

修士論文

# LSB のねじ形状が引き抜き性能 に与える影響と推定式の提案

広島大学大学院

先進理工系科学研究科 建築学プログラム

建築構造力学研究室

M213283 坪井航輝

2023年2月





# 目次

第1章	序論.....	1
1.1.	研究の背景.....	2
1.2.	研究の目的・流れ.....	4
第2章	LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証.....	7
2.1.	はじめに.....	8
2.2.	試験体概要.....	9
2.3.	試験方法.....	12
2.4.	試験結果と考察.....	13
2.4.1.	破壊性状.....	13
2.4.2.	荷重-変位関係.....	14
2.4.3.	最大荷重の比較.....	18
2.5.	本章のまとめ.....	22
第3章	ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験.....	23
3.1.	はじめに.....	24
3.2.	試験体概要.....	25
3.3.	試験方法.....	27
3.4.	試験結果と考察.....	28
3.4.1.	破壊性状.....	28
3.4.2.	荷重-変位関係.....	32
3.4.3.	特性値の比較.....	36
3.5.	本章のまとめ.....	40
第4章	ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験.....	41
4.1.	はじめに.....	42
4.2.	試験体概要.....	43
4.3.	試験方法.....	45
4.4.	試験結果と考察.....	46
4.4.1.	破壊性状.....	46
4.4.2.	荷重-変位関係.....	48
4.4.3.	せん断強度の比較.....	50
4.5.	本章のまとめ.....	53
第5章	LSB推定式の提案.....	55
5.1.	はじめに.....	56
5.2.	推定値と実験値の比較.....	57
5.2.1.	LSB形状による比較.....	57
5.2.2.	埋め込み長さの違いによる比較.....	68
5.3.	本章のまとめ.....	69
第6章	LSB接合部の実大試験.....	71
6.1.	はじめに.....	72
6.2.	試験体概要.....	73

6.3.	試験方法 .....	77
6.4.	試験結果 .....	80
6.4.1.	各試験体のモーメントー荷重関係と破壊性状 .....	80
6.4.2.	特性値 .....	89
6.5.	特性値比較 .....	92
6.6.	計算値との比較 .....	97
6.6.1.	接合部性能の推定 .....	97
6.6.2.	梁材耐力の推定 .....	101
6.7.	本章のまとめ .....	103
第7章	結論 .....	105
7.1.	まとめと今後の提案 .....	106
	謝辞 .....	110
	参考文献 .....	111



# 第1章 序論

## 第1章 序論

### 1.1. 研究の背景

日本では、戦後に植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、木造率としての割合が低く、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た<sup>1)</sup>。この法律により、比較的規模の大きな3~4階ほどの木造の建築物（中大規模木造建築物）が建設されるようになってきた。この中大規模木造建築物には建築計画上、大空間・大開口を有する、写真1.1-1に示すようなラーメン構造が期待されている。ラーメン構造の柱梁接合部には高剛性かつ高耐力を有する接合具が必要である。

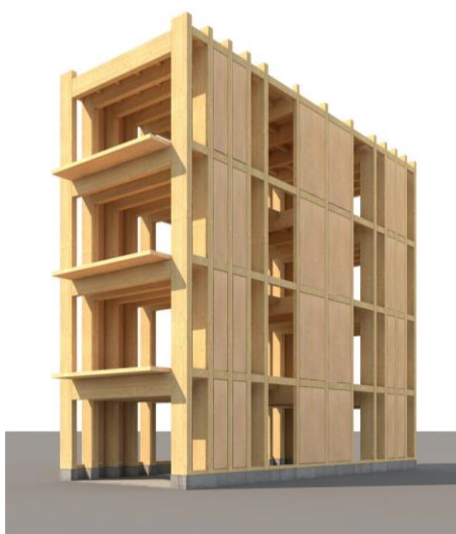


写真 1.1-1 目標とする中大規模木造建築物<sup>2)</sup>

その接合具の一つとして、ラグスクリューボルト（Lagscrewbolt、以下、LSB とする）が挙げられる。LSB は、木質構造接合部設計マニュアル<sup>3)</sup>によれば、「胴部のほぼ全長に渡ってラグスクリューに類似した雄ネジを加工し、端部にボルトと同じ雌ネジを内部に加工したもの、もしくはボルトと同じ雄ネジを外部に加工した複合型接合具である。基本的に、先穴を加工した集成材中にこの接合具をねじ込んで、その引き抜き抵抗に依存して、力を伝達することを意図した接合具である」と定義されている。そのため、LSB と木材が噛み合った状態となるため初期ガタが少なく、高剛性な接合部が実現可能であり、木質ラーメン構造の接合部として用いられることが多い。また LSB は、柱材や梁材への埋め込みを工場で済ませることができ、現場ではこれらを接合金物により接合するのみであるため施工性にも優れている。また、接合具（LSB）が埋設されるため、美観性に優れた接合部となる。LSB 接合部の設計法は、木質構造接合部設計マニュアル<sup>3)</sup>やラグスクリューボルト接合設計マニュアル<sup>4)</sup>にまとめられており、これらを参考にすることで設計に必要な最大耐力やすべり係数を求めることが可能である。しかしながら、これらの文献に基づき設計を行う場合、LSB の形状や木材の樹種・強度等級や断面の組み合わせ毎に写真1.1-2に示すような薄板試験が必要となり、実用性や合理性に欠けており実務的ではない。



## 第1章 序論

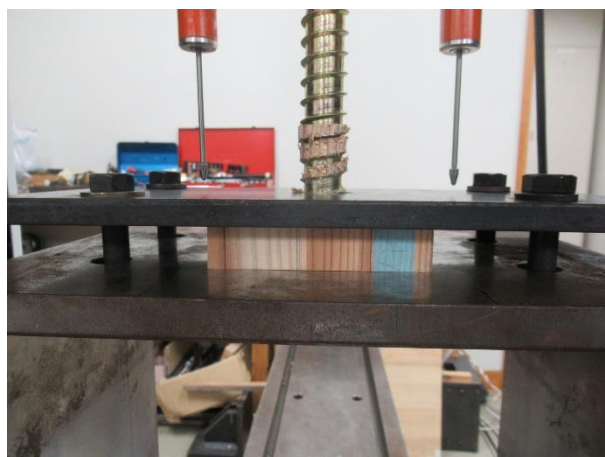


写真 1.1-2 薄板試験の様子

なお、LSB には JIS 等の統一的な規格が整備されていない。そのため、各メーカーや研究機関などが高い性能を有する LSB を開発されている段階であり、現在存在している LSB 形状は多岐にわたっている。そのため、LSB 形状を決定づけるボルト径やねじピッチ、ねじ角度の違いが引き抜き性能に及ぼす影響を明らかにすることが必要である。

また、LSB の埋め込み長さの違いによる検討も十分ではないのも現状である。中谷式は任意の LSB の形状や木材の樹種・強度等級や断面の組み合わせ毎に薄板試験を行い、式中のせん断強度  $f_v$  やせん断剛性係数  $\Gamma$  を求めることができれば、埋め込み長さが変わっても推定できる式となっている。しかし、LSB の埋め込み長さを複数のパラメータで実施された研究例は少ない。中谷式による最大耐力と埋め込み長さの関係は、比例関係ではなく、埋め込み長さが長くなるほど勾配が小さくなるような計算結果となるが、実験的な比較は 300mm 程度の埋め込み長さまでに限定されている。そのため、埋め込み長さが長くなると、実験値もそのような結果になるかどうかはわからない。実際に、既往の研究<sup>5)</sup>において実大規模の LSB 接合部を想定した検討として、LSB の埋め込み長さ 500mm の試験体による引き抜き試験が実施されており、この推定では、推定値が実験値を大きく下回っており、埋め込み長さが長いときの中谷式による実用性が懸念されている。

## 1.2. 研究の目的・流れ

本研究のフローを図 1.2-1 に示す。1.1 で述べたように LSB の課題点としては①統一的な規格が整備されておらず、性能が高い最適な LSB 形状が開発段階である点②性能の推定には薄板試験が必要である点、が挙げられる。本研究では、これら課題点を解決し LSB 設計法の効率化を目指すため、以下に示す実験や推定を実施した。

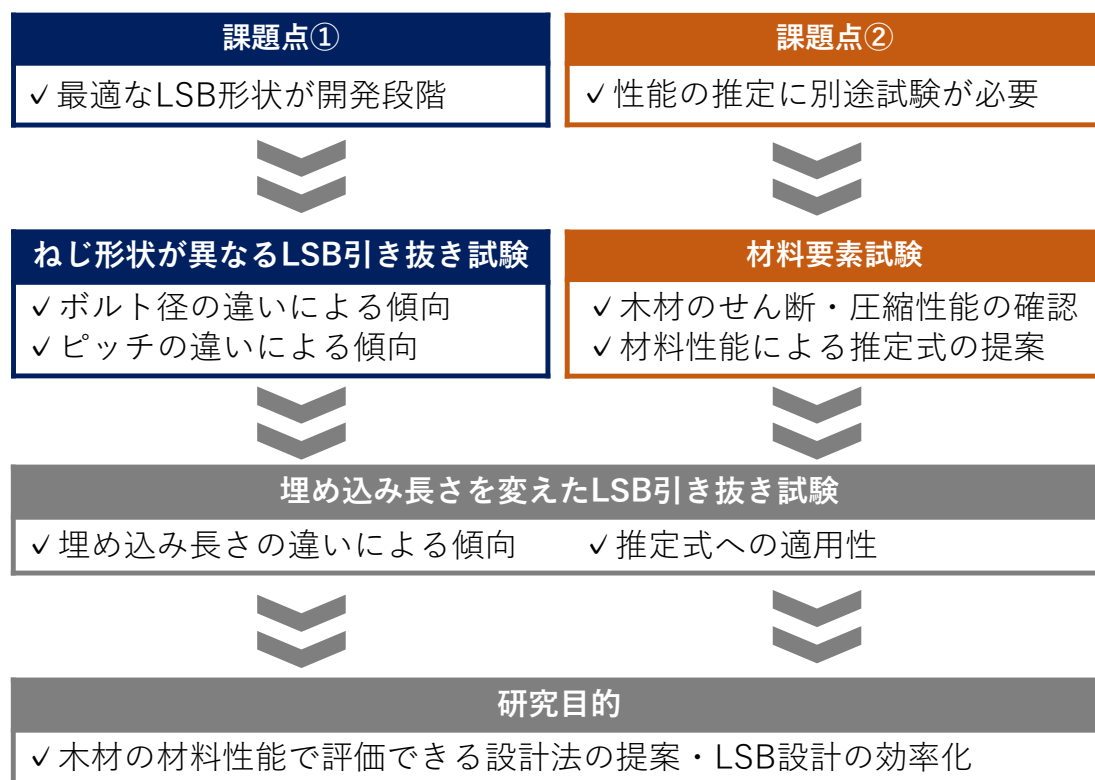


図 1.2-1 研究のフロー

課題点①に対して、2章においてボルト径やピッチなどのねじ形状を変えた LSB 引き抜き試験を行い、これらが引き抜き性能に与える影響について考察する。そして、課題点②について、性能の推定にはねじ形状ごとに薄板試験から求めた諸物性値が必要である点に対して、本研究ではねじ形状によらない推定式を提案する。今回は、赤松らの研究<sup>9)</sup>により提案されたタッピングインサートの引き抜き抵抗式を参考にした。赤松はねじ型接合部の引き抜き破壊は、図 1.2-2 および図 1.2-3 に示すようにねじ山にかかる木部が圧縮破壊、もしくはせん断破壊のいずれかにより起こると定義している。引き抜き荷重はこのねじ形状により求められるせん断面積、もしくは圧縮面積に材料強度を乗じることで推定できるとして以下の計算式を提案した。

第1章 序論

$$W_{\tau} = \left( l - \frac{p}{2} \right) \cdot \sqrt{c^2 + p^2} \cdot \tau \quad (1.2-1)$$

$$W_c = Xy = \frac{l(R-r)}{\cos \alpha} \cdot \frac{c^2 + p^2}{p \cdot c \sqrt{1 + \tan^2 \alpha \cdot \frac{c^2}{c^2 + p^2}}} \cdot \sigma_c \quad (1.2-2)$$

$l$  : 埋め込み長さ (mm)     $c = 2\pi R$

$p$  : ピッチ長さ (mm)     $\tau$  : せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)     $\tan \beta = p/c$

$R$  : 山径 (mm)     $r$  : 谷径 (mm)     $\alpha$  : ねじ山半角 (°)     $\sigma_c$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

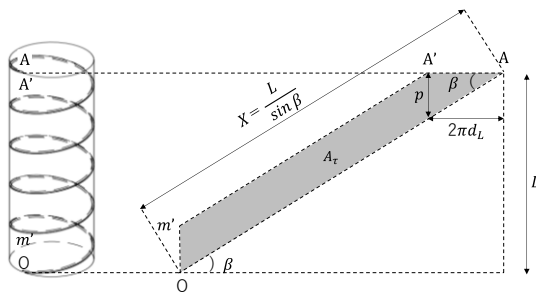


図 1.2-2 せん断面積の概略図

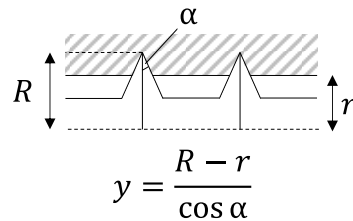


図 1.2-3 圧縮面積

ここで、式中の $\sigma_c$ については、第3章でねじ形状を模した圧縮要素試験により、 $\tau$ については第4章においてねじ形状を模したせん断要素試験により検討することとする。そして、第5章では、この推定方法と第3章と第4章の材料強度を用いた推定値と第2章の実験値を比較し、簡略的な推定式の提案を目指す。最後に第6章では、実大のLSB接合部の試験の実例の紹介とその解析方法に、第5章で提案した推定式を用いた検討結果を示す。第7章では、第1章～第6章を踏まえ得られた知見を述べる。

## 第1章 序論

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる 引き抜き性能の検証

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.1. はじめに

前述したように、LSBには様々なねじ形状が存在しており、JIS等の統一的な規格が整備されていない。そこで、LSBの形状や樹種、埋め込み長さを変えた試験体でLSBの引き抜き試験を行い、引き抜き性能に与える影響について検証する。本章では、その結果を報告する。

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.2. 試験体概要

試験に用いる LSB を図 2.2-1～図 2.2-4 に示す。使用する LSB は埋め込み長さ 100mm の試験体においては図 2.2-1～図 2.2-2 に示すようにボルト山径 (図中  $\phi$ ) が 21・23・25mm、ピッチは 6・8・10mm、ねじ角度を  $40^\circ$  とした組み合わせの 9 種類、および図 2.2-1・図 2.2-3 に示すようにボルト径が 25mm、ピッチが 6mm、ねじ角度  $37^\circ$  の計 10 種類とした。また、埋め込み長さの違いによる傾向を確認するために、埋め込み長さ 50・200・250・300mm で  $\phi 25P10D40$  の形状の LSB を用いた試験も行った。図 2.2-1 のねじ長さでは埋め込み長さ 200mm 以上の試験ができないため、図 2.2-4 の LSB を用いて行った。表 2.2-1 に試験体数一覧を示す。樹種はスギ同一等級集成材 E65-F255 (L70 指定) およびオウシュウアカマツ同一等級集成材 E95-F315 (L70 指定) を用いた。試験体数は各条件 6 体とし、ばらつきも考慮するため、この 6 体は別の集成材から採材した。

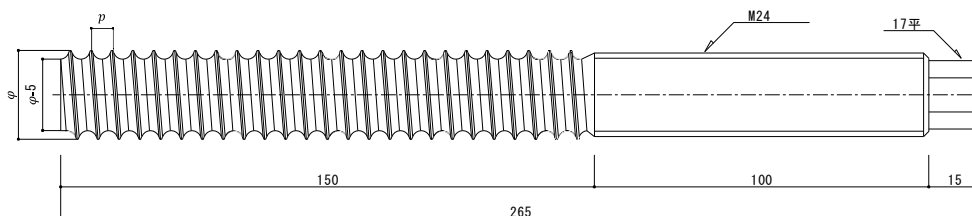


図 2.2-1 LSB 概略図 (ねじ長さ : 150mm)

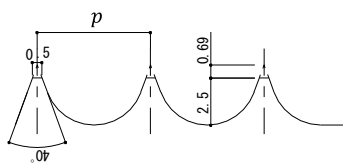


図 2.2-2 ねじ詳細 (ねじ角度 : 40 度)

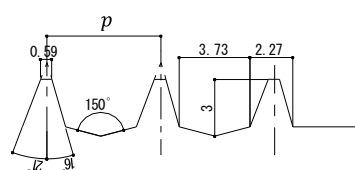


図 2.2-3 ねじ詳細 (ねじ角度 37 度)

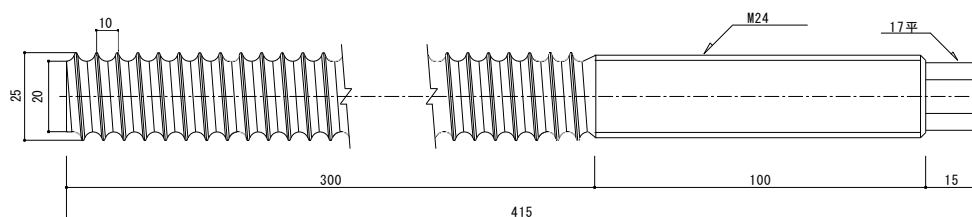


図 2.2-4 LSB 概略図 (ねじ長さ : 300mm)

第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

表 2.2-1 試験体数一覧およびLSB形状凡例

埋め込み長さ L (mm)	ボルト径 $\phi$ (mm)	ピッチ P(mm)	ねじ角度 D (°)	試験体数		
				SG	OA	
50	25	10	40	6	6	
100	21	6		6	6	
		8		6	6	
		10		6	6	
	23	6		6	6	
		8		6	6	
		10		6	6	
	25	6		37	0	6
				40	6	6
		8		40	6	6
				10	6	6
200	25	10		40	6	6
250	25	10		6	6	
300	25	10		6	6	

※SG：スギ、OA：オウシュウアカマツ

$\phi$ 21    P10    D40  
ボルト山径    ピッチ    ねじ角度



## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

図 2.2-5 に各試験体形状を示す。使用する集成材の断面は  $120 \times 120\text{mm}$  とし、LSB は断面中心部分に LSB の山径より  $2\text{mm}$  小さく、埋め込み長さよりも  $10\text{mm}$  長い先孔を加工し、挿入した。反力側について、埋め込み長さが  $50 \cdot 100 \cdot 200\text{mm}$  については試験体下部に  $\phi 22$  の丸孔を 2 か所開け、 $\phi 20$  の高力ボルトにより治具と緊結した。埋め込み長さが  $250 \cdot 300\text{mm}$  については、反力側に LSB を埋め込んだ。反力側の LSB は埋め込み長さ  $500\text{mm}$  とし、確実に試験側で破壊するようにした。

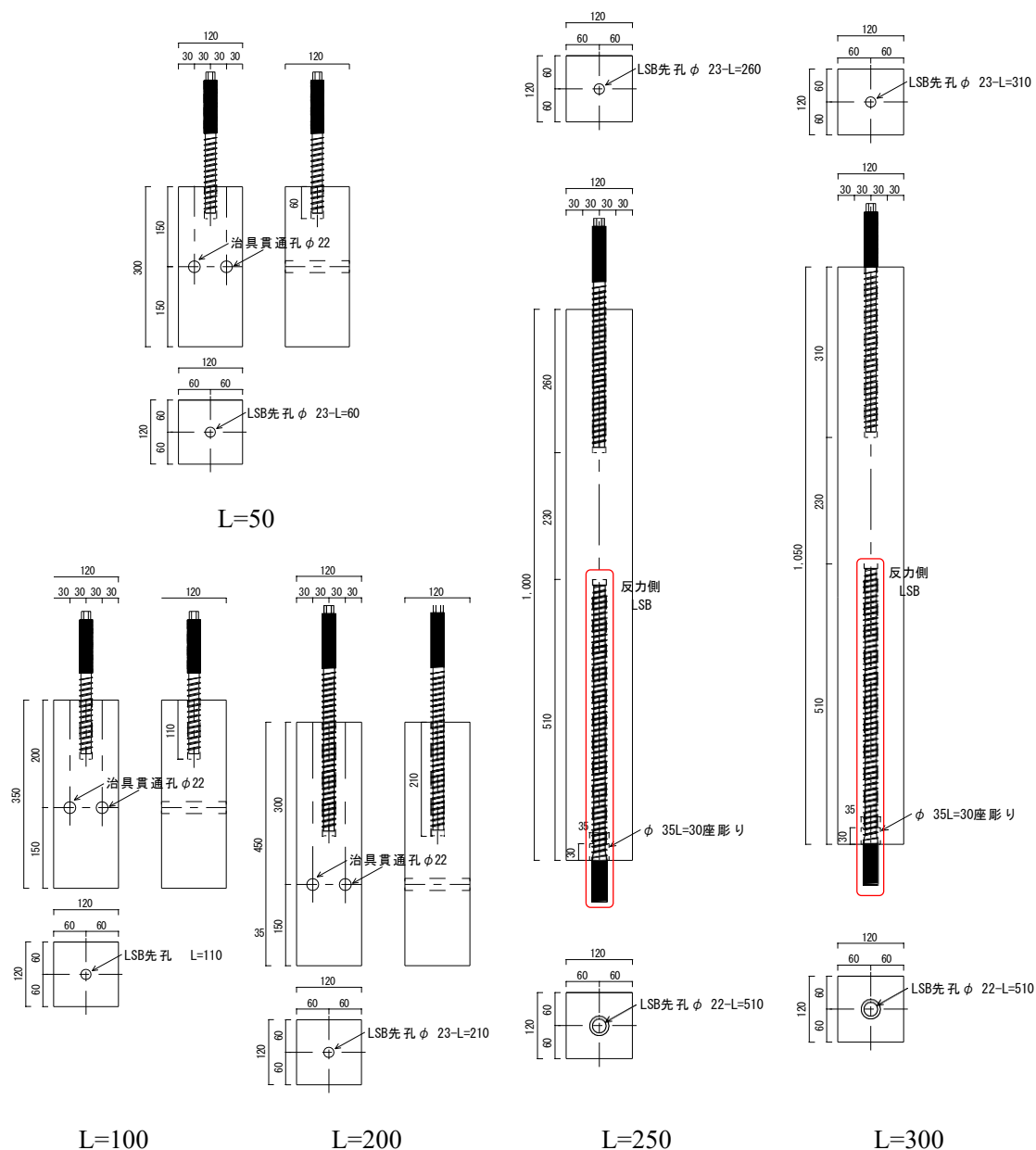


図 2.2-5 各試験体形状

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.3. 試験方法

試験体の設置の様子を写真 2.3-1 に示す。試験は L=50 および 100 については広島大学所有の材料試験機、L=200 については広島大学所有の 1000kN 万能試験機、L=250 および 300 については宮崎県木材利用技術センター所有の AUTOGRAPH AG-X plus 250kN で実施した。試験速度は 1.0mm/min で、単調引張試験とした。写真 2.3-2 に変位計の設置の様子を示す。LSB の引き抜き変形量は、L=50・100・200 については、木口面付近に 2 か所取り付けられた変位計 (CDP25 (東京測器)) と埋め込み長さ位置の側面に 2 か所取り付けられた変位計 (CDP25 (東京測器)) により計測した。なお、結果については木口面付近に取り付けた 2 つの変位計の平均値を用いた。L=250・300 については、木口面付近に 2 か所取り付けられた変位計 (CDP50 (東京測器)) で計測し、結果は 2 つの平均値を用いた。試験は最大荷重に達した後、最大荷重の 80%まで低下した時点で終了とした。



(i) L=50・100



(ii) L=200



(iii) L=250・300

写真 2.3-1 試験体設置の様子



(i) L=50・100・200 の変位計設置の様子



(ii) L=250・300 の変位計設置の様子

写真 2.3-2 変位計設置の様子

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.4. 試験結果と考察

#### 2.4.1. 破壊性状

写真 2.4.1-1～写真 2.4.1-4 に試験後の破壊の様子を示す。破壊性状は、LSB のねじ部にかかる木部がせん断破壊したことによる引き抜け破壊と LSB から材端にかけて生じる割裂破壊の 2 つであった。表 2.4.1-1、表 2.4.1-2 に各破壊性状の試験体数を示す。スギについては、L=50・100 では引き抜け破壊のみであったが、L=200・250 ではいくつか割裂破壊が生じた。L=300 については全ての試験体で割裂破壊となった。オウシュウアカマツについては L=50・100・200 では全ての試験体で引き抜け破壊のみであったが、L=250・300 では、それぞれ各 1 体が割裂破壊となった。



写真 2.4.1-1 スギ：引き抜け破壊

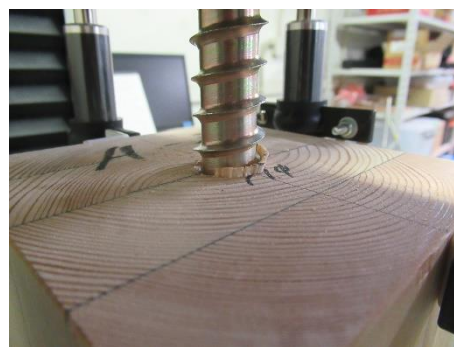


写真 2.4.1-2 オウシュウアカマツ  
：引き抜け破壊

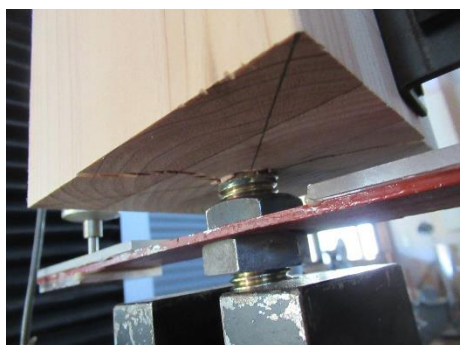


写真 2.4.1-1 スギ：割裂破壊



写真 2.4.1-2 オウシュウアカマツ  
：割裂破壊

表 2.4.1-1 スギにおける  
各破壊性状の試験体数

L (mm)	引き抜け破壊	割裂破壊
50	6	0
100	54	0
200	5	1
250	3	3
300	0	6

表 2.4.1-2 オウシュウアカマツにおける  
各破壊性状の試験体数

L (mm)	引き抜け破壊	割裂破壊
50	6	0
100	60	0
200	6	0
250	5	1
300	5	1

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.4.2. 荷重-変位関係

#### (1) スギ

・L=100：各 LSB 形状

図 2.4.2-1 に各 LSB 形状による荷重-変位関係を示す。全ての試験体で、引き抜け破壊となり、最大荷重到達後、徐々に荷重が低下した。なお、同じ LSB 径でピッチの違いで比較すると、P6 では最大荷重到達後の荷重低下が大きいことに対し、P10 では最大荷重到達後の荷重低下が緩やかであった。

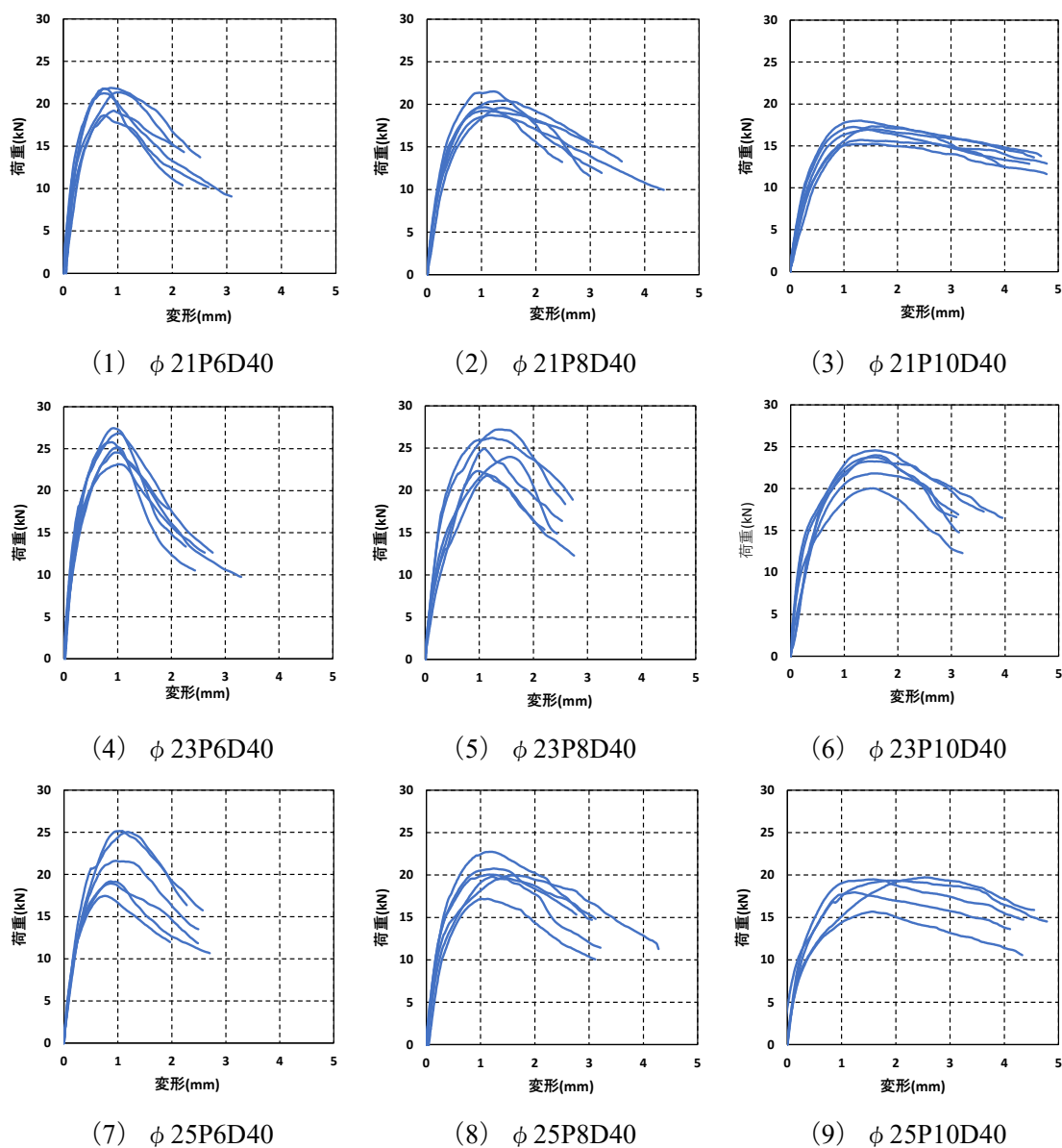


図 2.4.2-1 スギ-LSB 形状ごとの荷重-変位関係

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### ・埋め込み長さ

図 2.4.2-2 に各埋め込み長さによる荷重-変位関係を示す。L=50・200 はほとんどの試験体で引き抜け破壊となり、最大荷重到達後、徐々に荷重が低下した。L=250・300 は割裂破壊を伴う試験体が多く、最大荷重到達後急激に荷重が低下した。

