

博士論文

CLT 構造における引きボルト接合部の  
力学特性と耐力算定に関する研究

鈴木 圭

## 目次

1. 緒言	1
1.1 研究の目的と背景	1
1.2 CLT の品質及び製造方法	3
1.3 CLT 工法の種類	6
1.4 CLT 接合部の要求性能	7
1.5 想定する応力と接合部位	10
1.6 用語の定義	12
2. 既往の研究	13
2.1 CLT 接合部に関する研究	13
2.1.1 海外における CLT 接合部の研究	13
2.1.2 日本における CLT 接合部の研究	15
2.2 引きボルトに関する研究	17
3. 集成材及び CLT 材の圧縮試験	18
3.1 実験の目的	18
3.2 ラミナ材の材料物性	18
3.3 試験体の製造	20
3.4 試験体の仕様	21
3.5 試験体の材料物性	23
3.6 試験方法	26
3.7 試験結果	27
3.8 CLT 圧縮剛性の推定式の提案	40
3.9 実験値と推定値の比較	46
CLT の材料物性(曲げヤング係数及び密度)の違いによる影響	67
4. 試験	
4.1 実験の目的	67
4.2 試験体	67
4.3 試験方法	90
4.4 試験結果	91
4.5 材料物性と特性値の関係	100
4.6 まとめ	112
5. 縁距離、端距離及びラミナ境界部位置の影響試験	113
5.1 実験の目的	113
5.2 試験体	113
5.3 試験方法	126
5.4 試験結果	127
5.5 考察	140
5.6 まとめ	142

6.	CLT 厚さ及びボルト本数の影響試験	143
6.1	実験の目的	143
6.2	試験体	143
6.3	試験方法	149
6.4	試験結果	150
6.5	面圧面積と剛性についての考察	166
6.6	まとめ	169
7.	引きボルト接合部の推定式の提案	170
7.1	破壊のメカニズムに対する考察	170
7.2	推定式の策定	172
7.3	実験値と推定値の比較	177
7.4	まとめ	204
8.	耐力壁のせん断性能の推定	205
8.1	本章の目的	205
8.2	ボルトの先行降伏を想定した接合部の設計方法	205
8.3	壁のせん断性能の推定方法と推定結果	205
9.	結言	210
	文献リスト	213

## 1. 緒言

### 1.1 研究の目的と背景

ひき板を直交方向に積層接着した CLT(クロスラミネイティドティンバー)は、既に欧州では中高層建築物の構造部材として実用化されている。近年、我が国において公共建築物等の木造化を推進していくための手段のひとつとして、この CLT を使ったパネル工法(以下、CLT 工法)が注目されている。特に CLT の原材料となる木材は中小径木及び間伐材を活用することができるため、CLT の生産及び利活用を普及促進することにより地域林業・木材産業の活性化が期待される。

文献<sup>1)</sup>によると CLT 材は 1981 年に初めて製品を表す用語としてドイツ語で「Brettspertholz(BSP)」と称され、その頃は充複梁のウェブ材等として使われていた。その後、2000 年に Schickhofer と Hasewend によって「CLT」という英語に訳されるに至った。CLT に関する本格的な研究活動は 1990 年にグラーツ工科大学において開始され、その後多くの国際的研究プロジェクトがそれに続き、欧州・北米を中心として CLT パネルの製造および CLT パネルを用いた中高層建築物の建設が進められている。なお、欧州における CLT 研究開発の現況については渡部の総説<sup>2)</sup>が参考となる。

我が国では平成 25 年 12 月には「直交集成板の日本農林規格」として CLT の製造規格が制定され、平成 28 年 3 月 31 日の材料の品質(平 12 国交告第 1446 号)及び強度(平 13 国交告第 1024 号)、CLT 部材等の燃えしろ設計(平 12 建告第 1358 号及び平 27 国交告第 253 号)が改正された。その翌日の 4 月 1 日には CLT を用いた建築物の一般設計法として平 28 国交告第 611 号(以下「告 611 号」という。)及び構造計算書の内容が規定された平 28 国交告第 612 号が制定されたことにより、時刻歴応答解析以外の構造計算ルートによって構造設計できる道筋が開かれた。本告示の解説書として「2016 年公布・施行 CLT 関連告示等解説書」<sup>3)</sup>が平成 28 年 6 月に刊行され、更にその具体的な設計法・施工方法については「CLT を用いた設計施工マニュアル」<sup>4)</sup>が平成 28 年 10 月に刊行された。また、これらに伴う講習会が一般社団法人日本 CLT 協会により開催されたこと等により、告示の内容が普及されているところである。

CLT 工法の構造設計を行う場合、CLT パネルはほぼ剛体として扱われるため、CLT 端部のめり込み変形を除けば、その変形性能のほとんどは接合部が担っていると言っても過言ではない。CLT 工法の接合部の主な役割としては、パネル間相互の引張接合やせん断接合が挙げられる。せん断接合方法には、鋼板添え板ビス接合、構造用合板をスプラインとしたビス接合等<sup>5)6)</sup>があり、海外では長ビスを斜め打ちしたビス接合も用いられている。引張接合方法としては LSB(ラグスクリューボルト)接合、ビス接合、引きボルト接合等、様々なものが想定される。ビス接合やドリフトピン接合等については、CLT の繊維平行層と繊維直交層の割合から EYT 式における面圧定数を調整することによって大過ない程度に推定可能であり<sup>7)8)</sup>、ビスが埋め込まれる部分の繊維平行層と繊維直交層の割合と配置から精緻に求めることも可能である。LSB 接合については、中谷らによって課題は残っているものの引き抜き理論式が CLT 構造に適用可能ということが分かっている。<sup>9)</sup>しかしながら、引きボルト接合については、製材や集成材と違って CLT 特有の破壊性状を示すため、新たな推定式が必要となる。そこで本研究では引きボルト接合の引張性能について、実験を行い、新たな設計式による推定を行った。なお、本研究の一部は、2014 年度日本建築学会大会[近畿](2014 年 9 月)で発表している

10)。

引きボルト接合の用途としては、幅1~2m程度のパネルを用いて構面を形成した建築物を想定し、その建築物の壁パネルがロッキング挙動を示した場合の接合方法を想定している(図1.1-1)。壁パネルは上部荷重による座屈に抵抗するため、鉛直方向を強軸方向として用いるのが一般的であり、引きボルト接合も強軸方向のみ検討すれば良い。一方、垂れ壁パネルと壁パネルを接合する場合、垂れ壁パネルと壁パネル側は強軸方向が異なるため、引きボルト接合部としては両方向に対する検討が必要となる。

なお、製材の梁や集成材のラーメン接合部で使用される引きボルトの施工方法は図1.1-2に示すように材端部に穴を開けて座金を納める方法が圧倒的に多いと思われるが、本稿で採用した施工方法は図1.1-3に示すようにパネル側面部に貫通孔を開けて座金を納める方法である。壁パネルが幅方向に連なる場合や直交する壁パネルと十字に交わる場合は施工が不可能となるためである。

引きボルト接合の特色としては、CLTを現しにしたい場合は意匠性や防火上の理由から不向きと判断されることが多いが、施工が容易なため、施工現場の工期の短さをメリットとするCLT工法に最適な接合方法と言える。他の接合方法と比較すると、例えばビス接合は必要耐力が大きくなればそれに応じてビス本数を増やさなければならず、施工性が悪くなるが、引きボルト接合は座金の面積とボルトの材質や寸法を変えていくことで強度性能を調整することができるため、施工性がほとんど変わらないまま、低層から中高層までの建築物に適用が可能となる。

このため本研究では、接合部を設計するための設計式等を整備して一般的な仕様とすることを目的として、スギCLTを使った引きボルト実験のデータを収集・分析を行う。

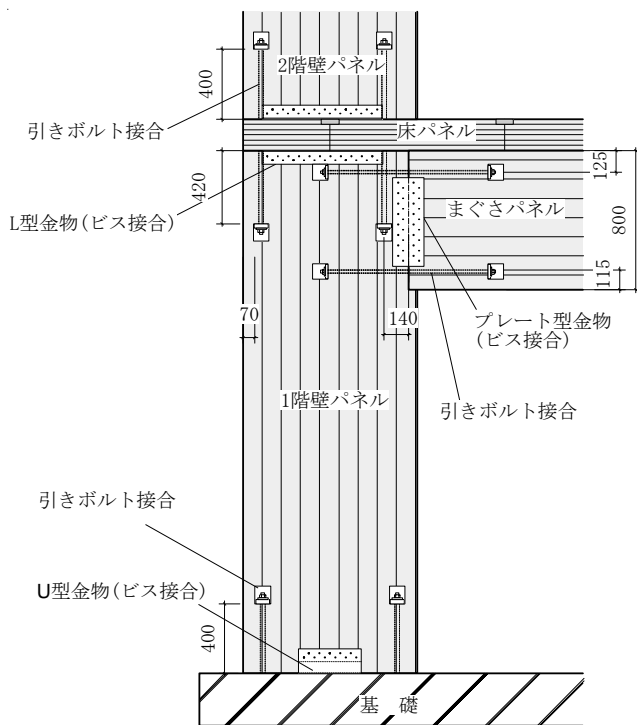


図 1.1-1 CLT 工法の接合部位

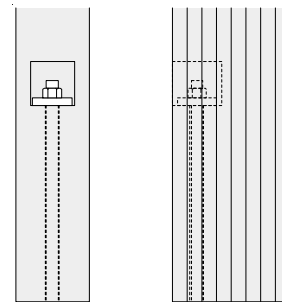


図 1.1-2 集成材ラーメン接合部等に見られる引きボルト接合

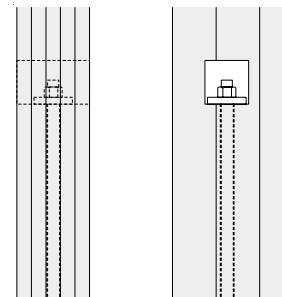


図 1.1-3 本報で検証する引きボルト接合

## 1.2 CLT の品質及び製造方法

### (1) CLT の製造方法

#### 1) ラミナの製造方法

試験体に使用するひき板は積層接着する時点のラミナ仕上がりの断面寸法になるように製材し、含水率が 15% 以下になるよう乾燥を行っている。その後モルダーで荒ら仕上げしたひき板を、グレーディングマシンで曲げヤング係数を測定し、等級区分する。等級区分されたラミナは原版のサイズに合わせて縦継ぎ(フィンガージョイント)し、ラミナ長さを調節する。

#### 2) パネルの製造方法

パネルの製造方法は、幅はぎの有無によって大きく異なる。

銘建工業の CLT パネルに代表される幅はぎ無し CLT は、1 層目のラミナを敷き詰め表面に接着剤を塗布し、直交になるよう 2 層目以降のラミナを積み重ねていき、仮組を行う。仮組された状態で側圧を掛けてラミナの側面の隙間を限りなく無くすように形を整えた後、積層方向に一定時間圧縮する。

一方、山佐木材の CLT パネルに代表される幅はぎ CLT は、まずラミナ側面に接着剤を塗布し、1 層毎の幅はぎパネルを製造する。プレーナー掛けして表面を均一にし、表面に接着剤を塗布した後、幅はぎパネルを繊維方向が直角になるように重ねていき、一定時間圧縮する。

### (2) CLT の構成

直交集成板の日本農林規格では、集成材と同じく異等級構成(Mx)と同一等級構成(S)があり、前者は床のような曲げ材、後者は壁のような圧縮を受ける用途を想定して規格化されている。ただし、集成材のような非対称異等級は存在しない。構成の種類は 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライ、7 層 7 プライ、9 層 9 プライの 6 種類であるが、実証試験を伴うシミュレーション計算によって強度が確認された場合は上記以外とすることも可能である。図 1.2-1 に直交集成板の構成を示す。図のとおりプライとは厚み方向のラミナ単位に区切ったときの数を表し、層とは繊維方向が同一のラミナ単位で区切ったときの数を表している。外層とは CLT 表面に面する層を指し、内層はそれ以外の内部に位置する層を指す。強軸方向とは外層の繊維方向の向きに平行な方向であり、弱軸方向とは強軸方向に対して直角の方向を指す。

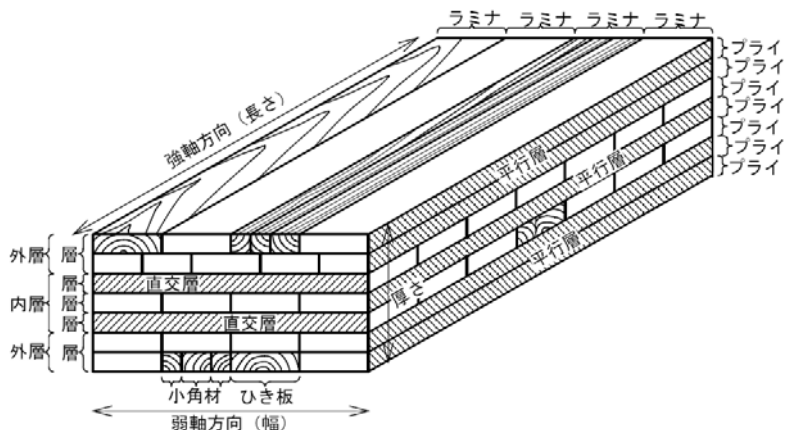


図 1.2-1 直交集成板の構成 (「直交集成板の日本農林規格」より抜粋)

### (3) CLT の等級区分

ラミナの等級区分には集成材等と同様、機械等級区分と目視等級区分があり、曲げヤング係数によって区分される。区分の種類にはヤング係数の上限値の有無によって A 種構成(上限無し)と B 種構成(上限有り)に分かれ、前者は機械等級区分及び目視等級区分、後者は機械等級区分のみの適用となる(表 1.2-1、表 1.2-2)。CLT パネルはこれらのラミナを組み合わせて表 1.2-3 及び表 1.2-4 のとおり構成する。目視等級については、Mx120 や S120 に加え、B 種構成が作製できないので注意が必要である。

### (4) 直交集成板の日本農林規格と告 611 号等との適用範囲の違い

直交集成板の日本農林規格ではラミナ厚さを 12 mm 以上 50 mm 以下、ラミナ幅を 300 mm 以下と定めているが、告 611 号ではラミナ厚さの適用範囲を 24 mm 以上 36 mm 以下と定めている。

なお、CLT パネルを構造耐力上主要な部分に用いる場合にあっては平 13 国交告第 1024 号の規定に適合する必要があるため、CLT パネルの幅及び長さが 360 mm 以上であることが必要である。

表 1.2-1 A 種構成に用いる区分ラミナの強度性能の基準

等級区分の方法	樹種	等級又は樹種群	曲げヤング係数 (Gpa又は $10^3\text{N/mm}^2$ )		曲げ強さ (MPa又は $\text{N/mm}^2$ )		引張強さ (MPa又は $\text{N/mm}^2$ )	
			平均値	下限値	平均値	下限値	平均値	下限値
機械等級区分	指定無し	M120A	12.0	10.0	42.0	31.5	25.0	19.0
		M 90A	9.0	7.5	34.5	26.0	20.5	15.5
		M 60A	6.0	5.0	27.0	20.0	16.0	12.0
		M 30A	3.0	2.5	19.5	14.5	11.5	8.5
目視等級区分	ダフリカカラマツ、サザンパイン、ベイマツ及びウエスタンラーチ	E1、1等	11.0	9.5	45.0	34.0	26.5	20.0
		E1、2等	7.0	6.0	33.0	25.0	20.0	15.0
	ヒノキ、ヒバ、カラマツ、アカマツ、クロマツ及びベイチ	E2、1等	10.0	8.5	42.0	31.5	24.5	18.5
		E2、2等	6.0	5.0	30.0	22.5	18.0	13.5
	ツガ、アラスカイエローシダー、ラジアタパイン及びベイツガ	E3、1等	9.0	7.5	39.0	29.5	12.5	17.5
		E3、2等	5.0	4.1	27.0	20.5	16.5	12.0
	モミ、トドマツ、エゾマツ、ベイモミ、スプルース、ロジポールパイン、ベニマツ、ポンデローサパイン、オウシュウアカマツ及びジャックパイン	E4、1等	8.0	6.5	36.0	27.0	21.5	16.0
		E4、2等	4.0	3.3	24.0	18.0	14.5	10.5
	スギ、ベイスギ及びホホワイトサイプレスパイン	E5、1等	7.0	6.0	33.0	25.0	20.0	15.0
		E5、2等	3.0	2.5	21.0	16.0	12.5	9.5

表 1.2-2 B 種構成に用いる区分ラミナの強度性能の基準

等級区分の方法	樹種	等級又は樹種群	曲げヤング係数 (Gpa又は $10^3\text{N/mm}^2$ )			曲げ強さ (MPa又は $\text{N/mm}^2$ )		引張強さ (MPa又は $\text{N/mm}^2$ )	
			平均値	下限値	上限値	平均値	下限値	平均値	下限値
機械等級区分	指定無し	M120A	12.0	10.0	15.0	42.0	31.5	25.0	19.0
		M 90A	9.0	7.5	12.0	34.5	26.0	20.5	15.5
		M 60A	6.0	5.0	9.0	27.0	20.0	16.0	12.0
		M 30A	3.0	2.5	6.0	19.5	14.5	11.5	8.5

表 1.2-3 CLT パネル異等級に用いるラミナの種類

CLTの強度等級	機械等級区分			目視等級区分		
	外層		内層	外層		内層
	ラミナの等級	樹種	ラミナの等級	ラミナの等級	樹種	ラミナの等級
Mx120 A種構成	M120A	E1/1級又は E2/1級	M30以上	—	—	—
Mx120 B種構成	M120B	E1/1級又は E2/1級	M30B	—	—	—
Mx90 A種構成	M90A	E1/2級、E2/2 級、E3/1級又 はE4/1級	M30以上	1等	E1/V90、 E2/V90又は E3/V90	2等以上
Mx90 B種構成	M90B	E1/2級、E2/2 級、E3/1級又 はE4/1級	M30B	—	—	—
Mx60 A種構成	M60A	E3/2級、E4/2 級又はE5/1級	M30以上	1等	E4/V60又は E5/V60	2等以上
Mx60 B種構成	M60B	E3/2級、E4/2 級又はE5/1級	M30B	—	—	—

表 1.2-4 CLT パネル同一等級に用いるラミナの種類

CLTの強度等級	機械等級区分		目視等級区分	
	ラミナの等級	樹種	ラミナの等級	樹種
S120 A種構成	M120A	E1又はE2	—	—
S120 B種構成	M120B	E1又はE2	—	—
S90 A種構成	M90A	E1、E2、E3又 はE4	1等	E1、E2又はE3
S90 B種構成	M90B	E1、E2、E3又 はE4	—	—
S60 A種構成	M60A	E3、E4又はE5	1等	E4又はE5
S60 B種構成	M60B	E3、E4又はE5	—	—



### 1.3 CLT 工法の種類

接合部の機能及び形態は、工法の種類に大きく影響を受ける。

FPIinnovations の解説<sup>11)12)</sup>では、西欧に於いて最も一般的な工法としてプラットフォーム工法(図 1.3-1 左)が紹介されている。これは壁パネルの上端部にプラットフォームとして床パネルを載せ、更にその上に壁パネルを重ねていく工法であり、告 611 号は当該工法を前提として定められていることから、我が国においても一般的な工法として位置づけられたと言える。床として設置された CLT 自体が足場として機能するため、施工性が良く、合理的である。

一方、壁の長手方向を建築物の高さ方向に用い、壁の側面に中間階の床パネルの端部を接合することによって階を区切っていくバルーン工法(図 1.3-1 右)は、西欧に於いてはあまり一般的でないとしている<sup>11)12)</sup>。プラットフォーム工法と比較すると終局時の床パネル脱落による安全性への懸念や床を設置する際の施工性の悪さが考えられるため、我が国に於いても一般化の可能性は低いと思われる。構造計算ルートは、①ルート 3 による場合：全ての層の  $D_s$  を 0.75 以上とするか増分解析結果に基づいて  $D_s$  を設定する、②限界耐力設計による場合の 2 通りが用意されている。

材料の欠点を補い合うために、CLT と異種材料を組み合わせることも有効な手段である。海外では混構造や CLT を部分利用した事例は少なくはない<sup>13)</sup>。日本でも、軸組構法に CLT を面材として使用した物件等が数棟<sup>4)</sup>あり、今後、RC 等との混構造とした物件も建設される見込みである。なお、告 611 号では、柱材、梁材等の軸組等が併用できるとしているが、あくまで自重や積載荷重を負担する役割とされている。

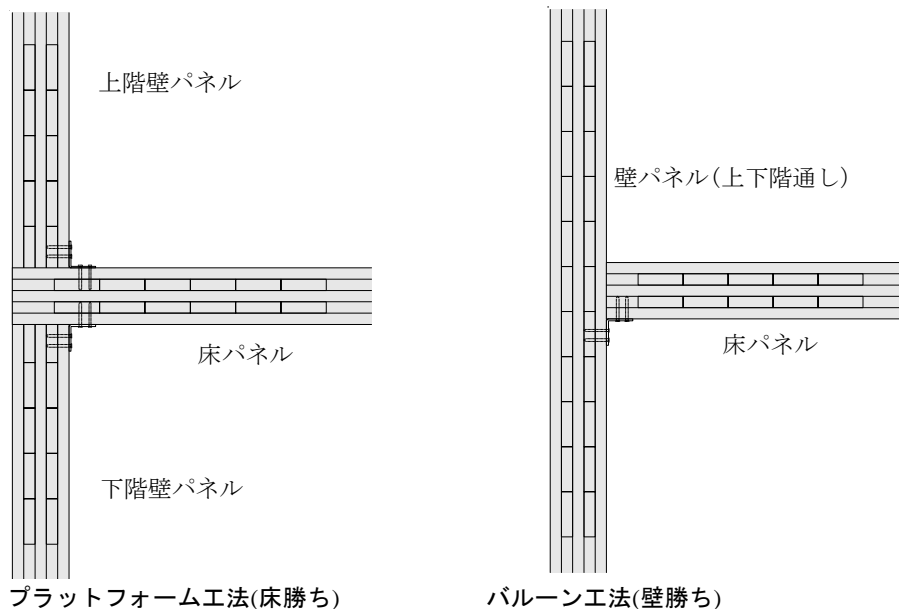


図 1.3-1 プラットフォーム工法とバルーン工法

## 1.4 CLT 接合部の要求性能

接合部の種類は混構造も含めて考えると多様なものが存在するが、本章では CLT のみで構成されるプラットフォーム工法を前提とした接合部について解説を行う。

プラットフォーム工法は、一般的な木造軸組構法等と同じように階層毎に床パネルまたは梁材によって構造要素が区切られており、層毎に変形角が生じる。ただし、変形の仕組みは異なり、木造軸組構法は耐力壁そのものがせん断変形する(図 1.4-1 左)のに対して、CLT 工法では CLT パネル自体の耐力及び剛性が高いため、せん断変形せず、脚部が浮き上がる挙動(いわゆるロッキング挙動)が主体となる(図 1.4-1 右)。したがって、鉛直構面の強度性能は、脚部接合部で決定されるといっても過言ではなく、告 611 号においても構面としてのせん断性能ではなく、接合部の引張及びせん断性能が要求されている。なお、告 611 号そのものに明記はないが、ルート 2 以上では壁パネルの圧縮剛性若しくは床パネルのめり込み剛性と引張接合部のつり合いによって回転剛性と耐力が決定するため、これらの圧縮剛性及びめり込み剛性も重要な要素である。

告 611 号における構造計算ルート毎の要求性能を表 1.4-1～表 1.4-2 に示す。

告 611 号の基本的な考え方としては、パネルサイズの大小に限らず、1 階脚部のボルト等で先行降伏させ、終局状態まで塑性変形させる設計法を前提としている(写真 1.4-1)。

このため、1 階脚部のボルト等で先行降伏させる場合は、構造計算ルートに応じて下記のとおりとしている。

### ①構造計算ルート 3(保有水平耐力計算)

Ds を耐力壁の種類に応じて 0.4～0.55 以上とする。

### ②構造計算ルート 2(許容応力度等計算)

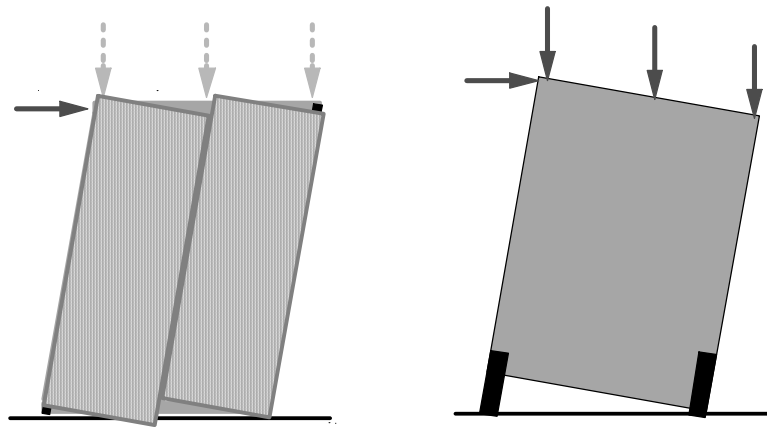
地震力による引張応力の応力割増し係数を架構形式に応じて 1.3～1.8 としてよく、それ以外の引張・せん断接合部は 2.5 以上とする。

### ③構造計算ルート 1(いわゆる許容応力度計算)

ボルトの仕様が具体的に定められ、1 階脚部が先行降伏するようになっている。

なお、構造計算ルート 2, 3 には除外規定も定められており、1 階脚部によって先行降伏させない場合は、構造計算ルート 3 においては  $D_s=0.75$  以上、特別な調査研究の結果に基づき  $D_s$  を算出する場合はその算出結果によることとし、構造計算ルート 2 では 1 階脚部の引張応力も割増し係数 2.5 以上とすることとなっている。

以上のように、1 階脚部で先行降伏させる場合の設計を行う場合は、終局時においてもボルトより先行破壊させてはいけないため、壁パネル-接合金物間の終局耐力(実験または計算による)が、ボルトの終局耐力を下回らないように判定する必要がある(図 1.4-2)。これは鉄骨造の露出型柱脚と同じ考え方である。



木造軸組構法

CLT 工法

図 1.4-1 木造軸組構法と CLT 工法のせん断変形の違い

表 1.4-1 告 611 号における引張接合部の要求性能

接合部位	設計ルート	該当告示	接合部の種類	要求性能	
壁パネル —基礎	ルート1	第十第2 第七号イ (1)または (2)	U形の鋼材 その他これ に類するも のまたは引 きボルト	金物-CLTの終局耐力 $P_u$ (kN)	86 kN以上
				ボルトの規格	M16(ABR490)
				引張応力に対して有効な部分の長さ(mm)	400 mm以上
	ルート2 <sup>※3</sup> ルート3 <sup>※4</sup>	第八第二 号ニ(1)	形状の指定 なし	$\delta u$ (mm)	40 mm以上
				伸び率(%) <sup>※2</sup>	10 %以上
下階壁パ ネル-上階 壁パネル、 壁パネル- 屋根パネ ル	ルート1	第十第2 第七号ロ (1)または (2)	U形の鋼材 その他これ に類するも のまたは引 きボルト	金物-CLTの終局耐力 $P_u$ (kN)	135 kN以上
				ボルトの規格	M20(ABR490)
				引張応力に対して有効な部分の長さ(mm)	200 mm以上
	ルート2 ルート3 <sup>※4</sup>	第八第二 号ニ(2)	形状の指定 なし	金物-CLTの終局耐力 $P_u$ (kN)	135 kN以上
				$\delta u$ (mm)	20 mm以上
				伸び率(%) <sup>※2</sup>	10 %以上
				接合部全体の許容耐力 $P_a$ (kN) <sup>※1</sup>	79.6 kN以上
			$\delta u$ (mm)	20 mm以上	
			伸び率(%) <sup>※2</sup>	10 %以上	
床パネル- 床パネル 床パネル- 横架材	ルート1	第十第2 第八号	形状の指定 なし	接合部全体の許容耐力 $P_a$ (kN)	52 kN/箇所

※1: 告示には記載が無いが、仕様で決まっているABRの降伏耐力以上の性能を満足する必要があるため。

※2: ボルトのように同一断面の鋼材が一樣に伸びてくれるような接合方法が前提となっており、1階脚部で塑性率6、それ以外の塑性率が3を念頭に置いて定められている。

※3: 応力割増し係数を2.5以上とすれば、規定を除外できる。

※4: 特別な調査研究、または $D_s$ を0.75以上とする場合は、規定を除外できる。

表 1.4-2 告 611 号におけるせん断接合部の要求性能

接合部位	該当告示	接合部の種類	要求性能	
壁パネル-壁パネル	第十第2 第八号	形状の指定 なし	接合部全体の許容耐力 $P_a$ (kN)	52 kN/箇所
壁パネル-基礎、又は 土台	第十第2 第九号イ	形状の指定 なし	接合部全体の許容耐力 $P_a$ (kN)	47 kN/m
壁パネル-床パネル、 小屋組又は屋根パネ ル	第十第2 第九号ロ	形状の指定 なし	接合部全体の許容耐力 $P_a$ (kN)	54 kN/m

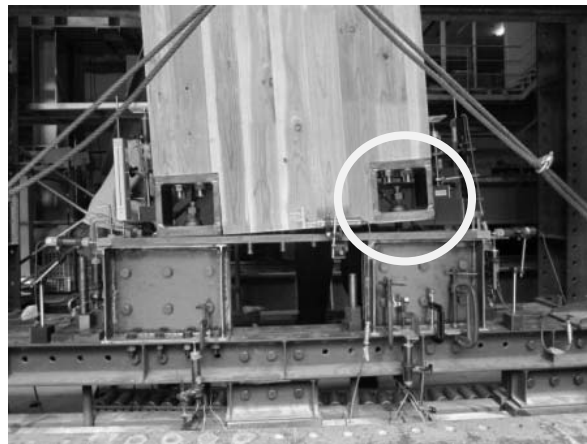


写真 1.4-1 脚部の塑性変形

壁パネル-CLT 接合部の  $P_u >$  ボルトの  $P_u$

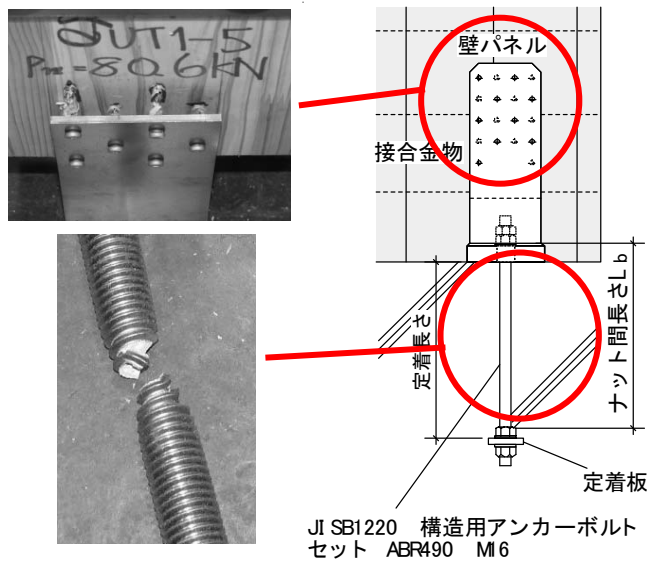


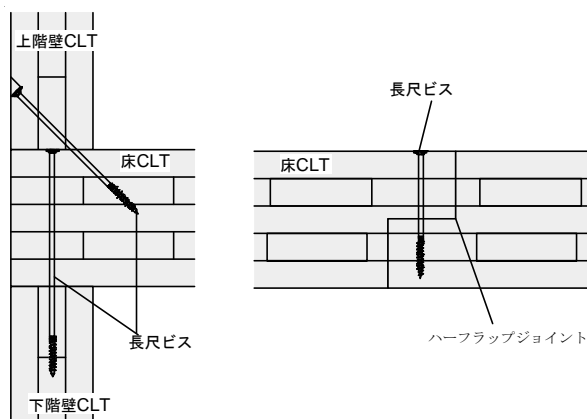
図 1.4-2 ボルトを先行降伏させるための  $P_u$  の判定方法

## 1.5 想定する応力と接合部位

文献<sup>11)12)</sup>によると、欧州では床パネル相互や壁パネル-床パネルの接合方法として、セルフタッピングスクリューと呼ばれる長尺のビスが一般的で使用量も多いとされている(図1.5-1)。

これらのビスは CLT パネル相互を接合するものであるため、長尺でフルスレッド(胴部全体にねじが切られている)のものや頭部径が大きいものが多い。これらのビスは複合応力にも抵抗でき、取り付けが容易なため、使い勝手が良いとされている。また、比較的径が大きいものが多い(呼び径 6~12 mm)が、ねじの先端形状等の工夫により、下穴なしでの施工が可能となっている。

ただし、我が国の接合部設計においては、1.4 節で示したとおり、複合応力は負担させない考え方であり、応力の種類と加力方向に応じて、別々の接合方法で役割分担させることとしている。例えば、図 1.5-2 の①と④のように壁端部に掛かる引張応力とせん断応力は別々の金物が担っている。



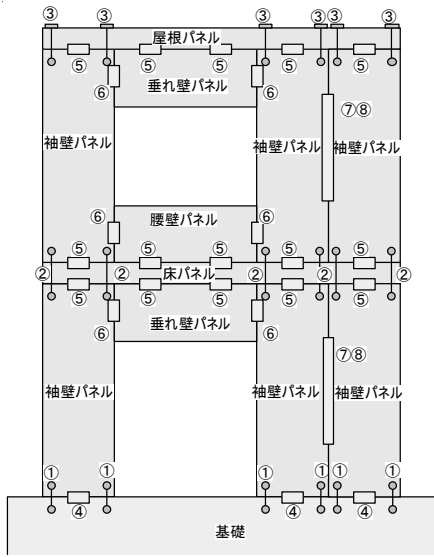
壁パネル-床パネル接合

床相互接合

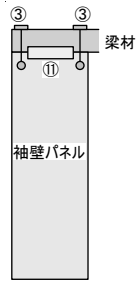
図 1.5-1 長尺ビスの使用例

表 1.5-1 接合部データの接合部位と応力の種類

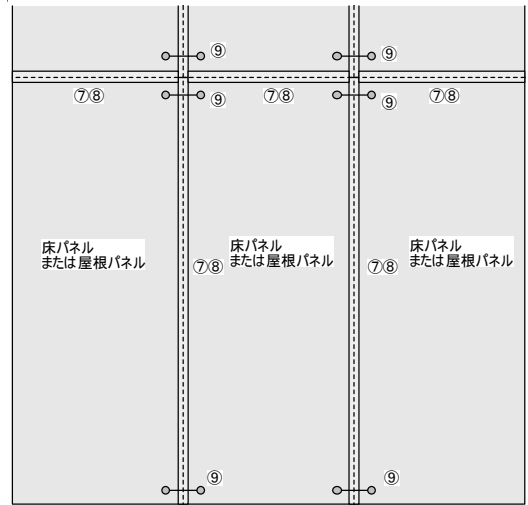
No	接合部位	想定する応力の種類	備考
①	基礎-壁パネル	引張	
②	下階壁パネル-上階壁パネル	引張	
③	壁パネル-屋根パネル	引張	
④	基礎-壁パネル	せん断	
⑤	壁パネル-床パネル	せん断	
⑥	垂れ壁パネル-袖壁パネル	せん断	
⑦	床パネル相互、壁パネル相互	せん断	
⑧	床パネル相互、壁パネル相互	面外せん断	
⑨	床パネル相互、壁パネル相互	引張	
⑩	CLT面材と梁材の接合部	せん断	軸組併用
⑪	壁パネル-梁材	せん断	軸組併用
⑫	その他		
⑬	①-9、①-10、①-11、①-12、②-9、②-10、②-11、②-12、③-9、③-10、③-11、③-12の金物図面		



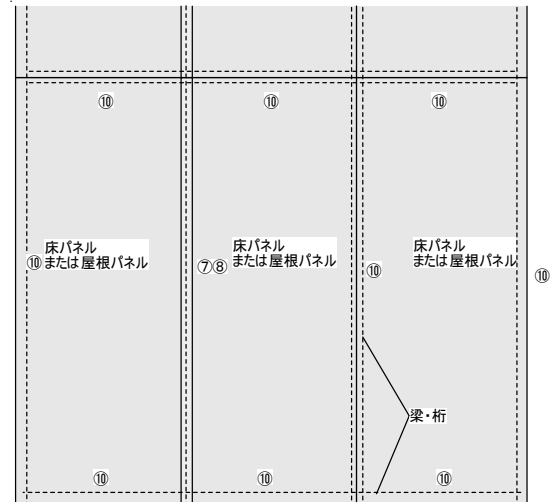
<鉛直構面>



<鉛直構面・軸組併用>



<水平構面>



<水平構面・軸組併用>

図 1.5-2 接合部データの接合部位と応力の種類

## 1.6 用語の定義

本稿では、用語の定義を表1.6-1のとおりとする。

### (1) CLTパネルの部位に関する定義

1.2項で示したとおり、CLTに関する用語は図1.6-1のとおり定義されている。本稿においても基本的には直交集成板の日本農林規格に従うのものとする。

「強軸試験体」

強軸方向に引張或いは圧縮加力される試験体を言う。なお、強軸方向とは直交集成板の日本農林規格において、外層の繊維方向の向きに平行な方向と定義されている。

「弱軸試験体」

弱軸方向に引張或いは圧縮加力される試験体を言う。

「接着積層面のせん断木部破壊」

CLTでは平行層と直交層の界面にせん断力が生じた場合、加力に対して平行となる層に直交となる層の繊維が残るようにして木部でせん断破壊が生じる。海外では、単に「rolling shear」と呼称されることが多いが、ここでは合板に於ける直交となる層の繊維が転がるように破壊する「ローリングシア破壊」と区別するために「接着積層面のせん断木部破壊」と称するものとする。

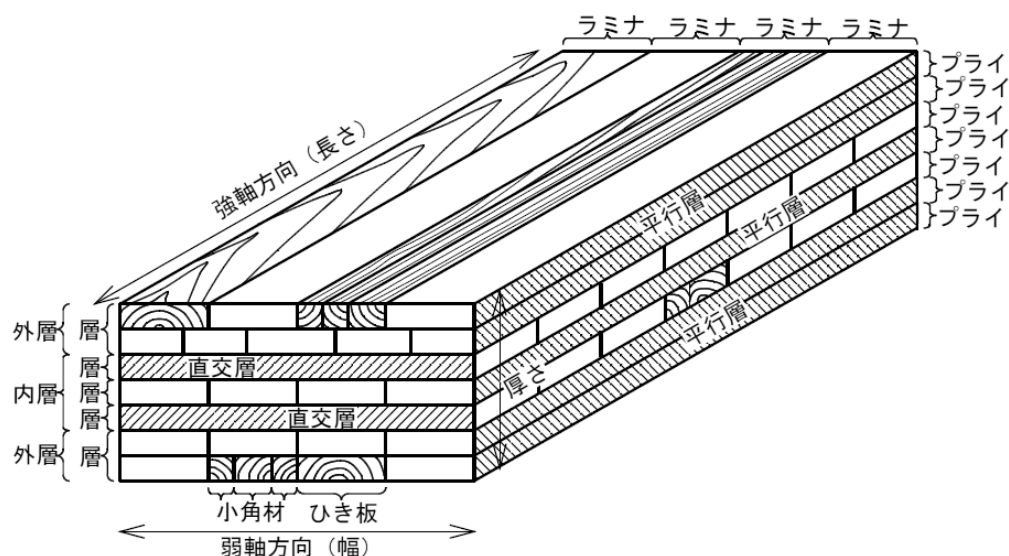


図 1.6-1 直交層の日本農林規格における CLT の各部名称

## 2. 既往の研究

### 2.1 CLT 接合部に関する研究

#### 2.1.1 海外における CLT 接合部の研究

海外における接合部の研究の対象となっているものはビス接合が多く、1.5 節で述べたビス単体によって接合させる場合や、ブラケット金物の接合具としてビスを使用するものである。文献<sup>11)12)</sup>では様々な接合方法が紹介されているが、せん断抵抗か引き抜き抵抗か判然としないものが多く、おそらく前述のセルフタッピングスクリューのように複合応力に抵抗することを期待していることが前提だと思われる。この中で明確に引き抜き抵抗接合として紹介されているのが、LSB(ラグスクリューボルト)接合、GIR(グルードインロッド)接合、ほぞパイプ型のドリフトピン接合、金属ブラケットのビス接合である。

接合部の研究は、2006 年、2007 年に Uibel ら<sup>14)15)</sup>が鋼製だぼ接合及びくぎ・ビス接合の包括的な研究内容を発表し、この研究成果はその後の接合部に関する研究に大きな影響を与え、海外の研究では実験値との比較にはこの研究での推定式が引用されることが非常に多い。

2006 年の研究<sup>14)</sup>では、CLT の積層面に対して直角に接合具を打った場合に接合具がせん断を受ける方向に加力した単位接合部試験を行っている。だぼ単位接合部試験については、ラミナ構成と厚さ、ラミナ側面相互の隙間とだぼとの配置関係をパラメータとした試験体に、加力方向を 0°、45°、90°と変化させたものとした。438 体の試験結果から、だぼの直径、CLT の密度、加力方向を変数とした回帰式を作成した。ビス及びくぎの単位接合部試験も同様に 179 体の試験結果からビス又はくぎの直径と CLT の密度を変数とした回帰式を作成した。適用範囲は層の厚さが 7 mm 以下としている。更にこの文献では Johansen の降伏理論<sup>16)</sup>を CLT に応用した推定式が提案されており、平行層と直交層の強度や剛性の違いを加味したものとなっている。

2007 年の研究<sup>15)</sup>では、CLT の木口面に対して接合具を直角に打った試験体を対象としている。だぼ単位接合試験は直径、埋め込み位置、加力方向をパラメータとした 100 体の試験体からだぼの直径と CLT の密度を変数とした回帰式を作成した。くぎおよびビスについても同様に 319 体の試験を行い、直径と密度を変数とした回帰式を作成した。また木口面に打った場合の端距離・縁距離についての試験も行っており、端距離・縁距離の限度を提案している。これに加えてビスの引き抜き試験も行われており、積層面と直交方向および木口面に直交方向とし、ラミナ相互との配置関係をパラメータとした 268 体の試験結果からビスの直径、埋め込み長さ、密度、打ち込み角度を変数とした回帰式を求めた。なお、いずれの研究もドイツウヒによる CLT パネルが使われている。

実際の設計を意識したスプライン(雇い材)+ビス接合、ハーフラップジョイント(相欠き)+ビス接合、長尺ビス単体接合等の接合部試験と上記の推定式及び欧州規格である Eurocode5 等の推定式を比較した研究は比較的多く見られる<sup>17)18)19)20)</sup>。

Muñoz ら<sup>17)</sup>は、実際の CLT(SPF)のせん断接合部を想定して、LVL をスプラインとしたビス接合、ハーフラップジョイント+ビス接合の面内方向のせん断及び引張試験、床パネルと壁パネルのビス接合のビス引き抜き試験を実施している。前者の試験結果は CSA O86、Eurocode5(以下、EC5 と称する。)及び文献 14)15)の計算式との比較が行われ、文献 14)15)の計算式がよく一致し、EC5 は安全側に算出され、CSA O86 は脆性的に壊れた試験体もあ



ったため、一部危険側に算出される結果となった。後者のビス接合の引き抜き試験についても同様な比較が行われ、推定式の適用範囲外である推定式は危険側に評価されるとしている。

Follesa ら<sup>18)</sup>は、ラミナ材をスプラインとした一面せん断接合、中央にスプラインを設けた二面せん断接合及びハーフラップジョイントについて実験を行い、実験値と推定値(EC5)との比較を行い、安全側に評価されていることが確認された。

Bratulic ら<sup>19)</sup>は、ビス接合の単調加力と一方向繰り返し加力の違いに着目して比較試験を実施した。ビスの種類はフルスレッド(全ねじ)ビスと先端のみねじ加工されているビスの2種類とし、更にビスの打ち方を90°、45°とした壁パネル相互のせん断、壁パネルと床パネルのせん断及び引張の試験とした。壁パネル相互のせん断、壁パネルと床パネルのせん断及び引張の試験とした。結果は繰り返し試験によって終局変位が多少低下する結果となり、製材等の推定式<sup>21)</sup>はよく一致する結果となり、文献16)の計算式はわずかに過大評価となった。

Sandhaas ら<sup>20)</sup>は、LVL をスプラインとしたトウヒ CLT3 層 3 プライ及び 5 層 5 プライにおけるビス接合の単調加力試験及び正負交番繰り返し試験を実施した。試験結果は文献14)15)による推定値と比較されよく一致する結果となった。また接合部の履歴復元力モデルを作成した。

接合部性能の検証は前述のとおり複合応力として考えられることもあり、耐力壁試験として包括的に検証が行われるものも少なくない<sup>22)23)24)25)</sup>。

Negri ら<sup>22)</sup>は CLT の材料物性に着目し、MOE について DIN EN338 に基づいて機械等級区分されたドイツトウヒ CLT の壁パネルと、ホールダウン金物が設置されるパネル両端下部に LVL で補強を行った壁パネルの面内せん断試験を実施した。3 層 3 プライの試験では R 及び C18 と C24 の破壊性状に明確な違いが見られた。R 及び C18 はホールダウン下部の CLT 材の割れによる脆性破壊、C24 はくぎの曲げ降伏後、引き抜けによる破壊となった。5 層 5 プライの試験では等級外の材料と端部 LVL 補強が比較され、前者はくぎの引き抜け破壊、後者は鋼板の引張破壊となった。結果として、ヤング係数の等級区分や LVL の補強は接合部の破壊性状に大きな影響を及ぼす結果となった。

Schädle ら<sup>23)</sup>は、スプライン、スプライン用の接合具、ホールダウン金物をパラメータとした壁の面内方向のせん断試験を実施した。接合部試験及び壁試験の履歴減衰の違いを論じ、壁試験の結果から4つの評価方法で求めた塑性率の比較をおこなった。また2次元モデルを作成し、Eurocode8によるq値(日本でいうDsに近い指標)<sup>26)</sup>の評価を行った。

Schneider ら<sup>24)</sup>は、8種類の耐力壁に、2種類のブラケットと5種類のくぎまたはビスを組み合わせと加力方法を代えて、約30種類の試験を行った。接合部試験と耐力壁試験の試験結果から吸収エネルギーベースの損傷指標の値を比較し、ある程度の相関性が確認された。

Popovski ら<sup>25)</sup>は、アスペクト比の異なるパネルや開口部付きのパネル等を用い、接合部にハーフラップジョイント+ビスやブラケット、ホールダウン金物を使った耐力壁の試験を実施した。結果としてロッキング挙動による影響で斜め打ちビスが脆性的に引き抜き破壊したこと、ホールダウン金物が応力に対して効果的であったことが分かった。

欧州でも比較的地震が多いイタリアでは、日本と同様、振動台実験を中心とした一連の研究が実施されている。Gavrić ら<sup>27)</sup>は CNR-IVALSA 研究所が行う SOFIE 研究プロジェクトにおける 2007 年に E ディフェンスで実施した 7 階建て実大振動台試験の接合部について正負交番繰り返し加力の要素試験を実施した。要素試験の種類は壁パネル相互のせん断及び引張、床パネル相互のせん断及び引張、壁パネル-床パネルのせん断及び引張とし、接合方式はスプライン接合とハーフラップジョイントとしている。続いて Gavrić ら<sup>28)</sup>は、ロッキング挙動による引き抜き抵抗金物の鋼板部分の引張破断、ボルトのせん断破断等の脆性的な破壊を課題として挙げており、靱性的なビス等の曲げ降伏等の破壊モードを脆性的な破壊モード以下に設計することを提案した。実大試験との関係性について更なる検証が望まれるところである。

またビスによる補強に関する研究として、Mestek ら<sup>29)</sup>は床 CLT パネル等が柱等によって局所的にめり込みを受ける場合に長尺のフルスレッドビスを打ち込むことによるめり込み補強効果について有限要素法を用いた解析を実施している。

混構造の研究例としては、Jacquier ら<sup>30)</sup>が RC 梁と CLT 床の接合部のせん断試験等を行っている。接合方法は RC 側を頭付のロッド 2 本、板状のメッシュの 2 種類、CLT 側はコーチスクリューが引き抜き方向に作用するように配置された接合方法 1 種類である。実験結果は Eurocode5 及び文献 16) で比較され、前者はかなり安全側に、後者はやや安全側に算定された。

### 2.1.2 日本における CLT 接合部の研究

日本における構造の考え方は 1.4 節で示したとおり、海外のものと異なる部分があり、北米・欧州と比べると過剰とも言えるくらいの要求性能となっているため、敢えて項を分けた。日本では、海外の接合部と同様に文献<sup>31)32)</sup>のとおりスプライン接合等の実験例があるが、これらは主に水平構面用に用いられる。また、長ビスの実験事例としては文献<sup>33)</sup>等がある。

鉛直構面に用いられる接合部は(1)～(4)に示すとおりである。実務ベースではここに挙げられた以外の GIR 接合等が実験されているが研究として発表されているものはあまり無いようである。

#### (1) 引きボルト接合

中高層建築物を想定した振動台実験用の引張接合方法として、2011 年より研究が進められた。告 611 号第十第七号イ(2)及びロ(2)に示す接合方法であり、製材、集成材の一般的な加工方法と破壊性状が大きく異なるため、新たに接合部の設計方法が考案された<sup>34)</sup>。剛性は座金下部の面圧剛性、角孔部横の CLT の引張剛性及びボルトの引張剛性の直列バネとし、降伏耐力は平行層の圧縮強度、最大耐力は角孔横部の CLT の引張耐力、座金下部の積層接着面のせん断耐力及び座金下部横の積層接着面のせん断耐力のうちの最小値としている。

本研究は、これらを総括したものとして位置づけられる。

#### (2) 鋼板添え板ビス接合

低層建築物を想定した振動台実験用の引張接合方法及びせん断接合方法として、2013 年より研究が進められた。告 611 号第十第七号イ(1)及びロ(1)に示す接合方法にはビスとは記されていないがこの接合方法が基になっている。

ビス 1 本あたりの基本的な設計方法は製材、集成材と同様に EYT 式(ヨーロッパ型降伏理論式)に終局時の設計方法を加えた小林らによる報告<sup>35)</sup>に基づく方法によって鈴木ら<sup>36)</sup>によって検証され、同様の設計法が適用範囲にあることが確認されている。なお、文献<sup>36)</sup>では面圧定数をビスの掛かっている部分の平行層と直交層の割合に応じて按分している。一方、新しく CLT の EYT 式を提案し、面圧実験との比較を行っている研究もある<sup>37)</sup>。

また、一列に多数本打った場合の低減係数や集合型破壊等の研究も実施されている<sup>38)39)</sup>。文献<sup>40)</sup>ではビスを一列に多数本打った場合、終局耐力に低減係数を乗じることとなっている。ただし、これは製材や集成材等が前提となっており、CLT の場合については検証されていない。そこで文献<sup>38)</sup>では、集成材及び CLT 材を使った鋼板添え板ビス接合を 1,5,10,15,20,25 本と増やしていったときの低減率を実験的に調べた結果、集成材の方は多数本打ちで耐力の結果が見られたが、CLT 材では直交層の存在により繊維方向に割裂が生じにくくなるため、低下が見られない結果となった。

多数本打ちの際の懸念として、一列多数本打ちの他、集合型破壊がある。CLT の場合はラミナの積層接着面のせん断強度が低いため、この部分で脆性破壊しやすいことが分かっており、文献<sup>40)</sup>に記載されている製材や集成材を前提とした集合型破壊とはせん断破断面が異なる。これについては文献<sup>39)</sup>のとおり検定式が提案されている。文献<sup>40)</sup>では木部のせん断耐力と引張耐力の内、大きい方を終局耐力としているが、提案式では足し合わせとしている。足し合わせが成立するのはせん断の  $\delta_u$  と引張の  $\delta_u$  が同一であるときが原則だが、基準強度等により十分安全側であるとの判断から適用可能としている。なお、文献 11)12)によると海外では上記の積層接着面のせん断破壊のような集合型破壊については研究が行われておらず、今後も様々なパラメータについて実験的に確認する必要がある。これらの設計方法は文献 4)にも紹介されている。

### (3)鋼板挿入型ドリフトピン接合

鋼板挿入型ドリフトピン接合については、中島ら<sup>41)</sup>が文献<sup>14)</sup>のだぼ接合の計算式及び既往の EYT 式<sup>40)</sup>による推定値と実験値の比較を行っている。推定値には CLT 全体の平行層と直交層の面積の割合から面圧強度を求める簡易 EYT 式からの推定値も含めて検証されており、結果として、簡易 EYT 式が危険側となる場合があることが報告されている。多数本打った場合は、CLT 特有の集合型破壊をする恐れがあるため、今後、縁距離、ピッチ及び本数等についての研究が必要となる。

### (4)LSB 接合

LSB 接合については、中谷らによって既往(製材、集成材等)の引き抜き理論式<sup>42)</sup>による推定値と実験値の比較が行われている<sup>43)</sup>。製材、集成材と同様に、CLT を輪切りにして薄板試験を実施し、その値から接合部の性能を推定している。結果として、引き抜き理論式が CLT 構造に適用可能ということが分かっている。CLT の木口面はラミナ厚ごとに積層面が異なるため、最適な有効面積  $A_w$  の設定方法については決まっておらず、今後の課題としている。LSB 接合は、告 611 号制定前には時刻歴応答解析によってハウステンボスの変なホテルや高知県の担い手育成センターに使用されている。実用においては施工上、箱形金物やカプラー等との併用が必要となる。

## 2.2 引きボルトに関する研究

引きボルトは、製品としてはボルトと座金とナットだけで構成される非常にシンプルな製品であり、それ故に軸組構法ではZマーク表示金物規格のような規格が存在しない。唯一、規格品の可能性があるのはJIS A 5531 木構造用金物(1978)に定める引張ボルトという規格である。「可能性がある」と控えめに述べたのは明確に用途が示されていないためである。当該規格には普通ボルトと引張ボルトの2種類が規定されているが、ボルト部分は共通規格であり、座金の規格のみが異なる。例えば、呼び径 $\phi 13$  mmのボルト用座金は普通ボルトが厚さ3 mm、幅38 mm角であるのに対し、引張ボルトは厚さ6 mm、幅50 mm角であり、羽子板ボルト等を受ける引張ボルトではなく、座金の面圧で引張に抵抗させようとする設計思想が読み取れる。このことからこの引張ボルトが引きボルト用の金物であることはほぼ間違いないのではないかと思われる。ただし、残念ながら当該規格は製造実績がほぼ皆無であるため、市場でその姿を見かけることはない。

引きボルトに関する研究については、本件を除き、これまでCLTをテーマにしたものは無く、ほとんどが集成材を対象としたラーメン接合である。なお、ボルトを挿入し、GIRのように接着剤を充填した接合部も引きボルト接合と定義している論文があるが、ここでは主たる接合耐力を座金等部分の面圧で引き抜き抵抗しているものを引きボルトと定義するものとする。

野口ら<sup>44)</sup>は1988年にPC鋼棒をボルトとして用い、集成材の継ぎ手を想定し、ひとつの接合部に4本の引きボルトを設けた接合部の引張試験結果を発表している。想定する構造形式は明記されていないが、せい240 mm、300 mmの集成材を平行方向に継ぐとしているので、大断面集成材構造の梁を想定しているのではないかと推測される。したがってラーメン構法の柱脚接合部のようにボルトを先行降伏させ、靱性を付与するのではなく、木部で破壊させる試験としている。結果として、剛性が高く変形が小さいことを報告している。接合部の仕様は集成材梁と仮定した場合の梁の側面部から貫通孔を開けて座金を納める方法としている。

坂本らが行った構造集成材によるラーメン構造の実用化を想定した一連の研究(1988年～)の内、大橋ら<sup>45)</sup>、五十田ら<sup>46)</sup>が行った研究では、引きボルト接合部のモーメント試験を実施しており、接着剤充填の有無による違いを検証し、ボルトの先行降伏による靱性確保の可能性を提案している。

1991年には稲山<sup>47)</sup>により引きボルト式梁-柱接合部の設計式が提案され、1996年に財団法人日本住宅・木材技術センター<sup>48)</sup>から設計方法の図書が出版された。

稲山<sup>49)</sup>は2008年に文献<sup>47)</sup>をブラッシュアップし、接合部の回転剛性と降伏モーメント、終局モーメント及び塑性率 $\mu$ をそれぞれ算出し、短期許容曲げモーメントを求める設計式を提案し、それによる解析及び接合部のモーメント試験と門型フレーム試験<sup>50)51)</sup>が実施された。2009年に中村らが引きボルト接合部の引張試験<sup>52)</sup>と稲山提案式<sup>49)</sup>による推定値との比較<sup>53)</sup>を行い、低減係数についての課題を残した。2013年には稲山ら<sup>54)</sup>によって柱脚接合部設計法が提案された。一連の研究は山口<sup>55)</sup>によって纏められている。

### 3. 集成材及び CLT 材の圧縮試験

#### 3.1 実験の目的

本章では、ラミナの縦圧縮性能及び部分圧縮性能(めり込み性能)から引きボルト接合部の面圧剛性及び圧縮降伏耐力を求めるため、集成材及び CLT 材の圧縮(めり込み)試験を実施し、木材の縦圧縮及び部分めり込みの強度性能から CLT の圧縮の最大耐力及び剛性の推定を行い、実験値と比較を行った。

CLT パネルは層数及びプライ数や層構成の違いによって様々な種類のものを製造することが可能であり、平行層と直交層の割合は層構成によって全て異なる(表 3.1-1)。したがってラミナ単位での縦圧縮性能と部分圧縮性能(めり込み性能)を把握し、未知の CLT の圧縮性能を推定することは、引きボルト以外の用途にも使用できる有益な情報である。

表 3.1-1 CLT パネルの層構成ごとの平行層と直交層の割合

CLTの層構成	平行層のプライ数	直交層のプライ数	平行層のプライ数／直交層のプライ数
3層3プライ	2	1	2.0
3層4プライ	2	2	1.0
5層5プライ	3	2	1.5
5層7プライ	5	2	2.5
7層7プライ	4	3	1.3

#### 3.2 ラミナ材の材料物性

試験を行うために集めたスギラミナ材のヤング率分布を図 3.2-1 に示す。ヤング係数の分布を見ると、ヤング係数 4~7GPa のものが一番多く、次いで 7~9Gpa、一番少ないのが 4GPa 未満、7GPa 以上のもので 1 割にも満たないことが分かる。ヤング係数と密度の関係については、図 3.2-2 または図 3.2-3 に示すとおり比例関係にあることが分かる。

圧縮試験では、ヤング係数の違いが剛性に与える影響が大きいと予想されるため、このロットからヤング係数が異なるものを幅広く採取し、ヤング係数別に検討を行うため、図 3.2-2 に示すとおり①下限なし~5.0GPa、②5.0~7.0Gpa、③7.0GPa~上限なしの 3 グループに分けて圧縮試験体を作成することとした。

CLT パネルは各グループごとに作成され、同一グループのラミナ材で構成される。図 3.2-3 は平行層に使われるラミナ材と直交層に使われるラミナ材を分けたものである。

なお、CLT パネルの製造は、縦継ぎ無しのラミナで製造可能であり、幅はぎ位置の制御もしやすいため、層ごとに幅はぎ接着を行ってから層間接着を行う製造方法(山佐木材製)の CLT 材を採用した。縦継ぎ無しのラミナを利用する目的は、個体特定作業が煩雑にならないためである。ただし、縦継ぎの無いラミナは比較的節も多くなるので、一長一短である。

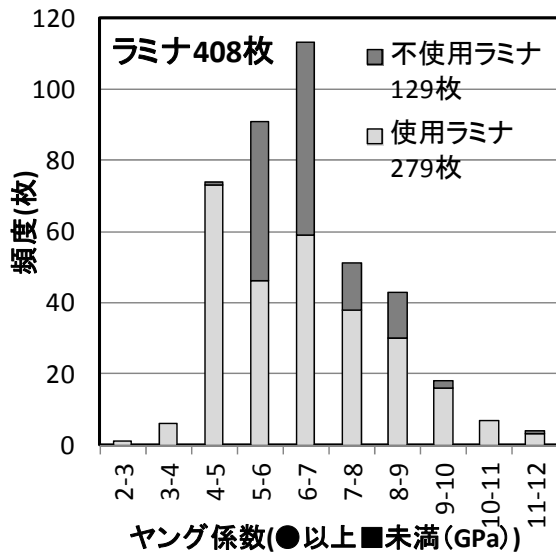


図 3.2-1 ラミナ材のヤング率分布  
(機械等級区分) n=408 枚  
ナ n=279 枚

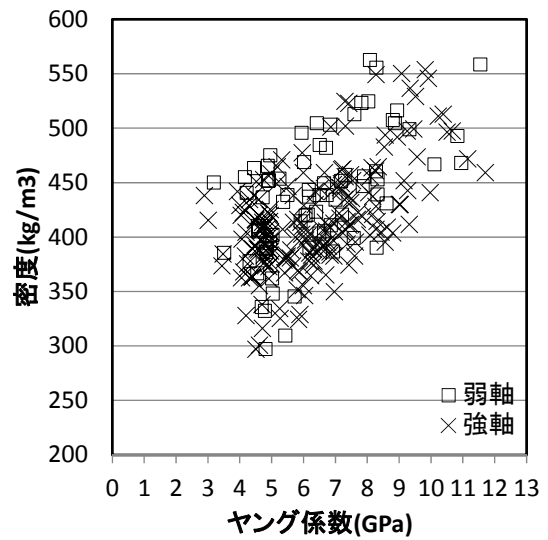


図 3.2-2 ヤング係数と密度の関係  
(等級区分別) 使用ラミナ

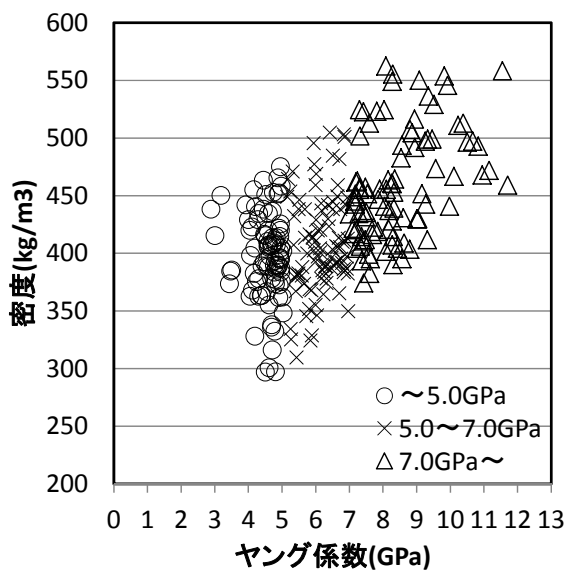


図 3.2-3 ヤング係数と密度の関係  
(平行層・直交層別) 使用ラミナ n=279 枚

### 3.3 試験体の製造

まずはラミナのグレーディングを行い、ヤング係数グループ別に選別した(写真 3.3-1)。集成材及び CLT 製造は、まずラミナ側に接着材を塗布し、幅はぎ材を製造した(写真 3.3-2)。次に幅はぎ材の表面に接着剤を塗布し、積層接着(写真 3.3-3)した後、圧縮(写真 3.3-4)を行った。ラミナのヤング係数と密度は木口面のナンバーによって管理した。



写真 3.3-1 ラミナのグレーディング  
(木口面に色分けしている)



写真 3.3-2 幅はぎ工程



写真 3.3-3 積層接着 接着材の塗布



写真 3.3-4 圧縮工程



写真 3.3-5 養生 ナンバリングにより  
ラミナの配置を管理している。

### 3.4 試験体の仕様

試験体の種類は、表 3.4-1 及び表 3.4-2 に示すとおり、スギ集成材の縦圧縮試験、横部分圧縮(めり込み)試験、スギ CLT の強軸方向及び弱軸方向の試験の 9 仕様とした。

野口ら<sup>56)</sup>は製材の縦圧縮剛性について、丸鋸等による表面の凹凸の影響があると仮定して、全面圧縮試験の実験値の剛性から理論値による剛性を差し引くことによって表面の凹凸の剛性を求めている。しかし、その現象は実験によって確認されていないため、当該試験でその影響を確認することとした。引きボルト接合の角穴の加工においては、ジグソーやホールソーで荒く削り、角ノミ等で仕上げるのが一般的な方法であり、平行層は繊維と直交方向にせん断によって一気に切削されるため表面が荒くなる(写真 3.4-1)。このため、表面の粗さとして仕上げ無しとサンダー仕上げの 2 種類を用意した。なお、試験体は節等を避けて木取りする必要があったため、GP300 のみ 5 体となった。



表 3.4-1 試験体の種類

試験体整理番号	試験体記号	材料の種類	加力方向	表面の粗さ	試験体数			
					ヤング係数 (GPa)			小計
					下限 ~5.0	5.0~ 7.0	7.0~ 上限	
1	GP200	集成材	繊維平行	仕上げ無し	5	4	4	13
2	GP300		繊維直交		0	1	4	5
3	GO		強軸方向		5	4	4	13
4	CP33	CLT	弱軸方向		3	4	3	10
5	CO33		強軸方向		3	4	3	10
6	CP55		弱軸方向		3	4	3	10
7	CO55		強軸方向		3	4	3	10
8	CP55M		弱軸方向		3	4	3	10
9	CO55M	強軸方向	サンダー仕上げ		3	4	3	10
		弱軸方向		3	4	3	10	

写真 3.4-1 引きボルト接合部のための角穴

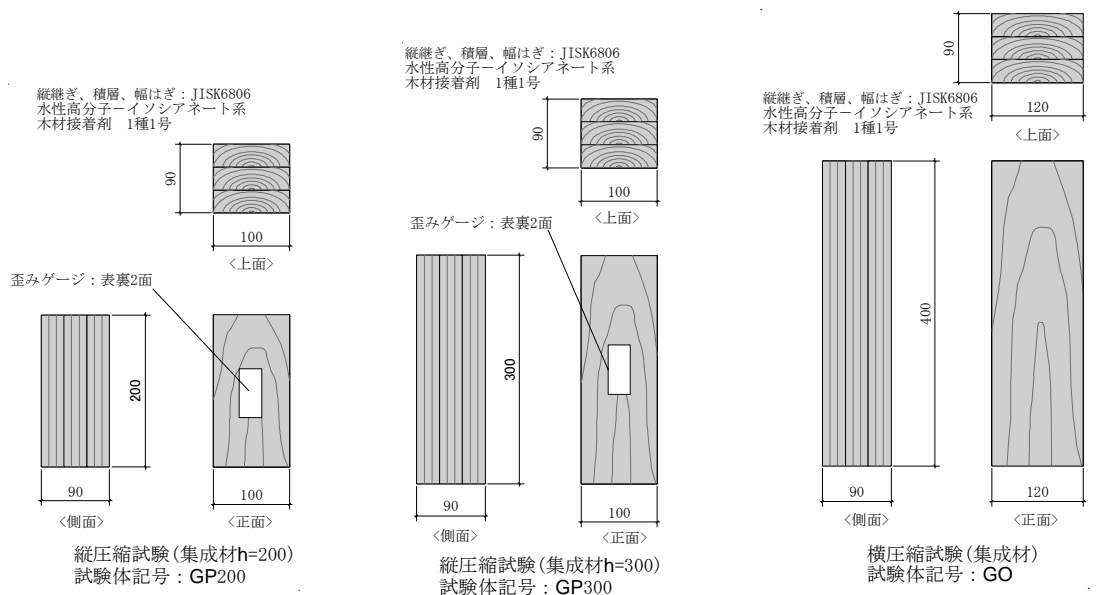
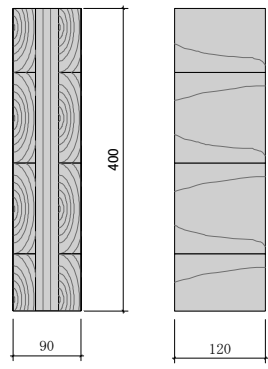
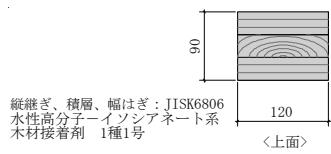
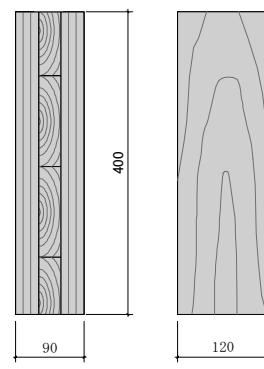
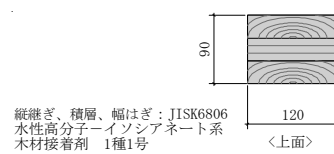


