなかったため、下限値、変動係数を示していないものもある。図 4.4-23～図 4.4-26 より強軸の試験体ではどのせん断弾性係数においても、層数が少ない方が高い値を示す傾向がみられた。これは、強軸ではモードⅠの破壊もみられ、モードⅠの場合はラミナのせん断強度によって決まることから、1層当たりのラミナ幅が大きい2層の試験体の方がよりせん断性能が高くなっていると考ええる。また、弱軸の試験体では層数が少ない方が低い値を示す傾向がみられた。弱軸ではモードⅢの破壊が見られ、3層の試験体の場合、中央のラミナが支点・載荷点に接していないことから、変形しにくくなり全体として若干せん断弾性係数が高くなったと考ええる。

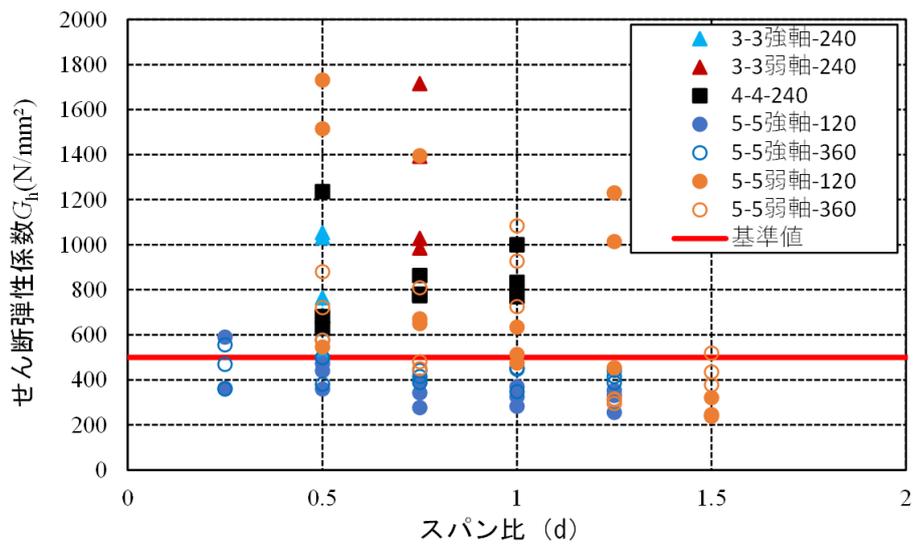


図 4.4-20 せん断弾性係数  $G_h$  とスパン比の関係

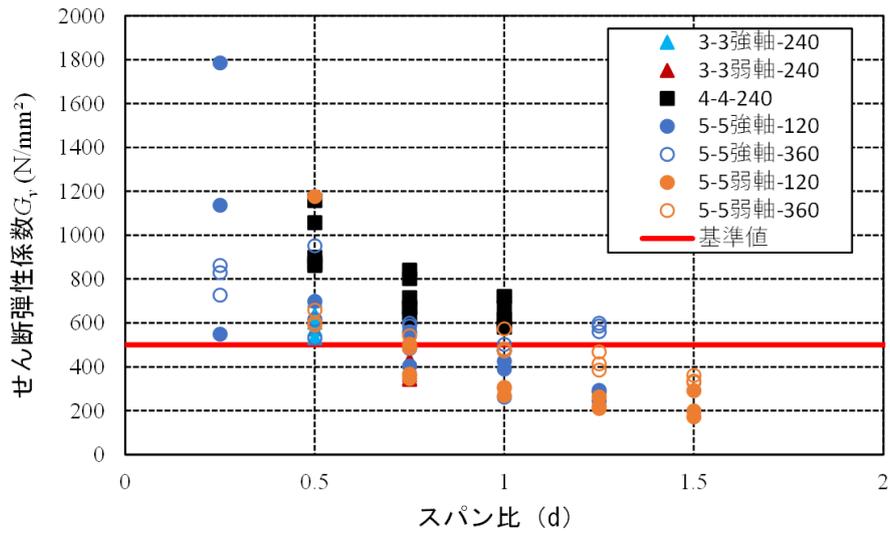


図 4.4-21 せん断弾性係数  $G_v$  とスパン比の関係

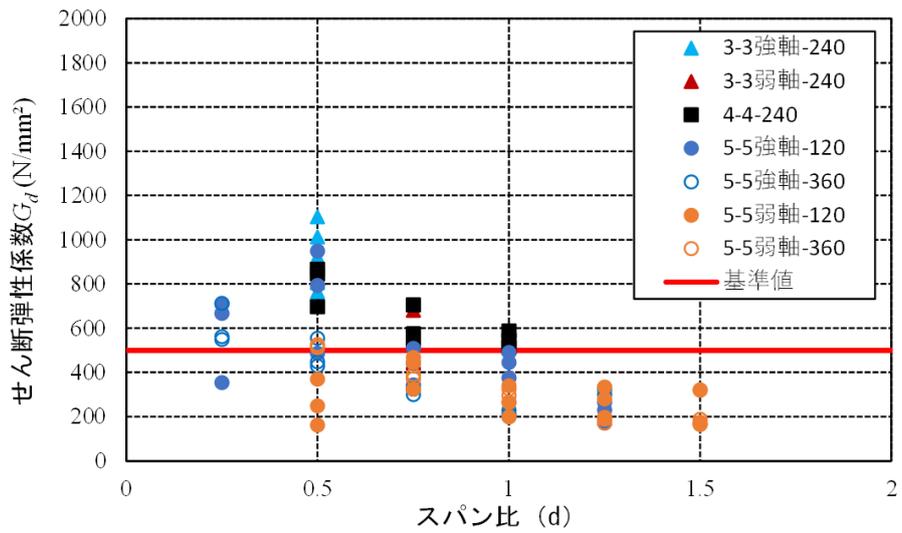


図 4.4-22 せん断弾性係数  $G_d$  とスパン比の関係

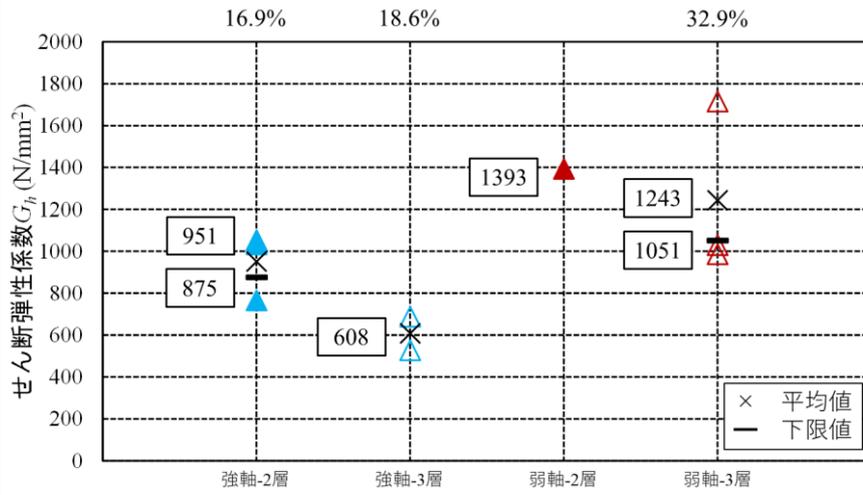


図 4.4-23  $G_h$ の層数による違い

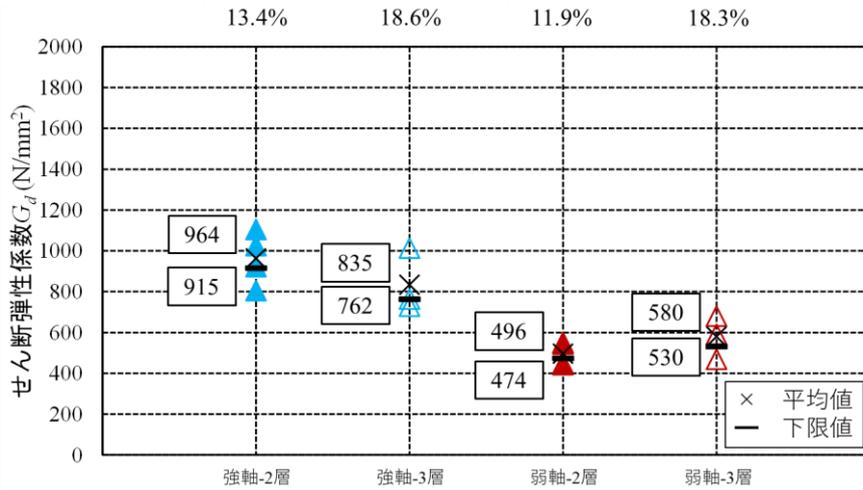


図 4.4-24  $G_d$ の層数による違い

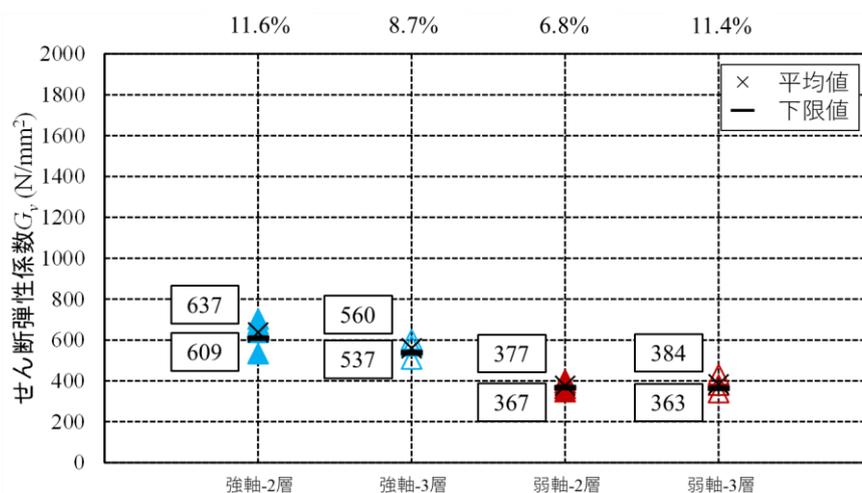


図 4.4-25  $G_v$ の層数による違い

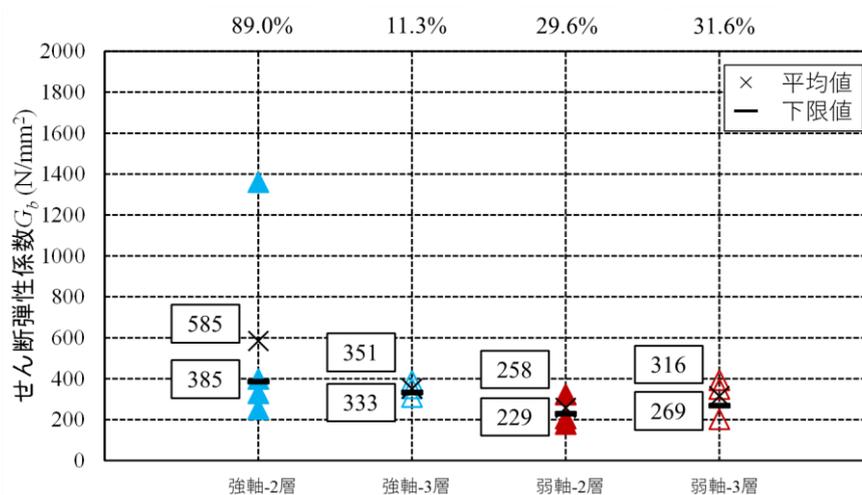


図 4.4-26  $G_b$ の層数による違い

図 4.4-27、図 4.4-28 に各せん断弾性係数と  $G_b$  の関係を示す。 $G_b$  はラミナ境界のずれを計測しており、各せん断弾性係数もラミナ境界を含む計測であることから、相関性がみられると考えた。 $G_v$  及び  $G_d$  については、若干正の相関がみられるが、 $G_h$  では相関性はみられなかった。この要因としては、破壊モードに起因すると考える。強軸ではモード I の破壊が生じていることから、ラミナのせん断変形が占める割合が大きいと考える。弱軸ではすべてモード III となっていることから、ラミナの変形よりもラミナ境界が変形する割合が大きいことから、繊維平行方向に計測している  $G_v$  及びラミナ境界を含む計測となる  $G_d$  とは相関性がみられ、繊維直交方向の計測となる  $G_h$  とは相関性がみられなくなっていると考える。また、 $G_h$  の場合、ばらつきが大きいことも要因の一つであると考えられる。

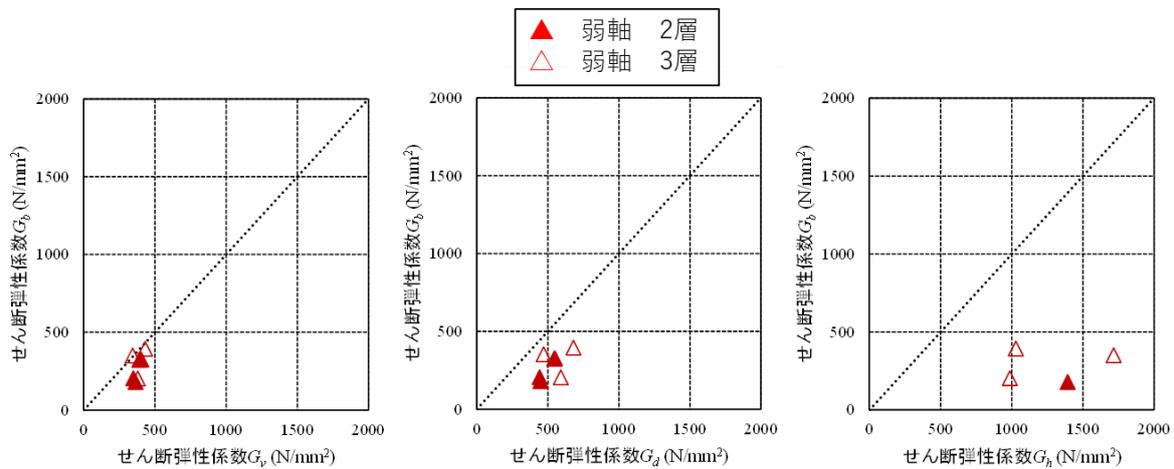


図 4.4-27 各せん断弾性係数と  $G_b$  の関係 (弱軸)