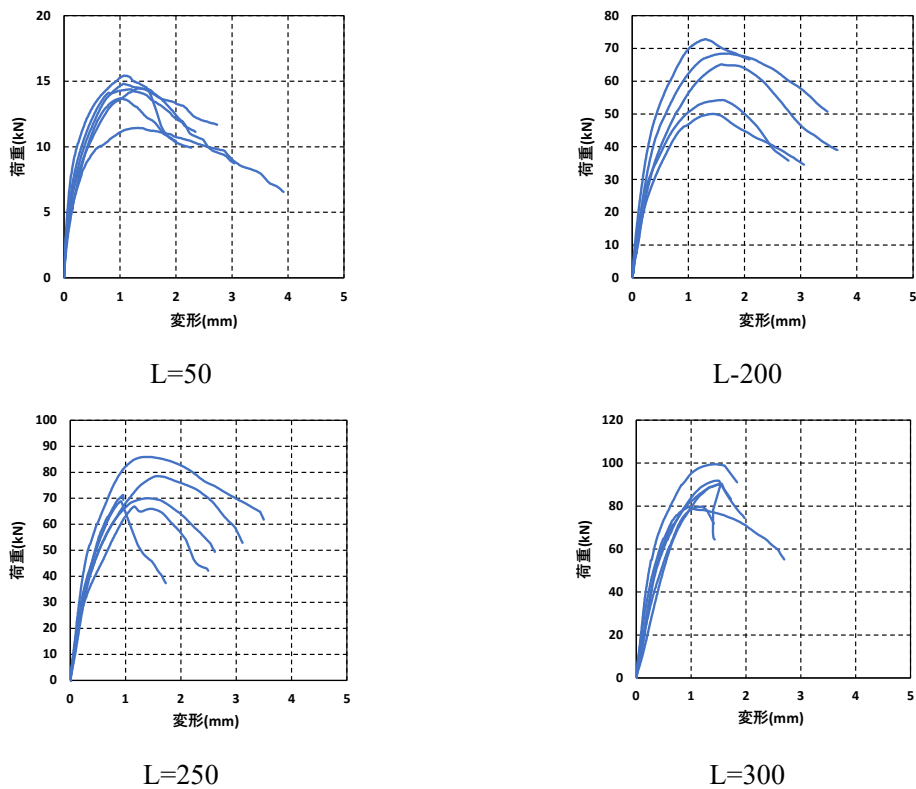


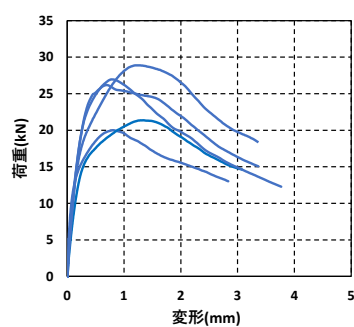
図 2.4.2-2 スギ埋め込み長さごとの荷重-変位関係

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

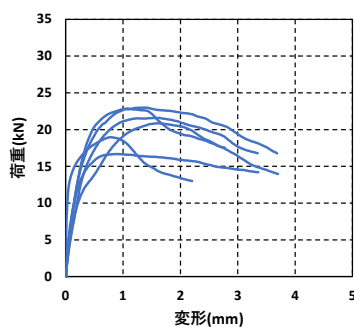
### (1) オウシュウアカマツ

・L=100：各LSB形状

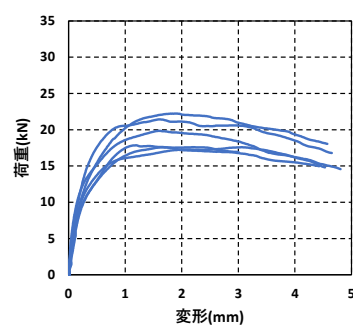
図2.4.2-3に各LSB形状による荷重-変位関係を示す。全ての試験体で、引き抜け破壊となり、最大荷重到達後、徐々に荷重が低下した。なお、同じLSB径でピッチの違いで比較すると、P6では最大荷重到達後の荷重低下が大きいことに対し、P10では最大荷重到達後の荷重低下が緩やかであった。



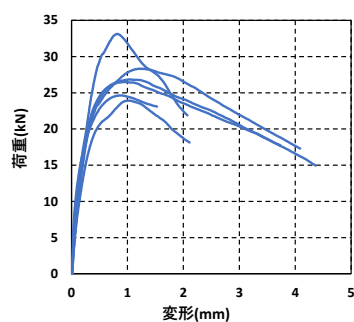
(1) φ21P6D40



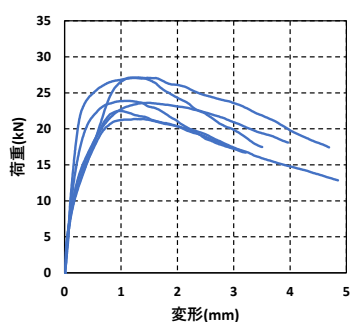
(2) φ21P8D40



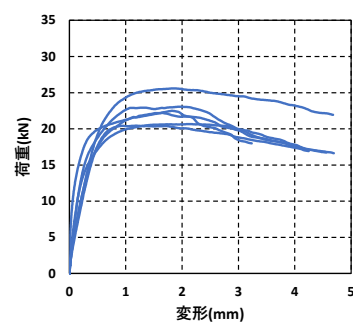
(3) φ21P10D40



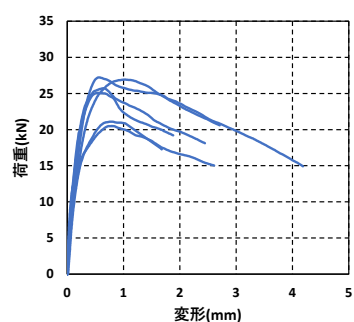
(4) φ23P6D40



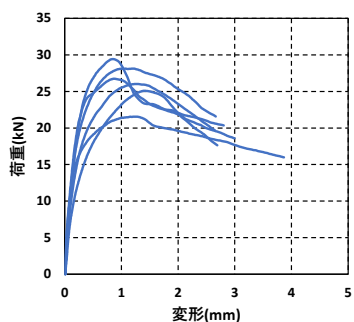
(5) φ23P8D40



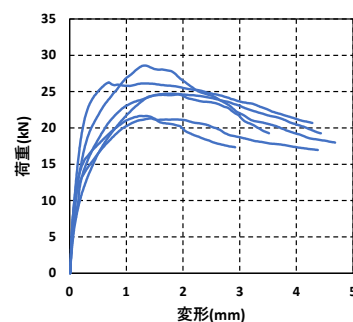
(6) φ23P10D40



(7) φ25P6D40



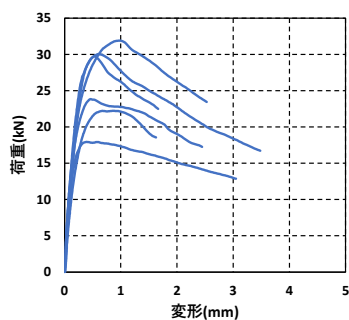
(8) φ25P8D40



(9) φ25P10D40



## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

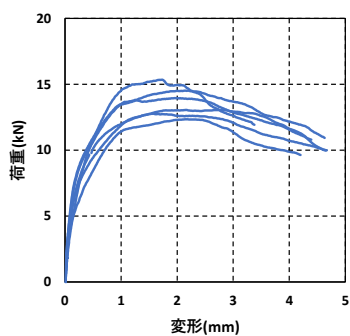


(10) φ25P6D37

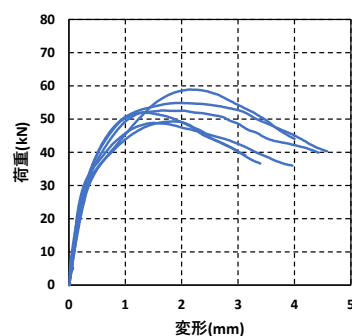
図 2.4.2-3 オウシュウアカマツ-LSB 形状ごとの荷重-変位関係

### ・埋め込み長さ

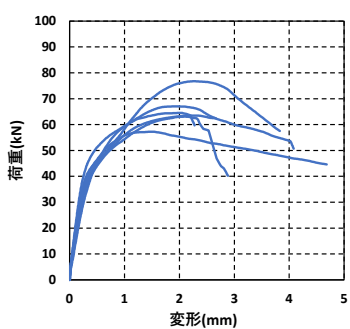
図 2.4.2-4 に各埋め込み長さによる荷重-変位関係を示す。ほとんどの試験体で、引き抜け破壊となり、最大荷重到達後、徐々に荷重が低下した。割裂破壊を伴う試験体については、最大荷重到達後急激に荷重が低下した。なお、使用した LSB が P10 であったので最大荷重到達後の荷重低下は緩やかであった。



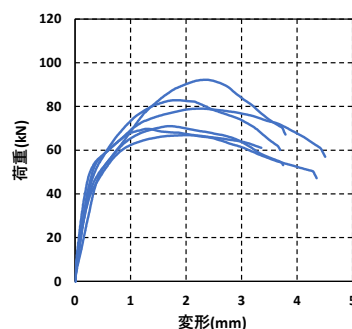
L=50



L=200



L=250



L=300

図 2.4.2-4 オウシュウアカマツ-埋め込み長さごとの荷重-変位関係

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.4.3. 最大荷重の比較

#### (1) スギ

##### ・LSB形状による比較（ピッチの違い）

図 2.4.3-1 にスギにおける、同一 LSB 径でのピッチによる比較を示す。どの LSB 径においても、最大荷重に大きな差はないものの、ピッチが小さいほど、最大荷重は大きくなることを確認できた。

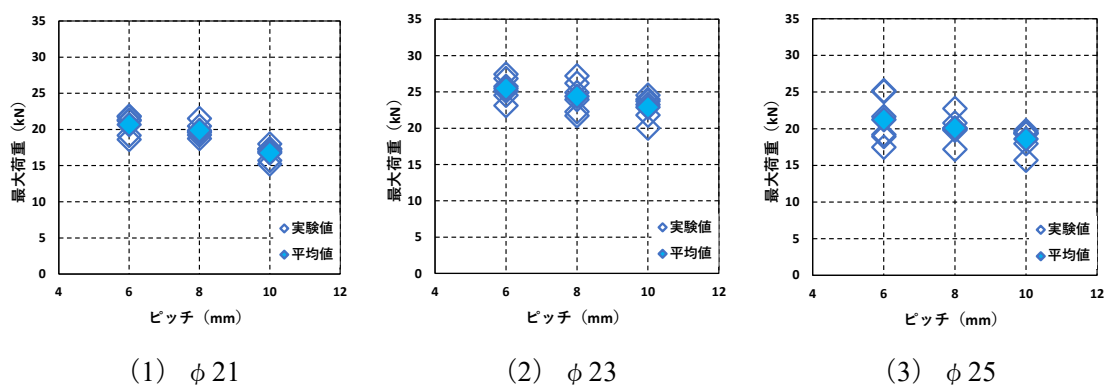


図 2.4.3-1 スギ-ピッチによる比較

##### ・LSB形状による比較（ボルト径の違い）

図 2.4.3-2 にスギにおける、同一ピッチでのボルト径による比較を示す。どのピッチにおいても、φ23 が一番高く、その次にφ21とφ25が同等の値となった。

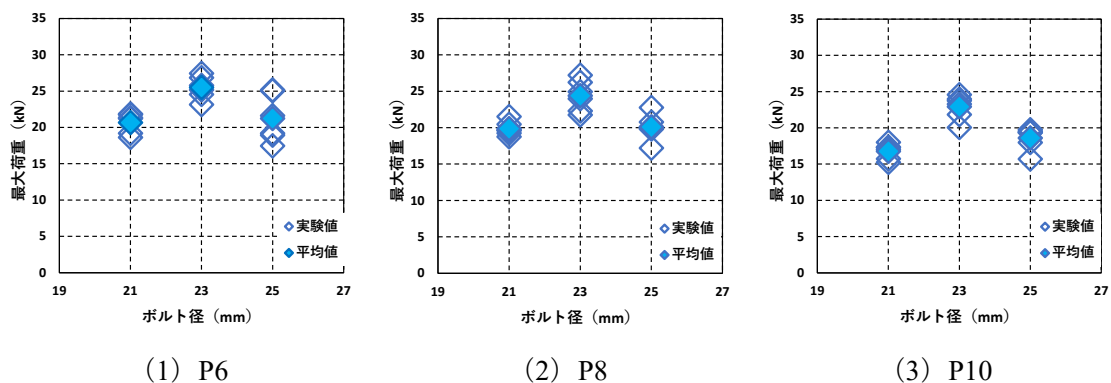


図 2.4.3-2 スギ-ボルト径による比較



## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### ・埋め込み長さによる比較

図 2.4.3-3 にスギにおける埋め込み長さの違いによる最大荷重の分布を示す。おおむね埋め込み長さに比例して、最大荷重が増加することを確認できた。ただ、埋め込み長さ 100mm については埋め込み長さ 50mm での平均値と大きく変わらず、単位埋め込み長さとする、他の埋め込み長さよりも低い値となった。

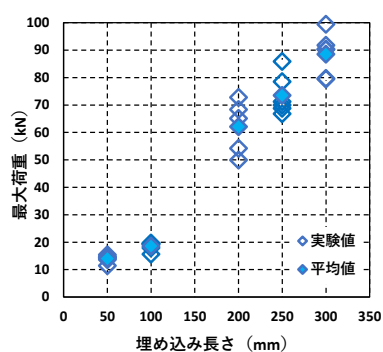
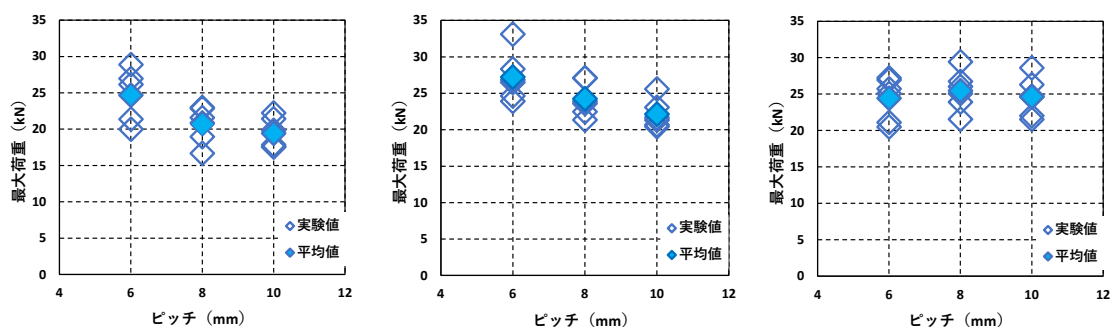


図 2.4.3-3 スギ-埋め込み長さによる比較

### (2) オウシュウアカマツ

#### ・LSB 形状による比較 (ピッチの違い)

図 2.4.3-4 にオウシュウアカマツにおける、同一 LSB 径でのピッチによる比較を示す。 $\phi 21$  と  $\phi 23$  においては、最大荷重に大きな差はないものの、ピッチが小さいほど、最大荷重は大きくなることを確認できた。 $\phi 25$  においては、ピッチの大小にかかわらず、同じ値となった。



(1)  $\phi 21$

(2)  $\phi 23$

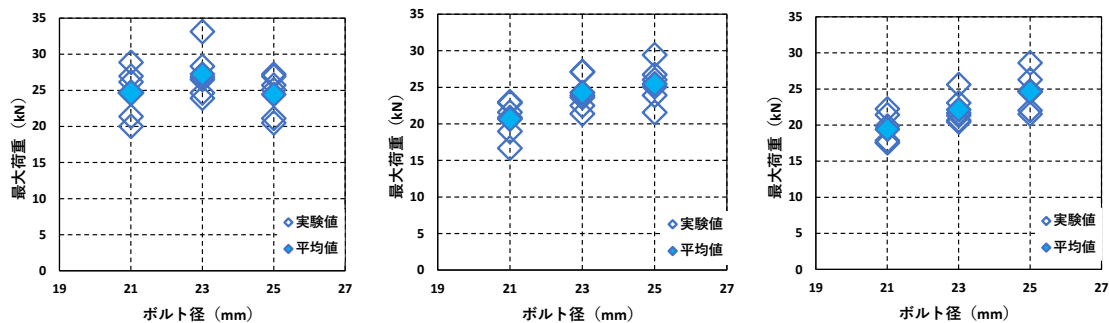
(3)  $\phi 25$

図 2.4.3-4 オウシュウアカマツ-ピッチによる比較

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### ・ LSB 形状による比較（ボルト径の違い）

図 2.4.3-5 にオウシュウアカマツにおける、同一ピッチでのボルト径による比較を示す。P6 においては、 $\phi 23$  が一番高く、その次に  $\phi 21$  と  $\phi 25$  が同等の値となった。P8 と P10 においては、ボルト径が大きいほど最大荷重は高い値となった。



(1) P6

(2) P8

(3) P10

図 2.4.3-5 オウシュウアカマツ-ボルト径による比較

### ・ LSB 形状による比較（ねじ角度）

図 2.4.3-6 にオウシュウアカマツにおける、ねじ角度による比較を示す。ねじ角度  $37^\circ$  が  $40^\circ$  に比べ高い値となった。なお、 $37^\circ$  は  $40^\circ$  に比べ、ばらつきが大きいことを確認した。

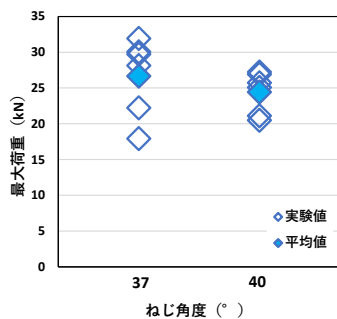


図 2.4.3-6 オウシュウアカマツ-ねじ角度による比較

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### ・埋め込み長さによる比較

図 2.4.3-7 にオウシュウアカマツにおける埋め込み長さの違いによる最大荷重の分布を示す。おおむね埋め込み長さに比例して、最大荷重が増加することを確認できた。また、埋め込み長さが大きくなるほど、ばらつきが大きくなることを確認した。

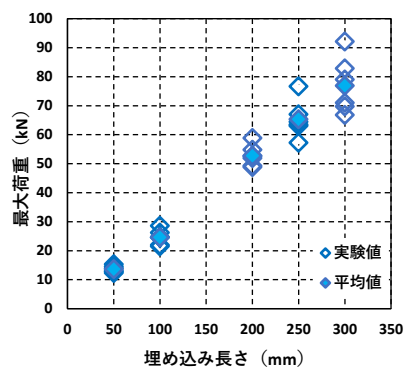


図 2.4.3-7 オウシュウアカマツ-埋め込み長さによる比較

## 第2章 LSBねじ形状の違いによる引き抜き性能の検証

### 2.5. 本章のまとめ

本章では、LSBの形状や樹種、埋め込み長さを変えた試験体でLSBの引き抜き試験を行い、引き抜き性能に与える影響について検証した。

LSBのピッチの違いによる比較では、最大荷重に大きな差はないものの、多くの条件でピッチが小さいほど、最大荷重が大きくなることを確認した。また、LSBのボルト径による比較に関しては、多くの条件でφ23が一番高く、その次にφ21とφ25が同等の値となった。オウシュウアカマツにおけるねじ角度の違いによる比較においては、ねじ角度37°が40°に比べ高い値となった。また、37°は40°に比べ、ばらつきが大きいことを確認した。

埋め込み長さの違いによる比較においては、スギ・オウシュウアカマツの試験体ともにおおむね埋め込み長さに比例して、最大荷重が増加することを確認した。また、埋め込み長さが大きくなるほど、ばらつきが大きくなった。

以上の結果より、LSBの形状において、両樹種ともにボルト径の大小についての傾向はみられなかったものの、ピッチについては小さいほど高い値を示すこと、ねじ角度が小さいほど高い値を示し、ねじ形状の違いにより引き抜き性能に影響を及ぼすことが分かった。また、埋め込み長さとは最大荷重は比例の関係であったため、任意の埋め込み長さで推定できれば、他の埋め込み長さでも容易に推定できることが予想される。3章・4章では、本章で用いた試験体から要素試験体を採材し、材料性能を確認する。

## 第3章 ねじ角度を想定した 傾斜加力面における縦圧縮試験

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### 3.1. はじめに

1.2 において、ねじ形状によらない推定式を紹介した。この推定式では、引き抜き荷重を材料強度により求める必要がある。本章では、圧縮式における圧縮強度 $\sigma_c$ を前章の引き抜き試験で用いた木材から採材した試験体より求める。図 3.1-1 に LSB のねじ部にかかる木部が圧縮力を受けている様子を示す。図のようにねじ部にかかる木部は LSB ねじ部の角度分傾斜した状態であり、それにより一般的に用いられる縦圧縮強度とは異なる値となる可能性がある。そこで、本章では、一般的に試験として行われている縦圧縮試験に加え、実際に LSB ねじ部にかかる木部の傾斜を想定した、傾斜加力面における試験体を併せて行い、ねじ角度の大きさが圧縮性能に及ぼす影響について確認する。

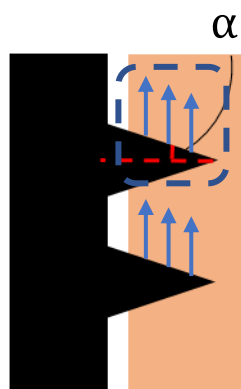


図 3.1-1 ねじ部にかかる木部が圧縮力を受けている様子

### 3.2. 試験体概要

本試験で用いた試験体を図 3.2-1～図 3.2-4 に示す。試験体は、前章で用いた LSB 引き抜き試験体の健全な部分から採材した。縦圧縮試験体は、図 3.2-2 のように、 $20 \times 20 \times 80\text{mm}$  の直方体を切り出し、それに傾斜角度 $\alpha$ つけて 2 つにした。加力面に傾斜を施した試験体の傾斜角度は  $15^\circ$ 、 $18.5^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $22.5^\circ$  の 4 つのパラメータで実施した。繊維方向は表 3.2-1 の試験体数一覧に示すように追い柵と柵目の 2 種類となるようにし、傾斜加力面を施した試験体については、傾斜の方向が TL 方向もしくは LR 方向の 2 種類となるようにした。また、ハンキンソン式の分布と比較するため、図 3.2-3 のように横圧縮の試験体も実施した。試験体は、図 3.2-4 のように柵目、板目、追い柵の 3 つの繊維方向となるようにした。

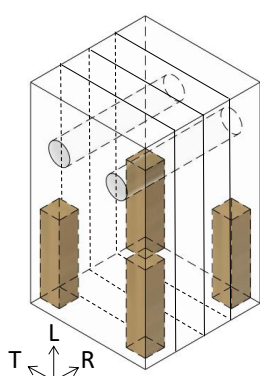


図 3.2-1 縦圧縮試験体の採材の様子

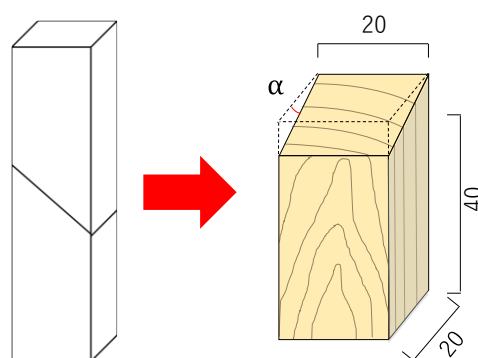


図 3.2-2 傾斜加力面試験体の採材

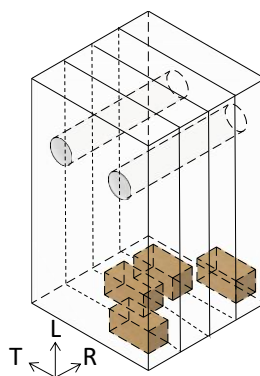


図 3.2-3 横圧縮試験体の採材の様子

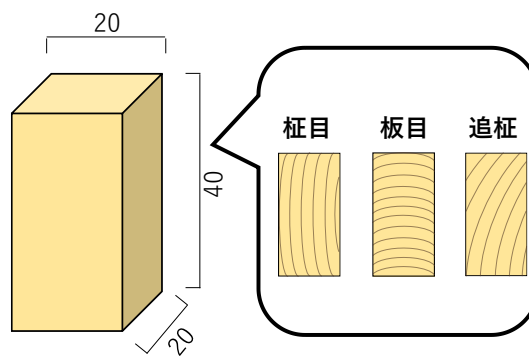


図 3.2-4 横圧縮試験体の採材

第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

表 3.2-1 試験体数一覧

	傾斜角度	繊維方向	SG		OA	
	$\alpha$ (°)		TL	LR	TL	LR
縦圧縮	0	追証	48		48	
		証目	8		8	
	15	追証	16	16	16	16
		証目	8	8	2	3
	18.5	追証	16	18	15	14
		証目	4	4	8	4
	20	追証	25	20	20	14
		証目	6	6	4	2
	22.5	追証	9	7	12	11
		証目	5	2	6	7
横圧縮	90	追証	13		13	
		証目	12		12	
		板目	6		6	



### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### 3.3. 試験方法

写真 3.3-1 と写真 3.3-2 に試験の様子を示す。写真 3.3-1 は傾斜加力面での実験の様子、写真 3.3-2 は縦圧縮試験の様子を示している。変位は、ヘッドの変位を CDP-25MT（東京測器）を用いて2か所計測しており、実験結果はこの2か所の変位計の値の平均値とした。加力速度は 0.5mm/min とし、最大荷重到達後 80%に荷重が下がるか、変位が 3mm 付近になるまで載荷した。



写真 3.3-1 傾斜加力面での実験の様子



写真 3.3-2 縦圧縮試験の様子

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

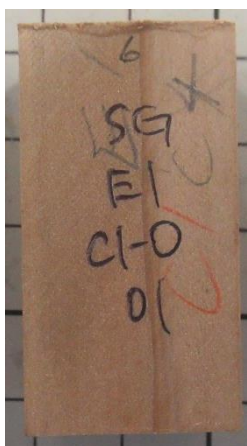
#### 3.4. 試験結果と考察

##### 3.4.1. 破壊性状

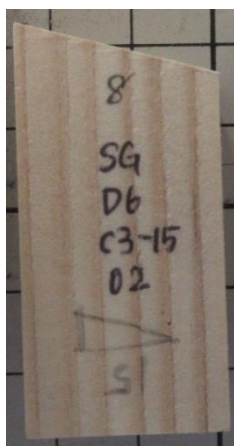
###### (1) スギ

###### ・縦圧縮試験

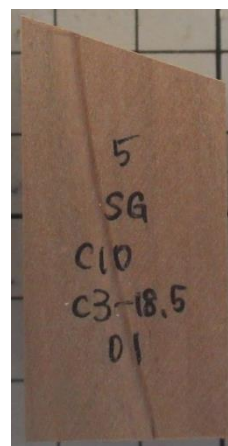
写真3.4.1にスギにおける縦圧縮試験の代表的な破壊性状を示す。どの条件においても、加力面もしくは試験体下端に圧縮もめがあったがそれ以外の部分では特に大きな損傷はなかった。ただ、傾斜角度  $22.5^\circ$  の試験体においては横方向移動を防ぐ治具沿いに向けて、しわができた試験体も見られた。



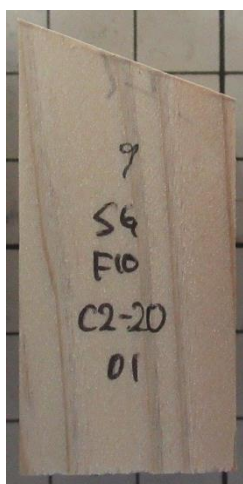
(1)  $0^\circ$



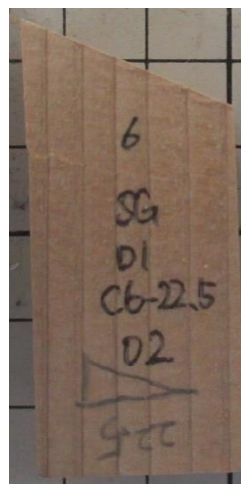
(2)  $15^\circ$



(3)  $18.5^\circ$



(4)  $20^\circ$



(5)  $22.5^\circ$

写真 3. 4. 1-1 スギにおける縦圧縮試験の代表的な破壊性状

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### ・横圧縮試験

写真 3.4.1-2 にスギにおける横圧縮試験の代表的な試験後の様子を示す。柎目は、加力後座屈のように反るような変形、追い柎は試験体下部に大きな変形、板目は横ずれのような変形がみられ、繊維方向の違いで変形の様子が異なった。



(1) 柎目

(2) 追い柎

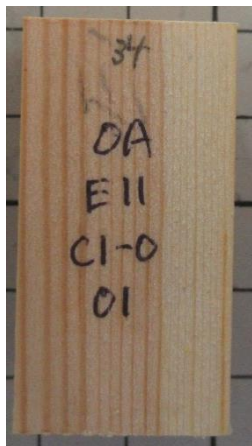
(3) 板目

写真 3. 4. 1-2 スギにおける横圧縮試験の代表的な試験後の様子

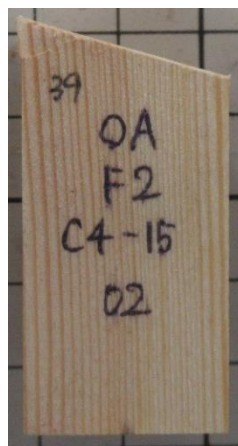
### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### (2) オウシュウアカマツ

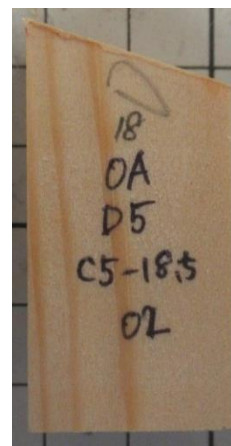
写真3.4.1-3にスギにおける縦圧縮試験の代表的な破壊性状を示す。傾斜角度 $0^\circ$ 試験体は、加力面もしくは試験体下端に圧縮もめがあったがそれ以外の試験体は横方向移動を防ぐ治具沿いに向けて、しわができた試験体が多数存在した。