図 3.4-1 スギ集成材の圧縮試験体図

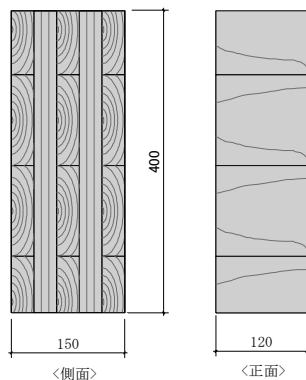
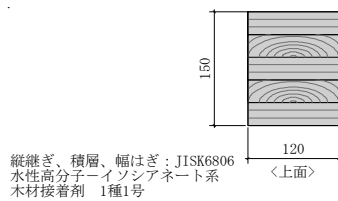




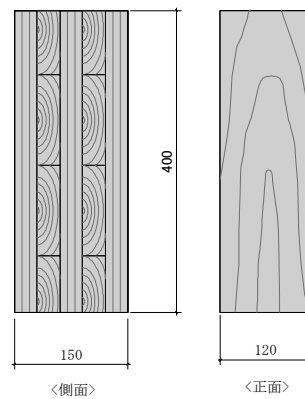
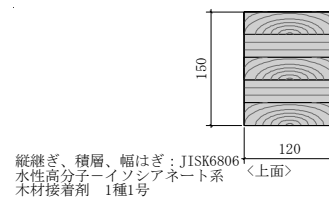
横圧縮試験 (CLT、最外層繊維平行)  
試験体記号：CP33



横圧縮試験 (CLT、最外層繊維直交)  
試験体記号：CO33



横圧縮試験 (CLT、最外層繊維平行)  
試験体記号：CP55、CP55M



横圧縮試験 (CLT、最外層繊維直交)  
試験体記号：CO55、CO55M

単位：mm

図 3.4-2 スギ CLT の圧縮試験体図

※CP55M 及び CO55M は、木口面をサンダー仕上げとしている。

### 3.5 試験体の材料物性

#### (1)スギ集成材試験体の材料物性

スギ集成材試験体の材料物性とそれに対応する試験体の種類を纏めたものを表 3.5-1 に示す。3 層の集成材 13 本から試験体を縦圧縮試験(GP200 及び GP300)及び横部分圧縮試験(GO)を切り出しており、試験体記号末尾の数字同士が同一個体由来の試験体となる。なお、試験体採取に当たっては、節、入り皮等を避けて木取りしており、どうしても入ってしまう場合は、縦圧縮の場合、節等が中央に配置されるように、横部分圧縮試験の場合は節等がなるべく材の端に配置し、加圧位置を避けることとした。ヤング係数が低いものほど節が多くなる傾向にあり、GP300 は 5 体しか採取できなかつた。なお、含水率はハンディタイプの高周波含水率計を用いて計測しており、表層の測定値の平均としている。

表 3.5-1 スギ集成材の材料物性とそれに対応する試験体の種類

集成材 No	グループ	ヤング係数(GPa)				平均密度(kg/m <sup>3</sup> )				平均含水率 (%)	試験体の種類		
		1層目	2層目	3層目	平均	1層目	2層目	3層目	平均		GP200	GP300	GO
1	7.0~ 上限	7.72	8.57	7.31	7.9	422.6	493.6	455.4	457.2	13.0	GP200-1	GP300-1	GO-1
2		7.43	7.12	7.61	7.4	374.3	421.7	382.5	392.8	11.0	GP200-2	GP300-2	GO-2
3		8.18	7.4	9.27	8.3	437.2	437.2	442.6	439.0	10.5	GP200-3	GP300-3	GO-3
4		9.57	7.18	7.48	8.1	473.6	442.6	457.2	457.8	12.0	GP200-4	GP300-4	GO-4
5	5.0~ 7.0	5.69	6.17	5.95	5.9	413.5	378.0	402.6	398.0	10.5	GP200-5		GO-5
6		5.88	5.6	5.44	5.6	367.9	388.0	381.6	379.2	14.0	GP200-6		GO-6
7		5.59	5.82	6.31	5.9	380.7	368.9	388.9	379.5	13.5	GP200-7	GP300-7	GO-7
8		6.32	6.13	5.66	6.0	374.3	404.4	373.4	384.0	12.5	GP200-8		GO-8
9	下限~ 5.0	4.62	4.81	4.06	4.5	300.5	393.4	362.5	352.2	12.5	GP200-9		GO-9
10		4.9	4.41	4.97	4.8	388.9	388.9	383.4	387.1	13.0	GP200-10		GO-10
11		4.78	4.13	4.39	4.4	408.9	367.9	363.4	380.1	13.5	GP200-11		GO-11
12		4.7	4.94	4.49	4.7	378.0	396.2	416.2	396.8	11.0	GP200-12		GO-12
13		4.7	4.51	2.89	4.0	337.9	296.9	438.1	357.6	12.0	GP200-13		GO-13

#### (2)スギ CLT 試験体の材料物性

スギ CLT の 5 層 5 プライ大判パネルから、節等の欠点を避けて木取りを行った。ただし、外観から判別できるのは表層のみであるため、カットした後、加圧板が当たる部分に節があることが確認できた場合は、図 3.5-1 のように加圧位置をずらしたり、予備試験体に代える等の対応を行った。CLT 試験体の加圧された部分の材料物性を表 3.5-2 及び表 3.5-3 に示す。図 3.5-1 に示すように加圧面である点線部分が試験に影響する部分と考え、ラミナが 2 材に跨っている場合は、加圧部分のラミナ幅(幅①、幅②)に応じてヤング係数や密度の平均を取り、更に平行層(1, 3, 5 層目)、直交層(2, 4 層目)ごとの平均を算出した。

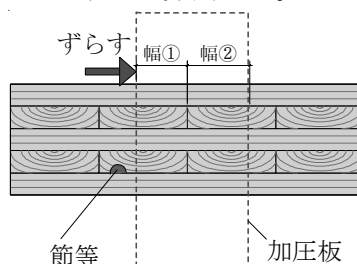


図 3.5-1 CLT 試験体の節の避け方、

表 3.5-2 スギ CLT 試験体の加圧部分の材料物性(平行層)

試験体名	平行層																幅(mm)	平均ヤング係数 (Gpa)	平均密度 (kg/m <sup>3</sup> )	平均含水率 (%)
	ヤング係数(Gpa)						密度(×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )													
	1層目		3層目		5層目		1層目		3層目		5層目									
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②								
CP33-1	4.6	4.31	4.81	4.31			434.4	362.5	373.4	434.4				70	30	4.587	402.28	11.0		
CP33-2			4.8	4.05	3.48	4.65			410.7	419.9	384.3	397.1				70	30	4.203	400.82	12.5
CP33-3			4.7	4.71	4.94	4.62			406.2	316	414.4	355.2		28	72	4.708	356.52	12.5		
CP33-4	6.01	6.07	6.48	6.84			429	397.1	396.2	386.2				14	86	6.426	394.55	11.0		
CP33-5			6.29	5.49	6	6.26			388.9	382.5	392.5	383.4		90	10	6.118	389.94	12.0		
CP33-6			5.75	6.2	6.23	5.81			399.8	385.2	364.3	351.5		15	85	6.003	370.45	12.5		
CP33-7	6.01	6.07	6.48	6.84			429	397.1	396.2	386.2				30	70	6.392	397.91	10.5		
CP33-8	7.21	9.04	7.37	10.39			404.4	429.9	393.4	512.8				80	20	7.775	413.39	11.0		
CP33-9			9.01	9.52	7.16	8.17			429.9	529.1	445.4	420.8		30	70	8.617	463.75	13.0		
CP33-10			9.02	8.28	7.19	7.48			429.9	549.2	449	411.7		85	15	8.071	445.58	12.0		
CO33-1			4.72	0	4.25	0			408	0	375.2	0		100	0	4.485	391.62	12.5		
CO33-2			4.48	0	4.97	0			392.5	0	387.1	0		100	0	4.725	389.80	12.0		
CO33-3			4.11	0	4.07	0			422.6	0	398	0		100	0	4.090	410.29	11.0		
CO33-4	6.04	0	6.29	0			346.1	0	388.9	0				100	0	6.165	367.49	10.5		
CO33-5			5.18	0	6.97	0			464.5	0	349.7	0		100	0	6.075	407.10	13.5		
CO33-6			5.18	0	6.97	0			464.5	0	349.7	0		100	0	6.075	407.10	13.5		
CO33-7	6.73	0	6.79	0			405.3	0	391.6	0				100	0	6.760	398.45	12.0		
CO33-8	11.16	0	7.29	0			471.8	0	434.4	0				100	0	9.225	453.10	11.0		
CO33-9	8.28	0	9.82	0			428.1	0	553.7	0				100	0	9.050	490.89	10.0		
CO33-10			9.35	0	7.32	0			536.4	0	501.8	0		100	0	8.335	519.13	11.0		
CP55-1	4.6	4.31	4.81	4.31	4.18	4.01	434.4	362.5	373.4	434.4	382.5	429	91	9	4.501	397.85	11.0			
CP55-2	3.01	0	4.05	0	4.65	0	415.3	0	419.9	0	397.1	0		100	0	3.903	410.75	12.5		
CP55-3	4.83	4.84	4.96	4.7	3.44	4.94	413.5	407.1	425.3	406.2	373.4	414.4	60	40	4.577	406.13	12.5			
CP55-4	5.68	6.01	6.94	6.48	6.96	5.98	438.1	429	448.1	396.2	382.5	409.8	14	86	6.208	413.23	10.5			
CP55-5	6.04	0	6.29	0	6	0	346.1	0	388.9	0	392.5	0		100	0	6.110	375.83	13.0		
CP55-6	6.66	6.86	5.75	6.2	6.23	5.81	459	500.9	399.8	385.2	364.3	351.5	84	16	6.226	408.49	13.5			
CP55-7	6.01	6.07	6.48	6.84	5.98	6.33	429	397.1	396.2	386.2	409.8	378	12	88	6.383	390.02	12.0			
CP55-8	7.21	9.04	7.37	10.39	8.05	10.51	404.4	429.9	393.4	512.8	440.8	496.4	20	80	9.493	466.30	11.0			
CP55-9	7.85	7.15	9.01	9.52	7.16	8.17	418.9	417.1	429.9	529.1	445.4	420.8	30	70	8.198	448.39	10.0			
CP55-10	8.57	7.37	9.02	8.28	7.19	7.48	395.3	414.4	429.9	549.2	449	411.7	30	70	7.875	448.30	11.0			
CO55-1	4.51	0	4.72	0	4.94	0	415.3	0	413.5	0	400.7	0		100	0	4.723	409.84	12.5		
CO55-2	4.98	0	4.2	0	4.8	0	458.1	0	327.9	0	377	0		100	0	4.660	387.67	12.5		
CO55-3	4.52	0	4.45	0	4.99	0	450.8	0	438.1	0	375.2	0		100	0	4.653	421.37	13.0		
CO55-4	6.37	0	6.93	0	5.16	0	429.9	0	397.1	0	449	0		100	0	6.153	425.32	11.0		
CO55-5	5.41	0	6	0	6.59	0	367	0	459	0	391.6	0		100	0	6.000	405.89	11.0		
CO55-6	6.61	0	6.46	0	5.89	0	406.2	0	387.1	0	328.8	0		100	0	6.320	374.01	14.0		
CO55-7	6.52	0	6.8	0	5.85	0	444.4	0	409.8	0	324.2	0		100	0	6.390	392.84	12.5		
CO55-8	7.51	0	8.63	0	7.3	0	435.3	0	408.9	0	524.6	0		100	0	7.813	456.28	13.5		
CO55-9	11.16	0	7.29	0	7.69	0	471.8	0	434.4	0	416.2	0		100	0	8.713	440.80	12.0		
CO55-10	8.57	0	9.02	0	7.19	0	395.3	0	429.9	0	449	0		100	0	8.260	424.71	12.0		
CP55M-1	4.31	4.4	4.31	3.93	4.01	4.59	362.5	363.4	434.4	441.7	429	419.9	52	48	4.256	408.48	10.5			
CP55M-2	3.01	4.97	4.05	4.48	4.65	4.97	415.3	404.4	419.9	392.5	397.1	387.1	30	70	4.536	399.48	12.5			
CP55M-3	4.84	4.92	4.7	4.71	4.94	4.62	407.1	421.7	406.2	316	414.4	355.2	5	95	4.754	366.55	13.0			
CP55M-4	6.01	0	6.48	0	5.98	0	429	0	396.2	0	409.8	0		100	0	6.157	411.66	12.5		
CP55M-5	6.04	6.64	6.29	5.49	5.27	6.8	346.1	392.5	388.9	382.5	325.1	409.8	90	10	5.911	357.53	11.0			
CP55M-6	6.66	0	5.75	0	6.23	0	459	0	399.8	0	364.3	0		100	0	6.213	407.71	11.5		
CP55M-7	5.68	6.01	6.94	6.48	6.96	5.98	438.1	429	448.1	396.2	382.5	409.8	82	18	6.460	420.87	12.0			
CP55M-8	7.21	9.04	7.37	10.39	8.05	10.51	404.4	429.9	393.4	512.8	440.8	496.4	78	22	8.079	427.57	13.0			
CP55M-9	7.85	7.15	9.01	9.52	8.54	7.16	418.9	417.1	429.9	529.1	482.7	445.4	30	70	8.100	457.86	10.5			
CP55M-10	8.57	7.37	9.02	8.28	7.19	7.48	395.3	414.4	429.9	549.2	449	411.7	62	38	8.051	437.52	11.0			
CO55M-1	4.31	0	4.31	0	4.01	0	362.5	0	434.4	0	429	0		100	0	4.210	408.62	12.5		
CO55M-2	4.62	0	4.8	0	3.48	0	407.1	0	410.7	0	384.3	0		100	0	4.300	400.73	13.5		
CO55M-3	4.84	0	4.7	0	4.94	0	407.1	0	406.2	0	414.4	0		100	0	4.827	409.23	12.0		
CO55M-4	5.41	0	6	0	6.59	0	367	0	459	0	391.6	0		100	0	6.000	405.89	11.0		
CO55M-5	6.04	0	6.29	0	6	0	346.1	0	388.9	0	392.5	0		100	0	6.110	375.83	10.5		
CO55M-6	6.66	0	6.2	0	5.81	0	500.9	0	385.2	0	351.5	0		100	0	6.290	412.57	11.5		
CO55M-7	6.61	0	6.46	0	5.89	0	406.2	0	387.1	0	328.8	0		100	0	6.320	374.01	12.5		
CO55M-8	8.28	0	8.95	0	8.26	0	407.1	0	491.8	0	460.8	0		100	0	8.497	453.25	13.0		
CO55M-9	9.16	0	7.42	0	8.54	0	451.7	0	522.8	0	482.7	0		100	0	8.373	485.73	11.0		
CO55M-10	7.37	0	8.28	0	7.48	0	414.4	0	549.2	0	411.7	0		100	0	7.710	458.41	11.5		

表 3.5-3 スギ CLT 試験体の加圧部分の材料物性(直交層)

試験体名	直交層												平均ヤング係数 (Gpa)	平均密度 (kg/m <sup>3</sup> )	平均含水率 (%)
	ヤング係数(GPa)				密度(× 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )				幅(mm)						
	2層目		4層目		2層目		4層目								
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②					
CP33-1	5	0			401.8	0	436.3	0	100	0	5.03	419.08	13.5		
CP33-2			5	0	297.1	0	394.3	0	100	0	4.96	345.67	11.0		
CP33-3			4.8	0	410.1	0	386	0	100	0	4.84	398.06	11.5		
CP33-4	5.4	0			432.2	0	405.3	0	100	0	5.36	418.73	12.0		
CP33-5			6.7	0	453.5	0	438.4	0	100	0	6.73	445.96	13.5		
CP33-6			6.2	0	438.4	0	443.2	0	100	0	6.17	440.79	11.0		
CP33-7	5.5	0			438.4	0	443.2	0	100	0	5.50	440.79	11.5		
CP33-8	11	0			492.8	0	434.2	0	100	0	10.83	463.54	10.5		
CP33-9			7.6	0	399.1	0	399.1	0	100	0	7.58	399.09	12.0		
CP33-10			7.6	0	455.6	0	512.8	0	100	0	7.60	484.22	12.5		
CO33-1			4.2	4.5	389.4	377.7	440.4	463.2	18	82	4.41	419.47	11.5		
CO33-2			4.8	5	394.3	406.7	297.1	348.1	68	32	4.88	355.82	12.5		
CO33-3			5	4.9	436.3	451.5	401.8	451.5	12	88	4.91	447.59	12.0		
CO33-4	6.5	5.4			484.6	309.5	423.2	438.4	30	70	5.75	397.92	12.0		
CO33-5			5.9	6.5	449.4	437	414.3	403.2	48	52	6.22	425.74	13.5		
CO33-6			6.8	6.7	503.2	432.2	503.2	405.3	12	88	6.67	428.87	15.0		
CO33-7	5.4	5.7			309.5	345.3	438.4	481.8	52	48	5.57	392.96	10.5		
CO33-8	8	8.6			524.5	430.8	452.9	468	50	50	8.33	469.05	11.0		
CO33-9	7.6	11			512.8	492.8	455.6	434.2	54	46	9.09	474.70	12.0		
CO33-10			7.6	6.7	399.1	466.6	399.1	405.3	15	85	6.79	430.43	11.5		
CP55-1	4.7	0	5	0	335.7	0	474.9	0	100	0	4.83	405.29	13.5		
CP55-2	5	0	4.7	0	401.8	0	436.3	0	100	0	4.88	419.08	13.0		
CP55-3	4.2	0	4.8	0	440.4	0	389.4	0	100	0	4.53	414.94	12.0		
CP55-4	6.2	0	6.5	0	437	0	403.2	0	100	0	6.34	420.11	11.5		
CP55-5	6.7	0	5.3	0	438.4	0	453.5	0	100	0	5.99	445.96	11.0		
CP55-6	6.5	0	6.2	0	403.2	0	437	0	100	0	6.34	420.11	10.5		
CP55-7	5.3	0	6.7	0	453.5	0	438.4	0	100	0	5.99	445.96	10.0		
CP55-8	8.9	0	7.8	0	504.5	0	523.2	0	100	0	8.35	513.85	11.5		
CP55-9	12	0	8.3	0	558.3	0	439.1	0	100	0	9.94	498.69	12.0		
CP55-10	8.3	0	8.3	0	460.4	0	555.6	0	100	0	8.29	508.00	12.0		
CO55-1	4.8	4.3	4.2	4.5	389.4	377.7	440.4	463.2	57	43	4.47	417.31	13.0		
CO55-2	4.6	0	5	0	406.7	0	348.1	0	100	0	4.82	377.38	12.0		
CO55-3	4.8	4.7	5	5	332.2	436.3	361.9	401.8	15	85	4.88	408.27	12.0		
CO55-4	5.4	5.7	6.5	6.7	309.5	345.3	438.4	481.8	85	15	6.01	379.88	11.5		
CO55-5	6.7	6.2	5.9	6.5	449.4	437	414.3	403.2	50	50	6.31	425.97	12.5		
CO55-6	6.8	5.4	6.8	6.7	503.2	432.2	503.2	405.3	54	46	6.46	464.33	13.5		
CO55-7	6.5	5.4	6.4	6.5	484.6	309.5	423.2	438.4	94	6	6.43	449.09	11.0		
CO55-8	8	8.6	8.3	11	524.5	430.8	452.9	468	52	48	8.95	469.84	13.0		
CO55-9	7.6	11	7.9	7	512.8	492.8	455.6	434.2	54	46	8.29	474.70	12.5		
CO55-10	7.6	10	7.6	7.2	399.1	466.6	399.1	420.5	56	44	8.06	418.65	11.0		
CP55M-1	5	0	4.8	0	394.3	0	297.1	0	100	0	4.89	345.67	12.0		
CP55M-2	4.7	0	5	0	436.3	0	401.8	0	100	0	4.88	419.08	11.5		
CP55M-3	4.5	0	4.3	0	463.2	0	377.7	0	100	0	4.38	420.46	13.5		
CP55M-4	6.4	0	6.1	0	504.5	0	419.8	0	100	0	6.25	462.16	11.0		
CP55M-5	6.8	0	6.8	0	503.2	0	503.2	0	100	0	6.84	503.17	11.5		
CP55M-6	6	0	5.9	0	468.7	0	495.6	0	100	0	5.98	482.15	12.5		
CP55M-7	5.9	0	6.7	0	414.3	0	449.4	0	100	0	6.28	431.83	12.0		
CP55M-8	8.3	0	8.3	0	555.6	0	460.4	0	100	0	8.29	508.00	12.5		
CP55M-9	10	0	7.2	0	466.6	0	420.5	0	100	0	8.66	443.55	12.5		
CP55M-10	7.8	0	8.9	0	523.2	0	504.5	0	100	0	8.35	513.85	11.5		
CO55M-1	4.3	4.6	4.5	4.9	377.7	366.7	463.2	465.3	58	42	4.52	418.58	11.5		
CO55M-2	5	4.6	4.8	5	394.3	406.7	297.1	348.1	80	20	4.87	352.01	12.5		
CO55M-3	4.8	4.7	5	5	332.2	436.3	361.9	401.8	58	42	4.89	377.30	13.5		
CO55M-4	6.5	5.4	6.4	6.5	484.6	309.5	423.2	438.4	95	5	6.43	449.89	12.5		
CO55M-5	6.7	6.2	5.9	6.5	449.4	437	414.3	403.2	50	50	6.31	425.97	10.5		
CO55M-6	6.8	5.4	6.8	6.7	503.2	432.2	503.2	405.3	54	46	6.46	464.33	11.5		
CO55M-7	6.5	5.4	6.4	6.5	484.6	309.5	423.2	438.4	92	8	6.42	447.49	11.5		
CO55M-8	9.3	8	7.2	8.3	499	524.5	451.5	452.9	93	7	8.25	476.20	12.0		
CO55M-9	11	8.3	7	8.3	492.8	555.6	434.2	460.4	55	45	8.63	483.54	11.5		
CO55M-10	7.2	7.6	10	7.6	420.5	399.1	466.6	399.1	50	50	8.12	421.32	10.5		

### 3.6 試験方法

試験方法図は図 3.6-1 に示すとおりである。スギ集成材の縦圧縮試験については、中央部分に歪みゲージを張り、全体の圧縮歪みから求めたヤング係数を計測し、その差分から表面の剛性を求める。

加力は単調圧縮加力とし、GP200 及び GP300 は荷重が落ちきるまで、これら以外は文献<sup>2)</sup>のめり込み試験方法に基づき、変位 20 mm まで計測を行った。

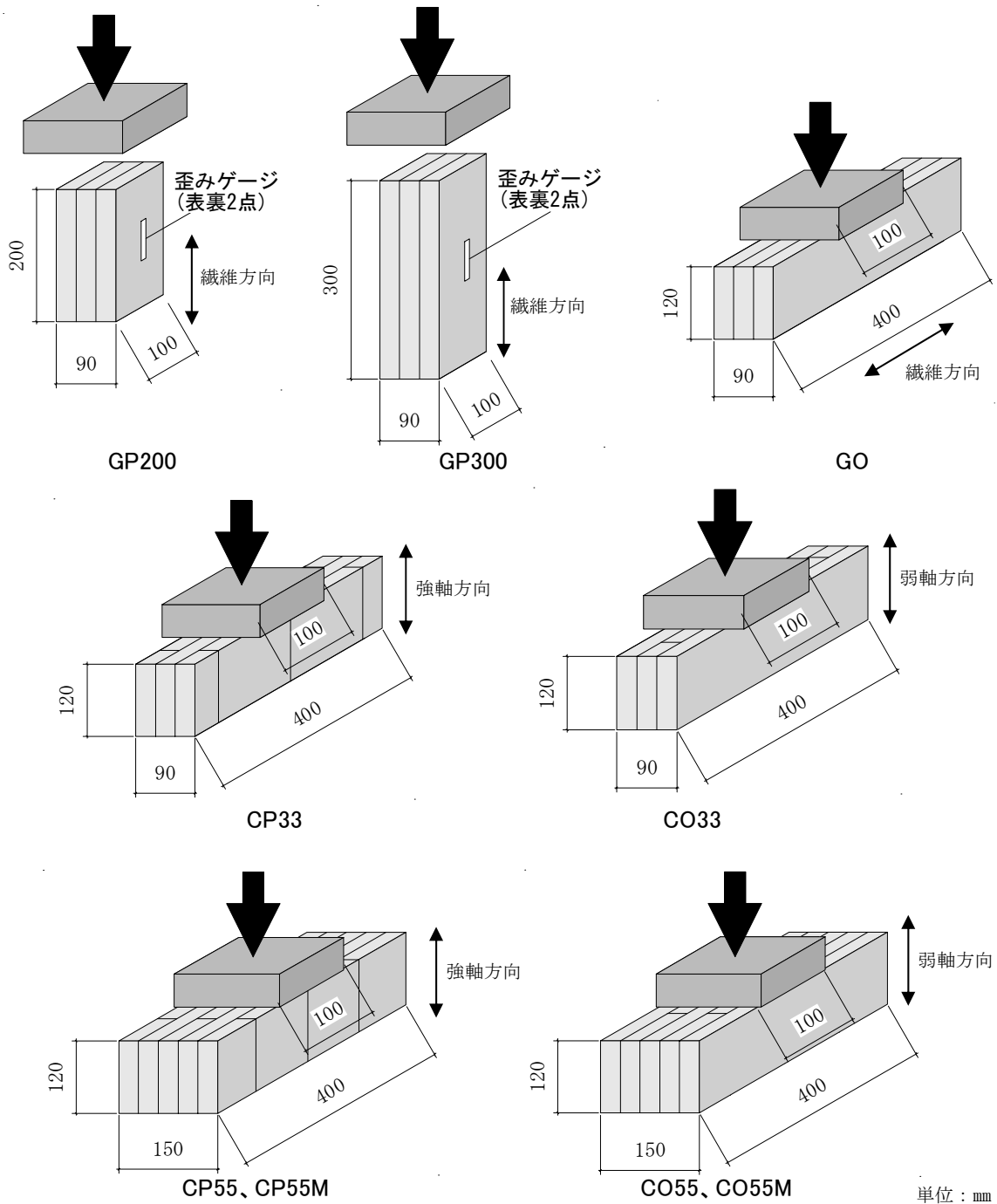


図 3.6-1 試験方法

### 3.7 試験結果

#### (1) 集成材試験結果と CLT 試験結果の比較

試験結果を図 3.7-1～図 3.7-3 に示す。集成材の縦圧縮試験では、いずれも直線的に荷重が上がっていき、比例限度を過ぎてから比較的早く最大荷重を迎え、その後は徐々に荷重が低下していく傾向にある(図 3.7-1 の GP200 及び GP300)。集成材の横圧縮(めり込み)試験では、降伏後の二次勾配は荷重が徐々に上がり続ける特性がある(図 3.7-1 の GO)。一方、CLT の荷重変位曲線は、集成材の縦圧縮試験と横圧縮試験を足し合わせたような曲線となる(図 3.7-2、図 3.7-3)。すなわち、最大荷重を迎えた後、一定の荷重まで低下するが、その荷重値を維持したまま、変形が進展する。

試験の様子は写真 3.7-1～写真 3.7-6、試験体の破壊性状は写真 3.7-7～写真 3.7-26 のとおりである。集成材の縦圧縮試験は、写真 3.7-7～写真 3.7-11 に示すとおり座屈のような破壊性状となった。集成材の横圧縮試験は写真 3.7-12 のとおりめり込み破壊となったが、中には写真 3.7-13 のように割裂破壊を含むものもあった。外層が加力の向きに対して繊維平行となる CP33,CP55,CP55M は、写真 3.7-14、写真 3.7-21 に示すように外層が集成材の縦圧縮試験と同じような座屈のような破壊性状となった。これらの破壊性状を見ると、平行層も直交層と同じように端部が降伏していることが分かる。一方、外層が繊維直交となる CO33,CO55,CO55M は、写真 3.7-18、写真 3.7-19、写真 3.7-23 及び写真 3.7-24 のようにめり込みが主たる破壊性状であるが、写真 3.7-20 及び写真 3.7-25 のように積層接着面の割裂を伴うものもあった。なお、圧縮された直交層は復元力によって写真 3.7-17 及び写真 3.7-26 のように膨らみができる。

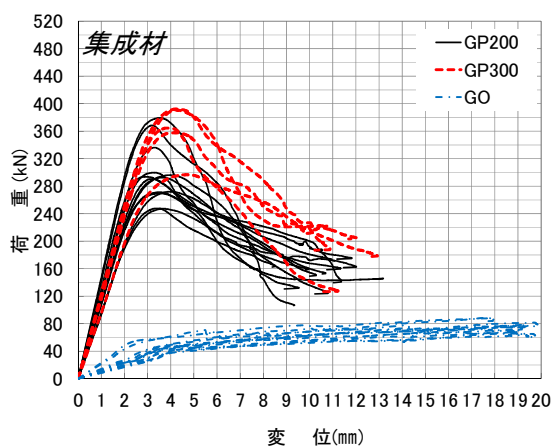


図 3.7-1 集成材の縦圧縮及び横圧縮試験結果

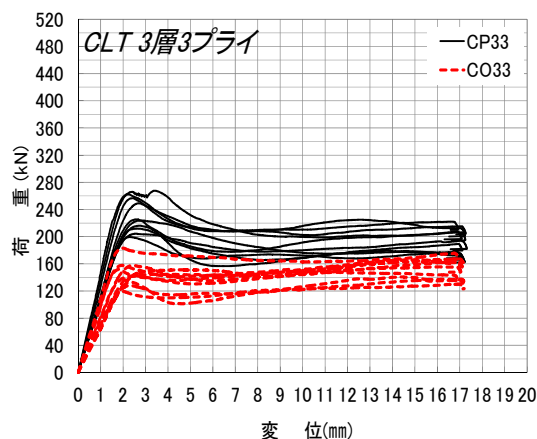


図 3.7-2 CLT3層3プライの圧縮試験結果

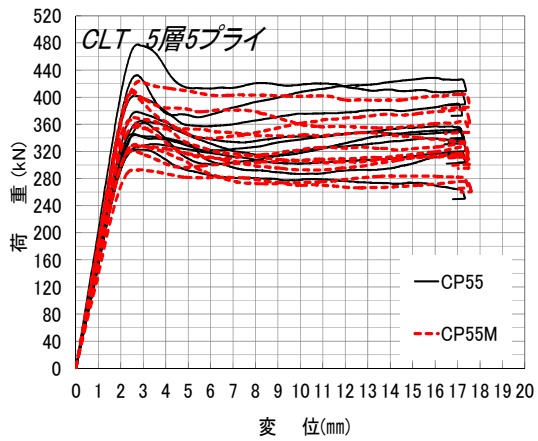


図 3.7-2 CLT3 層 3 プライの圧縮試験結果

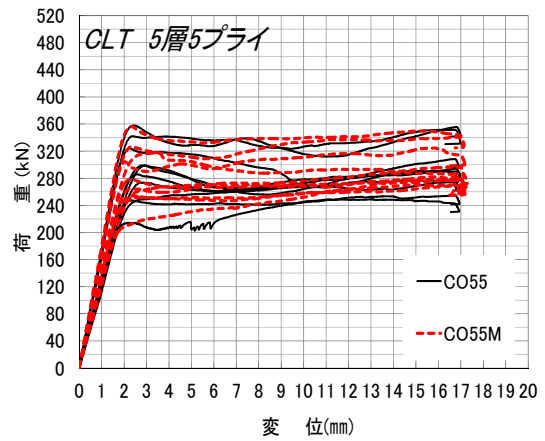


図 3.7-3 CLT5 層 5 プライの圧縮試験結果



写真 3.7-1 GP200 実験の様子



写真 3.7-2 GP300 実験の様子

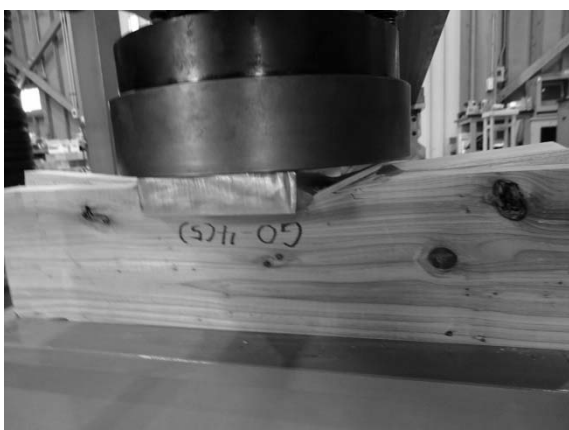


写真 3.7-3 GO 実験の様子



写真 3.7-4 CO33 実験の様子



写真 3.7-5 CP55 実験の様子

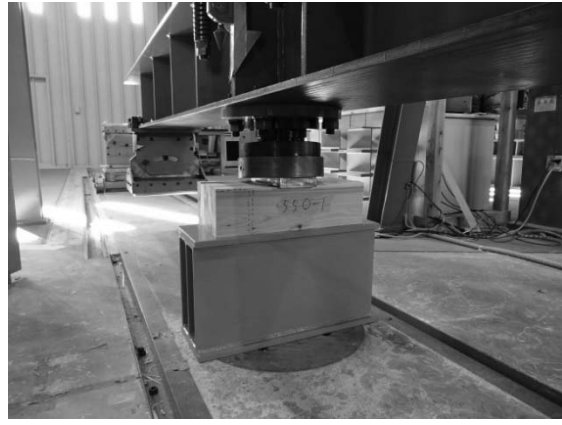


写真 3.7-6 CO55 実験の様子



写真 3.7-7 GP200 試験後の試験体

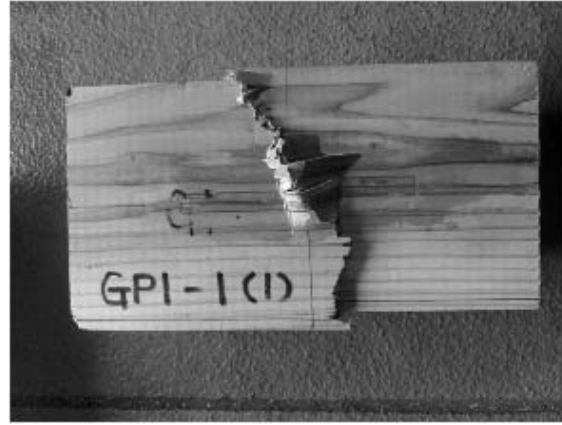


写真 3.7-8 GP200 座屈のような破壊

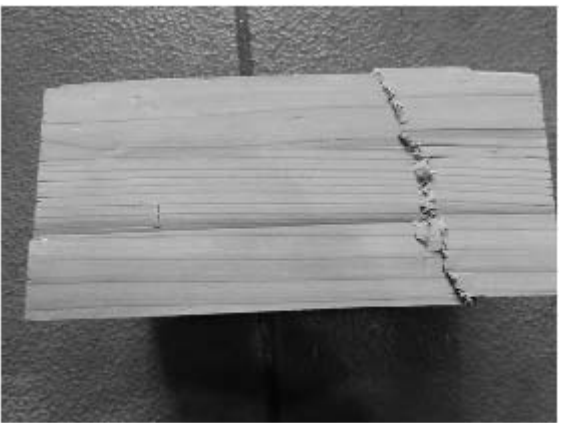


写真 3.7-9 GP200 座屈のような破壊



写真 3.7-10 GP200 座屈のような破壊



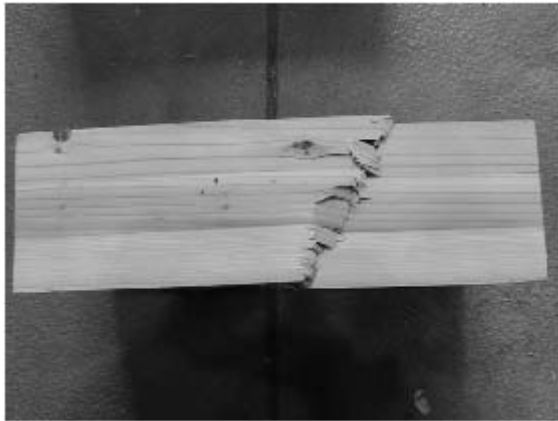


写真 3.7-11 GP300 座屈のような破壊

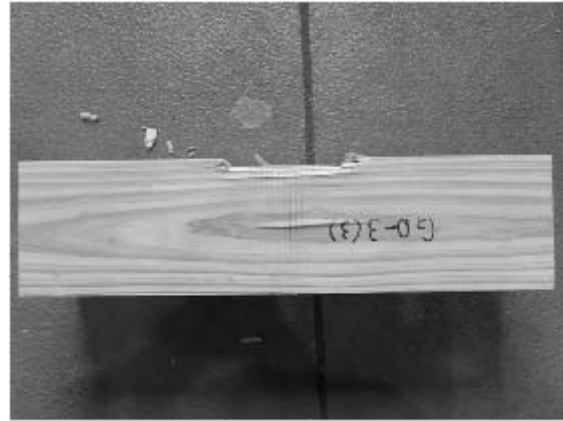


写真 3.7-12 GO めり込み



写真 3.7-13 GO 割裂破壊

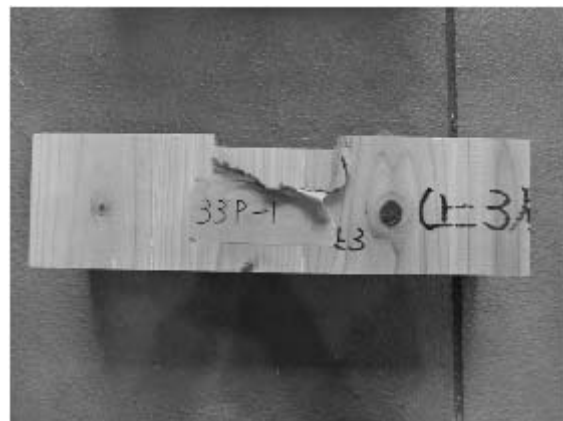


写真 3.7-14 CP33 めり込み



写真 3.7-15 CP33 めり込み



写真 3.7-16 CP33 めり込み



写真 3.7-17 CP33 めり込み、直交層の復元力によって平行層との間に割裂

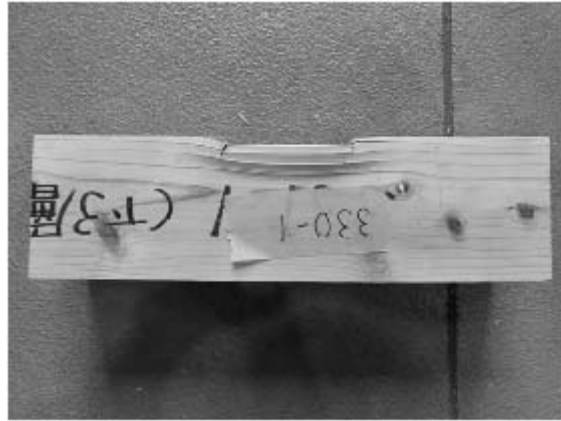


写真 3.7-18 CO33 めり込み

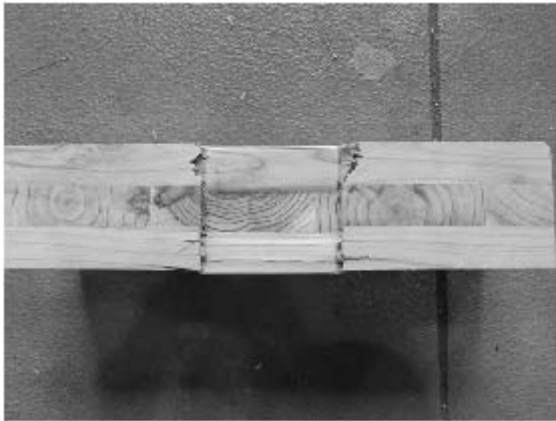


写真 3.7-19 CO33 めり込み

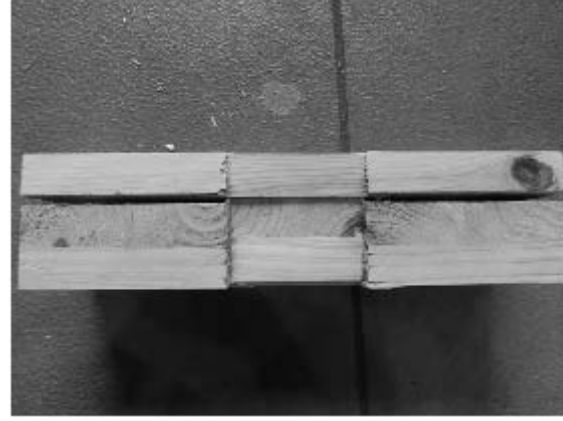


写真 3.7-20 CO33 積層接着面の割裂



写真 3.7-21 CP55 外層の座屈

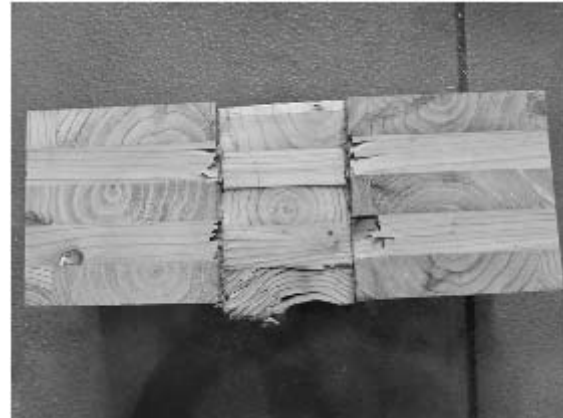


写真 3.7-22 CP55 めり込み



写真 3.7-23 CO55 むり込み

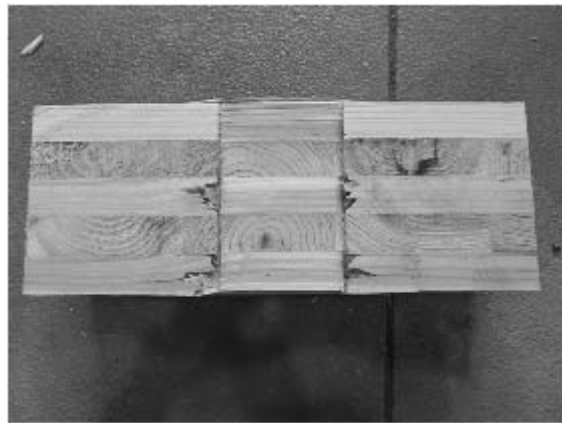


写真 3.7-24 CO55 むり込み

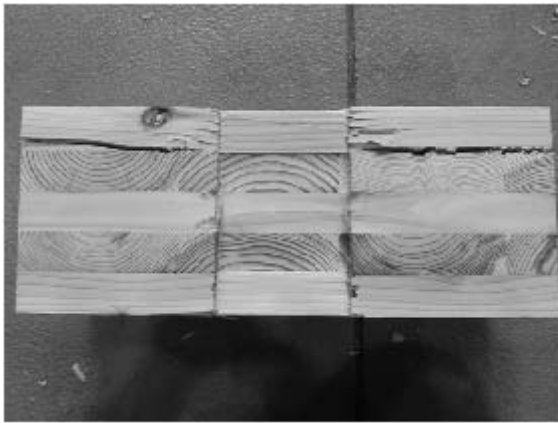


写真 3.7-25 CO55 積層接着面の割裂

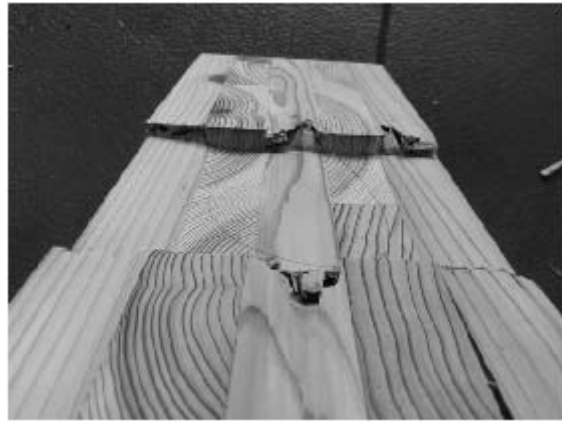


写真 3.7-26 CO55 直交層の復元力

## (2)剛性の評価方法

変位はストロークの変位であるため、初期滑りについては補正を行った。剛性の評価方法は、弾性域の直線部分とほぼ一致するように  $0.1-0.4P_{max}$  を剛性とした。集成材のむり込み試験については、降伏後に荷重が上がっていくため、 $0.3-0.5P_{max}$  とした。評価結果の例を図 3.7-4 及び図 3.7-5 に示す。

文献 56)に言及されている丸鋸等による表面の凹凸が剛性に及ぼす影響については、3.8 節で述べる。

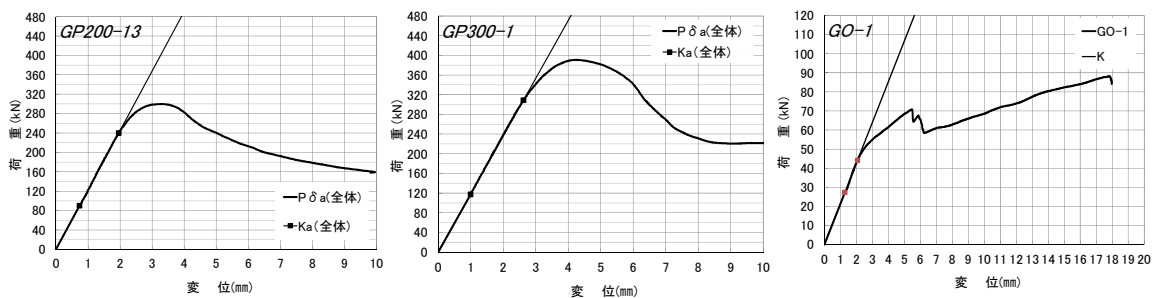


図 3.7-4 集成材試験体の剛性評価の例

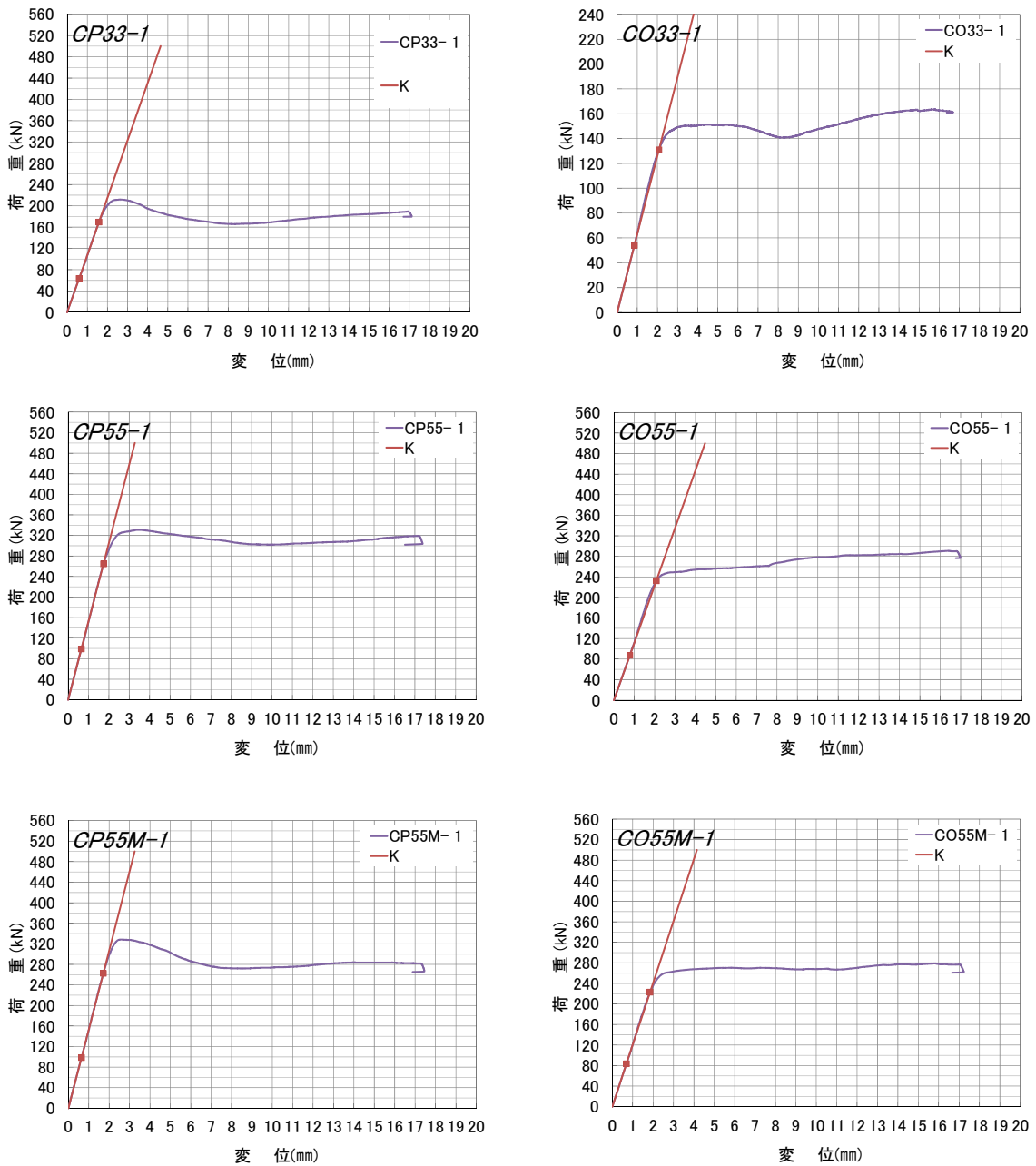


図 3.7-5 CLT 試験体の剛性評価の例

### (3)材料物性が強度性能に与える影響

集成材及び CLT 試験体の原版に使用したラミナのヤング係数と密度の相関関係を図 3.7-6 及び図 3.7-7 に示す。

各試験体の平均ヤング係数及び平均密度を x 軸に、試験結果から最大荷重と剛性を y 軸としたグラフを図 3.7-8～図 3.7-31 に示す。

集成材の縦圧縮試験体 GP200 及び GP300 については、図 3.7-8～図 3.7-11 及び表 3.7-1 に示すとおりヤング係数と最大荷重及び初期剛性にある程度の相関が見られ、比例関係にあることが分かった。一方、横圧縮試験 GO については図 3.7-12～図 3.7-15 及び表 3.7-1

に示すとおり全く相関が見られなかった。

CLT 試験体については、図 3.7-16～図 3.7-31 及び表 3.7-2 に示すとおり、平行層と直交層の材料物性に分けて検討を行っている。その理由は、前述の集成材の試験結果に示すとおり、平行層の最大耐力は直交層の約 4 倍、平行層の剛性は直交層の約 10 倍もの差があるため、平行層と直交層の材料物性の平均を取るべきでないと考えたためである。したがって理論的には直交層より平行層の材料物性の方が良い相関が取れるはずである。結果的にはさほど違いは見られなかった。ヤング係数と密度を比較するとどちらも最大荷重及び初期剛性と比例関係にあることが分かった。ややヤング係数の方が相関性があるようである。

集成材の試験では直交層の横部分圧縮(めり込み)試験の結果は材料物性と強度性能の相関性が低い結果となったが、CLT 試験においても直交層の全体に占める面積が大きい CO33、CO55、CO55M は、それぞれ CP33、CCP55、CCP55M と比べて相関性が低い結果となった(表 3.7-2)。

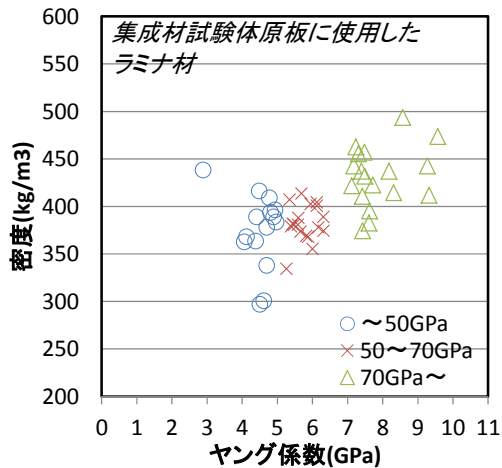


図 3.7-6 集成材試験体のヤング係数と密度の関係

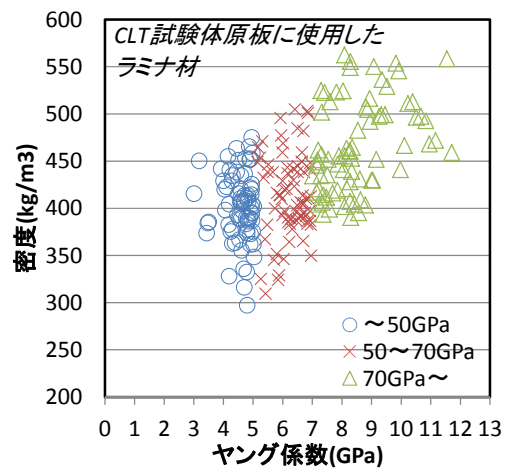


図 3.7-7 CLT 試験体のヤング係数と密度の関係

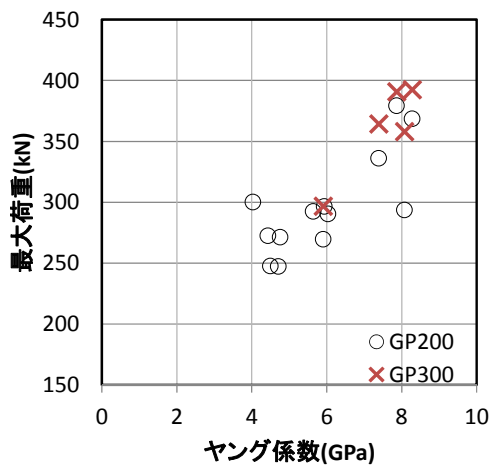


図 3.7-8 GP200 及び GP300 のヤング係数と最大荷重の関係

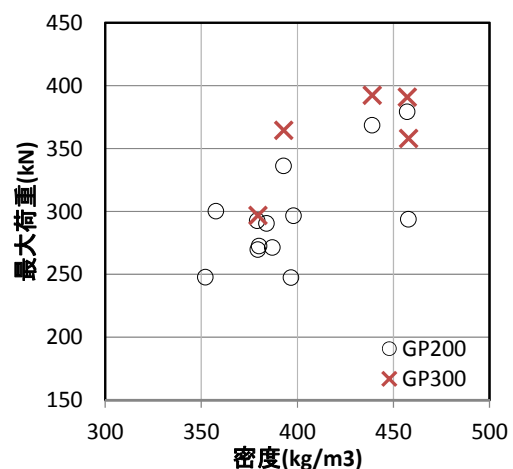


図 3.7-9 GP200 及び GP300 の密度と最大荷重の関係

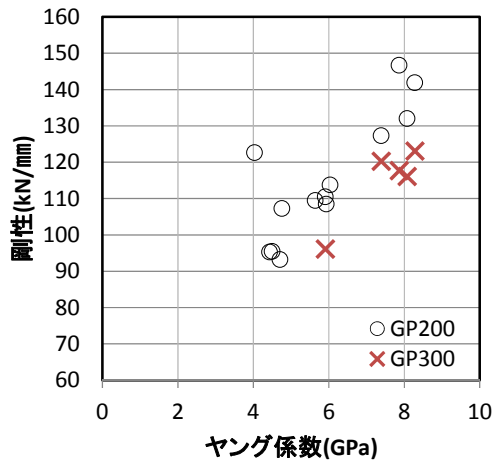


図 3.7-10 GP200 及び GP300 のヤング係数と剛性の関係

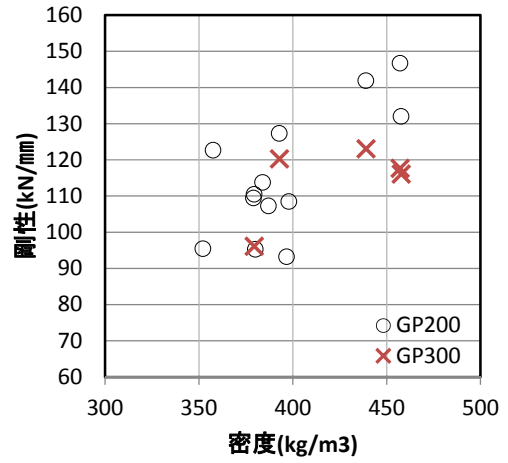


図 3.7-11 GP200 及び GP300 の密度と剛性の関係

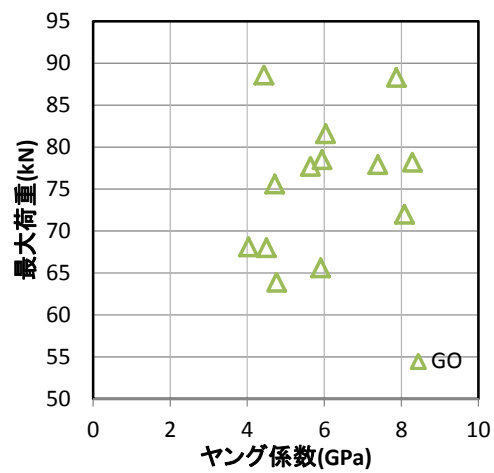


図 3.7-12 GO のヤング係数と最大荷重の関係

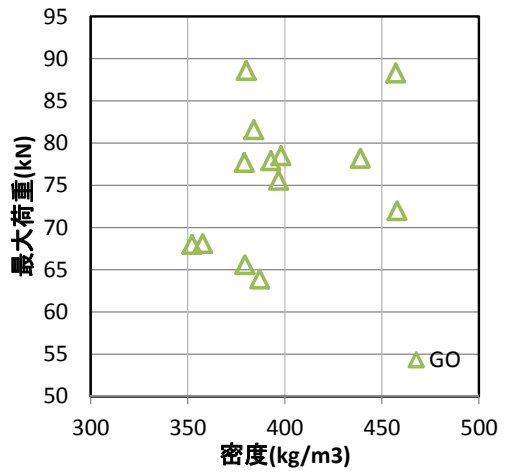


図 3.7-13 GO の密度と最大荷重の関係

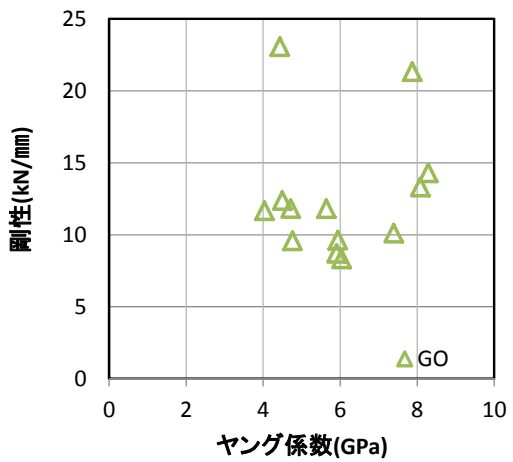


図 3.7-14 GO のヤング係数と剛性の関係

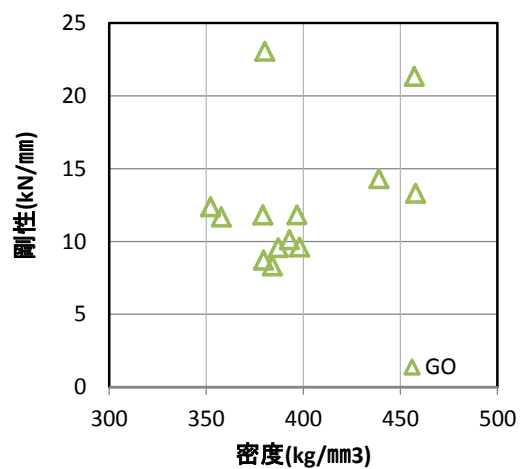


図 3.7-15 GO の密度と剛性の関係

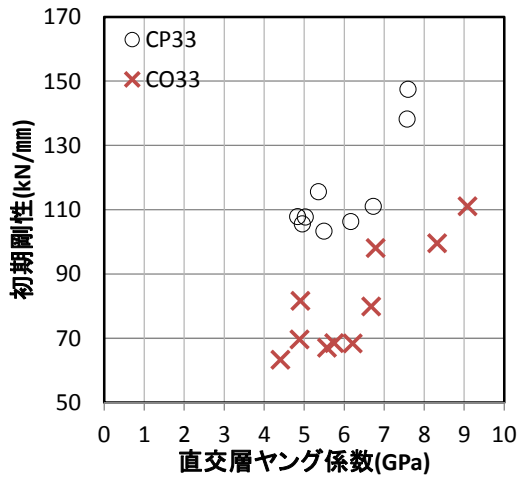


図 3.7-16 CLT3 層 3 プライ平行層のヤング係数と最大荷重の関係

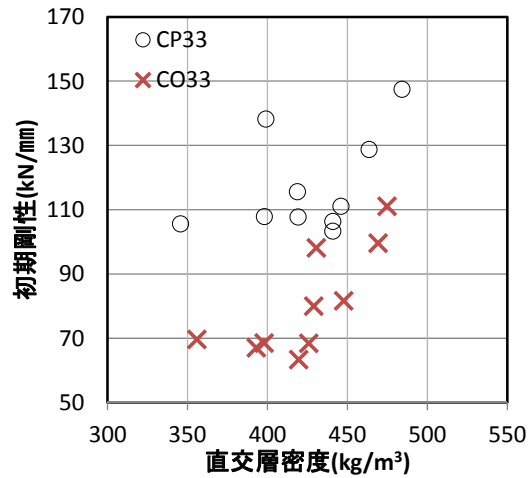


図 3.7-17 CLT3 層 3 プライ平行層の密度と最大荷重の関係

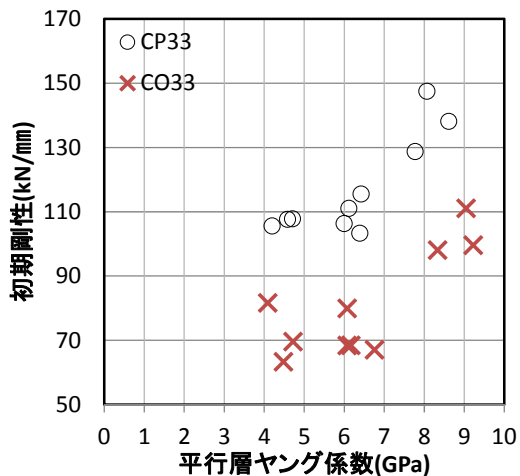


図 3.7-18 CLT3 層 3 プライ平行層のヤング係数と初期剛性の関係

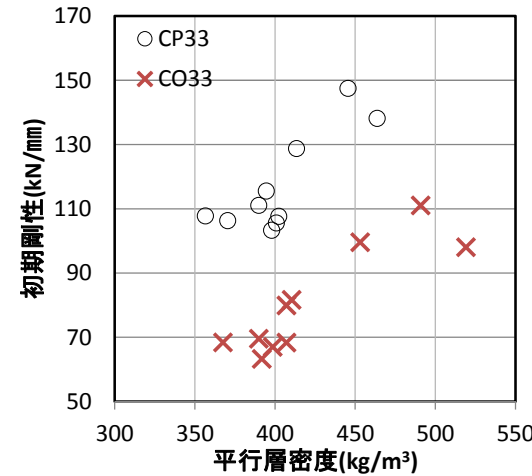


図 3.7-19 CLT3 層 3 プライ平行層の密度と初期剛性の関係

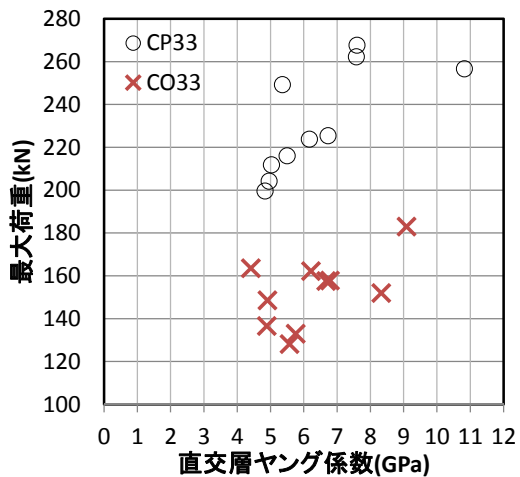


図 3.7-20 CLT3 層 3 プライ直交層のヤング係数と最大荷重の関係

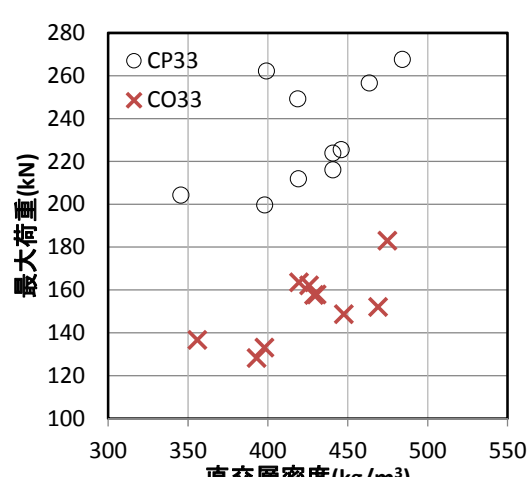


図 3.7-21 CLT3 層 3 プライ直交層の密度と最大荷重の関係

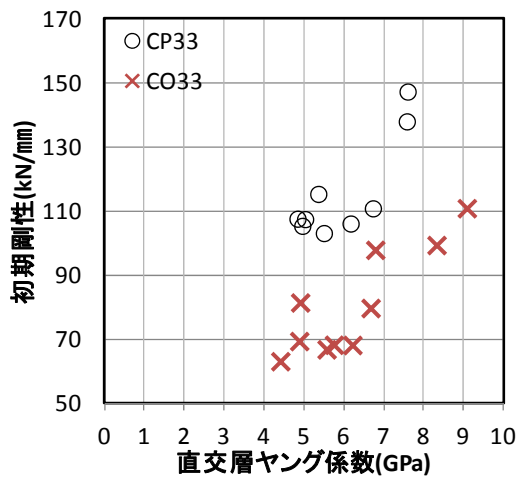


図 3.7-22 CLT3 層 3 プライ直交層のヤング係数と初期剛性の関係

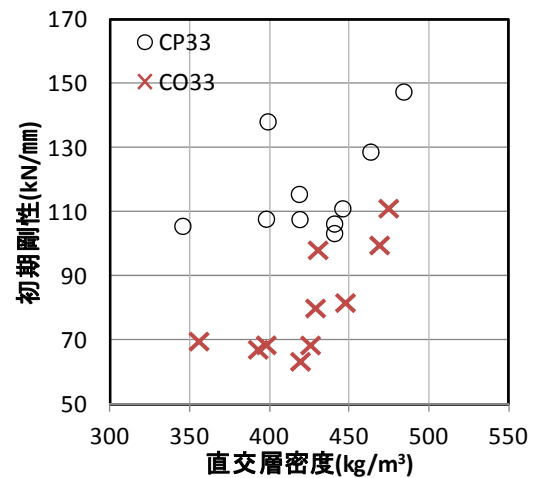


図 3.7-23 CLT3 層 3 プライ直交層の密度と初期剛性の関係

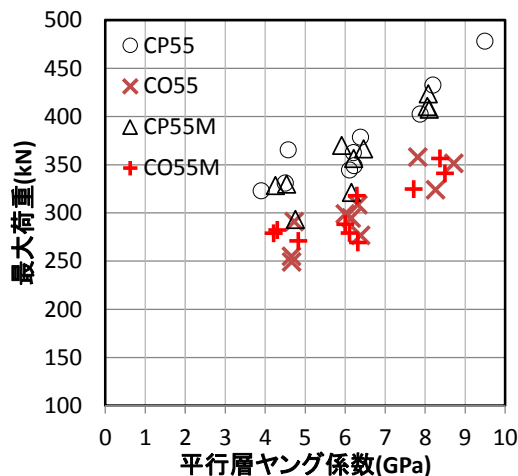


図 3.7-24 CLT5 層 5 プライ平行層のヤング係数と最大荷重の関係

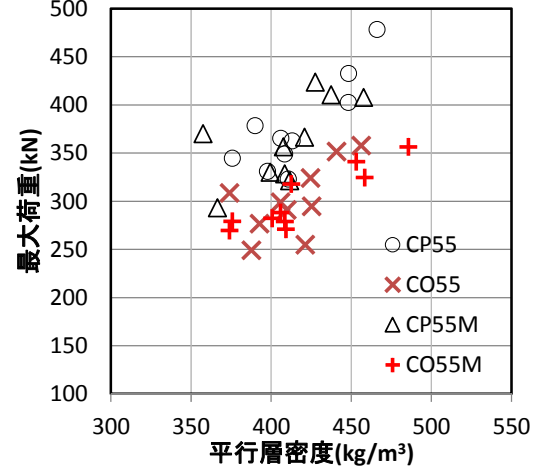


図 3.7-25 CLT5 層 5 プライ平行層の密度と最大荷重の関係

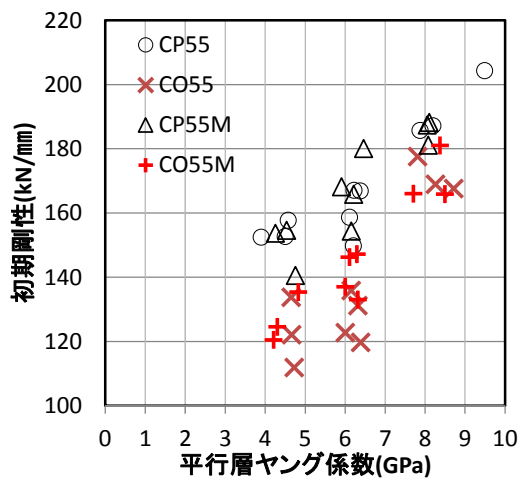


図 3.7-26 CLT5 層 5 プライ平行層のヤング係数と初期剛性の関係

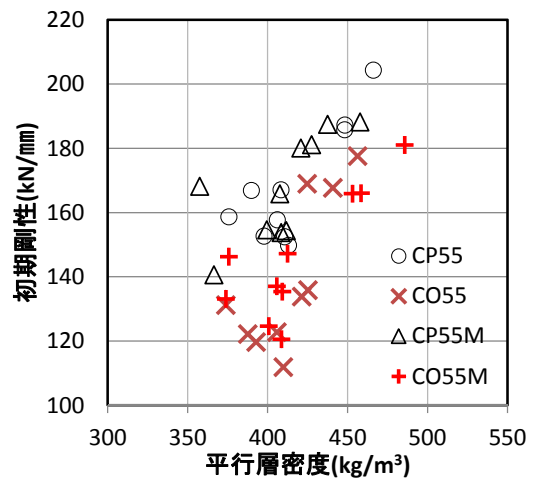


図 3.7-27 CLT5 層 5 プライ平行層の密度と初期剛性の関係



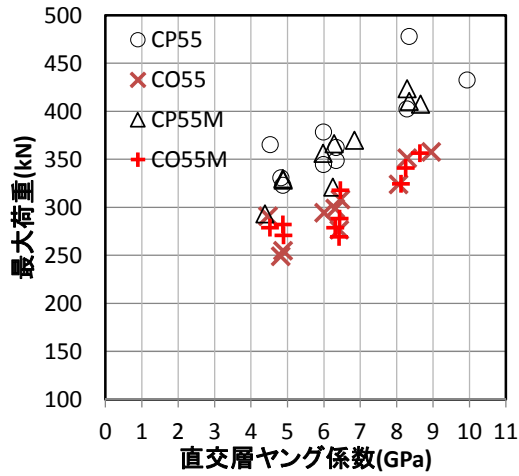


図 3.7-28 CLT5 層 5 プライ直交層のヤング係数と最大荷重の関係

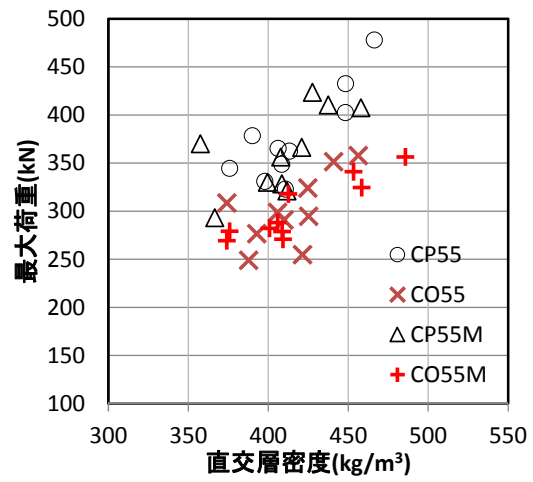


図 3.7-29 CLT5 層 5 プライ直交層の密度と最大荷重の関係

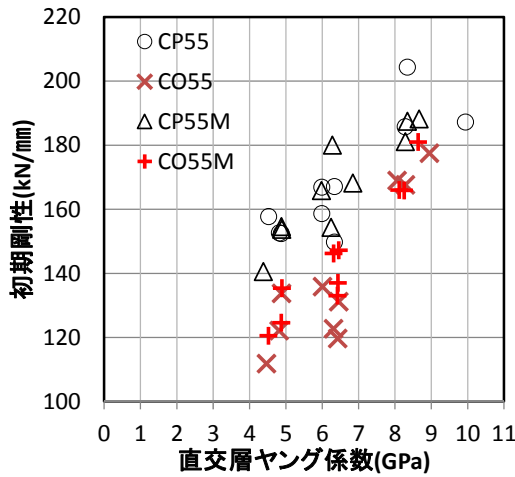


図 3.7-30 CLT5 層 5 プライ直交層のヤング係数と初期剛性の関係

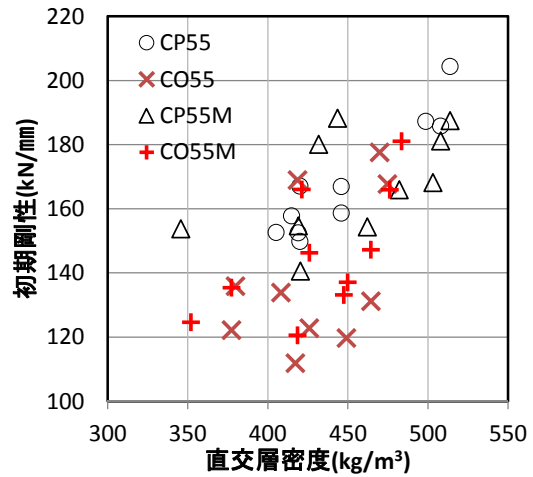


図 3.7-31 CLT5 層 5 プライ直交層の密度と初期剛性の関係

表 3.7-1 集成材試験体グラフの決定係数  $R^2$

試験体	最大荷重		初期剛性	
	ヤング係数	密度	ヤング係数	密度
GP200	0.595	0.429	0.690	0.539
GP300	0.843	0.520	0.844	0.347
GO	0.104	0.147	0.014	0.137