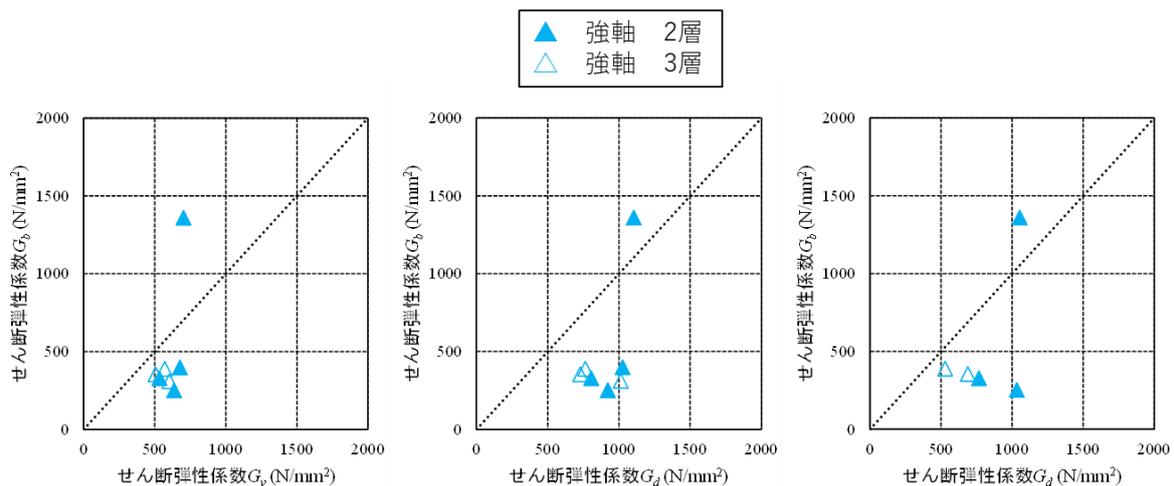


図 4.4-28 各せん断弾性係数と  $G_b$  の関係 (強軸)

図 4.4-29～図 4.4-31 に気乾密度と各せん断弾性係数の関係、図 4.4-32～図 4.4-34 に含水率と各せん断弾性係数の関係、図 4.4-35～図 4.4-37 にせん断強度と各せん断弾性係数の関係を示す。各図中に近似直線、近似式、決定係数も併せて示す。気乾密度との関係については、 $G_d$  と  $G_v$  では若干の正の相関がみられた。 $G_h$  では負の相関となっているが、弱軸試験体で高いせん断弾性係数が算出された試験体に低い密度が多かったためであり、全体的にはほぼ横ばいであると考えられる。

含水率との関係については、どの計測方法でも正の相関がみられた。特に  $G_d$  では決定係数が 0.3 程度となり、他の計測方法に比べて相関が強いことがわかる。

せん断強度との関係については、 $G_d$  と  $G_v$  では若干の正の相関がみられた。 $G_h$  ではほぼ横ばいとなっており、ばらつきも大きいことから、相関性はみられない。