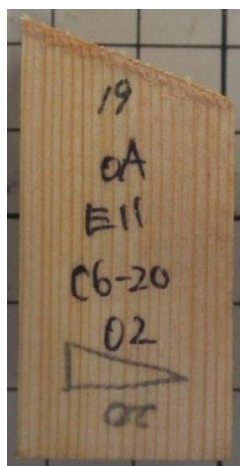
(1)  $0^\circ$



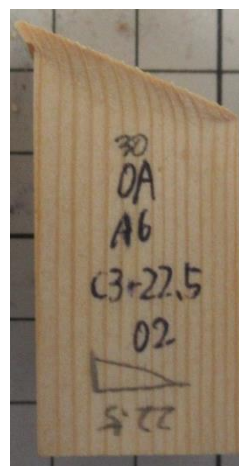
(2)  $15^\circ$



(3)  $18.5^\circ$



(4)  $20^\circ$



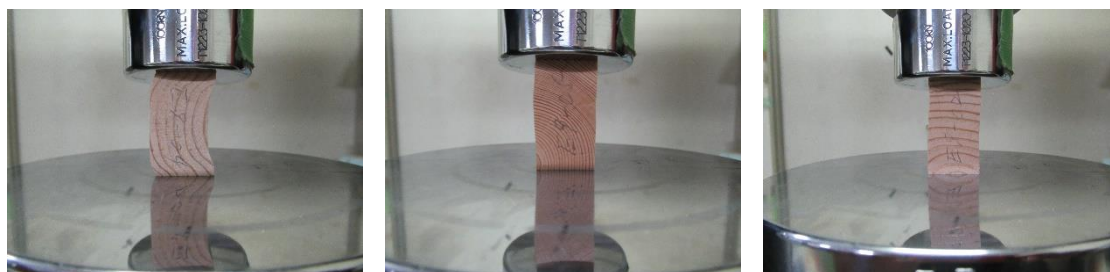
(5)  $22.5^\circ$

写真3.4.1-3 オウシュウアカマツにおける縦圧縮試験の代表的な破壊性状

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### ・横圧縮試験

写真3.4.1-4にスギにおける横圧縮試験の代表的な試験後の様子を示す。柾目は、加力後座屈のように反るような変形、追い柾は試験体下部に大きな変形、板目は横ずれのような変形がみられ、繊維方向の違いで変形の様子が異なった。



(1) 柾目

(2) 追い柾

(3) 板目

写真3.4.1-4 オウシュウアカマツにおける横圧縮試験の代表的な試験後の様子

### 3.4.2. 荷重-変位関係

(1) スギ

・縦圧縮試験

図3.4.2-1に、スギにおける縦圧縮試験の荷重-変位関係を示す。傾斜角度によらず、0.5mm付近で最大荷重に達し、その後、多少荷重は下がるものの、一定の値を保ちながら変形が進んだ。なお、傾斜角度が大きくなると、横方向分力による変形も見られたため、初期勾配のばらつきが大きくなることを確認した。

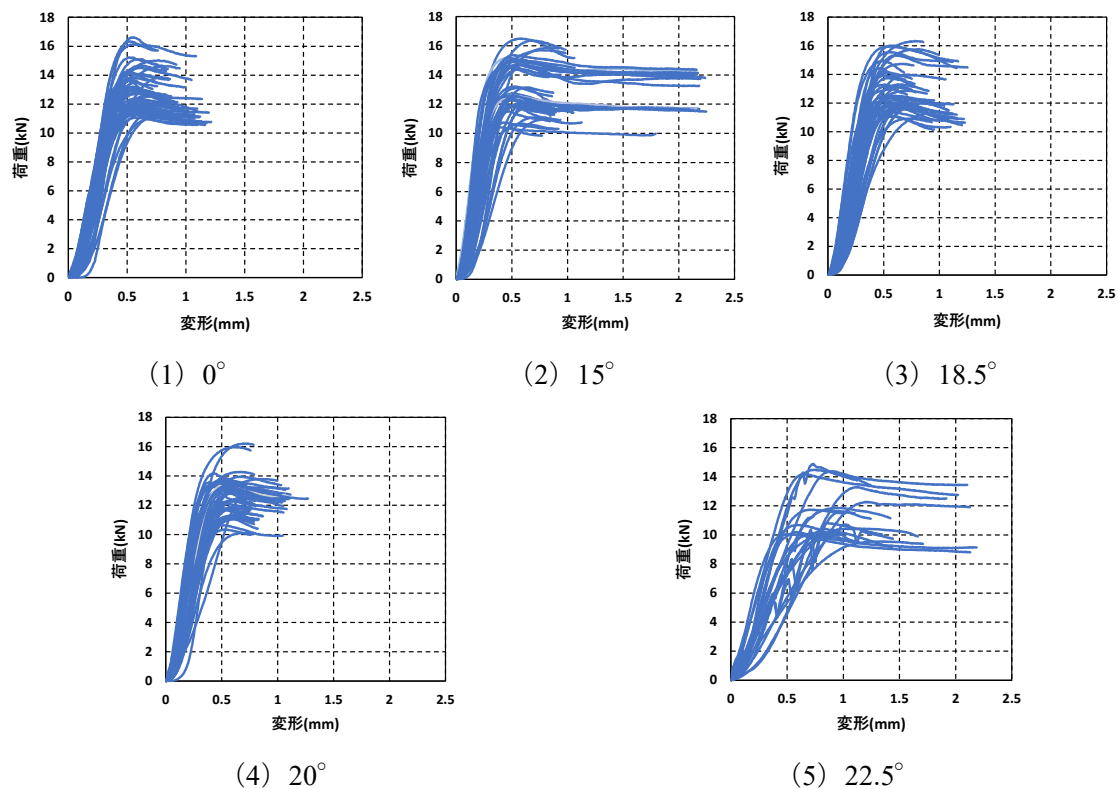


図 3. 4. 2-1 スギにおける縦圧縮試験の荷重-変位関係



### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### ・横圧縮試験

図 3.4.2-2 にスギにおける横圧縮試験の荷重-変位関係を示す。柵目では最大荷重到達後に、変形しながら緩やかに荷重が下がった。追い柵は、降伏荷重に達した後、変形しながら緩やかに荷重が増加した。板目は降伏荷重到達後、荷重の上昇と下降を繰り返しながら、荷重が増加した。

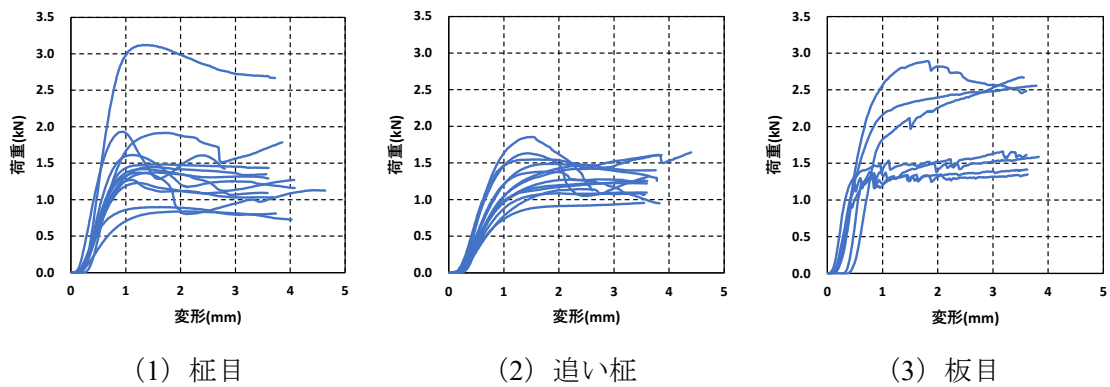


図 3.4.2-2 スギにおける横圧縮試験の荷重-変位関係

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### (2) オウシュウアカマツ

##### ・縦圧縮試験

図 3.4.2-3 に、オウシュウアカマツにおける縦圧縮試験の荷重-変位関係を示す。傾斜角度によらず、0.5mm 付近で最大荷重に達し、その後、多少荷重は下がるものの、一定の値を保ちながら変形が進んだ。なお、傾斜角度が大きくなると、横方向分力による変形も見られたため、初期勾配のばらつきが大きくなることを確認した。

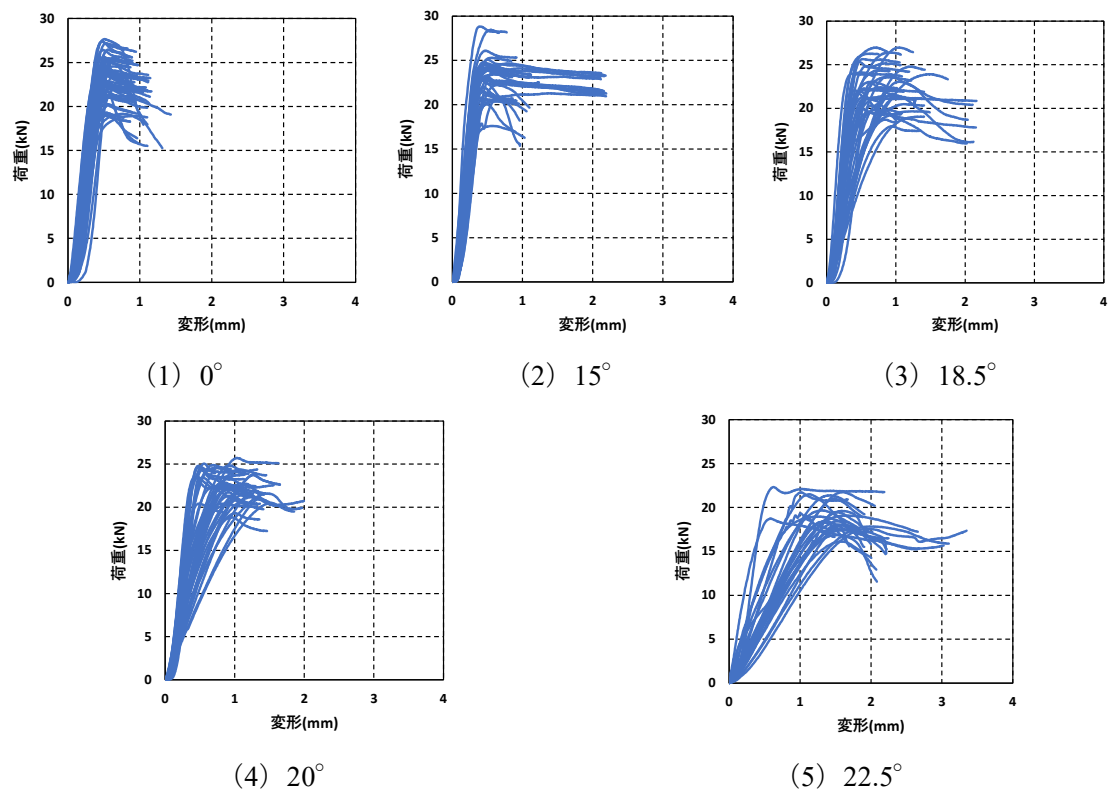


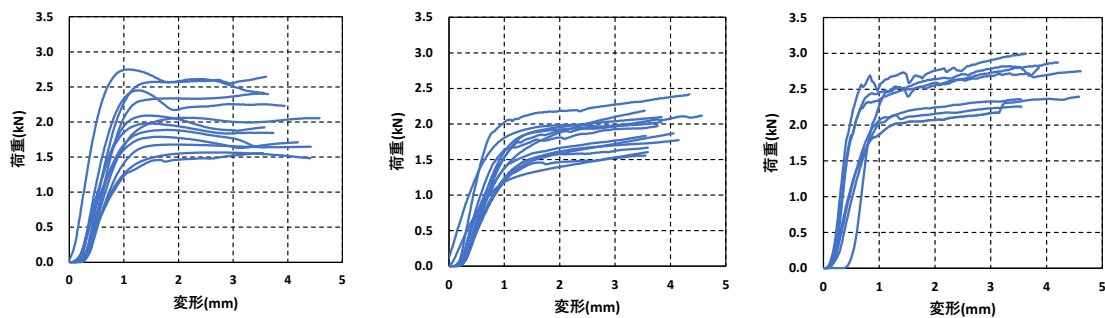
図 3.4.2-3 オウシュウアカマツにおける縦圧縮試験の荷重-変位関係



### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### ・横圧縮試験

図 3.4.2-4 にオウシュウアカマツにおける横圧縮試験の荷重-変位関係を示す。柁目では最大荷重到達後に、変形しながら緩やかに荷重が下がった。追い柁は、降伏荷重に達した後、変形しながら緩やかに荷重が増加した。板目は降伏荷重到達後、荷重の上昇と下降を繰り返しながら、荷重が増加した。



(1) 柁目

(2) 追い柁

(3) 板目

図 3.4.2-4 オウシュウアカマツにおける横圧縮試験の荷重-変位関係

### 3.4.3. 特性値の比較

#### (1) スギ

##### ①縦圧縮試験の最大荷重

図 3.4.3-1 にスギにおける縦圧縮試験の最大荷重の分布を示す。分布をみると、角度 0° から 18.5° まで一定の値となったが、角度 20° 以降は多少低下した。

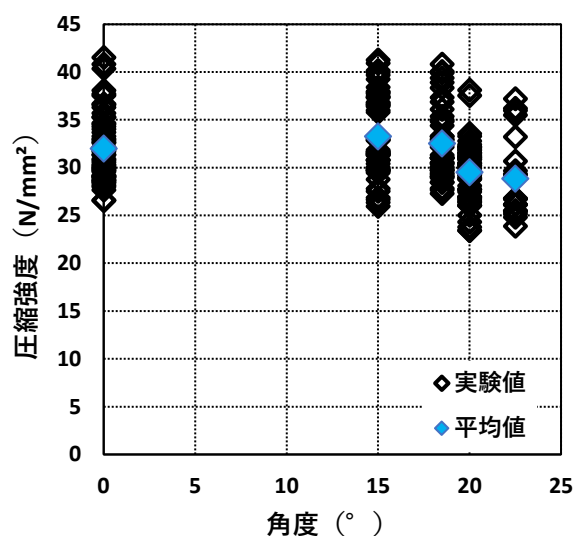


図 3.4.3-1 スギにおける縦圧縮試験の最大荷重の分布

##### ②横圧縮試験の降伏荷重

図 3.4.3-2 にスギにおける横圧縮試験の降伏荷重の分布を示す。横圧縮試験は明確な最大荷重がない試験体があったため、降伏荷重で比較する。降伏荷重は追い桎が一番低くその次に、桎目、板目の順となった。また、桎目面は3つの繊維方向の中で一番ばらつきが大きいことが分かった。

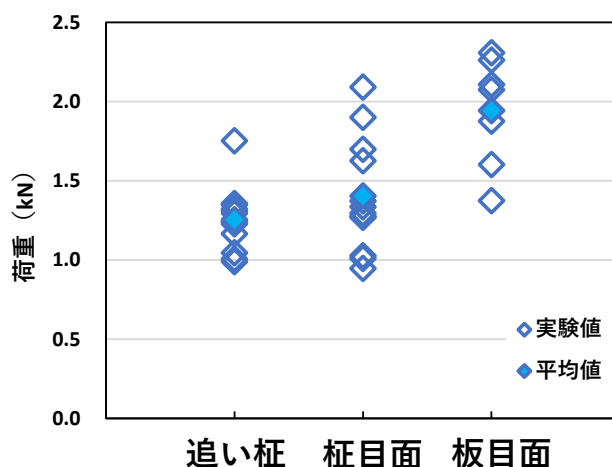


図 3.4.3-2 スギにおける横圧縮試験の降伏荷重の分布

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### ③ハンキンソン式との比較

図 3.4.3-3 にスギにおける実験値とハンキンソン式との比較を示す。ハンキンソン式は以下の式 (3.4.3) により求めることができる。

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_0 \sigma_{90}}{\sigma_0 \sin^n \theta + \sigma_{90} \cos^n \theta} \quad (3.4.3)$$

式中の $\sigma_0$ は傾斜角度0度、 $\sigma_{90}$ は繊維直交試験体のそれぞれの平均値とした。また、 $n$ は河村らの研究<sup>7)</sup>を参考にし2.5とした。全体として、ほとんどの試験体でハンキンソン式による分布以上の値となった。また、角度により比較すると、20°まで角度によらず一定の値であったが、22.5°になると若干低下した。

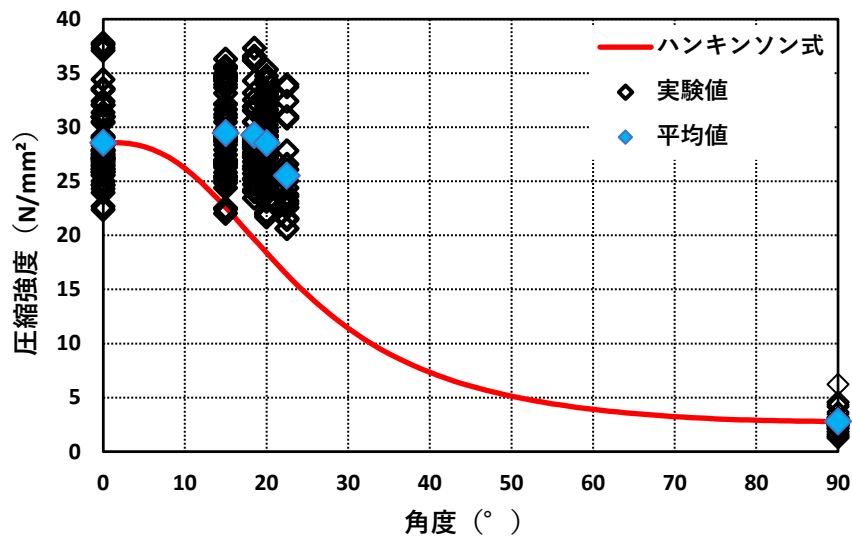


図 3.4.3-3 スギにおける実験値とハンキンソン式との比較

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### (2) オウシュウアカマツ

##### ①縦圧縮試験の最大荷重

図 3.4.3-4 にスギにおける縦圧縮試験の最大荷重の分布を示す。分布をみると、角度が大きくなると、荷重が多少低下することを確認した。

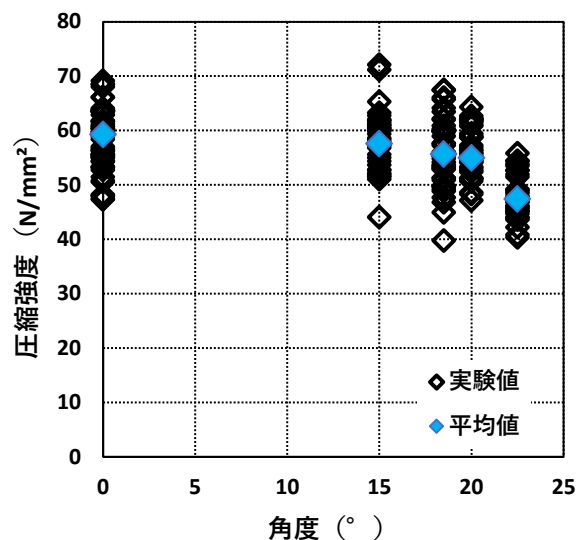


図 3.4.3-4 オウシュウアカマツにおける縦圧縮試験の最大荷重の分布

##### ②横圧縮試験の降伏荷重

図 3.4.3-3 にオウシュウアカマツにおける横圧縮試験の降伏荷重の分布を示す。横圧縮試験は明確な最大荷重がない試験体があったため、降伏荷重で比較する。降伏荷重は追い杭が一番低くその次に、柵目、板目の順となった。また、柵目面は3つの繊維方向の中で一番ばらつきが大きいことが分かった。

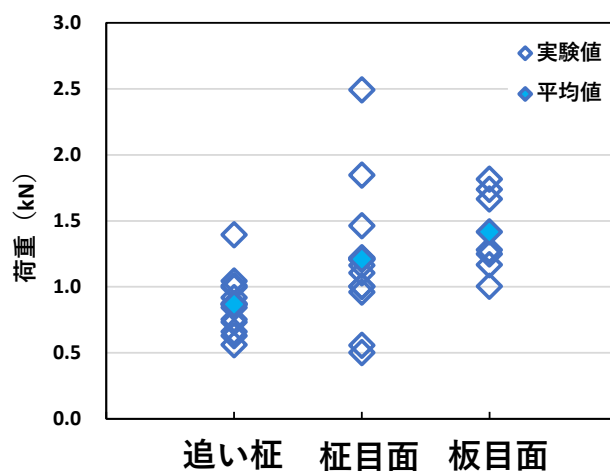


図 3.4.3-5 オウシュウアカマツにおける横圧縮試験の降伏荷重の分布

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### ③ハンキンソン式との比較

図 3.4.3-4 にオウシュウアカマツにおける実験値とハンキンソン式との比較を示す。全体として、全ての試験体でハンキンソン式による分布以上の値となった。また、角度により比較すると、角度が大きいと、実験値は若干の低下傾向を示した。

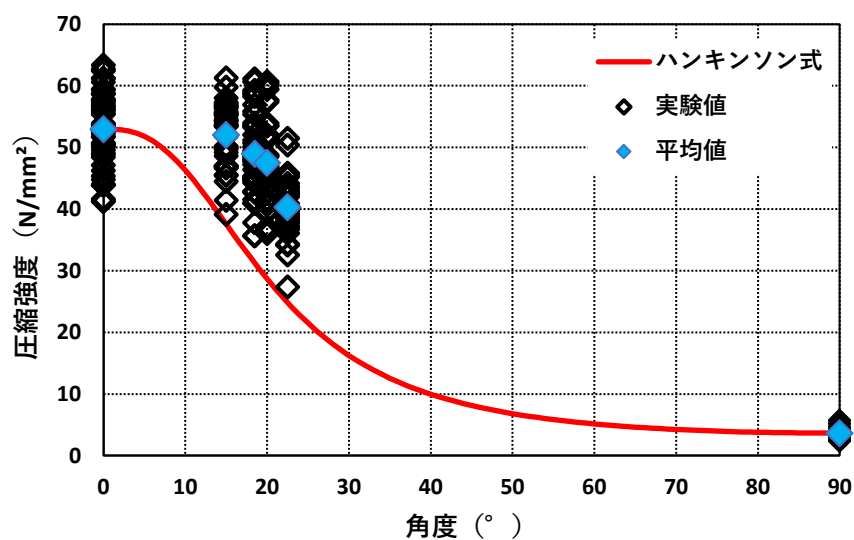


図 3.4.3-6 オウシュウアカマツにおける実験値とハンキンソン式との比較

### 第3章 ねじ角度を想定した傾斜加力面における縦圧縮試験

#### 3.5. 本章のまとめ

本章では、LSBのねじ角度の傾斜を想定し、傾斜加力面における縦圧縮試験を行い、ねじ角度の大きさが圧縮性能に及ぼす影響について検証した。また、横圧縮試験もを行い、ハンキンソン式との比較を併せて行った。

破壊性状としては、傾斜角度が大きくなると、スギ、オウシュウアカマツともに、横方向移動を防ぐ治具沿いに向けて、もめができた試験体が多数存在した。

角度の違いによる比較においては、スギでは角度 $0^{\circ}$ から $18.5^{\circ}$ まで一定の値となったが、角度 $20^{\circ}$ 以降は多少低下した。オウシュウアカマツについては角度が大きくなるほど荷重が多少低下することを確認した。ハンキンソン式との比較においては、両樹種ともに実験値がハンキンソン式による関係以上の値となった。

以上の結果より、傾斜加力面の傾斜角度が大きくなると、最大荷重は若干下がる事が確認できたが、ハンキンソン式の関係ほどの低下ではなかった。また、2章で用いたLSBのねじ角度は $40^{\circ}$ または $37^{\circ}$ であったが、その半分の角度である $20^{\circ}$ と $18.5^{\circ}$ における縦圧縮試験体の値を見ると、傾斜角度 $0^{\circ}$ の試験体との違いに差はなかった。よって、圧縮強度はこの範囲の大小に大きく影響しないことが確認できた。

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した 椅子型せん断試験

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.1. はじめに

1.2 において、ねじ形状によらない推定式を紹介した。この推定式では、引き抜き荷重を材料強度により求める必要がある。本章では、せん断式におけるせん断強度  $\tau$  を前2章の引き抜き試験で用いた木材から採材した試験体より求める。



## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.2. 試験体概要

図 4.2-1 に採材の様子を示す。採材は、図 4.2-2 のようにせん断面が TL 方向、LR 方向の 2 種類とし、LSB 引き抜き試験の木部のせん断面と椅子型試験体のせん断面がほぼ一致するように採材した。

図 4.2-3 と図 4.2-4 に使用する試験体を示す。圧縮要素試験同様に前章の LSB 引き抜き試験体で使用した木材から採材した。試験体はこれまでいくつか研究例のある JIS 形状<sup>8)</sup>と加力面幅  $b$  やせん断高さ  $h$  を LSB 形状に模したものを採材し、試験体形状の違いによる寸法効果の有無を検証する。加力面幅は  $1 \cdot 3 \cdot 3 + 1$  (詳細は後述)  $\cdot 5\text{mm}$ 、せん断高さは LSB のピッチの大きさを想定し、 $6 \cdot 8 \cdot 10\text{mm}$  とした。

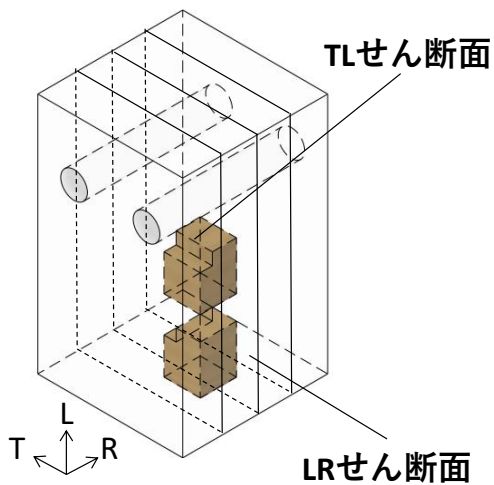


図 4.2-1 採材の様子

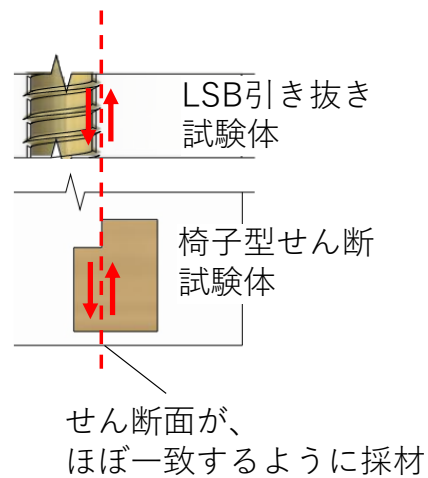


図 4.2-2 採材時の注意点

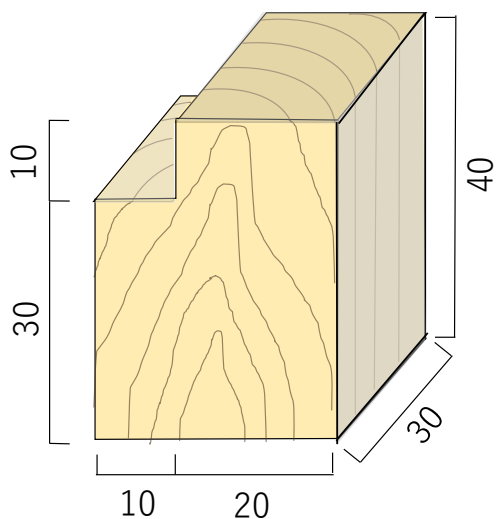


図 4.2-3 JIS 形状

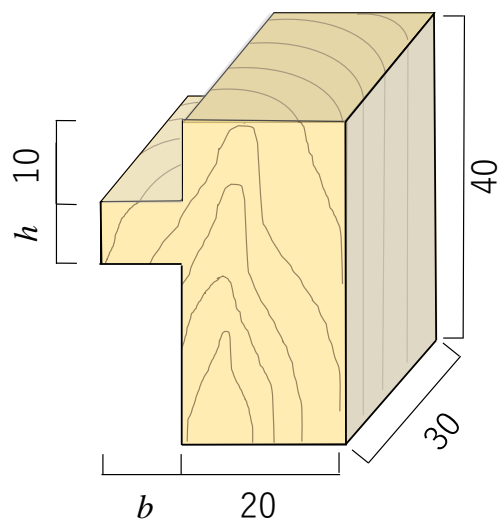


図 4.2-4 LSB 形状

加力面幅  $3+1$  については図 4.2-4 のように、加力面幅  $3\text{mm}$  のうち、椅子型せん断試験機

#### 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

の加力治具と試験体せん断面の間に 1mm 程度のクリアランスを設けている。これは、クリアランスにより生じる曲げモーメントにより、せん断面の上部で横引張破壊となるようにしている。なお、これは図 4.2-5 のように「LSB と木部との間にクリアランスが発生する」と仮定したときの試験として行った。

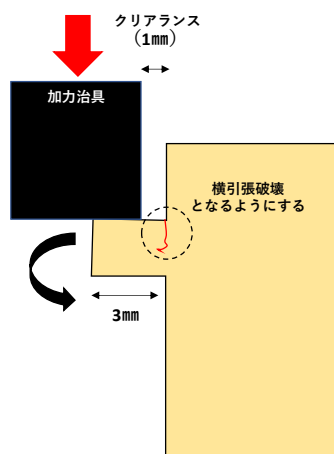


図 4.2-5 3+1 実験概略図

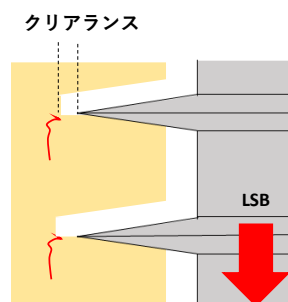


図 4.2-6 想定される破壊性状

表 4.2-1 試験体数一覧

	加力面幅 b (mm)	せん断面高さ h(mm)	SG		OA	
			TL	LR	TL	LR
LSB形状	1	6	3	3	3	3
		8	3	3	3	3
		10	4	3	3	3
	3	6	4	3	3	3
		8	4	3	3	3
		10	4	3	3	3
	3+1	6	3	3	3	3
		8	3	3	3	3
		10	3	3	3	3
	5	6	3	3	3	3
		8	3	3	3	3
		10	3	3	3	3
JIS形状	10	30	24	24	24	24

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.3. 試験方法

写真 4.3.1-1 に試験の様子を示す。変位は、ヘッドの変位を2か所計測しており、実験結果は2か所の変位計（CDP25MT（東京測器））の値の平均値とした。加力は0.5mm/minとし、最大荷重到達後80%に荷重が下がるまで載荷した。