表 3.7-2 CLT 試験体グラフの決定係数  $R^2$

試験体	平行層				直交層			
	最大荷重		初期剛性		最大荷重		初期剛性	
	ヤング係数	密度	ヤング係数	密度	ヤング係数	密度	ヤング係数	密度
CP33	0.8613	0.5809	0.7083	0.6873	0.5207	0.3021	0.4412	0.1978
CO33	0.1207	0.3476	0.6248	0.7806	0.3007	0.5103	0.7480	0.5777
CP55	0.8436	0.6953	0.8342	0.6968	0.6699	0.6953	0.7009	0.8691
CO55	0.7778	0.4082	0.7299	0.5896	0.8007	0.4082	0.7930	0.2099
CP55M	0.8016	0.4094	0.7912	0.5090	0.8795	0.4094	0.8276	0.2913
CO55M	0.7121	0.8207	0.8794	0.6670	0.7334	0.8207	0.8908	0.4111

(4) 特性値の比較

図 3.7-32、図 3.7-33 は、試験体毎に特性値を比較したものである。  
最大耐力、初期剛性共に、平行層の面圧面積に比例して大きくなる傾向を示した。

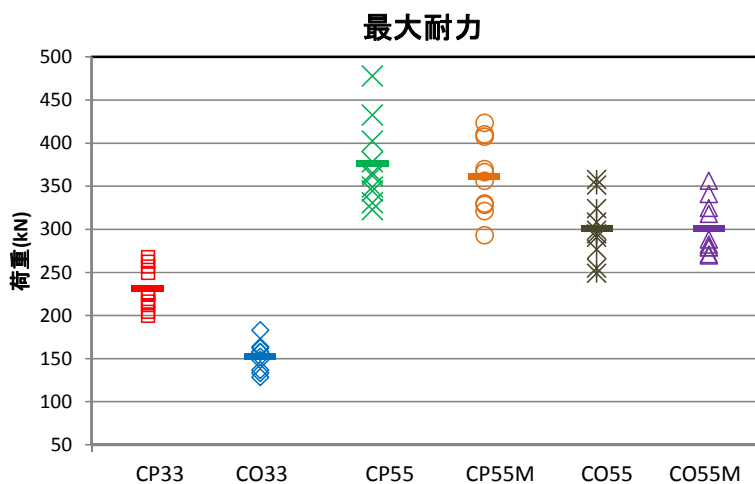


図 3.7-32 試験体種類ごとの最大耐力の比較

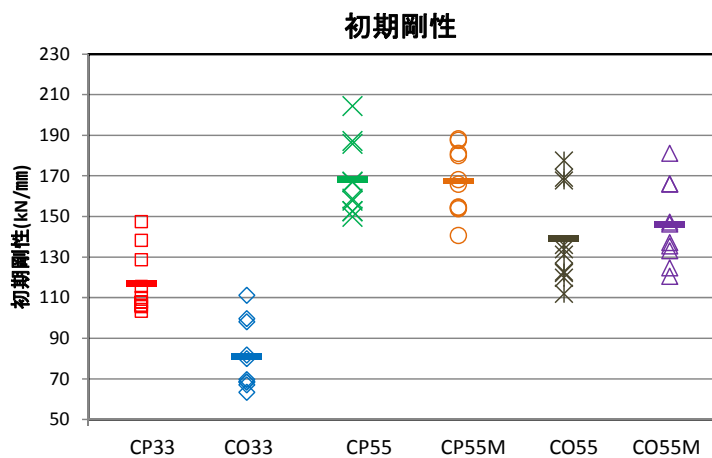


図 3.7-33 試験体種類ごとの初期剛性の比較

### 3.8 CLT 圧縮剛性の推定式の提案

#### (1) 丸鋸等による表面の凹凸の影響

文献 56)に言及されている丸鋸等による表面の凹凸の影響については、図 3.8-1 及び図 3.8-2 に比較されるように、荒仕上げのもの(試験体 CP55、CO55)とサンダー仕上げのもの(CP55M、CO55M)を比較すると剛性に影響があるとは言い難い。

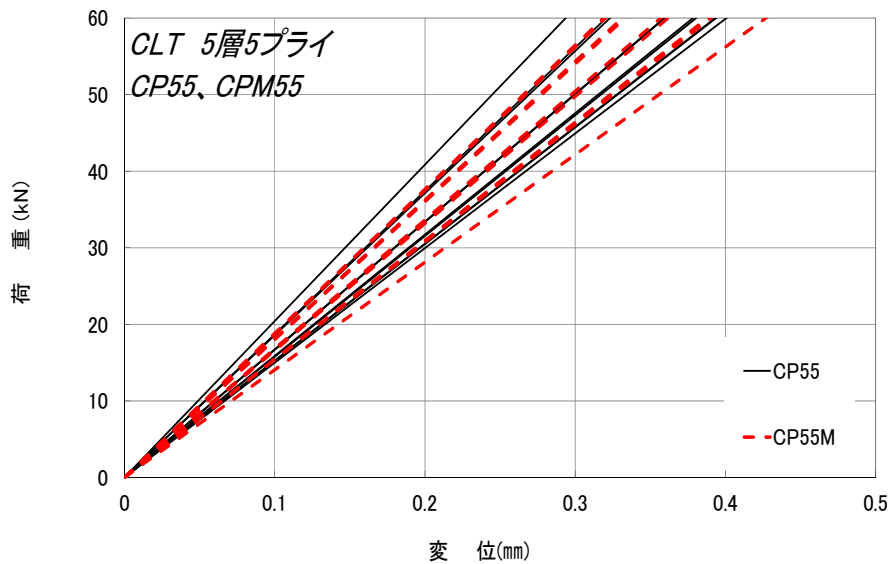


図 3.8-1 CP55(荒仕上げ)、CP55M(サンダー掛け) 表面の凹凸の影響

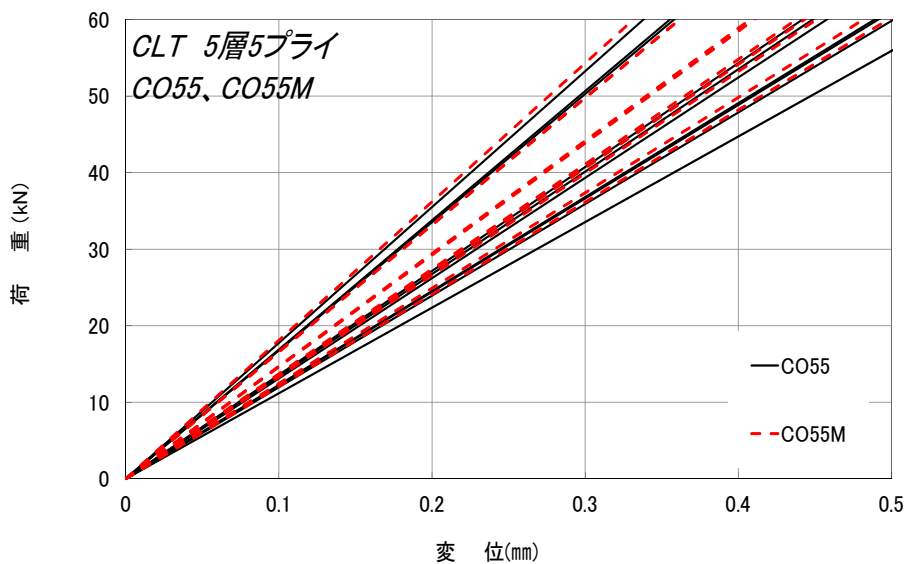


図 3.8-2 CO55(荒仕上げ)、CO55M(サンダー掛け) 表面の凹凸の影響

(2) 集成材の縦圧縮試験結果による全体剛性と中央部剛性の比較

集成材の縦圧縮試験 GP200 及び GP300 については、中央部分に歪みゲージを取り付けたが、試験体全体の剛性より中央部分の剛性の方が 2 倍程度大きいことが分かった。したがって、図 3.8-3 のとおり全体の剛性を  $k_{//}$  としたとき、中央部の剛性を  $k_c$ 、端部の剛性  $k_e$  の直列バネであると仮定した。なお、中央部分の変位は試験体の裏表 2 面に貼り付けた歪みゲージの値の平均を算出し、試験体高さ  $H$  を乗じたものとしている。

図 3.8-4～図 3.8-20 は試験結果による  $k_{//}$  及び  $k_c$  と、全体の変位から中央部の変位を差し引いた P- $\delta$  曲線から算出した  $2k_e$  をグラフにしたものである。全体の P- $\delta_a$  と中央付近の P- $\delta_c$  は、初期剛性を決めている 0.3-0.8Pmax 間においては共に線形であるため、 $k_{//}$  と  $k_c$  より、下式より  $k_e$  を求めることができる。

$$k_e = 2k_c / \left( \frac{k_c}{k_a} - 1 \right) \quad (3.8-1)$$

なお、GP200-1 の中央ひずみデータは計測装置の不調によりロストした。

実験から求めた  $k_{//}$  及び  $k_c$  と 3.8-1 式から求めた  $k_e$  について、ヤング係数と密度の関係を示したものが図 3.8-21～図 3.8-26 である。これによると  $k_{//}$  及び  $k_c$  とはヤング係数・密度に関わらず一定値を示しているのに対して、 $k_e$  は特にヤング係数と比例関係にあることが分かった。

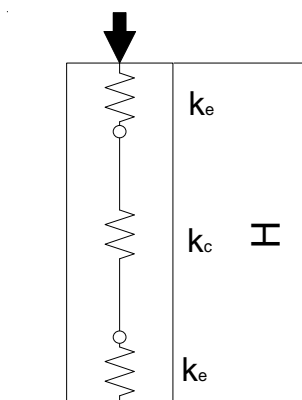


図 3.8-3 縦圧縮のバネモデルの仮定

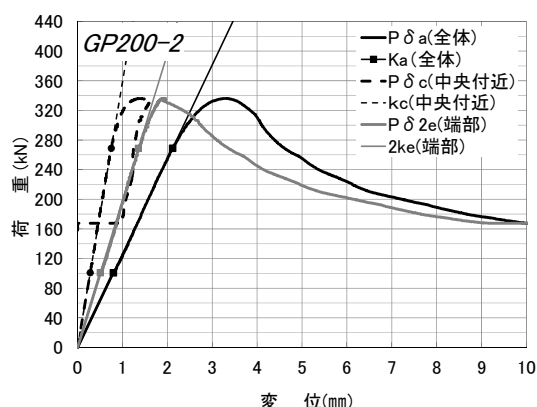


図 3.8-4 GP200-2 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

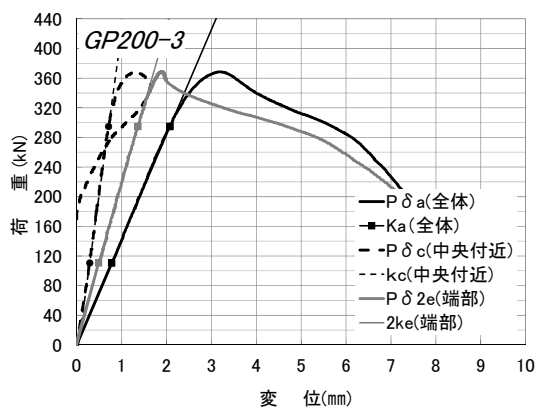


図 3.8-5 GP200-3 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

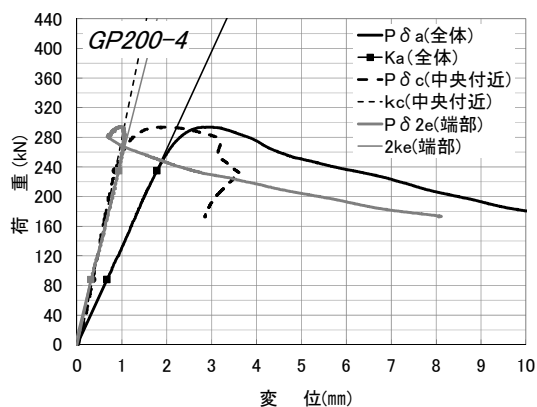


図 3.8-6 GP200-4 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

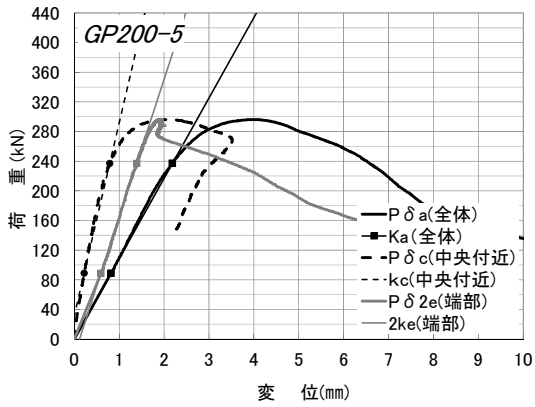


図 3.8-7 GP200-5 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

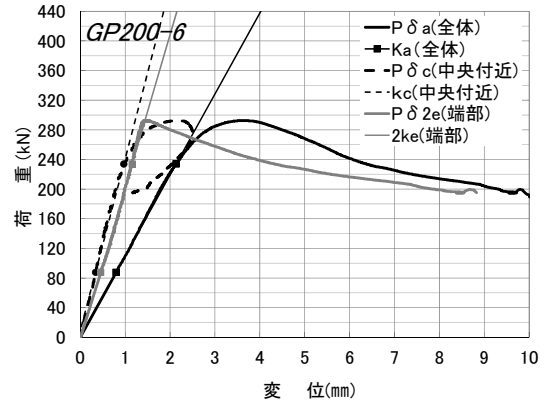


図 3.8-8 GP200-6 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

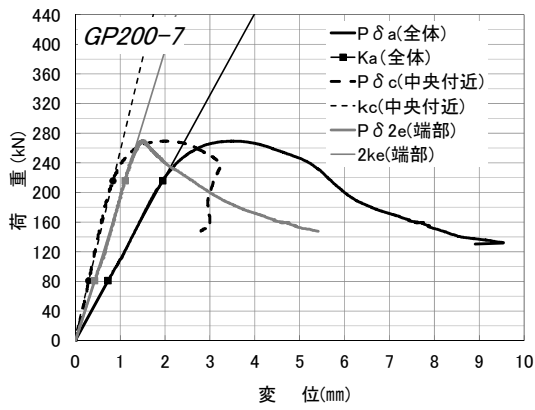


図 3.8-9 GP200-7 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

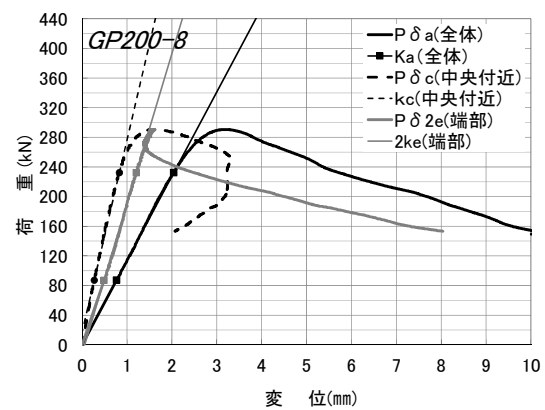


図 3.8-10 GP200-8 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

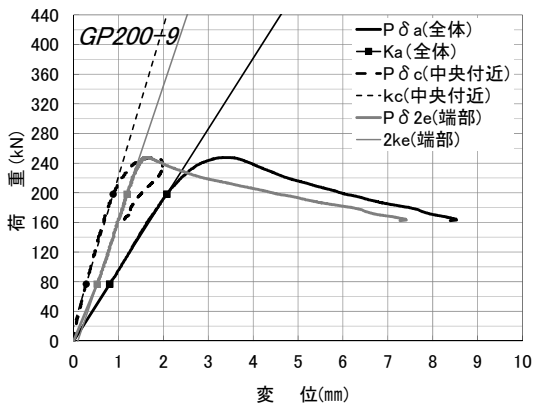


図 3.8-11 GP200-9 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

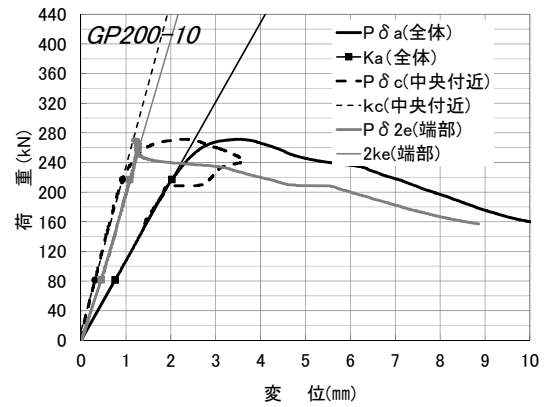


図 3.8-12 GP200-10 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

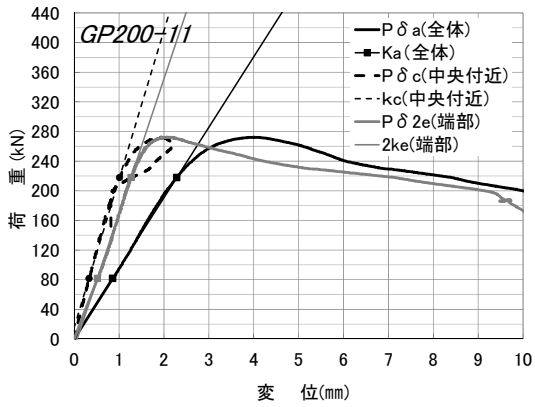


図 3.8-13 GP200-11 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

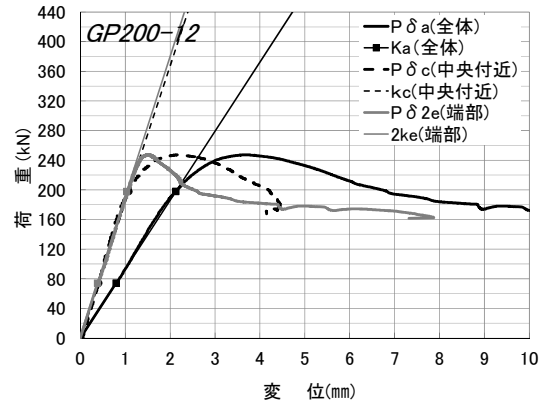


図 3.8-14 GP200-12 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

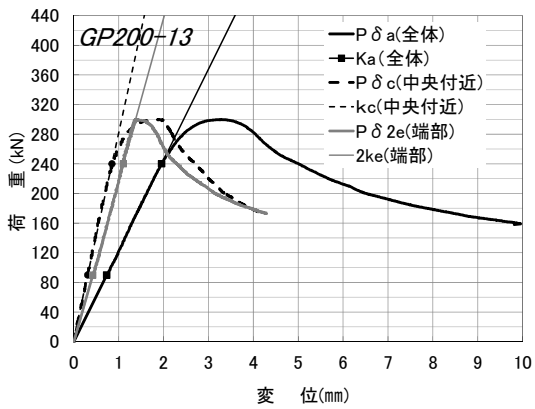


図 3.8-15 GP200-13 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

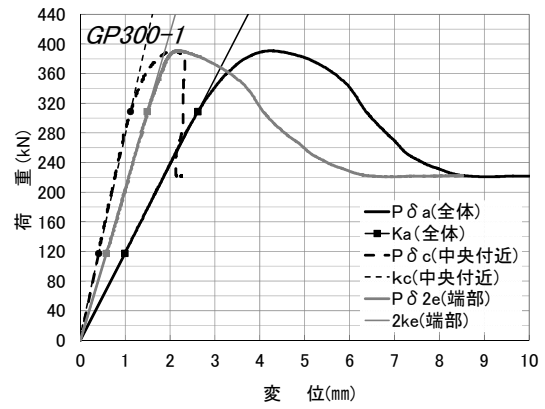


図 3.8-16 GP300-1 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

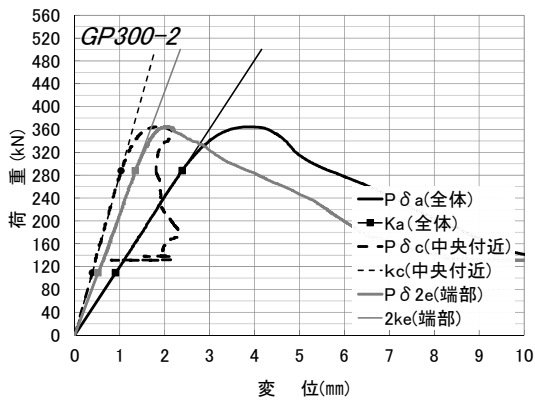


図 3.8-17 GP300-2 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

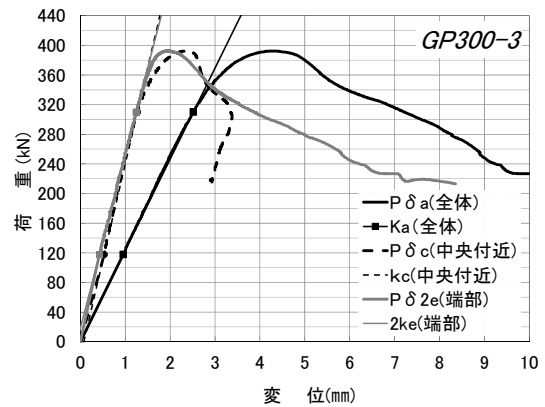


図 3.8-18 GP300-3 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

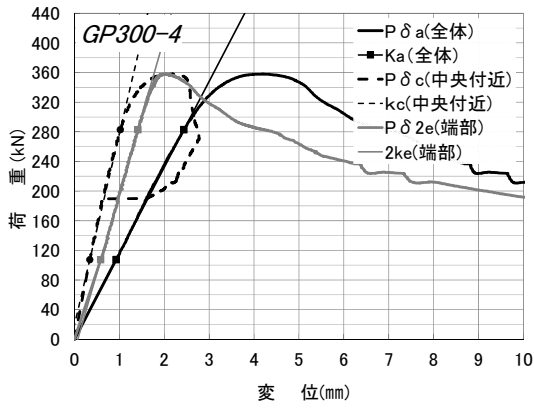


図 3.8-19 GP300-4 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

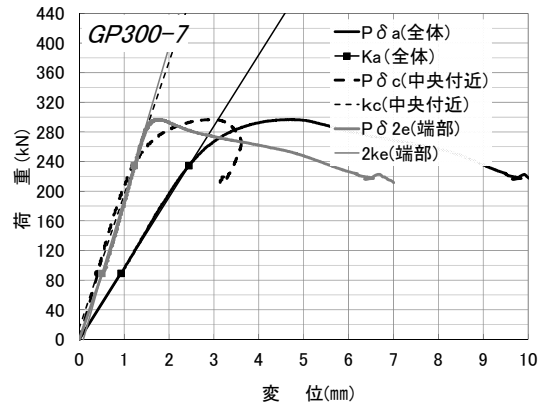


図 3.8-20 GP300-7 の各 P- $\delta$  曲線と剛性

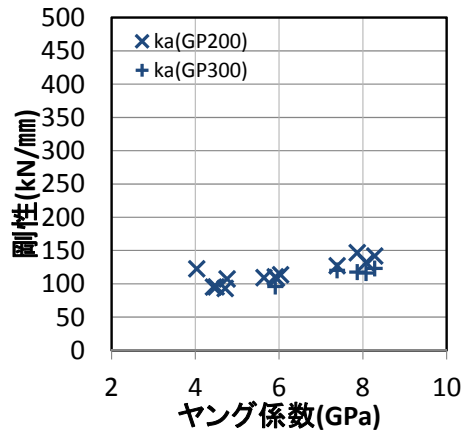


図 3.8-21 GP200 及び GP300 の全体剛性  $k_{//}$  におけるヤング係数と剛性の関係

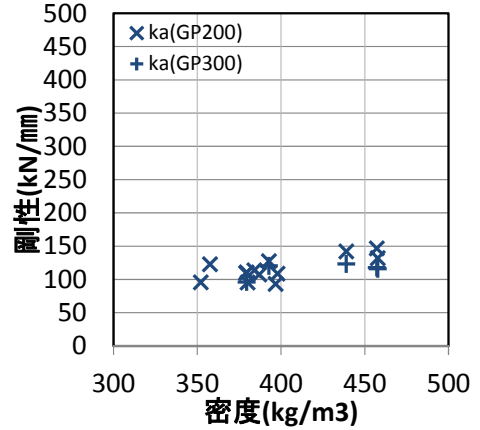


図 3.8-22 GP200 及び GP300 の全体剛性  $k_{//}$  における密度と剛性の関係

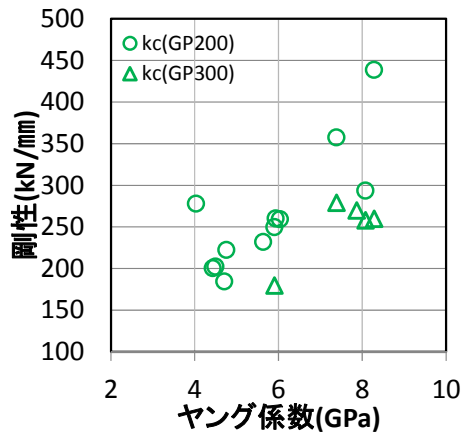


図 3.8-23 GP200 及び GP300 の中央部の剛性  $k_c$  におけるヤング係数と剛性の関係

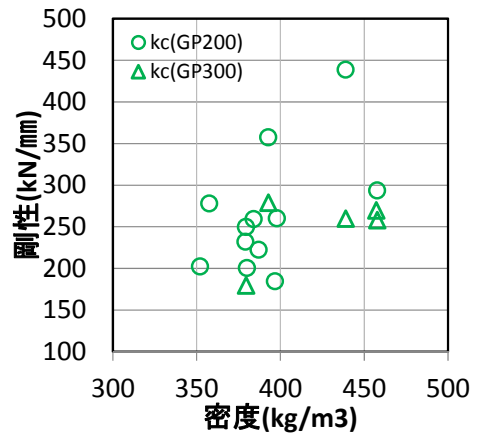


図 3.8-24 GP200 及び GP300 の中央部の剛性  $k_c$  における密度と剛性の関係

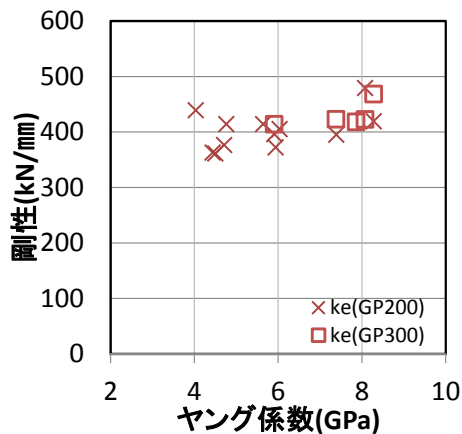


図 3.8-25 GP200 及び GP300 の端部の剛性  $k_e$  におけるヤング係数と剛性の関係

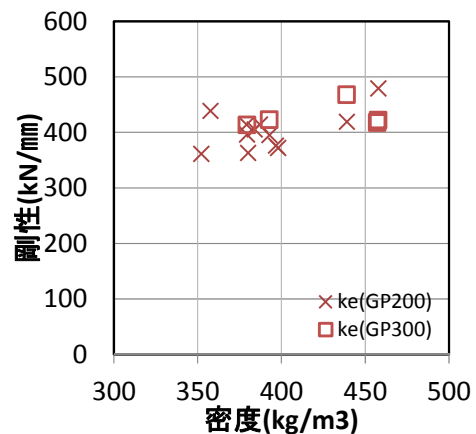


図 3.8-26 GP200 及び GP300 の端部の剛性  $k_e$  における密度と剛性の関係

(3) 縦圧縮剛性推定式の提案

縦圧縮の剛性  $k_{//}$  は上端部の剛性  $k_{et}$ 、上端部の剛性  $k_{eb}$ 、中央部の剛性  $k_c$  によって下式のとおり算出される。

$$k_{//} = \frac{k_{et} \cdot k_{eb} \cdot k_c}{k_{et} + k_{eb} + k_c} \quad (3.8-2)$$

端部剛性  $k_{et}$  及び  $k_{eb}$  は、図 3.8-25 及び図 3.8-26 に示すとおり、ヤング係数や密度、試験体高さに関わらずほぼ一定の値となっている。GP200 の  $k_e$  の平均値は 403.0kN/mm、GP300 の  $k_e$  の平均値は 428.8kN/mm、両方の平均を取ると 410.6kN/mm である。これを面圧面積  $A = 9,000 \text{ mm}^2$  で除した値  $45.6 \text{ N/mm}^3$  を端部の圧縮剛性  $k_{e0}$  とすると  $k_e$  は 3.8-3 式のとおりとなる。

$$k_e = k_{e0} \cdot A \quad (3.8-3)$$

ただし、上端部と下端部の面圧面積が異なる場合には  $k_e$  を  $k_{et}$  及び  $k_{eb}$  と称することによって使い分けを行う。

一方  $k_c$  は 3.8-4 式より算出されるものとした。

$$k_c = \frac{E \cdot A}{H} \quad (3.8-4)$$

ここで、 $E$  : ヤング係数(GPa)

$H$  : CLT 材の高さ(mm)

(4) CLT 圧縮剛性推定式の提案

CLT の圧縮剛性は、平行層(縦圧縮)の剛性  $k_{//}$  と直交層(横圧縮)の剛性  $k_{\perp}$  の並列バネとして 3.8-5 式より算出されるものとした。直交層(横圧縮)の剛性  $k_{\perp}$  は稲山の推定式<sup>47)</sup>とした。

$$K_c = k_{//} + k_{\perp} \quad (3.8-5)$$



### 3.9 実験値と推定値の比較

#### (1) 初期剛性

##### ① 推定方法の種類

木材の縦圧縮剛性の算定方法は、野口ら<sup>56)</sup>の有限要素法による応力度分布を考慮した力学的モデルを利用した算定方法や蒲池ら<sup>57)</sup>のフーリエ級数を用いた数値解析等がある。推定値は、3.8節によって提案した推定式その他、上記の文献(56)(57)の製材の縦圧縮剛性値に3.8-5式を使って直交層の剛性 $k_{\perp}$ を加えた推定値についても比較を行う。

文献(56)では木材の切断面による $100\mu\text{m}$ オーダーの凹凸が剛性に影響を与えるとしており、この剛性を実験的に導き出している。文献(56)によると木材の表面性状に起因する剛性 $k_c$ は、文中では $545\text{kN/mm}$ 、まとめでは $400\text{kN/mm}$ と記されており、齟齬がある上に単位面積あたりとなっていないため判断としない。文献中のグラフを見る限り、前者が平均値、後者が下限値である可能性が高いが、ここでは「まとめ」で示されている「 $400\text{kN/mm}$ 」を優先し、本文中から読み取れる面圧面積 $120\text{mm}\times 120\text{mm}=14400\text{mm}^2$ で除した $27.8\text{kN/mm}^3$ として計算を行うものとする。なお文献(57)には計算式の提案はないが、歪み測定値から求めたヤング係数の実測値が一般的数値より低くなった原因として、表面の凹凸による接触不良等の影響が示唆される表記があるため、文献(56)の表面の凹凸剛性を直列バネとして計算した値とする。

一方、本研究では、サンダー掛けしたものと粗挽きしたものを実験で比較し、凹凸による影響は剛性に影響を与えないとし、全体歪みの他に、上下端部に局所的なめり込み剛性 $k_e$ が存在すると考えている。

比較する推定値は表3.9-1のとおり、本研究によるものを推定値①、文献(4)によるものを推定値②、文献(57)に文献(56)の表面性状に起因する剛性 $k_{//c}$ を3.9-1式により加味したものを推定値③とした。それぞれの縦圧縮推定値は、3.8-5式を用いてCLTの圧縮剛性を算出した。

表 3.9-1 CLT 圧縮剛性の推定方法

推定値	推定式	繊維平行層			繊維直交層
		縦圧縮歪みによる圧縮剛性	表面の凹凸に起因する圧縮剛性	端部めり込み圧縮剛性	めり込み
①	本研究	3.8-2式	—	3.8-2式	稲山式(47)
②	文献(56)	文献(56)の(30)式による剛性 $k_{//m}$	文献(56)まとめより $k_{//c} =$	—	稲山式(47)
③	文献(57)	文献(57)の(7)式による剛性	$400\text{kN/mm}/14400\text{mm}^2 = 27.8\text{kN/mm}^3$	—	稲山式(47)

$$K_c = \frac{k_{//m} \cdot k_{//c}}{k_{//m} + k_{//c}} + k_{\perp} \quad (3.9-1)$$

ここで、 $K_c$ : CLTの圧縮(めり込み)剛性(kN/mm)

$k_{//m}$ : 文献<sup>56)</sup>あるいは<sup>57)</sup>に於ける繊維平行層の縦圧縮剛性(kN/mm)

$k_{//c}$ : 文献<sup>56)</sup>に於ける木材の表面性状に起因する圧縮剛性(kN/mm)

(=27.78N/ mm<sup>3</sup>×面積)

$k_{\perp}$ :文献<sup>47)</sup>における繊維直交層のめり込み剛性

## ② 推定結果

推定値①～③の入力値と出力結果を表 3.9-2～表 3.9-4 に示す。結果からいずれの推定値もヤング係数や面圧面積の増加と共に剛性が上がっていく傾向を良く捉えられている。

各試験体毎に試験結果と荷重変位包絡線で比較したグラフを図 3.9-1～図 3.9-60 に示す。推定値①③は実験値の剛性と比較的良く合っているのに対し、推定値②は実験値より低く推定されている。図 3.9-61～図 3.9-63 は、これらの推定値と実験値を纏めたものである。推定値①、③は共に傾向が似通っており、面圧面積が増えるとやや推定値が高めに算出される。特に外層が加力に対して繊維平行となる CP33、CP55、CP55M は推定値がやや高めとなり、外層が加力に対して繊維直交となる CO33、CO55、CO55M は、よく一致する結果となっている。

表 3.9-2 推定値①による CLT 圧縮剛性の入力値と出力結果

試験体名	試験体高さ H(mm)	加力に対して繊維平行となる層						加力に対して繊維直交となる層						$K_c$ (kN/mm)	
		平均ヤング係数(GPa)	平行層上部 面圧面積 $A_1$ (mm <sup>2</sup> )	平行層下部 面圧面積 $A_2$ (mm <sup>2</sup> )	$k_{er}$ (kN/mm)	$k_{eb}$ (kN/mm)	$k_c$ (kN/mm)	$k_{//}$ (kN/mm)	直交層ヤング係数 $E_{\perp}$ (GPa)	$x_f$ (mm)	$y_p$ (mm)	$C_x$	$C_y$		$k_{\perp}$ (kN/mm)
CP33-1	120	4.59	6000	24000	273.6	1094.4	229.3	112.0	0.101	150	60	2.4	1	11.8	123.8
CP33-2	120	4.20	6000	24000	273.6	1094.4	210.2	107.2	0.099	150	60	2.4	1	11.7	118.9
CP33-3	120	4.71	6000	24000	273.6	1094.4	235.4	113.4	0.097	150	60	2.4	1	11.4	124.8
CP33-4	120	6.43	6000	24000	273.6	1094.4	321.3	130.2	0.107	150	60	2.4	1	12.6	142.8
CP33-5	120	6.12	6000	24000	273.6	1094.4	305.9	127.6	0.135	150	60	2.4	1	15.8	143.4
CP33-6	120	6.00	6000	24000	273.6	1094.4	300.1	126.6	0.123	150	60	2.4	1	14.5	141.1
CP33-7	120	6.39	6000	24000	273.6	1094.4	319.6	129.9	0.110	150	60	2.4	1	13.0	142.9
CP33-8	120	7.78	6000	24000	273.6	1094.4	388.8	140.0	0.217	150	60	2.4	1	25.5	165.5
CP33-9	120	8.62	6000	24000	273.6	1094.4	430.9	145.1	0.152	150	60	2.4	1	17.8	163.0
CP33-10	120	8.07	6000	24000	273.6	1094.4	403.6	141.9	0.152	150	60	2.4	1	17.9	159.8
CO33-1	120	4.41	3000	12000	136.8	547.2	110.2	54.9	0.090	150	30	2.4	1	5.3	60.2
CO33-2	120	4.88	3000	12000	136.8	547.2	122.1	57.7	0.095	150	30	2.4	1	5.6	63.3
CO33-3	120	4.91	3000	12000	136.8	547.2	122.7	57.8	0.082	150	30	2.4	1	4.8	62.7
CO33-4	120	5.75	3000	12000	136.8	547.2	143.9	62.2	0.123	150	30	2.4	1	7.3	69.4
CO33-5	120	6.22	3000	12000	136.8	547.2	155.4	64.2	0.122	150	30	2.4	1	7.2	71.4
CO33-6	120	6.67	3000	12000	136.8	547.2	166.8	66.1	0.122	150	30	2.4	1	7.2	73.2
CO33-7	120	5.57	3000	12000	136.8	547.2	139.2	61.3	0.135	150	30	2.4	1	8.0	69.2
CO33-8	120	8.33	3000	12000	136.8	547.2	208.1	71.7	0.185	150	30	2.4	1	10.9	82.6
CO33-9	120	9.09	3000	12000	136.8	547.2	227.1	73.9	0.181	150	30	2.4	1	10.7	84.5
CO33-10	120	6.79	3000	12000	136.8	547.2	169.7	66.5	0.167	150	30	2.4	1	9.8	76.4
CP55-1	120	4.50	9000	36000	410.4	1641.6	337.6	166.4	0.097	150	90	2.4	1	17.0	183.5
CP55-2	120	3.90	9000	36000	410.4	1641.6	292.8	154.8	0.098	150	90	2.4	1	17.2	172.0
CP55-3	120	4.58	9000	36000	410.4	1641.6	343.3	167.8	0.091	150	90	2.4	1	16.0	183.8
CP55-4	120	6.21	9000	36000	410.4	1641.6	465.6	192.6	0.127	150	90	2.4	1	22.4	214.9
CP55-5	120	6.11	9000	36000	410.4	1641.6	458.3	191.3	0.120	150	90	2.4	1	21.2	212.4
CP55-6	120	6.23	9000	36000	410.4	1641.6	466.9	192.8	0.127	150	90	2.4	1	22.4	215.2
CP55-7	120	6.38	9000	36000	410.4	1641.6	478.7	194.7	0.120	150	90	2.4	1	21.2	215.9
CP55-8	120	9.49	9000	36000	410.4	1641.6	712.0	224.7	0.167	150	90	2.4	1	29.5	254.2
CP55-9	120	8.20	9000	36000	410.4	1641.6	614.9	214.0	0.199	150	90	2.4	1	35.1	249.1
CP55-10	120	7.88	9000	36000	410.4	1641.6	590.6	211.0	0.166	150	90	2.4	1	29.3	240.3
CO55-1	120	4.47	6000	24000	273.6	1094.4	223.3	110.5	0.094	150	60	2.4	1	11.1	121.6
CO55-2	120	4.82	6000	24000	273.6	1094.4	240.8	114.6	0.093	150	60	2.4	1	11.0	125.6
CO55-3	120	4.88	6000	24000	273.6	1094.4	244.0	115.4	0.093	150	60	2.4	1	11.0	126.3
CO55-4	120	6.01	6000	24000	273.6	1094.4	300.3	126.6	0.123	150	60	2.4	1	14.5	141.1
CO55-5	120	6.31	6000	24000	273.6	1094.4	315.5	129.2	0.120	150	60	2.4	1	14.1	143.4
CO55-6	120	6.46	6000	24000	273.6	1094.4	322.8	130.4	0.126	150	60	2.4	1	14.9	145.3
CO55-7	120	6.43	6000	24000	273.6	1094.4	321.3	130.2	0.128	150	60	2.4	1	15.0	145.2
CO55-8	120	8.95	6000	24000	273.6	1094.4	447.5	147.0	0.156	150	60	2.4	1	18.4	165.4
CO55-9	120	8.29	6000	24000	273.6	1094.4	414.4	143.2	0.174	150	60	2.4	1	20.5	163.7
CO55-10	120	8.06	6000	24000	273.6	1094.4	402.8	141.8	0.165	150	60	2.4	1	19.4	161.3
CP55M-1	120	4.26	9000	36000	410.4	1641.6	319.2	161.9	0.098	150	90	2.4	1	17.3	179.1
CP55M-2	120	4.54	9000	36000	410.4	1641.6	340.2	167.1	0.098	150	90	2.4	1	17.2	184.3
CP55M-3	120	4.75	9000	36000	410.4	1641.6	356.5	170.9	0.088	150	90	2.4	1	15.5	186.4
CP55M-4	120	6.16	9000	36000	410.4	1641.6	461.8	191.9	0.125	150	90	2.4	1	22.1	213.9
CP55M-5	120	5.91	9000	36000	410.4	1641.6	443.3	188.6	0.137	150	90	2.4	1	24.2	212.8
CP55M-6	120	6.21	9000	36000	410.4	1641.6	466.0	192.6	0.120	150	90	2.4	1	21.1	213.7
CP55M-7	120	6.46	9000	36000	410.4	1641.6	484.5	195.7	0.126	150	90	2.4	1	22.2	217.9
CP55M-8	120	8.08	9000	36000	410.4	1641.6	606.0	212.9	0.166	150	90	2.4	1	29.3	242.2
CP55M-9	120	8.10	9000	36000	410.4	1641.6	607.5	213.1	0.173	150	90	2.4	1	30.6	243.7
CP55M-10	120	8.05	9000	36000	410.4	1641.6	603.8	212.7	0.167	150	90	2.4	1	29.5	242.2
CO55M-1	120	4.52	6000	24000	273.6	1094.4	226.0	111.2	0.084	150	60	2.4	1	9.9	121.1
CO55M-2	120	4.87	6000	24000	273.6	1094.4	243.6	115.3	0.086	150	60	2.4	1	10.1	125.4
CO55M-3	120	4.89	6000	24000	273.6	1094.4	244.6	115.5	0.097	150	60	2.4	1	11.4	126.9
CO55M-4	120	6.43	6000	24000	273.6	1094.4	321.5	130.2	0.120	150	60	2.4	1	14.1	144.4
CO55M-5	120	6.31	6000	24000	273.6	1094.4	315.5	129.2	0.122	150	60	2.4	1	14.4	143.6
CO55M-6	120	6.46	6000	24000	273.6	1094.4	322.8	130.4	0.126	150	60	2.4	1	14.8	145.2
CO55M-7	120	6.42	6000	24000	273.6	1094.4	320.8	130.1	0.126	150	60	2.4	1	14.9	145.0
CO55M-8	120	8.25	6000	24000	273.6	1094.4	412.5	143.0	0.170	150	60	2.4	1	20.0	163.0
CO55M-9	120	8.63	6000	24000	273.6	1094.4	431.7	145.2	0.167	150	60	2.4	1	19.7	165.0
CO55M-10	120	8.12	6000	24000	273.6	1094.4	406.0	142.2	0.154	150	60	2.4	1	18.2	160.4

表 3.9-3 推定値②による CLT 圧縮剛性の入力値と出力結果

試験体名	試験体高さ H(mm)	加力に対して繊維平行となる層					加力に対して繊維直交となる層					$K_c$ (kN/mm)	
		平均ヤング係数(Gpa)	平行層面圧面積 $A_l$ (mm <sup>2</sup> )	$k_{//c}$ (kN/mm)	$k_{//m}$ (kN/mm)	$k_{//}$ (kN/mm)	直交層ヤング係数 $E_{\perp}$ (GPa)	$x_f$ (mm)	$y_p$ (mm)	$C_x$	$C_y$		$k_{\perp}$ (kN/mm)
CP33-1	120	4.59	6000	166.8	102.7	63.6	0.101	150	60	2.4	1	11.8	75.4
CP33-2	120	4.20	6000	166.8	94.1	60.2	0.099	150	60	2.4	1	11.7	71.9
CP33-3	120	4.71	6000	166.8	105.5	64.6	0.097	150	60	2.4	1	11.4	76.0
CP33-4	120	6.43	6000	166.8	143.9	77.3	0.107	150	60	2.4	1	12.6	89.9
CP33-5	120	6.12	6000	166.8	137.0	75.2	0.135	150	60	2.4	1	15.8	91.1
CP33-6	120	6.00	6000	166.8	134.5	74.4	0.123	150	60	2.4	1	14.5	89.0
CP33-7	120	6.39	6000	166.8	143.2	77.0	0.110	150	60	2.4	1	13.0	90.0
CP33-8	120	7.78	6000	166.8	174.2	85.2	0.217	150	60	2.4	1	25.5	110.7
CP33-9	120	8.62	6000	166.8	193.0	89.5	0.152	150	60	2.4	1	17.8	107.3
CP33-10	120	8.07	6000	166.8	180.8	86.8	0.152	150	60	2.4	1	17.9	104.7
CO33-1	120	4.41	3000	83.4	50.2	31.3	0.090	150	30	2.4	1	5.3	36.6
CO33-2	120	4.88	3000	83.4	52.9	32.4	0.095	150	30	2.4	1	5.6	37.9
CO33-3	120	4.91	3000	83.4	45.8	29.6	0.082	150	30	2.4	1	4.8	34.4
CO33-4	120	5.75	3000	83.4	69.0	37.8	0.123	150	30	2.4	1	7.3	45.0
CO33-5	120	6.22	3000	83.4	68.0	37.5	0.122	150	30	2.4	1	7.2	44.6
CO33-6	120	6.67	3000	83.4	68.0	37.5	0.122	150	30	2.4	1	7.2	44.6
CO33-7	120	5.57	3000	83.4	75.7	39.7	0.135	150	30	2.4	1	8.0	47.6
CO33-8	120	8.33	3000	83.4	103.3	46.1	0.185	150	30	2.4	1	10.9	57.0
CO33-9	120	9.09	3000	83.4	101.4	45.8	0.181	150	30	2.4	1	10.7	56.4
CO33-10	120	6.79	3000	83.4	93.3	44.0	0.167	150	30	2.4	1	9.8	53.9
CP55-1	120	4.50	9000	250.2	151.2	94.3	0.097	150	90	2.4	1	17.0	111.3
CP55-2	120	3.90	9000	250.2	131.1	86.0	0.098	150	90	2.4	1	17.2	103.3
CP55-3	120	4.58	9000	250.2	153.8	95.2	0.091	150	90	2.4	1	16.0	111.2
CP55-4	120	6.21	9000	250.2	208.6	113.8	0.127	150	90	2.4	1	22.4	136.1
CP55-5	120	6.11	9000	250.2	205.3	112.8	0.120	150	90	2.4	1	21.2	133.9
CP55-6	120	6.23	9000	250.2	209.2	113.9	0.127	150	90	2.4	1	22.4	136.3
CP55-7	120	6.38	9000	250.2	214.4	115.5	0.120	150	90	2.4	1	21.2	136.6
CP55-8	120	9.49	9000	250.2	318.9	140.2	0.167	150	90	2.4	1	29.5	169.7
CP55-9	120	8.20	9000	250.2	275.4	131.1	0.199	150	90	2.4	1	35.1	166.2
CP55-10	120	7.88	9000	250.2	264.6	128.6	0.166	150	90	2.4	1	29.3	157.9
CO55-1	120	4.47	6000	166.8	105.8	64.7	0.094	150	60	2.4	1	11.1	75.9
CO55-2	120	4.82	6000	166.8	104.4	64.2	0.093	150	60	2.4	1	11.0	75.2
CO55-3	120	4.88	6000	166.8	104.2	64.1	0.093	150	60	2.4	1	11.0	75.1
CO55-4	120	6.01	6000	166.8	137.8	75.5	0.123	150	60	2.4	1	14.5	90.0
CO55-5	120	6.31	6000	166.8	134.4	74.4	0.120	150	60	2.4	1	14.1	88.6
CO55-6	120	6.46	6000	166.8	141.6	76.6	0.126	150	60	2.4	1	14.9	91.5
CO55-7	120	6.43	6000	166.8	143.1	77.0	0.128	150	60	2.4	1	15.0	92.1
CO55-8	120	8.95	6000	166.8	175.0	85.4	0.156	150	60	2.4	1	18.4	103.8
CO55-9	120	8.29	6000	166.8	195.2	89.9	0.174	150	60	2.4	1	20.5	110.5
CO55-10	120	8.06	6000	166.8	185.0	87.7	0.165	150	60	2.4	1	19.4	107.2
CP55M-1	120	4.26	9000	250.2	143.0	91.0	0.098	150	90	2.4	1	17.3	108.3
CP55M-2	120	4.54	9000	250.2	152.4	94.7	0.098	150	90	2.4	1	17.2	111.9
CP55M-3	120	4.75	9000	250.2	159.7	97.5	0.088	150	90	2.4	1	15.5	113.0
CP55M-4	120	6.16	9000	250.2	206.9	113.2	0.125	150	90	2.4	1	22.1	135.3
CP55M-5	120	5.91	9000	250.2	198.6	110.7	0.137	150	90	2.4	1	24.2	134.9
CP55M-6	120	6.21	9000	250.2	208.8	113.8	0.120	150	90	2.4	1	21.1	134.9
CP55M-7	120	6.46	9000	250.2	217.0	116.2	0.126	150	90	2.4	1	22.2	138.4
CP55M-8	120	8.08	9000	250.2	271.5	130.2	0.166	150	90	2.4	1	29.3	159.5
CP55M-9	120	8.10	9000	250.2	272.2	130.4	0.173	150	90	2.4	1	30.6	160.9
CP55M-10	120	8.05	9000	250.2	270.5	130.0	0.167	150	90	2.4	1	29.5	159.5
CO55M-1	120	4.52	6000	166.8	94.3	60.2	0.084	150	60	2.4	1	9.9	70.2
CO55M-2	120	4.87	6000	166.8	96.3	61.1	0.086	150	60	2.4	1	10.1	71.2
CO55M-3	120	4.89	6000	166.8	108.1	65.6	0.097	150	60	2.4	1	11.4	77.0
CO55M-4	120	6.43	6000	166.8	134.4	74.4	0.120	150	60	2.4	1	14.1	88.6
CO55M-5	120	6.31	6000	166.8	136.9	75.2	0.122	150	60	2.4	1	14.4	89.6
CO55M-6	120	6.46	6000	166.8	140.9	76.4	0.126	150	60	2.4	1	14.8	91.2
CO55M-7	120	6.42	6000	166.8	141.6	76.6	0.126	150	60	2.4	1	14.9	91.5
CO55M-8	120	8.25	6000	166.8	190.3	88.9	0.170	150	60	2.4	1	20.0	108.9
CO55M-9	120	8.63	6000	166.8	187.6	88.3	0.167	150	60	2.4	1	19.7	108.0
CO55M-10	120	8.12	6000	166.8	172.7	84.8	0.154	150	60	2.4	1	18.2	103.0

表 3.9-4 推定値③による CLT 圧縮剛性の入力値と出力結果

試験体名	試験体高さ H(mm)	加力に対して繊維平行となる層					加力に対して繊維直交となる層					$K_c$ (kN/mm)	
		平均ヤング係数(Gpa)	平行層面圧面積 $A_l$ (mm <sup>2</sup> )	$k_{//c}$ (kN/mm)	$k_{//m}$ (kN/mm)	$k_{//}$ (kN/mm)	直交層ヤング係数 $E_{\perp}$ (GPa)	$x_l$ (mm)	$y_{\rho}$ (mm)	$C_x$	$C_y$		$k_{\perp}$ (kN/mm)
CP33-1	120	4.59	6000	166.8	589.8	130.0	0.101	150	60	2.4	1	11.8	141.9
CP33-2	120	4.20	6000	166.8	540.4	127.5	0.099	150	60	2.4	1	11.7	139.1
CP33-3	120	4.71	6000	166.8	605.3	130.8	0.097	150	60	2.4	1	11.4	142.2
CP33-4	120	6.43	6000	166.8	826.2	138.8	0.107	150	60	2.4	1	12.6	151.4
CP33-5	120	6.12	6000	166.8	786.6	137.6	0.135	150	60	2.4	1	15.8	153.5
CP33-6	120	6.00	6000	166.8	771.8	137.2	0.123	150	60	2.4	1	14.5	151.7
CP33-7	120	6.39	6000	166.8	821.8	138.7	0.110	150	60	2.4	1	13.0	151.6
CP33-8	120	7.78	6000	166.8	999.6	142.9	0.217	150	60	2.4	1	25.5	168.4
CP33-9	120	8.62	6000	166.8	1107.9	145.0	0.152	150	60	2.4	1	17.8	162.8
CP33-10	120	8.07	6000	166.8	1037.7	143.7	0.152	150	60	2.4	1	17.9	161.6
CO33-1	120	4.41	3000	83.4	346.6	67.2	0.090	150	30	2.4	1	5.3	72.5
CO33-2	120	4.88	3000	83.4	365.1	67.9	0.095	150	30	2.4	1	5.6	73.5
CO33-3	120	4.91	3000	83.4	316.0	66.0	0.082	150	30	2.4	1	4.8	70.8
CO33-4	120	5.75	3000	83.4	476.4	71.0	0.123	150	30	2.4	1	7.3	78.2
CO33-5	120	6.22	3000	83.4	469.4	70.8	0.122	150	30	2.4	1	7.2	78.0
CO33-6	120	6.67	3000	83.4	469.4	70.8	0.122	150	30	2.4	1	7.2	78.0
CO33-7	120	5.57	3000	83.4	522.4	71.9	0.135	150	30	2.4	1	8.0	79.9
CO33-8	120	8.33	3000	83.4	712.8	74.7	0.185	150	30	2.4	1	10.9	85.5
CO33-9	120	9.09	3000	83.4	699.3	74.5	0.181	150	30	2.4	1	10.7	85.2
CO33-10	120	6.79	3000	83.4	644.1	73.8	0.167	150	30	2.4	1	9.8	83.7
CP55-1	120	4.50	9000	250.2	767.7	188.7	0.097	150	90	2.4	1	17.0	205.7
CP55-2	120	3.90	9000	250.2	665.8	181.9	0.098	150	90	2.4	1	17.2	199.1
CP55-3	120	4.58	9000	250.2	780.6	189.5	0.091	150	90	2.4	1	16.0	205.5
CP55-4	120	6.21	9000	250.2	1058.9	202.4	0.127	150	90	2.4	1	22.4	224.8
CP55-5	120	6.11	9000	250.2	1042.1	201.8	0.120	150	90	2.4	1	21.2	222.9
CP55-6	120	6.23	9000	250.2	1061.9	202.5	0.127	150	90	2.4	1	22.4	224.9
CP55-7	120	6.38	9000	250.2	1088.6	203.4	0.120	150	90	2.4	1	21.2	224.6
CP55-8	120	9.49	9000	250.2	1619.1	216.7	0.167	150	90	2.4	1	29.5	246.2
CP55-9	120	8.20	9000	250.2	1398.3	212.2	0.199	150	90	2.4	1	35.1	247.3
CP55-10	120	7.88	9000	250.2	1343.2	210.9	0.166	150	90	2.4	1	29.3	240.2
CO55-1	120	4.47	6000	166.8	622.8	131.6	0.094	150	60	2.4	1	11.1	142.7
CO55-2	120	4.82	6000	166.8	614.4	131.2	0.093	150	60	2.4	1	11.0	142.2
CO55-3	120	4.88	6000	166.8	613.6	131.1	0.093	150	60	2.4	1	11.0	142.1
CO55-4	120	6.01	6000	166.8	811.3	138.4	0.123	150	60	2.4	1	14.5	152.8
CO55-5	120	6.31	6000	166.8	791.1	137.8	0.120	150	60	2.4	1	14.1	151.9
CO55-6	120	6.46	6000	166.8	833.3	139.0	0.126	150	60	2.4	1	14.9	153.9
CO55-7	120	6.43	6000	166.8	842.5	139.2	0.128	150	60	2.4	1	15.0	154.3
CO55-8	120	8.95	6000	166.8	1030.2	143.6	0.156	150	60	2.4	1	18.4	162.0
CO55-9	120	8.29	6000	166.8	1148.9	145.7	0.174	150	60	2.4	1	20.5	166.2
CO55-10	120	8.06	6000	166.8	1089.1	144.6	0.165	150	60	2.4	1	19.4	164.1
CP55M-1	120	4.26	9000	250.2	726.0	186.1	0.098	150	90	2.4	1	17.3	203.3
CP55M-2	120	4.54	9000	250.2	773.6	189.1	0.098	150	90	2.4	1	17.2	206.3
CP55M-3	120	4.75	9000	250.2	810.8	191.2	0.088	150	90	2.4	1	15.5	206.7
CP55M-4	120	6.16	9000	250.2	1050.1	202.1	0.125	150	90	2.4	1	22.1	224.1
CP55M-5	120	5.91	9000	250.2	1008.2	200.5	0.137	150	90	2.4	1	24.2	224.6
CP55M-6	120	6.21	9000	250.2	1059.8	202.4	0.120	150	90	2.4	1	21.1	223.5
CP55M-7	120	6.46	9000	250.2	1101.9	203.9	0.126	150	90	2.4	1	22.2	226.1
CP55M-8	120	8.08	9000	250.2	1378.1	211.8	0.166	150	90	2.4	1	29.3	241.0
CP55M-9	120	8.10	9000	250.2	1381.6	211.8	0.173	150	90	2.4	1	30.6	242.4
CP55M-10	120	8.05	9000	250.2	1373.2	211.6	0.167	150	90	2.4	1	29.5	241.1
CO55M-1	120	4.87	6000	166.8	555.1	128.3	0.084	150	60	2.4	1	9.9	138.2
CO55M-2	120	4.87	6000	166.8	567.0	128.9	0.086	150	60	2.4	1	10.1	139.0
CO55M-3	120	4.89	6000	166.8	636.4	132.2	0.097	150	60	2.4	1	11.4	143.5
CO55M-4	120	6.43	6000	166.8	791.1	137.8	0.120	150	60	2.4	1	14.1	151.9
CO55M-5	120	6.31	6000	166.8	805.6	138.2	0.122	150	60	2.4	1	14.4	152.6
CO55M-6	120	6.46	6000	166.8	829.4	138.9	0.126	150	60	2.4	1	14.8	153.7
CO55M-7	120	6.42	6000	166.8	833.3	139.0	0.126	150	60	2.4	1	14.9	153.9
CO55M-8	120	8.25	6000	166.8	1120.3	145.2	0.170	150	60	2.4	1	20.0	165.2
CO55M-9	120	8.63	6000	166.8	1104.1	144.9	0.167	150	60	2.4	1	19.7	164.6
CO55M-10	120	8.12	6000	166.8	1016.6	143.3	0.154	150	60	2.4	1	18.2	161.4