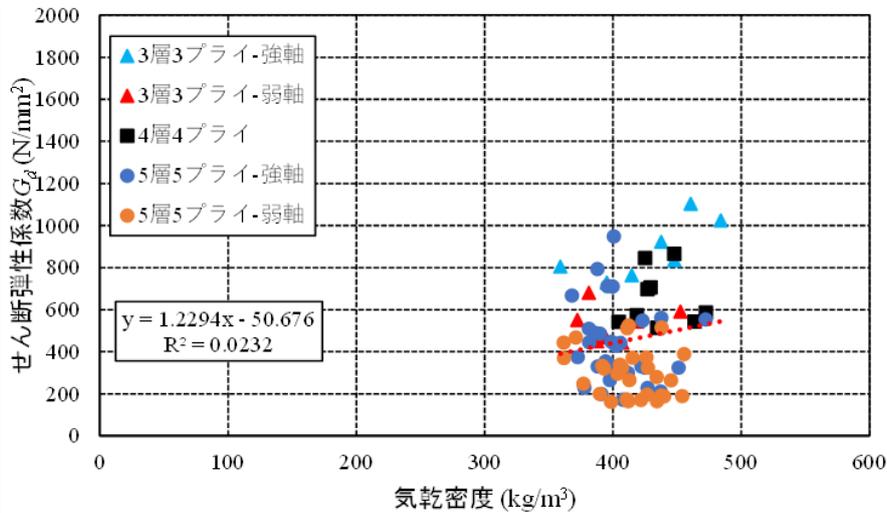


図 4.4-29 気乾密度とせん断弾性係数  $G_d$  の関係

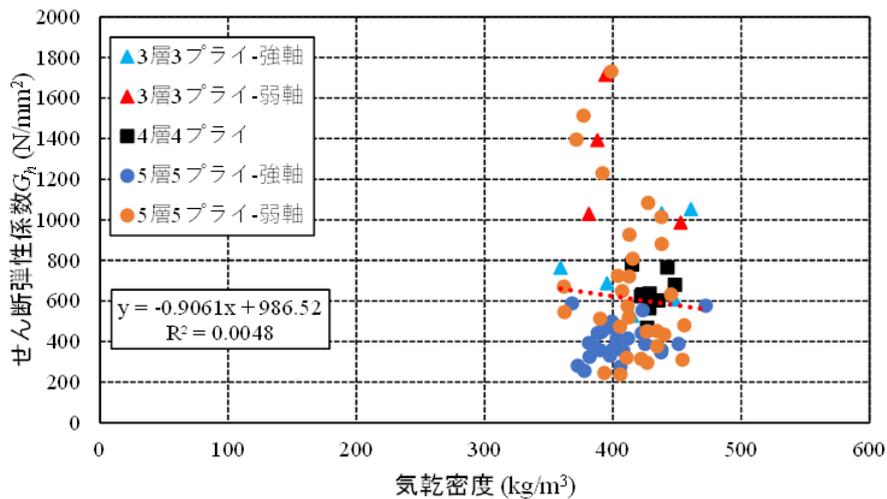


図 4.4-30 気乾密度とせん断弾性係数  $G_h$  の関係

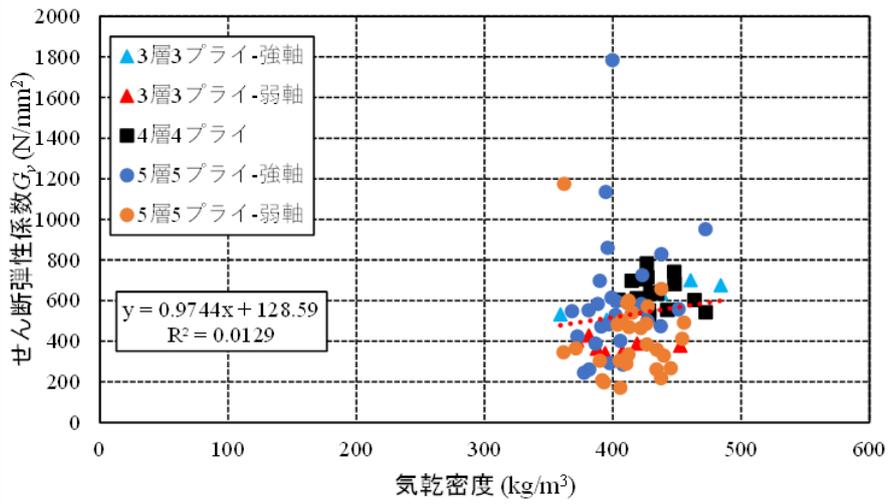


図 4.4-31 気乾密度とせん断弾性係数  $G_v$  の関係

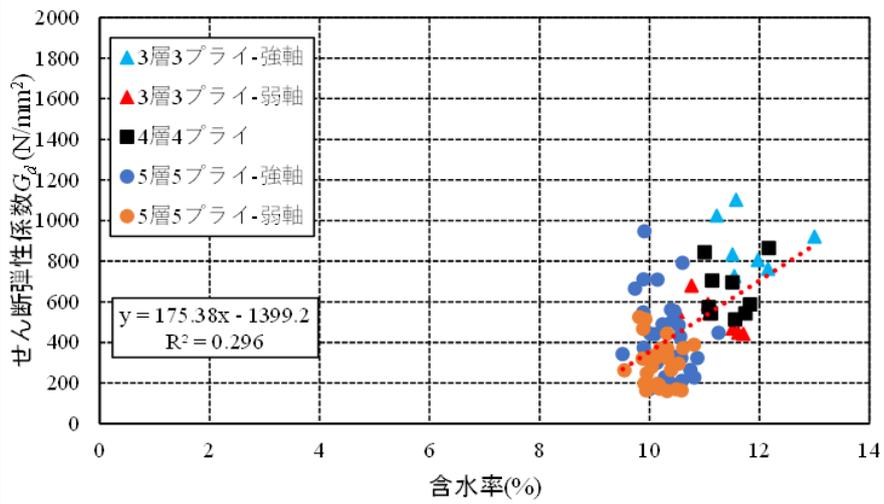


図 4.4-32 含水率とせん断弾性係数  $G_d$  の関係

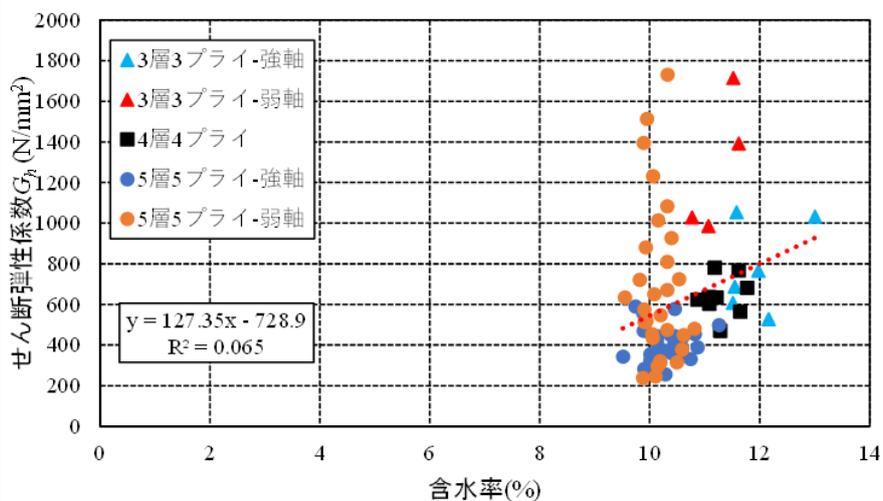


図 4.4-33 含水率とせん断弾性係数  $G_h$  の関係

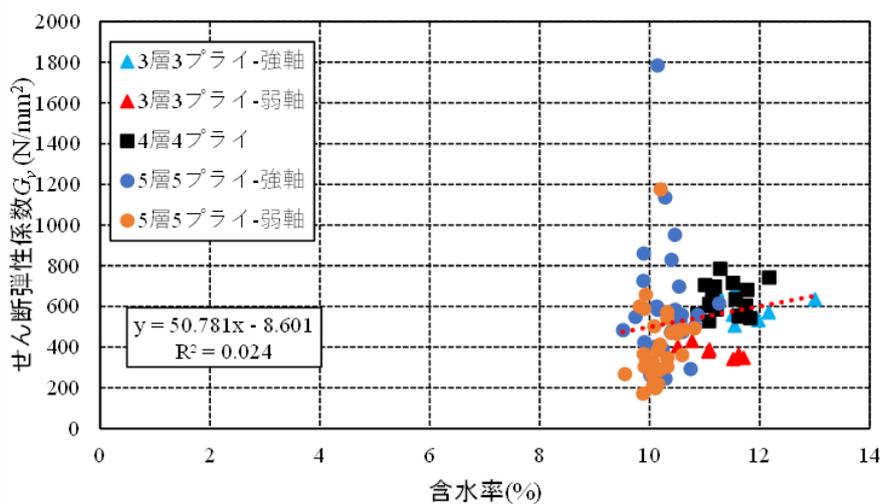


図 4.4-34 含水率とせん断弾性係数  $G_v$  の関係

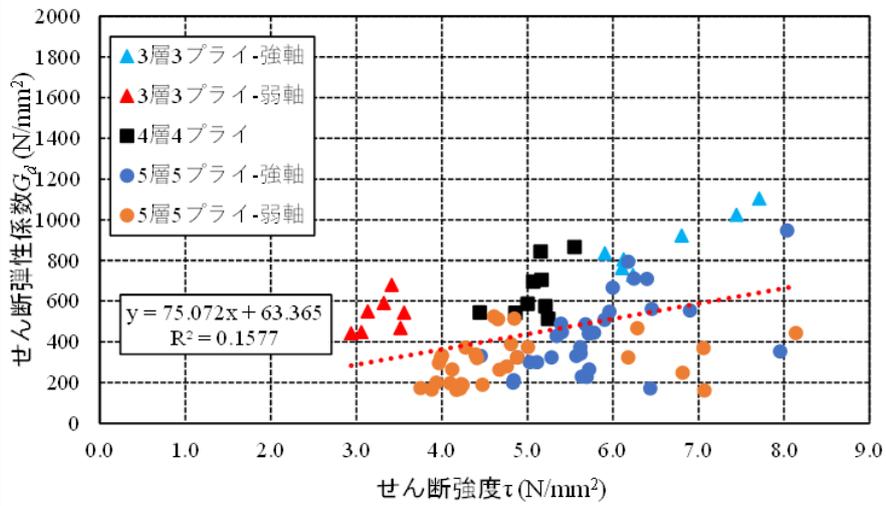


図 4.4-35 せん断強度とせん断弾性係数  $G_d$  の関係

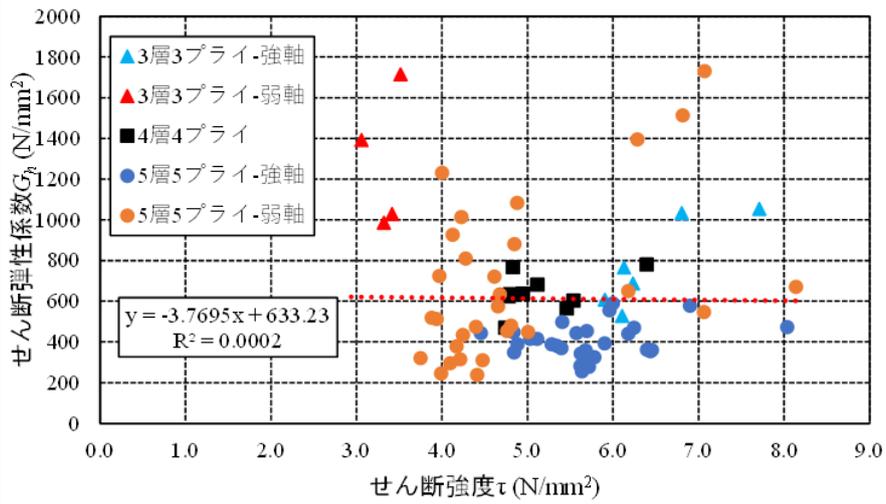


図 4.4-36 せん断強度とせん断弾性係数  $G_v$  の関係

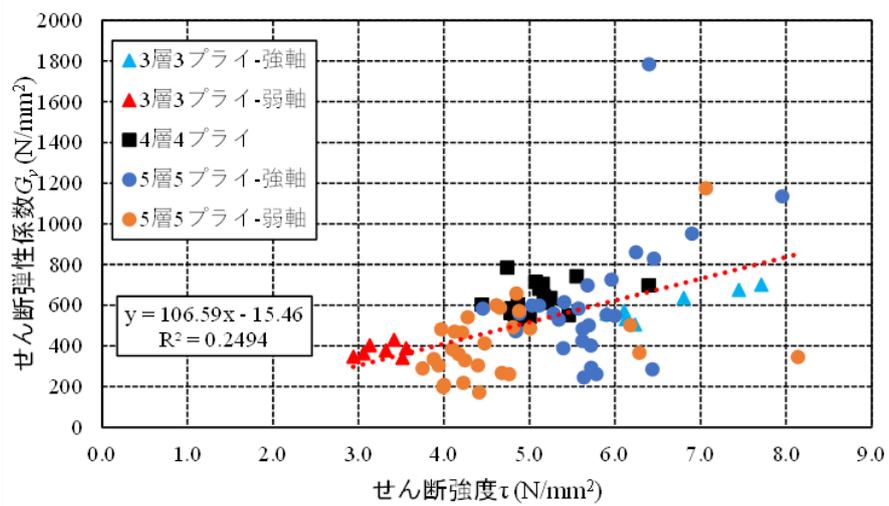


図 4.4-37 せん断強度とせん断弾性係数  $G_v$  の関係



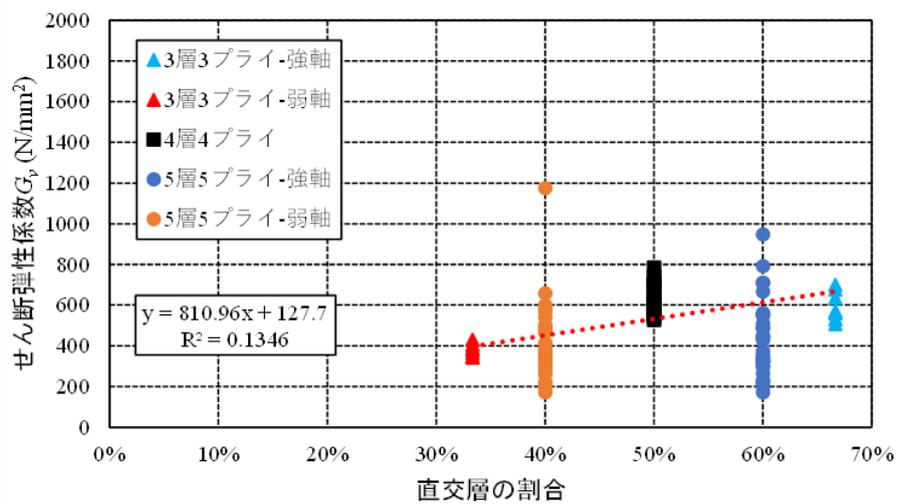


図 4.4-40 直交層の割合とせん断弾性係数  $G_v$  の関係

#### 4.5 逆対称4点曲げ試験の試験条件の確立

本章では、3層3プライのスギCLTを用いて逆対称4点曲げ試験を実施し、5層5プライ、4層4プライの結果と併せて、適切な試験条件及びせん断性能に影響を及ぼす要因を検証した。その結果、以下のことがわかった。

##### せん断強度

せん断強度については、強軸は弱軸の約2倍のせん断強度を示し、どちらも2章、3章の結果に比べて若干離れた値を示した。3層3プライ試験体のスパン比で他の試験体と比べると、値に差がみられたことからスパン比以外の要因として直交層の割合が影響していると考えた。直交層の割合とせん断強度は正の相関を示し、その傾きは概ねCLT施工マニュアル<sup>4)</sup>のモードIIの推移に類似した。モードIIでは直交層の割合がせん断強度に大きく影響していることから直交層の割合とせん断強度で近似式を算出すると、直交層の割合 $x$ に対してせん断強度 $y$ は $y=10x$ と簡易にせん断強度が推定できる可能性が示唆された。しかし、この傾向については逆対称4点曲げ試験に限る可能性が考えられるため、次章で他試験の結果とも比較し、せん断強度の推定をおこなう。本研究で検討した層構成はJAS<sup>42)</sup>で規定されたCLT構成のうち、5層7プライ以外のすべての範囲を包括している。また、せん断区間内のラミナ層数がせん断性能に若干影響することを確認した。

##### せん断弾性係数

せん断弾性係数については、3章に引き続き斜め方向の計測はばらつきが少なく、CLT施工マニュアル<sup>4)</sup>の値に近い値を示したことから、望ましい計測方法であると判断した。また、各計測方法でのせん断弾性係数は2、3章と同様の値を示し、層構成によるせん断弾性係数への影響はあまりないことがわかった。せん断区間内のラミナ層数によって各せん断弾性係数の値は1~2割程度差異がみられ、それらはラミナ幅や破壊モードに起因すると考える。また、せん断弾性係数と気乾密度や直交層の割合との関係では、計測方法によって異なる傾向がみられた。その要因としては、水平方向の計測での弱軸試験体はばらつきが大きく、値が極端に高かったことから、全体の相関に影響を与えているためだと考える。含水率との相関はどの計測方法でも正の相関がみられた。

## 試験条件の結論

本研究では、①荷重スパン、②試験体材せい、③層構成、④荷重方向をパラメータとし、それぞれが及ぼす影響の検討と適切な試験条件、計測条件の確立を目的として逆対称4点曲げ試験をおこなった。2～4章の結果を踏まえて下記に本研究で推奨する試験条件を示す。

- ① 荷重スパン：荷重スパンは支点・荷重点距離  $S$  から加圧板幅  $w_p$  を差し引き、材せい  $d$  の比としたスパン比  $(S-w_p)/d$  を対象として検討した。スパン比が長すぎる場合 ( $1.25d$  以上)、一部試験体で曲げ破壊が見られた。また、スパン比が短すぎる場合 ( $0.25d$ 、 $0.5d$  の一部)、支点・荷重点が同一ラミナにかかることで試験体中央部での縦圧縮によるストラットが増大し、極端に高いせん断強度が得られた。スパン比が短くても同一ラミナにかからない場合では、適切なせん断強度が得られたため荷重位置を検討した上で  $0.5\sim 1.0d$  の範囲が適切であると考え。また、せん断弾性係数については、スパン比と負の相関がみられる計測方法もあったことから、せん断変形を計測する上でのスパン比は  $0.5d$  が望ましいと考える。
- ② 試験体材せい：材せいがせん断強度及びせん断弾性係数に及ぼす影響はあまりなかった。しかし、材せいが小さい場合、先述の荷重スパンが短くなり同一ラミナに荷重しやすくなってしまふ。また、大きすぎる場合は、体積の増大や試験機の容量が必要になることから、本研究の範囲では  $240\text{mm}$  程度が望ましいと考える。
- ③ 層構成：層構成については、せん断強度に影響を及ぼすことがわかった。中でも、CLT の全層厚における直交層の厚さとせん断強度には正の相関がみられ、直交層の割合  $x$  に対してせん断強度  $y$  は  $y=10x$  で表せる可能性が示唆された。本研究で検討した層構成は JAS<sup>4-2)</sup> の CLT 構成の内、5層7プライ以外の構成を含む範囲であることから、他の JAS の層構成においても近い傾向がみられると考える。せん断弾性係数については、同じ荷重方向で比較した場合にはあまり影響はみられなかった。
- ④ 荷重方向：荷重方向では、先述の層構成と関連して強軸の方がせん断強度は高くなった。せん断弾性係数については、荷重方向と計測方法によって値の大小が異なり、その要因として繊維平行方向が変形しやすいためであると考え。繊維平行方向で計測した場合、CLT 施工マニュアル<sup>4-1)</sup>に示された  $500\text{N}/\text{mm}^2$  に近い値を示したが、繊維直交方向で計測した場合、その値の2～4倍の値を示し、計測が困難であることがわかった。本研究では、鉛直方向、水平方向、斜め方向で変形を計測したが、その中では斜め方向の計測が繊維方向の影響を受けにくいいため、ばらつきが小さく、 $500\text{N}/\text{mm}^2$  に近い値を示した。この結果から、斜め方向での計測が最も望ましい計測方法であると考え。

## 第5章

# 逆対称4点曲げ試験と他試験の比較

## 5 逆対称4点曲げ試験と他試験の比較

### 5.1 はじめに

本章では、逆対称4点曲げ試験の結果と他の試験方法を用いた既往文献の値を比較する。他の試験方法として、図5.1-1に示すI型試験、3点曲げ試験、Off-axis法の3種類を挙げ、それぞれから得られるせん断強度及びせん断弾性係数を比較する。

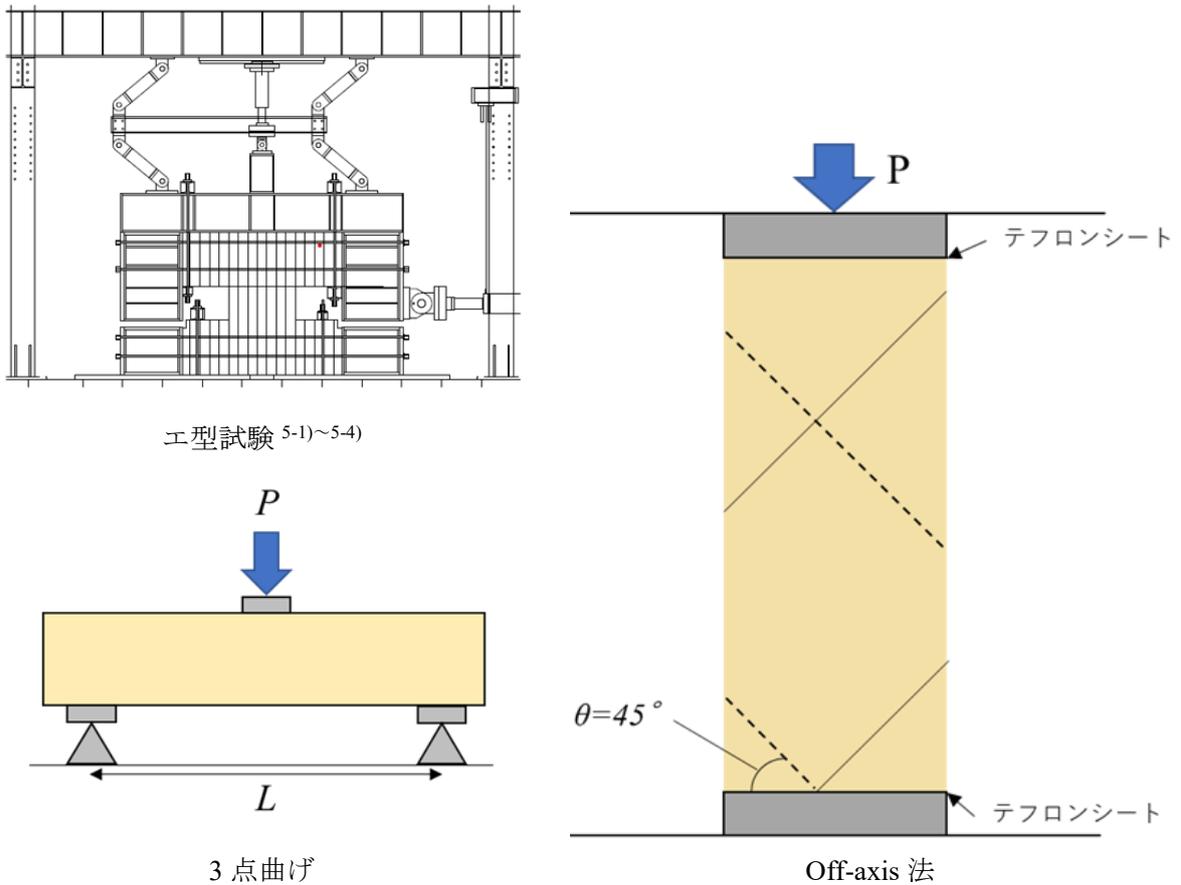


図 5.1-1 各試験方法

## 5.2 エ型試験との比較

### 5.2.1 エ型試験の概要

図 5.2-1 にエ型試験の設置図を示す。エ型試験は実大水平載荷試験とも呼ばれ、試験体中央のくびれ部に順せん断力が作用することで面内せん断破壊を生じさせる試験方法である。2 基の面外変形拘束パンタグラフを連結し、加力梁と反力床を平行に保ちながら水平加力する「建研式加力」試験装置を用いて加力する。CLT 施工マニュアル<sup>5-5)</sup>に示されたせん断弾性係数はエ型試験で算出された値を基に決定されており、面内せん断試験方法として確立されている。

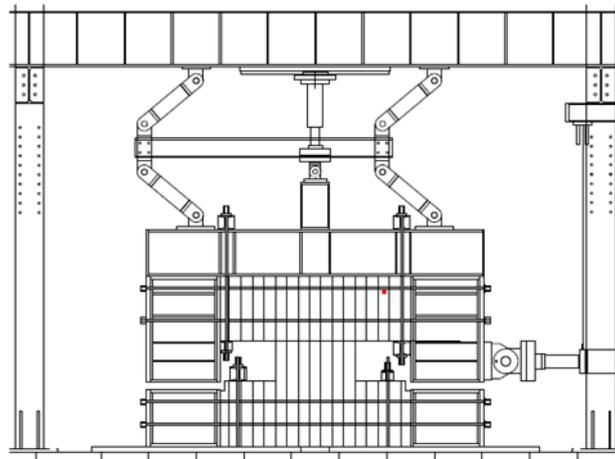


図 5.2-1 エ型試験<sup>5-1)</sup>

5.2.2 参考文献について

表 5.2-1 に示す 4 つの文献<sup>5-1)~5-4)</sup>からせん断強度、せん断弾性係数を参照し、本研究で得られた結果と比較する。なお、逆対称4点曲げ試験と大きく異なる点の1つとして、図 5.2-2 に示すせん断区間の面積が挙げられる。本研究では、幅(30~540)mm×材せい(120~360)mmであり、表 5.2-1 に示すせん断区間の面積は少なくとも2.7倍程度差異がある。

表 5.2-1 文献概要

文献番号	樹種	層構成	せん断区間の面積 幅×高さ (mm)	特記事項
1	カラマツ スギ トドマツ	3層3プライ 3層4プライ 5層5プライ	840×630	スギは Mx60 スギ試験体のみ 3層4プライも実施
2	スギ 外層ヒノキ・内層スギ	3層3プライ 3層4プライ 5層5プライ	840×630	スギのみは Mx60 外層のヒノキは Mx120 内層のスギは Mx30
3	ヒノキ	5層5プライ	強軸：840×525 弱軸：875×420	Mx90 偶数層のラミナ幅は 75、105、 124mm の 3 種類
4	スギ	5層5プライ 5層6プライ 6層6プライ	840×420	Mx60