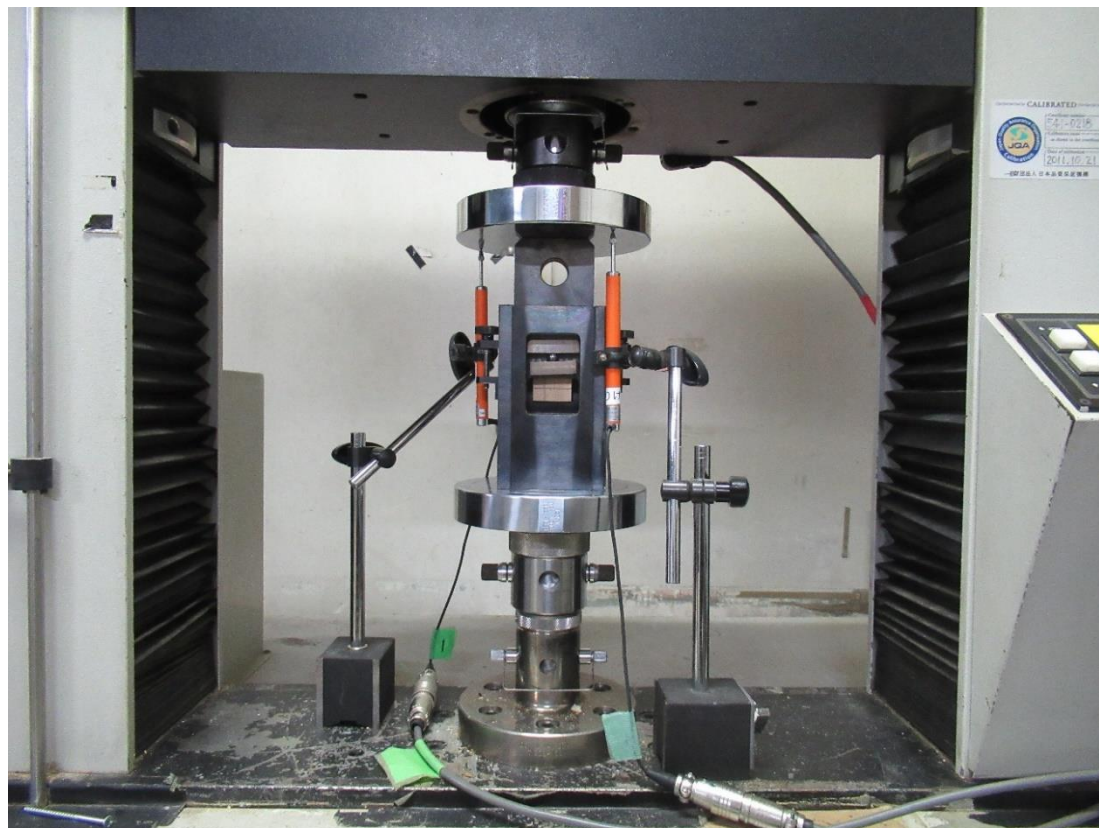


写真 4.3.1-1 試験体設置の様子

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.4. 試験結果と考察

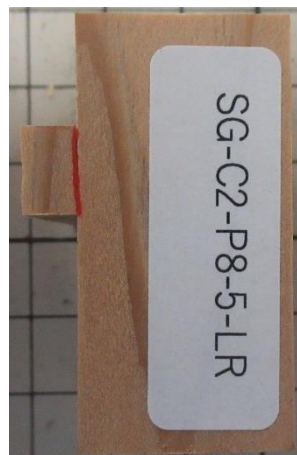
#### 4.4.1. 破壊性状

##### (1) スギ

写真 4.4.1-1 にスギ試験体の代表的な破壊性状を示す。LSB 形状の  $b=1$  は加力面の圧縮めり込みが顕著にみられた。 $b=3$  および  $5$  についてはせん断面がせん断破壊した。 $b=3+1$  についてはせん断面の上端から割裂が入り、加力面が回転変形することにより横引張破壊が生じた。JIS 形状の試験体はせん断面がせん断破壊した。



(1) LSB 形状 :  $b=1$   
加力面の圧縮めり込み



(2) LSB 形状 :  $b=3 \cdot 5$   
せん断面のせん断破壊



(3) LSB 形状 :  $b=3+1$   
せん断面の横引張破壊



(4) JIS 形状  
せん断面のせん断破壊

写真 4.4.1-1 スギ試験体の破壊性状

#### 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

##### (2) オウシュウアカマツ

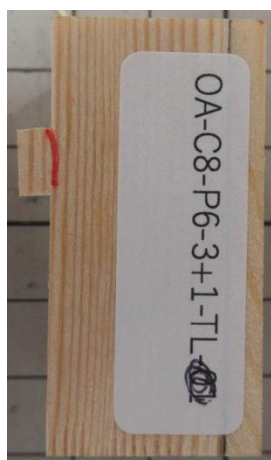
写真 4.4.1-2 にオウシュウアカマツ試験体の代表的な破壊性状を示す。LSB 形状の  $b=1$  は加力面の圧縮めり込みが顕著にみられた。 $b=3$  および  $5$  についてはせん断面がせん断破壊した。 $b=3+1$  についてはせん断面の上端から割裂が入り、加力面が回転変形することにより横引張破壊が生じた。JIS 形状の試験体はせん断面がせん断破壊した。



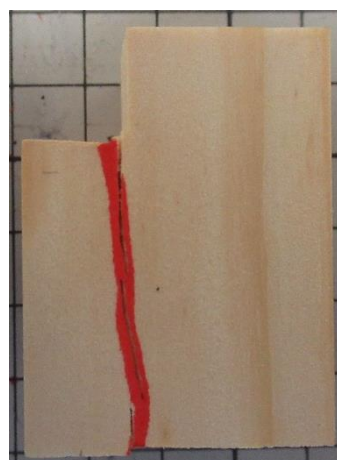
(1) LSB 形状 :  $b=1$   
加力面の圧縮めり込み



(2) LSB 形状 :  $b=3 \cdot 5$   
せん断面のせん断破壊



(3) LSB 形状 :  $b=3+1$   
せん断面の横引張破壊



(4) JIS 形状  
せん断面のせん断破壊

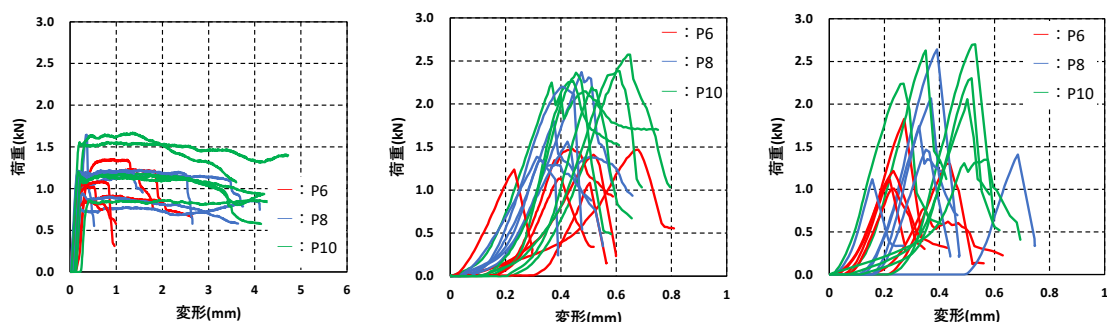
写真 4.4.1-2 オウシュウアカマツ試験体の破壊性状

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.4.2. 荷重-変位関係

#### (1) スギ

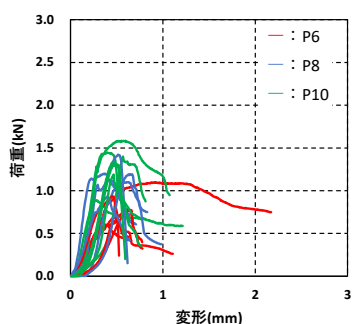
図 4.4.2-1 にスギ試験体における荷重-変位関係を示す。LSB 形状の試験体において、 $b=1$  については、最大荷重到達後、荷重を保ちながら変形が進み、試験体のいくつかはその後急激に荷重が低下した。 $b=3$ 、 $5$ 、 $3+1$  については、はじめは荷重と変形が比例的に増加し、最大荷重の到達と同時に荷重が急激に低下した。JIS 形状の試験体は、はじめは荷重と変形が比例的に増加したが、その後荷重と変形の勾配が小さくなった後、最大荷重の到達と同時に荷重が急激に低下した。



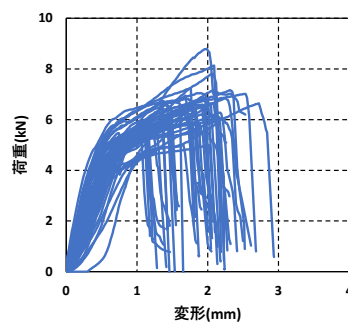
(1) LSB 形状 :  $b=1$

(2) LSB 形状 :  $b=3$

(3) LSB 形状 :  $b=5$



(4) LSB 形状 :  $b=3+1$



(5) JIS 形状

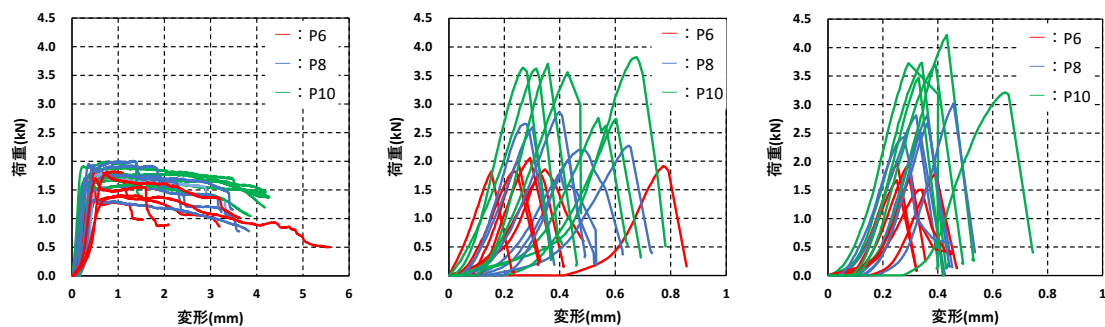
図 4.4.2-1 スギの荷重-変位関係



## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### (2) オウシュウアカマツ

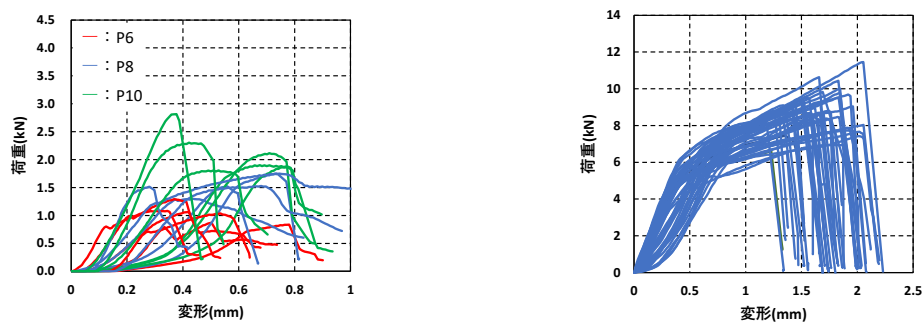
図 4.4.2-2 にオウシュウアカマツ試験体における荷重-変位関係を示す。LSB 形状の試験体において、 $b=1$  については、最大荷重到達後、荷重を保ちながら変形が進み、試験体のいくつかはその後急激に荷重が低下した。 $b=3$ 、 $5$ 、 $3+1$  については、はじめは荷重と変形が比例的に増加し、最大荷重の到達と同時に荷重が急激に低下した。JIS 形状の試験体は、はじめは荷重と変形が比例的に増加したが、その後荷重と変形の勾配が小さくなった後、最大荷重の到達と同時に荷重が急激に低下した。



(1) LSB 形状 :  $b=1$

(2) LSB 形状 :  $b=3$

(3) LSB 形状 :  $b=5$



(4) LSB 形状 :  $b=3+1$

(5) JIS 形状

図 4.4.2-2 オウシュウアカマツの荷重-変位関係

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.4.3. せん断強度の比較

以下にせん断強度の比較を示す。なお、せん断強度は  $\tau$  [N/mm<sup>2</sup>] は (4.4.3-1) 式を用い、試験結果から得られた荷重値  $P_{max}$  [N] を試験体のせん断面積 (試験体幅 : 30 × せん断面高さ :  $h$ ) [mm<sup>2</sup>] で除して算出した。

$$\tau = \frac{P_{max}}{30h} \quad (4.4.3-1)$$

また、 $b=1$  で比較する圧縮強度については、(4.4.3-2) 式を用い、試験結果から得られた荷重値  $P_{max}$  [N] を加力面の面積 (加力面幅 :  $b$  × 試験体幅 : 30) [mm<sup>2</sup>] で除して算出した。

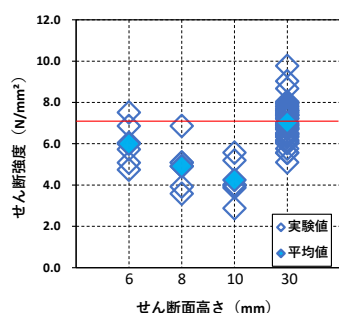
$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{30b} \quad (4.4.3-2)$$



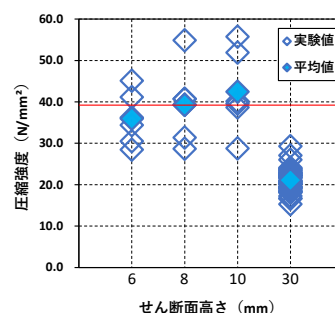
## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### (1) スギ

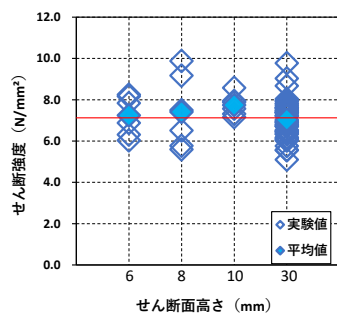
図 4.4.3-1 にスギ試験体のせん断強度および圧縮強度の比較を示す。LSB 形状の試験体に加え、JIS 形状の試験体もせん断高さ 30mm として併せて示している。b=1 ではせん断高さが大きくなると低くなる負の相関となった。これは加力面積が他の条件に比べ小さくなったことで、加力面積が小さくなり、最大荷重が圧縮強度で決まったためである。また、圧縮破壊が先行したため、JIS 形状の試験体のせん断強度よりも低い傾向を示した。実際に図 4.4.3-1(2)の比較のように、b=1 の実験値を加力面積で除した値を圧縮強度として比較すると、3章の圧縮要素試験の縦圧縮試験体の圧縮強度に近い値となった。b=3・5mm については、せん断高さに関わらず一定の値となり、JIS 形状の試験体のせん断強度に近い傾向を示した。b=3+1 については b=3 の試験体に比べ、35%程度低い値となった。また、加力面積での比較においては両者による大きな差は見られなかったため、その影響はないと考えられる。



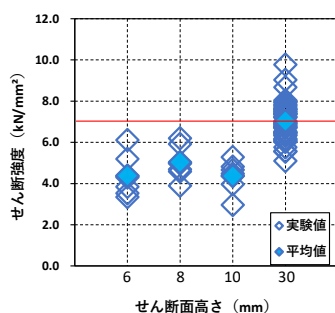
(1) b=1 : せん断強度の比較



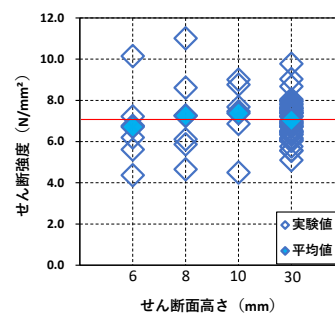
(2) b=1 : 圧縮強度の比較



(3) b=3



(4) b=3+1



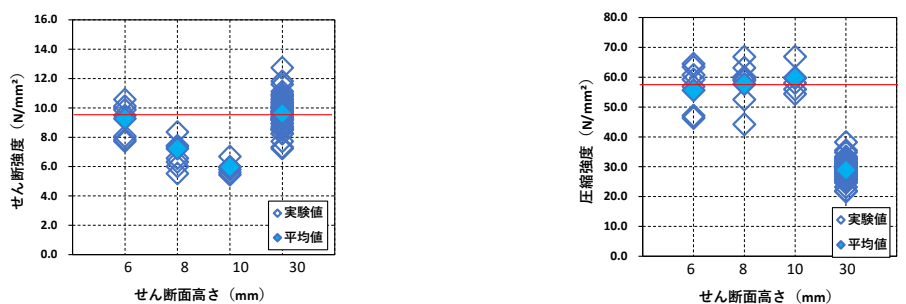
(5) b=5

図 4.4.3-1 スギ試験体のせん断強度および圧縮強度の比較

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

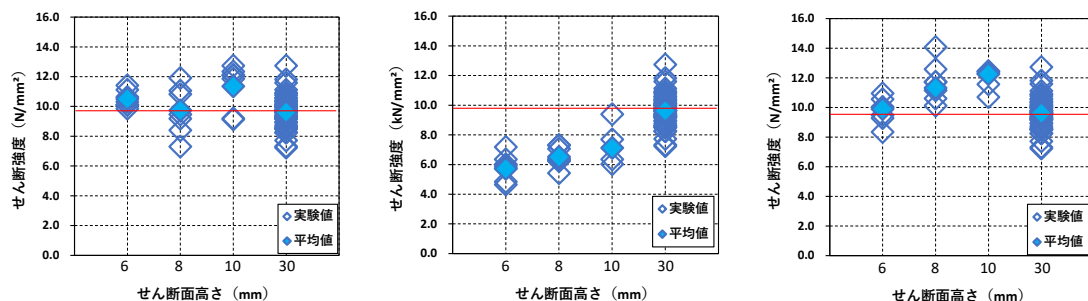
### (2) オウシュウアカマツ

図 4.4.3-2 にオウシュウアカマツ試験体のせん断強度および圧縮強度の比較を示す。LSB 形状の試験体に加え、JIS 形状の試験体もせん断面高さ 30mm として併せて示している。b=1 ではせん断高さが大きくなると低くなる負の相関となった。これは加力面積が他の条件に比べ小さくなったことで、加力面積が小さくなり、最大荷重が圧縮強度で決まったためである。また、圧縮破壊が先行したため、JIS 形状の試験体のせん断強度よりも低い傾向を示した。実際に図 4.4.3-2(2)の比較のように、b=1 の実験値を加力面積で除した値を圧縮強度として比較すると、3 章の圧縮要素試験の縦圧縮試験体の圧縮強度に近い値となった。b=3・5mm については、せん断高さに関わらず一定の値となり、JIS 形状の試験体のせん断強度に近い傾向を示した。b=3+1 については b=3 の試験体に比べ、35%程度低い値となった。また、加力面積での比較においては両者による大きな差は見られなかったため、その影響はないと考えられる。



(1) b=1 : せん断強度の比較

(2) b=1 : 圧縮強度の比較



(3) b=3

(4) b=3+1

(5) b=5

図 4.4.3-2 オウシュウアカマツ試験体のせん断強度および圧縮強度の比較

## 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

### 4.5. 本章のまとめ

本章では、せん断式におけるせん断強度  $\tau$  を2章の引き抜き試験で用いた木材から採材した試験体の実験値により求めた。試験体形状として、JIS 形状および、せん断面や加力面幅を LSB のピッチやねじ部が木部にかかる幅を想定した LSB 形状とした。

破壊性状としては、加力面幅が 1mm の試験体では、圧縮破壊が顕著にみられたが、加力面幅 3・5mm については JIS 形状の試験体同様にせん断面のせん断破壊となった。また 3+1mm については、せん断面の上部で横引張破壊となった。

特性値については、両樹種ともに  $b=1$  の実験値を加力面積で除した値を圧縮強度として比較すると、3章の圧縮要素試験の縦圧縮試験体の圧縮強度に近い値となった。 $b=3・5\text{mm}$  については、せん断高さに関わらず一定の値となり、JIS 形状の試験体のせん断強度に近い傾向を示した。 $b=3+1$  については  $b=3$  の試験体に比べ、35%程度低い値となった。また、加力面幅での比較においては両者による大きな差は見られなかった。

以上の結果から、加力面積が十分であれば、せん断高さや加力面幅の違いによるせん断強度には大きな差がなかったため、試験体寸法の違いによる寸法効果はなく、LSB のピッチの大きさに関わらず、引き抜き性能としてのせん断強度は変わらない可能性を確認できた。

#### 第4章 ねじ部にかかる木部を想定した椅子型せん断試験

## 第5章 LSB 推定式の提案

## 第5章 LSB 推定式の提案

### 5.1. はじめに

本章では、推定値と実験値の比較を行う。推定値は、1.2において、ねじ形状によらない推定式を用いて算出する。推定式には圧縮式とせん断式の2種類があるが、それぞれ、圧縮強度とせん断強度を要する。そこで、圧縮強度については3章の要素試験によるもの、せん断強度については4章の要素試験によるものとする。また、実験値は2章のLSB引き抜き試験の値を用いて比較を行う。

## 第5章 LSB 推定式の提案

### 5.2. 推定値と実験値の比較

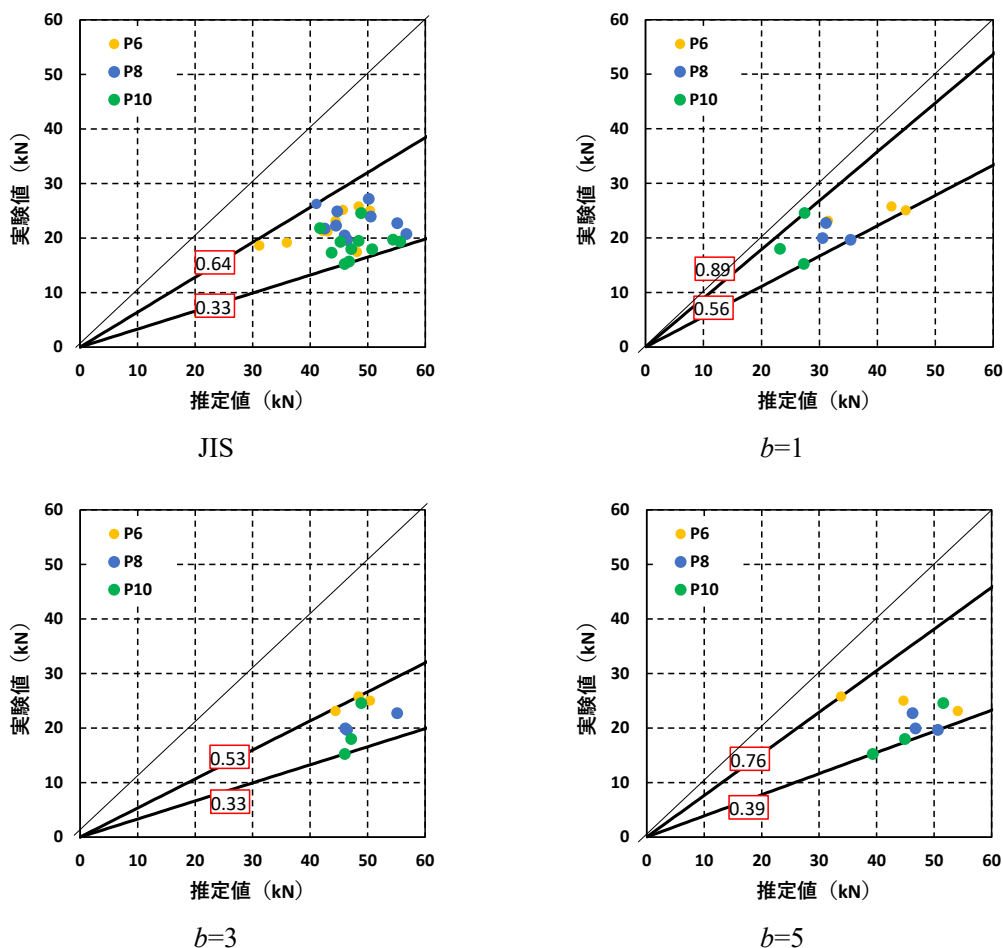
#### 5.2.1. LSB 形状による比較

##### (1) 赤松らの式による検討

本検討では、赤松らによるせん断式 (式 1.2.1-1) および圧縮式 (式 1.2.1-2) を用いて推定値を算出し、実験値と比較する。

##### ・スギにおけるせん断式での比較

図 5.2.1-1 にスギにおけるせん断式の比較を示す。推定値算出に用いた $\tau$ は4章で実施したスギの椅子型せん断試験体によるせん断強度とし、各図はせん断幅 $b$ ごとに分けて示している。推定値と実験値の比率では JIS で 0.33~0.64、 $b=1$  では 0.56~0.86、 $b=3$  では 0.33~0.53、 $b=5$  では 0.39~0.76 となった。JIS・ $b=3$ ・ $b=5$  では比率がおおよそ 0.35~0.65 の範囲となったが、 $b=1$  では異なった。これは、 $b=1$  ではせん断破壊ではなく圧縮破壊が先行したためと考えられる。ピッチごとで比較すると、すべての条件で比率の大小とピッチの大小で傾向はみられなかった。以上より、実験値と推定値との比率の関係から、せん断式をそのまま用いた計算は現実的ではないと考える。



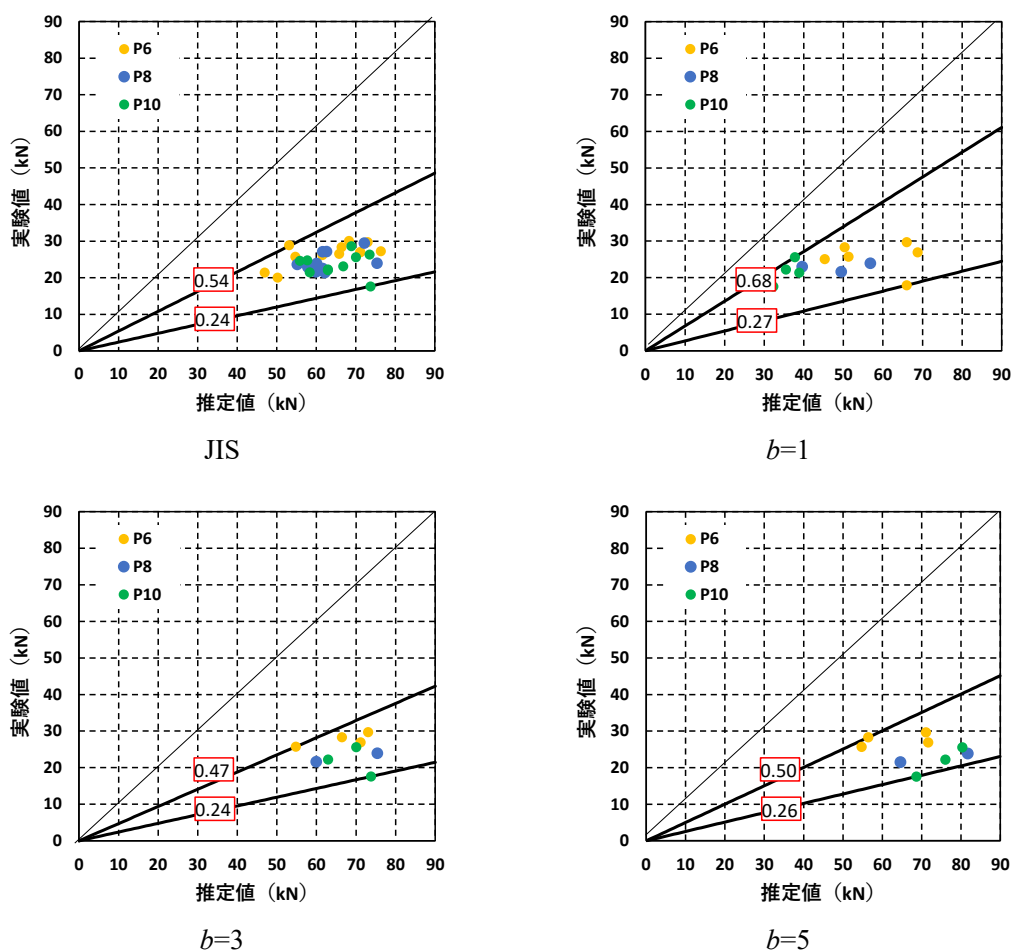
※図中の数字は実験値/推定値の比率を示す。

図 5.2.1-1 スギにおけるせん断式の比較

## 第5章 LSB 推定式の提案

### ・ オウシュウアカマツにおけるせん断式での比較

図 5.2.1-2 にオウシュウアカマツにおけるせん断式の比較を示す。推定値算出に用いた $\tau$ は4章で実施したオウシュウアカマツの椅子型せん断試験体によるせん断強度とし、各図はせん断幅  $b$  ごとに分けて示している。推定値と実験値の比率では JIS で 0.24~0.54、 $b=1$  では 0.27~0.68、 $b=3$  では 0.24~0.47、 $b=5$  では 0.26~0.50 となった。JIS・ $b=3$ ・ $b=5$  では比率がおおよそ 0.25~0.50 の範囲となったが、 $b=1$  では異なった。これは、 $b=1$  の試験体では最大荷重時にせん断破壊ではなく圧縮破壊が先行したためと考えられる。ピッチごとで比較すると、すべての条件で比率の大小とピッチの大小で傾向はみられなかった。以上より、実験値と推定値との比率の関係から、せん断式をそのまま用いた計算は現実的ではないと考える。



※図中の数字は実験値/推定値の比率を示す。

図 5.2.1-2 オウシュウアカマツにおけるせん断式の比較



## 第5章 LSB 推定式の提案

### ・スギにおける圧縮式での比較

図 5.2.1-3 にスギにおける圧縮式による比較を示す。 $\sigma_c$  の値は、3 章で実施したスギの傾斜加力面による圧縮試験の値とし、推定値算出には傾斜角度  $\alpha=0$  度の試験体もしくは LSB のねじ山半角である  $\alpha=20^\circ$  による圧縮強度とし、各図は傾斜角度に分けて示している。推定値と実験値の比率では  $\alpha=0^\circ$  の試験体では 0.46~0.94、 $\alpha=20^\circ$  の試験体では 0.41~1.08 となり、両者で比率の範囲に大きな差はなかった。ピッチごとで比較すると、ピッチの大きい P8 や P10 では比率が大きくなり、P6 では比率が小さくなる傾向がみられた。これは、ピッチが小さいほど式 1.2.1-2 の  $X$  が大きくなり、圧縮面積が大きくなることで推定値が大きく算出されるためである。なお、P8 や P10 の一部の条件で実験値を精度よく推定できている試験体があり、LSB の引き抜き性能は木材の圧縮性能で決まる可能性が確認できた。