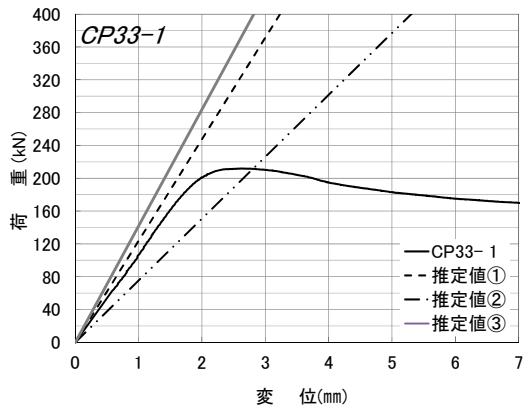


図 3.9-1 CP33-1 の試験結果と推定値の比較

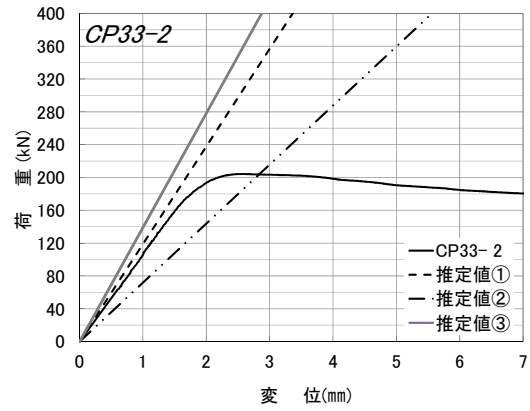


図 3.9-2 CP33-2 の試験結果と推定値の比較

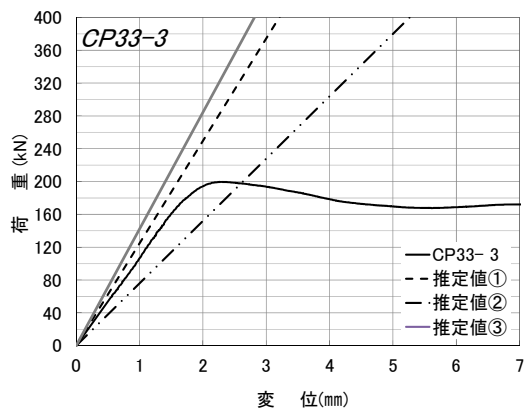


図 3.9-3 CP33-3 の試験結果と推定値の比較

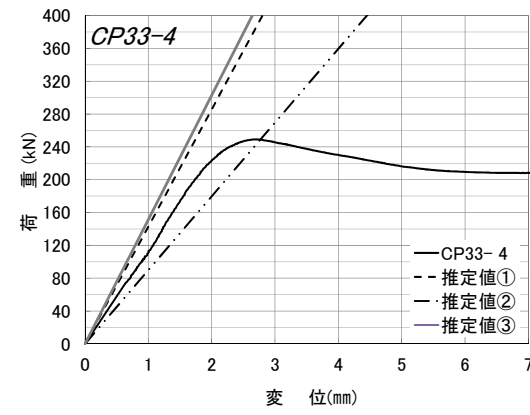


図 3.9-4 CP33-4 の試験結果と推定値の比較

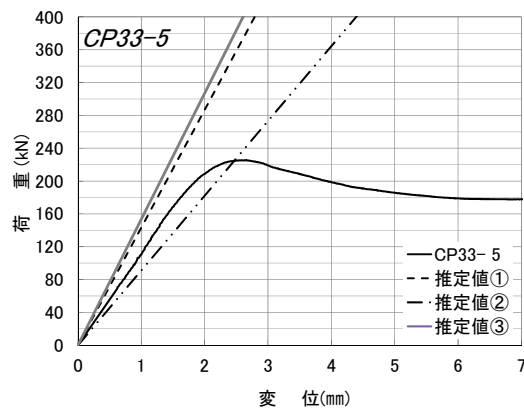


図 3.9-5 CP33-5 の試験結果と推定値の比較

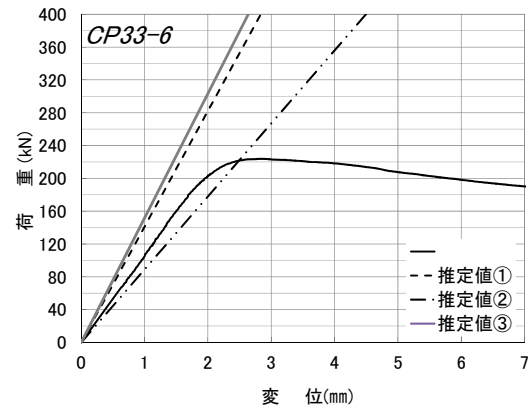


図 3.9-6 CP33-6 の試験結果と推定値の比較

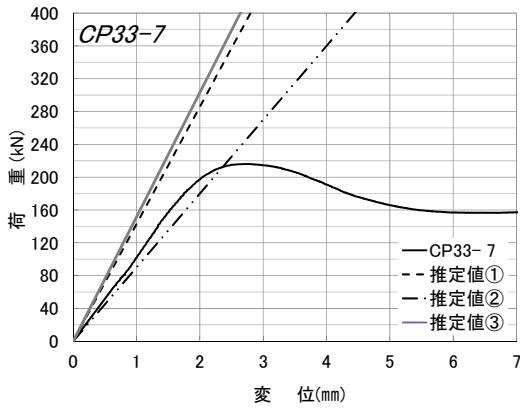


図 3.9-7 CP33-7 の試験結果と推定値の比較

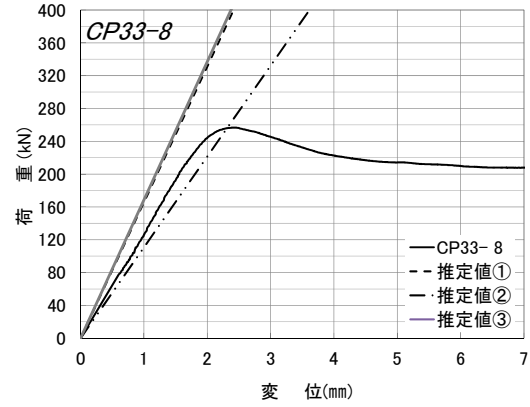


図 3.9-8 CP33-8 の試験結果と推定値の比較

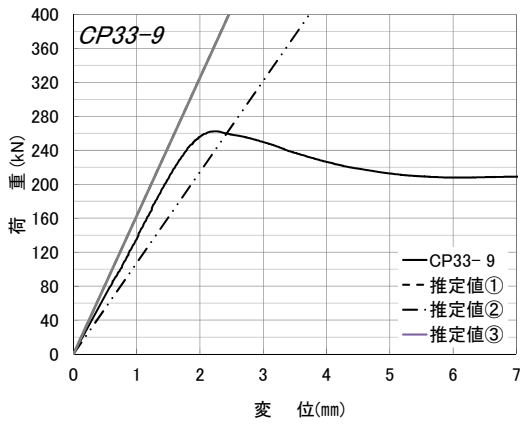


図 3.9-9 CP33-9 の試験結果と推定値の比較

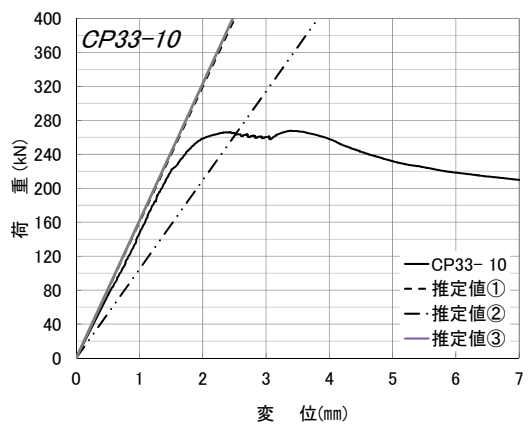


図 3.9-10 CP33-10 の試験結果と推定値の比較

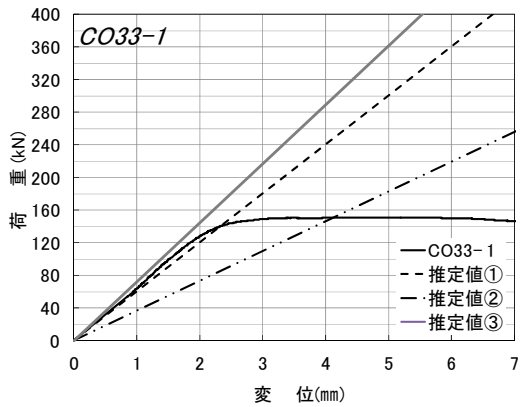


図 3.9-11 CO33-1 の試験結果と推定値の比較

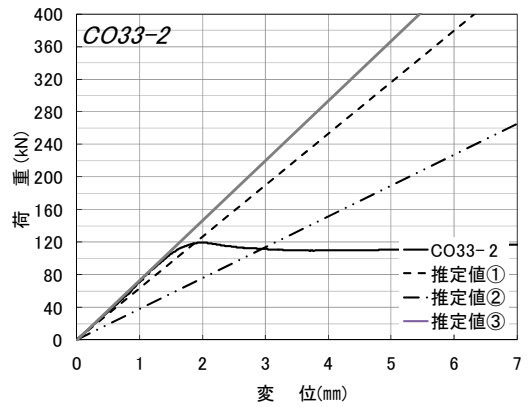


図 3.9-12 CO33-2 の試験結果と推定値の比較

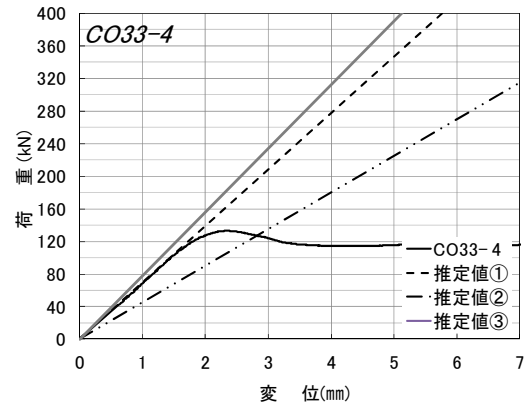
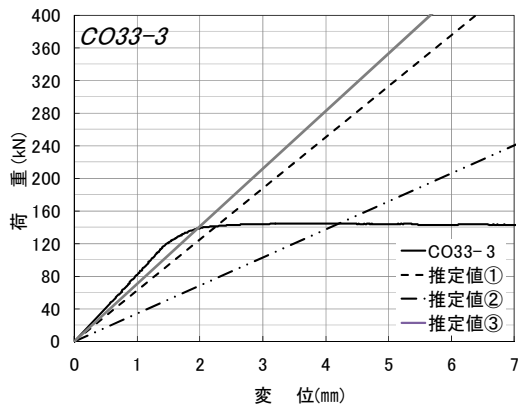


図 3.9-13 CO33-3 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-14 CO33-4 の試験結果と推定値の比較

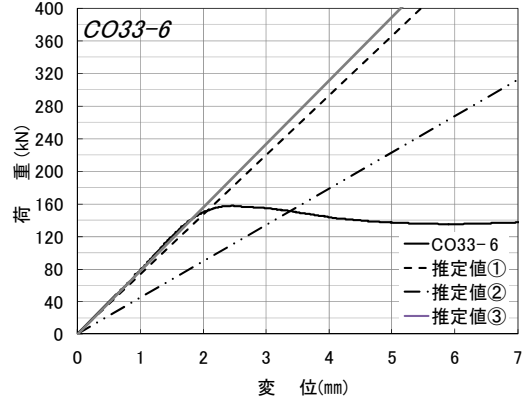
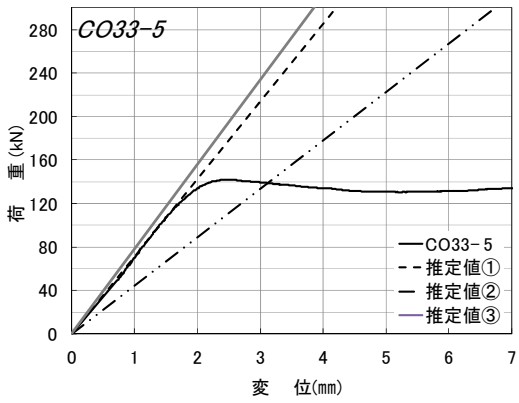


図 3.9-15 CO33-5 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-16 CO33-6 の試験結果と推定値の比較

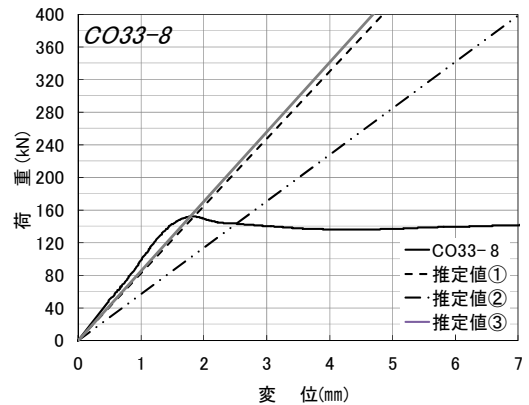
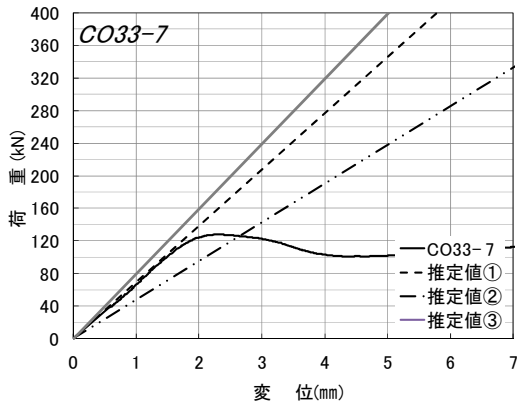


図 3.9-17 CO33-7 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-18 CO33-8 の試験結果と推定値の比較



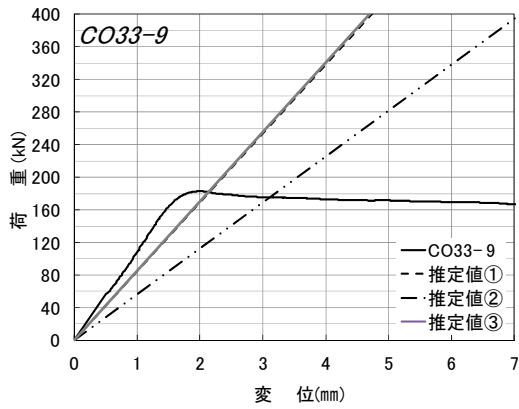


図 3.9-19 CO33-9 の試験結果と推定値の比較

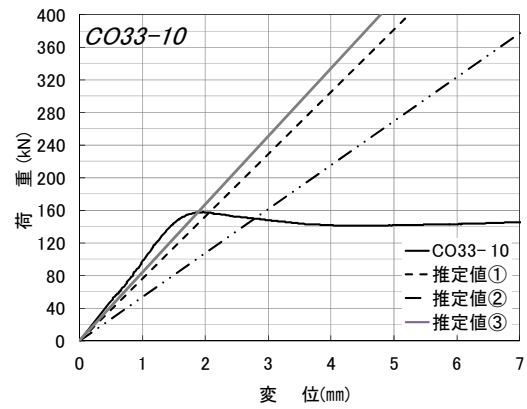


図 3.9-20 CO33-10 の試験結果と推定値の比較

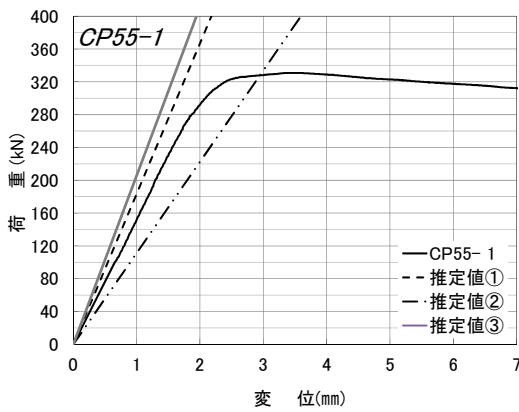


図 3.9-21 CP55-1 の試験結果と推定値の比較

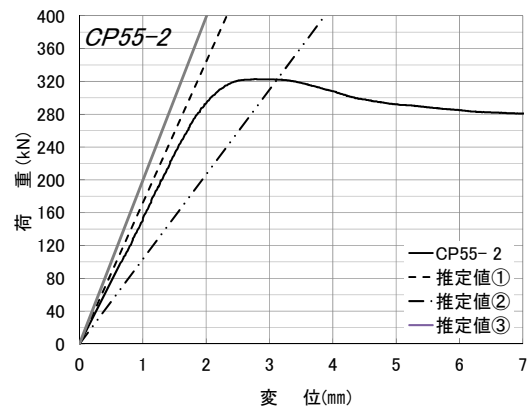


図 3.9-22 CP55-2 の試験結果と推定値の比較

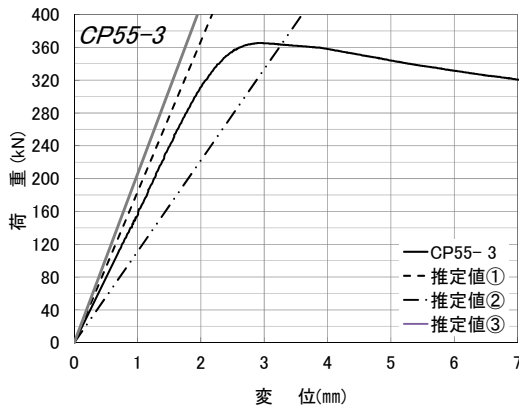


図 3.9-23 CP55-3 の試験結果と推定値の比較

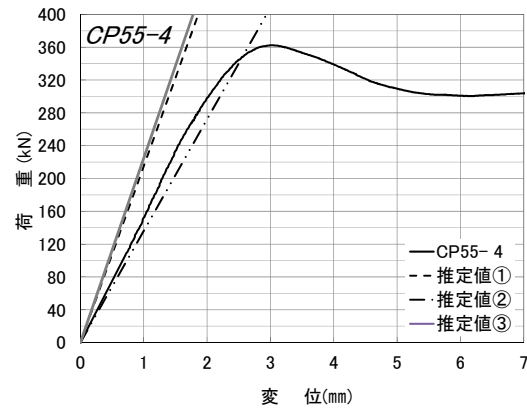


図 3.9-24 CP55-4 の試験結果と推定値の比較

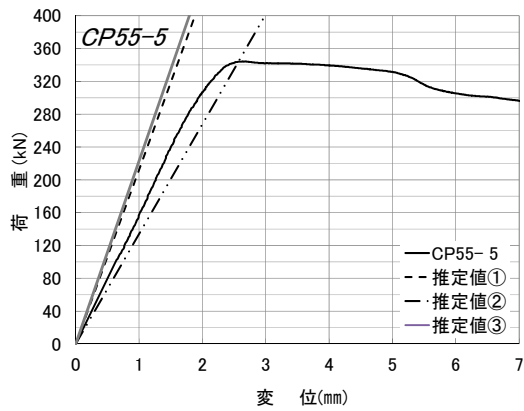


図 3.9-25 CP55-5 の試験結果と推定値の比較

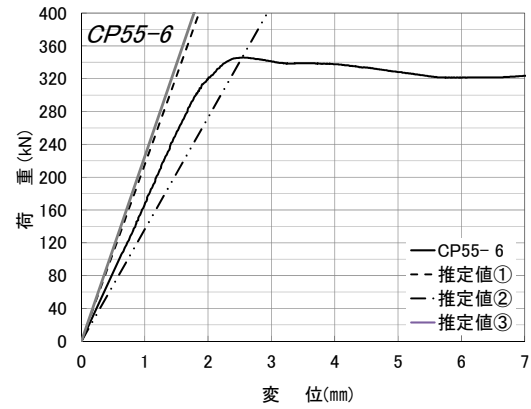


図 3.9-26 CP55-6 の試験結果と推定値の比較

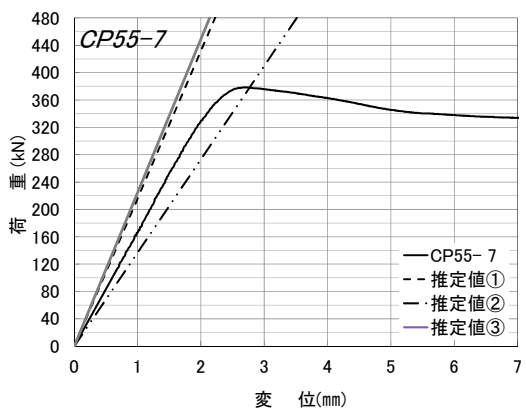


図 3.9-27 CP55-7 の試験結果と推定値の比較

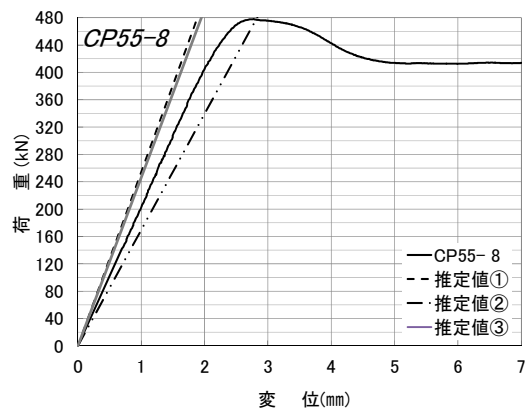


図 3.9-28 CP55-8 の試験結果と推定値の比較

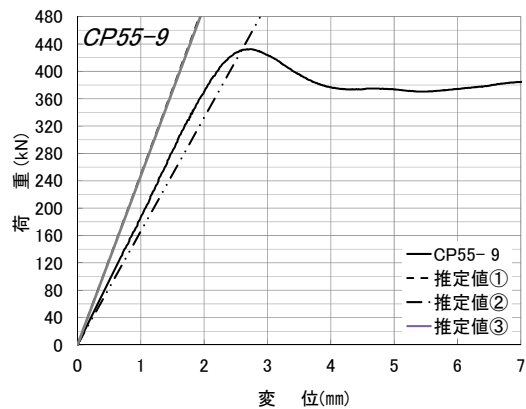


図 3.9-29 CP55-9 の試験結果と推定値の比較

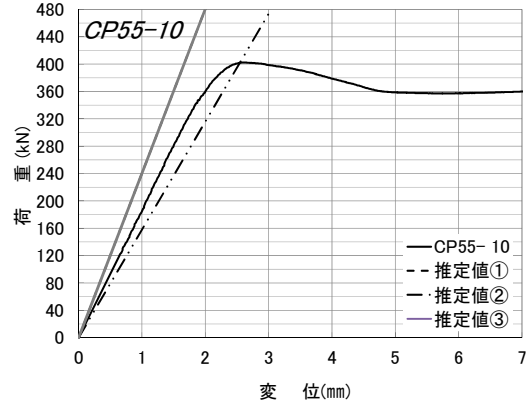


図 3.9-30 CP55-10 の試験結果と推定値の比較

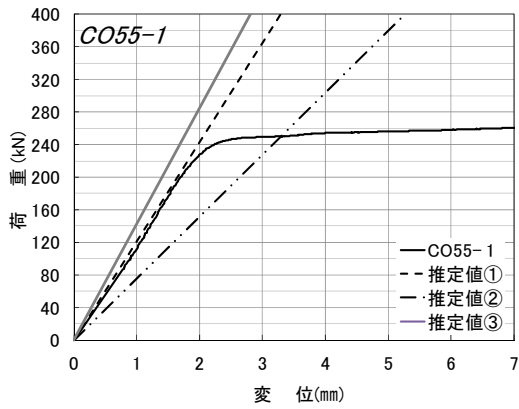


図 3.9-31 CO55-1 の試験結果と推定値の比較

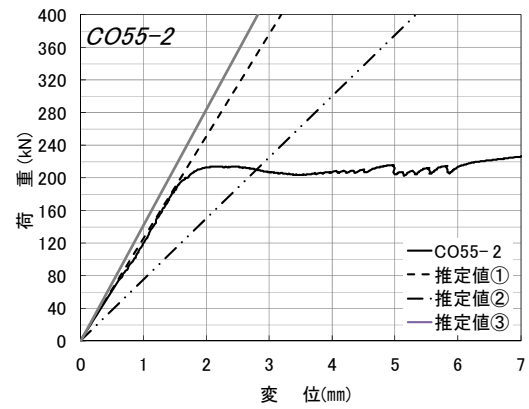


図 3.9-32 CO55-2 の試験結果と推定値の比較

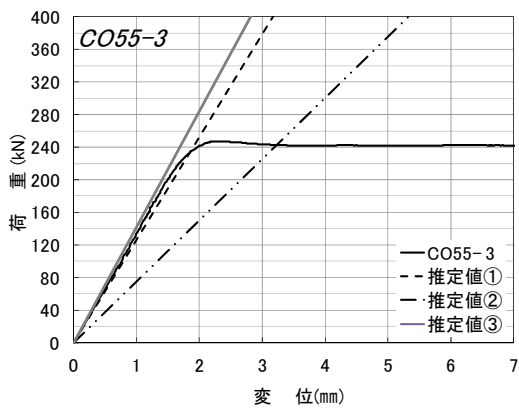


図 3.9-33 CO55-3 の試験結果と推定値の比較

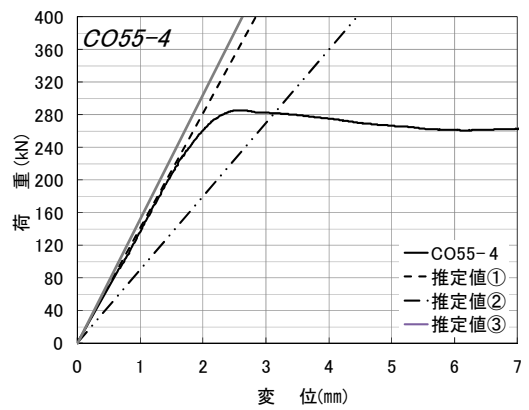


図 3.9-34 CO55-4 の試験結果と推定値の比較

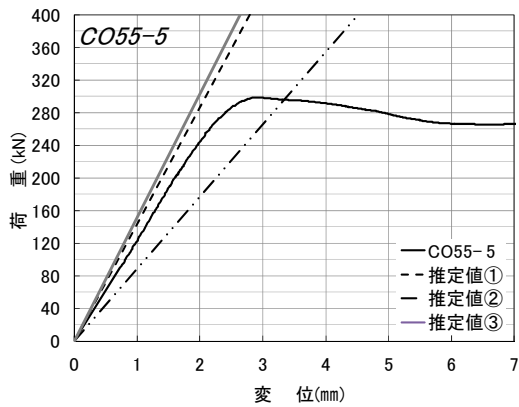


図 3.9-35 CO55-5 の試験結果と推定値の比較

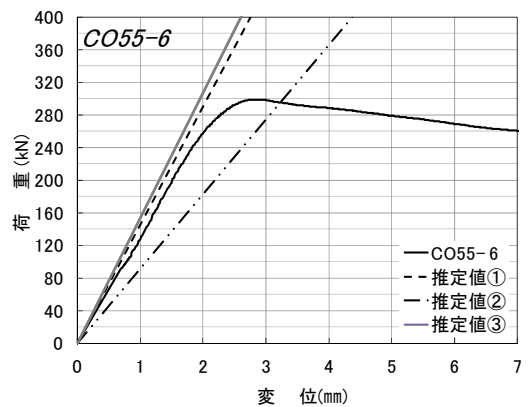


図 3.9-36 CO55-6 の試験結果と推定値の比較

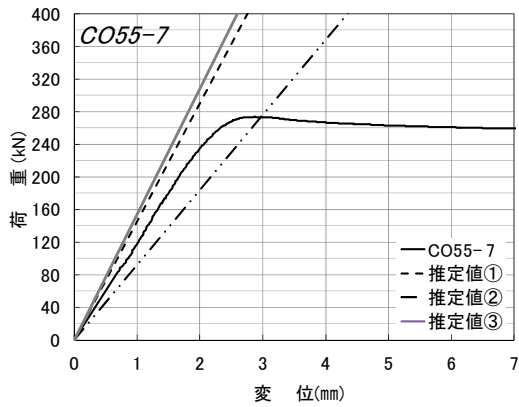


図 3.9-37 CO55-7 の試験結果と推定値の比較

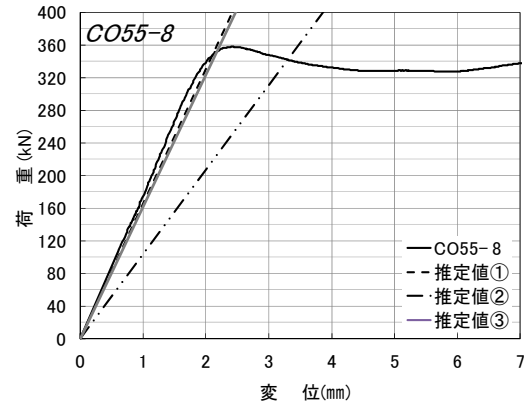


図 3.9-38 CO55-8 の試験結果と推定値の比較

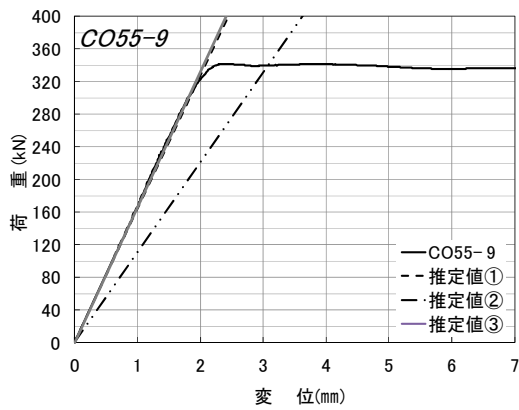


図 3.9-39 CO55-9 の試験結果と推定値の比較

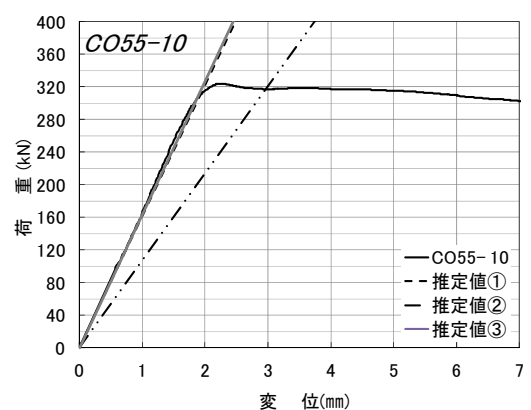


図 3.9-40 CO55-10 の試験結果と推定値の比較

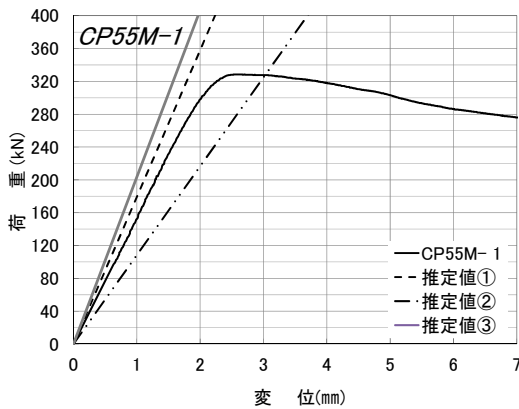


図 3.9-41 CP55M-1 の試験結果と推定値の比較

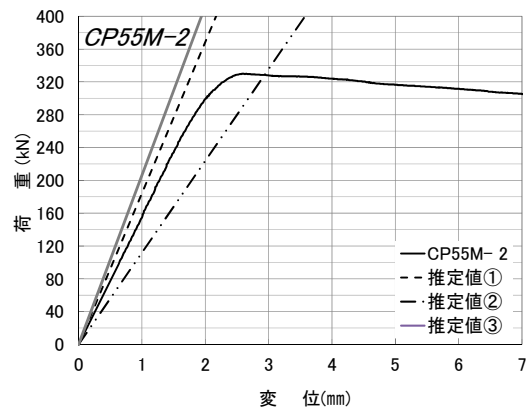


図 3.9-42 CP55M-2 の試験結果と推定値の比較

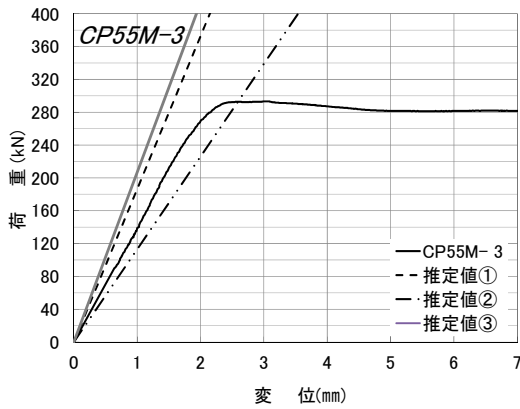


図 3.9-43 CP55M-3 の試験結果と推定値の比較

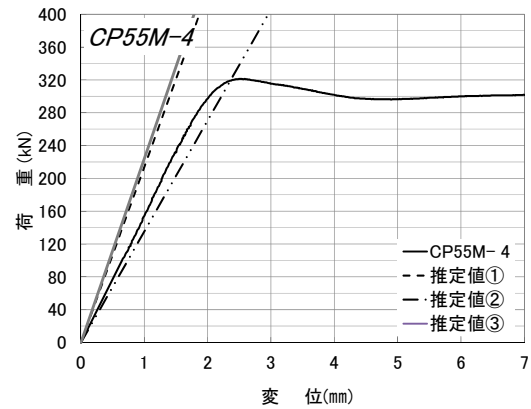


図 3.9-44 CP55M-4 の試験結果と推定値の比較

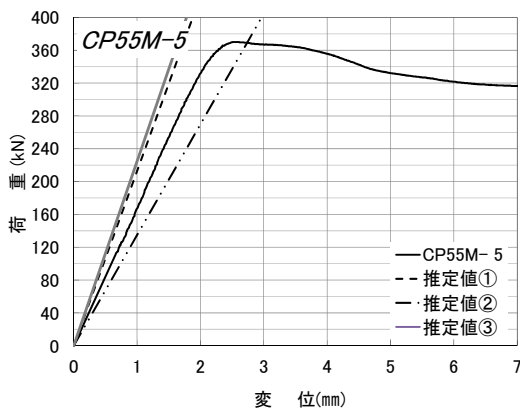


図 3.9-45 CP55M-5 の試験結果と推定値の比較

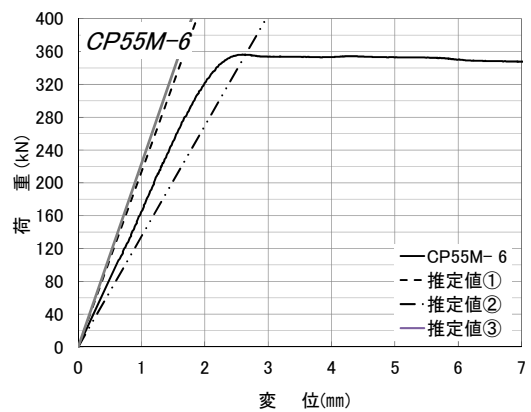


図 3.9-46 CP55M-6 の試験結果と推定値の比較

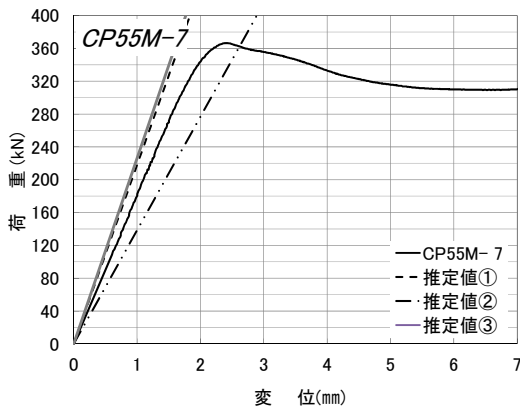


図 3.9-47 CP55M-7 の試験結果と推定値の比較

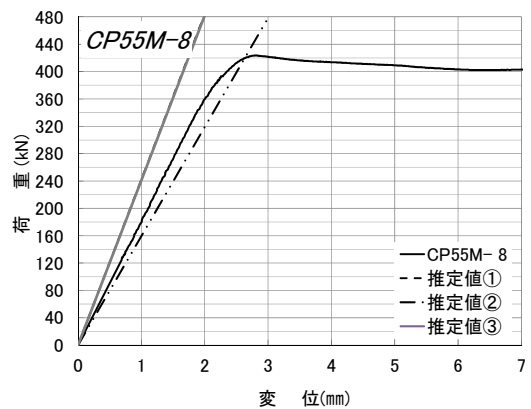


図 3.9-48 CP55M-8 の試験結果と推定値の比較

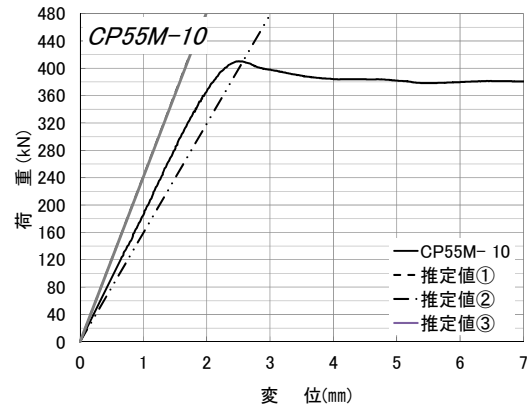
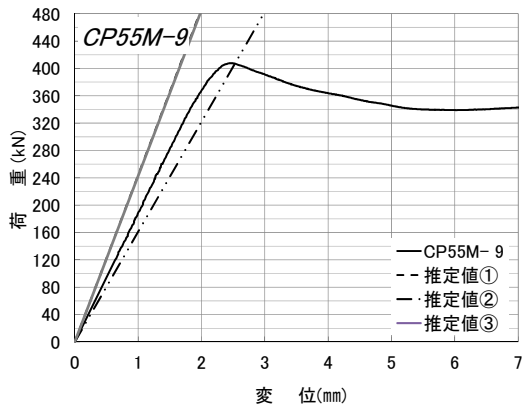


図 3.9-49 CP55M-9 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-50 CP55M-10 の試験結果と推定値の比較

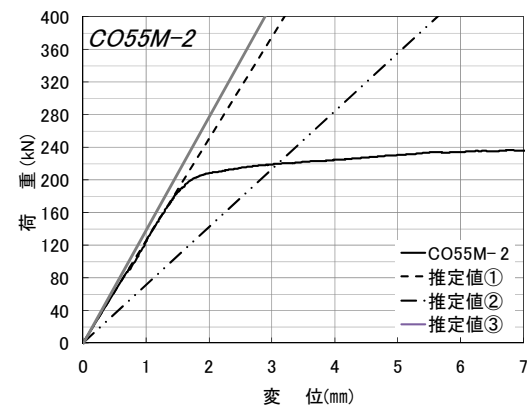
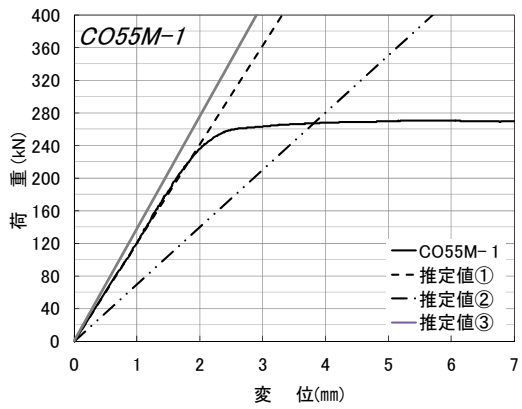


図 3.9-51 CO55M-1 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-52 CO55M-2 の試験結果と推定値の比較

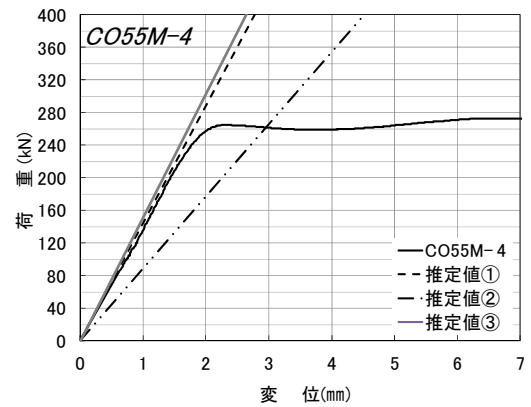
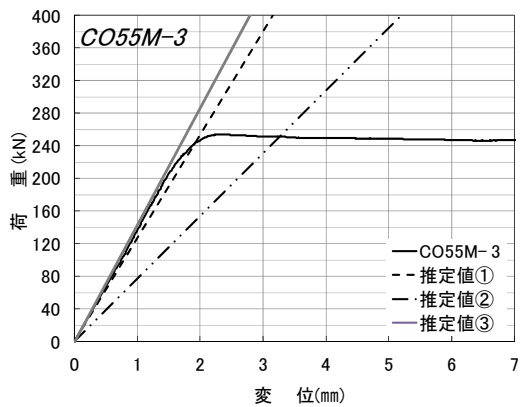


図 3.9-53 CO55M-3 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-54 CO55M-4 の試験結果と推定値の比較

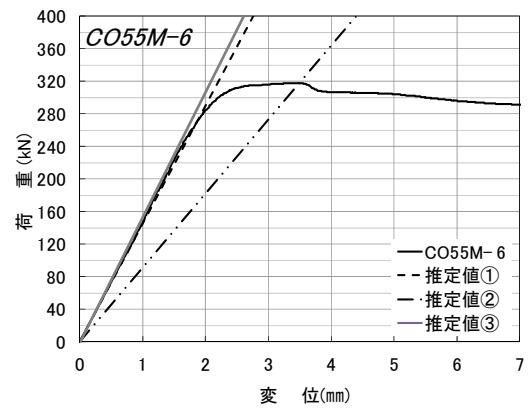
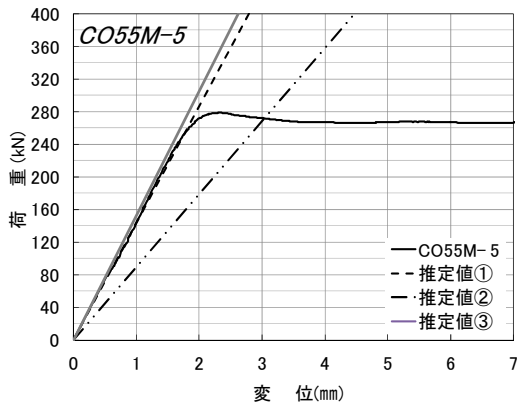


図 3.9-55 CO55M-5 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-56 CO55M-6 の試験結果と推定値の比較

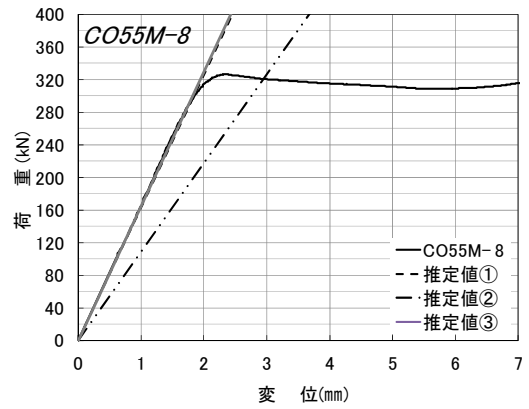
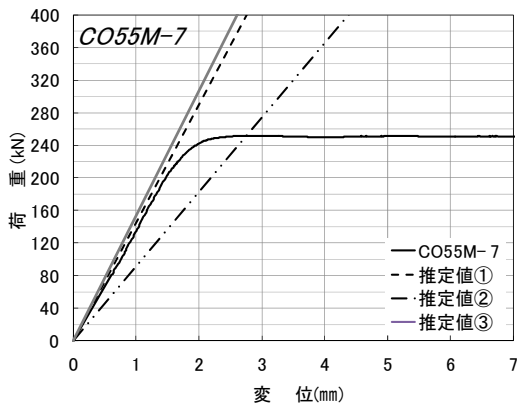


図 3.9-57 CO55M-7 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-58 CO55M-8 の試験結果と推定値の比較

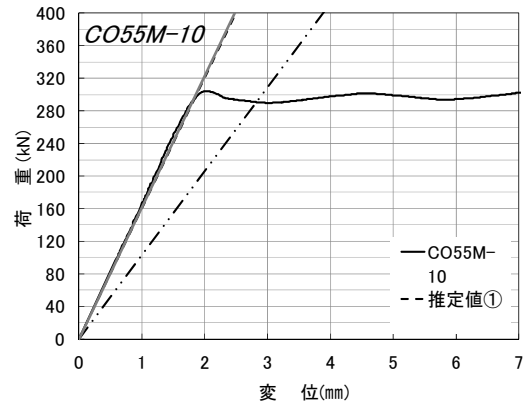
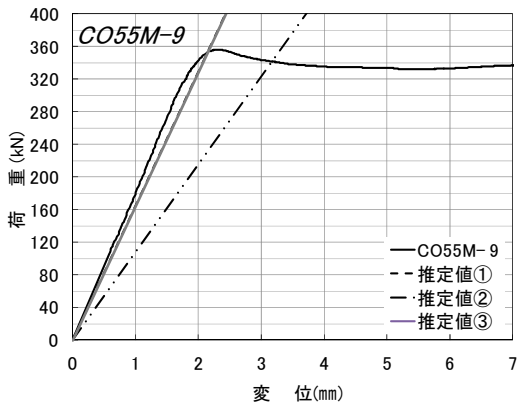


図 3.9-59 CO55M-9 の試験結果と推定値の比較 図 3.9-60 CO55M-10 の試験結果と推定値の比較

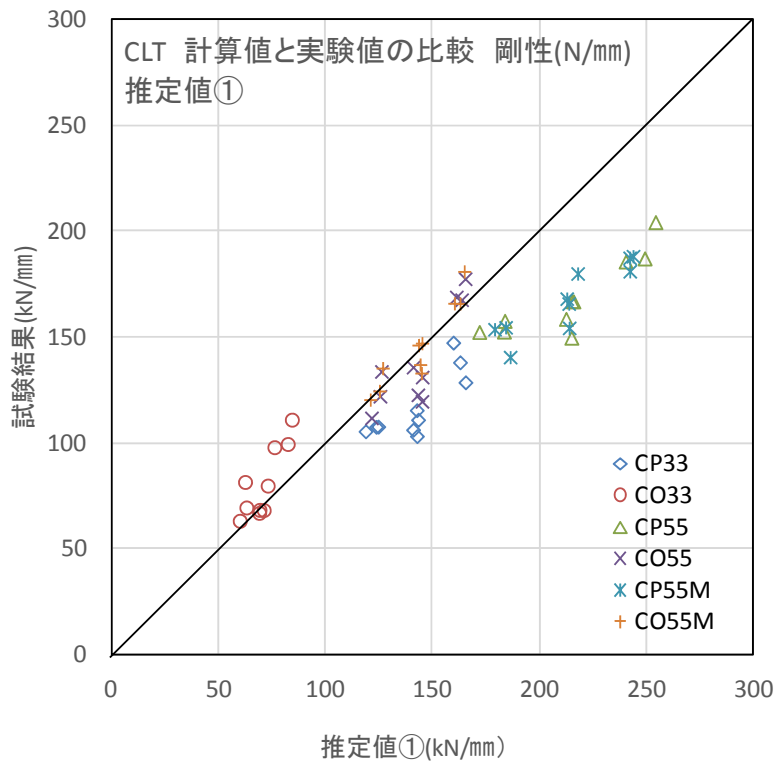


図 3.9-61 推定値①と試験結果の比較

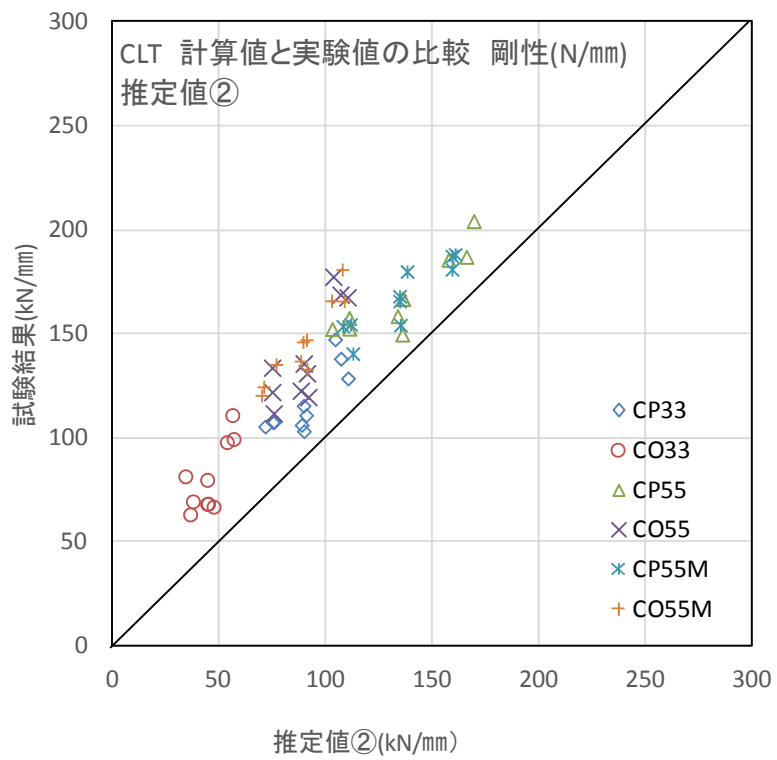


図 3.9-62 推定値②と試験結果の比較



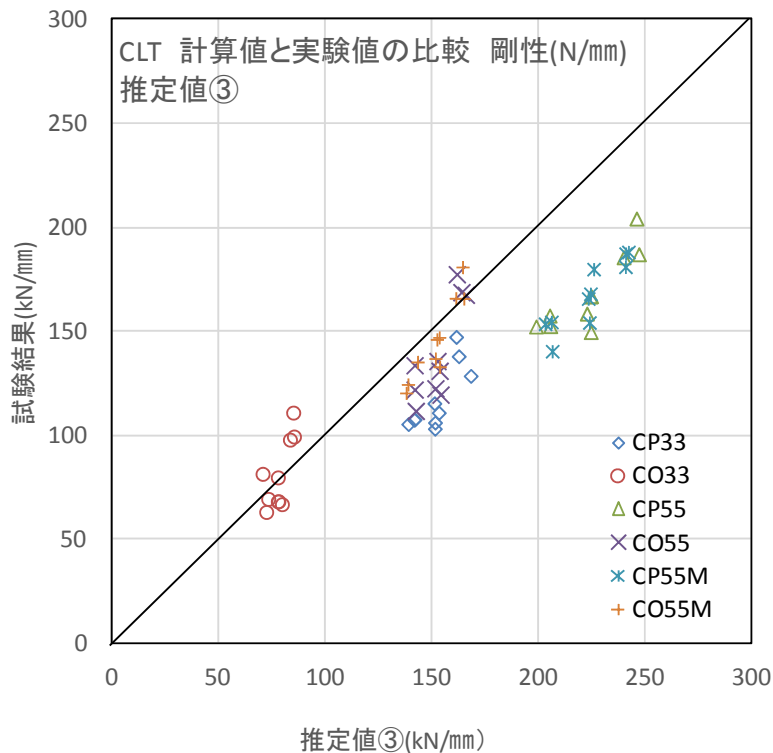


図 3.9-63 推定値③と試験結果の比較

### ③ 考察

推定値①において試験体 CP33,CP55,CP55M が高めに推定された理由として考えられるのは、図 3.9-64 のように集成材の縦圧縮試験は図 3.9-64 左の全面圧縮の結果であるのに対し、CLT 材のめり込み試験は図 3.9-64 右に示すような部分圧縮であったため、応力が放射状に分散し、推定値より低くなったと考えられる。したがって全体の面圧面積に占める平行層の面積の割合が高い CP33、CP55、CP55M がやや高めとなった可能性が考えられる。

しかし、原因はこれだけではないと考えられる。図 3.9-65 は x 軸を平行層の面圧面積、y 軸を稲山式<sup>47)</sup>による直交層の剛性を減じた平行層のみの剛性としたグラフである。概観すると、面圧面積が大きくなるにつれて剛性の増加率が減少していくことが分かる。また、これらを強軸試験体(CP シリーズ)と弱軸試験体(CO シリーズ)に分けたものが図 3.9-66 である。CP33、CO55 及び CO55M は共に平行層面積が同じ  $6,000 \text{ mm}^2$  であり、CP33 の外側に 1 層ずつ直交層を追加したものが CO55、CO55M である。直交層は平行層の 1/10 倍程度であることを考えると稲山式による直交層の剛性が多少安全側に算定されたとしても大過ないにも関わらず、両者には明確な差が見られる。よって、平行層面積  $9,000 \text{ mm}^2$  に位置する P55 及び P55M も弱軸試験体の線形近似線の延長線より下に位置していると考えられる。強軸試験体の剛性が弱軸試験体よりも低くなる理由としては、図 3.9-67 に示すように横歪みの影響が考えられる。全面圧縮では、四方に横歪みが生じるが、CLT の部分圧縮の場合は、直交層によって歪みが抑制される。しかし、強軸試験体の場合は外層が平行層と

なるため、厚み方向や幅方向に横歪みが発生しやすい状態である。

なお、抑制効果は最終破断にも影響を与え、CLTの強軸試験体は写真3.7-14、写真3.7-21のように外層が座屈するが、弱軸試験体は写真3.7-19、写真3.7-20、写真3.7-23、写真3.7-24のとおり、座屈が生じていない。これは荷重変位包絡線を見ても明らかで、図3.7-2～図3.7-4のとおり、強軸試験体(CPシリーズ)は外層が座屈するため、最大荷重後の荷重の落ち込みが大きいが、弱軸試験体(COシリーズ)は座屈が抑制されているため、最大荷重後の荷重の落ち方が少ないことが分かる。

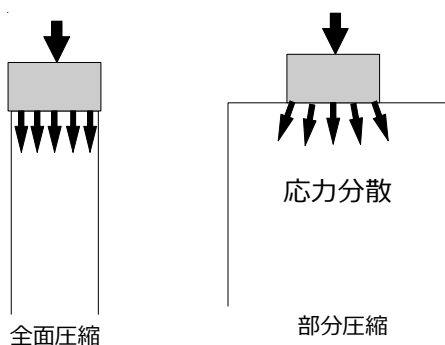


図 3.9-64 全面圧縮と部分圧縮の応力分布の違い

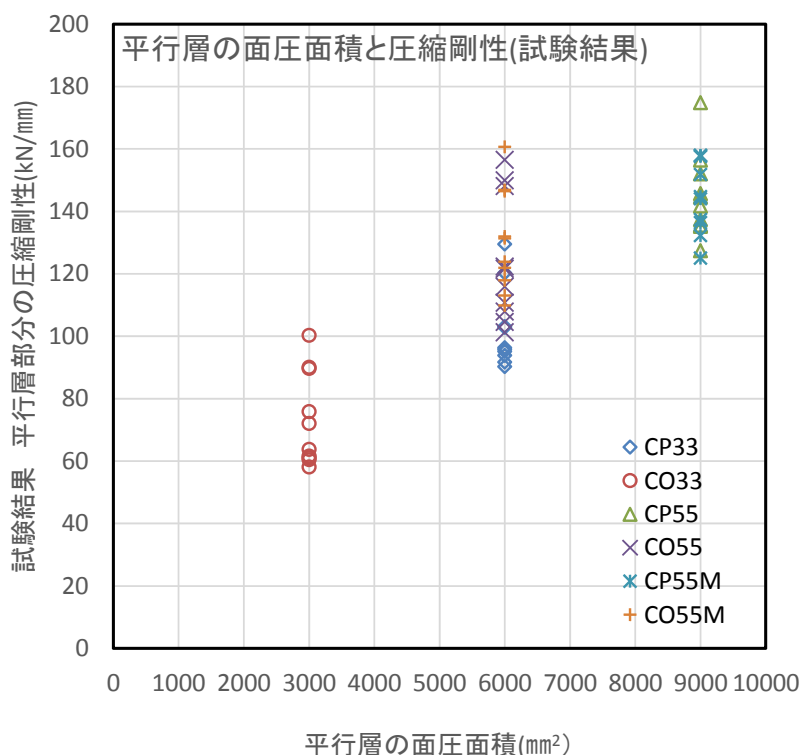


図 3.9-65 平行層の面圧面積と圧縮剛性(試験結果)の関係

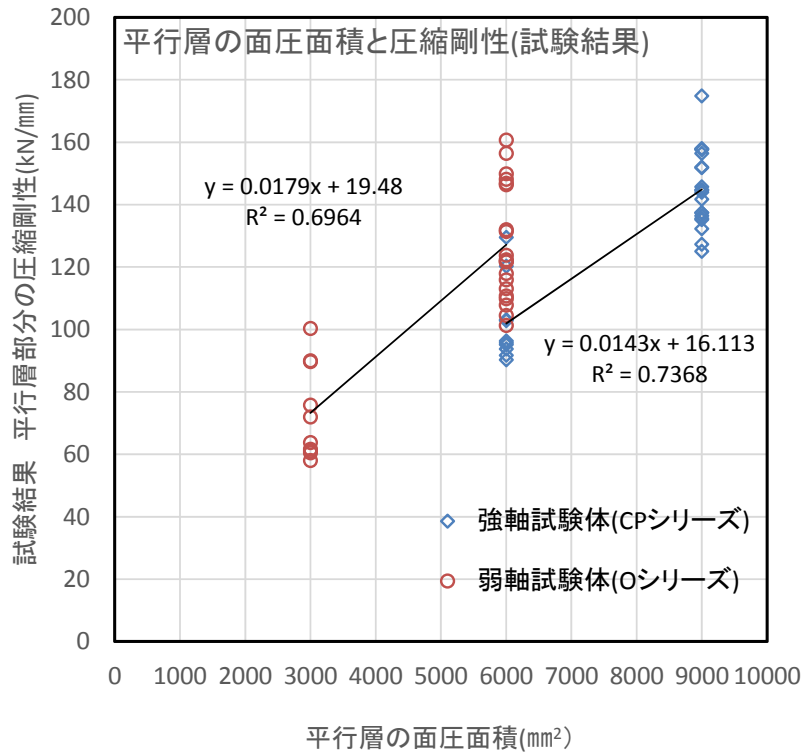


図 3.9-66 強軸試験体、弱軸試験体別の平行層の面圧面積と圧縮剛性(試験結果)の関係

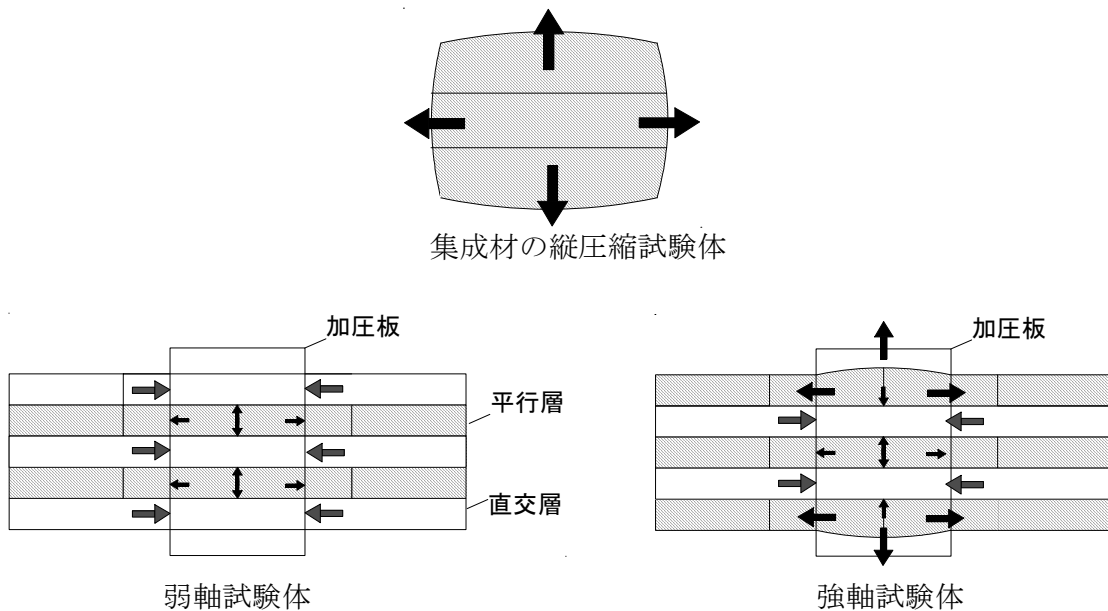


図 3.9-67 集成材の縦圧縮試験、CLT の横圧縮試験における横歪みの違い

## (2) 最大耐力の推定

CLT 材の圧縮最大耐力の推定式は、縦圧縮耐力とめり込み耐力を足し合わせることで求めた。本研究では、表 3.4-1 に示すヤング係数により区分されたグループ毎の集成材の最大耐力の平均値から CLT の推定値を求め、実験値と比較した。縦圧縮とめり込み試験では、それぞれの最大耐力時の変位が異なるため、これを揃えるために試験体 GP200 の  $\delta_{\max}$  の平均値を算出し( $\delta_{\max}=3.40$  mm)、試験体 GO の計算用耐力を一律変位 3.40 mm 時の耐力としている。結果は図 3.9-68 に示すとおり良く一致する結果となった。

なお、基準強度に基づき、計算を行った結果を図 3.9-69 に示す。スギ CLT の基準強度は M30 と M60 の 2 種類であるため、下限～5GPa までのグループを「M30」、5GPa 以上のグループを「M60」として計算を行った。計算に使ったヤング係数は、各試験体の測定値とした。結果から、基準強度に基づく算定結果は、試験値の半分以下となることが分かった。

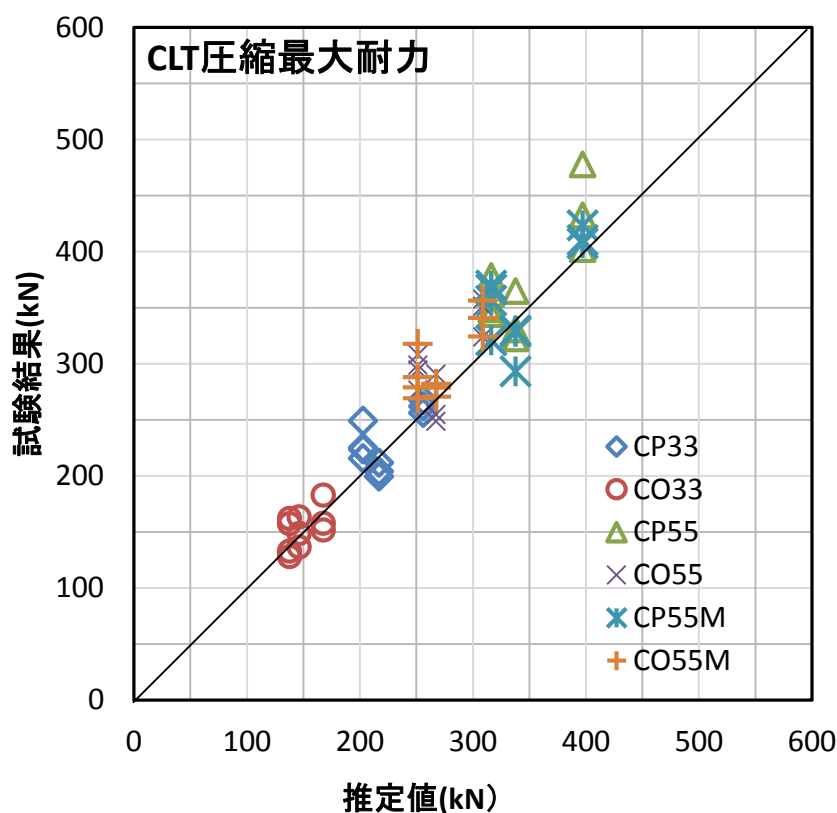


図 3.9-68 CLT 圧縮最大耐力の試験値と推定値の比較

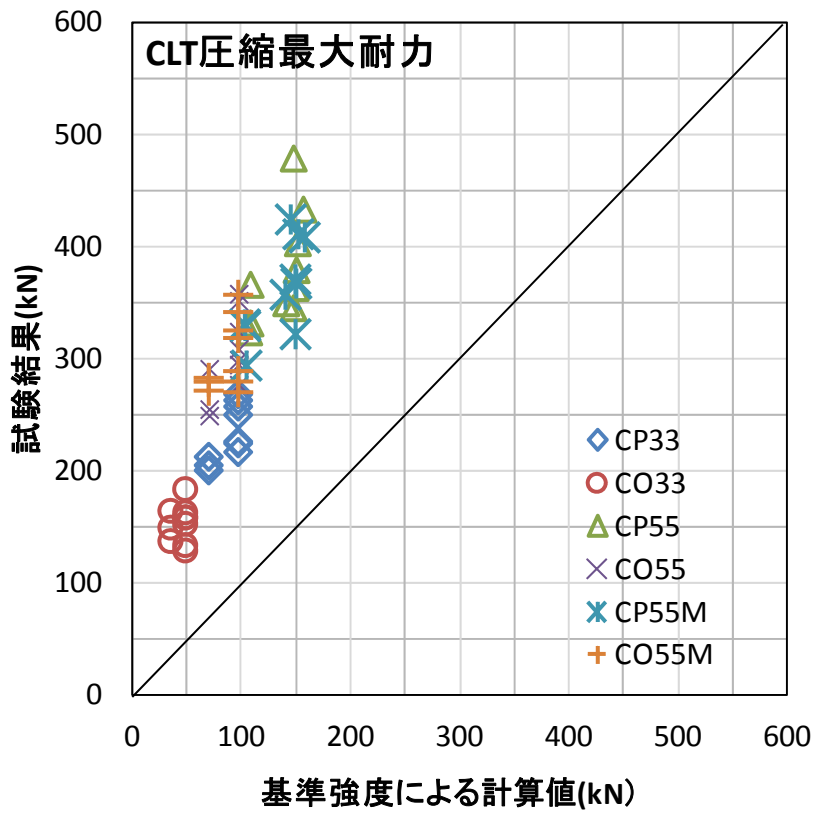


図 3.9-69 CLT 圧縮最大耐力の試験値と基準強度計算値の比較

## 4. CLT の材料物性(曲げヤング係数及び密度)の違いによる影響試験

### 4.1 実験の目的

前章では、ヤング係数別にグループ分けしたラミナを用いた集成材及び CLT 材の圧縮性能について材料物性の影響を検討した。

本章では、直交集成板の日本農林規格(農林水産省告示第 3079 号)に基づき製造されたスギ CLT パネルを用いた引きボルト接合部の引張性能を検証し、ラミナの品質制御を同規格と異なる方法によって製造された CLT を用いた場合と比較することを目的とする。

なお、本章の研究内容の一部は文献(58)で発表している。

### 4.2 試験体

#### (1) 試験体の仕様

試験体材料は、スギのラミナ(幅 110 mm、厚さ 30 mm)を用いた 5 層 5 プライの CLT パネルである。

試験体の仕様は、表 4.2-1 及び表 4.2-2 に示すとおり全 8 種類とした。試験体名称はそれぞれヤング係数の等級と構成を表したものである。このうち、JAS に規定される試験体は試験体記号 S30A, S30A', S30B, Mx60A, Mx60A', Mx60B の 6 種類であり、同一等級構成と異等級構成、および A 種と B 種の違いを比較する事を目的としている。なお、直交集成板の日本農林規格に規定されている A 種にはラミナの曲げヤング係数に上限値はないが、試験体 S30A' では内外層ラミナの上限を 7.5GPa に、Mx60A' では内層ラミナの上限を 7.5GPa、外層ラミナの上限を 9.0GPa とした。

残りの 2 種類は、ラミナの曲げヤング係数を 6.0GPa 以上 7.0GPa 未満の範囲に限定して製造した試験体 60S と、ラミナの密度を 405kg/m<sup>3</sup> 以上 435kg/m<sup>3</sup> 以下の範囲に限定して製造した試験体 DS である。なお、Mx60A-7~12、Mx60B、S30A-7~12、S30B は平成 26 年度、残りは平成 25 年度に製造したものであり、それぞれ試験実施場所が異なり、更にラミナの等級区分における母集団の分布形状が異なる可能性もある。しかし、ラミナの産地は何れも熊本県産材が主体である。

接合方法は、図 4.2-1 に示す両ねじボルトを図 4.2-2 の試験体図に示すとおり木口面から CLT 表面に開けた角穴部分まで挿入し、角座金を介してナット締めを行った。なお、試験装置の都合上、試験場によってボルトの長さを変えている。

全ての試験体で CLT パネルの幅はぎ部は接着しておらず、縦継ぎ及び積層面の接着は JIS K 6806 に規定される水性高分子-イソシアネート系木材接着剤 1 種 1 号とした。

試験体の形状寸法は全て同一とし、弱軸試験体は実施せず、強軸試験体のみとした。また、本試験は CLT パネルの材料品質の違いを比較することが目的であるため、接合金物が先行破壊しないように引きボルトと座金は十分な強度を有するものを用いた。