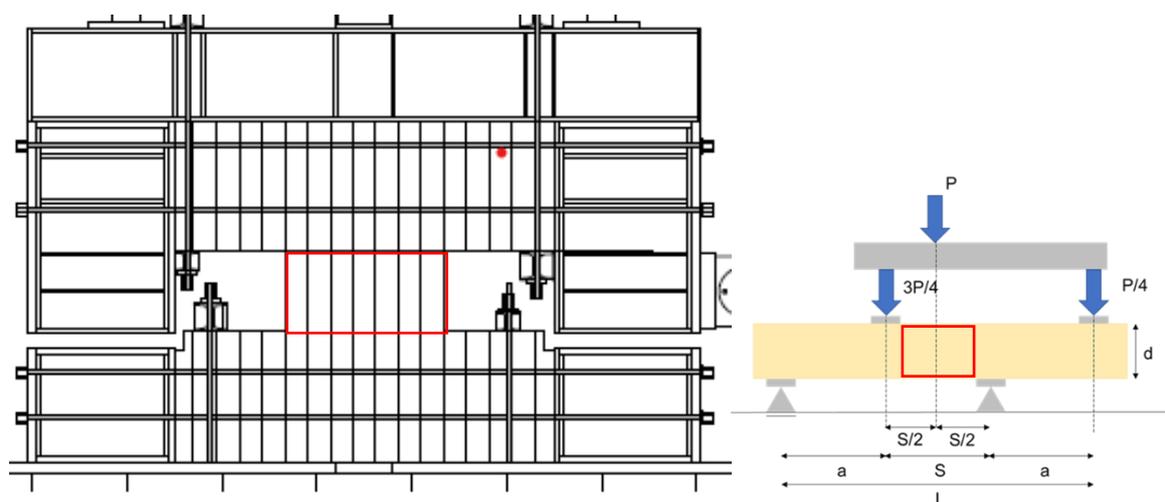


図 5.2-2 せん断区間の面積

### 5.2.3 せん断強度

図 5.2-3～図 5.2-6 に文献から得たせん断強度及び全文献での近似直線、近似式、決定係数を示す。全体的に横ばいの傾向がみられ、一部ヒノキやカラマツの試験体が高い値を示しているが、本研究の逆対称4点曲げ試験の結果のように明確な正の相関はみられない。本研究では主にスギを用いたため、図 5.2-7 にスギ試験体のみの場合と逆対称4点曲げ試験の比較を示す。スギのみでみるとさらに横ばいの傾向は強くなり、エ型試験においては直交層の割合とせん断強度には相関性がないと考える。また、逆対称4点曲げ試験の3層3プライの弱軸とエ型試験の3層3プライの弱軸は近い値を示した。しかし、それ以外の構成では試験方法による値の乖離が大きくなり、直交層の割合が66%の場合で約2.3倍逆対称4点曲げ試験の方が高い値を示した。

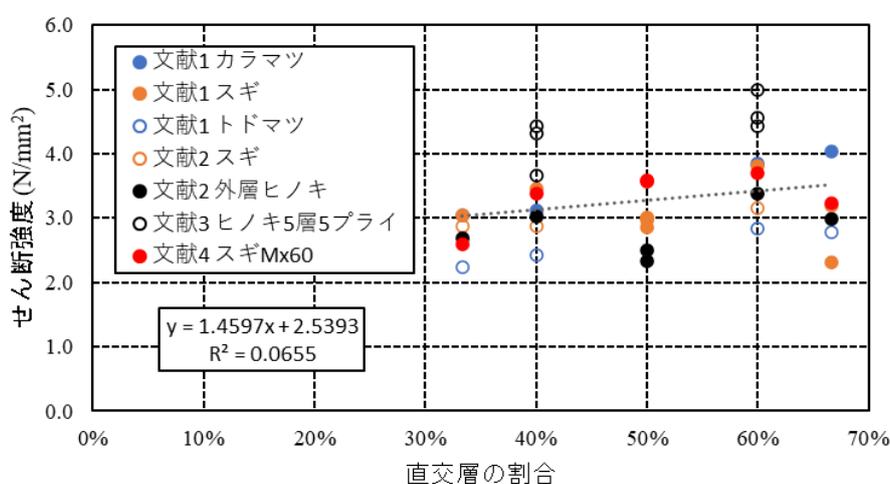


図 5.2-3 文献のせん断強度と直交層の割合の関係 全文献値

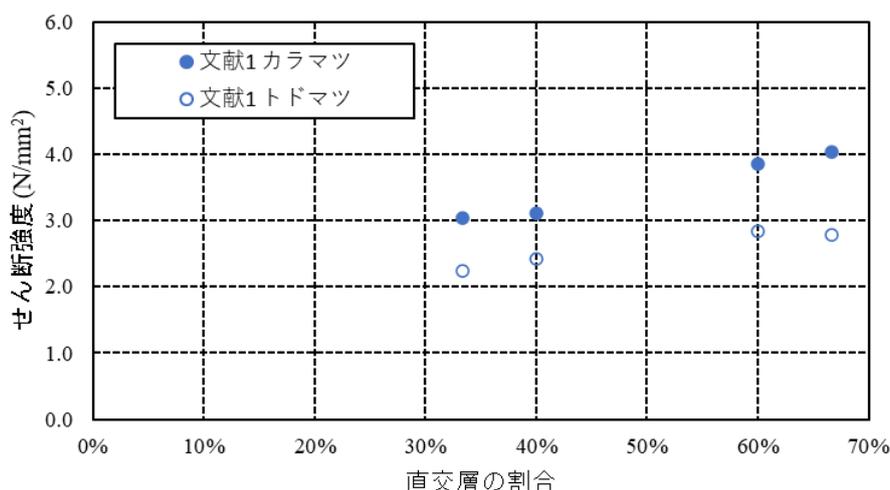


図 5.2-4 文献のせん断強度と直交層の割合の関係 カラマツ・トドマツ

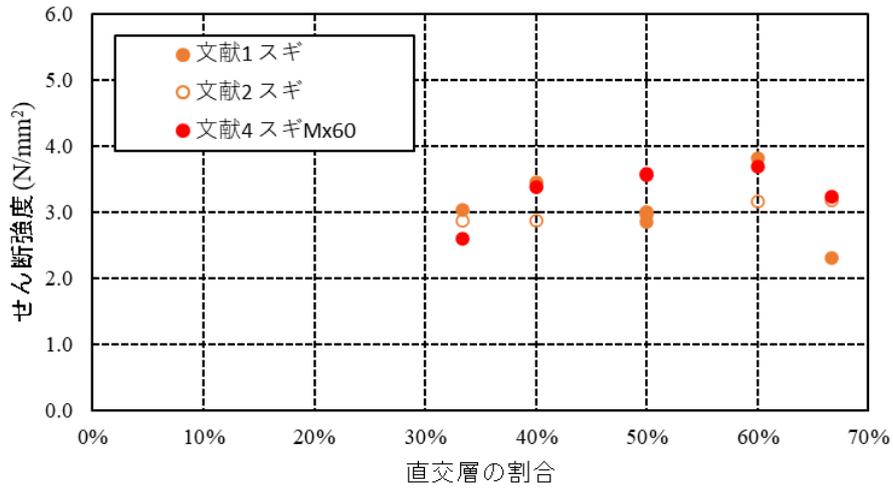


図 5.2-5 文献のせん断強度と直交層の割合の関係 スギ

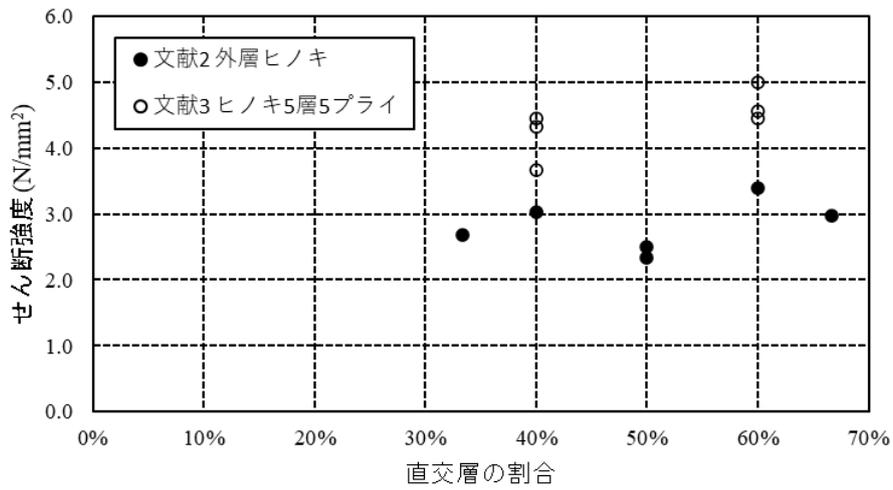


図 5.2-6 文献のせん断強度と直交層の割合の関係 ヒノキ

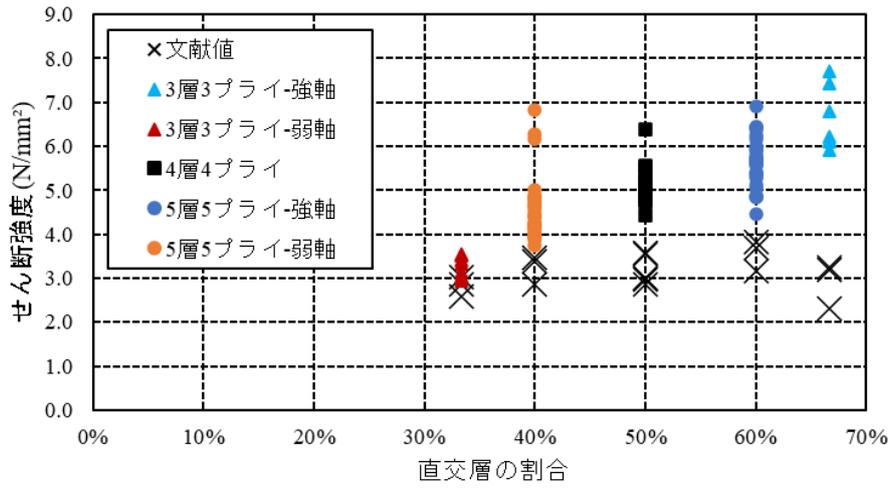


図 5.2-7 スギのみの文献値と逆対称4点曲げ試験の比較

5.2.4 せん断弾性係数

図 5.2-8～図 5.2-11 に文献から得たせん断弾性係数を示す。全体的に直交層の割合と負の相関がみられた。図 5.2-12～図 5.2-14 に示すスギ試験体みのグラフと逆対称4点曲げ試験の比較でも負の相関がみられた。逆対称4点曲げ試験では特に直交層の割合とは相関がみられなかったことから、試験条件の違いによって変形が異なると考えられる。