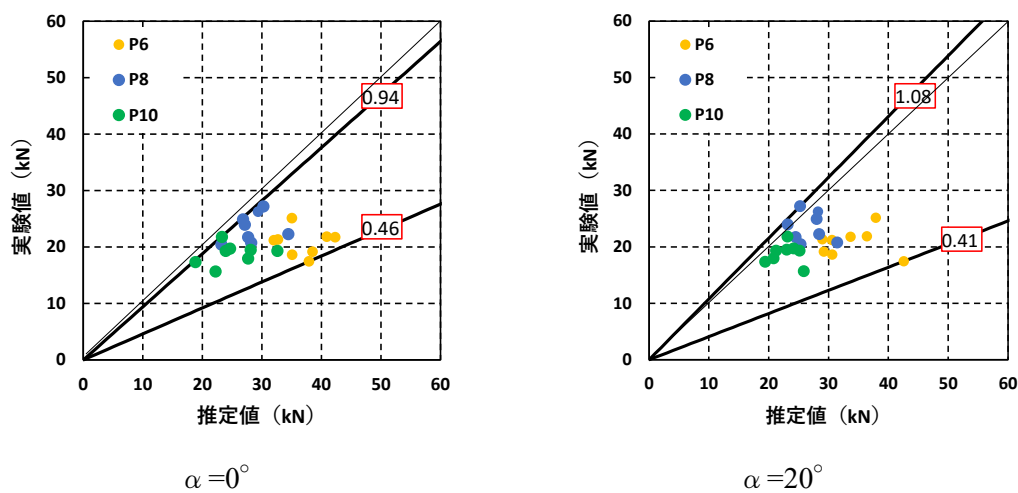


図 5.2.1-3 スギにおける圧縮式による比較



## 第5章 LSB 推定式の提案

### ・スギにおけるせん断式と圧縮式の推定値による比較

図 5.2.1-5 にスギにおけるせん断式と圧縮式の推定値による比較を示す。赤松らの理論によれば、引き抜き性能はせん断力（式 1.2.1-1）として計算した値もしくは、圧縮力（式 1.2.1-2）により計算した値の最小値としており、その値をプロットしている。結果として、多くの試験体で圧縮式により決まることが分かった。また推定値が実験値とよく合っている試験体があるため、LSB の引き抜き性能は圧縮破壊により決まる可能性があることがわかった。しかし、多くの試験体で実験値と推定値との間に大きな差があるため、ねじ部にかかる木部が圧縮破壊する前に他の破壊が起きていることが予想される。そこで、5.2 (2) において新たに横引張破壊に関する検討を行う。

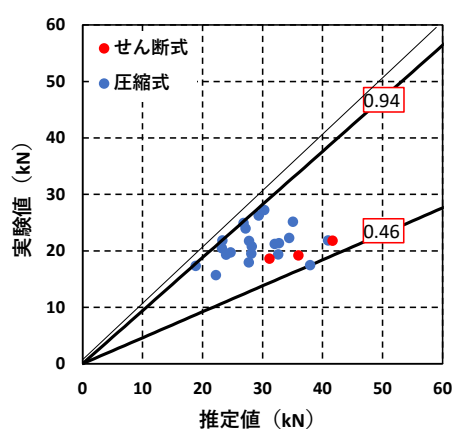


図 5.2.1-5 スギにおけるせん断式と圧縮式の推定値による比較

## 第5章 LSB 推定式の提案

### ・ オウシュウアカマツにおけるせん断式と圧縮式の推定値による比較

図 5.2.1-6 にオウシュウアカマツにおけるせん断式と圧縮式の推定値による比較を示す。スギ試験体と同様に（式 1.2.1-1）として計算した値もしくは、圧縮力（式 1.2.1-2）により計算した値の最小値をプロットしている。結果として、多くの試験体で圧縮式により決まることが分かった。また、すべての試験体で実験値と推定値との間に大きな差があるため、ねじ部にかかる木部が圧縮破壊する前に他の破壊が起きていることが予想される。そこで、スギと同様に 5.2（2）において新たに横引張破壊に関する検討を行う。

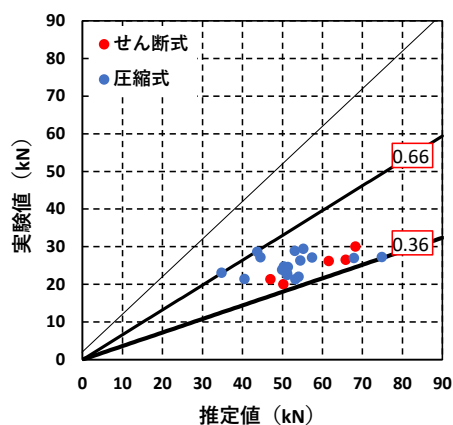


図 5.2.1-6 オウシュウアカマツにおけるせん断式と圧縮式の推定値による比較

## 第5章 LSB 推定式の提案

### (2) 横引張破壊を想定した検討

#### ・スギの検討

図 5.2.1-7 にスギにおける横引張破壊を想定した推定値による比較を示す。推定値は式 5.2-1 により求めた。4 章で実施した椅子型せん断試験体の条件 3+1 における最大荷重が LSB 形状により求めることができるつまき線長さとせん断試験体幅 (=30mm) に比例すると仮定して算出した。実験値と推定値の比率は 0.48~0.89 とばらつきは大きかった。ピッチごとに比較してもピッチの大小による比率の傾向はみられなかった。一部の条件では推定値が実験値を精度よく推定できている試験体があるものの、ピッチごとの傾向は見られない点やばらつきが大きい点から横引張耐力による推定は現実的ではないと考える。

$$P_{max} = \frac{XP_{tp}}{30} \quad (5.2-1)$$

$P_{max}$ : 横引張耐力 (kN)

$X$ : つまき線長さ (mm)

$P_{tp}$ : 4 章椅子型せん断試験体の最大荷重 (条件: 3+1) (kN)

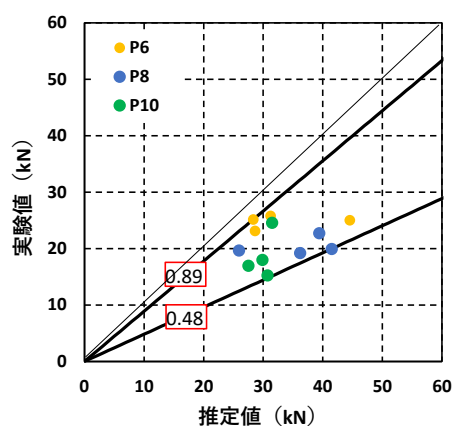


図 5.2.1-7 スギにおける横引張破壊を想定した推定値による比較

## 第5章 LSB 推定式の提案

### ・オウシュウアカマツ

図 5.2.1-7 にオウシュウアカマツにおける横引張破壊を想定した推定値による比較を示す。推定値はスギ試験体同様に式 5.2-1 により求めた。実験値と推定値の比率は 0.31~0.75 となった。ピッチごとに比較してもピッチの大小による比率の傾向はみられなかった。また、推定値が実験値と離れていたため、横引張耐力による推定は現実的ではないと考えられる。

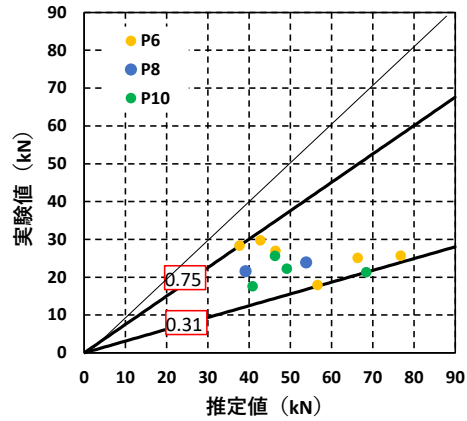
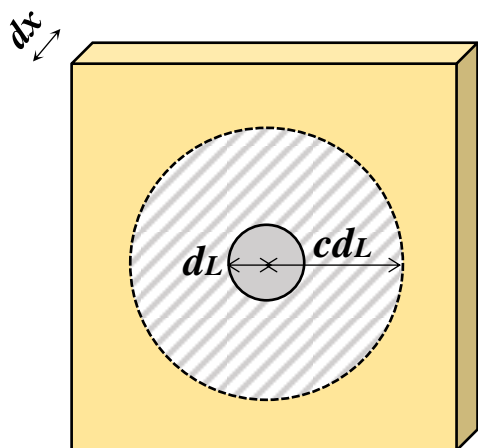


図 5.2.1-8 オウシュウアカマツにおける横引張破壊を想定した推定値による比較

## 第5章 LSB 推定式の提案

### (3) 木部有効断面積を考慮した検討

(1)・(2)においてLSBの引き抜き性能をせん断・圧縮・横引張から検討を行ったが、実験値と推定値との間に大きな差がみられた。この要因が、木部の有効断面積の取り方であると考えた。一般的にLSBの引き抜き性能の評価法として中谷式<sup>9)10)11)</sup>が用いられている。この中谷式は、LSBのねじ山にかかる木部のみではなく、その周辺の木部にも応力が作用していると仮定している。この応力が作用する部分の面積を木部有効断面積としており、図5.2.1-9のようにLSB山径の $c$ 倍にあたる灰色部の面積となる。



※斜線部：応力作用範囲  
=  $A_w$ ：木部有効断面積

$d_L$ ：LSB 山径

$c$ ：木材の応力負担面積を求めるための係数

図 5.2.1-9 木部有効断面積

## 第5章 LSB 推定式の提案

ここで、中谷式のモデルについて図 5.2.1-10 に示す。中谷式では微小区間  $dx$  において LSB の引き抜き時にかかる木部のせん断力  $f_v$  が、木部が受ける軸力  $\sigma_w$  と釣り合うとしている。なお、 $\sigma_w$  については木部有効断面積内に一様に作用していると仮定している。

一方で、瀧野らの研究<sup>12)-14)</sup>によると、木部有効断面積内に作用する応力は LSB 周辺部が最大となり、LSB から離れていくほど応力が減少していくことを有限解析法により確認している。

また、木部が受ける軸力は LSB 埋め込み方向に対しても一様に作用していると仮定している。しかし、ねじ山付近が受ける応力とねじ山以外が受ける応力は同じではないと考えられ<sup>15)</sup>、ねじ山先端が木部に接触する長さ（つるまき線長さ： $X$ ）により実験値に傾向がみられると仮定した。

そこで、図 5.2.1-11 に示すつるまき線モデルを考えた。このモデルは LSB ねじ部周辺木部にかかるせん断力が LSB ねじ部先端にかかる軸力と釣り合うとした。軸方向の応力において、LSB のねじ部が木部にかかるせん断面の応力が  $\tau_{max}$  に達したときに最大荷重を迎えるとしており、その時の LSB のねじ部が木部にかかるせん断面に近い部分の軸力における応力も  $\tau_{max}$  となるとしている。なお、この時の応力分布は木部の有効断面積内で不均一であるため、矩形の応力分布に置き換えるために  $\tau_{max}$  に  $\alpha$ （低減係数）を乗じている。

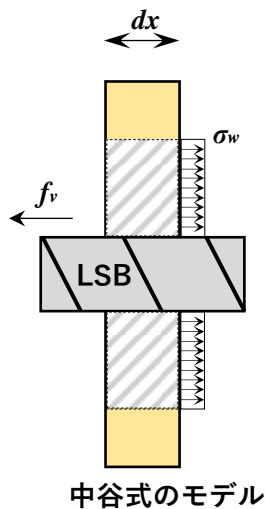


図 5.2.1-10 中谷式のモデル

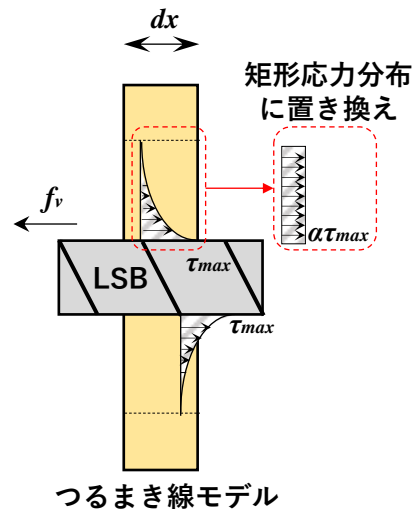


図 5.2.1-11 つるまき線モデル

式 5.2.1-2 つるまき線モデルのつり合い式を示す。LSB ねじ部周辺木部にかかるせん断力（左辺）、LSB ねじ部先端にかかる軸力（右辺）としている。

$$2f_v\pi d_L L = \alpha\tau_{max}(cd_L - d_w)X \quad (5.2-2)$$

$f_v$ ：薄板試験における各 LSB 形状における木部-LSB 境界面のせん断強度

$d_L$ ：LSB 山径  $d_w$ ：LSB 先孔径  $L$ ：埋め込み長さ

$c$ ：木材の応力負担面積を求めるための係数（本検討では LSB 形状によらず、 $c=1.5$  とした）



## 第5章 LSB 推定式の提案

図 5.2.1-12～図 5.2.1-13 に推定値と実験値の比較を示す。推定値は式 5.2-3 により求めた。なお、 $\tau_{max}$ は4章における JIS<sup>3)</sup>の椅子型せん断試験体によるせん断強度とした。また、 $\alpha$ は各 LSB 形状に関して式 5.2-2 により求めた値の平均値とし、SG では 0.35、OA は 0.36 とした。

$$P_{max} = \alpha \tau_{max} (cd_L - d_w) X \quad (5.2-3)$$

スギは、多くの試験体で推定値が実験値を安全側に評価しており、オウシュウアカマツについては、基準線が中央値付近を通過し、多くの試験体で精度よく実験値を評価できていた。

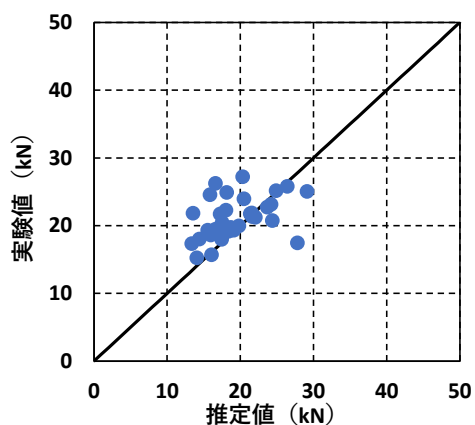


図 5.2.1-12 スギの比較

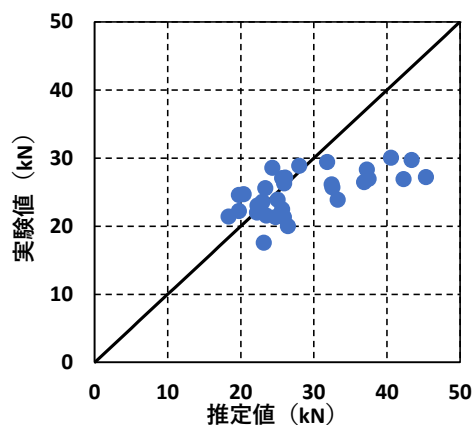


図 5.2.1-13 オウシュウアカマツの比較

## 第5章 LSB 推定式の提案

### 5.2.2. 埋め込み長さの違いによる比較

5.2.1 (3) において、LSB の引き抜き性能を、木材のせん断強度と定数 $\alpha$ を用いて求めることができる推定式を提案した。

ここでは LSB の埋め込み長さによる違いによる比較を併せておこなう。図 5.2.2-1 と図 5.2.2-2 に各樹種における埋め込み長さとの最大荷重の分布を示す。分布には、中谷式モデルにより求めたものと、つまき線モデルにより求めたものの2種類とする。つまき線モデルについて、スギは 200mm 以上で過小評価となったが、オウシュウアカマツは平均値を比較的良好に推定できた。中谷式についてはスギにおいて 200mm 以上で平均値を過小評価となった。オウシュウアカマツは 50・100mm において平均値を若干の過大評価、250・300mm において若干の過小評価となり、樹種や埋め込み長さにより精度が異なった。

なお、中谷式では埋め込み長さが長くなるほど、分布の勾配が異なってくるが、既往の GIR 接合における研究<sup>16)</sup>では、埋め込み長さに関わらず比例関係であると述べられており、材料実験により LSB でも起こり得る可能性が確認できた。

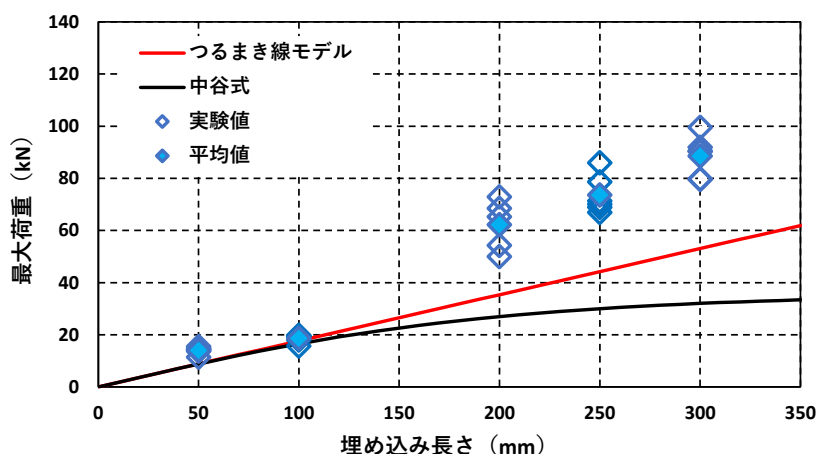


図 5.2.2-1 スギ試験体における埋め込み長さとの最大荷重の分布

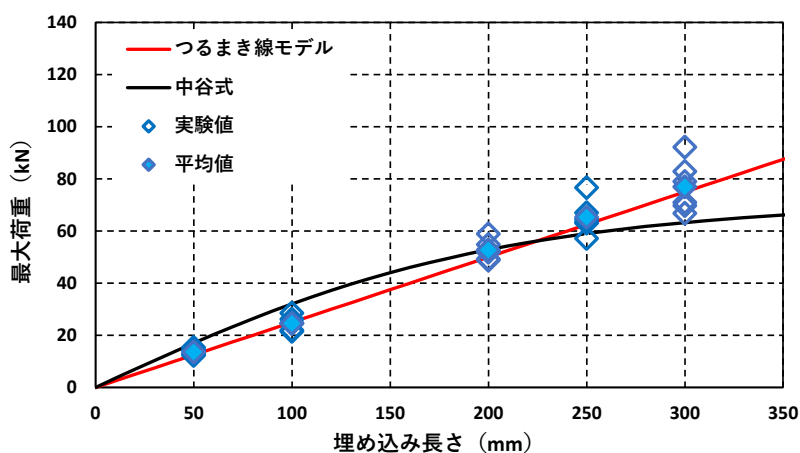


図 5.2.2-2 オウシュウアカマツにおける埋め込み長さとの最大荷重の分布

## 第5章 LSB 推定式の提案

### 5.3. 本章のまとめ

本章では、第2章で行った LSB 引き抜き試験の実験値を第3章・第4章の材料要素試験の値を用いて推定した。

#### せん断式による比較

第4章の実験値と式 1.2.1-1 を用いて推定値を算出し、実験値と比較した。

スギでは JIS で 0.33~0.64、 $b=1$  では 0.56~0.86、 $b=3$  では 0.33~0.53、 $b=5$  では 0.39~0.76 となった。JIS・ $b=3$ ・ $b=5$  では比率がおおよそ 0.35~0.65 の範囲となったが、 $b=1$  では圧縮破壊で決まったため比率が異なった。

オウシュウアカマツにおいては JIS で 0.24~0.54、 $b=1$  では 0.27~0.68、 $b=3$  では 0.24~0.47、 $b=5$  では 0.26~0.50 となった。JIS・ $b=3$ ・ $b=5$  では比率がおおよそ 0.25~0.50 の範囲となったが、 $b=1$  では圧縮破壊で決まったため比率が異なった。

ピッチごとで比較すると、両樹種ともすべての条件で比率の大小とピッチの大小で傾向はみられなかった。

全体として、実験値と推定値に大きな差があるため、せん断式をそのまま用いることによる推定は現実的ではないと考えられる。

#### 圧縮式による比較

第3章の実験値と式 1.2.1-2 を用いて推定値を算出し、実験値と比較した。

スギにおいて加力面傾斜角度  $\alpha=0^\circ$  の試験体では 0.46~0.94、 $\alpha=20^\circ$  の試験体では 0.41~1.08 となり、両者で比率の範囲に大きな差はなかった。ピッチごとで比較すると、ピッチの大きい P8 や P10 では比率が大きくなり、P6 では比率が小さくなる傾向がみられた。なお、P8 や P10 の一部の条件で実験値を精度よく推定できている試験体があり、LSB の引き抜き性能は木材の圧縮性能で決まる可能性が確認できた。

オウシュウアカマツにおいて加力面傾斜角度  $\alpha=0^\circ$  の試験体では 0.29~0.66、 $\alpha=20^\circ$  の試験体では 0.29~0.59 となり、両者で比率の範囲に大きな差はなかった。ピッチごとで比較すると、ピッチの大きい P8 や P10 では比率が大きくなり、P6 では比率が小さくなる傾向がみられた。全体として、実験値と推定値に大きな差があるため、圧縮式による推定は現実的ではないと考えられる。

#### せん断式と圧縮式の比較と横引張力を考慮した検討

赤松らの理論によれば、引き抜き性能はせん断力(式 1.2.1-1)として計算した値もしくは、圧縮力(式 1.2.1-2)により計算した値の最小値としているが、両樹種とも圧縮式により決まることが分かった。スギの試験体において推定値が実験値とよく合っている試験体があるため、理論上では LSB 形状によっては圧縮破壊により最大荷重が決まると考えられるが、多くの試験体で実験値と推定値との間に大きな差があるため、ねじ部にかかる木部が圧縮破壊する前に他の破壊が起きていることが予想された。そこで、新たに横引張破壊に関する検討を行ったが、多くの試験体で実験値と推定値との間に差があった。

## 第5章 LSB 推定式の提案

### 木部有効断面積を考慮した検討

既往の研究により実験値と推定値と差がみられた要因が、木部の有効断面積の取り方であると考えた。そこで、中谷式の応力のつり合いモデルを参考にし、LSB ねじ部周辺木部にかかるせん断力が LSB ねじ部先端にかかる軸力と釣り合うつるまき線モデルを作成した。結果として、スギでは多くの試験体で推定値が実験値を安全側に評価しており、オウシュウアカマツについては、基準線が中央値付近を通過し、多くの試験体で精度よく実験値を評価できていた。

### 埋め込み長さの違いによる検討

つるまき線モデルを用いて LSB の埋め込み長さによる違いによる比較を併せて行った。つるまき線モデルについて、スギは 200mm 以上で過小評価となったが、オウシュウアカマツは平均値を比較的良好に推定できた。中谷式についてはスギにおいて 200mm 以上で平均値を過小評価となった。オウシュウアカマツでは 50・100mm において平均値を若干の過大評価、250・300mm においては若干の過小評価となり、樹種や埋め込み長さにより精度が異なった。

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.1. はじめに

本章では、中大規模木造建築を想定した LSB を用いた柱梁接合部の実大試験を行い、接合部の設計法の提案と妥当性について検証した。これまでの章では、実大の試験体のうち梁の設計法の効率化について考えた。

本章では、2020 年度卒業論文<sup>17)</sup>での要素試験の実験値を用いたばねモデルでの計算値と実験値の比較を行い、柱梁接合部の設計法の提案をする。

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.2. 試験体概要

試験体は、LSB を用いた柱梁モーメント抵抗接合部とした。

試験に用いた LSB を写真 6.2-1 及び図 6.2-1 に示す。LSB はネジ山径 25mm、ネジ谷径 20mm、全長 475mm（埋め込み深さ 500mm、有効ネジ長さ 440mm）を用いた。

柱及び梁材は、スギ異等級対称構成集成材（強度等級 E65-F225）、カラマツ異等級対称構成集成材（強度等級 E105-F300）とし、試験体形状により断面 105×600mm、105×750mm および 210×600mm を用いた。

せん断受け金物は、後施工金物 3（カネシン製、写真 6.2-2、図 6.2-2）、または後施工金物 4（カネシン製、写真 6.2-3、図 6.2-3）を用いた。後施工金物 4 の後施工金物 3 との違いとして、柱部材に横引張力を伝達させないため、ドリフトピン（DP）孔をルーズホールにし、DP 孔を 4 か所から 5 か所とし、柱材に埋め込むダボを 3 か所から 4 か所とした。

試験体は、各部材に埋め込まれた LSB を、高力ボルト（M12、F10T または F12T：以下、HTB）と箱形金物（写真 6.2-4、図 6.2-4）を用いて緊結することで構成した。HTB の締め付けは、スプリングワッシャーが食い込むまでのトルク値 50Nm をデジタルトルクレンチで測定しながら行った。

接合部試験体の詳細寸法を図 6.2-5 と図 6.2-6 に、試験体概要を表 6.2-1 に示す。試験体は、2020 年度卒業論文<sup>17)</sup> の LWJ 接合部試験体を基準として①集成材の樹種をスギからカラマツに変更②LSB 本数を片側 2 本から 1 本に変更③梁せいを 600mm から 750mm に変更④材幅を 105mm から 210mm に変更⑤せん断金物を後施工金物 3 から後施工金物 4 に変更したパラメータを 8 条件とし、各 3 体の計 24 体を実施した。なお、結果比較のため、2020 年度卒業論文<sup>17)</sup> での接合部試験体（試験体名：LWJ→試験体名 S2-600-3 に変更）を併せて追記する。



写真 6.2-1 雌ネジ LSB

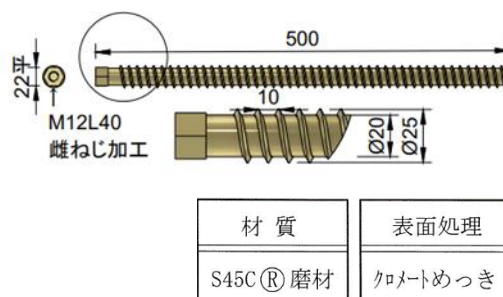


図 6.2-1 雌ネジ LSB 詳細 (mm)

第6章 LSB 接合部の実大試験



写真 6.2-2 せん断受け金物  
(後施工金物 3)

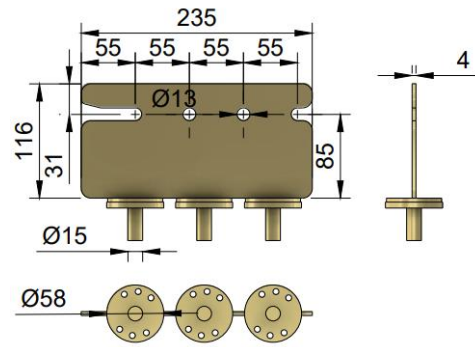


図 6.2-2 せん断受け金物  
(後施工金物 3) 詳細 (mm)



写真 6.2-3 せん断受け金物  
(後施工金物 4)

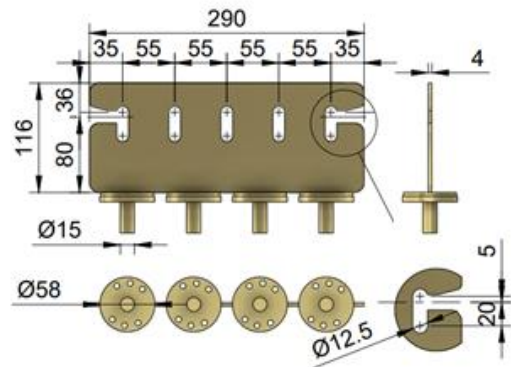


図 6.2-3 せん断受け金物  
(後施工金物 4) 詳細 (mm)

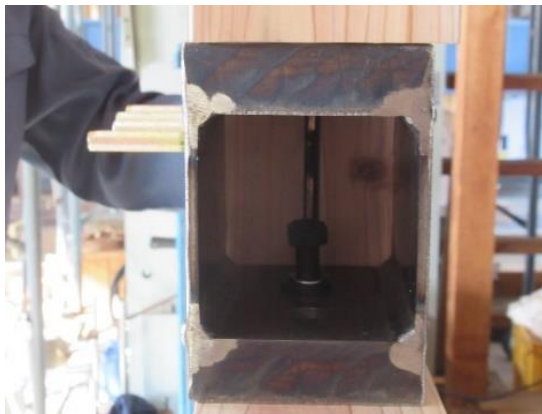


写真 6.2-4 箱形金物と HTB

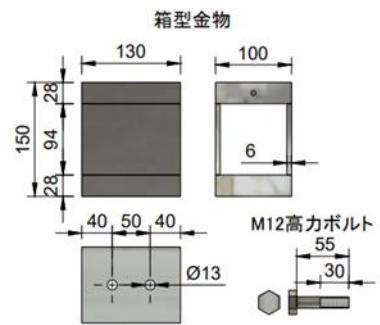


図 6.2-4 箱形金物と HTB 詳細 (mm)



第6章 LSB 接合部の実大試験

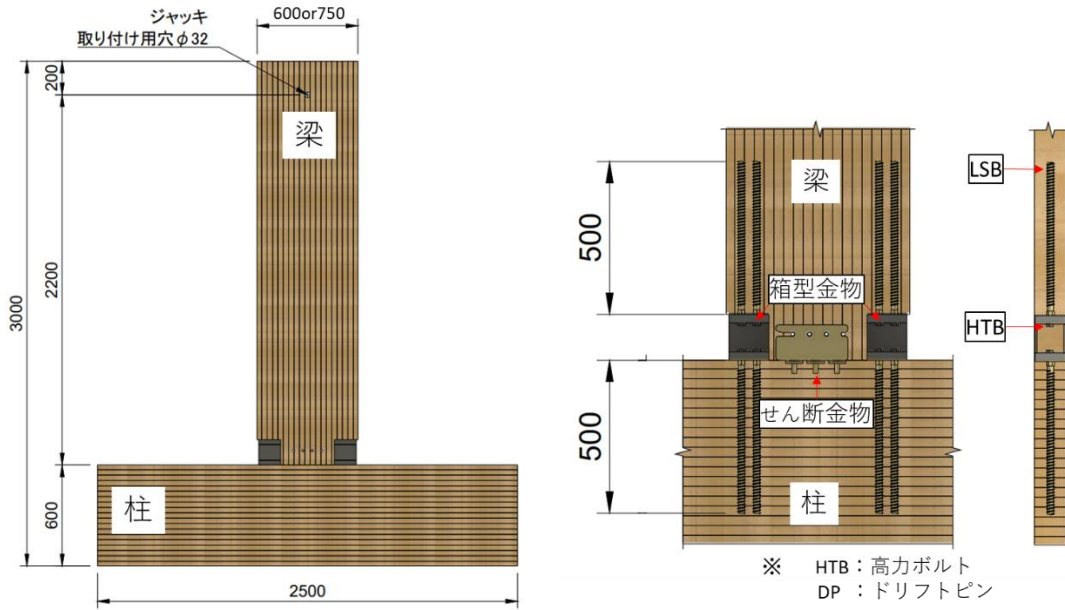


図 6.2-5 試験体概要図 (mm)