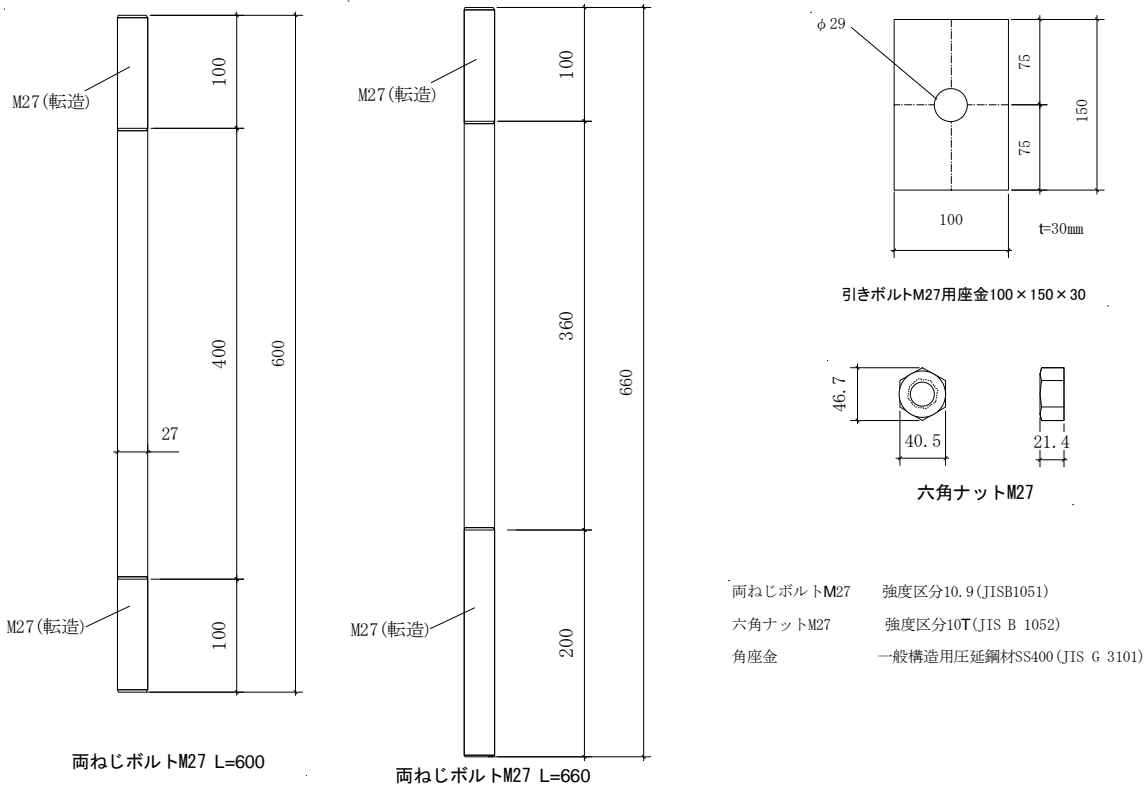
なお、表に記載のとおり第 4 章で扱う試験体グループをグループ 1 と称し、第 5 章、第 6 章との試験体との比較のために区別するものとする。

表 4.2-1 引きボルト接合部の試験体の詳細(1)

グループ	物性別通し番号	試験体番号	JASでの呼び方	ラミナの構成	ラミナの曲げヤング係数(Gpa)						密度(kg/m <sup>3</sup> )
					外層ラミナ			内層ラミナ			
					下限値	平均値	上限値	下限値	平均値	上限値	
1	1	S30A-1~6	S30-5-5・A種構成	同一等級	2.5	3.0	なし	2.5	3.0	なし	計測は行いが、制御はしない。  正規分布で一番頻度が高い密度のみで構成405~435
		S30A-7~12									
	2	S30A'-1~6	S30-5-5・A種構成	同一等級	2.5	3.0	7.5	2.5	3.0	7.5	
	3	S30B-1~6	S30-5-5・B種構成	同一等級	2.5	3.0	6.0	2.5	3.0	6.0	
	4	Mx60A-1~6	Mx60-5-5・A種構成	対称異等級	5.0	6.0	なし	2.5	3.0	なし	
		Mx60A-7~12									
	5	Mx60A'-1~6	Mx60-5-5・A種構成	対称異等級	5.0	6.0	9.0	2.5	3.0	7.5	
	6	Mx60B-1~6	Mx60-5-5・B種構成	対称異等級	5.0	6.0	9.0	2.5	3.0	6.0	
7	60S-1~6	なし	同一等級	6.0以上7.0未満							
8	DS-1~6	なし	同一等級	計測は行いが制御はしない。							
試験体数の合計											

表 4.2-2 引きボルト接合部の試験体の詳細(2)

グループ	物性別通し番号	試験体番号	JASでの呼び方	ラミナの構成	CLTの製造		試験実施年度	試験場所	試験体数	
					製造場所	製造月				
1	1	S30A-1~6	S30-5-5・A種構成	同一等級	岡山県	1月	H25	(公財)住木センター	6体	12体
		S30A-7~12					6月	H26	広島県立総合技術研究所	
	2	S30A'-1~6	S30-5-5・A種構成	同一等級		1月	H25	(公財)住木センター	6体	
	3	S30B-1~6	S30-5-5・B種構成	同一等級		6月	H26	広島県立総合技術研究所	6体	
	4	Mx60A-1~6	Mx60-5-5・A種構成	対称異等級		1月	H25	(公財)住木センター	6体	12体
		Mx60A-7~12				6月	H26	広島県立総合技術研究所	6体	
	5	Mx60A'-1~6	Mx60-5-5・A種構成	対称異等級		1月	H25	(公財)住木センター	6体	
	6	Mx60B-1~6	Mx60-5-5・B種構成	対称異等級		6月	H26	広島県立総合技術研究所	6体	
7	60S-1~6	なし	同一等級	1月	H25	(公財)住木センター	6体			
8	DS-1~6	なし	同一等級	1月	H25	(公財)住木センター	6体			
試験体数の合計									60体	



<住木センター用>

<広島総合研究所用>

単位：mm

図 4.2-1 金物製作図

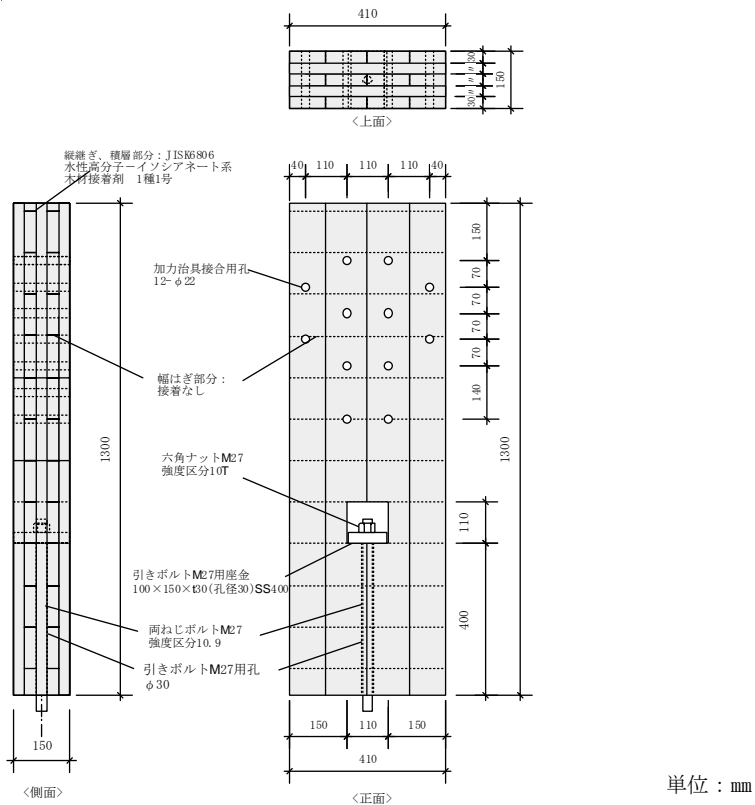


図 4.2-2 試験体図



(2) 試験体の材料物性

1) 各試験体のヤング係数及び密度の記録

表 4.2-3 は、表 4.2-1 の試験体毎のヤング係数の仕様を分かりやすく図示したものである。試験体によっては、ヤング係数の値がかなり広範囲に渡っていることが分かる。したがってヤング係数 6.0~6.9GPa に限定した試験体 60S を除き、第 3 章で検討を行った圧縮試験のようにヤング係数別にグループ分けした訳ではなく、この仕様に適合するように完全に無作為にグレーディングしたものである。各試験体のヤング係数と密度については図 4.2-3 ~図 4.2-15 のとおり、ヤング係数については試験体図の欄外にラミナ単位、密度については試験体図中にひき板単位で記録している。なお、ヤング係数は L40 といった表示がされているが、これは 4.0~4.9GPa といったようなある一定の範囲にある数値を示している(詳細は表 4.2-4 に示す。)。なお、試験体は全てスギ CLT である。

表 4.2-3 各試験体のヤング係数の仕様

ヤング係数 (Gpa)		ラミナの種類							
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
S30A	外層								
	内層								
S30A'	外層								
	内層								
S30B	外層								
	内層								
MX60A	外層								
	内層								
MX60A'	外層								
	内層								
MX60B	外層								
	内層								
60S	外層								
	内層								

表 4.2-4 図 4.2-3~図 4.2-15 におけるヤング率表示の意味

< S30A, S30A', S30B, Mx60A, Mx60A', Mx60B >

ヤング係数表示名	ヤング係数 (GPa)	
	下限	上限
L25	2.5	3.5
L40	3.5	4.5
L50	4.5	5.5
L60	5.5	6.5
L70	6.5	7.5
L80	7.5	8.5
L90	8.5	8.5以上

< 60S >

ヤング係数表示名	ヤング係数 (GPa)	
	下限	上限
L60	6.0	7.0

< DS >

ヤング係数表示名	ヤング係数 (GPa)	
	下限	上限
L25	2.5	4.0
L40	4.0	5.0
L50	5.0	6.0
L60	6.0	7.0
L70	7.0	8.0
L80	8.0	9.0
L90	9.0	9.0以上