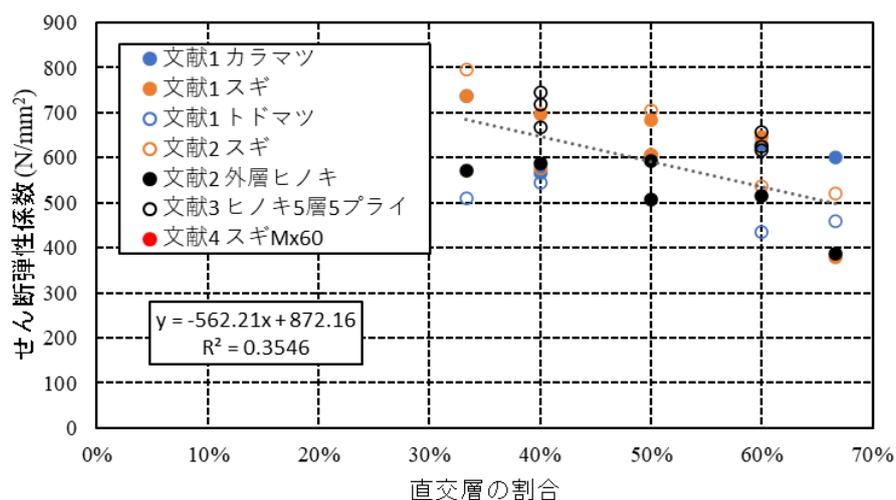


図 5.2-8 文献のせん断弾性係数と直交層の割合の関係 全文献値

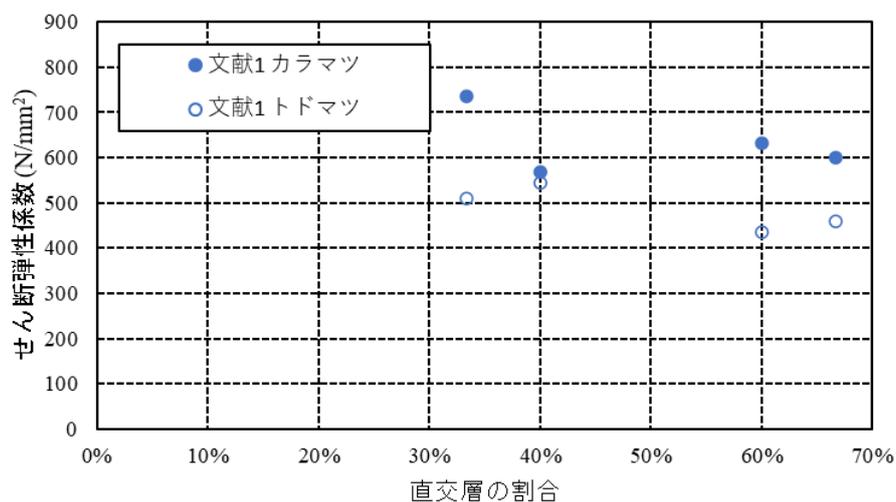


図 5.2-9 文献のせん断弾性係数と直交層の割合の関係 カラマツ・トドマツ

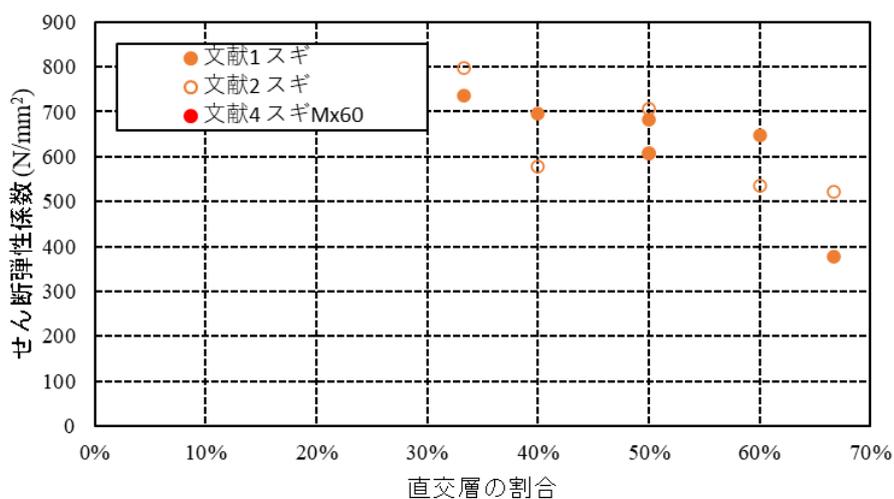


図 5.2-10 文献のせん断弾性係数と直交層の割合の関係 スギ

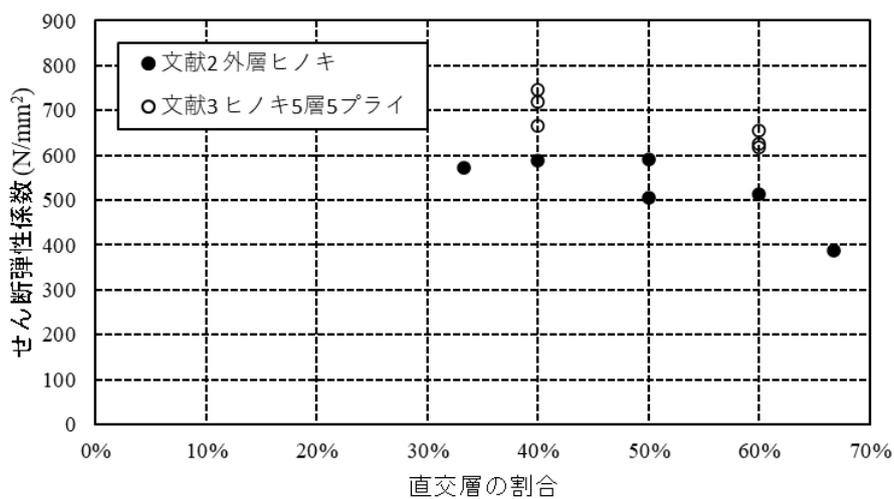


図 5.2-11 文献のせん断弾性係数と直交層の割合の関係 ヒノキ





### 5.2.5 エ型試験と逆対称4点曲げ試験の差異について

せん断強度及びせん断弾性係数の検討から、エ型試験と逆対称4点曲げ試験の差異を検証した。逆対称4点曲げ試験の結果とエ型試験の文献から試験方法によって得られるせん断性能が異なることがわかった。エ型試験に比べると逆対称4点曲げ試験が高いせん断強度を示す理由としては、せん断区間の面積が小さい点や拘束条件の違いが考えられる。せん断区間の面積については、せん断応力の算出には直接関係しないが、せん断区間内のラミナの枚数が異なる点や寸法効果の影響などが生じていると考える。拘束条件については、逆対称4点曲げ試験の場合、支点・載荷点で試験体に面している点で変形を拘束している。しかし、エ型試験のせん断破壊させる箇所では、広い範囲で拘束がないことから、せん断破壊がしやすくなり強度、弾性係数ともに若干低い値が算出されると考える。特に、モードⅢは直交する交差面のずれやねじりによって生じることから、拘束することによる性能差がより生じやすいと考える。また、せん断弾性係数と直交層の割合との関係では、試験方法によって対照的な傾向がみられたが、これに対する明確な要因はわからない。

エ型試験は逆対称4点曲げ試験と比べて、せん断強度、せん断弾性係数ともに異なる傾向を示すが、ばらつきは小さく、安定した値を得られる点で優れている。また、せん断強度算定式と同様の傾向を示すことから、エ型試験の方が他試験に比べて適切にせん断性能を評価できると考える。しかし、試験可能な場所が限られる点や材積が大きくなる点などが課題であり、エ型試験での応力状態に近づけた逆対称4点曲げ試験の試験方法が開発されると、試験方法による差異の検証がより発展すると考える。

### 5.3 3点曲げ試験との比較

#### 5.3.1 3点曲げ試験の概要

3点曲げ試験は逆対称4点曲げ試験と同様に、製材及び集成材の試験方法として日本住宅・木材技術センターの強度試験マニュアル<sup>5-6)</sup>で試験方法が規定されている。しかし、規定された寸法で実施した場合<sup>5-7)</sup>、図5.3-1に示すように強軸、弱軸ともに曲げ破壊が発生し、CLT施工マニュアル<sup>5-5)</sup>の基準強度を下回る低いせん断強度が得られている。また、CLTの面外せん断に関しては3点曲げをよく用いている<sup>例えば5-8)~5-10)</sup>が、面内せん断については先述の文献以外にはみられないことから、3点曲げ試験についてもデータが不足しているといえる。そこで、本研究では曲げ破壊が生じず、適切にせん断性能を計測できる試験条件を検討した。



図 5.3-1 文献<sup>5-7)</sup>での曲げ破壊

5.3.2 実験概要

表 5.3-1 に試験体の一覧を示す。試験体は3層3プライのスギ CLT の S60 とし、材せいを 500mm と 700mm の 2 種類とした。試験体数は各 3 体とし、いずれも幅はぎ接着はしていない。ラミナ厚さは 30mm、ラミナ幅は 122mm としている。また、いずれも荷重方向は強軸としている。また、加圧板幅は材せい 500mm では 200mm としたがめりこみが生じたため、700mm では写真 5.3-1 に示すように鉄板を重ねることで、試験体のめりこみ及び鉄板の曲げ変形を抑制した。また、すべての試験体で写真 5.3-2 に示すように荷重面にビスを打ち込むことでめり込み補強をした。めり込み補強では木ビス (CPQ45) を用い、繁田ら<sup>5-11)</sup>の結果を基に 1 本あたり 4.5kN の補強効果があると考え、不足するめり込み耐力分を直交層に打ち込んだ。

表 5.3-1 逆対称4点曲げ試験体一覧

樹種	材せい (mm)	材幅 (mm)	スパン比 ( $S-wp$ ) / $d$	支点板幅 (mm)	加圧板幅 (mm)	試験体数
スギ	500	90	0.64 $d$	160	200	各 3 体 (計 6 体)
	700		0.92 $d$		300	
			0.67 $d$			

※材せい 500mm の 1 体目はスパン比を 0.92 $d$  としており、その後支点間距離を狭めた



写真 5.3-1 材せい 700mm での荷重点



写真 5.3-2 載荷面のめりこみ補強

5.3.3 試験方法

図 5.3-2 に示すような中央集中荷重の3点曲げ試験をおこなった。荷重速度は 1mm/min とし、油圧試験機 (UH-F1000kN、島津製作所製) を用いて実施した。最大荷重到達後  $0.8P_{max}$  に荷重が低下するまで荷重した。写真 5.3-3 に実験の様子を示す。

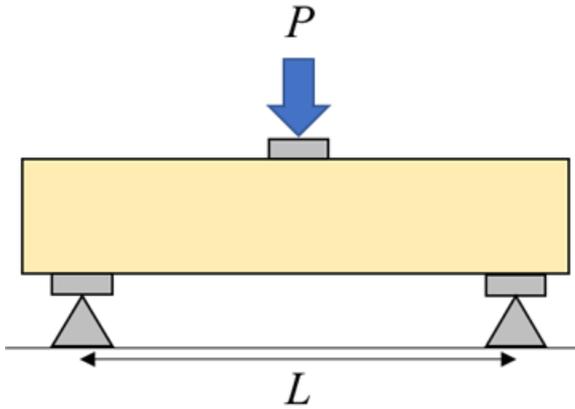


図 5.3-2 3点曲げ試験

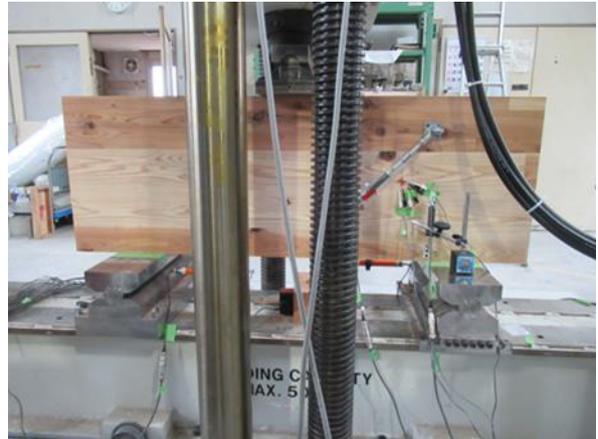


写真 5.3-3 実験の様子

5.3.4 計測方法及び特性値の算出

3点曲げ試験の計測を写真 5.3-4 に示す。逆対称4点曲げ試験と同様に水平方向、鉛直方向、斜め方向で計測した。

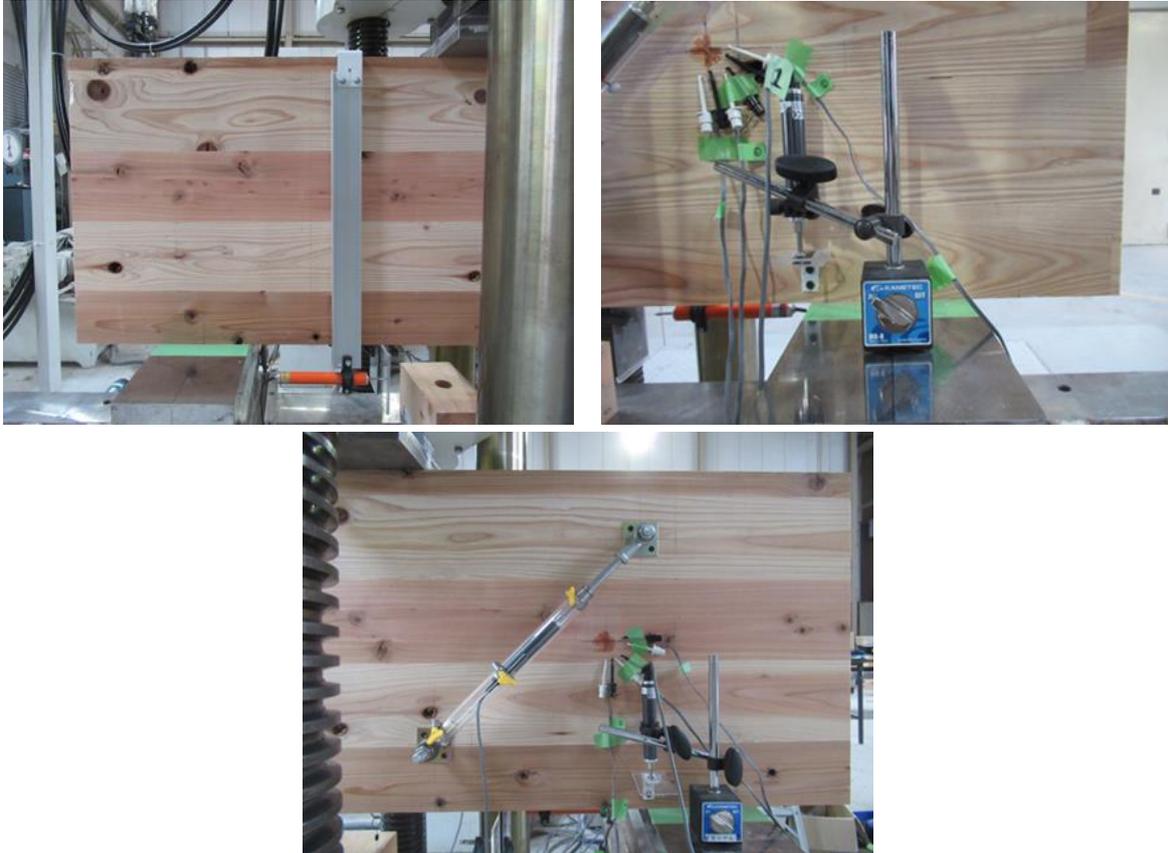


写真 5.3-4 3点曲げ試験での計測方法

3点曲げ試験のせん断強度及びせん断弾性係数は逆対称4点曲げ試験と同様に算出し、本章では比較的曲げの影響を受けにくいと考えられる水平方向の計測と前章で適切な計測方法とした斜め方向の計測から得たせん断弾性係数で比較する。

5.3.5 破壊性状

写真 5.3-5～写真 5.3-10 に破壊性状を示す。材せい 500mm の試験体では写真 5.3-5 に示す曲げ破壊や写真 5.3-6 に示すめりこみ破壊で最大荷重となった。破壊は曲げ又はめりこみとなったが、写真 5.3-7 に示すようにせん断ずれも生じており、せん断耐力の算出には至らなかったがせん断弾性係数は算出可能であると考えられる。なお、写真 5.3-5 に示す試験体は材せい 500mm の最初に載荷した試験体であり、その後載荷点・支点間距離を短くすると、写真 5.3-6 のようなめりこみが生じた。そのため、材せい 700mm ではさらに載荷点幅を長くし、一部試験体では写真 5.3-8 に示す支点部でのめりこみがみられたが、最終的には写真 5.3-9、写真 5.3-10 に示すローリングシアによるせん断破壊が生じた。



写真 5.3-5 載荷点下部の曲げ破壊 (500mm)

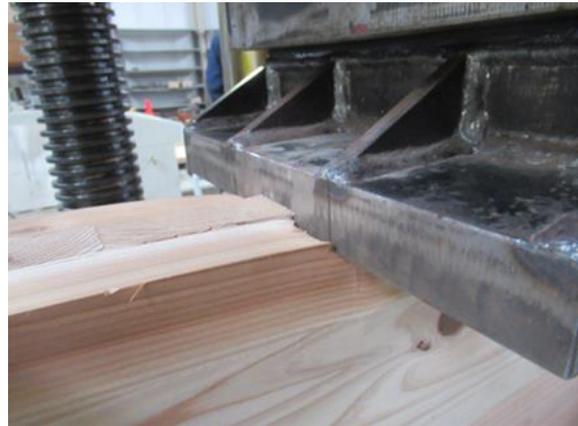


写真 5.3-6 加力点のめりこみ (500mm)

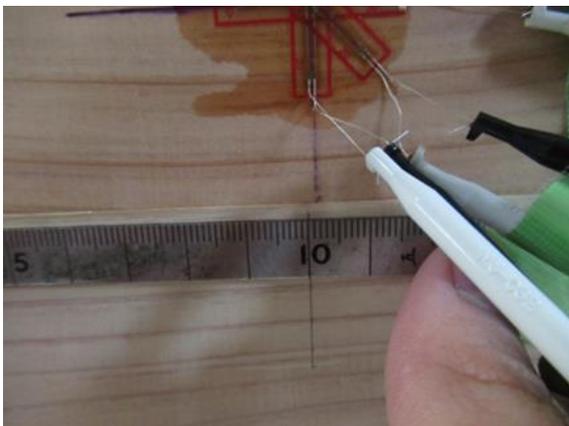


写真 5.3-7 せん断ずれ (500mm)

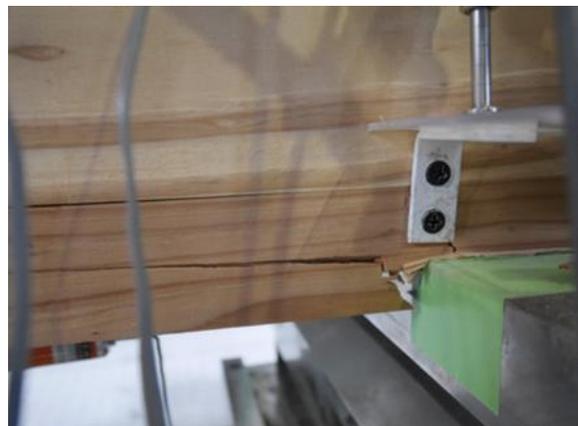


写真 5.3-8 支点のめりこみ (700mm)