**試験体名**

**S2-600-3-01**

① ② ③④

① : S→スギ、K→カラマツ、  
数字→LSB 本数

② : 数字→梁せい

③ : 3→後施工金物 3、4→後施工金物 4

④ : 試験体番号

第6章 LSB 接合部の実大試験

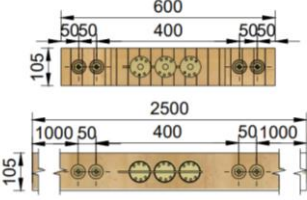
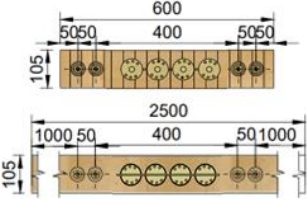
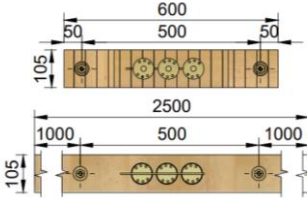
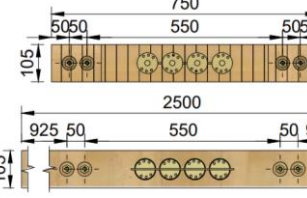
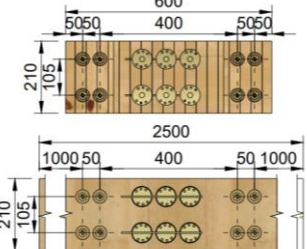
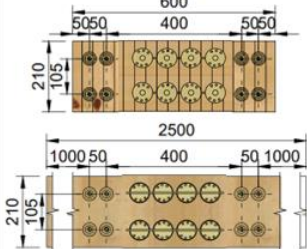
接合部詳細	接合具配置	
	後施工金物3	後施工金物4
LSB : 8本 箱型金物 : 2個 柱 : 105 × 600 梁 : 105 × 600	S2-600-3・K2-600-3 	S2-600-4・K2-600-4 
LSB : 4本 箱型金物 : 2個 柱 : 105 × 600 梁 : 105 × 600	S1-600-3 	—
LSB : 8本 箱型金物 : 2個 柱 : 105 × 600 梁 : 105 × 750	—	S2-750-4・K2-750-4 
LSB : 16本 箱型金物 : 4個 柱 : 210 × 600 梁 : 210 × 600	S4-600-3 	S4-600-4 

図 6.2-6 断面形状 (mm)

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.3. 試験方法

試験機と試験体の設置の様子を写真 6.3-1、変位計の設置位置とその詳細を図 6.3-1 に示す。試験は、実大壁せん断試験機（試験機フレーム：(株) 鷺宮製作所製、オイルジャッキシステム：理研機器社製、容量押し 500kN、引き 250kN）を用いて実施した。加力は、見かけの回転変形角が 1/450rad、1/300rad、1/200rad、1/150rad、1/100rad、1/75rad、1/50rad の正負交番 3 回繰り返した。載荷は、最大荷重に達した後、最大荷重の 80% に荷重が低下するまで、もしくは見かけのせん断変形角が 1/15rad になるまでとした。見かけのせん断変形角の算出方法は以下の通りとした。

$$\text{見かけのせん断変形角 } \gamma = \#01 / H \quad (6.3-1)$$

ここで、#01 は変位計#01 の測定値であり、 $H$  は加力点と梁部材下面までの距離 2200mm とした。

また、接合部変形角は、引張側と圧縮側それぞれについて梁部材-箱型金物の変位と箱型金物の開きと柱部材-箱型金物の変位の合算値を裏表で平均し、その差を変位計の引張側と圧縮側の計測用変位計の距離である 500mm、または 650mm で除したものとした。

- ・ 梁せい 600mm の試験体

$$\theta = ((\text{ave}(\#2, \#7) + \#12 + \text{ave}(\#24, \#25)) - (\text{ave}(\#6, \#11) + \#13 + \text{ave}(\#26, \#27))) / 500 \quad (6.3-2)$$

- ・ 梁せい 750mm の試験体

$$\theta = ((\text{ave}(\#2, \#7) + \#12 + \text{ave}(\#24, \#25)) - (\text{ave}(\#6, \#11) + \#13 + \text{ave}(\#26, \#27))) / 650 \quad (6.3-3)$$

- ・ 柱および梁幅 210mm の試験体

$$\theta = ((\text{ave}(\#2, \#7) + \text{ave}(\#12, \#14) + \text{ave}(\#24, \#25)) - (\text{ave}(\#6, \#11) + \text{ave}(\#13, \#15) + \text{ave}(\#26, \#27))) / 500 \quad (6.3-4)$$

第6章 LSB 接合部の実大試験

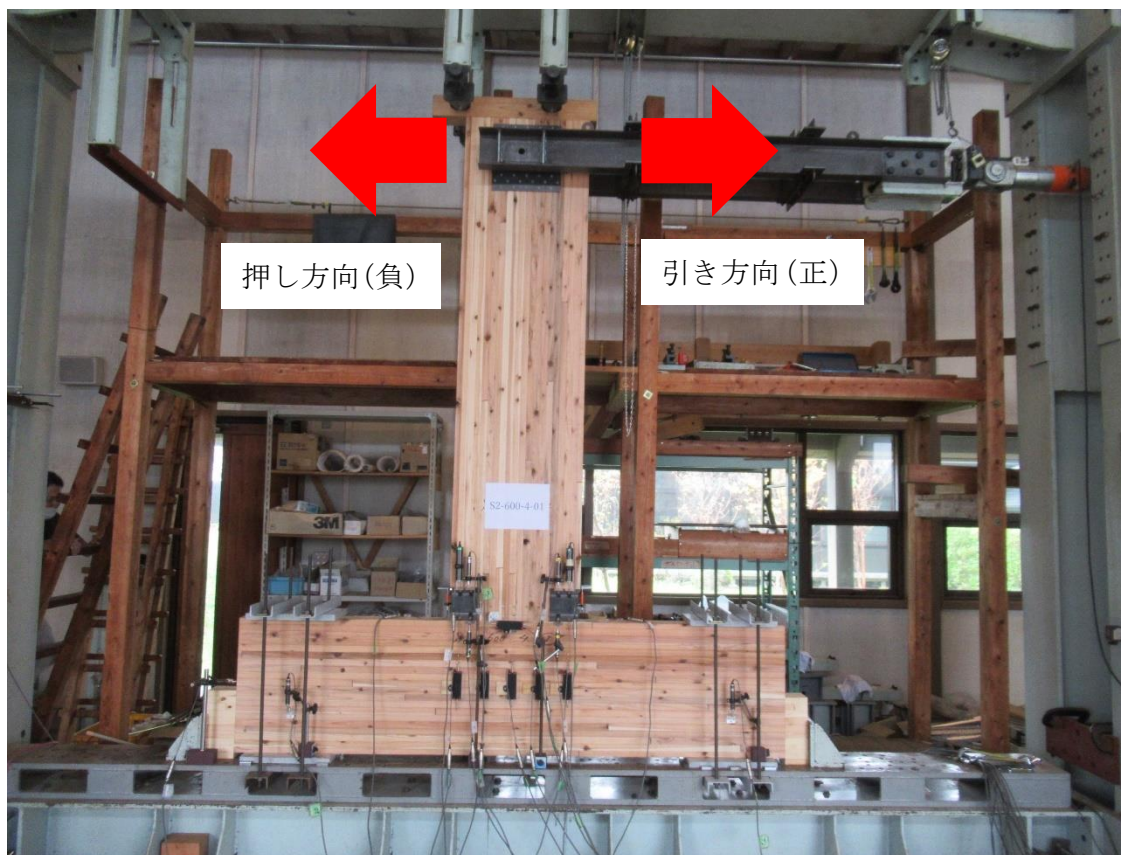
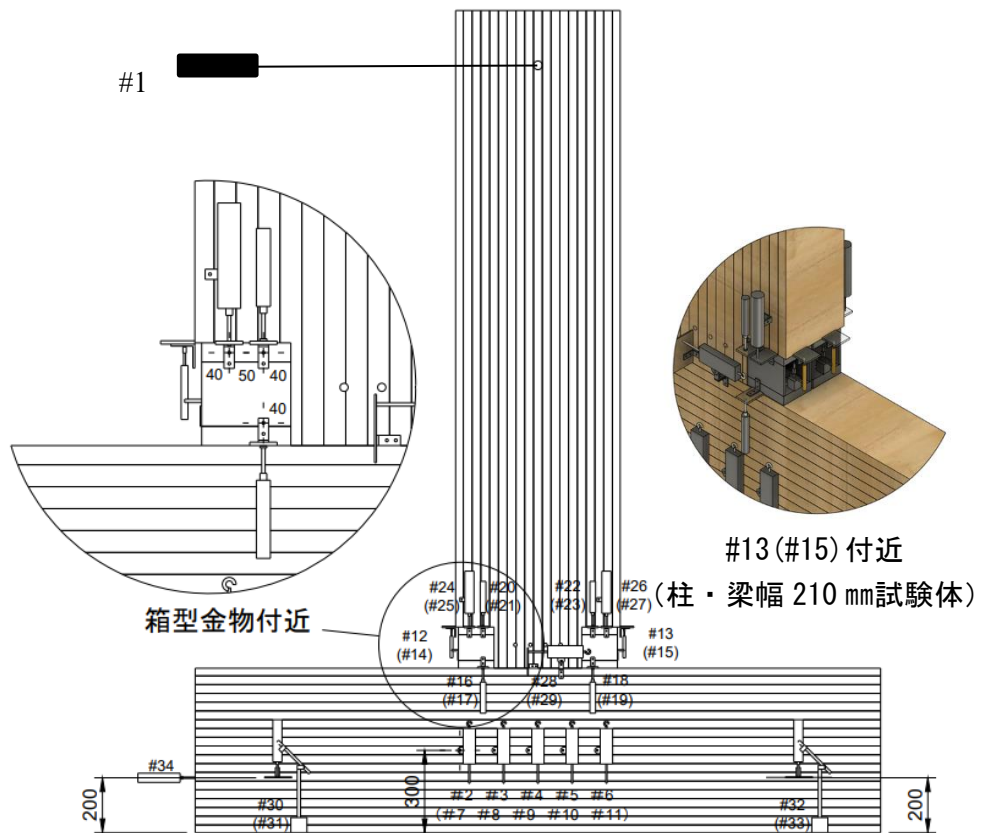


写真 6.3-1 試験方法

第6章 LSB 接合部の実大試験



(i) 変位計取り付け位置

	変位計の検討項目	使用した変位計
#00	荷重	#1 DT500E
#01	試験体水平変位	#2～#11 SDP50
#02～#11	柱・梁（箱型金物）間変位量	#12・#13 CDP10
#12～#13	金物変位量	#14・#15 CDP10 (S4-600-4 のみ)
#14～#15	金物変位量 (S4-600-4 のみ)	#16～#23 CDP25
#16～#19	柱部材・箱型金物 めり込み・開き変位量	#24～#27 CDP50
#20～#27	梁部材・箱型金物 めり込み・開き変位量	#28・#29 SDP50
#28・#29	梁部材水平変位	#30～#34 CDP25
#30～#33	柱部材浮き上がり	
#34	柱部材水平変位	

(ii) 各変位計の詳細

図 6.3-1 変位計の取り付け位置と詳細

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.4. 試験結果

#### 6.4.1. 各試験体のモーメントー荷重関係と破壊性状

各試験体のモーメントー荷重関係と破壊性状を以下に示す。

##### (1) 参考：S2-600-3 (2020年度卒業論文)

01 は HTB の破断と後施工金物 3 の取り付けビスによる集成材の横引張による破壊が最大モーメントに達するとほぼ同時に生じて急激に耐力を失った。02 は最大モーメント付近で後施工金物 3 による集成材の横引張破壊が生じ、つぎのサイクルで HTB の破断により急激に耐力を失った。03 は最大モーメント付近で後施工金物 3 と LSB の引張力による集成材の横引張割れが発生し、つぎのサイクルで HTB の破断により急激に耐力を失った。

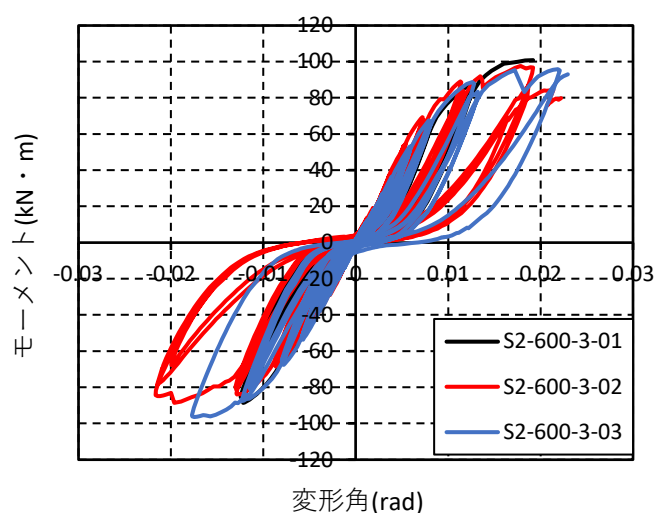
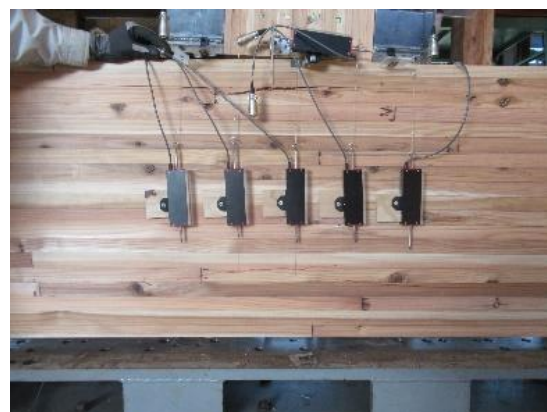


図 6.4.1-1 モーメントー変形角関係



柱材側せん断金物ビス底部付近の横引張割れ



柱材 LSB 底部の引張力による横引張割れ

写真 6.4.1-1 破壊性状



## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (2) S1-600-3

S1-600-3 の試験体では、すべての試験体で、後施工金物 3 のビス底部付近で柱部材の横引張割れが生じた後、HTB の破断で終局に至った。

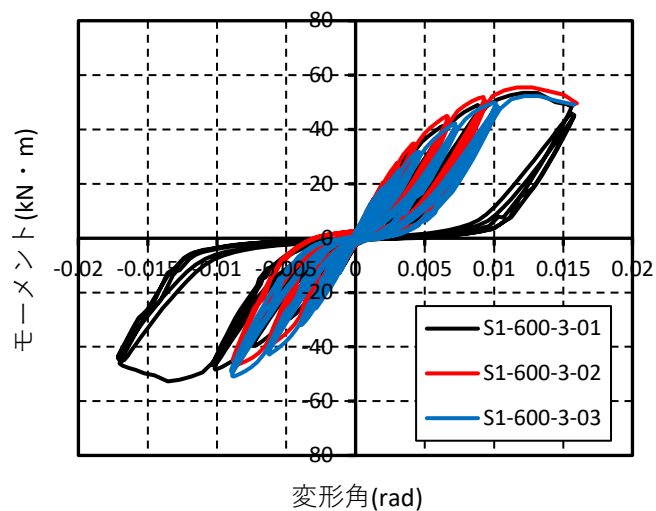


図 6. 4. 1-2 モーメントー変形角関係



柱材側せん断金物ビス底部付近の横引張割れ  
写真 6. 4. 1-2 破壊性状

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (3) S4-600-3

01 は後施工金物 3 のビス底部付近で柱部材の横引張割れが起き、その後横引張割れの進行と箱型金物のめり込みが進行した。02 では後施工金物 3 のビス底部付近で柱部材の横引張割れが先行し、その後柱側の HTB4 本が同時に引張破断した。03 では、柱材上部ラミナから 6 層目あたりで早い段階 (1/50rad) から横引張割れが生じ、その後その割れが進行し最大荷重に達し、破壊した。

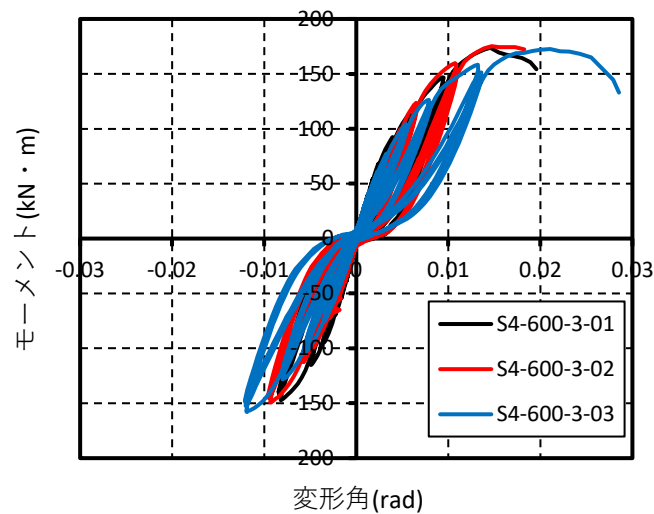


図 6.4.1-3 モーメントー変形角関係



柱材側せん断金物ビス底部付近の  
横引張割れ

柱材せん断割れと曲げ破壊

写真 6.4.1-3 破壊性状



## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (4) K2-600-3

K2-600-3 の試験体では、すべて後施工金物 3 のビス底部付近で柱部材の横引張割れが生じ、同じ加力履歴で HTB の破断が生じ、耐力が急激に下がった。

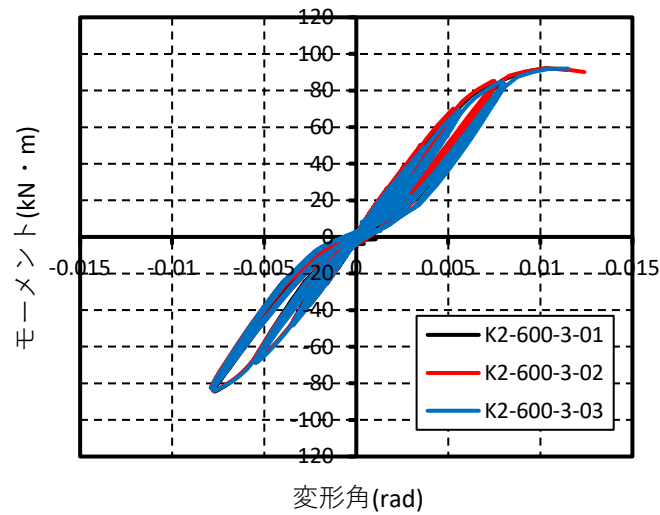


図 6. 4. 1-4 モーメントー変形角関係



柱材側せん断金物ビス底部付近の横引張割れ

写真 6. 4. 1-4 破壊性状

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (5) S2-600-4

S2-600-4 では、すべての試験体で、柱材に損傷（発生順では柱材せん断割れ、LSB 底部の割れ、柱材上部の割れ）がみられ、最終的に HTB の破断で終局に至った。

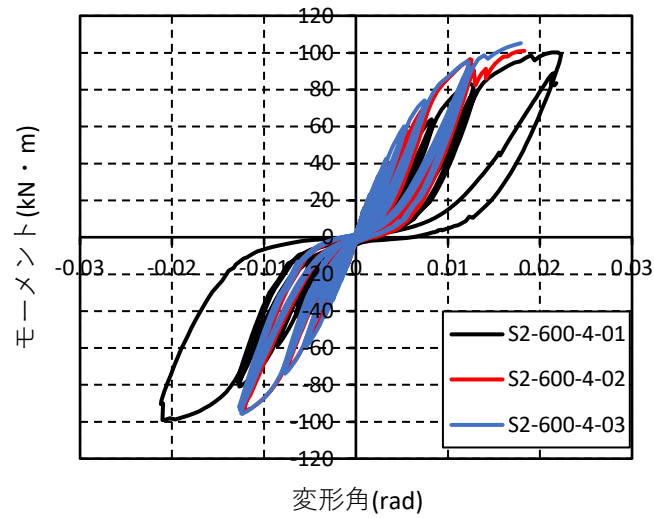


図 6.4.1-5 モーメントー変形角関係



(i) 柱材の損傷

(ii) HTB の破断

写真 6.4.1-5 破壊性状

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (6) S2-750-4

1体目は柱側 LSB の引き抜けが先行し、その後 HTB の破断で終局に至った。2体目は、柱材パネルゾーンにおいて LSB の引張力と圧縮力によるせん断破壊を起こし、その後 HTB の破断で終局に至った。3体目は LSB の破断で終局に至った。

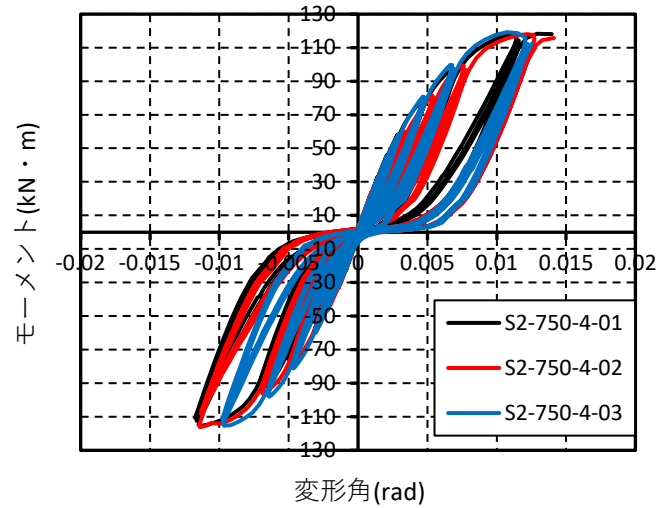


図 6.4.1-6 モーメントー変形角関係



柱材せん断割れ

写真 6.4.1-6 破壊性状

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (7) S4-600-4

すべての試験体で柱材に損傷（発生順では柱材せん断割れ、LSB 底部の割れ、柱材上部の割れ）がみられた。HTB の破断は2体目のみみられたが、他の試験体条件とは異なり、最大曲げモーメント時ではなく、終局変位時での破断となった。1・3体目では、最大曲げモーメント後の加力でも LSB 底部の割れの進行による柱材の回転変形により HTB が破断しなかったと考えられる。

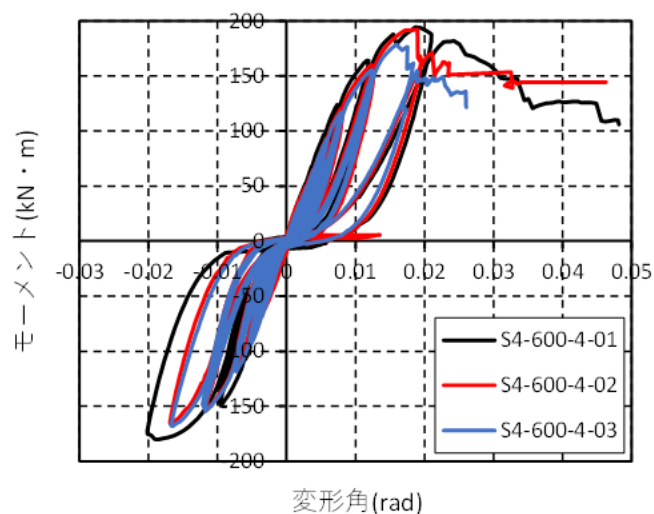


図 6.4.1-7 モーメントー変形角関係



柱材の割れ

梁材箱型金物付近割れ

写真 6.4.1-7 破壊性状

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (8) K2-600-4

K2-600-4 では、すべての試験体で、柱材に小さな割れがみられた。また、梁材の箱型金物付近の切り欠きの隅部からの割れがみられた試験体もあった。柱材に関しては、乾燥ひび割れ、梁材に関しては HTB の破断の衝撃によりできた割れと考えられる。最終的にはすべての試験体で HTB の破断で終局に至った。

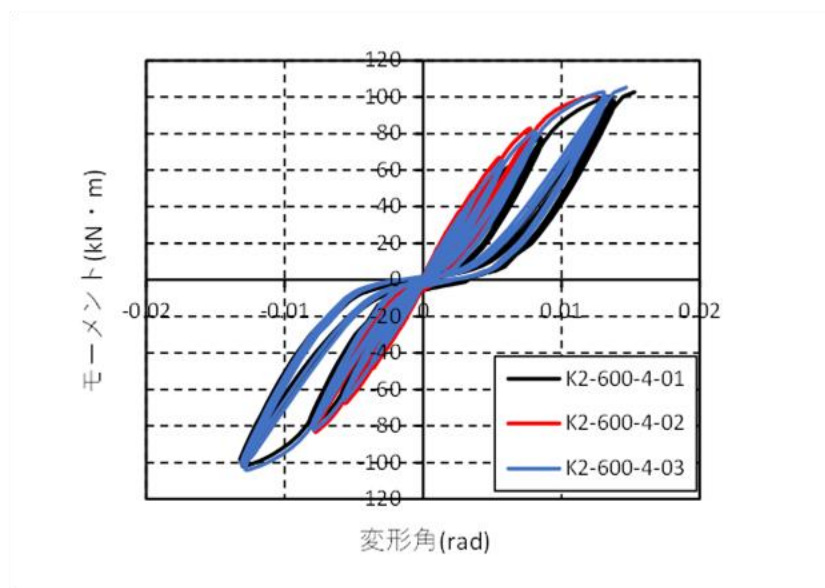


図 6.4.1-8 モーメント-変形角関係



(i) 柱材の損傷

(ii) 梁材箱型金物付近割れ

写真 6.4.1-8 破壊性状

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### (9) K2-750-4

1 体目は梁材の箱型金物付近の切り欠きの隅部からの割れがみられた。梁材に関しては HTB の破断の衝撃によりできた割れと考えられる。2 体目と 3 体目は柱材や梁材の損傷は見られなかった。いずれの試験体も HTB の破断で終局に至った。

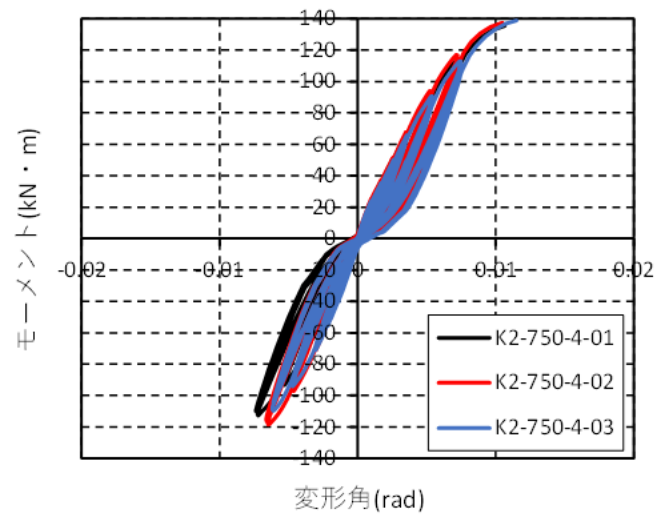


図 6.4.1-9 モーメントー変形角関係

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.4.2. 特性値

表 6.4.2-1～表 6.4.2-9 に実験より得られた特性値一覧を示す。

特性値については、正加力側について評価を行った。また、回転剛性については、最大耐力の 0.1 倍と 0.4 倍を直線で結んだ傾きとした。下限値はモーメントを 5% 下限値、回転剛性は 50% 下限値を採用した。

また、中立軸は、#3、#8 と #5、#10 の変位から算出した引張と圧縮の変位が入れ替わる点とし、圧縮縁からの距離を降伏耐力時及び最大耐力時で計算し、併せて表に示した。

- ・ 梁せい 600mm の試験体

$$\lambda = 425 - 250 \times (\text{ave.}(\#3, \#8)) / ((\text{ave.}(\#3, \#8)) - \text{ave.}(\#5, \#10)) \quad (6.4.2-1)$$

- ・ 梁せい 750mm の試験体

$$\lambda = 537.5 - 325 \times (\text{ave.}(\#3, \#8)) / ((\text{ave.}(\#3, \#8)) - \text{ave.}(\#5, \#10)) \quad (6.4.2-2)$$

表 6.4.2-1 S2-600-3 の特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント				終局モーメント			構造特性係数	$M_u \times 0.2 / D_s$	回転剛性
	$M_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\lambda_{\max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$	$2/3M_{\max}$	$M_u$	$\theta_u$	$D_s$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm	kN・m	kN・m	rad		kN・m	kN.m/rad	
S2-600-3-01	100.8	0.0192	233	61.7	0.0074	299	67.2	91.7	0.0192	0.64	28.8	8324	
S2-600-3-02	97.6	0.0178	240	66.8	0.0067	271	65.1	87.7	0.0178	0.58	30.1	9839	
S2-600-3-03	95.9	0.0218	196	57.9	0.0065	279	63.9	88.1	0.0218	0.55	31.8	8847	
平均値	98.1	0.0196	225	62.1	0.0069	283	65.4	93.0	0.0196	0.59	30.2	9003	
標準偏差	2.05	0.0017	19.0	3.62	0.0004	11.7	1.37	1.78	0.0017	0.03	1.25	628	
下限値	91.6			50.7			61.1	87.4			26.3	8707	

表 6.4.2-2 S1-600-3 の特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント				終局モーメント			構造特性係数	$M_u \times 0.2 / D_s$	回転剛性
	$M_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\lambda_{\max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$	$2/3M_{\max}$	$M_u$	$\theta_u$	$D_s$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm	kN・m	kN・m	rad		kN・m	kN.m/rad	
S1-600-3-01	53.4	0.0121	186	27.8	0.0033	212	35.6	48.5	0.0158	0.47	20.8	8645	
S1-600-3-02	55.5	0.0127	117	30.0	0.0034	198	37.0	51.1	0.0160	0.47	22.0	8992	
S1-600-3-03	52.3	0.0122	205	26.9	0.0036	279	34.9	48.3	0.0158	0.51	19.1	7492	
平均値	53.7	0.0123	225	28.2	0.0034	230	35.8	51.1	0.0159	0.48	20.6	8377	
標準偏差	1.32	0.0003	37.5	1.31	0.0001	35.1	0.88	1.29	0.0001	0.02	1.19	641	
下限値	49.6			24.1			33.0	48.5			16.9	8074	