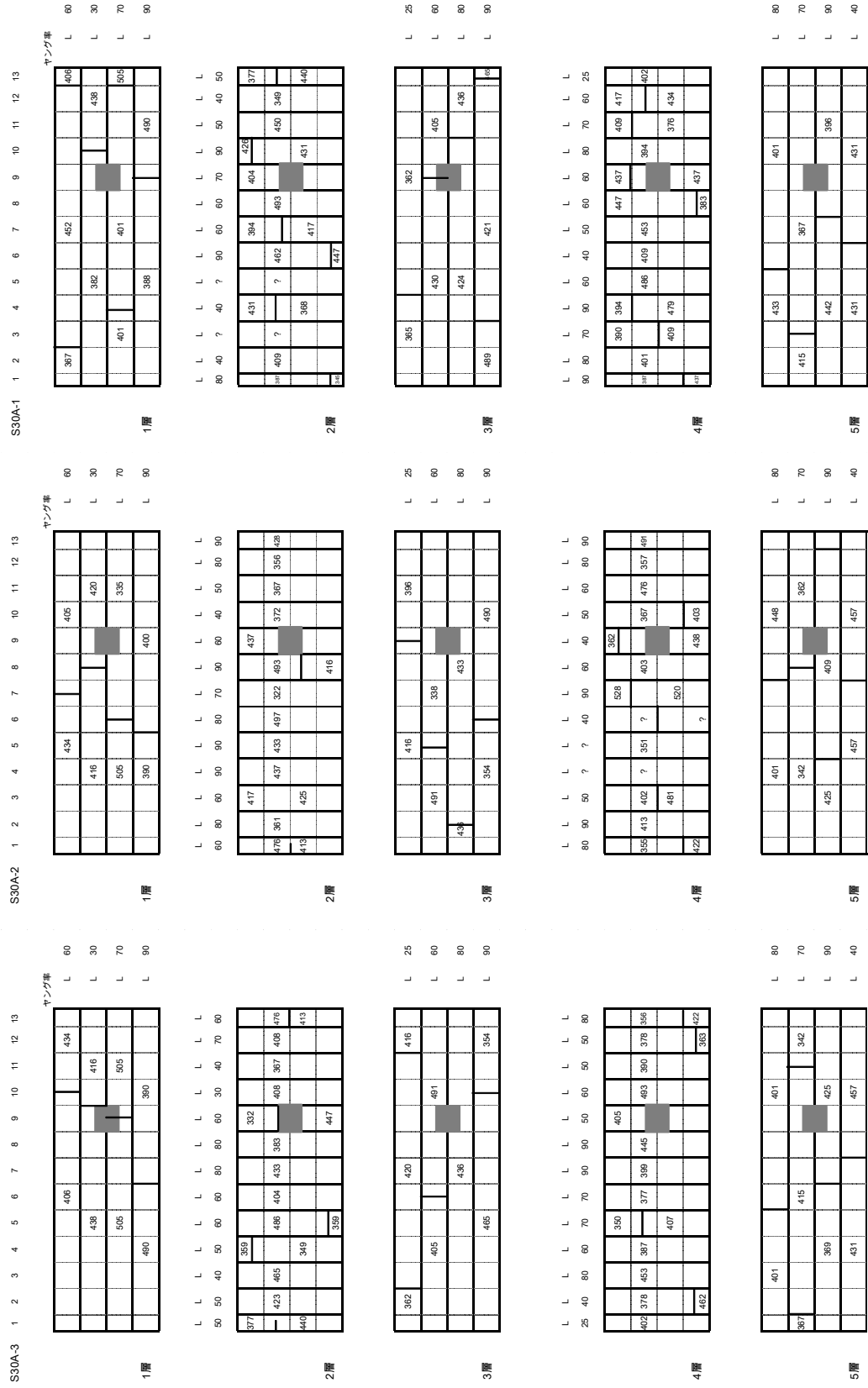


図 4.2-3 S30A1-3 ヤング係数と密度の記録

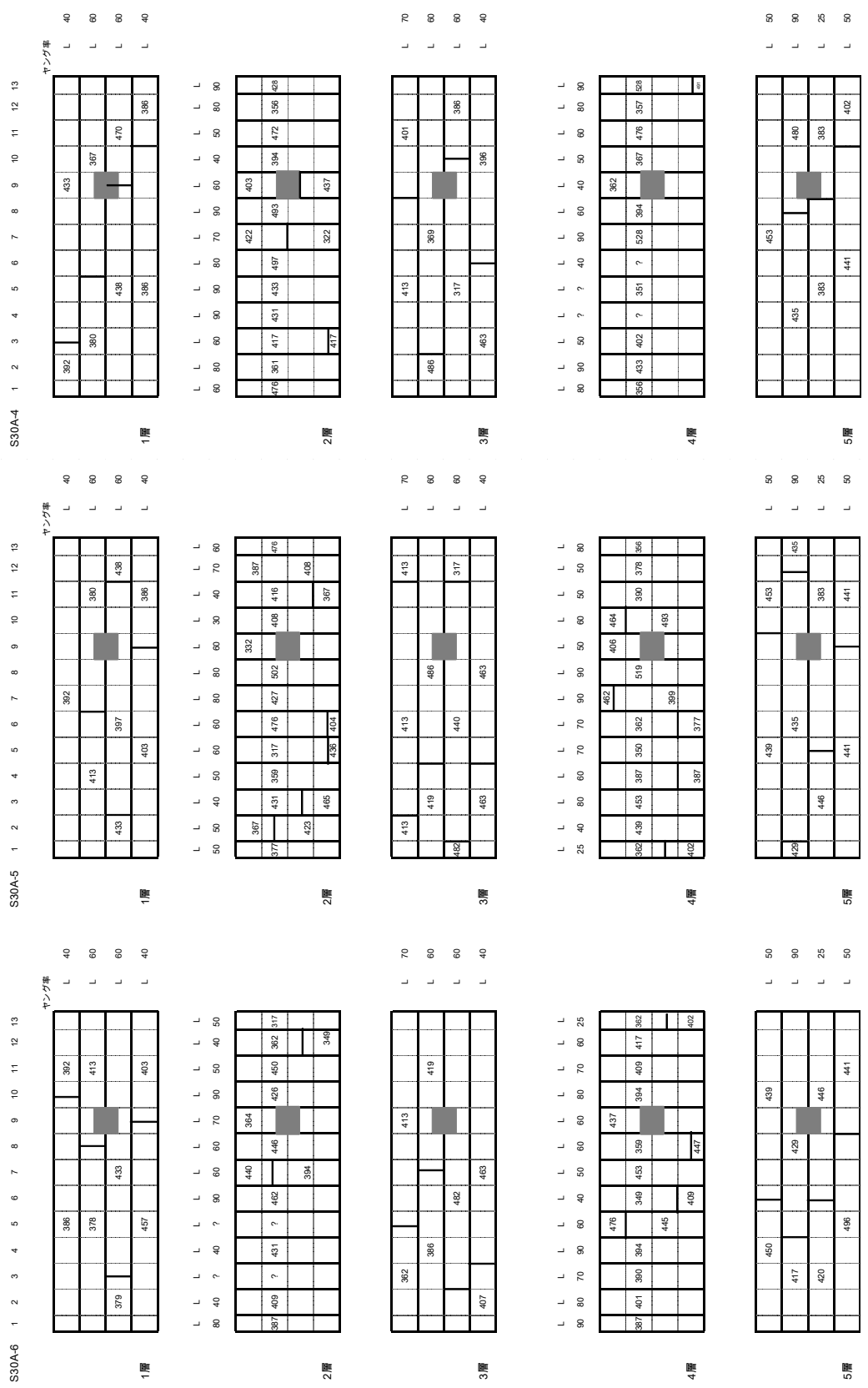


図 4.2-4 S30A4-6 ヤング係数と密度の記録

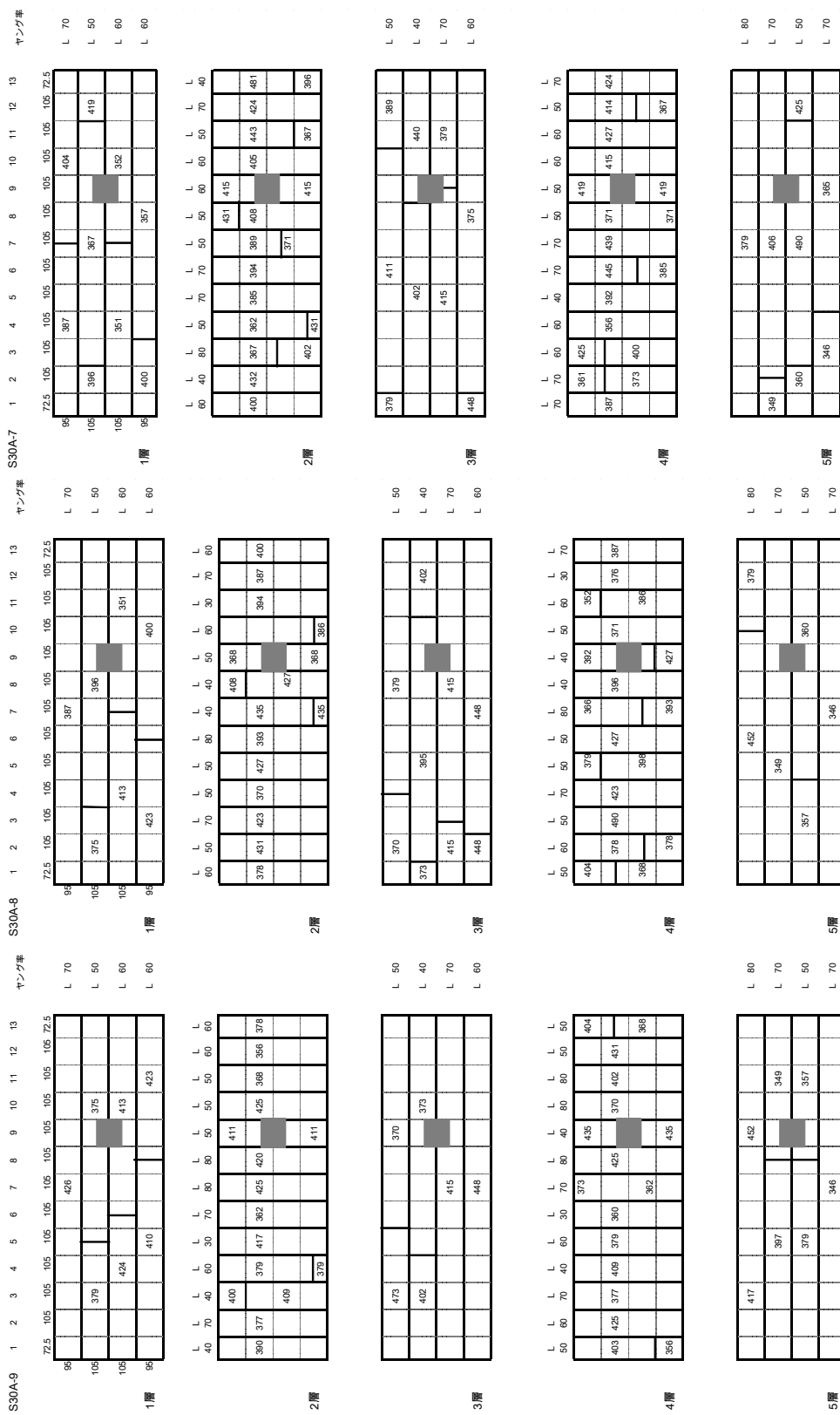


図 4.2-5 S30A7-9 ヤング係数と密度の記録

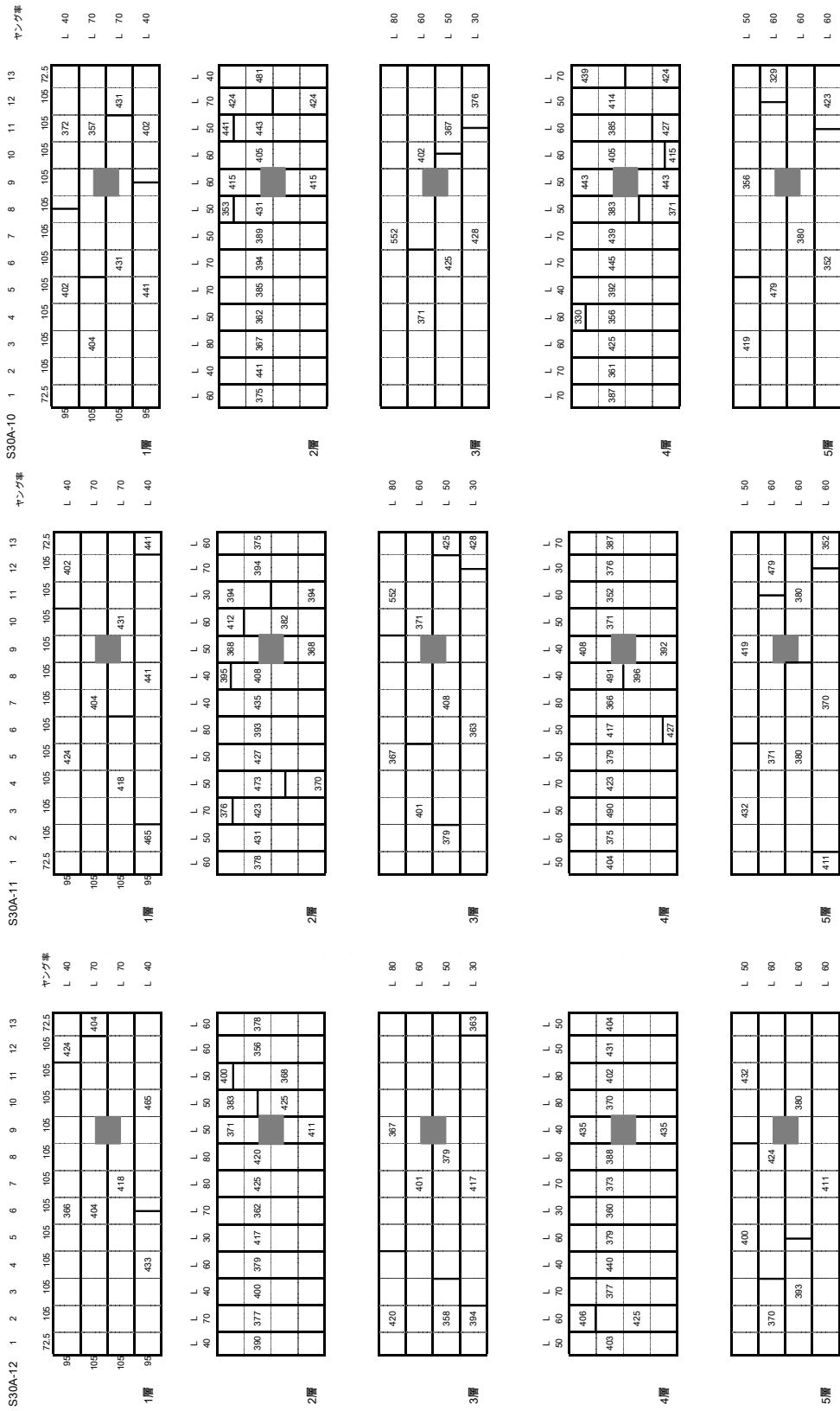


図 4.2-6 S30A10-12 ヤング係数と密度の記録

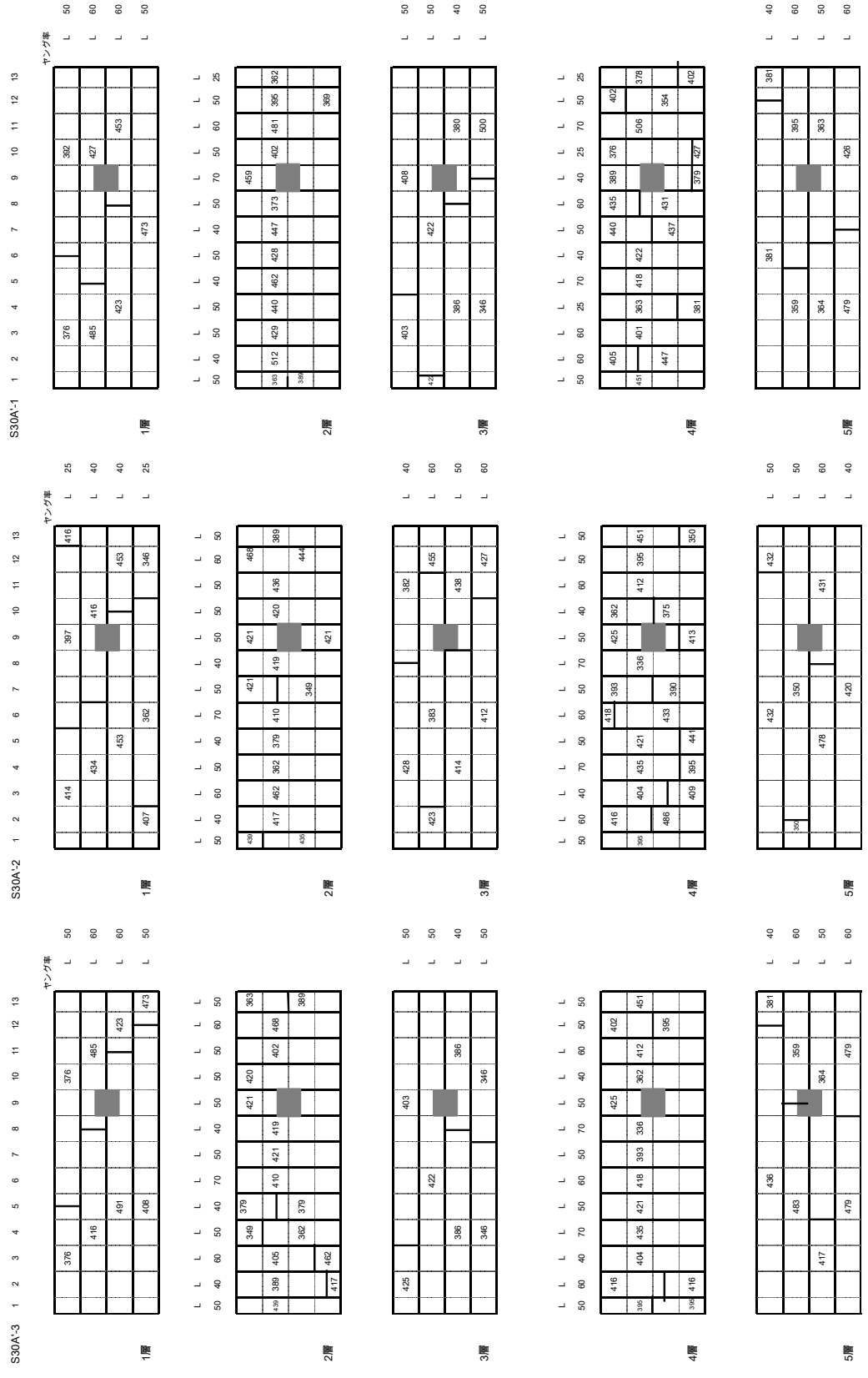


図 4.2-7 S30A'1-3 ヤング係数と密度の記録

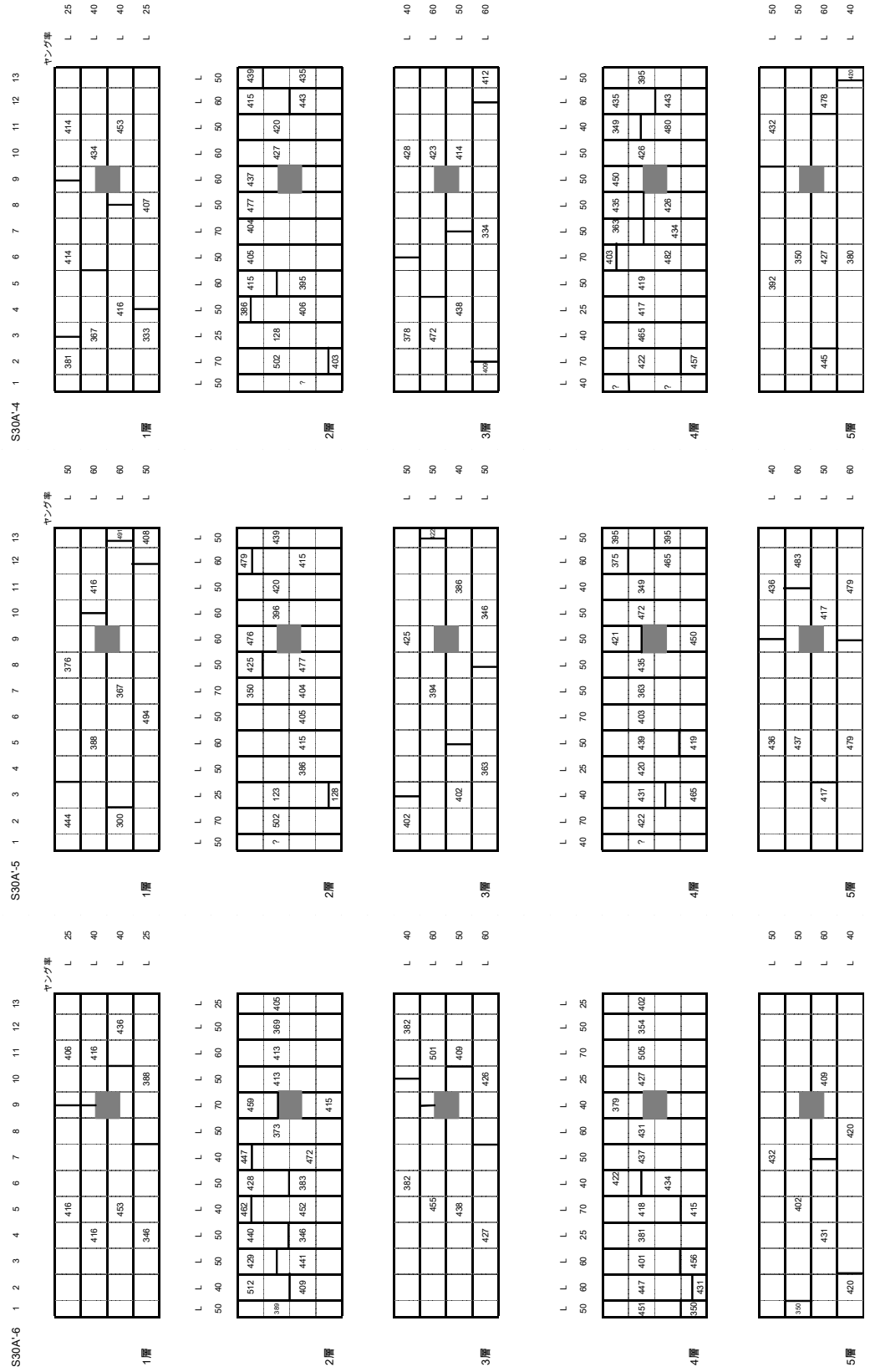


図 4.2-8 S30A'-4-6 ヤング係数と密度の記録

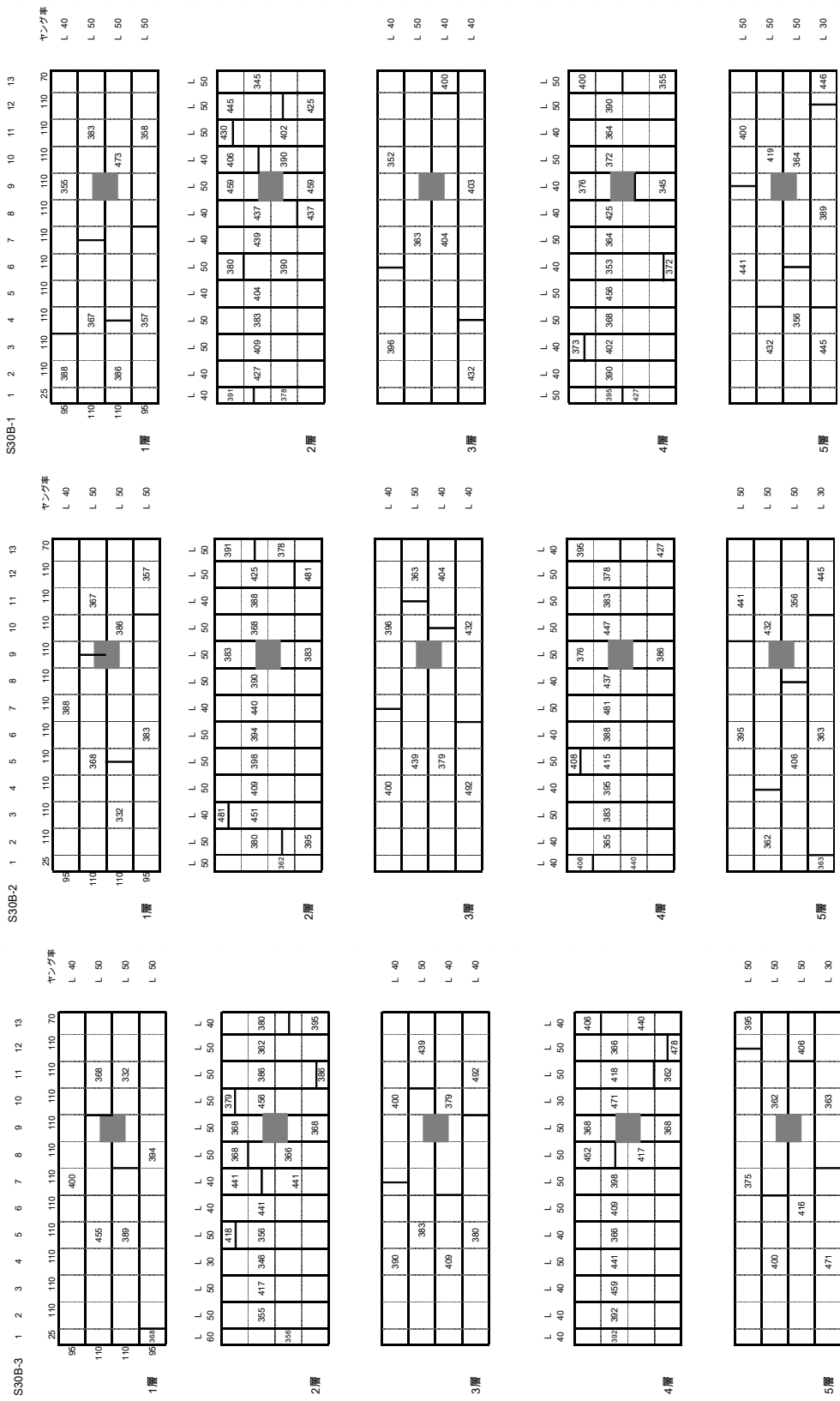


図 4.2-9 S30B1-3 ヤング係数と密度の記録



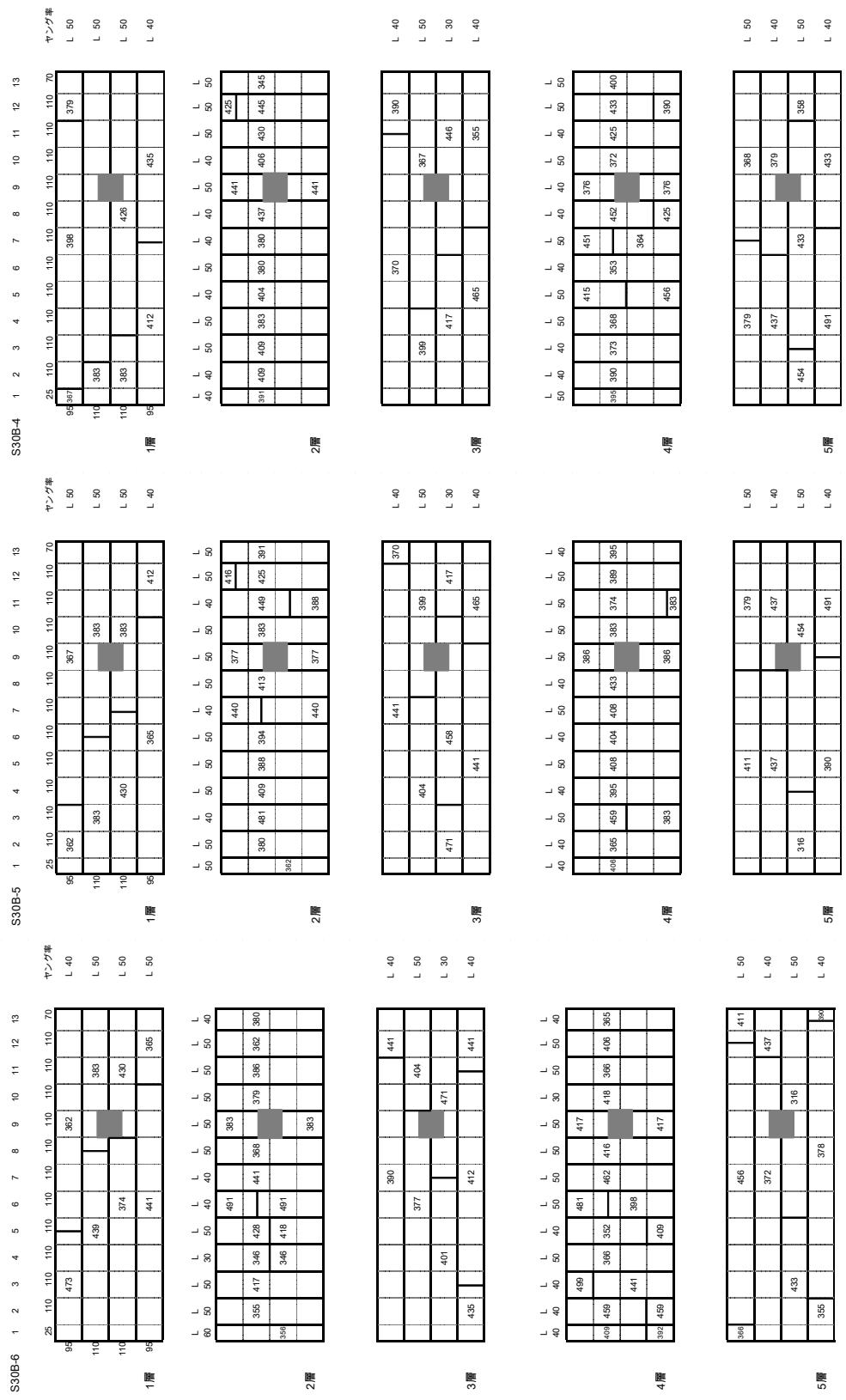


図 4.2-10 S30B4-6 ヤング係数と密度の記録

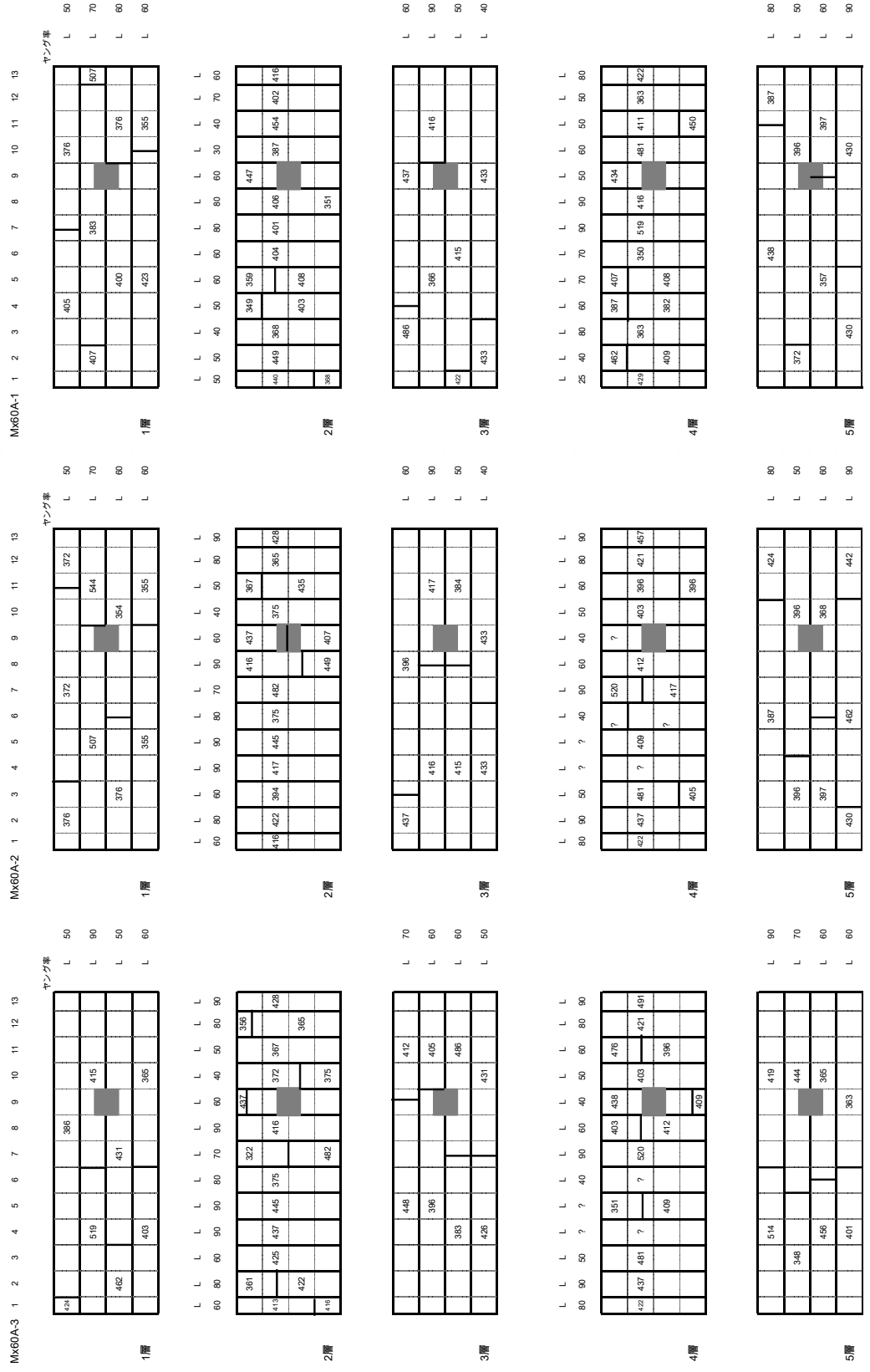


図 4.2-11 Mx60A1-3 ヤング係数と密度の記録

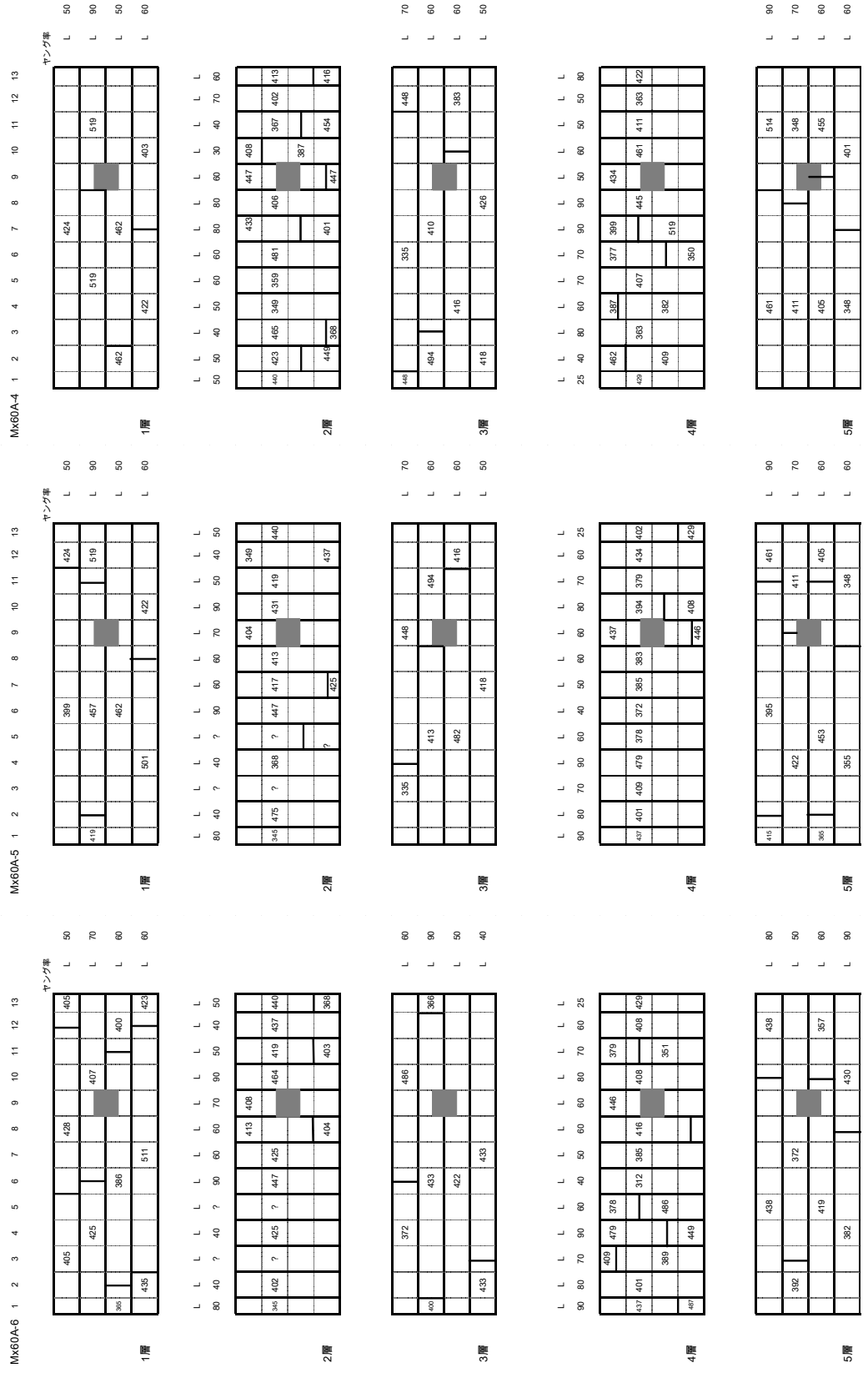


図 4.2-12 Mx60A4-6 ヤング係数と密度の記録

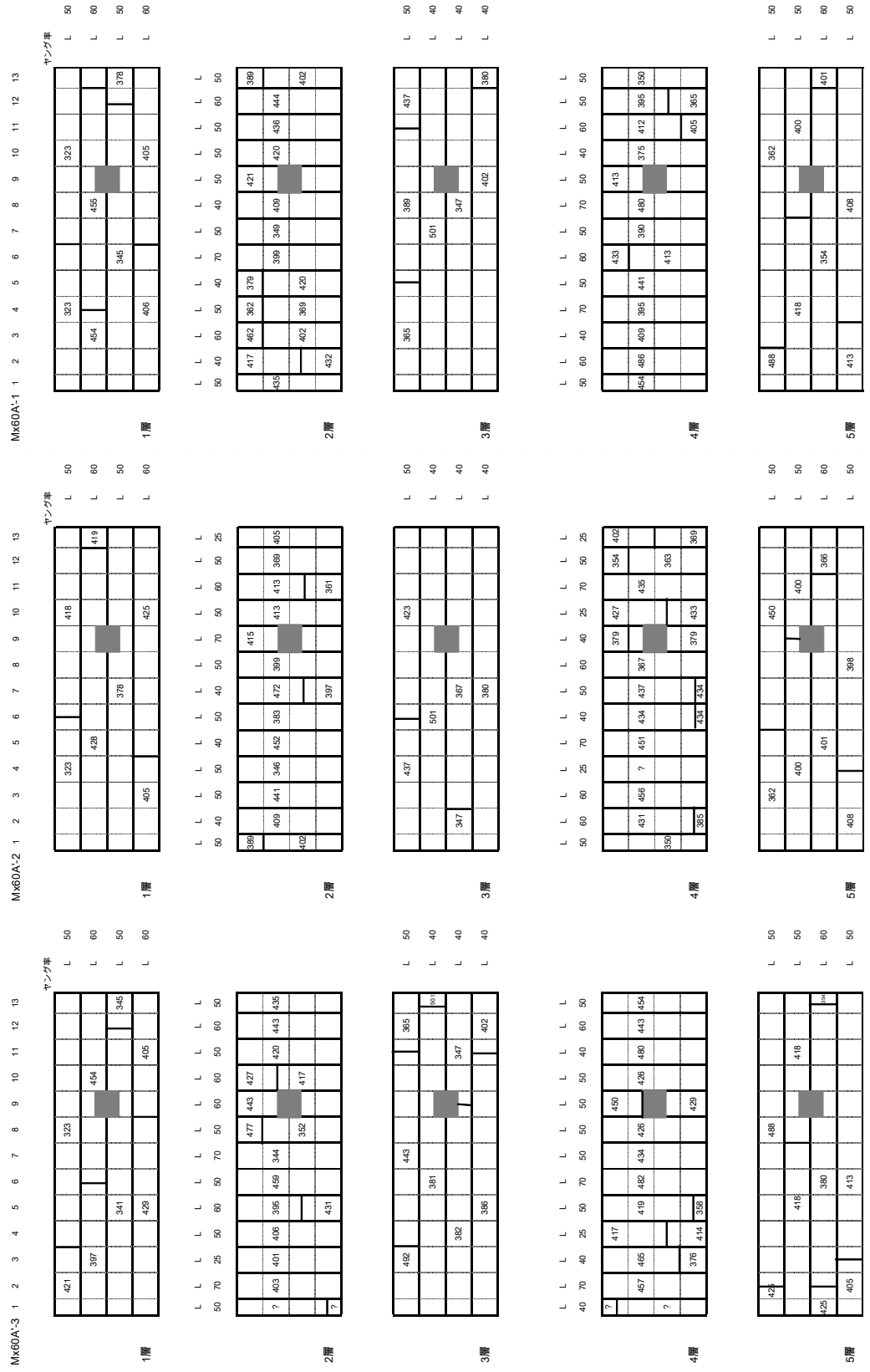


図 4.2-13 Mx60A'1-3 ヤング係数と密度の記録

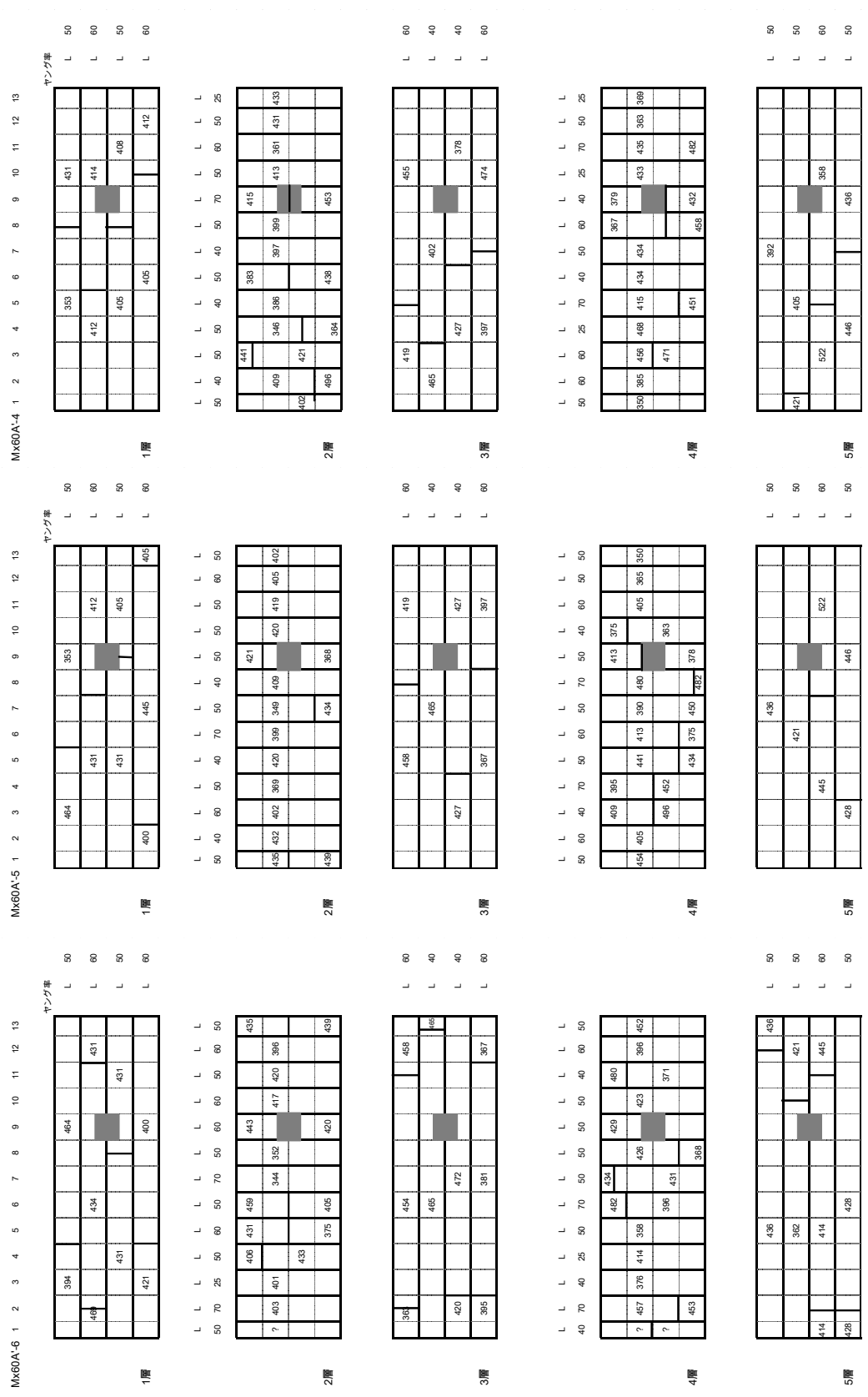


図 4.2-9 Mx60A'4-6 ヤング係数と密度の記録

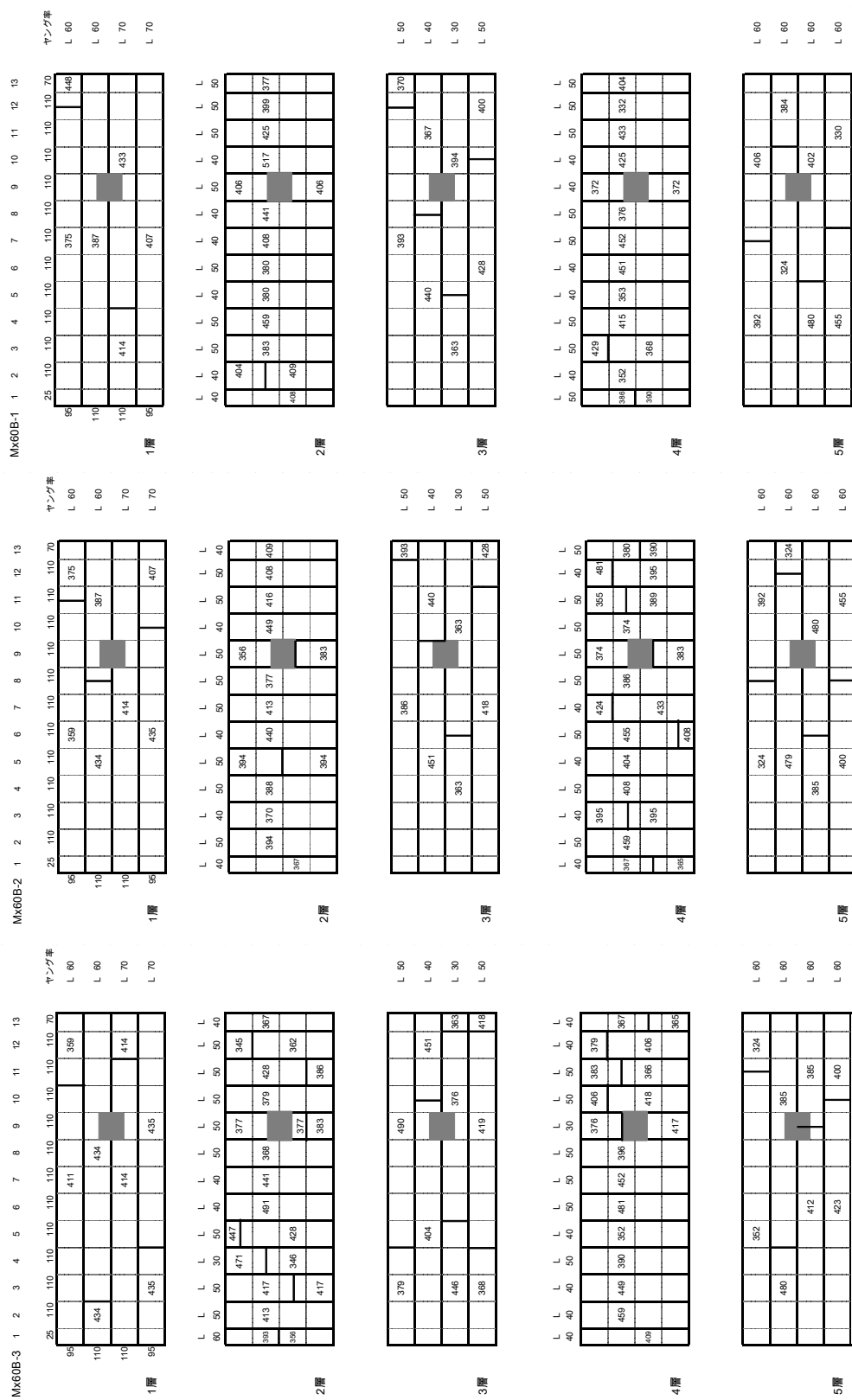


図 4.2-10 Mx60B1-3 ヤング係数と密度の記録

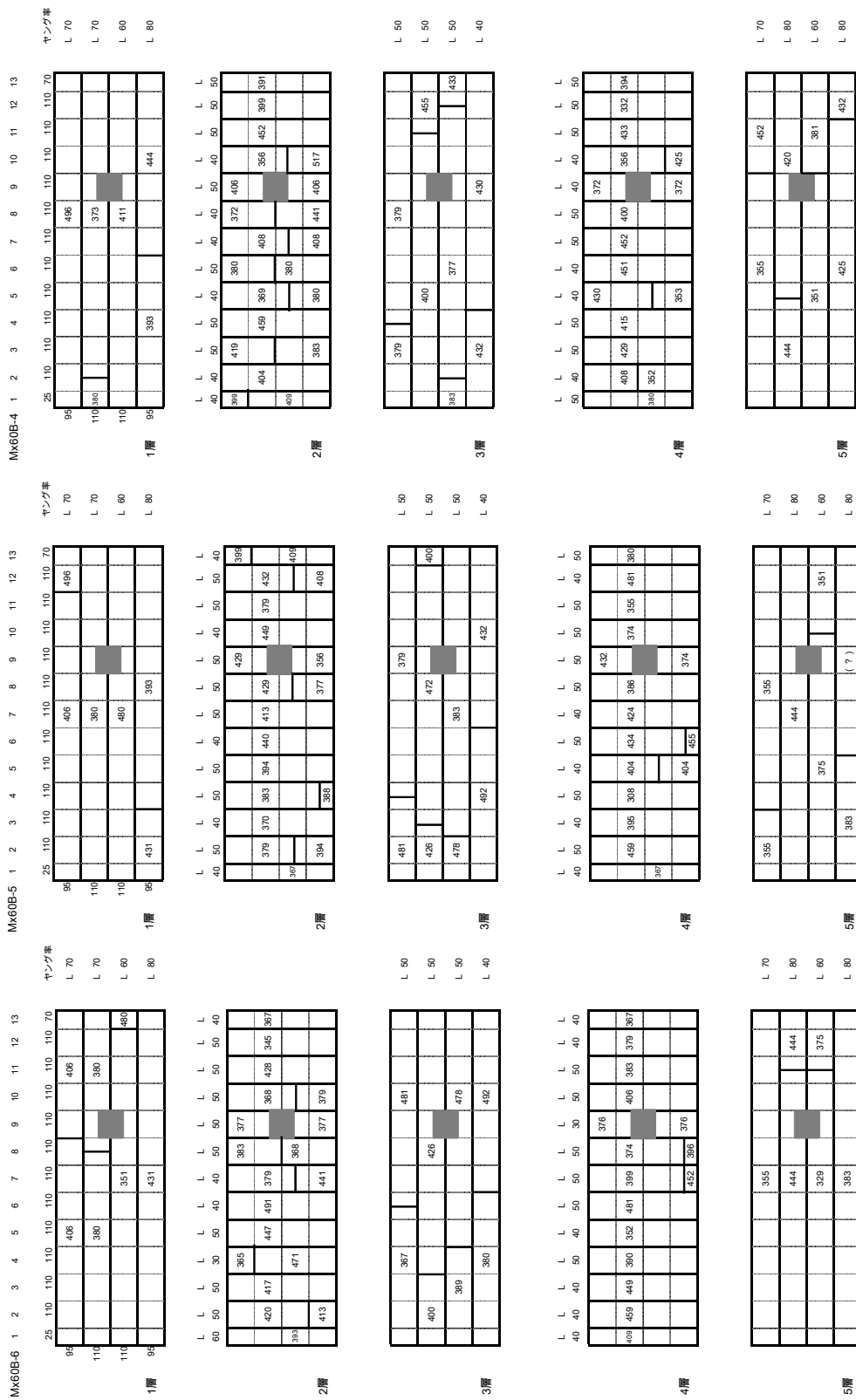


図 4.2-11 Mx60B4-6 ヤング係数と密度の記録

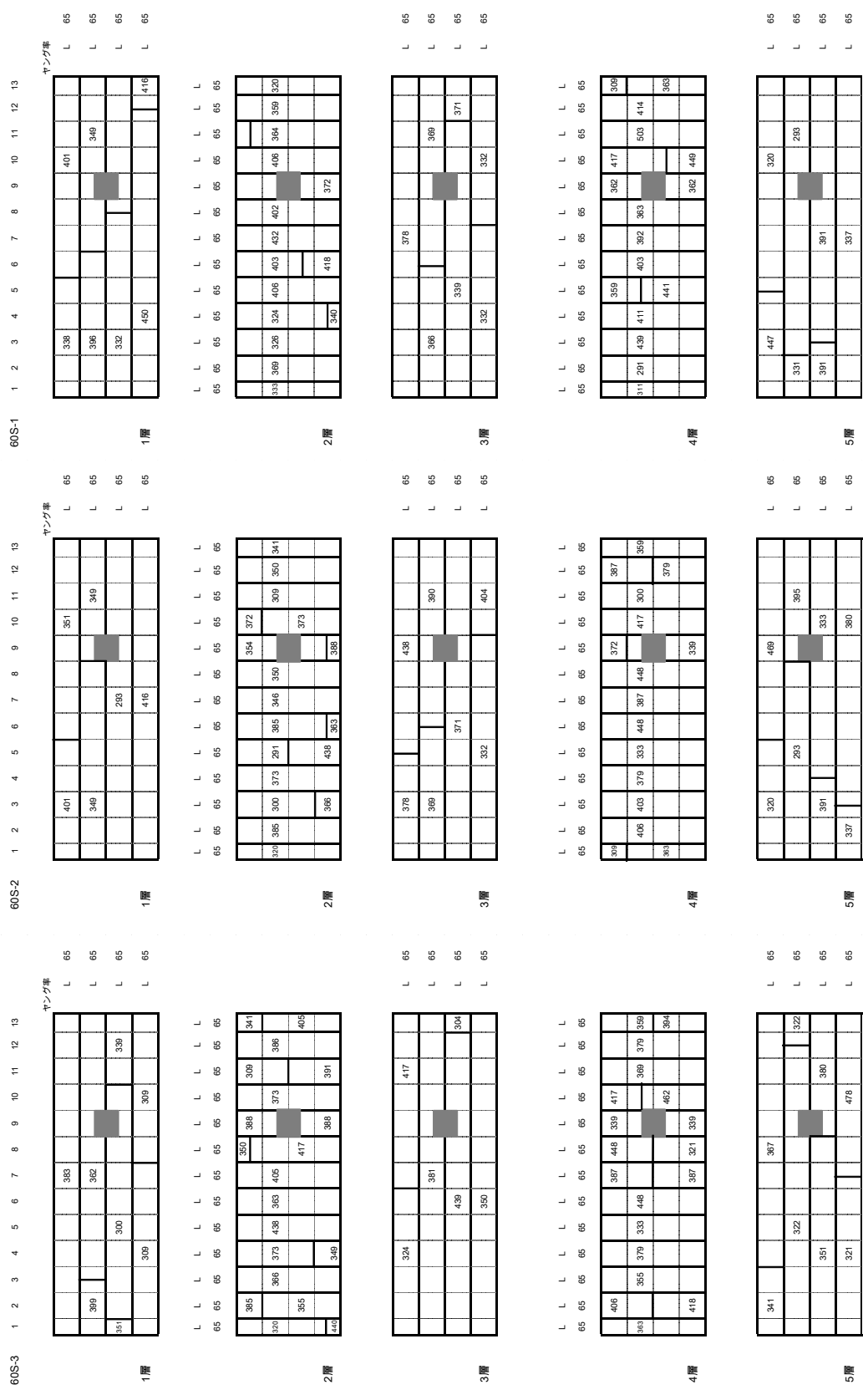


図 4.2-12 60S1-3 ヤング係数と密度の記録



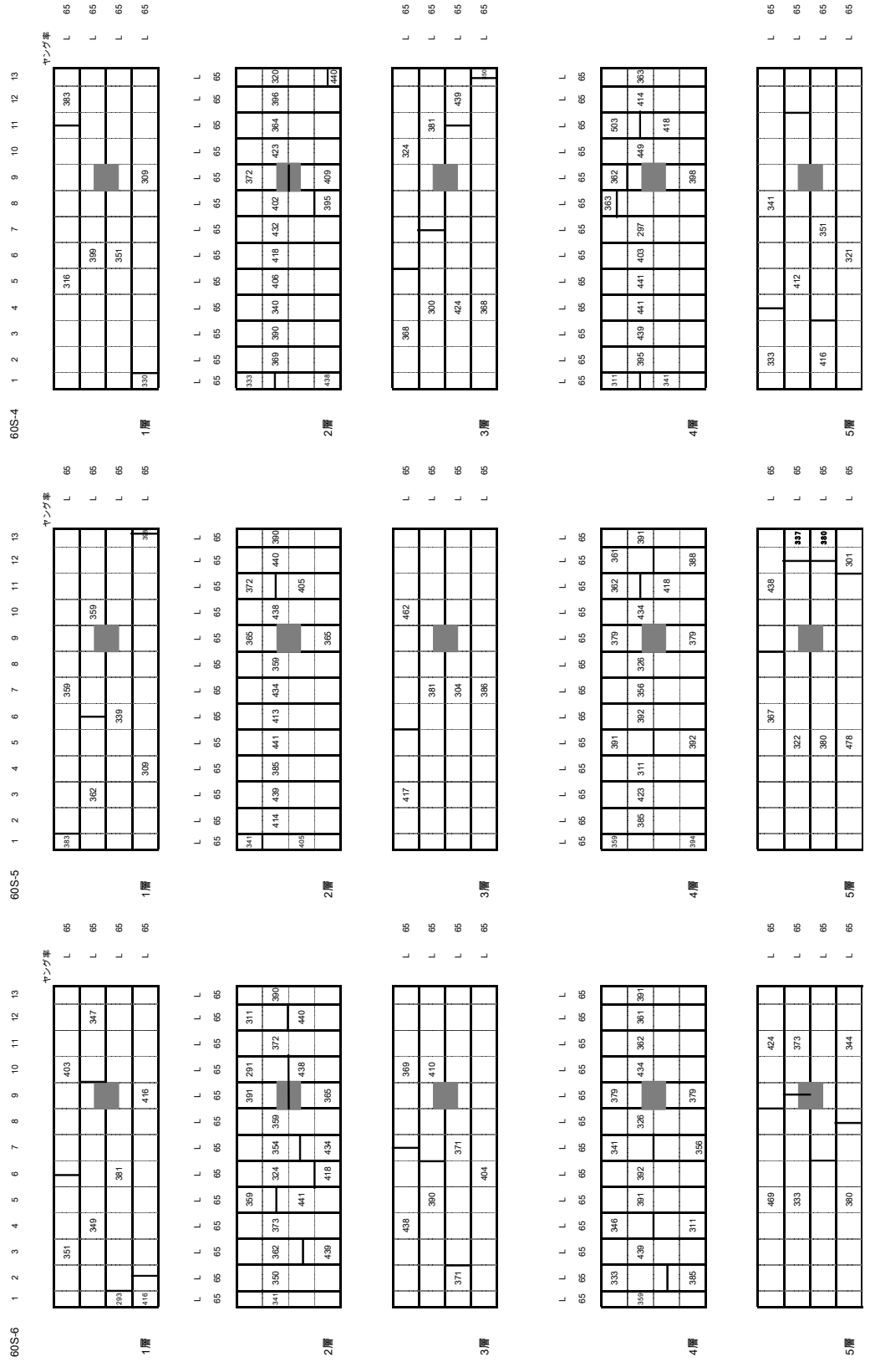


図 4.2-13 60S4-6 ヤング係数と密度の記録

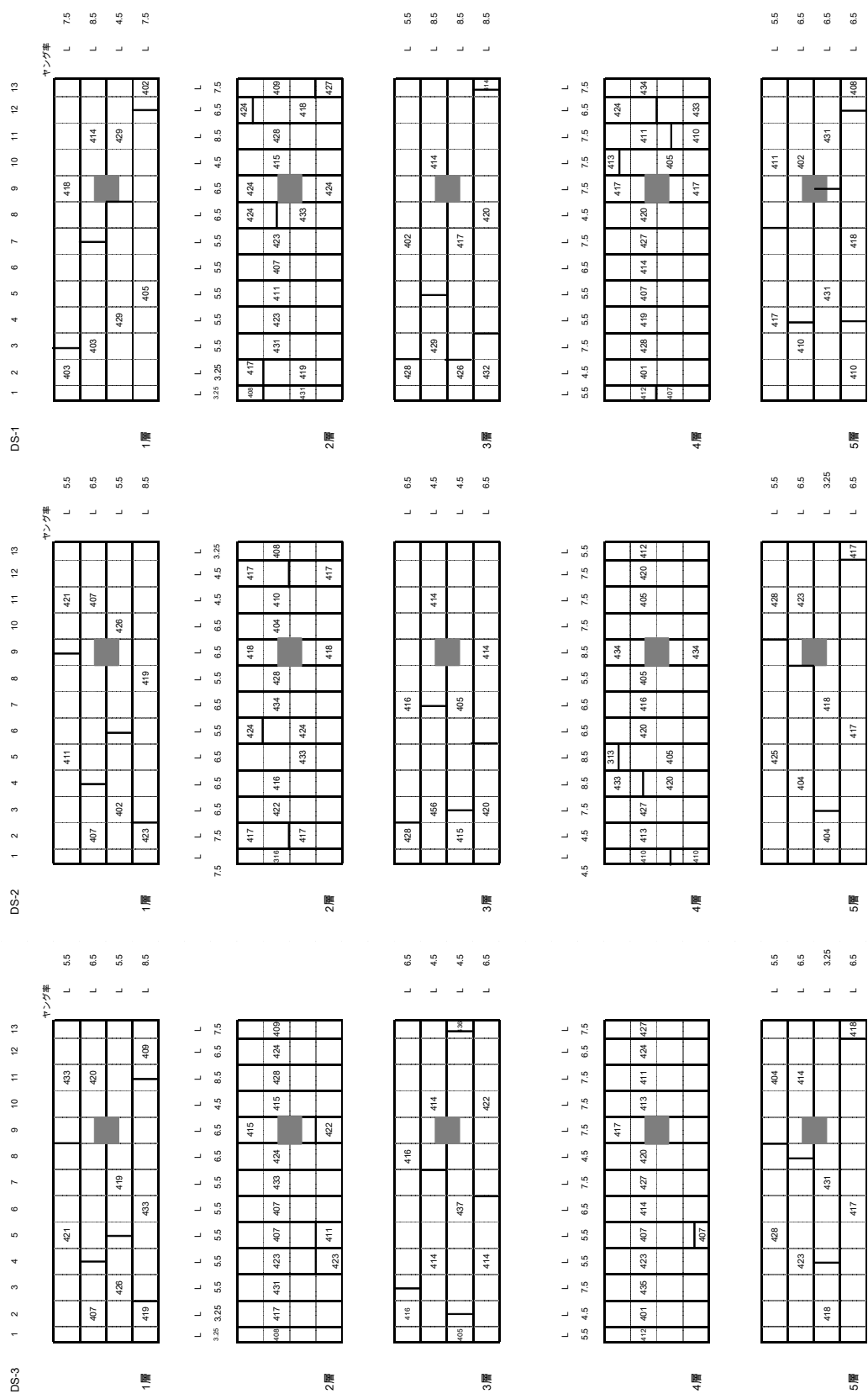


図 4.2-14 DS1-3 ヤング係数と密度の記録

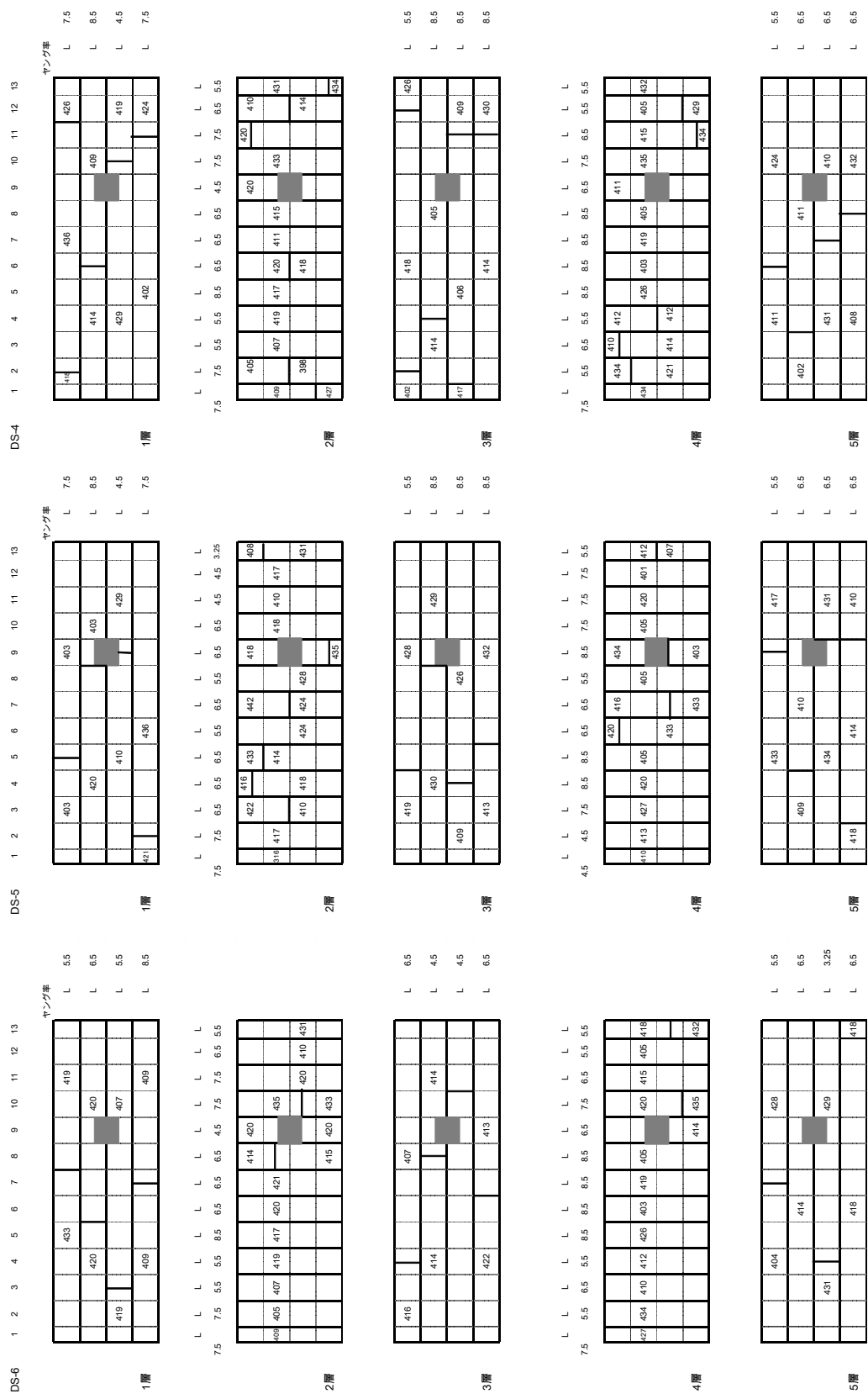


図 4.2-15 DS4-6 ヤング係数と密度の記録

## 2)試験体の密度及び含水率

試験体 1 体あたりの密度及び含水率を表 4.2-5 に示す。意図せず、60S のみ全般的に密度が低い結果となった。なお、含水率はハンディタイプの高周波含水率計を用いて計測している。

表 4.2-5 引きボルト試験体の木材の密度、含水率

試験体	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	試験体	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
S30A	-1	420	Mx60A	-1	410
	-2	420		-2	420
	-3	430		-3	420
	-4	430		-4	430
	-5	430		-5	430
	-6	430		-6	420
	平均値	427		13.3	平均値
S30A	-7	400	Mx60A	-7	410
	-8	400		-8	400
	-9	400		-9	400
	-10	420		-10	410
	-11	410		-11	400
	-12	400		-12	390
	平均値	405		11.1	平均値
S30A'	-1	420	Mx60A'	-1	410
	-2	420		-2	410
	-3	420		-3	410
	-4	420		-4	410
	-5	420		-5	430
	-6	420		-6	420
	平均値	420		13.5	平均値
S30B	-1	400	Mx60B	-1	400
	-2	410		-2	410
	-3	400		-3	410
	-4	410		-4	410
	-5	420		-5	410
	-6	410		-6	400
	平均値	408		13.1	平均値
60S	-1	380	DS	-1	410
	-2	380		-2	410
	-3	380		-3	410
	-4	390		-4	410
	-5	390		-5	410
	-6	390		-6	410
	平均値	385		9.3	平均値

## (3)試験体の加工

試験体の加工は、座金やナットを納める角孔の加工→木口からのボルト孔開けの順になる。角孔はドリルを使って四角形の頂点部分に丸孔を開けた後、それらを結ぶようにして四面を切断する(写真 4.2-1)。その後角を取って整形する。通し孔は写真 4.2-2 のとおり孔開けを行う。LSB や GIR 接合にも共通する問題として、節等によりボルト孔の精度を出すのが困難である。以下、5 章及び 6 章における引きボルト接合についても同様の方法で製造されている。



写真 4.2-1 角孔加工後



写真 4.2-2 ボルト孔加工の様子(広島河本組)

### 4.3 試験方法

試験方法を図 4.3-1 に示す。

試験体は、両ねじボルト M27（強度区分 10.9）と厚さ 30mm の引きボルト用座金を用いて鉄骨架台に緊結した。ナットの締め付けは、レンチで固く締め付けた後、一度緩めてから、5N・m で締め付けた。変位の計測は 2 台の変位計を用い、パネルの軸芯前後面で絶対変位を計測した。測定される変位には、金物の変形、材料の割れやめり込みによる変形等も含んだものとした。繰り返し履歴は全ての試験体で同一とし、既報<sup>4)</sup>の試験結果より降伏変位  $\delta y=2\text{mm}$  として、その 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16 倍の順に一方向繰り返し加力を行い、最大荷重に達した後、変位計の測定限度または接合部の機能が失われる(例えばボルトが外れる等)まで加力した。なお、加力速度は、概ね 2 mm/min 程度とした。

試験は(公財)日本住宅・木材技術センター発行「木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008年版)」<sup>59)</sup>に準じて行った。

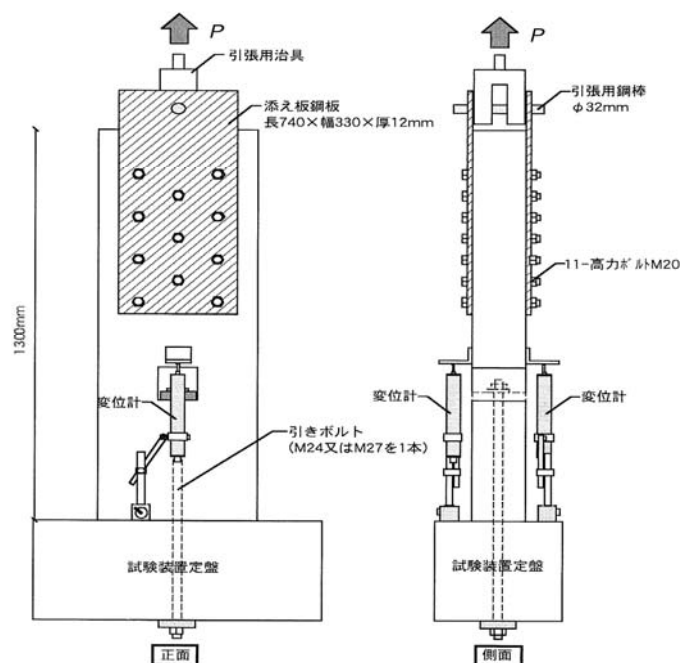


図 4.3-1 試験方法図

#### 4.4 試験結果

各試験体の荷重－変位包絡線を図 4.4-1～図 4.4-8 に示す。破壊性状は写真 4.4-1～写真 4.4-28 に示すとおりである。

主な破壊性状は試験体の種類による大きな違いはなく、座金下部の木部でめり込みが進展し(写真 4.4-3、写真 4.4-8、写真 4.4-9、写真 4.4-19、写真 4.4-21、写真 4.4-27)、圧縮破壊し、最終的には外層ラミナの積層接着部分がせん断破壊し、残った層で塑性変形する結果となった(写真 4.4-4、写真 4.4-7 等)。まためり込み進展時にボルトが曲げ変形している(写真 4.4-28)。例外は平成 25 年に実施した S30A'-2(写真 4.4-5、写真 4.4-6)、Mx60A-1(写真 4.4-11)、60S-2(写真 4.4-23、写真 4.4-24)、60S-3 の 4 体で、降伏前あるいは降伏後に角穴の横の木部の引張破断により脆性的な破壊性状となった。荷重-変位曲線を比較すると弾性域の剛性にはほとんど違いが見られないが、平成 26 年度に実施した試験体の方が降伏後の荷重と変形性能のばらつきが少ないという結果になった(例えば図 4.4-1 の S30A や図 4.4-4 の Mx60A)。

特性値の算出は、文献<sup>7)</sup>に記載されている完全弾塑性モデルによって各試験体の特性値を算出した。各試験体を特性値で比較した結果を図 4.4-9～図 4.4-12 に示す。最大荷重、降伏耐力を比較すると、ラミナの密度範囲を管理した DS が突出して高い結果となった。異等級構成と同一等級構成を比較すると外層ラミナの曲げヤング係数の高い異等級構成の方が若干高くなる傾向にあるが、A 種構成と B 種構成に明確な差はなく、むしろヤング係数のばらつきが少ない B 種よりも A 種の方が最大荷重、降伏耐力のばらつきが少なく、5% 下限値が大きくなるという結果となった。

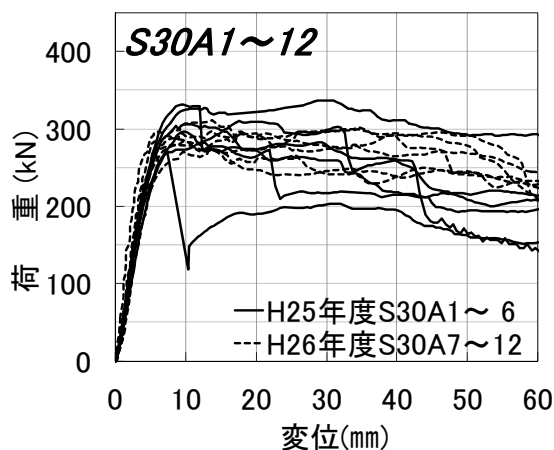


図 4.4-1 S30A1～12 の荷重変位包絡線

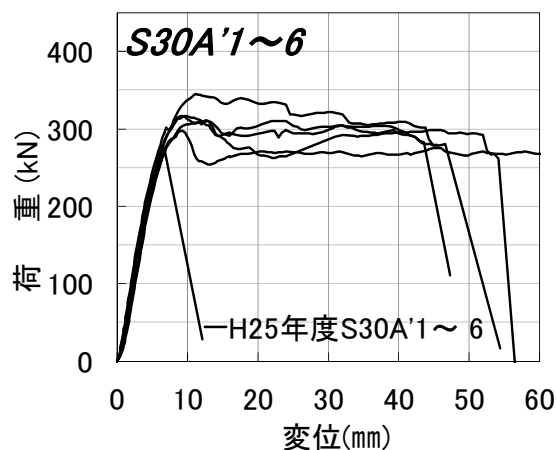


図 4.4-2 S30A'1～6 の荷重変位包絡線

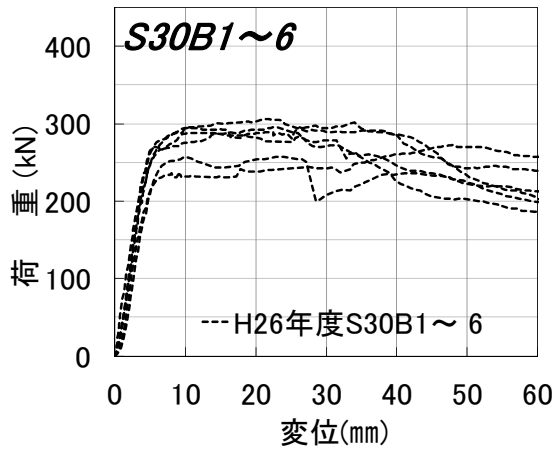


図 4.4-3 S30B1~6 の荷重変位包絡線

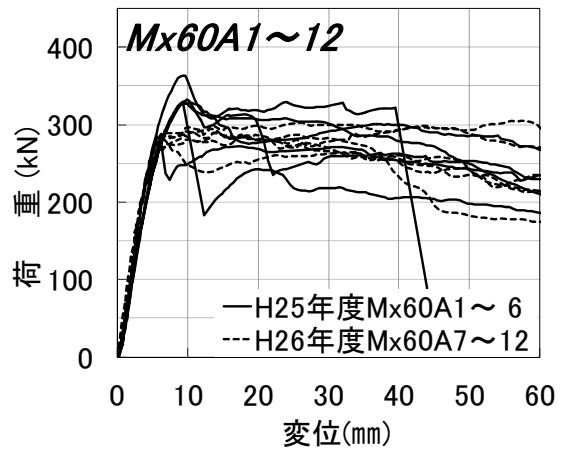


図 4.4-4 Mx60A1~12 の荷重変位包絡線

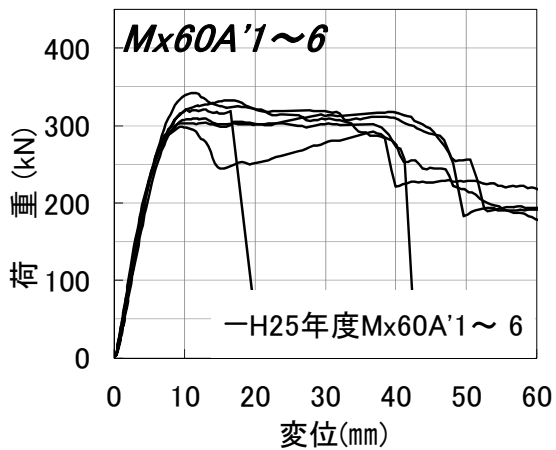


図 4.4-5 Mx60A'1~6 の荷重変位包絡線

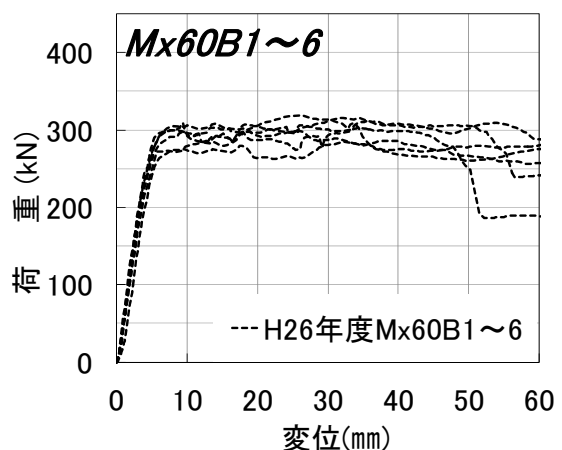


図 4.4-6 Mx60B1~6 の荷重変位包絡線

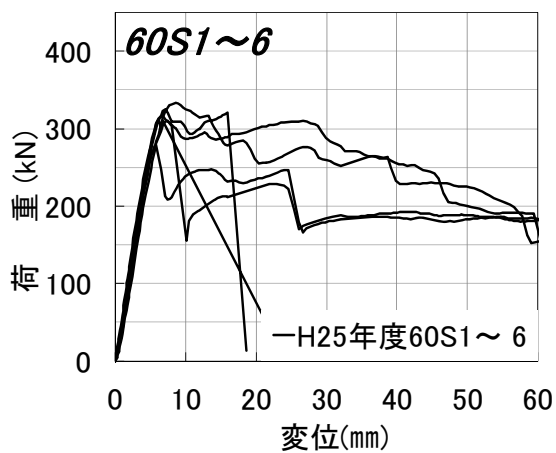


図 4.4-7 60S1~6 の荷重変位包絡線

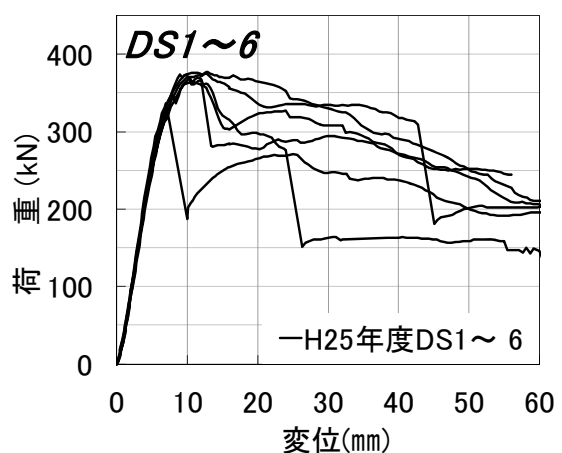


図 4.4-8 DS1~6 の荷重変位包絡線

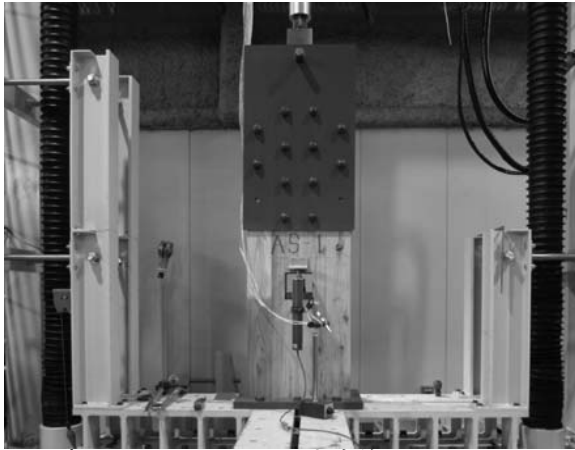


写真 4.4-1 S30A-1 試験前



写真 4.4-2 S30A-1 試験後



写真 4.4-3 S30A-1 座金下部の  
めり込み



写真 4.4-4 S30A-1 積層接着面のせん断木部  
破壊





写真 4.4-5 S30A'-2 引張破壊

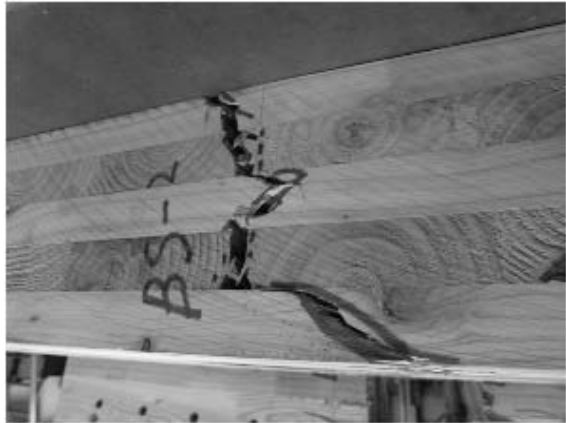


写真 4.4-6 S30A'-2 引張破壊

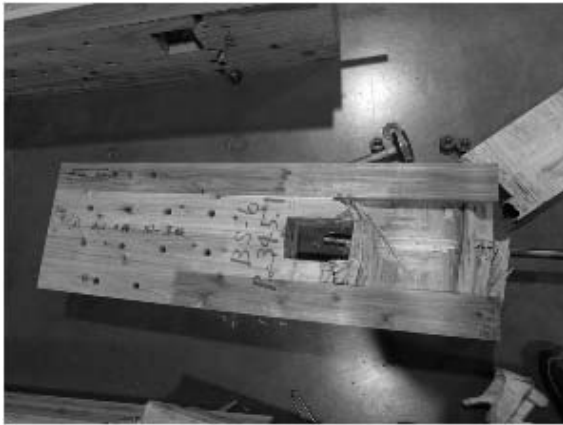


写真 4.4-7 S30A'-6 積層接着面のせん断  
木部破壊



写真 4.4-8 S30A'-6 座金下部のめり込み  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 4.4-9 S30B-2 座金下部のめり込み



写真 4.4-10 S30B-2 積層接着面のせん断  
木部破壊



写真 4.4-11 Mx60A-1  
積層接着面のせん断と  
引張 (FJ) の複合的破壊 (表)



写真 4.4-12 Mx60A-1  
積層接着面のせん断木部  
破壊 (裏)



写真 4.4-13 Mx60A-2  
積層接着面のせん断木部  
破壊



写真 4.4-14 Mx60A'-2 積層接着面のせん  
断木部破壊



写真 4.4-15 Mx60A'-2 積層接着面のせん断  
木部と引張の複合的破壊



写真 4.4-16 Mx60B-4 積層接着面のせん断木部破壊



写真 4.4-17 Mx60B-5 積層接着面のせん断木部と引張の複合的破壊



写真 4.4-18 Mx60B-6 積層接着面のせん断木部破壊



写真 4.4-19 Mx60B-6 座金下部のめり込み



写真 4.4-20 60S-1 積層接着面のせん断木部破壊



写真 4.4-21 60S-1 座金下部のめり込み



写真 4.4-22 60S-2 積層接着面の引張とせん断木部の複合的破壊

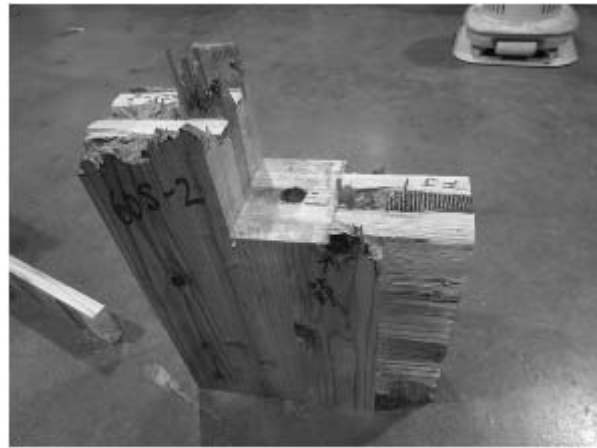


写真 4.4-23 60S-2 引張破壊断面 FJ(フィンガージョイント)部分含む



写真 4.4-24 DS-2 積層接着面のせん断  
木部破壊



写真 4.4-25 DS-2 積層接着面のせん断  
木部破壊



写真 4.4-26 DS-5 積層接着面のせん断  
木部破壊

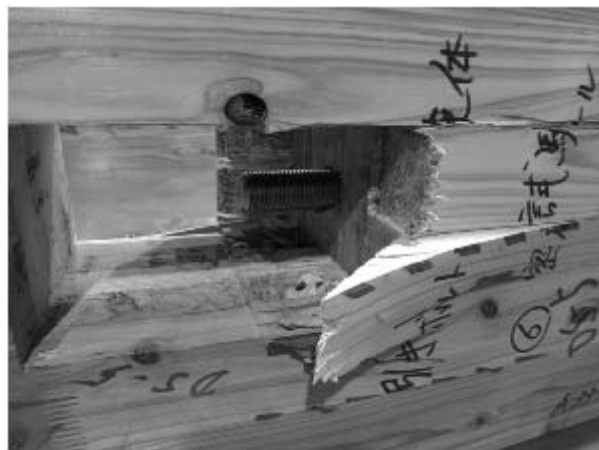


写真 4.4-27 DS-5 座金下部のめり込み



写真 4.4-28 ボルトの曲がり

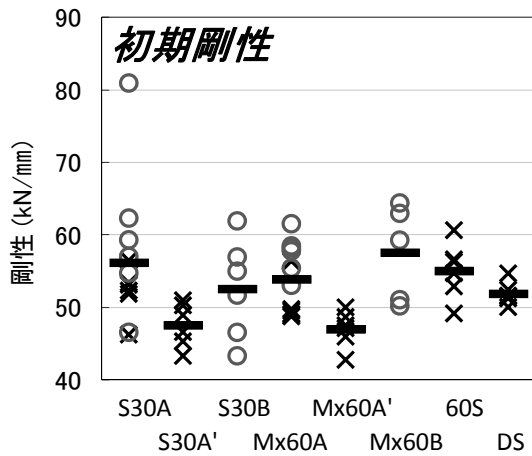


図 4.4-9 各試験体の初期剛性の比較

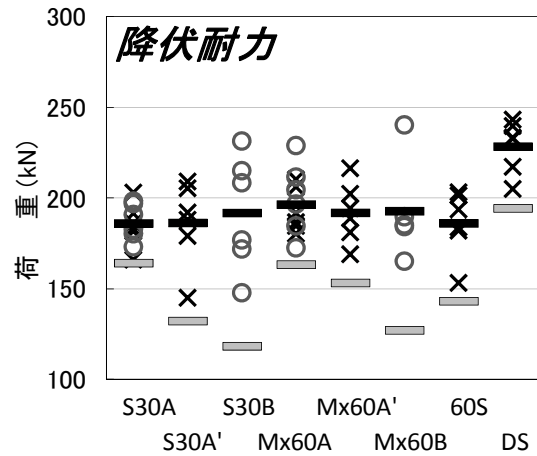


図 4.4-10 各試験体の降伏耐力の比較

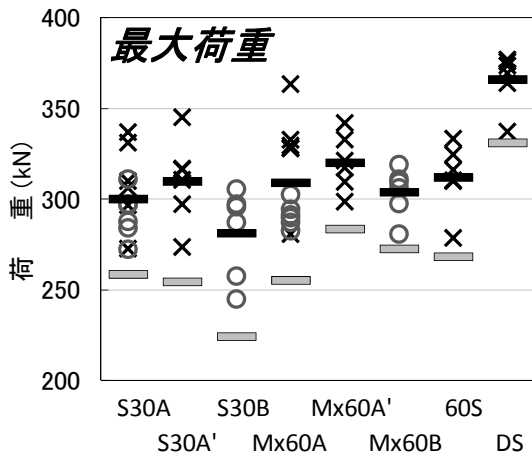


図 4.4-11 各試験体の最大荷重の比較

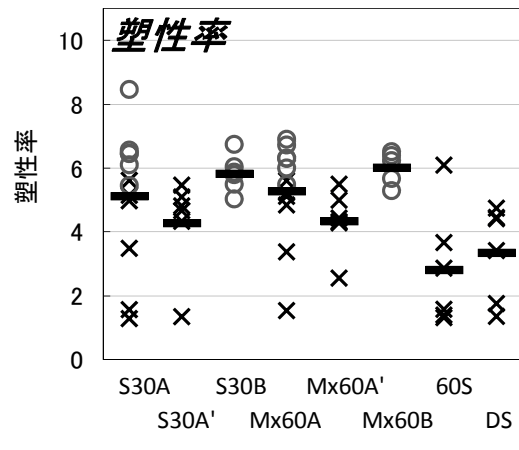


図 4.4-12 各試験体の塑性率の比較

図 4.4-9～図 4.4-12 の凡例  
 ※ × :H25 年度実施    ○ :H26 年実施  
 ■ :平均値            □ :5%下限値

#### 4.5 材料物性と特性値の関係

各試験体のラミナごとの曲げヤング係数と密度の値と、実験より得られた各種特性値を比較した。なお、曲げヤング係数と密度の値は、試験体全体の値ではなく、試験結果に影響を与える図 4.5-1 に示す斜線部分の値とした。この斜線部分のヤング係数と密度のラミナ単位の記録は表 4.5-1～表 4.5-6 のとおりである。これを試験体 1 仕様 6 体ごとのラミナの曲げヤング係数と密度の頻度分布としたものを図 4.5-2～図 4.5-21 に示す。図 4.5-2、図 4.5-3、図 4.5-6、図 4.5-7 の曲げヤング係数の試験体記号 Mx60A-1～6 と Mx60A-7～12、S30A-1～6 と S30A-7～12 は、共に同じ規格であるが、製造時期が異なるため、外層・内層に配分するラミナの等級に差異がある（ただし、全体としての平均値及び標準偏差にはあまり差異はない）。また、内層ラミナの上限值が 6.0Gpa である Mx60B-1～6、S30B-1～6 は内層と外層の棲み分けがはっきりとした特徴的な分布となっている。図 4.5-12～図 4.5-21 の密度については、平均値に着目すると 60S が 376kg/m<sup>3</sup>、それ以外の試験体が概ね 400～410 kg/m<sup>3</sup> という結果となった。ただし、平均値が同じであっても極端に密度の低いラミナが存在しない DS は、他の試験体よりも降伏・破断しにくいいため、降伏耐力や最大荷重が他よりも高くなっていると思われる。それに対して平均密度は低い、密度の低いラミナの配合率が大きい 60S 試験体は他の試験体と比べて降伏耐力、最大荷重及び初期剛性に大きな差は見られなかった。

曲げヤング係数および密度と各種特性値とを比較した結果を図 4.5-21～図 4.5-27 に示す。曲げヤング係数と降伏耐力及び最大荷重との間には全く相関が見られないが、初期剛性は僅かに比例関係が見られた。密度と降伏耐力及び初期剛性との間には全く相関が見られないが、最大荷重には僅かに比例関係が見られた。

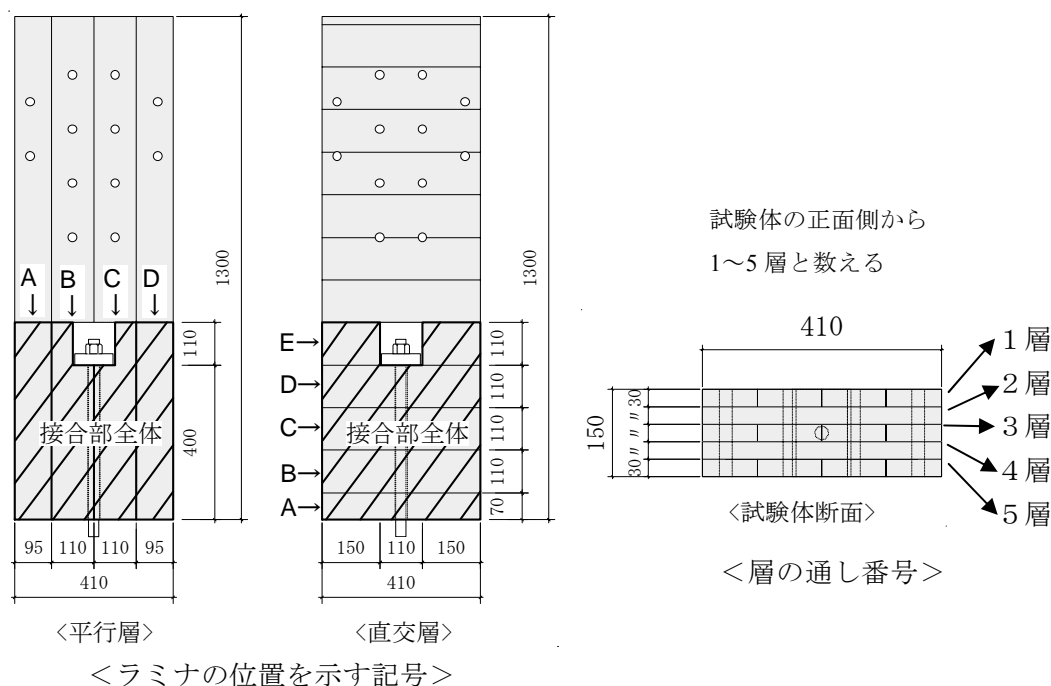


図 4.5-1 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分

表 4.5-1 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分のヤング係数 記録(1)

		S30A					S30A					S30A'					S30B													
	試体の記号	層の通し番号					試体の記号	層の通し番号					試体の記号	層の通し番号					試体の記号	層の通し番号										
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5						
1	A	9.00	5.00	9.00	3.00	4.00	A	6.50	4.50	6.50	7.50	7.50	A	5.00	3.00	5.00	3.00	6.00	A	5.50	5.50	4.50	5.50	3.30						
	B	7.00	4.00	8.00	6.00	9.00	B	6.50	7.50	7.50	5.50	5.50	B	6.00	5.00	4.00	5.00	5.00	B	5.50	5.50	4.50	5.50	5.50						
	C	3.00	5.00	6.00	7.00	7.00	C	5.50	5.50	4.50	6.50	7.50	C	6.00	6.00	5.00	7.00	6.00	C	5.50	5.50	5.50	4.50	5.50						
	D	6.00	9.00	3.00	8.00	8.00	D	7.50	6.50	5.50	6.50	8.50	D	5.00	5.00	5.00	3.00	4.00	D	4.50	4.50	4.50	5.50	5.50						
	E	7.00			6.00		E	6.50			5.50		E	7.00			4.00		E	5.50			5.50							
	層毎の平均	6.25	6	6.5	6	7	層毎の平均	6.5	6.1	6	6.3	7.25	層毎の平均	5.5	5.2	4.75	4.4	5.25	層毎の平均	5.25	5.3	4.75	5.1	4.95						
平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング											
	6.4					2.48					6.4					4.38					5.1					3.88				
2	A	9.00	9.00	9.00	9.00	4.00	A	6.50	6.50	6.50	7.50	7.50	A	3.00	5.00	6.00	5.00	4.00	A	5.50	5.50	4.50	4.50	3.30						
	B	7.00	8.00	8.00	8.00	9.00	B	6.50	7.50	7.50	3.30	5.50	B	4.00	6.00	5.00	5.00	6.00	B	5.50	5.50	4.50	5.50	5.50						
	C	3.00	4.00	6.00	5.00	7.00	C	5.50	3.30	4.50	6.50	7.50	C	4.00	5.00	6.00	6.00	5.00	C	5.50	4.50	5.50	5.50	5.50						
	D	6.00	4.00	3.00	5.00	8.00	D	7.50	6.50	5.50	5.50	8.50	D	3.00	5.50	4.00	4.00	5.00	D	4.50	5.50	4.50	5.50	5.50						
	E	6.00			4.00		E	5.50			4.50		E	5.00			5.00		E	5.50			5.50							
	層毎の平均	6.25	6.4	6.5	6.4	7	層毎の平均	6.5	5.86	6	5.46	7.25	層毎の平均	3.5	5.3	5.25	5	5	層毎の平均	5.25	5.3	4.75	5.3	4.95						
平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング											
	6.5					2.47					6.2					3.48					4.8					3.05				
3	A	9.00	6.00	9.00	8.00	4.00	A	6.50	6.50	6.50	5.50	7.50	A	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00	A	5.50	4.50	4.50	4.50	3.30						
	B	7.00	7.00	8.00	5.00	9.00	B	6.50	6.50	7.50	5.50	5.50	B	6.00	6.00	4.00	5.00	5.00	B	5.50	5.50	4.50	5.50	5.50						
	C	3.00	4.00	6.00	5.00	7.00	C	5.50	5.50	4.50	8.50	7.50	C	6.00	5.00	5.00	6.00	6.00	C	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50						
	D	6.00	3.00	3.00	6.00	8.00	D	7.50	5.50	5.50	8.50	8.50	D	5.00	5.50	5.00	4.00	4.00	D	4.50	5.50	4.50	3.30	5.50						
	E	6.00			5.00		E	5.50			4.50		E	5.00			5.00		E	5.50			5.50							
	層毎の平均	6.25	5.2	6.5	5.8	7	層毎の平均	6.5	5.9	6	6.5	7.25	層毎の平均	5.5	5.3	4.75	5	5.25	層毎の平均	5.25	5.3	4.75	4.86	4.95						
平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング											
	6.1					2.33					6.5					4.08					5.2					3.93				
4	A	4.00	9.00	4.00	9.00	5.00	A	4.50	4.50	3.30	7.50	6.50	A	3.00	5.00	6.00	5.00	4.00	A	4.50	5.50	4.50	5.50	5.50						
	B	6.00	8.00	6.00	8.00	3.00	B	7.50	7.50	5.50	5.50	6.50	B	4.00	6.00	5.00	6.00	6.00	B	5.50	5.50	3.50	5.50	4.50						
	C	6.00	5.00	6.00	6.00	9.00	C	7.50	5.50	6.50	6.50	6.50	C	4.00	6.00	6.00	4.00	5.00	C	5.50	5.50	5.50	4.50	5.50						
	D	4.00	4.00	7.00	5.00	5.00	D	4.50	6.50	8.50	6.50	5.50	D	3.00	6.00	4.00	5.00	5.00	D	5.50	4.50	4.50	5.50	4.50						
	E	6.00			4.00		E	6.50			5.50		E	6.00			5.00		E	5.50			4.50							
	層毎の平均	5	6.4	5.75	6.4	5.5	層毎の平均	6	6.1	5.95	6.3	6.25	層毎の平均	3.5	5.8	5.25	5	5	層毎の平均	5.25	5.3	4.5	5.1	5						
平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング											
	5.8					2.27					6.1					3.75					4.9					3.00				
5	A	4.00	6.00	4.00	8.00	5.00	A	4.50	6.50	3.30	7.50	6.50	A	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00	A	4.50	5.50	4.50	4.50	5.50						
	B	6.00	7.00	6.00	5.00	3.00	B	7.50	7.50	5.50	3.30	6.50	B	6.00	6.00	4.00	6.00	5.00	B	5.50	5.50	3.30	5.50	4.50						
	C	6.00	4.00	6.00	5.00	9.00	C	7.50	3.30	6.50	6.50	6.50	C	6.00	6.00	5.00	4.00	6.00	C	5.50	4.50	5.50	5.50	5.50						
	D	4.00	3.00	7.00	6.00	5.00	D	4.50	6.50	8.50	5.50	5.50	D	5.00	6.00	5.00	5.00	4.00	D	5.50	5.50	4.50	5.50	4.50						
	E	6.00			5.00		E	5.50			4.50		E	6.00			5.00		E	5.50			5.50							
	層毎の平均	5	5.2	5.75	5.8	5.5	層毎の平均	6	5.86	5.95	5.46	6.25	層毎の平均	5.5	5.8	4.75	5	5.25	層毎の平均	5.25	5.3	4.45	5.3	5						
平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング											
	5.4					2.50					5.9					3.01					5.3					3.92				
6	A	4.00	5.00	4.00	3.00	5.00	A	4.50	6.50	3.30	5.50	6.50	A	3.00	3.00	6.00	3.00	4.00	A	4.50	4.50	4.50	4.50	5.50						
	B	6.00	4.00	6.00	6.00	3.00	B	7.50	6.50	5.50	5.50	6.50	B	4.00	5.00	5.00	5.00	6.00	B	5.50	5.50	3.30	5.50	4.50						
	C	6.00	5.00	6.00	7.00	9.00	C	7.50	5.50	6.50	8.50	6.50	C	4.00	6.00	6.00	7.00	5.00	C	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50						
	D	4.00	3.00	7.00	8.00	5.00	D	4.50	5.50	8.50	8.50	5.50	D	3.00	5.00	4.00	3.00	5.00	D	5.50	5.50	4.50	3.30	4.50						
	E	7.00			6.00		E	5.50			4.50		E	7.00			4.00		E	5.50			5.50							
	層毎の平均	5	4.8	5.75	6	5.5	層毎の平均	6	5.9	5.95	6.5	6.25	層毎の平均	3.5	5.2	5.25	4.4	5	層毎の平均	5.25	5.3	4.45	4.86	5						
平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング					平均ヤング	最小値ヤング											
	5.4					2.30					6.2					3.49					4.7					2.23				

※単位：GPa



表 4.5-2 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分のヤング係数 記録(2)

		Mx60A					
	ラミナの記号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
1	A	6.00	6.00	4.00	8.00	9.00	
	B	6.00	7.00	5.00	5.00	6.00	
	C	7.00	4.00	9.00	5.00	5.00	
	D	5.00	3.00	6.00	6.00	8.00	
	E		6.00		5.00		
	層毎の平均	6	5.2	6	5.8	7	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.0		2.94			

		Mx60A					
	ラミナの記号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
7	A	6.50	4.50	5.50	7.50	6.50	
	B	6.50	7.50	4.50	5.50	8.50	
	C	6.50	5.50	7.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	7.50	6.50	7.50	
	E		6.50		5.50		
	層毎の平均	6.5	6.1	6.25	6.3	7.25	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		4.56			

		Mx60A'					
	ラミナの記号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
1	A	6.00	5.00	4.00	5.00	5.00	
	B	5.00	6.00	4.00	5.00	6.00	
	C	6.00	5.00	4.00	6.00	5.00	
	D	5.00	5.50	5.00	4.00	5.00	
	E		5.00		5.00		
	層毎の平均	5.5	5.3	4.25	5	5.25	
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.1		3.79			

		Mx30B					
	ラミナの記号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
1	A	7.50	5.50	5.50	5.50	6.50	
	B	7.50	5.50	3.30	5.50	6.50	
	C	6.50	5.50	4.50	5.50	6.50	
	D	6.50	4.50	5.50	4.50	6.50	
	E		5.50		4.50		
	層毎の平均	7	5.3	4.7	5.1	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.7		3.73			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	9.00	4.00	9.00	9.00
B	6.00	8.00	5.00	8.00	6.00		
C	7.00	5.00	9.00	6.00	5.00		
D	5.00	4.00	6.00	5.00	8.00		
E		6.00		4.00			
層毎の平均	6	6.4	6	6.4	7		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.3		2.96			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.50	6.50	5.50	7.50	6.50
B	6.50	7.50	4.50	3.30	8.50		
C	6.50	3.30	7.50	6.50	6.50		
D	6.50	6.50	7.50	5.50	7.50		
E		5.50		4.50			
層毎の平均	6.5	5.86	6.25	5.46	7.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.2		3.62			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	3.00	4.00	3.00	5.00
B	5.00	5.00	4.00	5.00	6.00		
C	6.00	6.00	4.00	7.00	5.00		
D	5.00	5.00	5.00	3.00	5.00		
E		7.00		4.00			
層毎の平均	5.5	5.2	4.25	4.4	5.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.0		2.74			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	7.50	4.50	5.50	5.50	6.50
B	7.50	5.50	3.30	4.50	6.50		
C	6.50	5.50	4.50	5.50	6.50		
D	6.50	4.50	5.50	5.50	6.50		
E		5.50		5.50			
層毎の平均	7	5.1	4.7	5.3	6.5		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.7		3.73			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	9.00	5.00	9.00	6.00
B	5.00	8.00	6.00	8.00	6.00		
C	9.00	5.00	6.00	6.00	7.00		
D	5.00	4.00	7.00	5.00	9.00		
E		6.00		4.00			
層毎の平均	6.25	6.4	6	6.4	7		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.4		3.22			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.50	6.50	5.50	5.50	6.50
B	6.50	6.50	4.50	5.50	8.50		
C	6.50	5.50	7.50	8.50	6.50		
D	6.50	5.50	7.50	8.50	7.50		
E		5.50		4.50			
層毎の平均	6.5	5.9	6.25	6.5	7.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		4.25			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	5.00	4.00	5.00	5.00
B	5.00	6.00	4.00	6.00	6.00		
C	6.00	5.50	4.00	4.00	5.00		
D	5.00	6.00	5.00	5.00	5.00		
E		6.00		5.00			
層毎の平均	5.5	5.7	4.25	5	5.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.1		3.77			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	7.50	4.50	5.50	4.50	6.50
B	7.50	5.50	3.30	4.50	6.50		
C	6.50	5.50	4.50	5.50	6.50		
D	6.50	5.50	5.50	5.50	6.50		
E		5.50		3.30			
層毎の平均	7	5.3	4.7	4.66	6.5		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.7		3.45			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	8.50	7.50	7.50	4.50	6.50
B	7.50	5.50	6.50	7.50	8.50		
C	7.50	6.50	6.50	5.50	6.50		
D	6.50	6.50	8.50	6.50	7.50		
E		5.50		6.50			
層毎の平均	7.5	6.3	7.25	6.1	7.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.9		4.88			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	3.00	6.00	3.00	5.00
B	5.00	5.00	4.00	5.00	6.00		
C	6.00	6.00	4.00	7.00	5.00		
D	5.00	5.00	6.00	3.00	5.00		
E		7.00		4.00			
層毎の平均	5.5	5.2	5	4.4	5.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.1		2.84			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	8.50	5.50	4.50	5.50	8.50
B	6.50	5.50	4.50	5.50	6.50		
C	7.50	5.50	5.50	5.50	8.50		
D	7.50	4.50	5.50	4.50	7.50		
E		5.50		4.50			
層毎の平均	7.5	5.3	5.25	5.1	7.75		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.2		3.60			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	5.00	5.00	3.00	6.00
B	5.00	4.00	6.00	6.00	6.00		
C	9.00	5.00	6.00	7.00	7.00		
D	5.00	9.00	7.00	8.00	9.00		
E		7.00		6.00			
層毎の平均	6.25	6	6	6	7		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.3		3.27			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	8.50	6.50	7.50	7.50	6.50
B	7.50	7.50	6.50	3.30	8.50		
C	7.50	3.30	6.50	6.50	6.50		
D	6.50	6.50	8.50	5.50	7.50		
E		5.50		4.50			
層毎の平均	7.5	5.86	7.25	5.46	7.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.6		3.83			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	5.00	6.00	5.00	5.00
B	5.00	6.00	4.00	5.00	6.00		
C	6.00	5.00	4.00	6.00	5.00		
D	5.00	6.00	6.00	4.00	5.00		
E		5.00		5.00			
層毎の平均	5.5	5.4	5	5	5.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.2		3.92			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	8.50	4.50	4.50	5.50	8.50
B	6.50	5.50	5.50	4.50	6.50		
C	7.50	5.50	5.50	5.50	8.50		
D	7.50	4.50	5.50	4.50	7.50		
E		5.50		3.30			
層毎の平均	7.5	5.1	5.25	5.3	7.75		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.2		3.60			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	6.00	5.00	6.00	5.00	5.00
B	5.00	6.00	4.00	6.00	6.00		
C	6.00	6.00	4.00	4.00	5.00		
D	5.00	6.00	6.00	5.00	5.00		
E		6.00		5.00			
層毎の平均	5.5	5.8	5	5	5.25		
平均ヤング		最小値ヤング					
		5.3		3.93			

		層の通し番号					
	ラミナの記号	1	2	3	4	5	
		A	8.50	4.50	4.50	4.50	8.50
B	6.50	5.50	5.50	4.50	6.50		
C	7.50	5.50	5.50	5.50	8.50		
D	7.50	5.50	5.50	5.50	7.50		
E		5.50		3.30			
層毎の平均	7.5	5.3	5.25	4.66	7.75		
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.1		3.31			

※単位：GPa

表 4.5-3 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分のヤング係数 記録(3)

		60S					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
1	A	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	B	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	C	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	E		6.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		6.50			

		DS					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
1	A	7.50	7.50	8.50	7.50	6.50	
	B	4.50	6.50	8.50	6.50	6.50	
	C	8.50	8.50	8.50	7.50	6.50	
	D	7.50	4.50	5.50	7.50	5.50	
	E		6.50		7.50		
	層毎の 平均	7	6.7	7.75	7.3	6.25	
平均ヤング		最小値ヤング					
		7.0		4.62			

		60S					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
2	A	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	B	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	C	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	E		6.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		6.50			

		DS					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
2	A	8.50	3.30	6.50	5.50	6.50	
	B	5.50	4.50	4.50	7.50	3.30	
	C	6.50	4.50	4.50	7.50	6.50	
	D	5.50	6.50	6.50	7.50	5.50	
	E		6.50		8.50		
	層毎の 平均	6.5	5.06	5.5	7.3	5.45	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.0		3.14			

		60S					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
3	A	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	B	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	C	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	E		6.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		6.50			

		DS					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
3	A	8.50	7.50	6.50	7.50	6.50	
	B	5.50	6.50	4.50	6.50	3.30	
	C	6.50	8.50	4.50	7.50	6.50	
	D	5.50	4.50	6.50	7.50	5.50	
	E		6.50		7.50		
	層毎の 平均	6.5	6.7	5.5	7.3	5.45	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.3		3.68			

		60S					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
4	A	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	B	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	C	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	E		6.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		6.50			

		DS					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
4	A	7.50	5.50	8.50	5.50	6.50	
	B	4.50	6.50	8.50	5.50	6.50	
	C	8.50	7.50	8.50	6.50	6.50	
	D	7.50	7.50	5.50	7.50	5.50	
	E		4.50		6.50		
	層毎の 平均	7	6.3	7.75	6.3	6.25	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.8		4.34			

		60S					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
5	A	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	B	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	C	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	E		6.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		6.50			

		DS					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
5	A	7.50	3.30	8.50	5.50	6.50	
	B	4.50	4.50	8.50	7.50	6.50	
	C	8.50	4.50	8.50	7.50	6.50	
	D	7.50	6.50	5.50	7.50	5.50	
	E		6.50		8.50		
	層毎の 平均	7	5.06	7.75	7.3	6.25	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.7		3.72			

		60S					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
6	A	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	B	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	C	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	D	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	
	E		6.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.5		6.50			

		DS					
試体の 記号	層の 通し番号	層の通し番号					
		1	2	3	4	5	
6	A	8.50	5.50	6.50	5.50	6.50	
	B	5.50	6.50	4.50	5.50	3.30	
	C	6.50	7.50	4.50	6.50	6.50	
	D	5.50	7.50	6.50	7.50	5.50	
	E		4.50		6.50		
	層毎の 平均	6.5	6.3	5.5	6.3	5.45	
平均ヤング		最小値ヤング					
		6.0		3.72			

※単位 : GPa

表 4.5-4 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分の密度 記録(1)

		S30A				
試体の記号	層の通し番号	1	2	3	4	5
		A	472	423	423	402
B	405	349	430	427	396	
C	412	450	409	387	367	
D	450	431	362	394	401	
E		404		437		
層毎の平均		434	411	406	408	398
平均密度		最小値密度				
		412		354		

※単位：kg/m<sup>3</sup>

表 4.5-5 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分の密度 記録(2)

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	378	416	433	422	430	
B	382	402	415	363	392	
C	393	454	404	421	396	
D	376	387	437	481	414	
E		447		434		
層毎の平均	382	420	422	424	408	
平均密度	411		最小値密度 355			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	425	481	380	439	424	
B	426	424	474	420	420	
C	401	411	404	385	426	
D	393	405	397	405	436	
E		415		413		
層毎の平均	411	423	414	410	426	
平均密度	417		最小値密度 370			

		Mx60A'				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	405	400	400	350	408	
B	354	444	347	384	362	
C	411	436	501	410	400	
D	323	420	407	375	362	
E		421		413		
層毎の平均	373	426	414	388	383	
平均密度	397		最小値密度 322			

		Mx60B				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	407	377	409	404	330	
B	433	399	394	332	402	
C	387	425	367	433	358	
D	393	517	387	425	406	
E		406		372		
層毎の平均	405	430	389	394	374	
平均密度	398		最小値密度 324			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	355	428	433	457	450	
B	354	365	384	421	368	
C	536	417	417	396	396	
D	372	375	396	403	409	
E		422		409		
層毎の平均	405	398	407	414	405	
平均密度	406		最小値密度 327			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	415	375	374	365	387	
B	411	394	372	390	432	
C	362	394	452	423	342	
D	401	412	397	371	379	
E		368		408		
層毎の平均	397	391	399	393	385	
平均密度	393		最小値密度 343			

		Mx60A'				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	425	405	380	386	398	
B	378	369	367	363	390	
C	427	394	501	435	400	
D	418	413	423	429	450	
E		415		379		
層毎の平均	412	398	418	401	409	
平均密度	408		最小値密度 346			

		Mx60B				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	416	409	422	385	455	
B	414	408	363	415	480	
C	387	416	442	377	441	
D	366	449	387	374	392	
E		366		377		
層毎の平均	396	412	403	386	442	
平均密度	408		最小値密度 346			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	365	428	431	491	363	
B	431	365	486	421	365	
C	415	367	402	417	444	
D	386	373	419	403	419	
E		437		438		
層毎の平均	400	389	435	429	398	
平均密度	410		最小値密度 339			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	436	378	363	404	400	
B	436	356	478	390	383	
C	402	400	452	402	386	
D	393	383	406	370	379	
E		377		399		
層毎の平均	417	379	425	392	387	
平均密度	400		最小値密度 343			

		Mx60A'				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	406	435	393	454	413	
B	341	443	353	443	380	
C	454	420	386	480	418	
D	323	421	409	426	488	
E		443		440		
層毎の平均	381	432	385	449	424	
平均密度	414		最小値密度 334			

		Mx60B				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	435	367	419	366	407	
B	414	358	374	400	388	
C	434	418	436	372	385	
D	381	379	490	415	339	
E		378		397		
層毎の平均	416	381	429	392	380	
平均密度	400		最小値密度 335			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	403	414	426	422	401	
B	462	402	394	363	449	
C	519	399	410	411	348	
D	424	390	366	461	514	
E		447		434		
層毎の平均	453	408	399	417	428	
平均密度	421		最小値密度 338			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	425	439	357	481	380	
B	426	420	368	424	412	
C	400	436	455	355	371	
D	393	405	417	405	440	
E		431		415		
層毎の平均	411	425	399	411	401	
平均密度	409		最小値密度 348			

		Mx60A'				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	409	433	474	369	436	
B	408	431	378	363	358	
C	414	361	402	452	405	
D	431	443	455	433	392	
E		453		397		
層毎の平均	415	422	427	406	397	
平均密度	413		最小値密度 348			

		Mx60B				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	444	391	430	394	427	
B	411	399	391	332	375	
C	373	452	425	433	420	
D	496	415	379	372	431	
E		406		372		
層毎の平均	430	415	406	380	413	
平均密度	409		最小値密度 341			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	422	440	418	409	348	
B	462	403	460	434	432	
C	484	419	494	379	413	
D	405	431	448	399	423	
E		404		439		
層毎の平均	444	419	455	410	404	
平均密度	426		最小値密度 363			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	425	375	369	362	365	
B	402	394	413	394	374	
C	400	390	381	448	362	
D	393	412	436	382	357	
E		353		418		
層毎の平均	405	388	400	403	365	
平均密度	392		最小値密度 341			

		Mx60A'				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	442	402	397	350	446	
B	409	444	427	365	522	
C	412	419	465	405	421	
D	353	420	419	366	436	
E		387		396		
層毎の平均	404	417	427	377	456	
平均密度	416		最小値密度 341			

		Mx60B				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	393	407	432	380	425	
B	480	423	383	481	359	
C	380	379	462	355	444	
D	438	449	379	374	454	
E		393		403		
層毎の平均	423	411	414	400	396	
平均密度	409		最小値密度 333			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	499	422	433	429	430	
B	392	437	422	408	380	
C	407	415	424	362	372	
D	405	464	486	408	438	
E		408		446		
層毎の平均	425	431	441	407	405	
平均密度	422		最小値密度 358			

		Mx60A				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	412	378	373	416	365	
B	402	356	385	367	379	
C	400	400	369	402	382	
D	393	383	452	370	357	
E		383		399		
層毎の平均	402	380	394	388	373	
平均密度	388		最小値密度 345			

		Mx60A'				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	400	437	376	454	428	
B	431	396	427	396	427	
C	434	420	465	400	399	
D	464	417	456	423	436	
E		432		429		
層毎の平均	432	418	431	417	422	
平均密度	424		最小値密度 379			

		Mx60B				
層の記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
A	431	367	492	367	383	
B	369	345	478	379	350	
C	380	428	426	383	444	
D	406	372	481	406	355	
E		377		376		
層毎の平均	396					

表 4.5-6 試験体の特性値に影響を及ぼすと考えられる部分の密度 記録(3)

		60S				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
1	A	439	320	332	353	337
	B	293	396	350	414	391
	C	349	364	369	503	293
	D	401	423	378	428	320
	E		372		362	
	層毎の平均	370	380	357	420	335
平均密度		最小値密度				
		372			275	

		DS				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
1	A	404	414	420	434	416
	B	429	419	417	427	431
	C	414	428	414	411	402
	D	418	415	402	407	411
	E		422		417	
	層毎の平均	416	420	413	418	415
平均密度		最小値密度				
		417			399	

		60S				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
2	A	416	341	387	359	380
	B	293	350	371	382	333
	C	349	309	390	300	395
	D	351	373	438	417	469
	E		354		347	
	層毎の平均	352	345	396	362	394
平均密度		最小値密度				
		370			286	

		DS				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
2	A	419	408	414	412	417
	B	426	417	405	401	418
	C	407	410	414	420	423
	D	421	404	416	405	428
	E		413		434	
	層毎の平均	418	410	412	413	421
平均密度		最小値密度				
		415			399	

		60S				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
3	A	309	393	350	379	478
	B	322	386	415	379	380
	C	362	356	381	369	322
	D	383	373	417	448	367
	E		388		339	
	層毎の平均	344	378	391	386	386
平均密度		最小値密度				
		377			301	

		DS				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
3	A	422	409	422	427	417
	B	419	424	437	424	431
	C	420	428	414	411	414
	D	433	415	416	413	404
	E		415		417	
	層毎の平均	423	419	422	418	417
平均密度		最小値密度				
		420			404	

		60S				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
4	A	309	345	368	363	321
	B	351	396	430	414	351
	C	339	364	381	444	382
	D	351	423	324	449	341
	E		391		389	
	層毎の平均	338	386	376	417	349
平均密度		最小値密度				
		373			296	

		DS				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
4	A	413	434	421	432	432
	B	421	412	407	408	410
	C	409	400	405	415	411
	D	432	433	420	435	424
	E		420		414	
	層毎の平均	419	419	413	420	419
平均密度		最小値密度				
		418			397	

		60S				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
5	A	309	390	386	391	422
	B	339	440	304	376	380
	C	359	395	381	401	325
	D	359	438	462	434	438
	E		365		379	
	層毎の平均	342	409	383	398	391
平均密度		最小値密度				
		384			301	

		DS				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
5	A	436	425	432	410	410
	B	429	417	426	401	431
	C	403	410	429	420	410
	D	403	418	428	405	417
	E		417		419	
	層毎の平均	418	417	429	411	417
平均密度		最小値密度				
		418			398	

		60S				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
6	A	416	390	404	391	344
	B	381	367	371	361	373
	C	348	372	410	362	337
	D	403	375	369	434	424
	E		376		379	
	層毎の平均	387	375	389	385	369
平均密度		最小値密度				
		381			332	

		DS				
ミナの記号	層の通し番号					
	1	2	3	4	5	
6	A	409	434	413	421	418
	B	407	410	423	405	429
	C	420	420	414	415	414
	D	419	435	407	420	428
	E		420		414	
	層毎の平均	414	423	414	414	422
平均密度		最小値密度				
		418			402	