写真 5.3-9  
側面のローリングシア (700mm)



写真 5.3-10  
上面のローリングシア (700mm)

5.3.6 応力-ひずみ関係

図 5.3-3 に応力-ひずみ関係を示す。材せい、計測方法で分けているが、弾性域では概ね同様の挙動を示した。0.5 $P_{max}$ 程度以降では、材せい700mmの方が若干応力は低下する傾向がみられた。

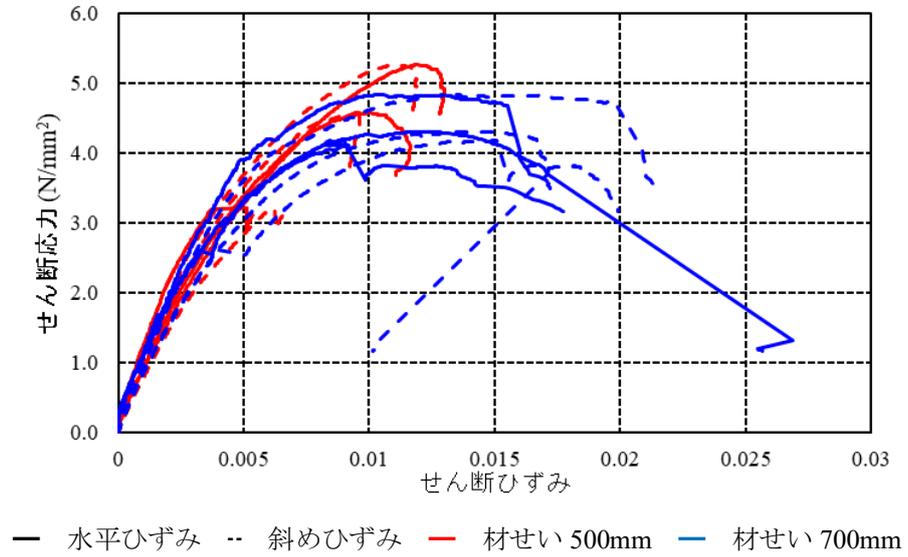


図 5.3-3 応力-ひずみ関係

### 5.3.7 せん断強度

図 5.3-4 に3点曲げ試験のせん断強度と逆対称4点曲げ試験での3層3プライ強軸のせん断強度の比較を示す。図中に平均値、下限値、変動係数を併せて示す。500mmの試験体に関しては、曲げ破壊及びめりこみ破壊となっているため、せん断強度ではなく破壊時のせん断応力であることに注意されたい。また、曲げ破壊が生じた試験体は別でプロットしている。曲げ破壊が生じた試験体のせん断応力は、同じ500mmでめりこみ破壊した試験体の約0.7倍の値を示した。また、700mmについてはすべてせん断破壊が最大荷重となっていたが、500mmの試験体とあまり変わらないせん断強度となった。逆対称4点曲げ試験の平均値は3点曲げ試験の値の約1.46倍の値を示しており、試験方法によってせん断強度に差異が生じた。この要因としては、3点曲げの場合、図 5.3-5のように逆対称4点曲げではせん断力が最大の箇所まで曲げモーメントは0となるが、3点曲げ試験ではせん断力が作用する区間に曲げモーメントも作用しているため、曲げによる影響をより受けやすいためであると考えられる。また、前項で述べたせん断区間の面積が影響している可能性も考えられる。今後は3点曲げ試験で同様の面積の検討をおこなうことで、せん断強度に影響を及ぼしている要因を検証したい。

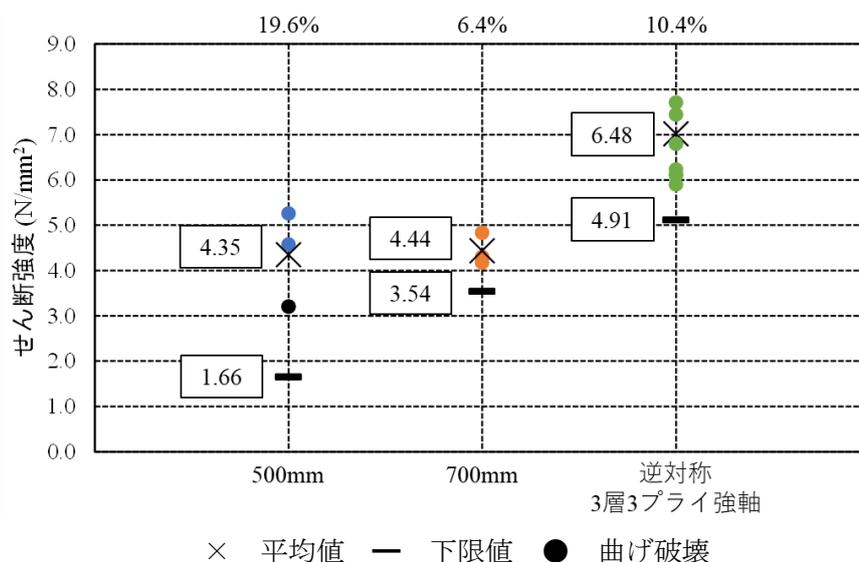


図 5.3-4 せん断強度の比較

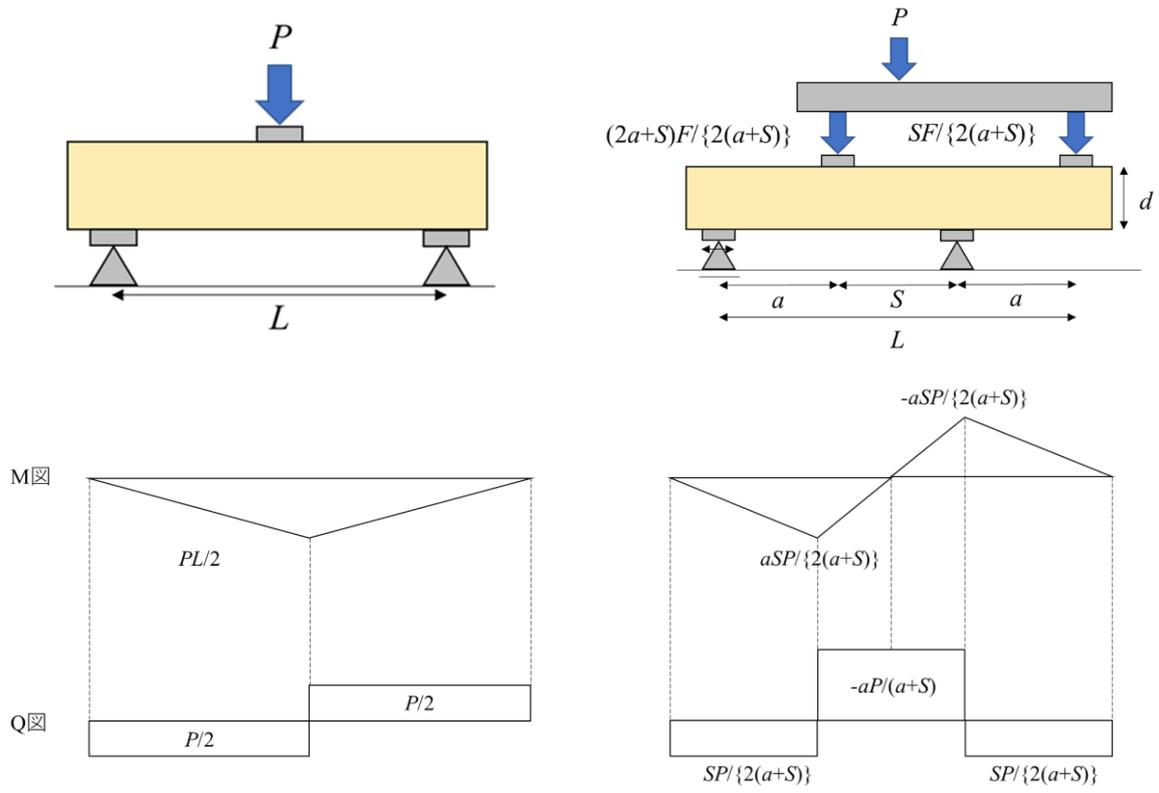


図 5.3-5 3点曲げ試験と逆対称4点曲げ試験のモーメントとせん断力

5.3.8 セン断弾性係数

図 5.3-6 に3点曲げ試験のせん断弾性係数と逆対称4点曲げ試験での3層3プライ強軸のせん断弾性係数の比較を示す。図中に平均値、下限値、変動係数を併せて示す。3点曲げ試験では概ね400~600N/mm<sup>2</sup>となり、計測方法に関わらず変動係数は10%未満とばらつきが小さい結果となった。逆対称4点曲げ試験と比較して小さい値となっているが、これは前項で述べたせん断区間に曲げモーメントも作用しており、本研究の計測では曲げ変形を除去できていないため、実際のせん断弾性係数は若干高い値になると考える。3点曲げ試験で適切にせん断弾性係数を算出するには、曲げ試験や縦振動法によって曲げヤング係数を算出し、曲げ変形分を除去することが必要であり、今後3点曲げ試験をおこなう際にはこの点を留意する必要がある。

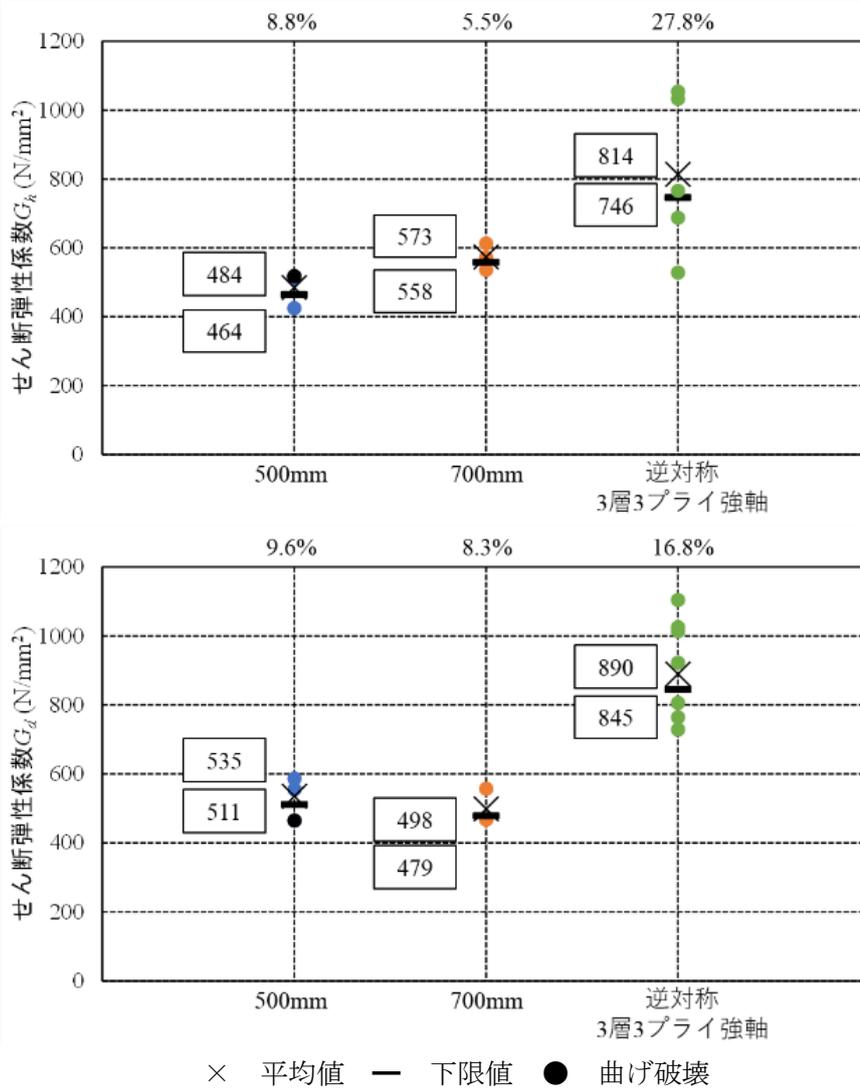


図 5.3-6 セン断弾性係数の比較

### 5.3.9 3点曲げ試験と逆対称4点曲げ試験の差異について

せん断強度及びせん断弾性係数の検討から、3点曲げ試験と逆対称4点曲げ試験の差異を検証した。その結果、せん断強度、せん断弾性係数共に3点曲げ試験の方が小さい値を示した。この要因としては、3点曲げ試験の場合、せん断破壊が生じる区間に曲げ応力も作用しており、その影響によるものと考えられる。せん断弾性係数については、別途面内曲げ試験や縦振動法によって曲げヤング係数を算出し、載荷時に生じている曲げたわみを除くことで真のせん断弾性係数が算出できると考える。また、本研究の逆対称4点曲げ試験で用いた試験体と比較すると、材せいが大きく異なる点も要因の一つとして考えられる。3点曲げ試験の方がばらつきは小さくなっている点についても、材せいが影響している可能性が考えられる。そのため、材せいの低い3点曲げ試験との比較が必要であると考えられる。

3点曲げ試験でも適切に曲げ及びめりこみを抑制することで、せん断性能の算出が可能であることが示唆された。しかし、せん断弾性係数の算出には曲げヤング係数を要する点や、曲げの影響を取り除いたせん断強度の算出が難しい点が課題であると考えられる。

## 5.4 Off-axis 法との比較

### 5.4.1 Off-axis 法の概要

Off-axis 法は木材と同様に異方性が強い材料である繊維強化プラスチックで頻繁に実施されている試験方法であり、異方性主軸を傾けた試験体（Off-axis 試験体）を単軸引張又は圧縮試験をすることによって、せん断応力の影響を強調することができる試験方法である。国内では合板の面内せん断弾性係数の算出<sup>5-12)~5-14)</sup>に用いられることがある。また、国外では CLT に用いた報告<sup>5-15)~5-17)</sup>もされており、国内では1件であるが、複数の層構成の CLT を用いた報告<sup>5-18)</sup>がされている。

本章では、2、3章の Off-axis 法での試験結果と先述の文献の値及び逆対称4点曲げ試験の結果を比較し、本研究で実施した Off-axis 法の妥当性や差異の要因を検討する。