表 6.4.2-3 K2-600-3 の特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント				終局モーメント			構造特性係数	$M_u \times 0.2 / D_s$	回転剛性
	$M_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\lambda_{\max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$	$2/3M_{\max}$	$M_u$	$\theta_u$	$D_s$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm	kN・m	kN・m	rad		kN・m	kN.m/rad	
K2-600-3-01	92.1	0.0103	220	54.8	0.0040	236	61.4	87.7	0.0115	0.63	28.0	13553	
K2-600-3-02	92.0	0.0101	219	54.0	0.0038	244	61.3	88.2	0.0124	0.58	30.3	14045	
K2-600-3-03	92.0	0.0115	229	52.7	0.0041	261	61.3	87.1	0.0115	0.64	27.2	13009	
平均値	92.0	0.0107	225	53.8	0.0040	247	61.4	87.7	0.0118	0.62	28.5	13536	
標準偏差	0.07	0.0006	4.35	0.85	0.0001	10.2	0.05	0.43	0.0004	0.03	1.32	423	
下限値	91.8			51.2			61.2	87.7			24.3	13336	



## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 表 6.4.2-4 S2-750-4 の特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント			$2/3M_{max}$	終局モーメント		構造特性係数 $Ds$	$M_u \times 0.2/Ds$	回転剛性 $Rj$
	$M_{max}$	$\theta_{max}$	$\lambda_{max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$		$M_u$	$\theta_u$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm		kN・m	rad			
S2-750-4-01	118.3	0.0129	331	64.3	0.0033	352	78.9	107.0	0.0140	0.54	39.8	16430
S2-750-4-02	118.0	0.0122	276	61.2	0.0036	339	78.7	109.3	0.0141	0.55	39.9	16787
S2-750-4-03	119.1	0.0107	255	65.1	0.0034	322	79.4	109.0	0.0125	0.55	40.0	18967
平均値	118.5	0.0119	225	63.5	0.0035	338	79.0	93.0	0.0135	0.54	39.9	17395
標準偏差	0.47	0.0009	31.7	1.68	0.0001	12.1	0.31	1.03	0.0007	0.004	0.07	1122
下限値	117.0			58.2			78.0	89.8			39.7	16866

### 表 6.4.2-5 S4-600-4 の特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント			$2/3M_{max}$	終局モーメント		構造特性係数 $Ds$	$M_u \times 0.2/Ds$	回転剛性 $Rj$
	$M_{max}$	$\theta_{max}$	$\lambda_{max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$		$M_u$	$\theta_u$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm		kN・m	rad			
S4-600-3-01	173.6	0.0146	196	87.8	0.0036	221	115.8	153.4	0.0196	0.44	69.7	24307
S4-600-3-02	175.2	0.0147	243	100.7	0.0049	288	116.8	164.9	0.0182	0.53	61.7	20354
S4-600-3-03	172.6	0.0211	165	92.9	0.0044	250	115.1	157.8	0.0279	0.39	79.9	20968
平均値	173.8	0.0168	225	93.8	0.0043	253	115.9	93.0	0.0219	0.46	70.4	21876
標準偏差	1.06	0.0030	32.1	5.28	0.0005	27.3	0.71	4.72	0.0043	0.06	7.45	1737
下限値	170.5			77.2			113.7	78.2			47.0	21058

### 表 6.4.2-6 S2-600-4 の特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント			$2/3M_{max}$	終局モーメント		構造特性係数 $Ds$	$M_u \times 0.2/Ds$	回転剛性 $Rj$
	$M_{max}$	$\theta_{max}$	$\lambda_{max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$		$M_u$	$\theta_u$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm		kN・m	rad			
S2-600-4-01	100.2	0.0213	238	67.3	0.0091	310	66.8	91.4	0.0223	0.64	28.8	7405
S2-600-4-02	101.0	0.0183	234	61.1	0.0062	297	67.4	92.2	0.0183	0.60	31.0	9780
S2-600-4-03	105.2	0.0179	204	56.4	0.0048	290	70.1	93.0	0.0179	0.53	34.9	11806
平均値	102.1	0.0192	225	61.6	0.0067	299	68.1	93.0	0.0195	0.59	31.6	10793
標準偏差	2.18	0.0015	15.3	4.47	0.0018	8.15	1.45	0.66	0.0020	0.04	2.53	1799
下限値	95.2			47.5			63.5	91.0			23.6	

注) 01 試験体は箱形金物と梁材の間に 1.5mm の隙間があったため、回転剛性が他の試験体よりも低い値となった。回転剛性の平均値は 02 と 03 のみとし、特性値の比較では 01 の試験体は含めないこととする。

### 表 6.4.2-7 K2-600-4 の試験結果と特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント			$2/3M_{max}$	終局モーメント		構造特性係数 $Ds$	$M_u \times 0.2/Ds$	回転剛性 $Rj$
	$M_{max}$	$\theta_{max}$	$\lambda_{max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$		$M_u$	$\theta_u$			
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm		kN・m	rad			
K2-600-4-01	103.6	0.0153	221	60.5	0.0061	186	69.1	92.8	0.0153	0.67	27.8	9937
K2-600-4-02	100.9	0.0126	267	55.5	0.0044	230	67.2	90.2	0.0126	0.63	28.6	12584
K2-600-4-03	105.2	0.0147	282	56.6	0.0048	223	70.1	94.0	0.0147	0.61	31.0	11906
平均値	103.2	0.0142	225	57.5	0.0051	213	68.8	93.0	0.0142	0.64	29.1	11476
標準偏差	1.78	0.0012	26.2	2.13	0.0007	19.3	1.19	1.61	0.0012	0.03	1.36	1123
5%下限値	97.6			50.8			65.1	88.0			24.8	10947



## 第6章 LSB 接合部の実大試験

表 6. 4. 2-8 K2-750-4 の試験結果と特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント			$2/3M_{\max}$	終局モーメント			構造特性係数 $D_s$	$M_u \times 0.2/D_s$	回転剛性 $R_j$
	$M_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\lambda_{\max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$		$M_u$	$\theta_u$				
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm		kN・m	rad				
K2-750-4-01	135.4	0.0107	295	77.8	0.0041	355	90.3	123.8	0.0107	0.64	36.2	18243	
K2-750-4-02	137.4	0.0105	283	83.4	0.0044	361	91.6	127.4	0.0105	0.60	36.7	18631	
K2-750-4-03	138.9	0.0115	298	81.0	0.0045	383	92.6	126.0	0.0115	0.53	37.5	17587	
平均値	137.2	0.0109	225	80.7	0.0043	366	91.5	125.7	0.0109	0.59	36.8	18153	
標準偏差	1.44	0.0004	6.53	2.30	0.0002	11.8	0.96	1.49	0.0004	0.04	0.51	431	
5%下限値	132.7			73.4			88.5	121.0			35.2	17950	

表 6. 4. 2-9 S4-600-4 の試験結果と特性値

試験体名	最大モーメント			降伏モーメント			$2/3M_{\max}$	終局モーメント			構造特性係数 $D_s$	$M_u \times 0.2/D_s$	回転剛性 $R_j$
	$M_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\lambda_{\max}$	$M_y$	$\theta_y$	$\lambda_y$		$M_u$	$\theta_u$				
	kN・m	rad	mm	kN・m	rad	mm		kN・m	rad				
S4-600-4-01	194.2	0.0186	241	114.1	0.0066	282	129.4	175.7	0.0295	0.46	77.1	17348	
S4-600-4-02	192.4	0.0190	245	118.3	0.0077	274	128.3	172.4	0.0235	0.56	61.9	15450	
S4-600-4-03	178.6	0.0159	240	103.0	0.0066	292	119.1	156.3	0.0228	0.53	58.9	15562	
平均値	188.4	0.0178	225	111.8	0.0070	283	125.6	168.1	0.0253	0.51	66.0	16120	
標準偏差	6.96	0.0014	2.04	6.48	0.0005	7.58	4.64	8.49	0.0030	0.04	8.01	870	
5%下限値	166.4			91.4			111.0	141.4			40.7	15710	

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.5. 特性値比較

樹種、せん断金物、材せい、材幅、LSB 本数の違いによる比較を以下に示す。

#### ・樹種による比較

図 6.5-1～図 6.5-3 に樹種の違いによる比較を示す。

最大モーメントは、高力ボルトの破断で決まるため、スギとカラマツとの差はなかった。

降伏モーメントは、S2-600-3 と K2-600-3 および S2-600-4 と K2-600-4 との比較ではカラマツが 5%ほど低いですが、S2-750-4 と K2-750-4 ではカラマツが高い結果となった。

回転剛性については、S2-600-3 と K2-600-3 および S2-600-4 と K2-600-4 との比較ではカラマツの試験体がスギの試験体よりも高い傾向を示したが、S2-750-4 と K2-750-4 の試験体においては、スギの試験体と大きな差はなかった。

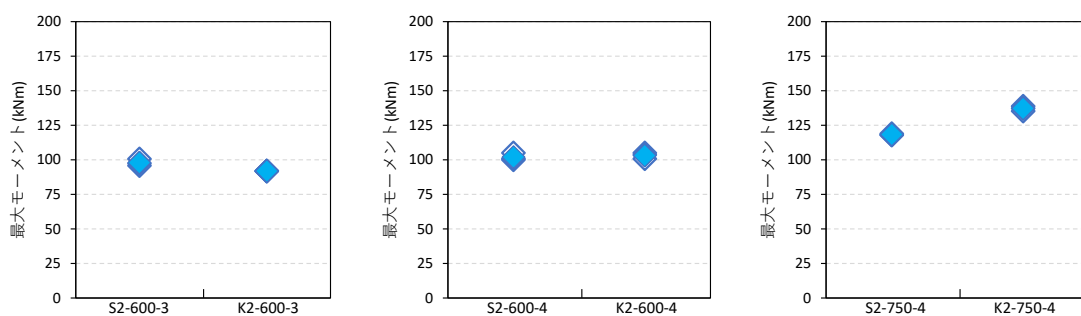


図 6.5-1 最大モーメント

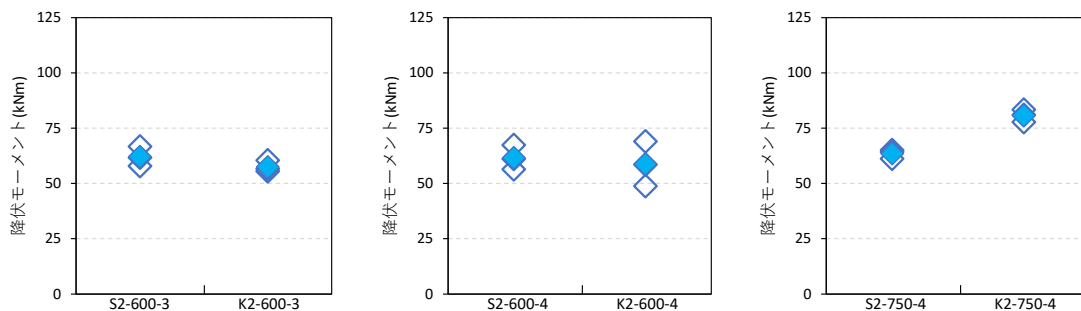


図 6.5-2 降伏モーメント

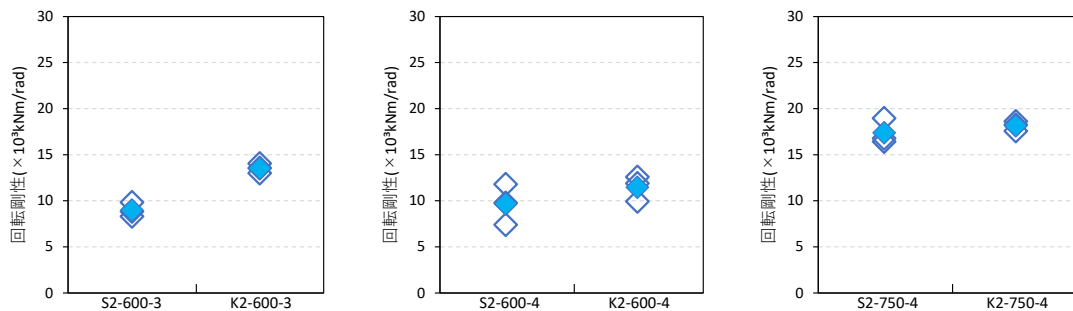


図 6.5-3 回転剛性

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### ・せん断金物による比較

図 6.5-4～図 6.5-6 にせん断金物の違いによる比較を示す。

最大モーメントは、高力ボルトの破断で決まるため、せん断金物の形状による大きな差はなかった。

降伏モーメントは、S2-600-3 と S2-600-4 および K2-600-3 と K2-600-4 の比較ではせん断金物による差はなかった。これは後施工金物 3 仕様の試験体で生じた柱側せん断金物ビス底部での横引張割れと後施工金物 4 仕様の試験体で生じた柱のせん断割れの発生したループがほぼ同じでだったと考えられる。S4-600-3 と S4-600-4 で比較すると S4-600-4 が高いが、断面幅が 210 mm となり、柱のせん断割れ時の耐力が柱材横引張割れ時の耐力を上回ったためと考えられる。

回転剛性については、S2-600-3 と S2-600-4 ではほぼ変わらないが、K2-600-3 と K2-600-4、S4-600-3 と S4-600-4 では、後施工金物 4 仕様の試験体が低い結果となった。後施工金物 4 のルーズホールにより梁の回転変形への抵抗がなくなったためと考えられる。

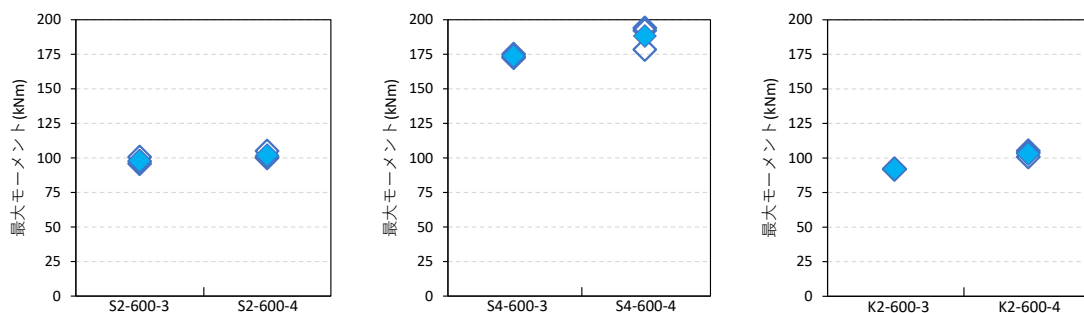


図 6.5-4 最大モーメント

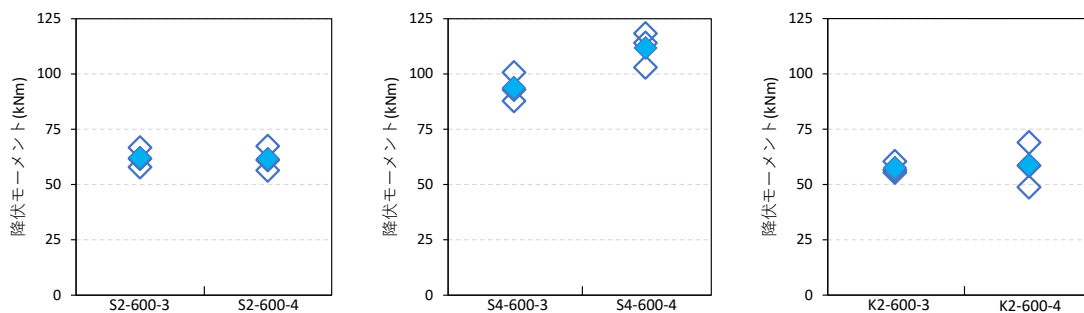


図 6.5-5 降伏モーメント

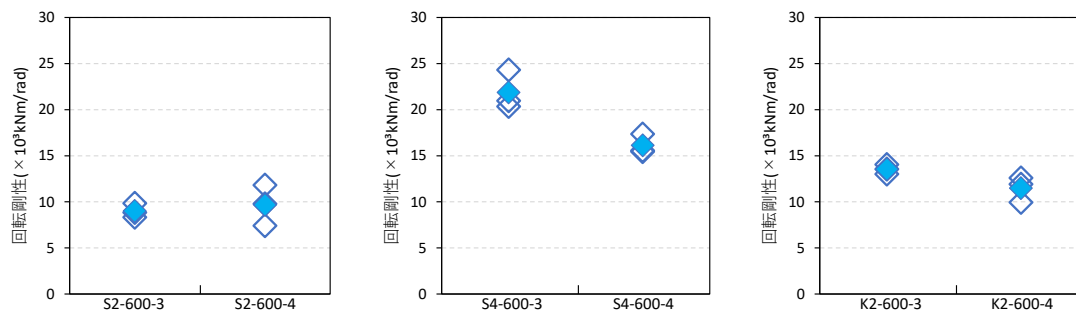


図 6.5-6 回転剛性

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### ・材せいによる比較

図 6.5-7～図 6.5-9 に材せいの違いによる比較を示す。

最大モーメントは、材せい 750mm の方がスギの試験体では約 16%、カラマツの試験体では約 33%高い値となった。材せいが 600mm から 750mm になることで応力中心距離が 450mm から 600mm に 1.33 倍となるため、カラマツは材せいに比例して最大モーメントが上昇した。

降伏モーメントは、材せい 750mm の方がスギの試験体では約 3%、カラマツの試験体では約 37%高い値となった。カラマツは材せいに比例して降伏モーメントが上昇した。

回転剛性は、材せい 750mm の方がスギの試験体では約 80%、カラマツの試験体では約 58%高い値となった。回転剛性の簡略計算では、応力中心間距離の 2 乗 (=1.78) に比例するため、スギは材せいに比例して回転剛性が上昇した。

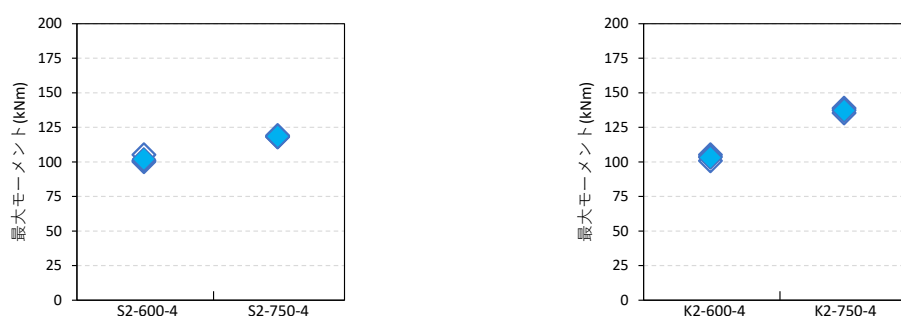


図 6.5-7 最大モーメント

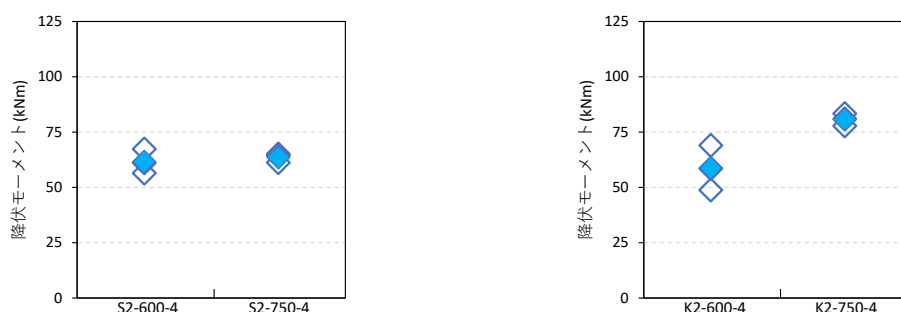


図 6.5-8 降伏モーメント

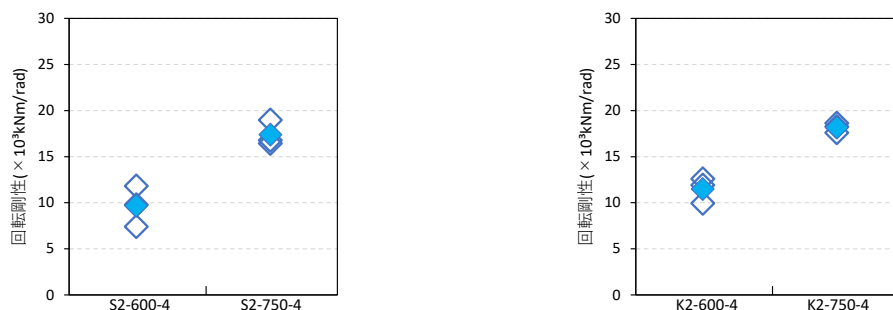


図 6.5-9 回転剛性

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### ・材幅による比較

図 6.5-10～図 6.5-12 に材幅の違いによる比較を示す。

最大モーメントは、断面幅が 105mm から 210mm により、後施工金物 3 仕様で 1.8 倍、後施工金物 4 仕様で 1.7 倍となり、断面幅の増加分の上昇とはならなかった。

降伏モーメントは、後施工金物 3 仕様で 1.6 倍、後施工金物 4 仕様で 1.8 倍となり、断面幅の増加分の上昇とはならなかった。

回転剛性は、後施工金物 3 仕様で 2.3 倍、後施工金物 4 仕様で 1.3 倍となった。後施工金物 3 仕様で断面幅の増加分以上の上昇となった要因は、後施工金物 3 が 2 基になることで、梁の回転変形への抵抗が材幅 105mm の試験体よりも大きくなったためと考えられる。

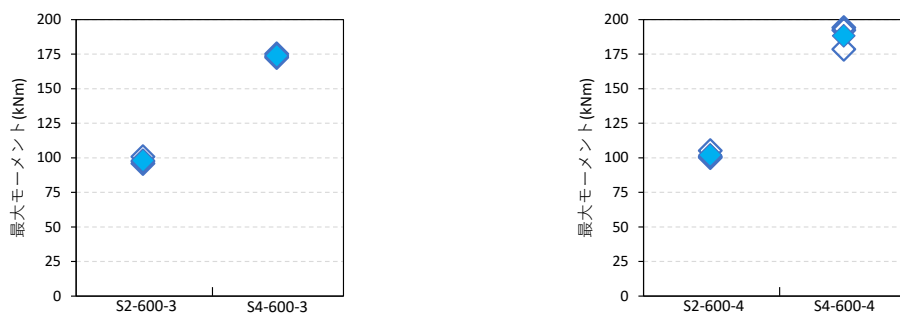


図 6.5-10 最大モーメント

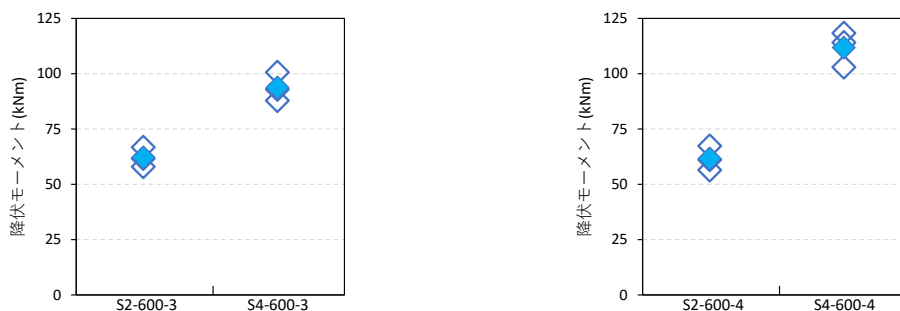


図 6.5-11 降伏モーメント

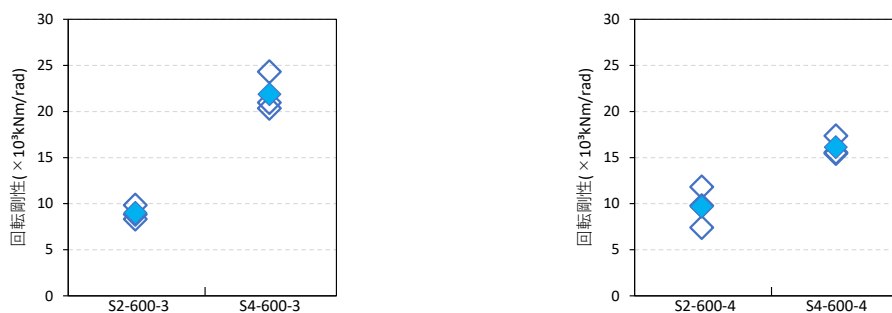


図 6.5-12 回転剛性

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### ・LSB 本数による比較

図 6.5-13～図 6.5-15 に LSB 本数の違いによる比較を示す。

最大モーメントは、LSB 本数が 1 本となることで 0.55 倍、降伏モーメントは 0.46 倍、回転剛性は 0.85 倍となった。モーメントは、本数の減少分だけ減少しているが、回転剛性は、本数の減少分よりも高い値となった。これは、回転剛性の性能として大きく寄与する外側の LSB 間距離が同じであったためと考えられる。

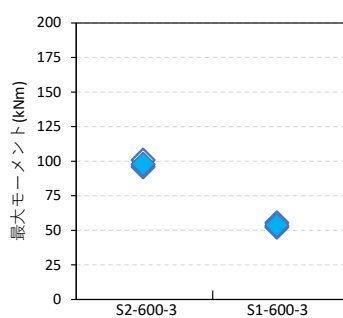


図 6.5-13 最大モーメント

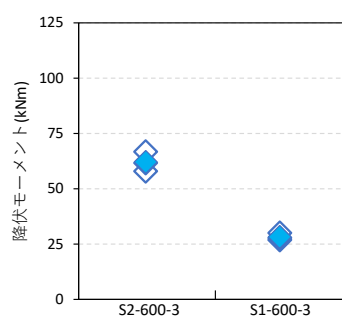


図 6.5-14 降伏モーメント

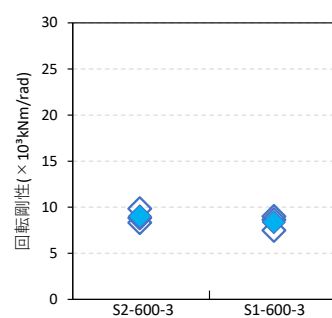


図 6.5-15 回転剛性

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.6. 計算値との比較

#### 6.6.1. 接合部性能の推定

##### ・計算値算出方法

実験結果と、中立軸を剛比をもとに求め算出した計算結果を比較する。図 6.6.2-1 に LSB による柱梁接合部の中立軸を剛比で求める力学モデル<sup>18)</sup>を示す。このモデルを基に、下に示すの式により回転剛性 ( $R$ ) と最大及び降伏モーメント ( $M_{max}$  及び  $M_y$ ) を算定した。

<回転剛性  $R$  について>

引張側のバネは柱側の LSB のすべり係数 ( $K_{LC}$ )、箱形金物の引張剛性 ( $K_J$ )、そして梁側の LSB のすべり係数 ( $K_{LB}$ ) の直列バネとし、圧縮側は引張側と同様のバネに箱形金物の柱へのめり込み剛性 ( $K_{WC}$ ) を加えた。

<モーメントについて>

モーメントについては、最大時・降伏時それぞれ、2020 年度卒業論文で実施の要素試験における LSB1 本あたりの値と HTB の値の最小値で  $P_{max}$  と  $P_y$  を決定し、それらを用いて算出した。表 5.3.4-1、表 5.3.4-2 に 2020 年度卒業論文<sup>17)</sup> で実施の要素試験の結果と HTB の特性値を示す。なお高力ボルトの耐力については S2-600-3 では強度区分 12.9、それ以外の試験体については強度区分 10.9 を使用したため、それぞれの強度区分による耐力で計算した。

最大モーメントの計算値は、柱端部側に使用した LSB の HTB が破断する耐力で決定するとし、降伏モーメントの計算値は、柱端部側に使用した LSB の HTB が降伏する耐力もしくは柱側の LSB が引き抜き降伏で決定するものとした。

$$R = Kt(J_k - \lambda)(2J_k - h) \quad (6.6.1-1)$$

$$\lambda = \frac{Kc(h - J_k) + KtJ_k}{(Kt + Kc)} \quad (6.6.1-2)$$

$$K_T = \frac{K_{LC} \cdot K_J \cdot K_{LB}}{K_{LC} \cdot K_J + K_J \cdot K_{LB} + K_{LC} \cdot K_{LB}} \quad (6.6.1-3)$$

$$K_C = \frac{(K_{LC} + K_{WC}) \cdot K_J \cdot K_{LB}}{(K_{LC} + K_{WC}) \cdot K_J + K_J \cdot K_{LB} + (K_{LC} + K_{WC}) \cdot K_{LB}} \quad (6.6.1-4)$$

ここで、

$R$  : 回転剛性

$K_T$  : 引張側剛性

$\lambda$  : 圧縮側の材端から中立軸までの距離

$h$  : 柱せい

$K_C$  : 圧縮側剛性

$K_{LC}$  : 柱側の LSB のすべり係数

$K_J$  : 箱形金物の引張剛性

$K_{LB}$  : 梁側の LSB のすべり係数

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

$K_{WC}$  : 箱形金物の柱へのめり込み剛性

最大モーメント

・材幅 105mm の試験体

$$M_{max} = \left\{ 1 + \frac{(J_M - b - \lambda)}{(J_M - \lambda)} \right\} \cdot P_{max} \cdot (J_k - (h - J_k)) \quad (6.6.1-5)$$

・材幅 210mm の試験体

$$M_{max} = 2 \left\{ 1 + \frac{(J_M - b - \lambda)}{(J_M - \lambda)} \right\} \cdot P_{max} \cdot (J_k - (h - J_k)) \quad (6.6.1-6)$$

降伏モーメント

・材幅 105mm の試験体

$$M_y = \left\{ 1 + \frac{(J_M - b - \lambda)}{(J_M - \lambda)} \right\} \cdot P_y \cdot (J_k - (h - J_k)) \quad (6.6.1-7)$$

・材幅 210mm の試験体

$$M_y = 2 \left\{ 1 + \frac{(J_M - b - \lambda)}{(J_M - \lambda)} \right\} \cdot P_y \cdot (J_k - (h - J_k)) \quad (6.6.1-8)$$

ここで、 $P_{max}$  : 接合具の最大耐力、 $P_y$  : 接合具の降伏耐力

表 6. 6. 1-1 要素試験の結果と HTB の特性値 (最大モーメント算出)

	S1-600	S2-600	S2-750	S4-600
LSB繊維直交引抜き最大耐力	165.30	135.20	135.20	97.74
LSB繊維平行引抜き最大耐力	160.00	124.75	124.75	115.07
HTB最大耐力	84.30	101.16	84.30	84.30
最小値(Pmax)	84.30	101.16	84.30	84.30

表 6. 6. 1-2 要素試験の結果と HTB の特性値 (降伏モーメント算出)

	S1-600	S2-600	S2-750	S4-600
LSB繊維直交引抜き降伏耐力	77.10	66.35	66.35	48.97
LSB繊維平行引抜き降伏耐力	81.90	74.95	74.95	49.66
HTB降伏耐力	75.87	91.04	75.87	75.87
最小値(Py)	75.87	66.35	66.35	48.97