※単位 : kg/m<sup>3</sup>

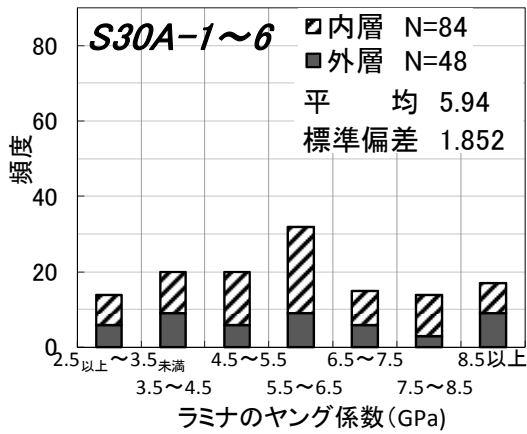


図 4.5-2 S30A-1~6 のヤング係数分布

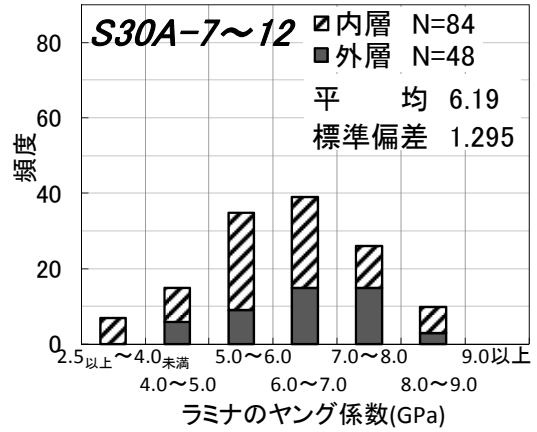


図 4.5-3 S30A-7~12 のヤング係数分布

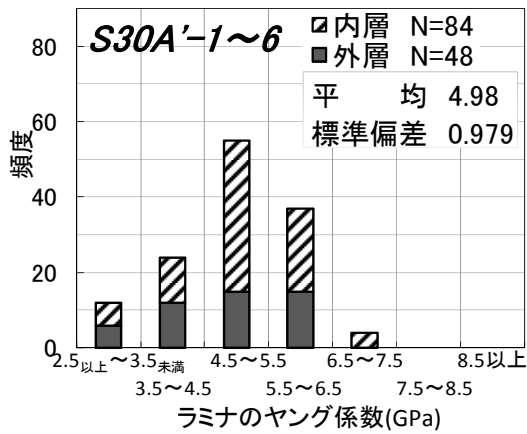


図 4.5-4 S30A'-1~6 のヤング係数分布

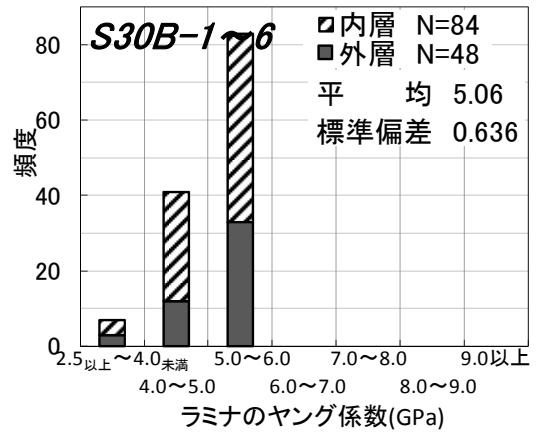


図 4.5-5 S30B-1~6 のヤング係数分布

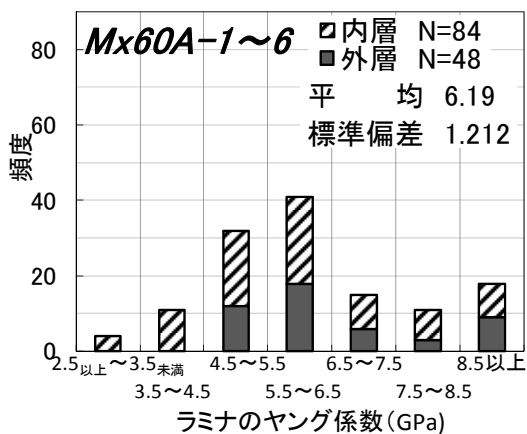


図 4.5-6 Mx60A-1~6 のヤング係数分布

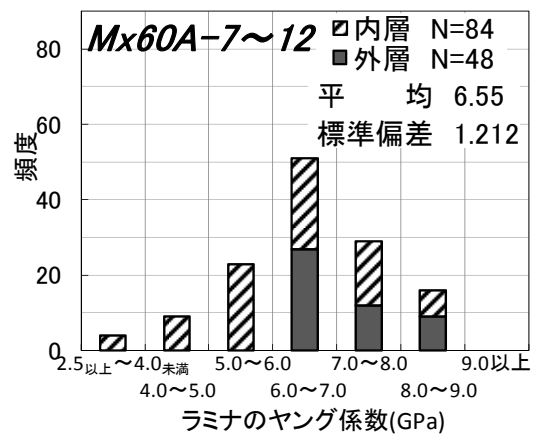


図 4.5-7 Mx60A-7~12 のヤング係数分布

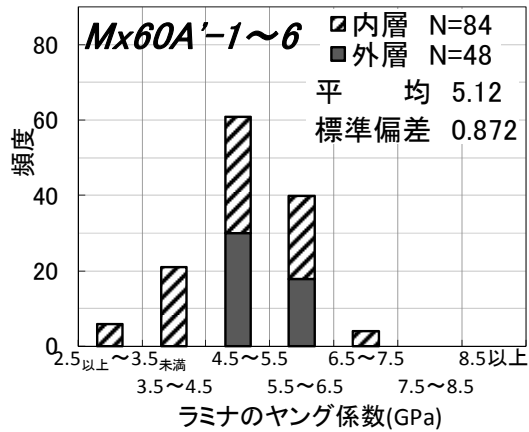


図 4.5-8 Mx60A-1~6 のヤング係数分布

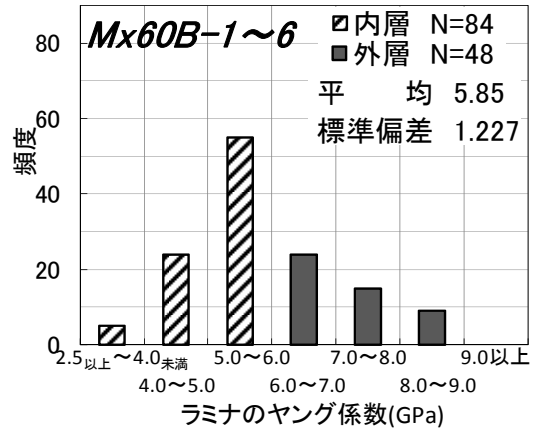


図 4.5-9 Mx60B-1~6 のヤング係数分布

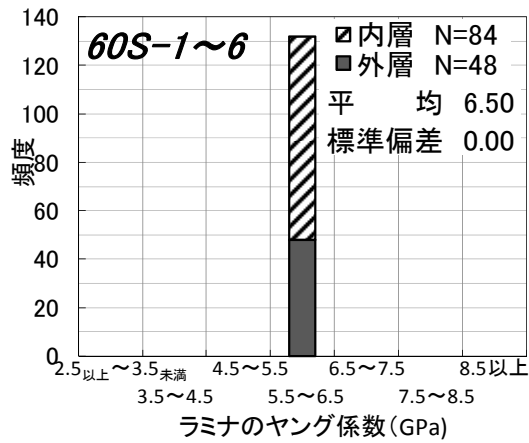


図 4.5-10 60S-1~6 のヤング係数分布

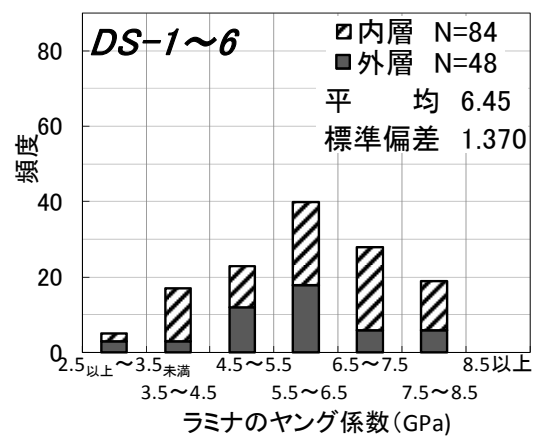


図 4.5-11 DS-1~6 のヤング係数分布

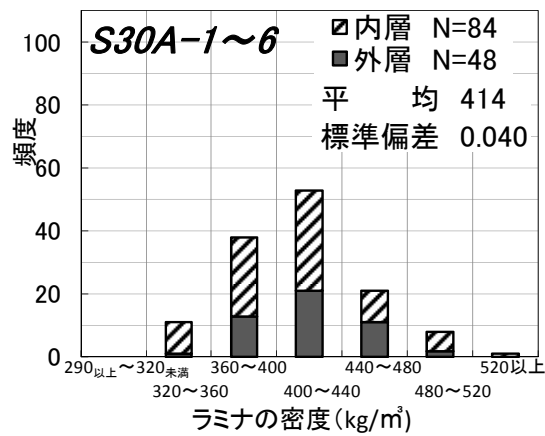


図 4.5-12 S30A-1~6 の密度分布

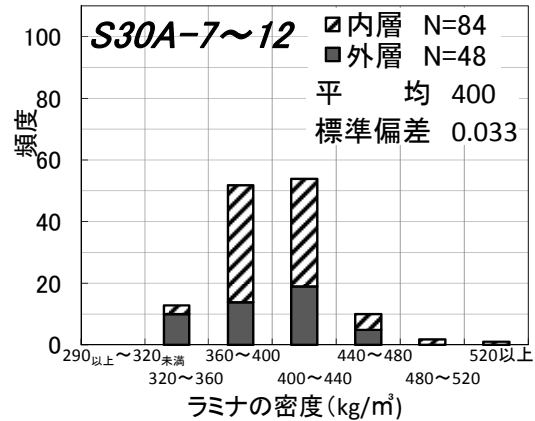


図 4.5-13 S30A-7~12 の密度分布

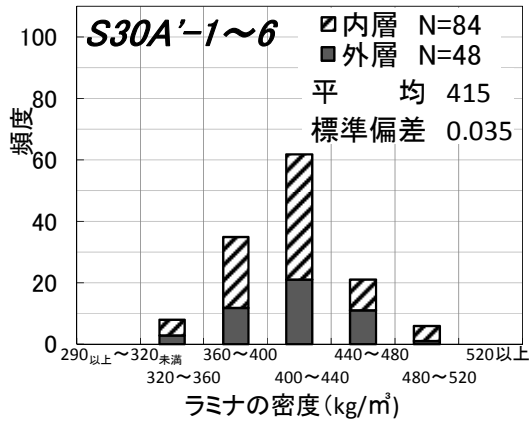


図 4.5-14 S30A'-1~6 の密度分布

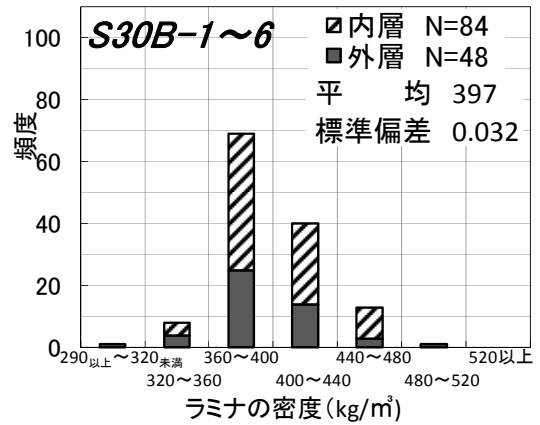


図 4.5-15 S30B-1~6 の密度分布

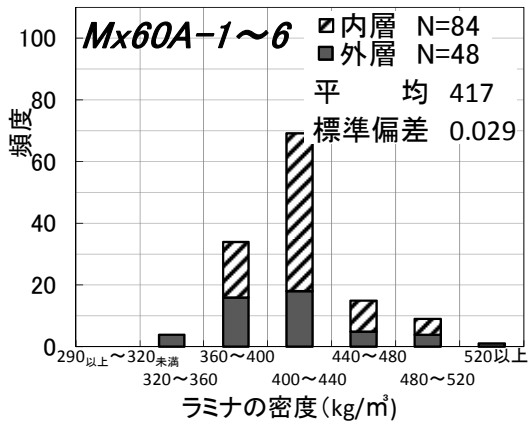


図 4.5-16 Mx60A-1~6 の密度分布

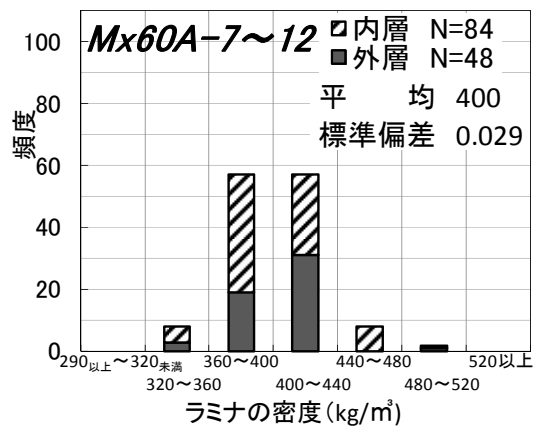


図 4.5-17 Mx60A-7~12 の密度分布

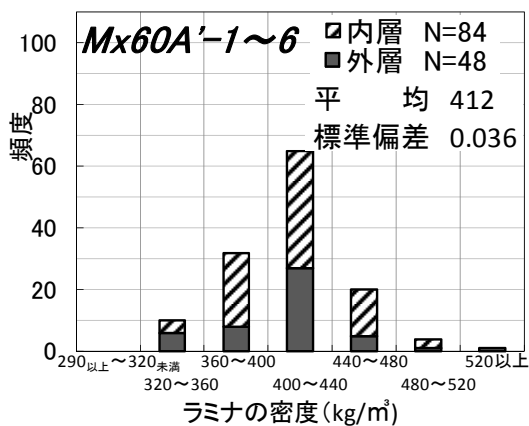


図 4.5-18 Mx60A'-1~6 の密度分布

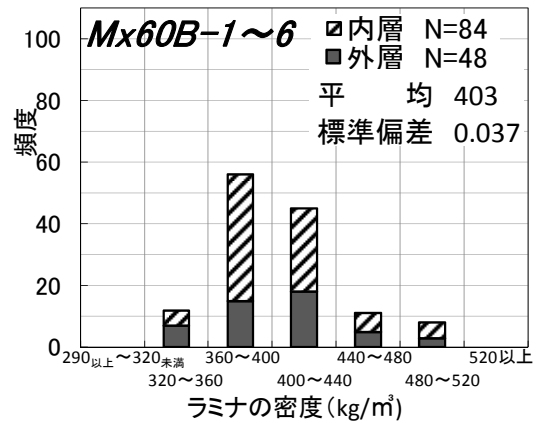


図 4.5-19 Mx60B-1~6 の密度分布



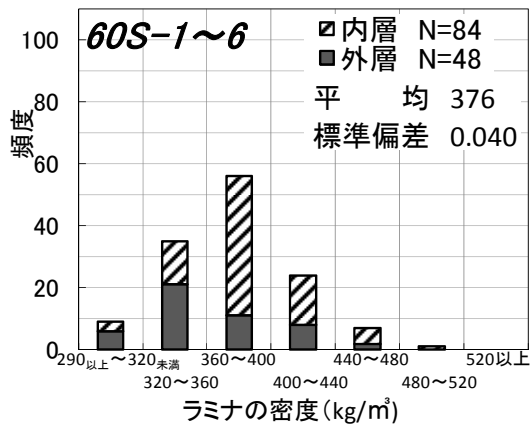


図 4.5-20 60S-1~6 の密度分布

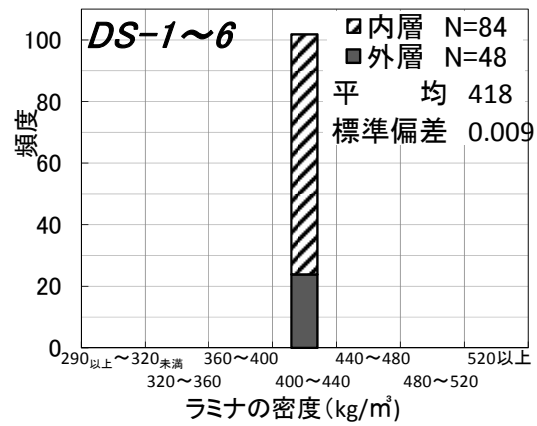


図 4.5-21 DS-1~6 の密度分布

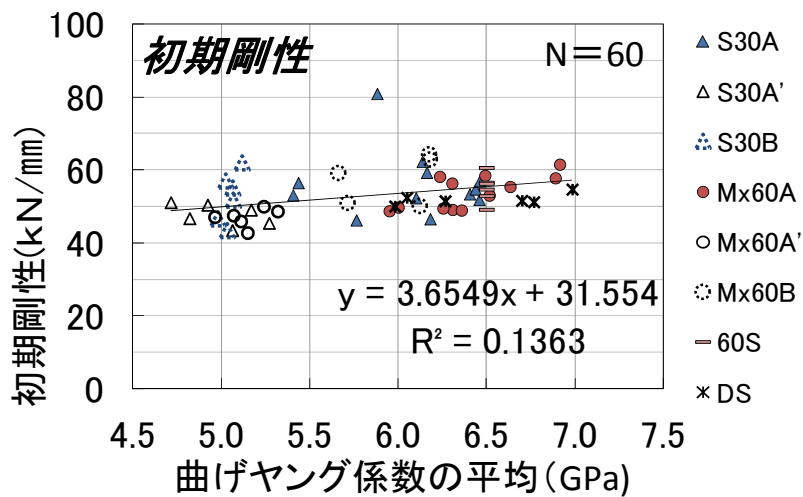


図 4.5-22 曲げヤング係数と初期剛性の関係

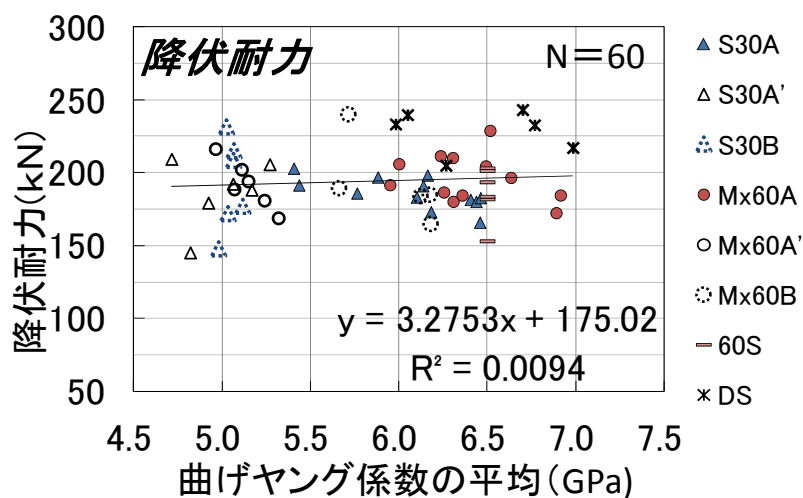


図 4.5-23 曲げヤング係数と降伏耐力の関係

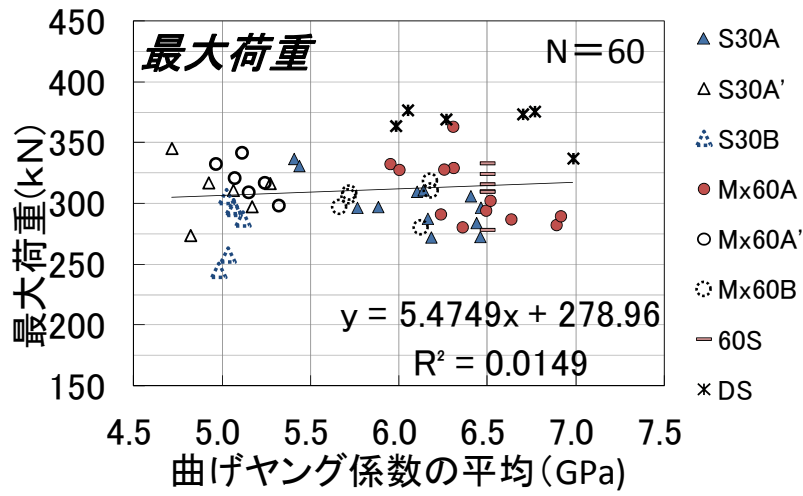


図 4.5-24 曲げヤング係数と最大荷重の関係

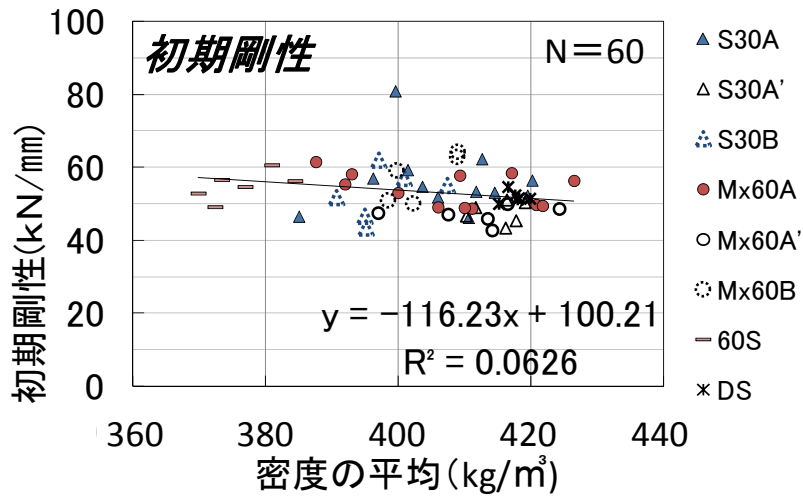


図 4.5-25 密度と初期剛性の関係

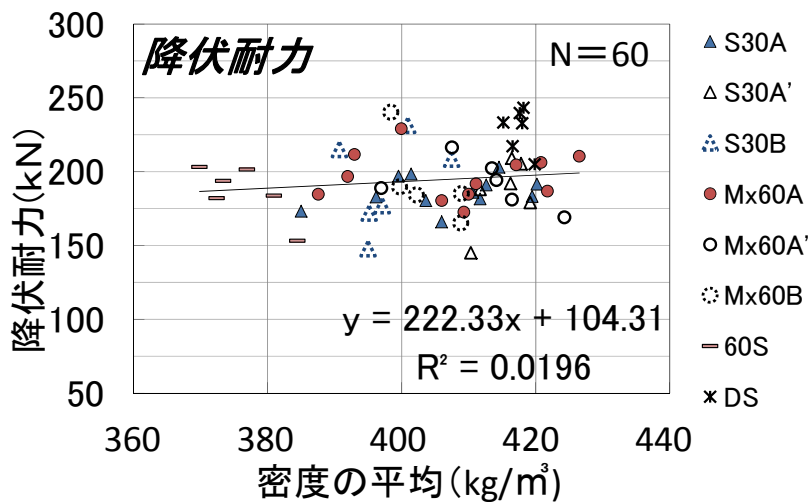


図 4.5-26 密度と降伏耐力の関係

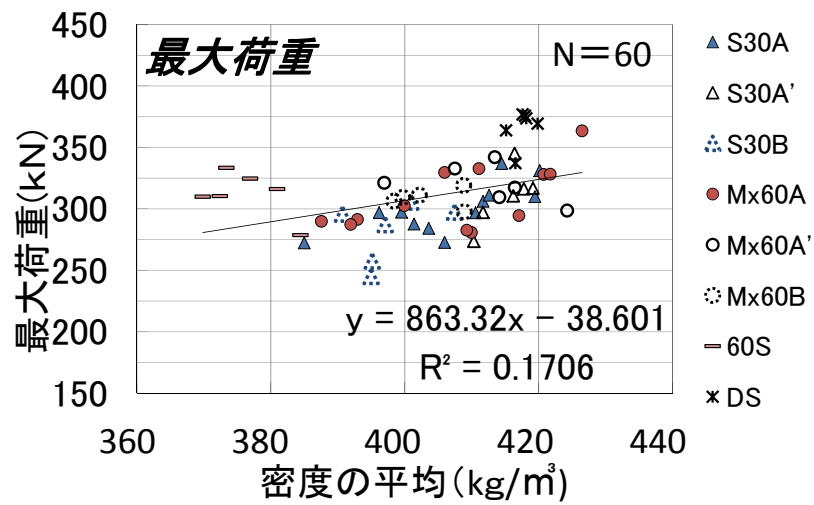


図 4.5-27 密度と最大荷重の関係

#### 4.6 まとめ

全ての試験結果を概観すると、曲げヤング係数と初期剛性、密度と最大荷重の間には僅かに比例関係が見られた。しかしながら、少なくとも引きボルト接合部においては、A種構成とB種構成、異等級と同一等級では、個体間のばらつきによる影響の方が大きく、構造設計においてはこれらを意図的に使い分けることはあまり意味がなさそうである。また、A種構成より材質のばらつきを抑えたB種構成、曲げヤング係数を調整した試験体60Sにおいては強度性能のばらつきへの影響がほとんど見られなかったが、密度管理を行ったDSについては強度性能のばらつきが少なくなる傾向にあり、結果的に降伏耐力や最大荷重が他の試験体より高くなった。

## 5. 縁距離、端距離及びラミナ境界部位置の影響試験

### 5.1 実験の目的

前章の材料物性の違いによる影響試験では、接着積層のせん断木部破壊の他、引張破壊するものもあったが、これらの破壊はせん断面積や引張断面積の違いによる影響を受けやすいと考えられる。

したがって、本章では、せん断面積や引張断面積の違いによる影響を調べるため、縁距離、端距離及びラミナ境界部位置をパラメータとした試験を行うこととした。

なお、本章の研究内容の一部は文献(34)で発表している。

### 5.2 試験体

#### (1) 試験の種類

試験体仕様は表 5.2-1 に示すとおり 34 仕様 131 体とした。試験体の名称は図 5.2-1 に示すとおり、ヤング係数の等級と構成に加え、端距離・縁距離を表したものである。表 5.2-1 中の※印の試験体については、第 4 章の試験体 S60 及び S30A と同一であるため、実際には試験は行わず、第 4 章のデータを参照することとする。

試験体材料はグループ 2 を除いて直交集成板の日本農林規格に定めるスギ CLT(5 層 5 プライ)とし、幅はぎ接着していない材料とした。

ここでいう縁距離、端距離及びラミナ境界部位置の違いとは図 5.2-2 に示す部分を指す。座金下部から加力方向の材端までの距離を端距離、座金とナットを納めるための角孔端部から加力と直交方向の材端までの距離を縁距離と定義した。なお、この縁距離の寸法をボルト芯からではなく、角孔端部からの距離とした理由は、角孔の真横の引張断面が剛性や耐力に影響を及ぼすと考えたためであり、ボルト芯からの距離が等しい場合であっても角孔幅の大小によって強度性能が左右されると考えたためである。同様に端距離についても角孔から CLT 端部までの距離とした。ラミナ境界部とは、ラミナの幅方向にラミナ側面相互が密着或いは接近している境界部分を指す。ラミナ境界部位置の影響を比較対象に入れた理由は座金の両端部とラミナ境界部位置が一致した場合、せん断面積が少なくなると考えたためである。なお、当該試験ではボルトと座金で先行降伏させないため、ボルトの強度と断面、及び座金の厚みは余裕を持たせた仕様としている。

**Mx60A P S 08 40**

①

②

③

④

⑤

- ①：材料物性を示す。詳細は第 4 章を参照。
- ②：外層の繊維の向きを示す。P: parallel、O: Orthogonal
- ③：ラミナ境界部と座金の位置関係を示す。図 5.2-2 を参照。
- ④：縁距離を示す。08 は 80 mm。図 5.2-2 を参照。
- ⑤：端距離を示す。40 は 400 mm。図 5.2-2 を参照。

図 5.2-1 試験体名称

表 5.2-1 縁距離、端距離及びラミナ境界部位置の影響試験の仕様

グループ	試験体番号	CLTの種類	ボルトの種類	座金の種類	加力方向	試験体形状	縁距離 (mm)	端距離 (mm)	試験体数	試験場
2	S60SPC0540	スギ、ヤング係数6.0～7.0GPaまでのラミナで構成される5層5プライの材料 (JASに規定なし)			強軸方向		50	400	2	広島県立総合技術研究所
	S60SPC0840						80	400	2	
	S60SPC1040						100	400	2	
	S60SPC1515						150	150	2	
	S60SPC1520						150	200	2	
	S60SPC1530						150	300	2	
	S60SPC1540 <sup>※1</sup>						150	400	6	
	S60SPC1550						150	500	2	
3	S30APC0540		両ねじボルト M27、強度区分10.9、ボルト1本	材質: SS400、幅100×奥行き150×厚み30	強軸方向	ラミナ境界部位置が座金の中央部	50	400	3	
	S30APC0840						80	400	3	
	S30APC1040						100	400	3	
	S30APC1515						150	150	3	
	S30APC1520						150	200	3	
	S30APC1530						150	300	3	
	S30APC1540 <sup>※2</sup>						150	400	6	
	S30APC1550						150	500	3	
4	S30AOC0540	スギ、S30-5-5、A種構成			弱軸方向		50	400	3	
	S30AOC0840						80	400	3	
	S30AOC1040						100	400	3	
	S30AOC1515						150	150	3	
	S30AOC1520						150	200	3	
	S30AOC1530						150	300	3	
	S30AOC1540						150	400	3	
	S30AOC1550						150	500	3	
5	Mx60APS0840	スギ、Mx60-5-5、A種構成			強軸方向	ラミナ境界部位置が座金両端と一致	80	400	6	(公財)住木センター
	Mx60APS1520						150	200	6	
	Mx60APS1540						100	400	6	
	Mx60APS1750						170	500	6	
	Mx60APS2140						215	400	6	
6	Mx60AOS0840				弱軸方向		80	400	6	
	Mx60AOS1520						150	200	6	
	Mx60AOS1540						150	400	6	
	Mx60AOS1750						170	500	6	
	Mx60AOS2140						215	400	6	
合 計									131	

※ 第4章の試験体 S60(※1)及び S30A(※2)と同一であるため、試験を兼ねている。

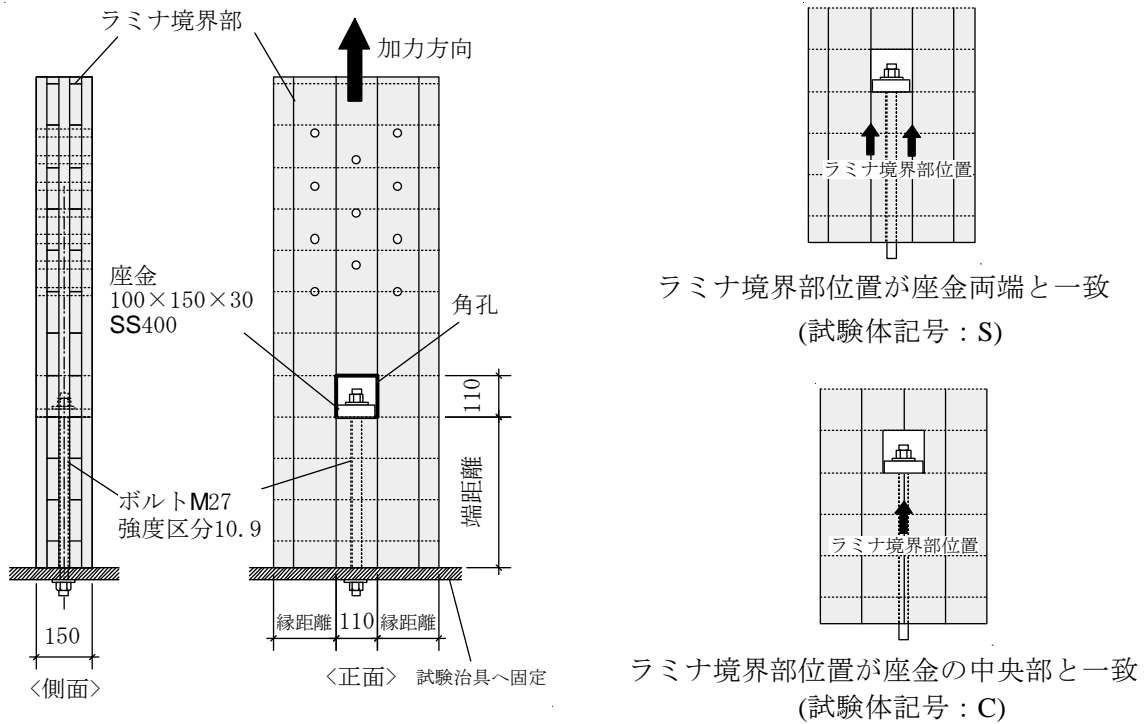


図 5.2-2 試験体のパラメータ

単位：mm

## (2) 試験体の仕様

両ねじボルト及び座金の仕様を図 5.2-3～図 5.2-5 に示す。試験装置の治具の関係上、広島総合技術研究所と住木センターとでボルト長さを変えている。材質については、第 4 章と同様、ボルトや座金が先行降伏しないよう、十分な強度を有するものを選択している。

試験体仕様を図 5.2-6～図 5.2-13 に示す。縁距離をパラメータとする場合、応力集中が生じないように引張治具固定部分から角穴付近までは R を取り、試験体形状は左右対称とした。

第 4 章と同様、全ての試験体で CLT パネルの幅はぎ部は接着しておらず、縦継ぎ及び積層面の接着は JIS K 6806 に規定される水性高分子ーイソシアネート系木材接着剤 1 種 1 号とした。

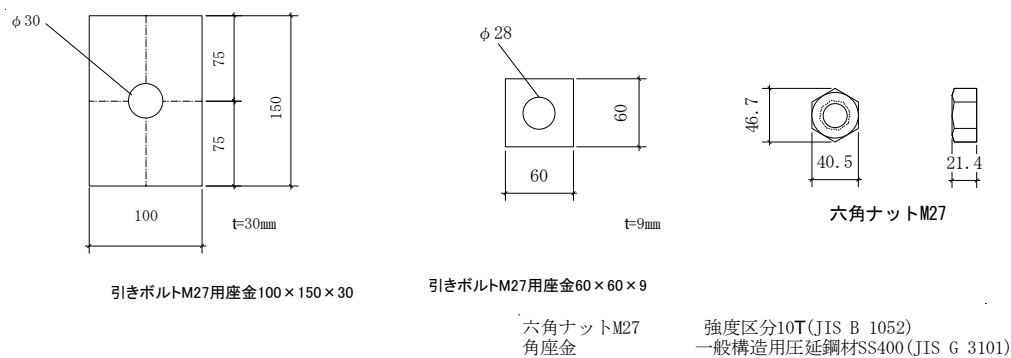
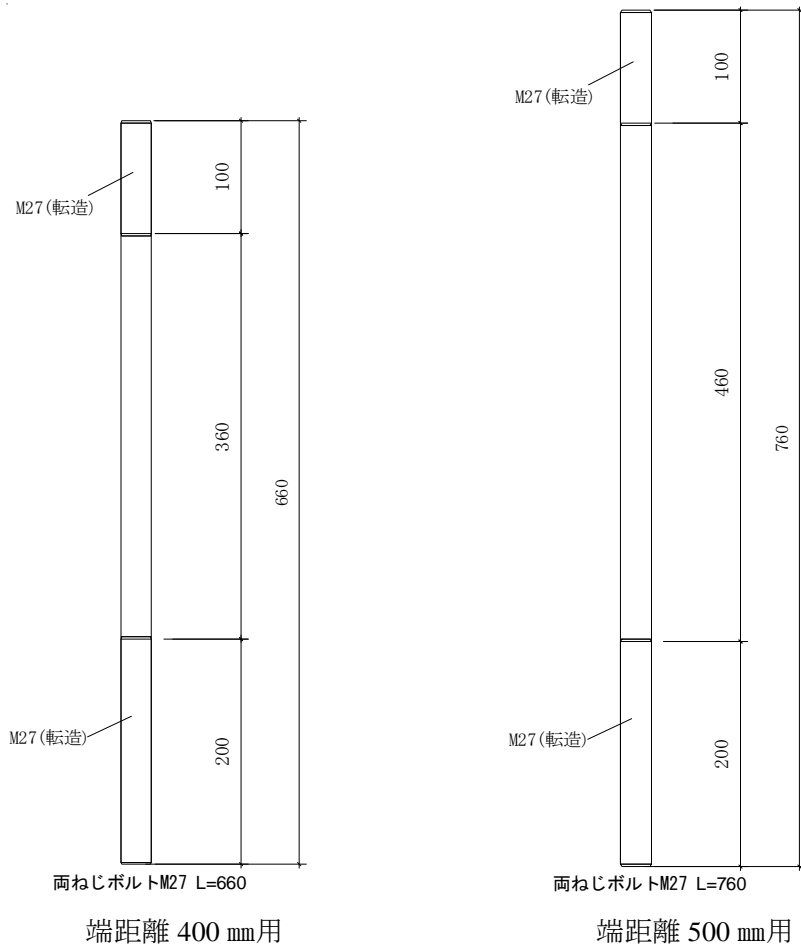
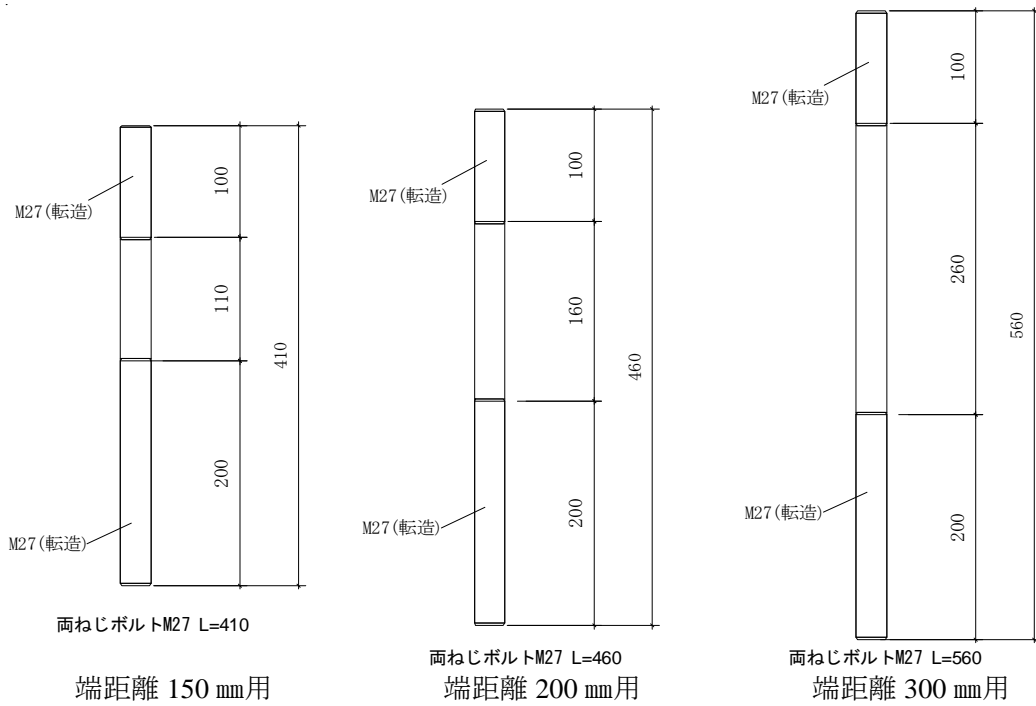


図 5.2-3 角座金及びナットの製作図

単位：mm



両ねじボルトM27 強度区分10.9 (JISB1051) 単位: mm

図 5.2-4 両ねじボルト M27 の製作図(広島県立総合技術研究所用)

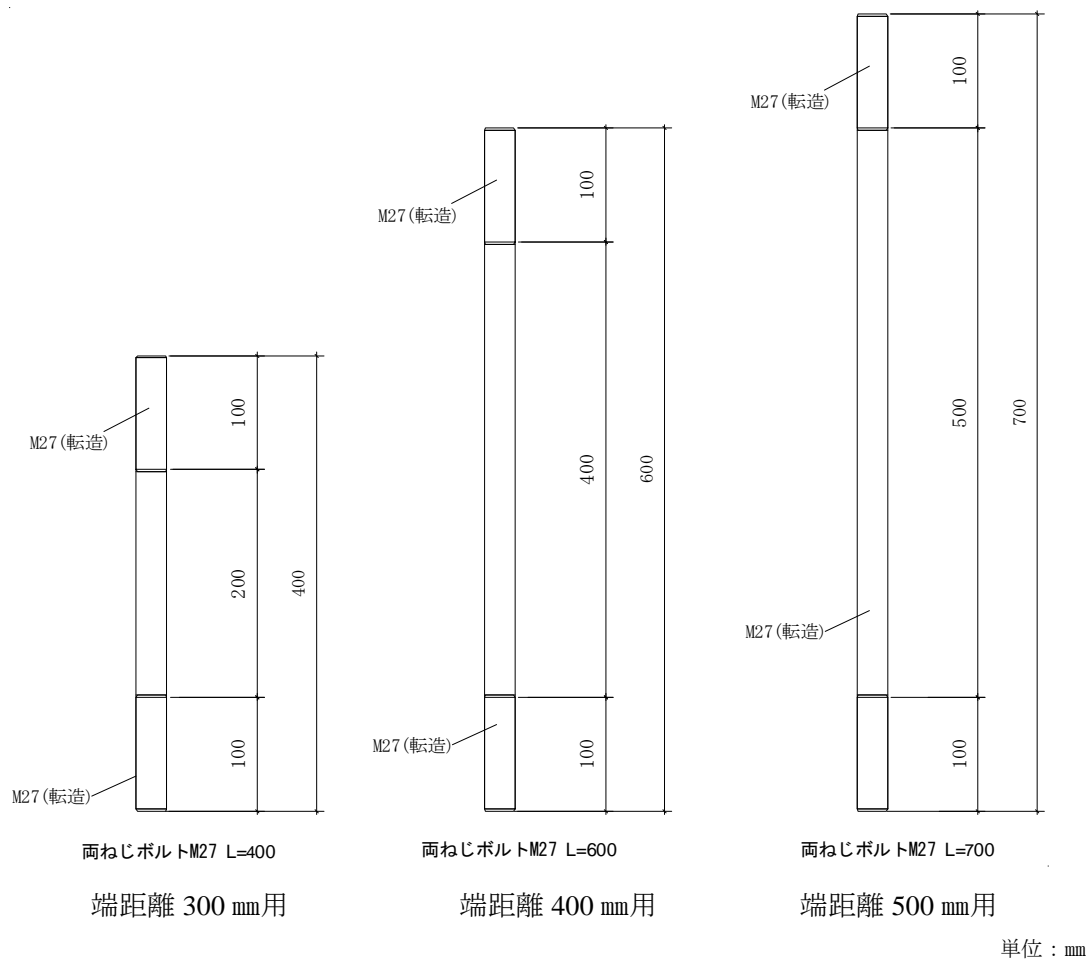
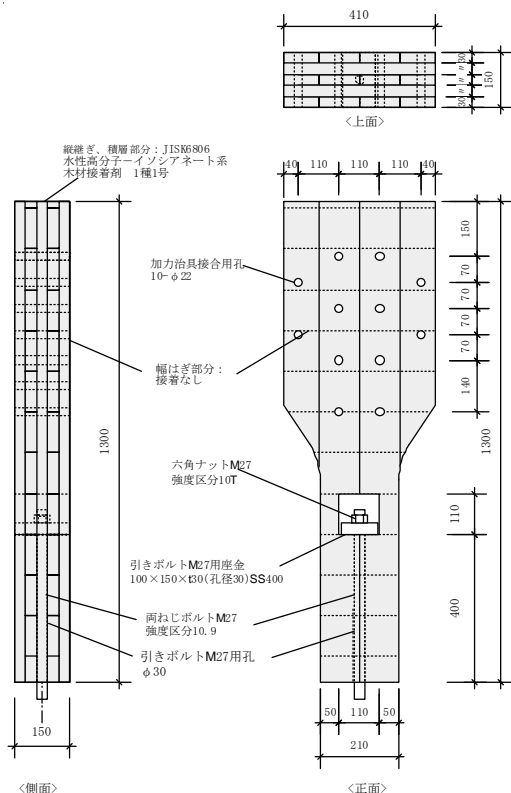
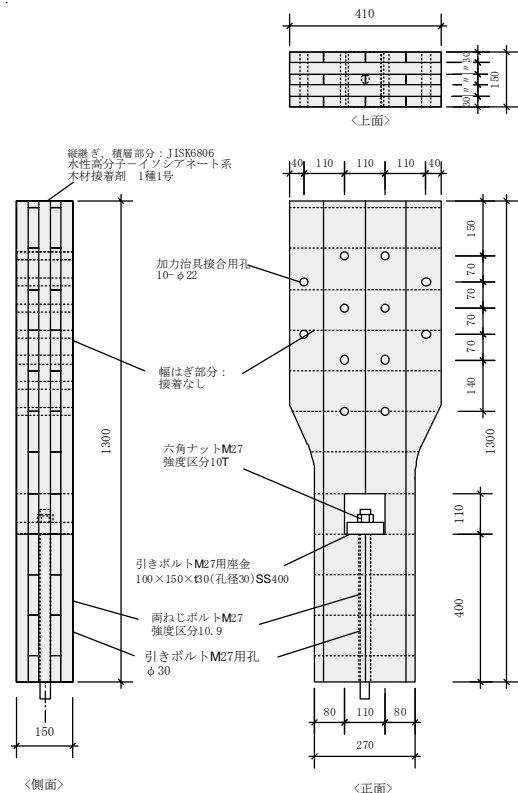


図 5.2-5 両ねじボルト M27 の製作図((公財)住木センター用)

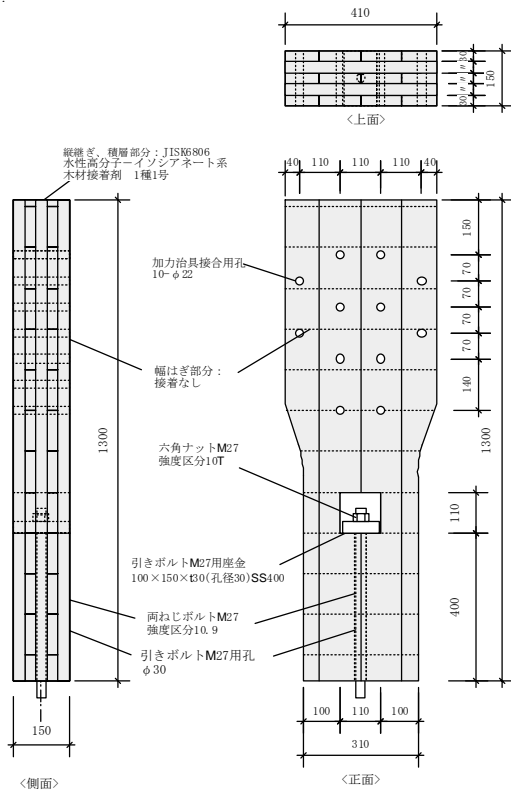




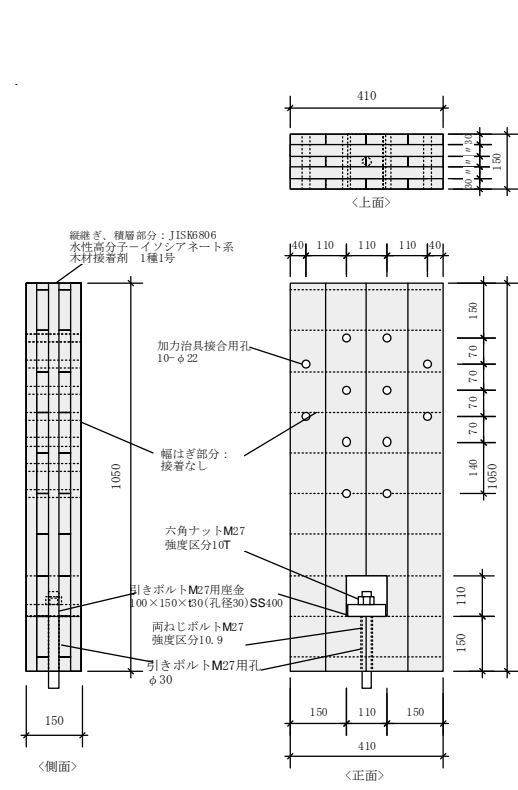
S60SPC0540、S30APC0540 試験体



S60SPC0840、S30APC0840 試験体



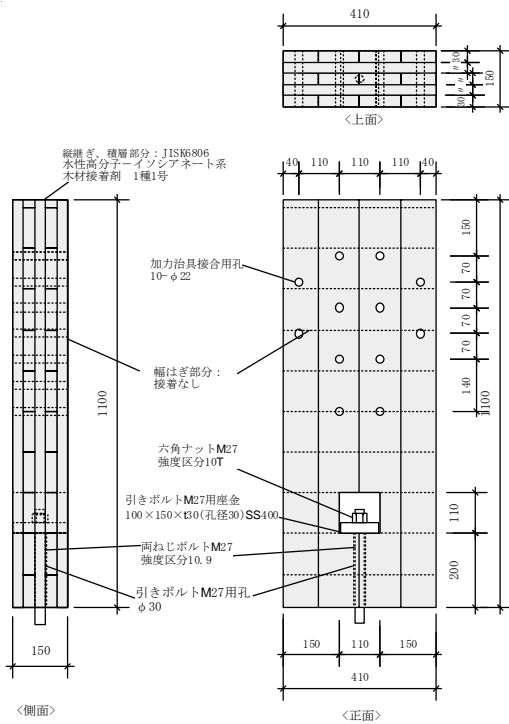
S60SPC1040、S30APC1040 試験体



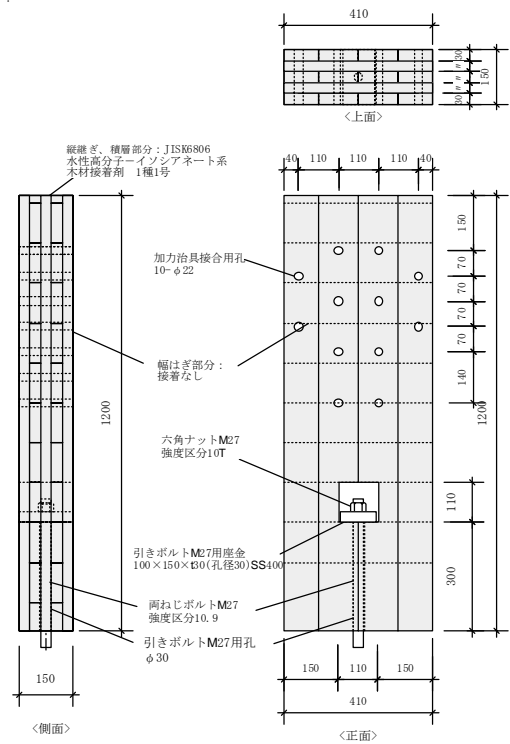
S60SPC1515、S30APC1515 試験体

図 5.2-6 グループ1, 2の試験体図(1)

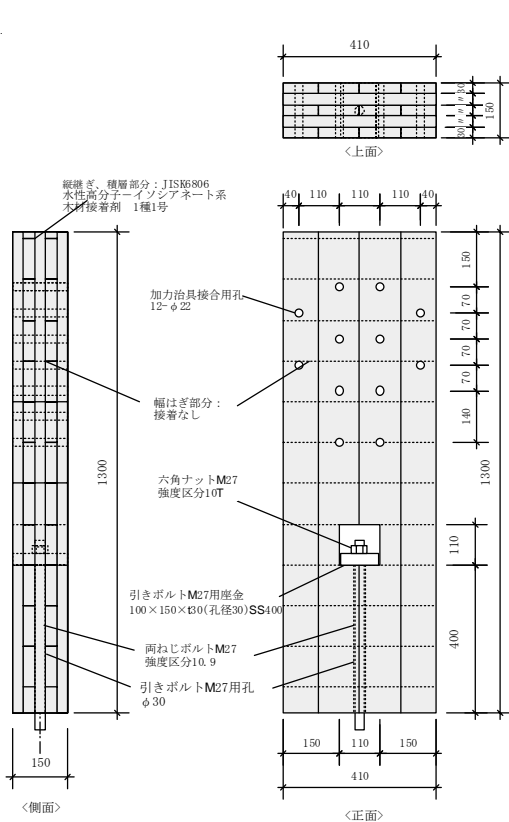
単位: mm



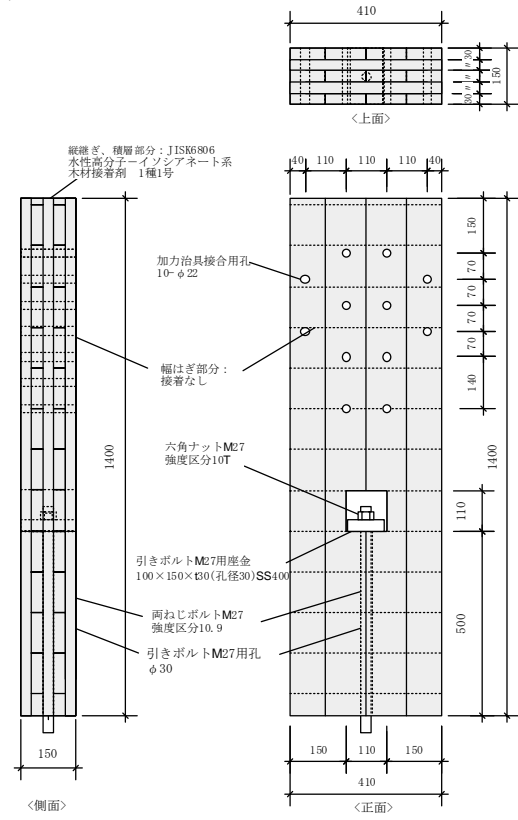
S60SPC1520、S30APC1520 試験体



S60SPC1530、S30APC1530 試験体



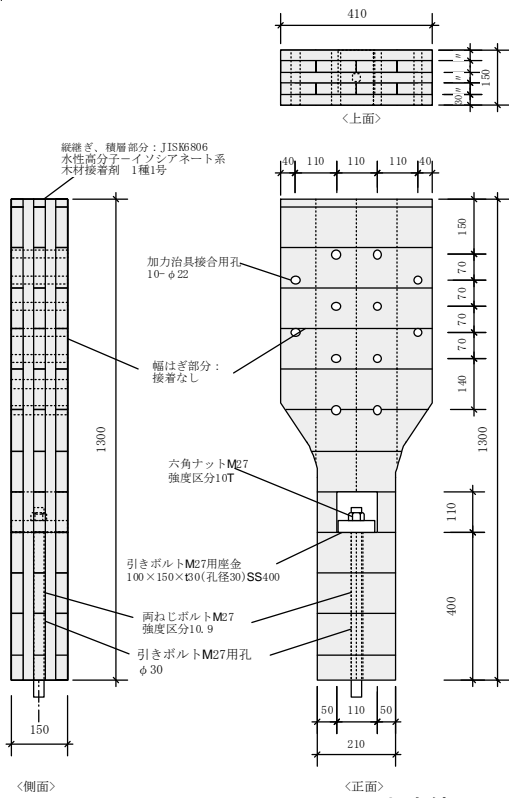
S60SPC1540、S30APC1550 試験体



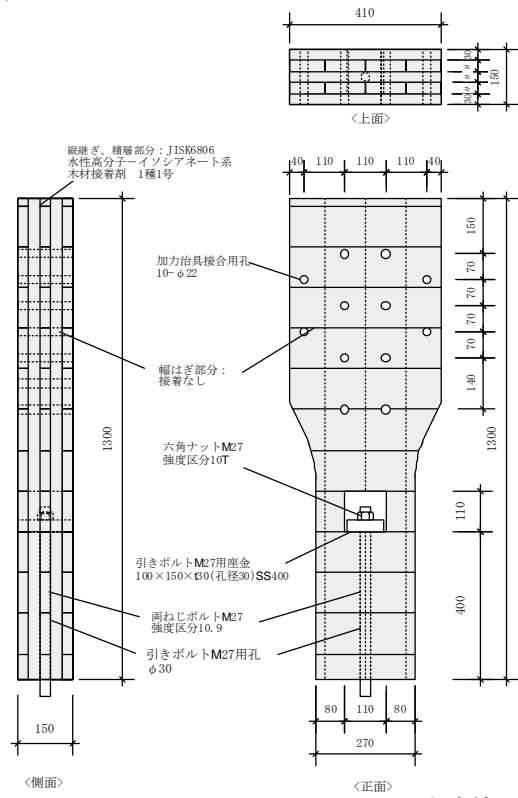
S60SPC1540、S30APC1550 試験体

図 5.2-7 グループ1, 2の試験体図(2)

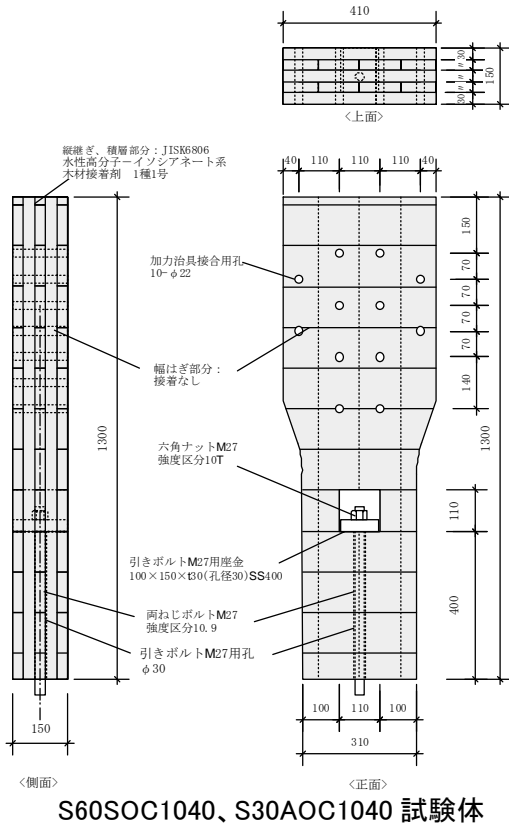
単位: mm



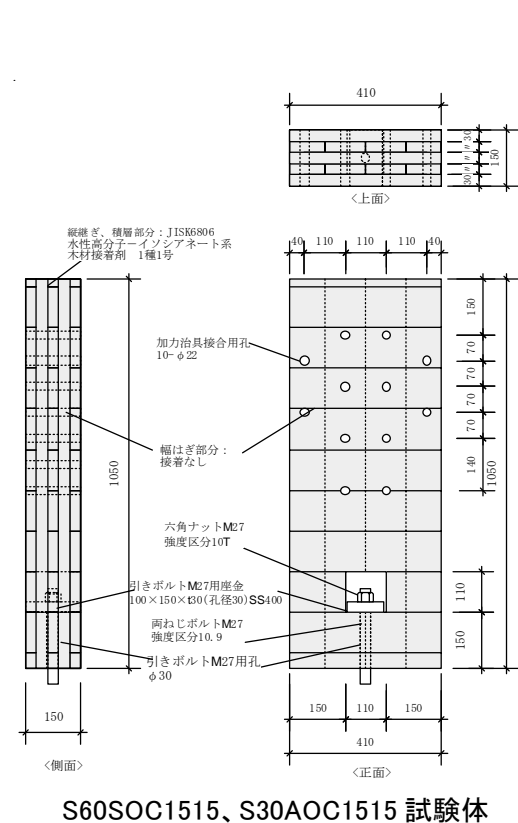
S60SOC0540、S30APO0540 試験体



S60SOC0840、S30AOC0840 試験体



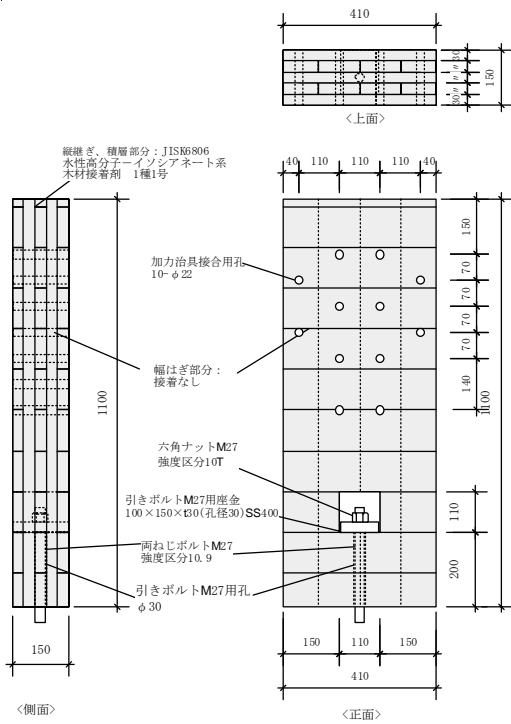
S60SOC1040、S30AOC1040 試験体



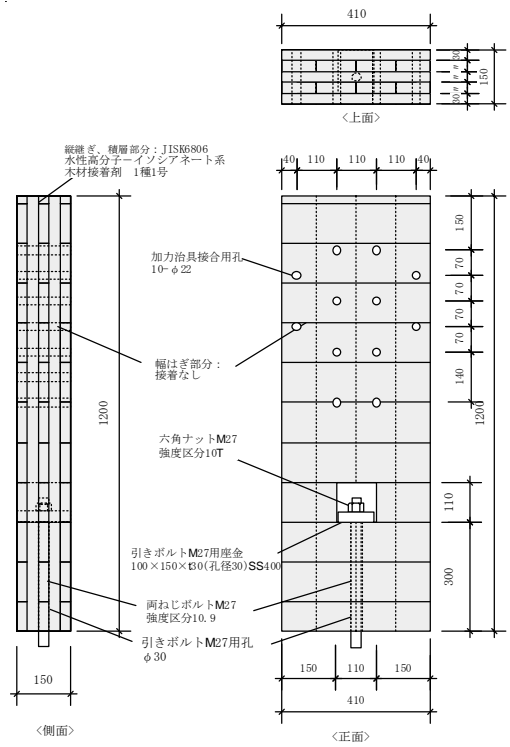
S60SOC1515、S30AOC1515 試験体

図 5.2-8 グループ3の試験体図(1)

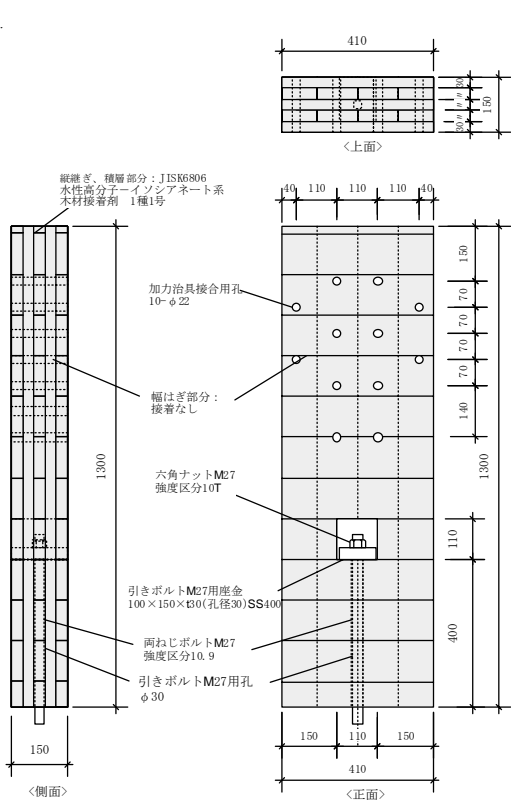
単位: mm



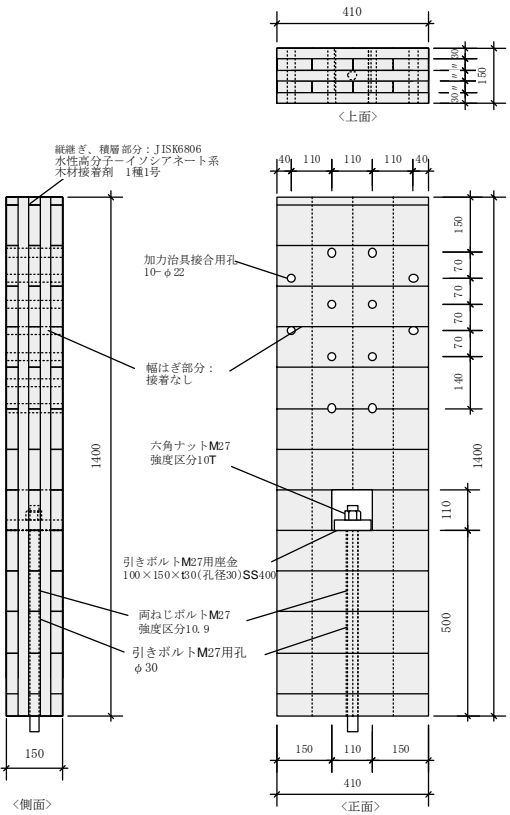
S60SOC1520、S30AOC1520 試験体



S60SOC1530、S30AOC1530 試験体



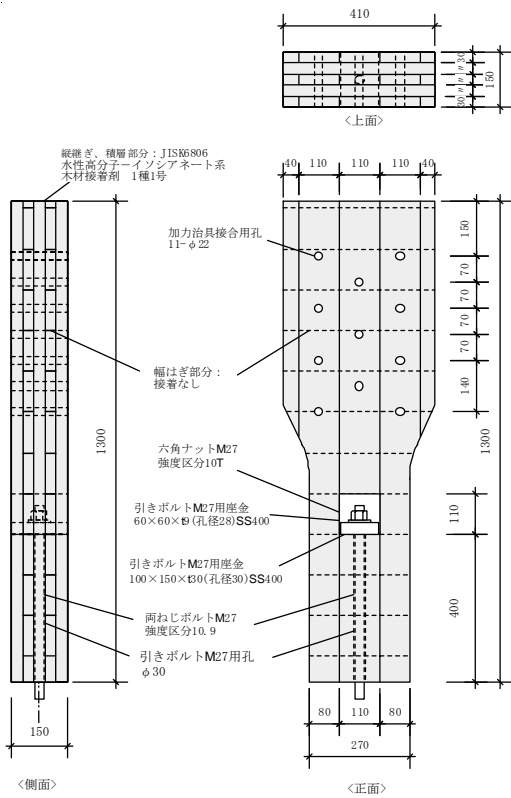
S60SOC1540、S30AOC1550 試験体



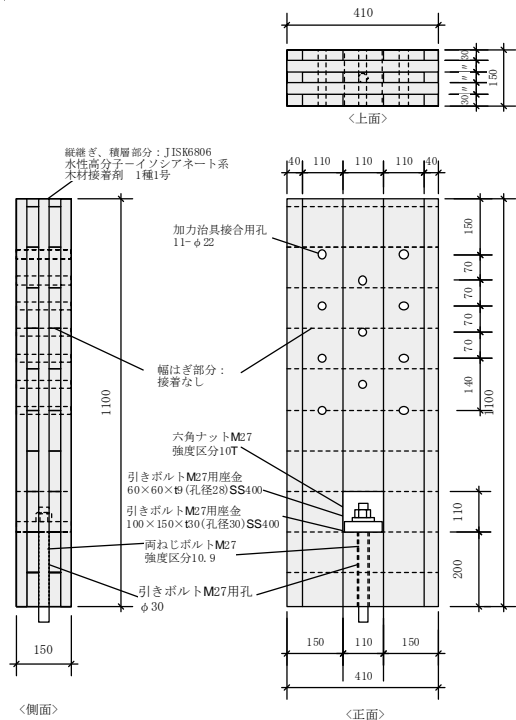
S60SOC1540、S30AOC1550 試験体

図 5.2-9 グループ3の試験体図(2)