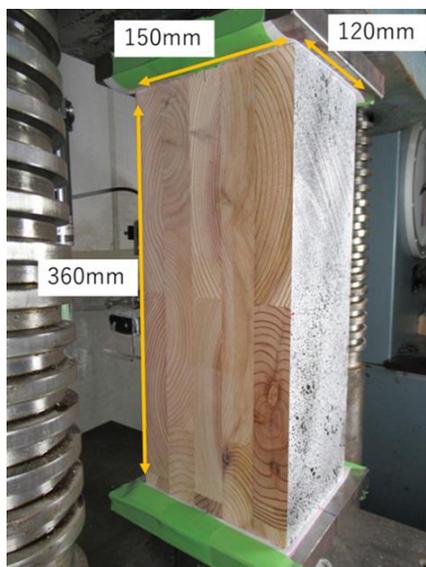
5.4.2 参考文献について

野田ら<sup>5-18)</sup>の報告では、スギの Mx60、3層3プライ、5層5プライ、7層7プライ、9層9プライを用いて Off-axis 法を実施しており、縦振動法によってヤング係数を測定したのち実験している。また、本研究の試験体と試験体構成が異なるため、表 5.4-1 に示す。試験体長さは全断面に対する細長比 $\lambda$  (式 5.1) がおよそ 20 となるように採材されており、本研究の場合は図 5.4-1 に示すような 5層5プライで $\lambda=8.3$ 、4層4プライで $\lambda=6.9$ となっていることから、プロポーシオンが異なる。なお、本研究との比較として、本章では5層5プライの試験結果で比較する。

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{i}} \quad (5.1)$$

表 5.4-1 野田ら<sup>5-18)</sup>の試験体

等級・構成 (層-プライ)	ラミナ寸法 幅×厚 (mm)	細長比 ( $\lambda$ )	寸法 (mm) 厚×幅×長
Mx60-3-3	175×45	21.3	135×300×830
Mx60-5-5	105×30	19.2	150×300×830
Mx60-7-7	105×20	20.5	140×300×830
Mx60-9-9	105×20	16.0	180×300×830



本研究の場合の $\lambda$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{i}} = \frac{h}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{360}{\sqrt{\frac{120 \times 150^3}{12}}} = 8.3$$

図 5.4-1 細長比について

5.4.3 せん断強度

図 5.4-2 に文献値<sup>5-18)</sup>、本研究での Off-axis 法と逆対称4点曲げ試験の5層5プライの値を示す。本研究での値は文献値に比べて約2倍以上の値を示した。また、逆対称4点曲げ試験においても、約1.3倍以上の値を示し、文献値との差異がみられた。この要因としては、前項で述べた試験体のプロポーションが大きく影響していると考ええる。本研究の試験体の細長比は文献のものと比較して半分以下であったことや長さが短いことで試験体内のラミナ境界の数が少なくなり、ラミナ自身のせん断性能に近づいていたためではないかと考える。

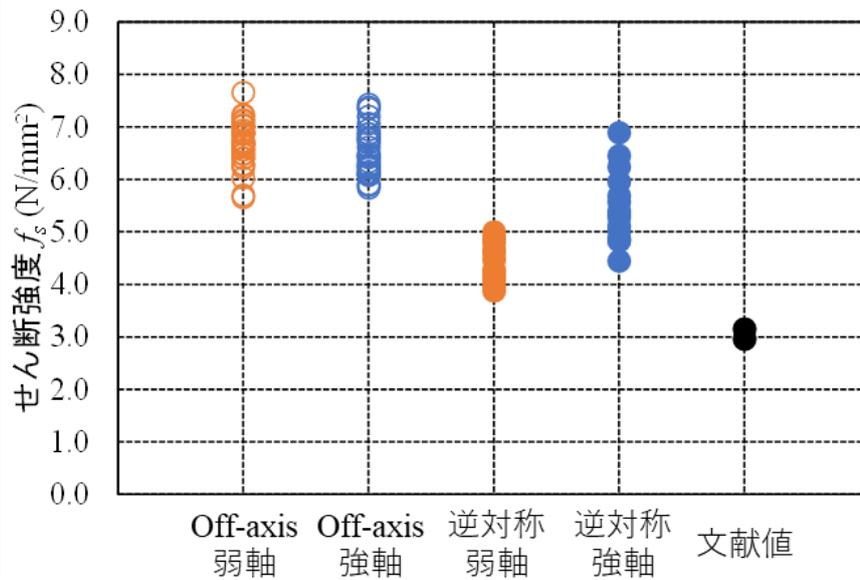


図 5.4-2 せん断強度の比較

5.4.4 せん断弾性係数

図 5.4-3 に文献値<sup>5-18)</sup>、本研究での Off-axis 法と逆対称4点曲げ試験の5層5プライの値を示す。本研究での値は文献値と同等の値を示した。また、逆対称4点曲げ試験においても同程度の値を示した。

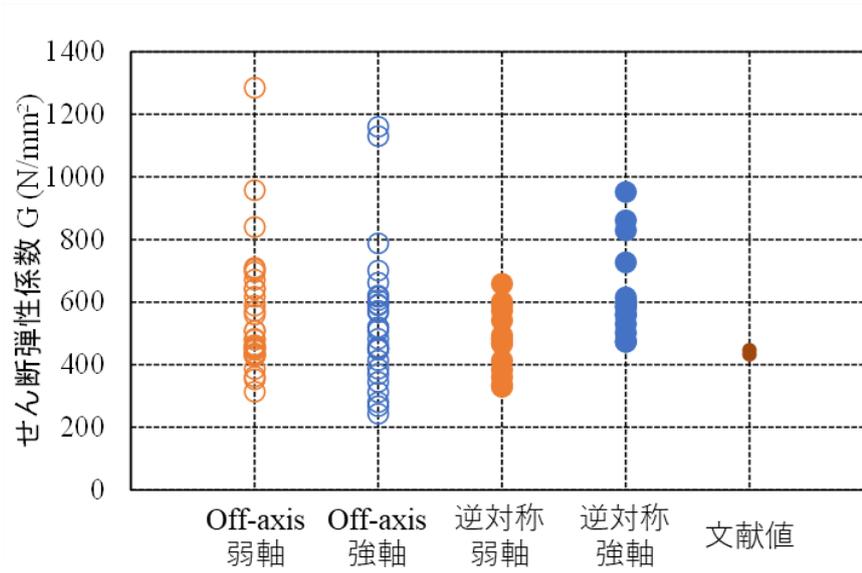


図 5.4-3 せん断弾性係数の比較

### 5.4.5 Off-axis 法と逆対称4点曲げ試験の差異について

せん断強度及びせん断弾性係数の検討から、Off-axis 法と逆対称4点曲げ試験の差異を検証した。その結果せん断強度については、本研究の値では逆対称4点曲げ試験より Off-axis 法の方が高い値を示す傾向にあったが、文献の値は低い値を示しており、同じ Off-axis 法の試験でも試験体のプロポーシオンやラミナ境界の数によって大きく性能が異なる可能性が示唆された。せん断弾性係数については、試験方法に関わらず、文献と同程度の値を示しており、Off-axis 法でのせん断弾性係数の算出の可能性が見いだされた。

Off-axis 法では角度をつけて採材する必要がある点が他試験と大きく異なる点であり、採材の精度や角度については検討の余地があると考ええる。また、せん断強度及びせん断弾性係数の算出方法についても、圧縮応力やポアソン比の影響をどのように除くかが重要であると考ええる。しかし、単調圧縮で実施できる点や逆対称4点曲げ試験に比べて体積を抑えることができる点は優れており、今後試験方法の確立が期待される。

## 5.5 本章のまとめ

本章では、逆対称4点曲げでの結果とエ型試験、3点曲げ試験、Off-axis法の比較をおこない、各試験方法の特性や差異を検討した。その結果、以下のことがわかった。

### エ型試験との比較

せん断強度については、逆対称4点曲げ試験の方がエ型試験より高い値を示した。高いせん断強度を示す理由としては、せん断区間の面積が小さい点や拘束条件の違いが考えられる。せん断区間の面積については、せん断応力の算出には直接関係しないが、せん断区間内のラミナの枚数が異なる点や寸法効果の影響などが生じていると考える。拘束条件については、逆対称4点曲げ試験の場合、支点・载荷点で試験体に面している点で変形を拘束している。しかし、エ型試験のせん断破壊させる箇所では、広い範囲で拘束がないことから、せん断破壊がしやすくなり強度、弾性係数ともに若干低い値が算出されると考える。特に、モードⅢは直交する交差面のずれやねじりによって生じることから、拘束することによる性能差がより生じやすいと考える。また、せん断弾性係数と直交層の割合との関係では、試験方法によって対照的な傾向がみられたが、これに対する明確な要因はわからない。

エ型試験は得られるせん断性能のばらつきは小さいが、試験可能な場所が限られる点、材積が大きくなることから容易に実施できない。そのため、本研究で提案した逆対称4点曲げ試験の試験方法にエ型試験に近い応力状態となるような改善をおこなうことで、よりばらつきを小さくした簡易的な試験方法となるのではないかと考える。

### 3点曲げ試験との比較

せん断強度、せん断弾性係数共に3点曲げ試験の方が小さい値を示した。この要因としては、3点曲げ試験の場合、せん断破壊が生じる区間に曲げ応力も作用しており、その影響によるものと考えられる。せん断弾性係数については、別途面内曲げ試験や縦振動法によって曲げヤング係数を算出し、载荷時に生じている曲げたわみを除くことで真のせん断弾性係数が算出できると考える。また、本研究の逆対称4点曲げ試験で用いた試験体と比較すると、材せいが大きく異なる点も要因の一つとして考えられる。3点曲げ試験の方がばらつきは小さくなっている点についても、材せいが影響している可能性が考えられる。そのため、材せいの低い3点曲げ試験との比較が必要であると考えられる。

3点曲げ試験でも適切に曲げ及びめりこみを抑制することで、せん断性能の算出が可能であることが示唆された。しかし、せん断弾性係数の算出には曲げヤング係数を要する点や、曲げの影響を取り除いたせん断強度の算出が難しい点が課題であると考えられる。

### Off-axis法との比較

せん断強度については、本研究の値では逆対称4点曲げ試験よりOff-axis法の方が高い値を示す傾向にあったが、文献の値は低い値を示しており、同じOff-axis法の試験でも試験体のプロポーシオンやラミナ境界の数によって大きく性能が異なる可能性が示唆された。せん断弾性係数については、試験方法に関わらず、文献と同程度の値を示しており、Off-axis法でのせん断弾性係数の算出の可能性が見いだされた。

## 第5章 逆対称4点曲げ試験と他試験の比較

Off-axis 法では角度をつけて採材する必要がある点就是他試験と大きく異なる点であり、採材の精度や角度については検討の余地があると考ええる。また、せん断強度及びせん断弾性係数の算出方法についても、圧縮応力やポアソン比の影響をどのように除くかが重要であると考ええる。しかし、単調圧縮で実施できる点や逆対称4点曲げ試験に比べて体積を抑えることができる点は優れており、今後試験方法の確立が期待される。

# 第 6 章

## 結言

## 6 結言

### 6.1 逆対称4点曲げ試験方法の確立

スギ及びヒノキ CLT を用いて逆対称4点曲げ試験を実施し、層構成、材せい、スパン比、計測方法などをパラメータとしてせん断強度及びせん断弾性係数の算出方法の確立をおこなった。その結果として、本論で決定した試験条件を以下に示す。

各検討項目について得られた知見を以下に示す。

- ① 荷重スパン：荷重スパンは支点・荷重点距離  $S$  から加圧板幅  $w_p$  を差し引き、材せい  $d$  の比としたスパン比  $(S-w_p)/d$  を対象とした。スパン比が長すぎる場合 ( $1.25d$  以上)、一部試験体で曲げ破壊が見られた。また、スパン比が短すぎる場合 ( $0.25d$ 、 $0.5d$  の一部)、支点・荷重点が同一ラミナにかかることで試験体中央部での縦圧縮によるストラットが増大し、極端に高いせん断強度が得られた。スパン比が短くても同一ラミナにかからない場合では、適切なせん断強度が得られたため、荷重位置を検討した上で  $0.5\sim 1.0d$  の範囲が適切であると考え。また、せん断弾性係数については、スパン比と負の相関がみられる計測方法もあったことから、せん断変形を計測する上でのスパン比は  $0.5d$  が望ましいと考える。
- ② 試験体材せい：材せいがせん断強度及びせん断弾性係数に及ぼす影響はあまりなかった。しかし、材せいが小さい場合、先述の荷重スパンが短くなり同一ラミナに荷重しやすくなってしまう。また、大きすぎる場合は、体積の増大や試験機の容量が必要になることから、本論の範囲では  $240\text{mm}$  程度が望ましいと考える。
- ③ 層構成：層構成については、せん断強度に影響を及ぼすことがわかった。中でも、CLT の全層厚における直交層の厚さとせん断強度には正の相関がみられ、直交層の割合  $x$  に対してせん断強度  $y$  は  $y=10x$  で表せる可能性が示唆された。本論で検討した層構成は JAS の CLT 構成の内、5層7プライ以外の構成を含む範囲であることから、他の JAS の層構成においても近い傾向がみられると考える。せん断弾性係数については、同じ荷重方向で比較した場合ではあまり影響はみられなかった。
- ④ 荷重方向：荷重方向は外層ラミナが荷重方向にして繊維直交方向となる強軸、平行方向となる弱軸と定義する。荷重方向では、先述の層構成と関連して強軸の方がせん断強度は高くなった。せん断弾性係数については、荷重方向と計測方法によって値の大小が異なり、その要因として繊維平行方向がせん断変形をしやすいためであると考え。繊維平行方向で計測した場合、CLT 施工マニュアル<sup>6)</sup>に示された  $500\text{N/mm}^2$  に近い値を示したが、繊維直交方向で計測した場合、その値の2~4倍の値を示し、計測が困難であることがわかった。本論では、鉛直方向、水平方向、斜め方向で変形を計測したが、その中では斜め方向の計測が繊維方向の影響を受けにくいため、ばらつきが小さく、 $500\text{N/mm}^2$  に近い値を示した。この結果から、斜め方向での計測が最も望ましい計測方法であると考え。

また、いくつかの試験体では画像相関法による変形の計測も試みた。その結果、変位計による計測で算出したせん断弾性係数とあまり変わらない結果が得られた。ばらつきについても大きく変わらないことから、画像相関法による変形計測の有用性を確認した。