第6章 LSB 接合部の実大試験

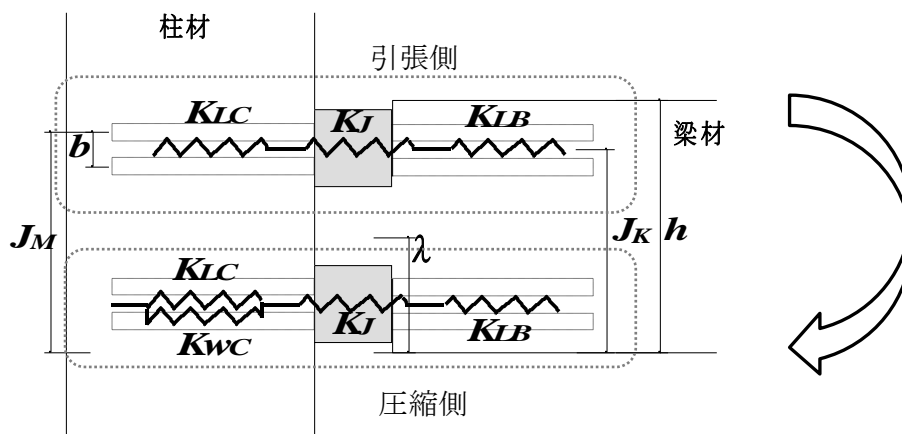


図 6. 6. 1-1 LSB による柱梁接合部の解析モデル

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### ・実験値と計算値との比較

中立軸を詳細計算した計算結果と実験値との比較を図 6.6.2-2 に示す。

最大モーメントは全体的に良い一致であった。計算値は高力ボルトの破断であり、実験においても高力ボルトの破断と想定通りとなったためと考えられる。

降伏モーメントは、危険側となった試験体のみ見られた。これは、想定していた柱側の LSB 引き抜き降伏耐力よりも先に柱材の横引張割れが生じたためと考えられる。

回転剛性は、S4-600-3 については、せん断金物が S2-600 と同様にせん断金物による梁材の引張抵抗が起こっていたが、S2-600 とは異なり、柱部材のせん断破壊が進んだために柱材の曲げ剛性が下がり、相反する二つのことが起こったことで、実験値と計算値に近い値を示したと考えている。S4-600-4 では S4-600-3 と比較すると実験値が推定値に近づいた。これは後施工金物 4 に変更したことで、スリットにより梁材の回転変形への抵抗がなくなったためと考えられる。

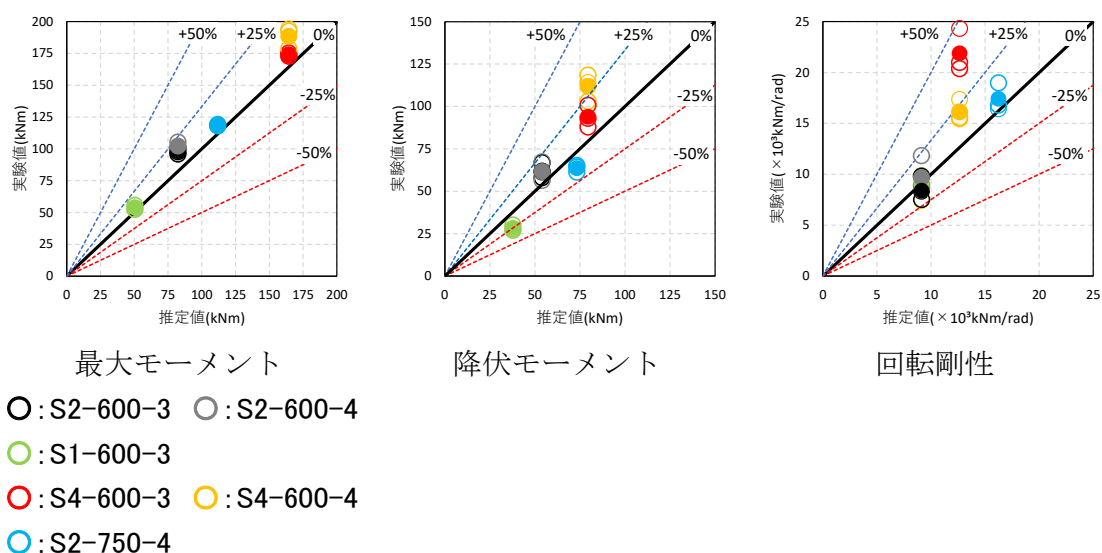


図 6.6.1-2 中立軸を詳細計算した計算結果と実験値の比較

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.6.2. 梁材耐力の推定

5章において、簡易的な耐力推定を行った。また、2020年度卒業論文<sup>17)</sup>において本章接合部評価のための実大要素試験を実施している。5章の検討はLSBが木材の繊維平行方向に埋め込まれたものであるため、梁材における耐力をつるまき線モデルによる式を用いて算出した。また、薄板試験による物性値 $f_v$ および $F$ と、中谷式による分布も併せて算出し、比較検討する。

#### ・2020年度卒業論文<sup>17)</sup>における試験概要

実大の接合部試験と同様にスギ異等級対称構成集成材（強度等級E65-F225）を用いた。図6.6.2-1に試験体を示す。幅は実大試験と同様に105mmとし、LSBは埋め込み長さ500mmとした。写真6.6.2-1に示す。载荷には2000kN万能試験機（島津製作所：UH-2000kNC）を使用し、単調引張载荷で試験を行った。特性値は表6.6.2-1のようになった。

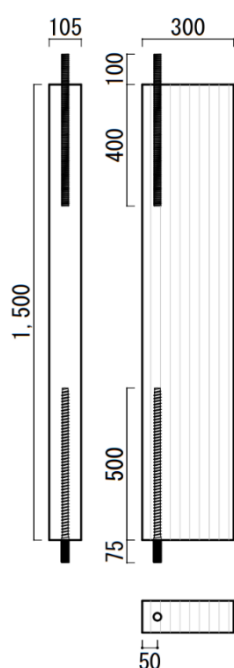


図 6. 6. 2-1 試験体概要



写真 6. 6. 2-1 試験の様子

表 6. 6. 2-1 特性値一覧

試験体名	最大耐力	降伏耐力		終局耐力	初期剛性	破壊性状
	$P_{max}$	$P_y$	$2/3P_{max}$	$P_u$	$K(0.1P_{max}-0.4P_{max})$	
	kN	kN	kN	kN	kN/mm	
LTPa1-01	157.9	89.4	105.2	143.8	253.1	LSB引き抜け
LTPa1-02	171.4	99.7	114.2	153.2	239.1	GIR引き抜け
LTPa1-03	150.7	79.9	100.5	137.9	287.8	LSB引き抜け+部材割裂
平均値	154.3	84.6	102.9	140.9	270.4	
標準偏差						
5%下限値						
50%下限値						

※灰色部の値を短期許容耐力とする。

※LTPa1-02は反力側のGIR引き抜けとなったため、評価から除外した。

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### ・実験値と推定値の比較

図 6.6.2-2 に実験値と推定値の比較を示す。中谷式における分布では、実験値をかなり過小評価しているが、つるまき線モデルを用いた分布では実験値を比較的精度よく推定している。この結果から、つるまき線モデルを用いた推定値の比較は実大の埋め込み長さでも検討できることが確認できた。

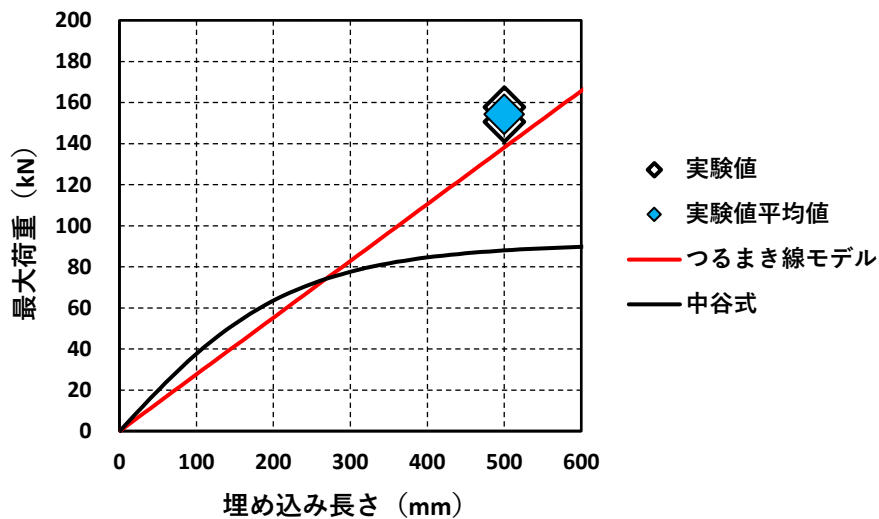


図 6.6.2-2 実験値と推定値の比較

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

### 6.7. 本章のまとめ

2020年度卒業論文<sup>17)</sup>での試験体に加えて、部材の樹種、せん断金物の形状、部材断面が異なる柱及び梁材によるモーメント抵抗接合部について試験を実施し、そのデータ収集をおこない、以下の知見を得た。

<実験結果について>

#### ① 樹種の違いについて

・スギ (S2-600-4) からカラマツ (K2-600-4) に変更することによって、金物類の塑性や破断で決定する降伏モーメントや最大モーメントはあまり変わらない結果となった。回転剛性については、カラマツがスギの約 1.2 倍の性能を示した。

・スギ (S2-750-4) からカラマツ (K2-750-4) に変更することによって、降伏モーメントや最大モーメントはカラマツが高い結果となった。回転剛性については、カラマツの方が高い値となったが、スギと大きく差はなかった。

#### ② 後施工金物 3 と後施工金物 4 との違いについて

・後施工金物 3 (S2-600-3) と後施工金物 4 (S2-600-4) の違いにおいては、最大モーメント、降伏モーメント、回転剛性いずれも両者の間にあまり差はなかった。

・後施工金物 3 (S4-600-3) と後施工金物 4 (S4-600-4) の違いにおいては、最大モーメントはそこまで差はなかったが、降伏モーメントは 2 割ほど S4-600-4 の方が高く、回転剛性は 3 割ほど低い結果となった。

#### ③ 破壊性状については、昨年度実施した後施工金物 3 仕様の試験体 (S1-600-3、S2-600-3、S4-600-3、K2-600-3) では柱材のビス底部付近で横引張割れが生じたが、昨年度実施した後施工金物 4 仕様の試験体 (S2-750-4)、今年度実施した後施工金物 4 仕様の試験体 (S2-600-4、S4-600-4、K2-600-4、K2-750-4) では、柱材のビス底部付近で横引張割れを防ぐことができた。ただ、スギの試験体 (S2-600-4、S4-600-4) においては新たに柱材に損傷 (発生順では柱材せん断割れ、LSB 底部の割れ、柱材上部の割れ、) がみられ、最終的に HTB の破断で終局に至る破壊性状となった。カラマツの試験体 (K2-600-4、K2-750-4) は多少のひび割れ等は見られたものの、木材側に大きな損傷はなく高力ボルトの破断のみとなった。

<接合部における推定値と実験値の比較について>

中立軸を詳細計算した推定値と実験値との比較を行った。

まず、最大モーメントは全体的に良い一致であった。計算値は高力ボルトの破断であり、実験においても多数の試験体で高力ボルトの破断と想定通りとなったためと考えられる。次に降伏モーメントは、危険側となった試験体が見られた。これは、想定していた柱側の LSB 引き抜き降伏耐力よりも先に柱材の横引張割れが生じたためと考えられる。回転剛性は、S4-600-3 については、せん断金物が S2-600 と同様にせん断金物による梁材の引張抵抗が起こっていたが、S2-600 とは異なり、柱部材のせん断破壊が進んだために柱材の曲げ剛性が下がり、相反する二つのことが起こったことで、実験値と計算値に近い値を示したと考えている。S4-600-4 では S4-600-3 と比較すると実験値が推定値に近づいた。これは後施工金物 4 に変更したことで、スリットにより梁材の回転変形が S4-600-3 と比較して容

## 第6章 LSB 接合部の実大試験

易となったためと考えられる。

全体として後施工金物4に変えたことにより、せん断金物ビス底部付近の横引張割れを防ぐことができた。なお、スギにおいては柱材のせん断割れが起きてしまい、特性値の上昇にはあまり期待できないと考えられる。また樹種を変えたことにより、最大モーメントや降伏モーメントは若干高い特性値が得られるが、回転剛性については部材断面により異なることが分かった。

<梁材耐力における推定値と実験値の比較について>

2020年度卒業論文<sup>17)</sup>において本章接合部評価のための実大要素試験の結果を5章の推定式を用いて算出した。つるまき線モデルを用いた推定値は中谷式よりも精度よく推定でき、実大の埋め込み長さでも検討できることが確認できた。

## 第7章 結論

## 第7章 結論

### 7.1. まとめと今後の提案

本論では LSB 設計の効率化のために、仕様が多数存在する LSB を想定しボルト径やピッチ等を変えた引き抜き試験を実施し、傾向を検証した。また、材料要素試験（傾斜加力面の縦圧縮試験・椅子型せん断試験）を実施し、材料性能で評価できる推定式を提案した。その結果を下記に示す。

#### LSB 引き抜き試験

第2章では、LSB の形状や樹種、埋め込み長さを変えた試験体で LSB の引き抜き試験を行い、引き抜き性能に与える影響について検証した。

LSB のピッチの違いによる比較では、最大荷重に大きな差はないものの、多くの条件でピッチが小さいほど、最大荷重が大きくなることを確認した。また、LSB のボルト径による比較に関しては、多くの条件で  $\phi 23$  が一番高く、その次に  $\phi 21$  と  $\phi 25$  が同等の値となった。オウシュウアカマツにおけるねじ角度の違いによる比較においては、ねじ角度  $37^\circ$  が  $40^\circ$  に比べ高い値となった。また、 $37^\circ$  は  $40^\circ$  に比べ、ばらつきが大きいことを確認した。

埋め込み長さの違いによる比較においては、スギ・オウシュウアカマツの試験体ともにおおむね埋め込み長さに比例して、最大荷重が増加することを確認した。また、埋め込み長さが大きくなるほど、ばらつきが大きくなった。

以上の結果より、LSB の形状において、両樹種ともにボルト径の大小についての傾向はみられなかったものの、ピッチについては小さいほど高い値を示すこと、ねじ角度が小さいほど高い値を示し、ねじ形状の違いにより引き抜き性能に影響を及ぼすことが分かった。また、埋め込み長さと最大荷重は比例の関係であったため、任意の埋め込み長さで推定できれば、他の埋め込み長さでも推定できることが確認できた。

今後は、実大長さである埋め込み長さ 500mm 程度での実験を行い、傾向を確認するとともに、埋め込み長さが長くなると割裂破壊が生じやすくなるため、断面寸法の影響も考えていくことと、複数本で影響する範囲を調べる必要があると考える。

#### 傾斜加力面における縦圧縮試験

第3章では、LSB のねじ角度の傾斜を想定し、傾斜加力面における縦圧縮試験を行い、ねじ角度の大きさが圧縮性能に及ぼす影響について検証した。また、横圧縮試験もを行い、ハンキンソン式との比較を併せて行った。

角度の違いによる比較においては、スギでは角度  $0^\circ$  から  $18.5^\circ$  まで一定の値となったが、角度  $20^\circ$  以降は多少低下した。オウシュウアカマツについては角度が大きくなるほど荷重が多少低下することを確認した。ハンキンソン式との比較においては、両樹種ともに実験値がハンキンソン式による関係以上の値となった。

以上の結果より、傾斜加力面の傾斜角度が大きくなると、最大荷重は若干下がるものが確認できたが、ハンキンソン式の関係ほどの低下率ではなかった。また、2章で用いた LSB のねじ角度は  $40^\circ$  または  $37^\circ$  であったが、その半分の角度である  $20^\circ$  と  $18.5^\circ$  における縦圧縮試験体の値を見ると、傾斜角度  $0^\circ$  の試験体との違いに差はなかった。よって、縦圧縮強度はねじ角度の大小に大きく影響しないことが確認できた。



## 第7章 結論

### 椅子型せん断試験

第4章では、JIS形状および、せん断高さや加力面幅をLSBのピッチやねじ部が木部にかかる幅を想定したLSB形状の椅子型せん断試験を実施した。

特性値については、両樹種ともに $b=1$ の実験値を加力面積で除した値を圧縮強度として比較すると、3章の圧縮要素試験の縦圧縮試験体の圧縮強度に近い値となった。 $b=3 \cdot 5\text{mm}$ については、せん断高さに関わらず一定の値となり、JIS形状の試験体のせん断強度に近い傾向を示した。また、加力面幅での比較においては両者による大きな差は見られなかった。

以上の結果から、加力面積が十分であれば、せん断高さや加力面幅の違いによるせん断強度には大きな差がなかったため、試験体寸法の違いによる寸法効果はなく、LSBのピッチの大きさに関わらず、引き抜き性能としてのせん断強度は変わらないことを確認できた。

### 実験値と推定値の比較

第5章では、第2章で行ったLSB引き抜き試験の実験値を第3章・第4章の材料要素試験の値を用いて推定した。

せん断式による比較では第4章の実験値と式1.2.1-1を用いて推定値を算出し、実験値と比較した。スギではJISで $0.33 \sim 0.64$ 、 $b=1$ では $0.56 \sim 0.86$ 、 $b=3$ では $0.33 \sim 0.53$ 、 $b=5$ では $0.39 \sim 0.76$ となった。JIS・ $b=3 \cdot b=5$ では比率がおおよそ $0.35 \sim 0.65$ の範囲となったが、 $b=1$ では圧縮破壊で決まったため比率が異なった。オウシュウアカマツにおいてはJISで $0.24 \sim 0.54$ 、 $b=1$ では $0.27 \sim 0.68$ 、 $b=3$ では $0.24 \sim 0.47$ 、 $b=5$ では $0.26 \sim 0.50$ となった。JIS・ $b=3 \cdot b=5$ では比率がおおよそ $0.25 \sim 0.50$ の範囲となったが、 $b=1$ では圧縮破壊で決まったため比率が異なった。ピッチごとで比較すると、両樹種ともすべての条件で比率の大小とピッチの大小で傾向はみられなかった。

圧縮式による比較では第3章の実験値と式1.2.1-2を用いて推定値を算出し、実験値と比較した。スギにおいて加力面傾斜角度 $\alpha=0^\circ$ の試験体では $0.46 \sim 0.94$ 、 $\alpha=20^\circ$ の試験体では $0.41 \sim 1.08$ となり、両者で比率の範囲に大きな差はなかった。ピッチごとで比較すると、ピッチの大きいP8やP10では比率が大きくなり、P6では比率が小さくなる傾向がみられた。なお、P8やP10の一部の条件で実験値を精度よく推定できている試験体があり、LSBの引き抜き性能は木材の圧縮性能で決まる可能性が確認できた。オウシュウアカマツにおいて加力面傾斜角度 $\alpha=0^\circ$ の試験体では $0.29 \sim 0.66$ 、 $\alpha=20^\circ$ の試験体では $0.29 \sim 0.59$ となり、両者で比率の範囲に大きな差はなかった。ピッチごとで比較すると、ピッチの大きいP8やP10では比率が大きくなり、P6では比率が小さくなる傾向がみられた。

以上のせん断式と圧縮式の両者を比較した。赤松らの理論によれば、引き抜き性能はせん断力(式1.2.1-1)として計算した値もしくは、圧縮力(式1.2.1-2)により計算した値の最小値としているが、両樹種とも圧縮式により決まることが分かった。スギの試験体において推定値が実験値とよく合っている試験体があるため、理論上ではLSB形状によっては圧縮破壊により最大荷重が決まると考えられるが、多くの試験体で実験値と推定値との間に大きな差があるため、ねじ部にかかる木部が圧縮破壊する前に他の破壊が起きていることが予想された。そこで、新たに横引張破壊に関する検討を行ったが、多くの試験体で実験値と推定値との間に差があった。

## 第7章 結論

木部有効断面積を考慮した検討を行った。既往の研究により実験値と推定値と差がみられた要因が、木部の有効断面積の取り方であると考えた。そこで、中谷式の応力のつり合いモデルを参考にし、LSB ねじ部周辺木部にかかるせん断力が LSB ねじ部先端にかかる軸力と釣り合うつるまき線モデルを作成した。結果として、スギでは多くの試験体で推定値が実験値を安全側に評価しており、オウシュウアカマツについては、基準線が中央値付近を通過し、多くの試験体で精度よく実験値を評価できていた。

埋め込み長さの違いによる検討ではつるまき線モデルを用いて LSB の埋め込み長さによる違いによる比較を併せて行った。つるまき線モデルについて、スギは 200mm 以上で過小評価となったが、オウシュウアカマツは平均値を比較的良好に推定できた。中谷式についてはスギにおいて 200mm 以上で平均値を過小評価となった。オウシュウアカマツでは 50・100mm において平均値を若干の過大評価、250・300mm においては若干の過小評価となり、樹種や埋め込み長さにより精度が異なった。

今後の検討として、木部有効断面積を決定する定数  $c$  を考えていく必要がある。今回の検討では LSB 形状に関わらず  $c=1.5$  としたが、実際には LSB 径により異なっていく可能性がある。有限要素解析法により、LSB 径・埋め込み長さ方向についてどれだけ応力作用範囲があるか確認できれば、本推定式は木材の材料性能のみで評価できると考える。

### LSB 接合部の実大試験

2020 年度卒業論文<sup>17)</sup>での試験体に加えて、部材の樹種、せん断金物の形状、部材断面が異なる柱及び梁材によるモーメント抵抗接合部について試験を実施した。

樹種の違いについて、スギ (S2-600-4) からカラマツ (K2-600-4) に変更することによって、金物類の塑性や破断で決定する降伏モーメントや最大モーメントはあまり変わらない結果となった。回転剛性については、カラマツがスギの約 1.2 倍の性能を示した。また、スギ (S2-750-4) からカラマツ (K2-750-4) に変更することによって、降伏モーメントや最大モーメントはカラマツが高い結果となった。回転剛性については、カラマツの方が高い値となったが、スギと大きく差はなかった。

後施工金物 3 と後施工金物 4 との違いについては、後施工金物 3 (S2-600-3) と後施工金物 4 (S2-600-4) の違いにおいては、最大モーメント、降伏耐力モーメント、回転剛性いずれも両者の間にあまり差はなかった。後施工金物 3 (S4-600-3) と後施工金物 4 (S4-600-4) の違いにおいては、最大モーメントはそこまで差はなかったが、降伏モーメントは 2 割ほど S4-600-4 の方が高く、回転剛性は 3 割ほど低い結果となった。

破壊性状については、昨年度実施した後施工金物 3 仕様の試験体 (S1-600-3、S2-600-3、S4-600-3、K2-600-3) では柱材のビス底部付近で横引張割れが生じたが、昨年度実施した後施工金物 4 仕様の試験体 (S2-750-4)、今年度実施した後施工金物 4 仕様の試験体 (S2-600-4、S4-600-4、K2-600-4、K2-750-4) では、柱材のビス底部付近で横引張割れを防ぐことができた。ただ、スギの試験体 (S2-600-4、S4-600-4) においては新たに柱材に損傷 (発生順では柱材せん断割れ、LSB 底部の割れ、柱材上部の割れ、) がみられ、最終的に HTB の破断で終局に至る破壊性状となった。カラマツの試験体 (K2-600-4、K2-750-4) は多少のひび割れ等は見られたものの、木材側に大きな損傷はなく高力ボルトの破断のみとなった。

## 第7章 結論

簡略的なばねモデルを用いて接合部における推定値を算出し実験値と比較した。なお、中立軸は詳細計算した。まず、最大モーメントは全体的に精度よく推定できた。計算値は高力ボルトの破断であり、実験においても多数の試験体で高力ボルトの破断と想定通りとなったためと考えられる。次に降伏モーメントは、危険側となった試験体のみ見られた。これは、想定していた柱側の LSB 引き抜き降伏耐力よりも先に柱材の横引張割れが生じたためと考えられる。回転剛性は、S4-600-3 については、せん断金物が S2-600 と同様にせん断金物による梁材の引張抵抗が起こっていたが、S2-600 とは異なり、柱部材のせん断破壊が進んだために柱材の曲げ剛性が下がり、相反する二つのことが起こったことで、実験値と計算値が近い値を示したと考えている。S4-600-4 では S4-600-3 と比較すると実験値が推定値に近づいた。これは後施工金物 4 に変更したことで、スリットにより梁材の回転変形が S4-600-3 と比較して容易となったためと考えられる。全体として後施工金物 4 に変えたことにより、せん断金物ビス底部付近の横引張割れを防ぐことができた。なお、スギにおいては柱材のせん断割れが起きてしまい、特性値の上昇にはあまり期待できないと考えられる。また樹種を変えたことにより、最大モーメントや降伏モーメントは若干高い特性値が得られるが、回転剛性については部材断面により異なることが分かった。

梁材耐力について、2020 年度卒業論文<sup>17)</sup> の本章接合部評価のための実大要素試験の結果を 5 章の推定式を用いて算出した。つるまき線モデルを用いた推定値は中谷式よりも精度よく推定でき、実大の埋め込み長さでも検討できることが確認できた。

なお、実大の集成材での埋め込みとなると、応力作用範囲が異なる可能性がある。材料の寸法効果など影響がないか今後考えていく必要がある。

## 第7章 結論

### 謝辞

この研究が修士論文として形にできたのは、広島大学先進理工系科学研究科建築学プログラムの森拓郎准教授の、丁寧かつ熱心なご指導のおかげです。実験計画に迷ったときや、結果が思うようにいかなかったときに、いつも親身になって相談に乗ってくださいました。本当にありがとうございました。同専攻教授の中村尚弘先生、准教授の寺本篤史先生には論文作成にあたり、副査としてご助言を賜りました。また、本研究は建築構造力学研究室の先輩・後輩をはじめとするたくさんの人に支えられて行うことができました。ここに深く感謝いたします。

宮崎県木材利用技術センター中谷誠様には、私が学部4年時から本研究の打ち合わせや実験の実施に関して様々な意見をいただきました。また打合せの際には、いつもの確かな意見をいただきました。いただいた意見のおかげで新たな課題が見え、解決していくことで本研究がより良いものになったと思います。ここに深くお礼申し上げます。

株式会社エヌ・シー・エヌの小谷竜城様には、私が学部4年時から本研究の打ち合わせで様々な意見をいただきました。この研究で行き詰った場面において、様々な解決策を提示していただきました。ここに深くお礼申し上げます。

宮崎県木材利用技術センター笹山様には、この研究の大半の試験体を作製していただきました。いつも加工していただく数が多く、かつ複雑な形状であるにもかかわらず、すべて丁寧に加工していただきました。ここに深く感謝を申し上げます。

広島大学モノづくりプラザの皆様には、本研究2章の実験で使用する治具の作製・補助をしていただきました。難しい加工に関しても、丁寧に加工していただきました。納期が短い治具に関しては、打ち合わせをした当日と一緒に教えていただきながら加工をした日もありました。ここに深く謝意申し上げます。

本研究は、「令和2~4年度 木材産業・木造建築活性化対策のうち中高層建築物を中心としたCLT等の木質建築部材の利用促進事業」の補助を受け、行いました。ここに深く感謝いたします。

最後になりましたが、本研究は私一人ではなく、たくさんの方々に支えられて実施できました。特に、両親には大学院の進学を快く受け入れ、日々の生活を支えてくれました。6年間の大学生活の中で私に関わってくれた全ての人々への感謝を忘れずにこれからまた新たな道へ進んで行こうと思います。

本当にありがとうございました。

2023年2月

## 第7章 結論

### 参考文献

- 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2月8日参照
- 2) 出展：<https://www.ki-ki.info/index.html>
- 3) 日本建築学会編：木質構造接合部設計マニュアル，第1版第1刷，pp.134-148，2009.11
- 4) ラグスクリューボルト研究会編：ラグスクリューボルト接合 設計マニュアル(Ver.1.0)，初版，2012.1
- 5) 坪井航輝、豊岡佳樹、井上涼、森拓郎、中谷誠、伊藤大貴、森達登、田中圭、腰原幹雄：大断面集成材を用いたラグスクリューボルト接合に関する基礎的研究，日本建築学会中国支部研究報告集，p.205-208，2020
- 6) 赤松明、古澤富志雄：タッピングインサートの強度性能（第2報）木口面にねじ込んだ場合の引き抜き抵抗の推定，木材学会誌 p.311-317，1984.12
- 7) 河村進、岡本滋史、亀崎和海、荒木康弘、小谷竜城、秋山信彦、車田慎介：円形孔を有する集成材梁の耐力に関する解析的研究 その1 材料強度．日本建築学会大会梗概集，p.265-266，2018.9
- 8) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル，p.25，2011
- 9) 中谷誠，小松幸平：ラグスクリューボルトの引抜き性能発現機構（第1報），木材学会誌 p.125-130，2005.2
- 10) 中谷誠，小松幸平：ラグスクリューボルトの引抜き性能発現機構（第2報）繊維平行方向引き抜き理論の構築，木材学会誌 p.311-317，2005.5
- 11) 中谷誠，小松幸平：ラグスクリューボルトの引き抜き性能発現機構（第3報）繊維直交方向引き抜き理論の構築，木材学会誌 p.160-167
- 12) 瀧野敦夫，室伏祐美，大坪祐介，森拓郎，中谷誠，小谷竜城，功刀厚志：ラグスクリューボルト接合部の引抜き時における応力伝達機構の解明，日本建築学会構造系論文集 第86巻 第779号，p.97-106，2021.1
- 13) 大坪祐介，森拓郎，中谷誠，小谷竜城：ラグスクリューボルト接合部の引き抜き時における応力伝達機構 その1 実験による検討，日本建築学会大会梗概集，p.103-104，2019.9
- 14) 室伏祐美，瀧野敦夫，大坪祐介，森拓郎：ラグスクリューボルト接合部の引き抜き時における応力伝達機構 その2 解析による検討，日本建築学会大会梗概集，p.105-106，2019.9
- 15) 本多航，落合陽，青木謙治，稲山正弘：木質構造用ビスの繊維直交方向引き抜き抵抗メカニズムと耐力推定式の提案，木材学会誌 Vol. 67, No. 4, p.178-187，2021
- 16) 竹内麻美子，石谷淳，田中圭，後藤泰男，井上正文：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構について（その3）Volkersen モデルによる理論値の適合性及び接合設計法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，p.60-61，2007.8
- 17) 坪井航輝：中大規模木造建築を想定した LSB 接合部の基礎的研究，広島大学卒業論文集，2021.3
- 18) ラグスクリューボルト研究会編：ラグスクリューボルト接合 設計マニュアル(Ver.2.0)，p.55-67，2015.10