他試験方法との比較を以下に示す。

- ① エ型試験との比較：エ型試験については、既往研究の値を基に検討する。エ型試験の既往研究では様々な層構成、樹種での検討がされており、本論で用いたスギの結果を主に述べる。せん断強度については、逆対称4点曲げ試験はエ型試験の1.0~2.3倍程度の値を示した。また、逆対称4点曲げ試験では直交層の割合と正の相関がみられたが、エ型試験では概ね横ばいの傾向を示し、試験方法による差が顕著にみられた。せん断弾性係数については、逆対称4点曲げ試験では若干の正の相関がみられるが、エ型試験では負の相関がみられ、対照的な傾向を示した。その中でも、直交層の割合が50%の場合では試験方法によらず同等の値を示した。これらについてはせん断区間の面積が大きく異なる点や、逆対称4点曲げ試験では加圧板がせん断区間に接することから拘束条件が異なる点などが挙げられるが明確の要因はわからない。
- ② 3点曲げ試験との比較：3点曲げ試験では曲げ及びめりこみによる破壊が生じやすく、既往研究では曲げ破壊によって基準強度以下の値となる場合もある。そのため、本論では曲げ及びめりこみ応力が卓越しないようにするためにスパンを短くし、載荷部にビスを多数本打つことによるめりこみ補強をおこなうことでせん断破壊を生じさせることができた。逆対称4点曲げ試験は3点曲げ試験でせん断破壊した際のせん断強度の1.48倍程度の値を示した。せん断弾性係数も1.6倍程度となり、エ型試験ほどではないが試験方法による差異がみられた。3点曲げ試験については、せん断破壊が生じる箇所では曲げ応力も生じていることから、その影響を受けて若干実際のせん断性能より低い値が得られている可能性がある。そのため、今後は面内曲げ試験や縦振動法で曲げヤング係数を算出し、曲げ変形を除去して真のせん断性能を算出することで試験方法の差異を検討したい。
- ③ Off-axis法との比較：本論では逆対称4点曲げ試験で用いた試験体の非破壊箇所からOff-axis法によるせん断試験も実施した。その結果、Off-axis法では45°に切り出したことによって、逆対称4点曲げ試験では生じていた載荷方向による影響がみられなくなった。せん断強度及びせん断弾性係数は逆対称4点曲げ試験に近い値を示したが、ばらつきが大きくなった。また、既往文献でもせん断弾性係数の評価には課題を残すものの、強度評価方法としての有効性は示唆しており、今後こちらの試験方法についても明確な試験方法の確立が期待される。

本論での逆対称4点曲げ試験から得られた結果は、せん断強度、せん断弾性係数ともに、他の試験方法に比べて同等又は若干高い値を示した。その要因としては、曲げ応力の影響やせん断区間の面積、拘束条件の違いなどが考えられるが、明確な要因は分からない。逆対称4点曲げ試験は他試験に比べて試験体寸法を抑えられる点やせん断破壊が生じやすい点、複雑な加工を要しない点などで優れるが、

他の試験結果との差異については課題が残る。今後はこの差異が生じている要因が明確になることで、CLTの面内せん断性能の簡易な検証方法として確立するのではないかと考える。

## 6.2 今後の提案

本研究で実施した各試験から得られた結果を基に明らかにした課題点を今後の提案として以下に論じる。

### せん断強度

せん断強度と直交層の割合には正の相関がみられた。しかし、エ型試験の文献<sup>6-2)~6-5)</sup>では相関性はみられず、直交層の割合に関わらず CLT 施工マニュアル<sup>6-1)</sup>の値に近い値を示していた。この要因として、試験体の寸法が異なる点と拘束条件の違いが考えられる。試験体寸法については、ラミナ層数が影響している可能性が考えられ、ラミナ幅を縮小し、エ型試験の条件に近づけることで差異の要因を検討できると考える。拘束条件については中島ら<sup>6-6)</sup>が検討しているが、先述のラミナ幅の縮小と併用することでよりエ型試験の条件に近づけるのではないかと考える。

### せん断弾性係数

せん断弾性係数については、現状では斜め方向での計測が望ましいことがわかった。これは広い範囲で計測することで、CLT 全体の変形を含むためであるが CLT のラミナや接着層、ラミナ境界、ローリングシアなど各要素でのせん断剛性から全体のせん断弾性係数を表現できるのではないかと考える。そのためには、本研究で実施したラミナ境界の計測方法の改善や接着層の変形の計測方法を検討する必要がある。また、曲げ型試験であるため変形の中に曲げ変形も含んでおり、それを除去するためにも曲げヤング係数の算出も必要となる。これらの検討から、現在は示されていない CLT のせん断弾性係数の算出式を提案できるのが最も望ましいと考える。

### Off-axis 法

本研究でおこなった Off-axis 法は木材分野、特に CLT には近年用いられるようになった試験方法である。そのため、せん断性能の評価方法や試験体寸法など未確立の項目が多い。5.4 の文献との比較でも、プロポーションの違いによる性能差がみられたことから、適切な試験方法の確立が必要と考える。圧縮とせん断が同時に作用する試験であるため、応力分布の把握や圧縮力による影響を除く方法も必要である。また、本研究で対象とした CLT 以外にも、合板や LVL、集成材にも適用できる可能性が考えられる。角度をつけた採材が可能であれば、逆対称 4 点曲げ試験と同様に材積を抑えることができ、一般的な材料試験機で実施できるため、Off-axis 法についても試験方法の確立が期待される。

### 試験方法

本研究の実施において、3 点曲げ試験と同様に曲げとめりこみが大きな課題となった。いくつかは曲げ破壊が生じたことや卒業論文でおこなった実験ではめりこみが発生した。曲げやめりこみを防ぐために現状ではスパンを短くすること、加圧板幅を大きくすることを対策としているが、材せいが小さい場合はスパンが短いことで中央部の計測が困難になり、材せいが大きい場合は加圧板が幅、厚さと

もに大きくなり、実験が困難になるのが課題であると考え。そのため、3点曲げ試験でおこなったよ  
うなめりこみ補強による実験や、中央部をくびれさせることでせん断耐力を下げた試験体での実験を  
おこなうことで、曲げやめりこみの影響を低減しより正確なせん断性能の評価ができるようになると  
考える。

## 謝辞

本研究において、実験の実施、論文の作成など終始親身にご指導くださいました広島大学大学院先進理工系科学研究科准教授の森拓郎先生に深く感謝申し上げます。

同研究科の三浦弘之准教授、寺本篤史准教授には、副査としてご助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

研究に関して国立研究開発法人建築研究所の中島昌一様には、計測治具の貸し出しやご助言を頂き感謝申し上げます。銘建工業の車田慎介様、近藤純平様には特殊な試験体の製作にご助力いただきました。宮崎県木材利用技術センターの中谷誠様、ライフデザインカバヤ様には試験体の採材についてご協力頂き感謝申し上げます。

広島大学技術職員平松様には、広島大学 E3 棟や G1 棟での実験の際に補助や試験機の使い方をご教授いただきました。試験体の搬入や治具の設計など実験の準備、実施に何度もご協力いただきました。感謝申し上げます。

広島大学大学院先進理工系科学研究科の井上涼様には、実験の実施、論文の作成などで多大なご協力を頂き感謝申し上げます。

論文作成にご協力いただきました建築構造力学研究室の皆様にご心よりお礼申し上げます。

研究室でのこれまでの3年間は先生方や、先輩、後輩、企業の方々や研究者の方々、家族に支えていただきました。私が無事博士課程後期に進学できれば、今後の3年間は私からも支えになれるよう頑張りたいと思います。今後ともよろしく願いいたします。

本研究の一部は2022年度日本建築学会中国支部奨励研究の助成を受けました。ここに謝意を表します。

2023年2月 山形 海斗

## 参考文献

## 【第1章】

- 1-1) 林野庁：公共建築物における木材の利用の促進に関する法律  
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/>, 2023年1月14日参照
- 1-2) 角田功太郎,他 7 人:CLT 連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験 その1 実験概要と破壊性状,日本建築学会大会学術講演梗概集 ,pp.303-304, 2020
- 1-3) 衣笠大樹,他 7 人: CLT 連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験 その2 各部設計および事前解析と実験結果の比較,日本建築学会大会学術講演梗概集 ,pp.305-306, 2020
- 1-4) (公財)2016年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016
- 1-5) 中島昌一, 他 4 名: 実大水平載荷実験による CLT の幅方向のせん断強度の評価 樹種の違いが幅方向のせん断強度に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.760, pp.842-849, 2019
- 1-6) 荒木康弘, 他 3 名: 9 層 9 プライヒノキ CLT の面内せん断性能に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.25, No.59, pp.141-145, 2019
- 1-7) 岡部実, 他 4 名: スギ 5 層 5 プライ CLT パネルの面内せん断性能における強軸方向鉛直荷重の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.35-36, 2021
- 1-8) 吉原浩: 木材および木質材料のせん断特性の評価法, 材料, Vol.55, No.4, pp.349-355, 2006.4
- 1-9) Mehsam Tanzim Khan et al: A Review of the Methods for Predicting the Effective In-Plane Shear Modulus of Cross-Laminated Timber (CLT) , Hindawi, 2021
- 1-10) 吉原浩: 3 点曲げショートビームシア試験による中密度繊維板 (MDF) の層間せん断強さの測定および非対称 4 点曲げ試験で得られた結果との比較, 日本機械学会論文集 (A 編) , Vol.79, No.797, pp.105-109, 2013.1
- 1-11) Mario Jelec et al: Advancement in prediction of shear strength and stiffness of cross laminated timber beams, Engineering Structures, Vol.238, 2021
- 1-12) 井道裕史, 他 3 名: ラミナ構成の異なる集成材のせん断試験 破壊形態とせん断強度, 木材学会誌, Vol.55, No.5, pp.316-321, 2009
- 1-13) 森田秀樹, 他 3 名: 実大構造用木材のせん断試験法の開発, 木材学会誌, Vol.52, No.6, pp.376-382, 2006
- 1-14) 吉原浩, 他 1 名: 逆対称 4 点曲げ試験による木材のせん断強さの測定における支点および荷重点の位置の影響, 木材学会誌, Vol.66, No.4, pp.209-213, 2020
- 1-15) 岡部実, 他 2 名: スギ CLT パネル層内せん断耐力の推定, 木材学会誌, Vol.60, No.3, pp.169-176, 2014

- 1-16) 石原亘, 他 5 名: カラマツ及びトドマツ CLT の面外せん断強度 (第 1 報) 荷重方式及びスパン条件がせん断強度に与える影響, 木材学会誌, Vol.66, No.4, pp.214-224, 2020
- 1-17) 山形海斗: CLT の曲げ及びせん断性能に関する研究, 広島大学工学部第四類卒業研究, 2021
- 1-18) (公財) 日本住宅・木材技術センター: 構造用製材の強度試験マニュアル, 2011
- 1-19) 平成 28 年度 林野庁委託事業 都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及事業 (CLT 強度データ収集) 成果報告書
- 1-20) 野田康信, 他 4 名: CLT の面内せん断強度評価に関する研究 -45 度方向短柱圧縮せん断試験による検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.109-110, 2017
- 1-21) Reinhard Brandner et al: Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuration, properties and design, Construction and Building Materials Vol.147, pp.312-327,

【第 2 章】

- 2-1) Mehsam Tanzim Khan, Ying Hei Chui: PREDICTION OF IN-PLANE SHEAR MODULUS OF CLT FROM LAMINATE PROPERTIES, WCTE2021
- 2-2) Reinhard Brandner、他 5 名 : Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuration, properties and design, Construction and Building Materials, 147, pp312-327, 2017
- 2-3) 木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-, 日本建築学会, 2006
- 2-4) M.Flaig, 他 1 名 : Shear Strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane, proceedings of CIB-W18, 46-12-3, pp.1-14, 2013
- 2-5) (公財) 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016

【第 3 章】

- 3-1) (公財) 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016

【第 4 章】

- 4-1) (公財) 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016
- 4-2) 直交集成板の日本農林規格, 農林水産省告示第 3079 号

【第 5 章】

- 5-1) 中島昌一, 他 4 名: 実大水平載荷実験による CLT の幅方向のせん断強度の評価 樹種の違いが幅方向のせん断強度に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.760, pp.843-849, 2019
- 5-2) 中島昌一, 他 4 名: CLT の面内せん断性能に層構成とラミナ等級が与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.25-26, 2015

- 5-3) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所: 都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及事業 (CLT 強度データ収集) 成果報告書, 平成 29 年度 林野庁委託事業, 2018
- 5-4) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所: 都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及事業 (CLT 強度データ収集) 成果報告書, 平成 30 年度 林野庁委託事業, 2019
- 5-5) (公財) 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016
- 5-6) (公財) 日本住宅・木材技術センター: 構造用製材の強度試験マニュアル, 2011
- 5-7) 宮崎県木材利用技術センター: 宮崎県産スギを用いた新たな CLT の開発 実施報告書, 林野庁委託事業, 2016
- 5-8) 林知行, 他 1 名: スギ CLT (直交集成板) の実大試験 曲げ及びせん断強度に及ぼす試験体幅の寸法効果, 秋田県立大学ウェブジャーナル B, Vol.2, pp.138-143, 2015
- 5-9) 戸田正彦, 他 7 名: 国産材を用いた CLT の力学特性-その 2 層内せん断性能-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.315-316, 2014
- 5-10) 新藤健太, 他 4 名: CLT の面外方向加力におけるせん断性能 その 4 せん断スパン比の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.31-32, 2021
- 5-11) 繁田悠里亜: ねじ部深さの異なる木ねじを用いた集成材のめり込み補強効果, 広島大学工学部第四類卒業研究, 2020
- 5-12) 吉原浩: [±45]試験体の単軸引張試験による合板の面内せん断弾性係数の測定, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.77, No.776, pp.670-678, 2011
- 5-13) 桑村仁: 合板の面内挙動における異方弾性と強さ -鉄骨木質構造の研究 その 7-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.653, pp.1317-1326, 2010
- 5-14) 吉原浩: 切欠き試験体の非対称 4 点曲げ試験および単軸引張試験で得られた 5 プライ合板の面内せん断特性, 材料, Vol.59, No.4, pp.291-296, 2010
- 5-15) Mehsam Tanzim Khan, Ying Hei Chui: PREDICTION OF IN-PLANE SHEAR MODULUS OF CLT FROM LAMINATE PROPERTIES, WCTE2021
- 5-16) Reinhard Brandner、他 5 名: Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuration, properties and design, Construction and Building Materials, 147, pp312-327, 2017
- 5-17) Jonas Sharifi, 他 3 名: Diaphragm shear and diagonal compression testing of cross-laminated timber, SN Applied Sciences, Vol.3, No.842, 2021
- 5-18) 野田康信, 他 4 名: CLT の面内せん断強度評価に関する研究 -45 度方向短柱圧縮せん断試験による検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.109-110, 2017

【第6章】

- 6-1) 中島昌一, 他 4 名: 実大水平載荷実験による CLT の幅方向のせん断強度の評価 樹種の違いが幅方向のせん断強度に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.760, pp.843-849, 2019
- 6-2) 中島昌一, 他 4 名: CLT の面内せん断性能に層構成とラミナ等級が与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.25-26, 2015
- 6-3) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所: 都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及事業 (CLT 強度データ収集) 成果報告書, 平成 29 年度 林野庁委託事業, 2018
- 6-4) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所: 都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及事業 (CLT 強度データ収集) 成果報告書, 平成 30 年度 林野庁委託事業, 2019
- 6-5) (公財) 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, CLT 設計施工マニュアル編集委員会編, 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016
- 6-6) 中島昌一, 他 4 名: 簡易的な CLT の面内せん断強度の評価法の開発, 京都大学生存圏研究所生存圏シンポジウム木質材料実験棟令和 3 年度共同利用研究発表会, R3-WM-07, 2022