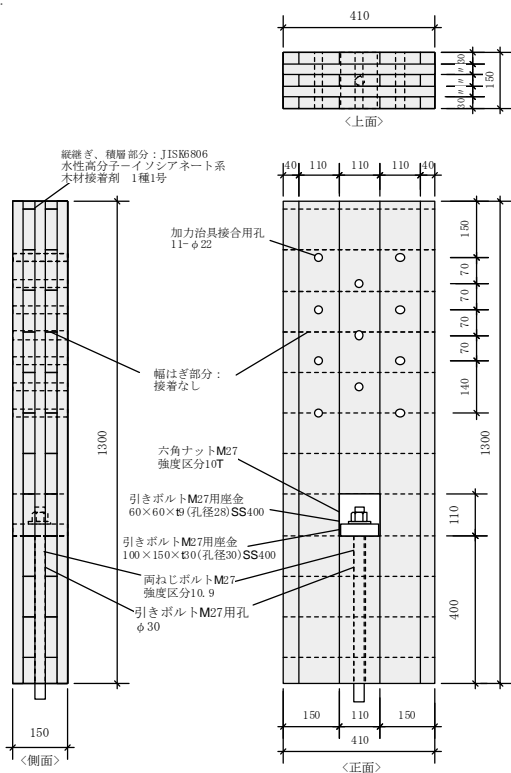
単位：mm



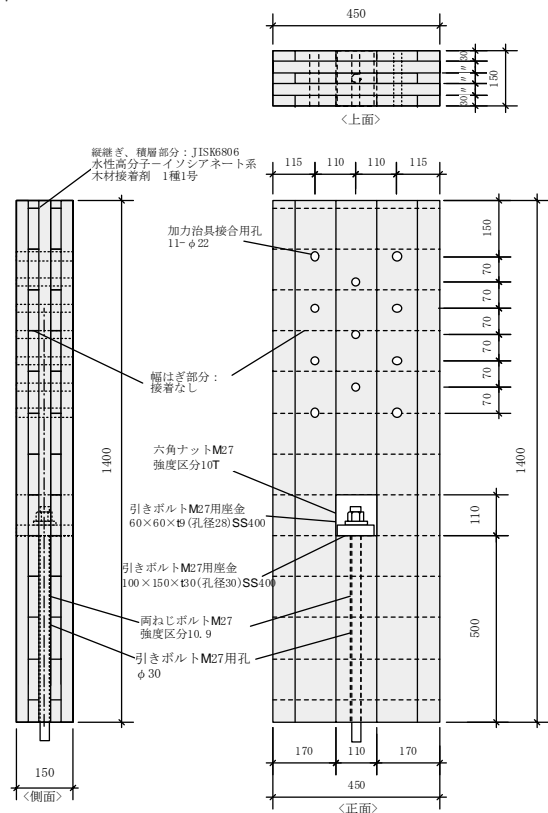
Mx60APS0840 試験体



Mx60APS1520 試験体



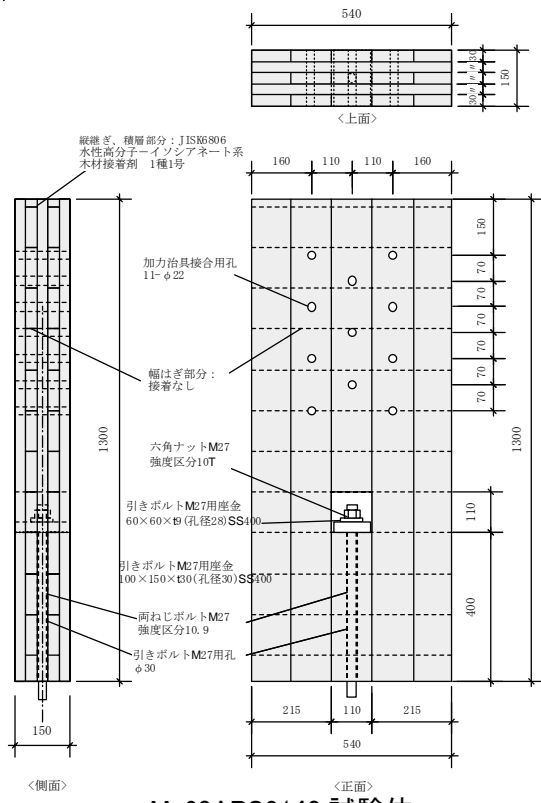
Mx60APS1540 試験体



Mx60APS1750 試験体

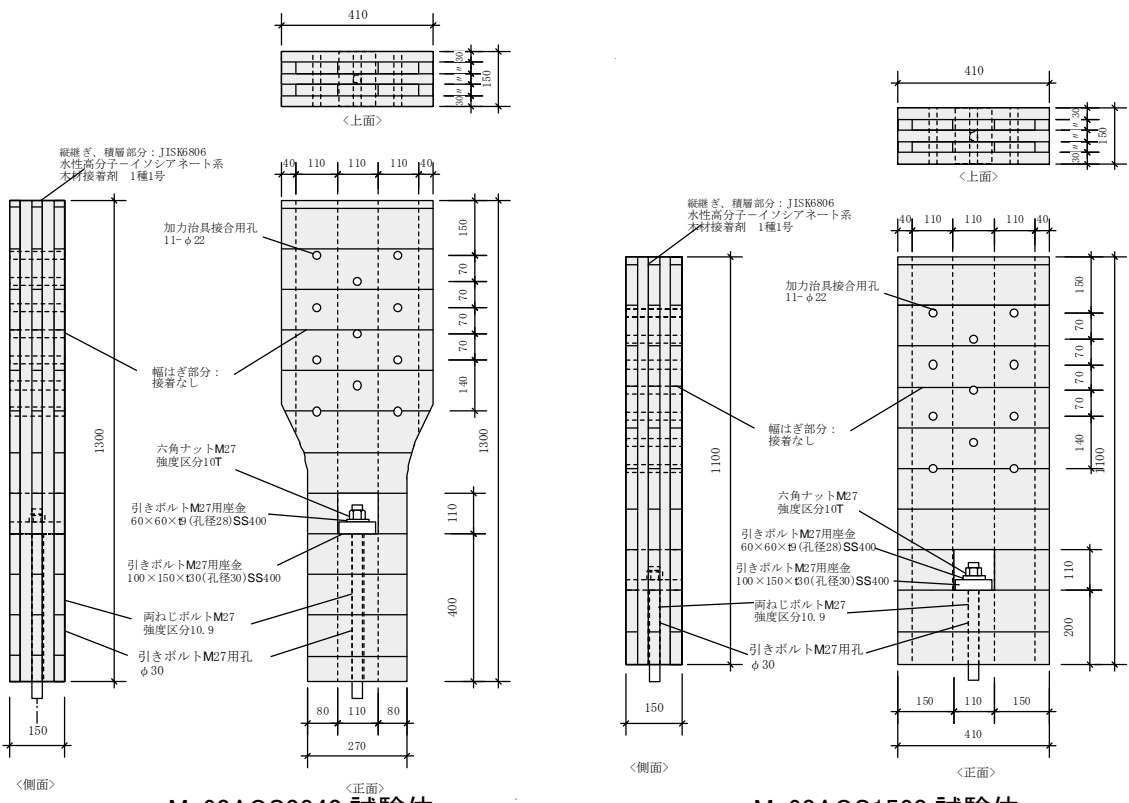
図 5.2-10 グループ4の試験体図(1)

単位: mm



Mx60APS2140 試験体

図 5.2-11 グループ4の試験体図(2)

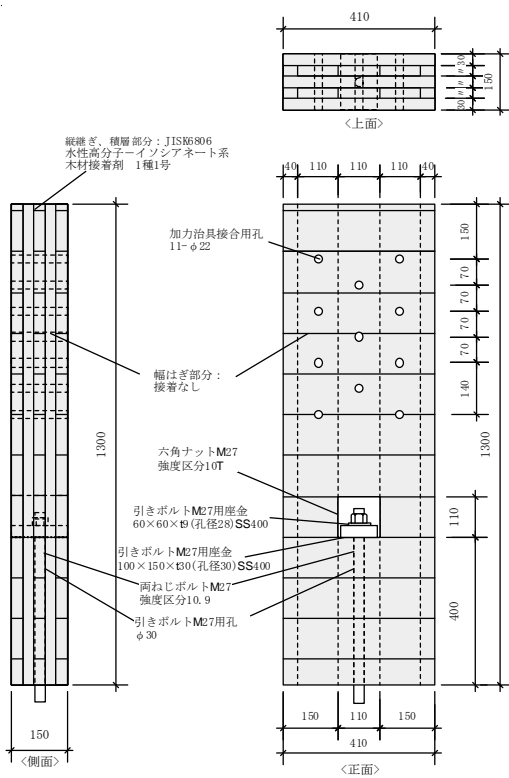


Mx60AOS0840 試験体

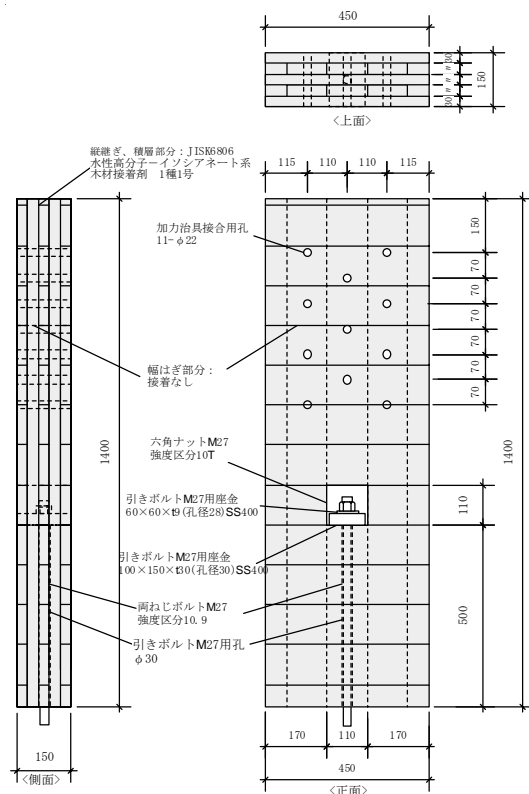
Mx60AOS1520 試験体

図 5.2-12 グループ5の試験体図(1)

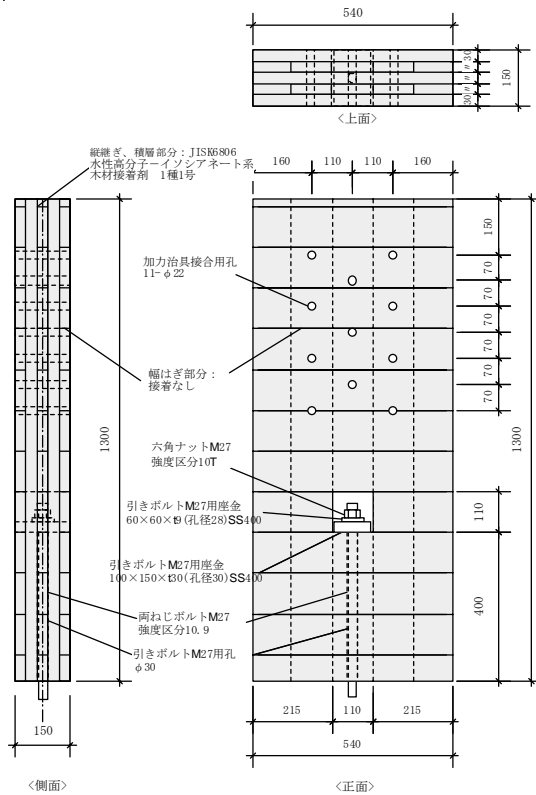
単位: mm



Mx60AOS1540 試験体



Mx60AOS1750 試験体



Mx60AOS2140 試験体

図 5.2-13 グループ 5 の試験体図(2)

単位: mm

(3) 試験体の含水率及び密度

試験体 1 体あたりの密度及び含水率を表 5.2-2 に示す。意図した訳ではないが、第 4 章と同様に 60S のみ全般的に密度が低い結果となった。なお、含水率はハンディタイプの高周波含水率計を用いて計測している。

表 5.2-2 グループ 2～4 の木材の密度、含水率

	試験体番号		密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
		-1		
グループ 2	S60SPC0540	-2	363	9.5
		平均値	366	7.8
		-1	357	7.0
	S60SPC0840	-2	360	7.0
		平均値	359	7.0
	S60SPC1040	-1	370	9.5
		-2	381	10.0
	S60SPC1515	平均値	375	9.8
		-1	369	10.5
		-2	372	7.5
	S60SPC1520	平均値	370	9.0
		-1	375	9.5
-2		370	9.0	
S60SPC1530	平均値	373	9.3	
	-1	380	9.5	
	-2	374	9.0	
S60SPC1540 <sup>*1</sup>	平均値	377	9.3	
	-1	380	10.5	
	-2	380	8.0	
	-3	380	9.0	
	-4	390	10.0	
	-5	390	9.5	
	-6	390	9.0	
平均値	385	9.3		
S60SPC1550	-1	378	7.0	
	-2	373	6.0	
	平均値	376	6.5	

	試験体番号		密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
		-1		
グループ 3	S30APC0540	-2	402	9.0
		-3	413	10.0
		-3	412	9.5
		平均値	409	9.5
	S30APC0840	-1	420	10.5
		-2	419	11.0
		-3	417	12.0
		平均値	419	11.2
	S30APC1040	-1	426	12.5
		-2	418	11.5
		-3	423	13.5
		平均値	422	12.5
S30APC1515	-1	432	7.0	
	-2	434	13.5	
	-3	419	10.5	
	平均値	428	10.3	
S30APC1520	-1	412	10.5	
	-2	444	10.5	
	-3	412	8.5	
	平均値	423	9.8	
S30APC1530	-1	429	11.0	
	-2	423	9.0	
	-3	420	10.0	
	平均値	424	10.0	
S30APC1540 <sup>*2</sup>	-1	420	12.0	
	-2	420	12.5	
	-3	430	13.5	
	-4	430	14.0	
	-5	430	12.5	
	-6	430	15.0	
	平均値	427	13.3	
S30APC1550	-1	410	10.0	
	-2	423	12.5	
	-3	419	8.5	
	平均値	417	10.3	

	試験体番号		密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
		-1		
グループ 4	S30AOC0540	-2	416	11.5
		-3	415	11.0
		-3	414	10.0
		平均値	415	10.8
	S30AOC0840	-1	424	9.0
		-2	417	9.0
		-3	427	12.0
		平均値	423	10.0
	S30AOC1040	-1	410	13.5
		-2	420	12.0
		-3	422	9.0
		平均値	417	11.5
S30AOC1515	-1	419	9.0	
	-2	433	12.0	
	-3	410	10.0	
	平均値	420	10.3	
S30AOC1520	-1	415	9.0	
	-2	420	10.0	
	-3	429	9.0	
	平均値	421	9.3	
S30AOC1530	-1	416	9.5	
	-2	422	9.0	
	-3	431	9.0	
	平均値	423	9.2	
S30AOC1540	-1	431	11.5	
	-2	414	10.5	
	-3	422	10.5	
	平均値	422	10.8	
S30AOC1550	-1	425	12.5	
	-2	422	11.5	
	平均値	427	11.7	



表 5.2-3 グループ 5, 6 の木材の密度、含水率

	試験体番号		密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
		-1	402	10.5
	-2	402	11.0	
	-3	402	10.5	
	-4	403	10.5	
	-5	408	12.0	
	-6	414	14.0	
	平均値	405	11.4	
	-1	402	12.5	
	-2	403	12.5	
	-3	404	13.5	
	-4	405	12.5	
	-5	421	13.0	
	-6	426	13.5	
	平均値	410	12.9	
	-1	390	15.0	
	-2	397	13.5	
	-3	401	13.0	
	-4	401	13.5	
	-5	402	15.5	
	-6	405	13.5	
	平均値	399	14.0	
	-1	391	12.5	
	-2	395	12.5	
	-3	401	13.5	
	-4	407	13.5	
	-5	411	14.5	
	-6	414	14.0	
	平均値	403	13.4	
	-1	405	16.5	
	-2	408	14.0	
	-3	409	18.0	
	-4	410	16.5	
	-5	412	17.5	
	-6	420	17.0	
	平均値	411	16.6	

	試験体番号		密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)
		-1	398	13.0
	-2	398	12.5	
	-3	401	12.5	
	-4	404	13.5	
	-5	405	14.5	
	-6	408	11.0	
	平均値	402	12.8	
	-1	396	13.0	
	-2	397	11.0	
	-3	401	12.0	
	-4	406	13.0	
	-5	412	11.0	
	-6	415	11.0	
	平均値	405	11.8	
	-1	403	13.0	
	-2	403	11.0	
	-3	408	14.0	
	-4	408	13.0	
	-5	412	12.0	
	-6	412	13.5	
	平均値	407	12.8	
	-1	389	14.5	
	-2	394	11.0	
	-3	400	13.0	
	-4	400	12.0	
	-5	401	12.5	
	-6	406	12.0	
	平均値	398	12.5	
	-1	393	14.0	
	-2	397	12.5	
	-3	399	13.5	
	-4	405	14.0	
	-5	408	13.5	
	-6	414	11.5	
	平均値	402	13.2	

### 5.3 試験方法

試験方法は 4.3 と同様の方法で行った。

## 5.4 試験結果

各試験体の縁距離・端距離毎の荷重－変位包絡線を図 5.4-1～図 5.4-10 に示す。破壊性状は写真 5.4-1～写真 5.4-62 に示すとおりである。

図 5.4-1～図 5.4-3 のように縁距離が短いものは変位 5mm 前後で脆性的に破壊し、ほぼ荷重 0 まで落ちているものは角孔部の縁距離部分での引張破断(写真 5.4-1、写真 5.4-19、写真 5.4-41～写真 5.4-44)が多く、フィンガージョイント(以下「FJ」と称する)部分での引張破断も多く見られた(写真 5.4-6)。図 5.4-6～図 5.4-8 のように端距離が短いと座金下部の両脇の部分の CLT ラミナの積層接着面のせん断木部破壊(写真 5.4-2、写真 5.4-7、写真 5.4-10～写真 5.4-12、写真 5.4-22～写真 5.4-26、写真 5.4-45～写真 5.4-48)が多くなり、こちらも脆性的な破壊となった。弱軸試験体は、外層の曲げ破壊を伴うものもあった(写真 5.4-10～写真 5.4-12)。

一方、図 5.4-2 のグループ 5、図 5.4-4、図 5.4-5、図 5.4-9、図 5.4-10 のように縁距離・端距離が共に一定以上長くなると比較的靱性が高くなり、座金直下の積層接着面でのせん断木部破壊が多くなる(写真 5.4-31～写真 5.4-34、第 4 章の写真 4.4-2 など)。これらのうち強軸試験体では、ラミナ境界部の位置によって荷重変位曲線の形状が異なる傾向にあり(ただし、破壊モードは同じ。)、ラミナ境界部の位置が座金側面と一致するグループ 5 では、最大荷重を迎えた後、一気に荷重がゼロとはならず一定の荷重を保ったまま推移し、暫く変位が進んだ後更に荷重低下する傾向にある(図 5.4-2、図 5.4-4、図 5.4-5、図 5.4-10 のグループ 5)。一方、ラミナ境界部が座金の中央に位置するグループ 2、3 は一部引張破断で破壊した脆性的なものを除き、塑性変形が大きくなるものもあり、座金下部の外層ラミナの座金端部直下の木部のせん断と積層接着面でのせん断によって破断する(図 5.4-4、5.4-5 のグループ 2、グループ 3)。弱軸試験体では、外層が直交層となるため、初期降伏からめり込みが進展し、靱性が高くなる傾向にある(図 5.4-4、図 5.4-5、図 5.4-9、図 5.4-10 のグループ 4、グループ 6)。弱軸試験体の壊れ方は強軸試験体と同様に外層接着面のせん断破壊が多いが、外層の加力を受ける方向が繊維直交方向となるので、座金直下の真横部分で積層接着面のせん断木部破壊する(写真 5.4-14、写真 5.4-51～写真 5.4-58)

なお、破壊性状には例外があり、これらの破壊が複合的に起こる場合(写真 5.4-3、写真 5.4-8、写真 5.4-9、写真 5.4-15、写真 5.4-19、写真 5.4-39)や、縁距離が充分であっても引張破断する試験体もある(写真 5.4-5、写真 5.4-13、写真 5.4-61、写真 5.4-62)。

図 5.4-7～図 5.4-10 にグループ 4,5 の各特性値を比較したものを示す。前述のとおり、降伏耐力や最大耐力は縁距離・端距離に比例して高くなる傾向にあるが、初期剛性はどれもほぼ同一、塑性率は弱軸試験体の縁距離・端距離が大きいものが高くなる傾向を示した。荷重変位曲線上では、強軸試験体の縁距離・端距離の大きいものの塑性率は見かけ上、高いように見えるが、外層がせん断破壊した時点で荷重が  $0.8P_{\max}$  以下になっているため、その部分は評価されていない。

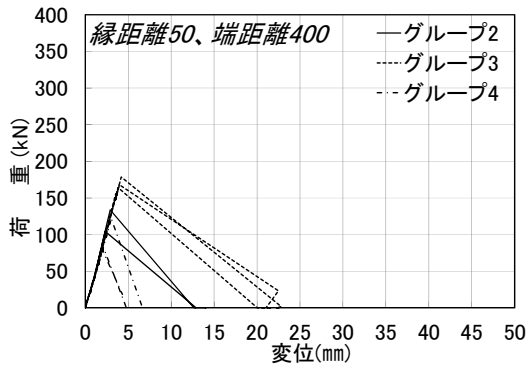


図 5.4-1 縁距離 50 端距離 400 の荷重変位包絡線

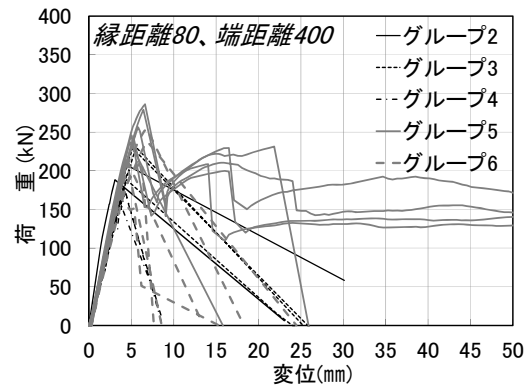


図 5.4-2 縁距離 80 端距離 400 の荷重変位包絡線

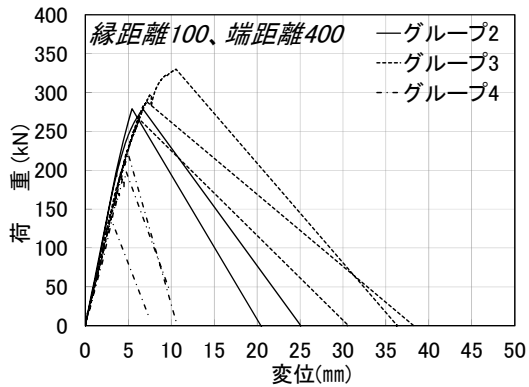


図 5.4-3 縁距離 100 端距離 400 の荷重変位包絡線

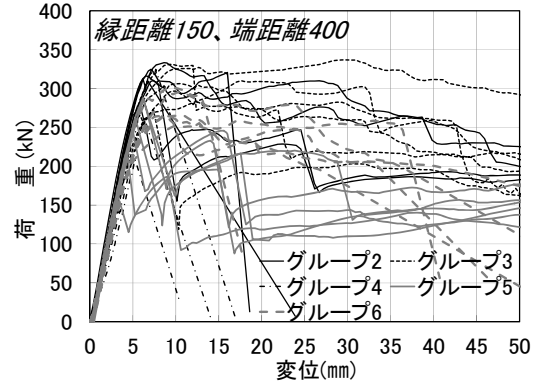


図 5.4-4 縁距離 150 端距離 400 の荷重変位包絡線

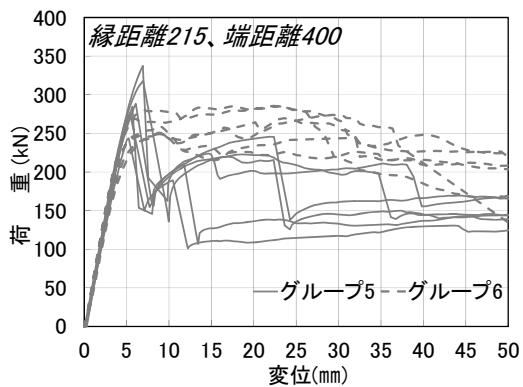


図 5.4-5 縁距離 215 端距離 400 の荷重変位包絡線

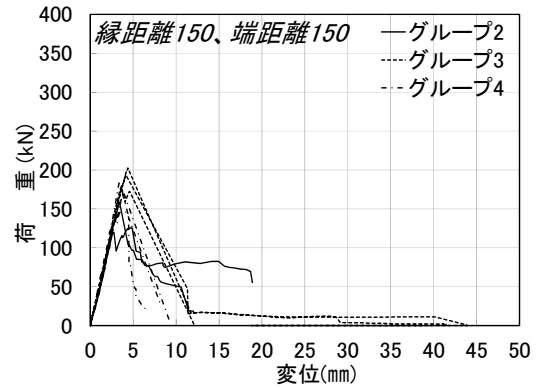


図 5.4-6 縁距離 150 端距離 150 の荷重変位包絡線

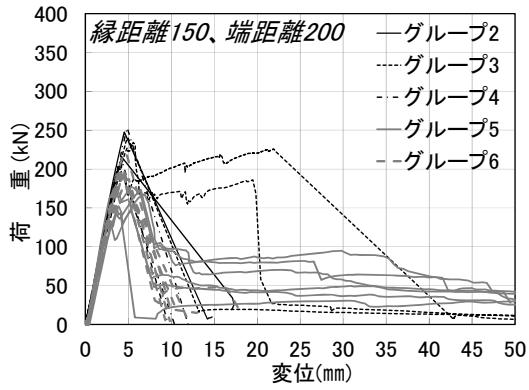


図 5.4-7 縁距離 150 端距離 200 の荷重変位包絡線

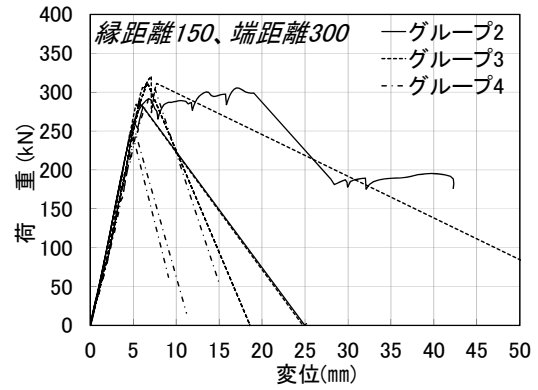


図 5.4-8 縁距離 150 端距離 300 の荷重変位包絡線

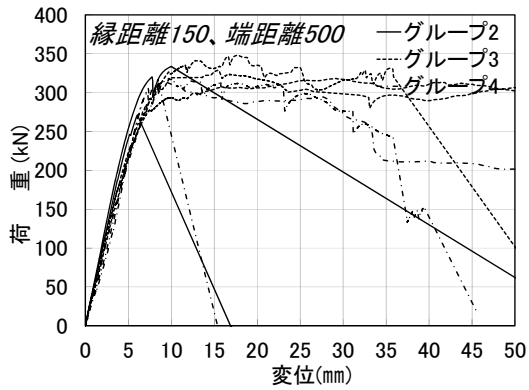


図 5.4-9 縁距離 150 端距離 500 の荷重変位包絡線

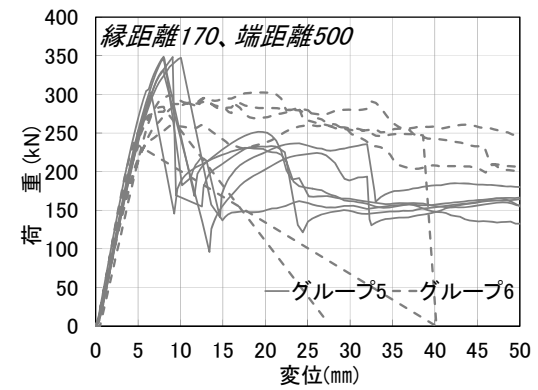


図 5.4-10 縁距離 170 端距離 500 の荷重変位包絡線

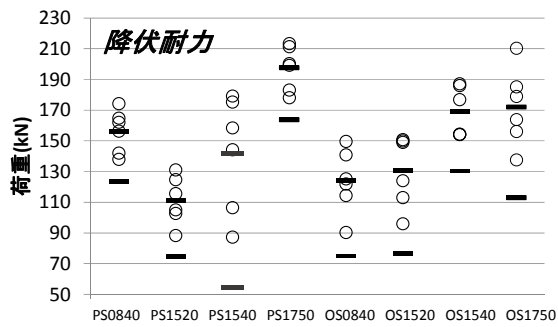


図 5.4-11 グループ 4,5 の降伏耐力の比較

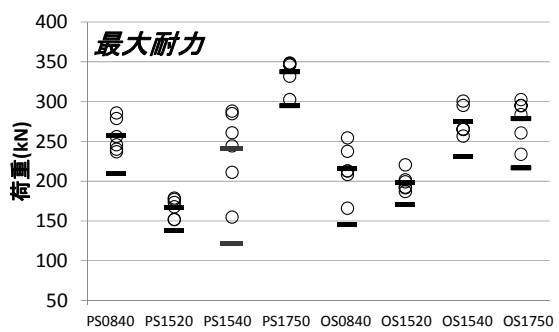


図 5.4-12 グループ 4,5 の最大耐力の比較

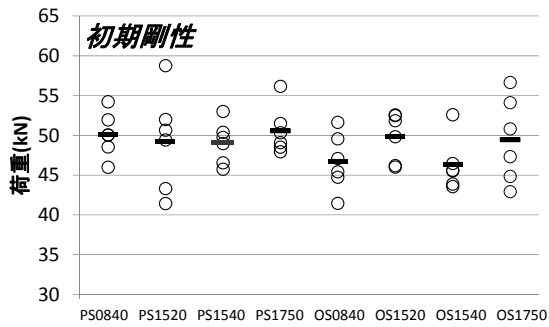


図 5.4-13 グループ 4,5 の初期剛性の比較

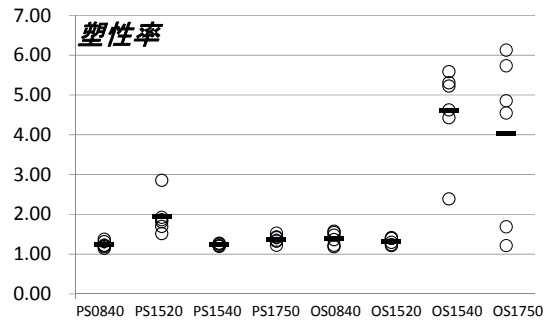


図 5.4-14 グループ 4,5 の塑性率の比較



写真 5.4-1 60SPC0540-2  
引張破断



写真 5.4-2 60SPC1515-2 座金による外層の  
押し抜きせん断+積層接着面のせん断木部  
破壊



写真 5.4-3 60SPC1530-1 積層方向のせん断  
木部破壊と引張断面の複合破壊



写真 5.4-4 60SPC1550-1 引張破断  
(FJ4 箇所)



写真 5.4-5 60SPC1550-1 引張破断の断面



写真 5.4-6 S30APC0540-1 引張破断  
(FJ 1箇所)



写真 5.4-7 S30APC1515-3 積層接着面の  
せん断木部破壊



写真 5.4-8 S30APC1515-3 引張とせん断  
の複合破壊



写真 5.4-9 S30APC1550-3 引張とせん断  
の複合破壊 (接着不良)



写真 5.4-10 S30AOC1515-1 積層接着面  
のせん断木部破壊



写真 5.4-11 S30AOC1515-2 積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-12 S30AOC1515-2 積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-13 S30AOC1550-1 引張破断



写真 5.4-14 S30AOC1550-3 座金下部外層の割れ+積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-15 Mx60APS0840-1 積層接着面せん断木部破壊後、引張破壊 (FJ)



写真 5.4-16 Mx60APS0840-1 解体後 外層 2層分がせん断破壊



写真 5.4-17 Mx60APS0840-2  
解体後 座金下部の圧縮



写真 5.4-18 Mx60APS 0840-2  
外層ラミナ



写真 5.4-19 Mx60APS 0840-3  
引張破壊 (FJ) とせん断の複合的破壊



写真 5.4-20 Mx60APS 0840-5 解体後



写真 5.4-21 Mx60APS1520-1 座金下部  
両脇の積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-22 Mx60APS1520-1 座金下部両脇  
の積層接着面のせん断木部破壊





写真 5.4-23 Mx60APS1520-1  
解体後



写真 5.4-24 Mx60APS1520-1  
解体後 試験体底面より



写真 5.4-25 Mx60APS 1520-2 座金下部  
両脇の積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-26 Mx60APS1520-3 座金下部→  
両脇の積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-27 Mx60APS1540-1  
座金下部の積層接着面のせん断破壊



写真 5.4-28 Mx60APS1540-1  
座金による圧縮めり込み

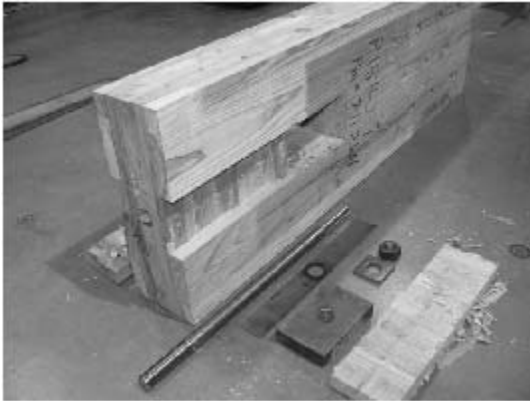


写真 5. 4-29 Mx60APS1540-1  
解体後



写真 5. 4-30 Mx60APS1540-1  
座金下部のめり込み



写真 5. 4-31 Mx60APS1540-3 積層接着面  
のせん断木部破壊



写真 5. 4-32 Mx60APS1540-3  
座金下部のめり込み



写真 5. 4-33 Mx60APS1750-1 積層接着面  
のせん断木部破壊



写真 5. 4-34 Mx60APS1750-1  
座金下部のめり込み



写真 5. 4-35 Mx60APS1750-2  
解体後

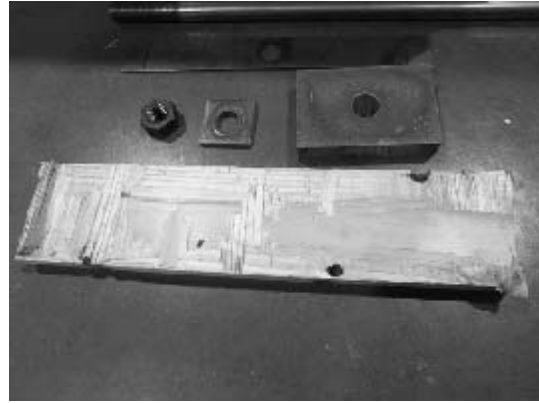


写真 5. 4-36 Mx60APS1750-2 積層接着  
面のせん断木部破壊後の外層



写真 5. 4-37 Mx60APS 1750-5  
解体後 座金下部のめり込み



写真 5. 4-38 Mx60APS 1750-6  
解体後 座金下部のめり込み



写真 5. 4-39 Mx60AOS0840-1  
引張とせん断の複合的な破壊



写真 5. 4-40 Mx60AOS0840-1  
引張とせん断の複合的な破壊



写真 5.4-41 試験体 00840-2  
解体後



写真 5.4-42 試験体 00840-4  
解体後



写真 5.4-43 Mx60AOS0840-5  
引張破壊

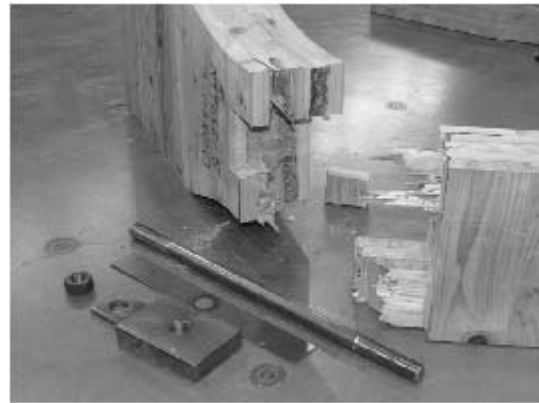


写真 5.4-44 Mx60AOS0840-5  
引張破壊



写真 5.4-45 Mx60AOS1520-1 積層  
接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-46 Mx60AOS1520-1 積層  
接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-47 Mx60AOS1520-1 積層接着面のせん断木部破壊

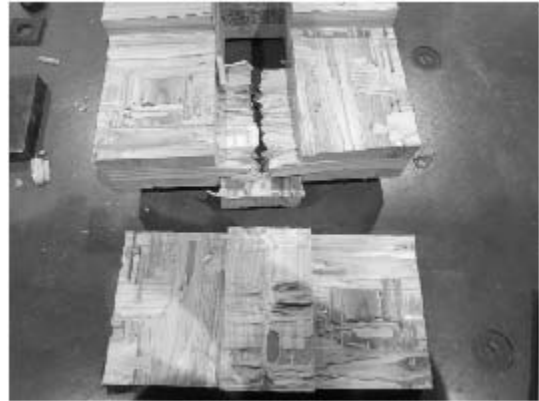


写真 5.4-48 Mx60AOS1520-1 解体後 積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-49 Mx60AOS1520-2  
引張と座金下部両脇せん断の複合的な破壊



写真 5.4-50 Mx60AOS1520-2  
解体後 座金下部の様子  
めり込み無し



写真 5.4-51 Mx60AOS1540-1 積層接着面のせん断木部破壊



写真 5.4-52 Mx60AOS1540-1 積層接着面のせん断木部破壊

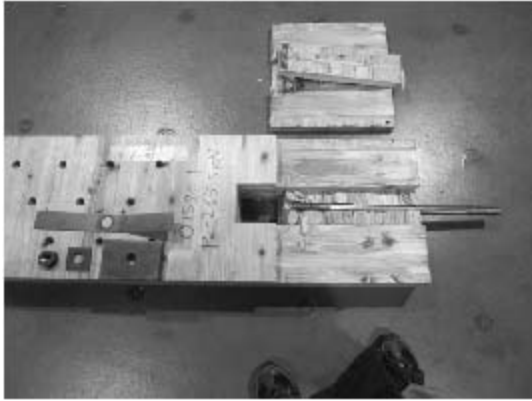


写真 5.4-53 Mx60AOS1540-1  
解体後



写真 5.4-54 Mx60AOS1540-1  
解体後 座金下部のめり込み



写真 5.4-55 Mx60AOS1540-3 積層接着面  
のせん断木部破壊



写真 5.4-56 Mx60AOS1540-5  
解体後 座金下部のめり込み



写真 5.4-57 Mx60AOS1750-1 積層接着面  
のせん断木部破壊



写真 5.4-58 Mx60AOS1750-1 積層接着面  
のせん断木部破壊



写真 5.4-59 Mx60AOS1750-1  
座金のめり込み



写真 5.4-60 Mx60AOS1750-1  
解体後



写真 5.4-61 Mx60AOS1750-4  
引張破壊



写真 5.4-62 Mx60AOS1750-4  
引張破壊 (FJ)

## 5.5 考察

前述の座金下部の積層接着面のせん断木部破壊は、一見不自然な壊れ方に見える。これらの試験体が破壊に至るまでの過程は、図 5.5-1 のとおりに生じると考えられる。強軸試験体において座金下部の CLT が圧縮降伏する場合、直交層と平行層の圧縮による歪み量の違いによりせん断が生じ、外層を押し出して 1 回目の荷重低下が起こる。残った 4 層で変形が進み、1 回目と同様に外層が押し出されて 2 回目の荷重低下となる。ただし、ラミナ境界部の位置が座金の中央部に位置するグループ 2, 3 の試験体や弱軸試験体は 1 回目の荷重低下までのめり込み変形が大きいため 1 回目の荷重低下のみで計測終了となっているものが多い。

縁距離・端距離に応じた最大荷重の違いを図 5.5-2～図 5.5-5 に示す。縁距離及び端距離が大きくなるにつれて最大荷重も高くなり、縁距離は 100～150mm 付近、端距離は 300～400mm 付近を超えたあたりで横ばいとなった。縁距離が 100mm～150mm 付近で比例限度となる理由は、引張破断からせん断の破壊モードに移行するためである。端距離が比例しなくなる理由は、せん断応力が一様に作用しているとは考えがたく、端距離が長くなればなるほど面積比例しなくなるためと考えられる。文献<sup>17)</sup>では集成材における引きボルト接

合のせん断長さが 300mm 程度を越えるとほぼ一定の値になると述べられており、積層接着面のローリングシヤ的な木部のせん断と木材の繊維方向のせん断という異なる破壊現象ではあるものの、応力が伝達する面積は同じであると考えられる。

材料物性に着目すると、ヤング係数による影響は見られなかったが、密度が低いグループ2の試験体の最大荷重が低くなる傾向が見られた。これは第4章でヤング係数と密度が強度性能に及ぼす影響を検証した際の結果と一致する。

座金端部と幅はぎ位置の関係については、破壊性状が第4章の写真 4.4-13 や写真 5.4-27 に代表されるような座金下部の積層接着面のせん断木部破壊において差異が見られた。すなわち、座金下部の積層接着面のせん断木部破壊が生じた図 5.5-2 若しくは図 5.5-3 の縁距離 150 端距離 400 の試験体に着目すると、グループ3及び4がグループ6より高い結果となった。材料物性が同じもの同士で比較すると第4章の Mx60A を Mx60PC とし、本章の Mx60APS1540 と比較すると図 5.5-6 のとおり座金端部と幅はぎ位置は一致しない方が高い最大耐力が得られた。これは積層接着面のせん断木部破壊に加えて、座金端部位置のラミナにせん断力が生じるためと思われる。

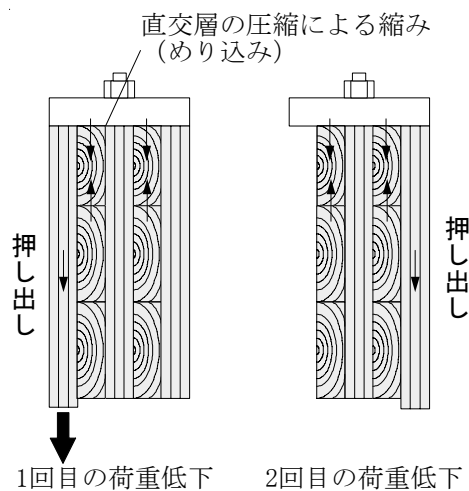


図 5.5-1 座金下部の積層接着面が破断するまでの過程

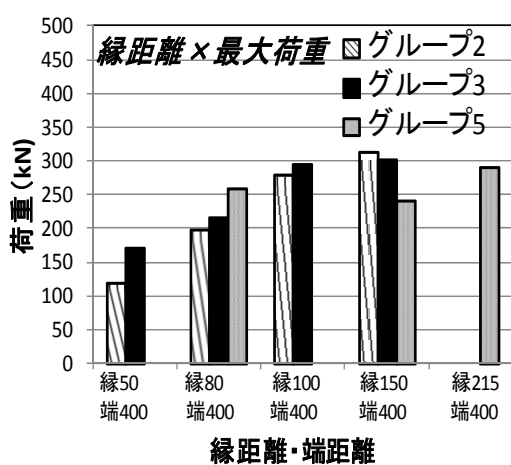


図 5.5-2 強軸試験体における縁距離と最大荷重の関係

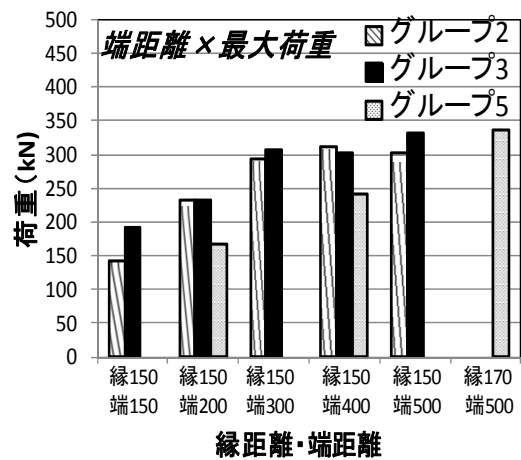


図 5.5-3 強軸試験体における端距離と最大荷重の関係



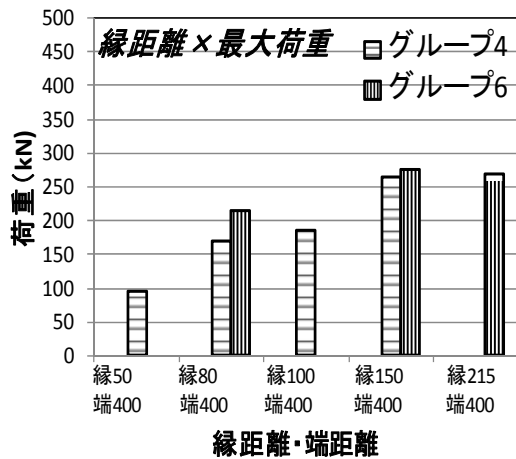


図 5.5-4 弱軸試験体における縁距離と最大荷重の関係

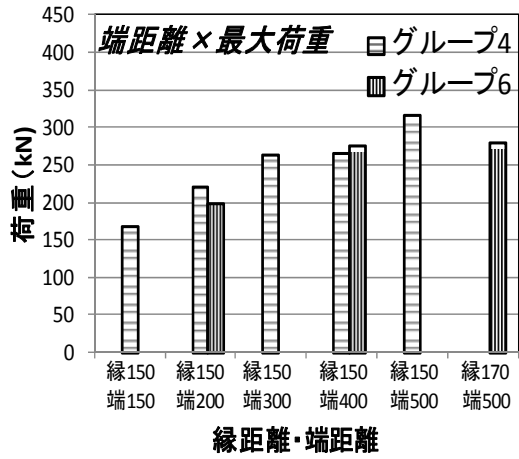


図 5.5-5 弱軸試験体における端距離と最大荷重の関係

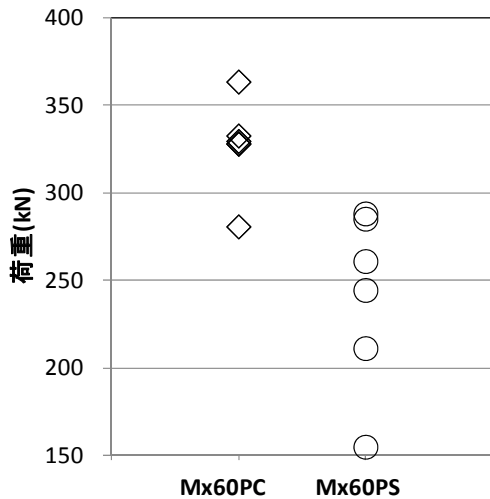


図 5.5-6 幅はぎ位置と座金端部位置の違いによる影響

## 5.6 まとめ

縁距離・端距離に応じた最大荷重及び破壊性状の違いについて分析を行い、試験体の降伏から破壊に至るまでのメカニズムについて考察を行った。縁距離が短くなると引張破壊によって最大耐力が決定し、その値も減少する。端距離が短くなるとせん断破壊によって最大耐力が決定し、その値も減少する結果となった。引きボルト接合は座金による木部の圧縮降伏によって降伏していくが、縁距離及び端距離が短いと最大荷重も小さくなるため、降伏前に破断することが分かった。座金端部と幅はぎ位置が一致しない場合は最大耐力が高くなることが分かった。

## 6. CLT 厚さ及びボルト本数の影響試験

### 6.1 実験の目的

第3章ではCLTの圧縮剛性が面圧面積と比例関係にあることが分かっており、第5章では引きボルトの角孔横の引張断面積が最大耐力に影響を与えていることが分かった。これらは当然CLTの厚みにも影響するはずである。偏心荷重の低減効果を期待して、均等に座金で圧縮させるためボルト2本入れた仕様についても確認を行った。

なお、本章の研究内容の一部は文献34)で発表している。

### 6.2 試験体

#### (1) 試験の種類

試験体仕様は表6.2-1に示すとおり10仕様60体とした。各試験体の断面図を図6.2-1に示す。試験体材料は直交集成板の日本農林規格に定めるスギCLT(3層3プライ、3層4プライ、5層5プライ、7層7プライ)とし、幅はぎ接着していない材料とした。

表6.2-1中の※印の試験体については、第5章の試験体Mx60APS2140及びMx60AOS2140と同一であるため、実際には試験は行わず、第5章のデータを参照することとする。試験体はいずれも縁距離・端距離を充分に取り、座金下部の積層接着面のせん断木部破壊で破断するように制御した。また、試験体P55D及びO55Dは、CLT材の2層目と4層目にボルトを合計2本入れることによって偏心荷重が少なくなり、第5章図5.4-11とは異なる破壊性状になることを期待して試験体に追加したものである。

試験体材料は直交集成板の日本農林規格に定めるスギCLT(Mx60、A種構成)とし、幅はぎ接着していない材料とした。

なお、当該試験ではボルトと座金で先行降伏させないため、ボルトの強度と断面、及び座金の厚みは余裕を持たせた仕様としている。

表 6.2-1 試験体厚さ及びボルト本数の影響試験の仕様

グループ	試験体番号	CLTの種類	CLTの厚み(mm)	ボルトの種類		ボルトの本数(本)	座金の種類	加力方向	試験体形状	縁距離(mm)	端距離(mm)	試験体数	試験場
				ねじ規格	強度区分								
7	P33	Mx60-3-3	90	M27	10.9	1	材質：SS400、幅100×奥行き150×厚み30	強軸方向	ラミナ境界部位置が座金両端と一致	215	400	6	(公財)住木センター
	P34	Mx60-3-4	120			1						6	
	P55※1	Mx60-5-5	150	1	6								
	P55D	Mx60-5-5	150	M20	2	6						(一財)建材試験センター	
	P77	Mx60-7-7	210	M27	12.9	1							
8	O33	Mx60-3-3	90	M27	10.9	1	弱軸方向					6	(公財)住木センター
	O34	Mx60-3-4	120			1						6	
	O55※2	Mx60-5-5	150	1	6								
	O55D	Mx60-5-5	150	M20	2	6						(一財)建材試験センター	
	O77	Mx60-7-7	210	M27	12.9	1							
合計												60	

※ 第5章の試験体Mx60APS2140(※1)及びMx60AOS2140(※2)と同一であるため、試験を兼ねている。

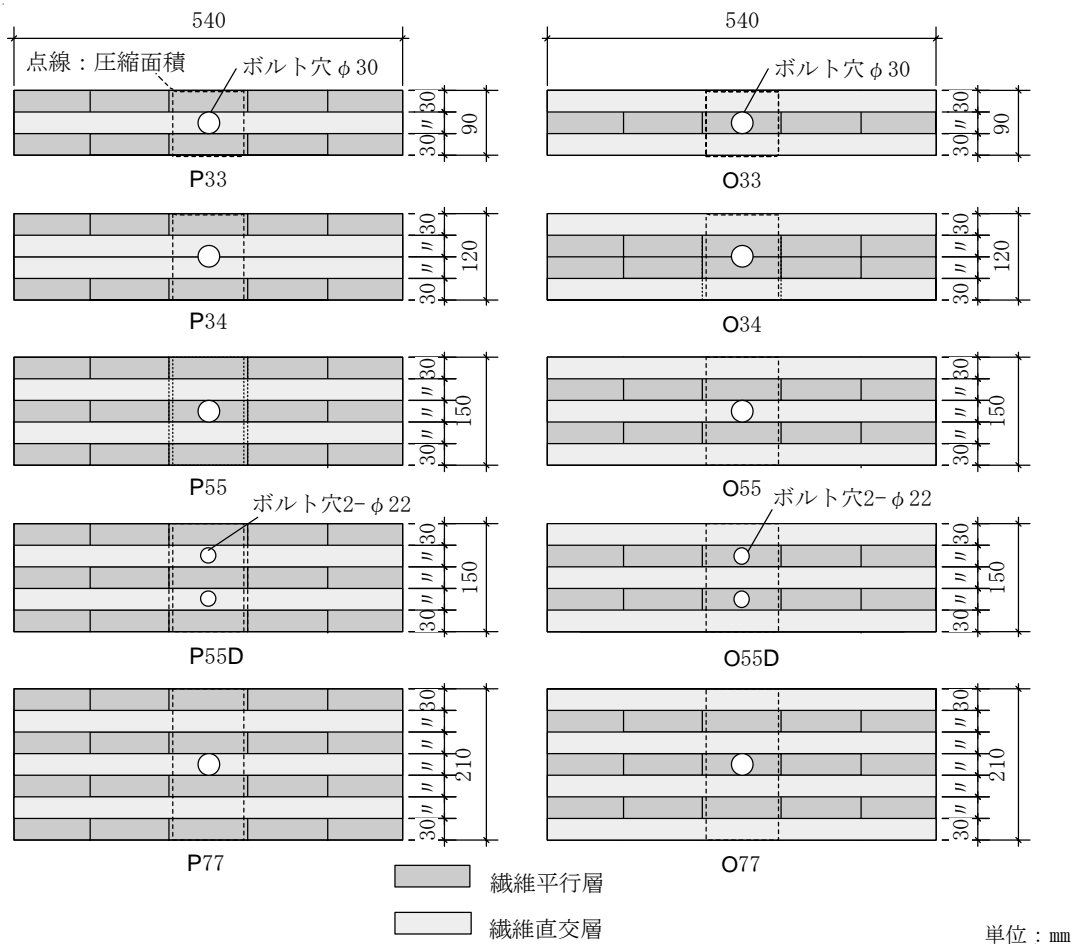


図 6.2-1 CLT 厚さ、ボルト本数の影響試験 試験体断面図

## (2) 試験体の仕様

両ねじボルト及び座金の仕様を図 6.2-2～図 6.2-3 に示す。材質については、第 4 章、第 5 章と同様、ボルトや座金が先行降伏しないよう、十分な強度を有するものを選択している。

試験体仕様を図 6.2-4～図 6.2-7 に示す。第 4 章、第 5 章と同様、全ての試験体で CLT パネルの幅はぎ部は接着しておらず、縦継ぎ及び積層面の接着は JIS K 6806 に規定される水性高分子－イソシアネート系木材接着剤 1 種 1 号とした。

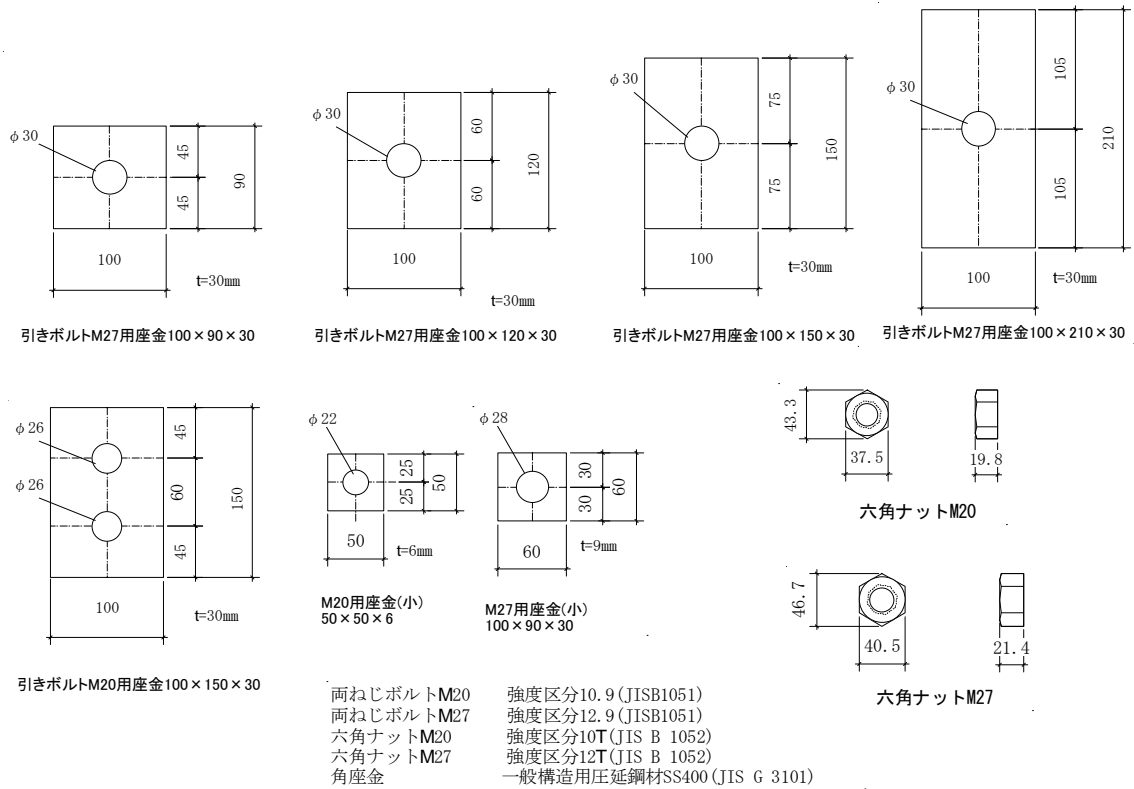


図 6.2-2 角座金及びナットの製作図

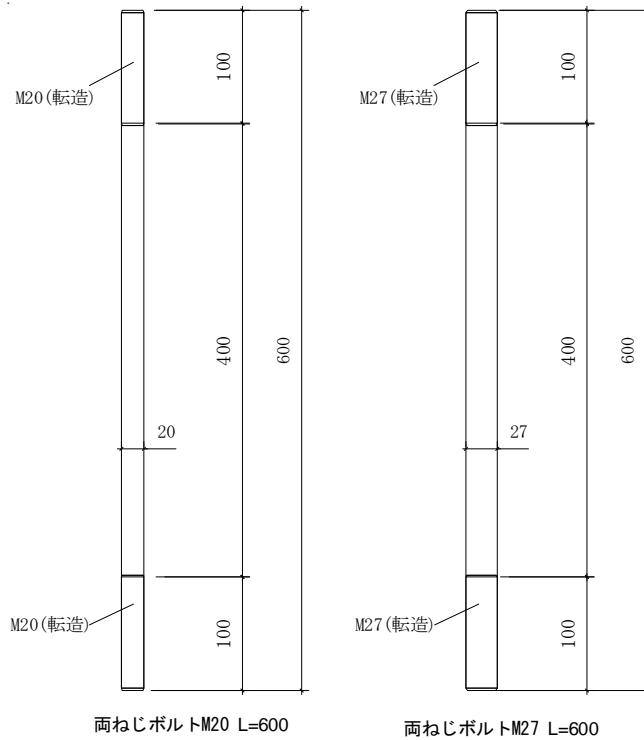
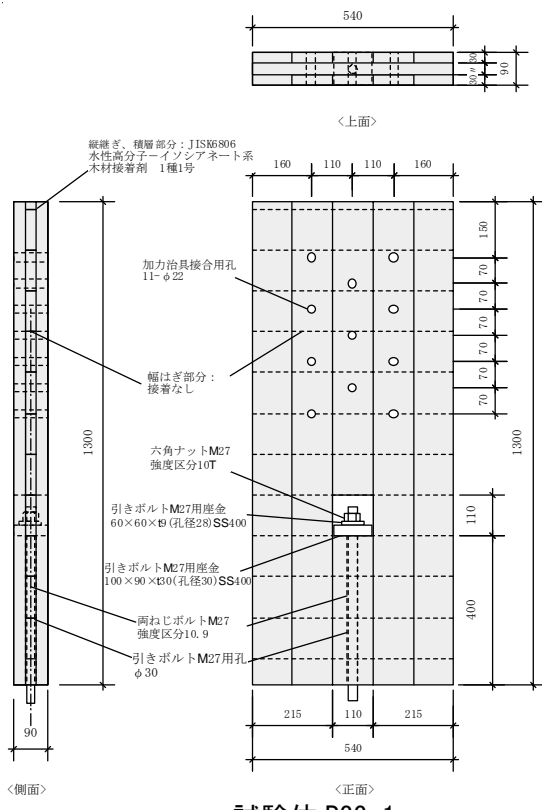
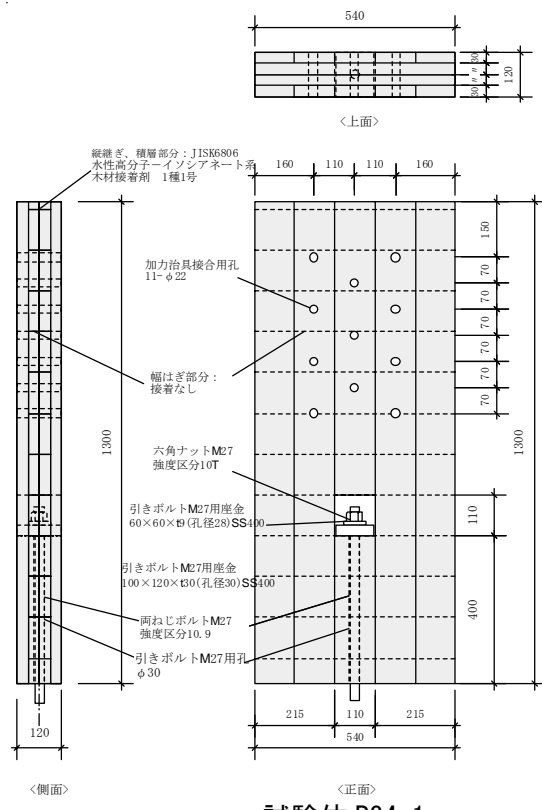


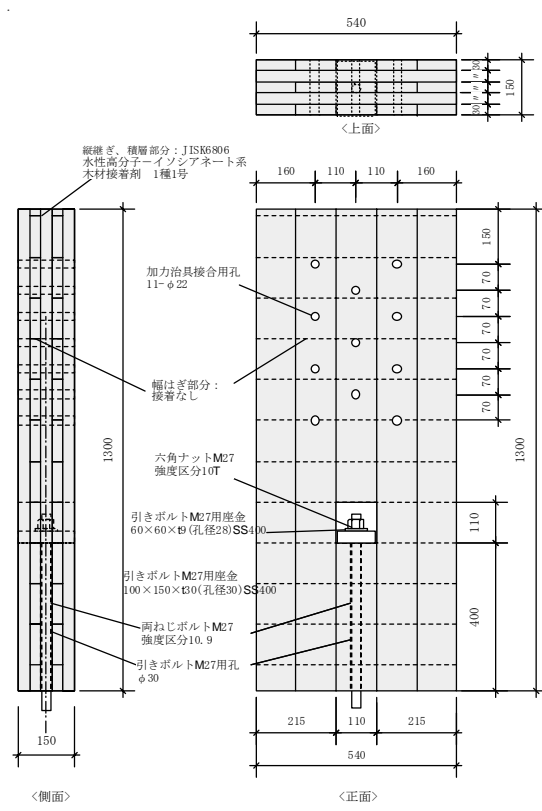
図 6.2-3 両ねじボルト M20、M27 の製作図



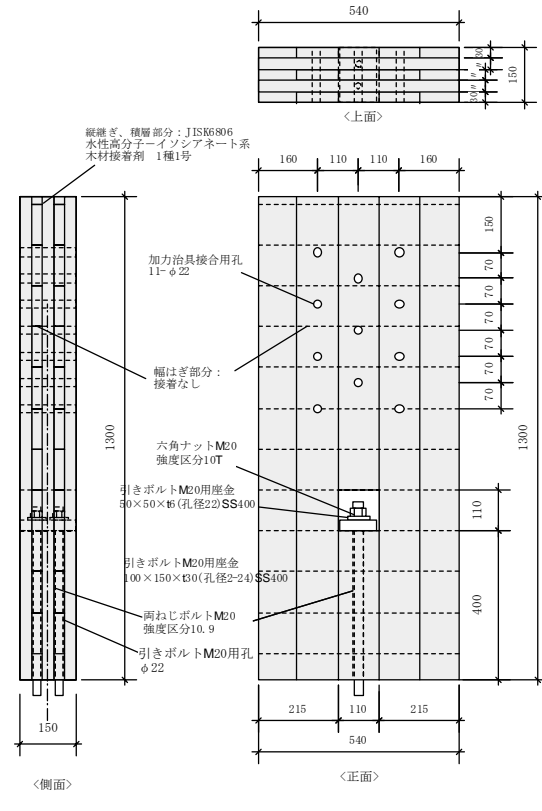
試験体 P33-1



試験体 P34-1



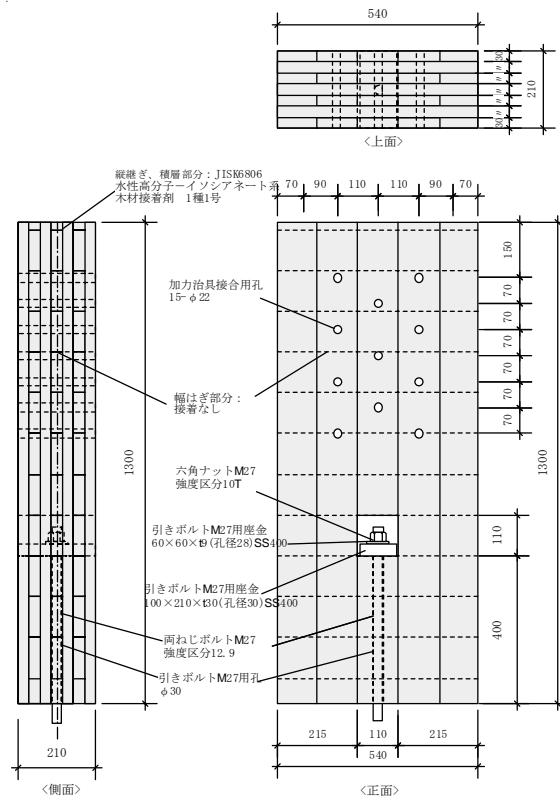
試験体 P55-1



試験体 P55D-1

図 6.2-4 グループ 7 の試験体図(1)

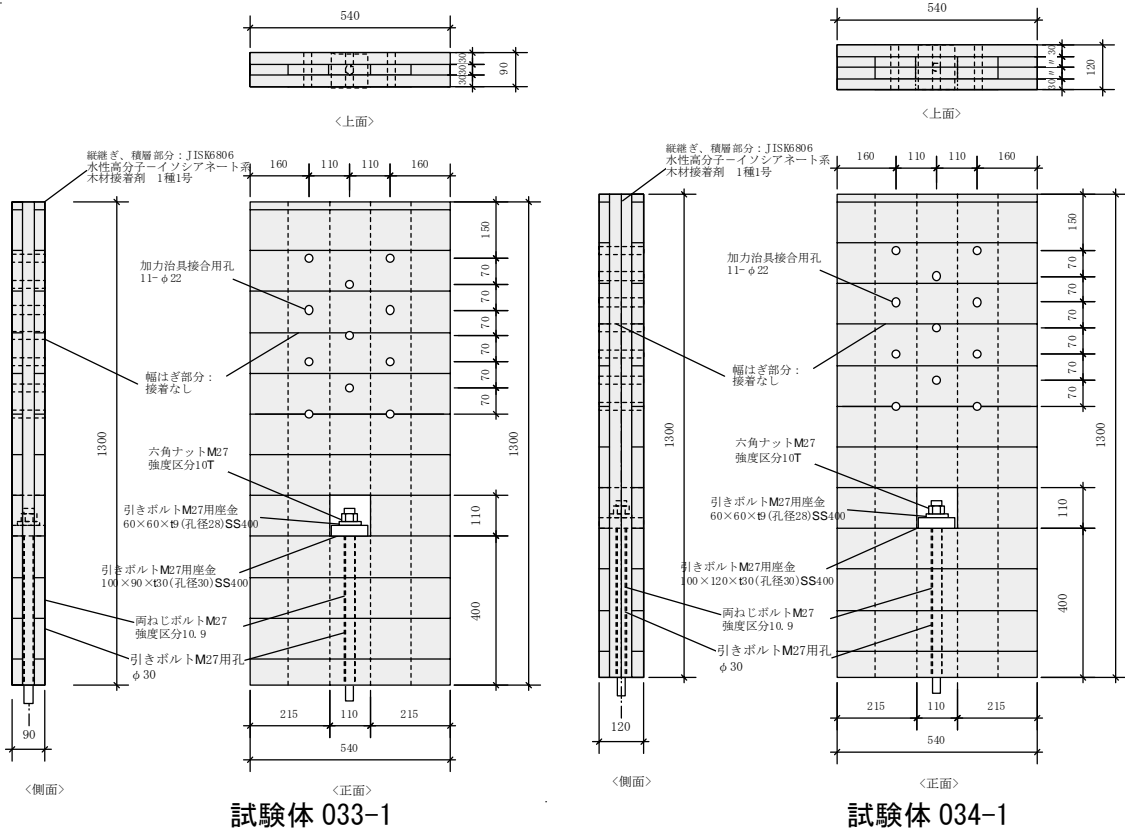
単位: mm



試験体 P77-1

単位: mm

図 6.2-5 グループ 7 の試験体図(2)

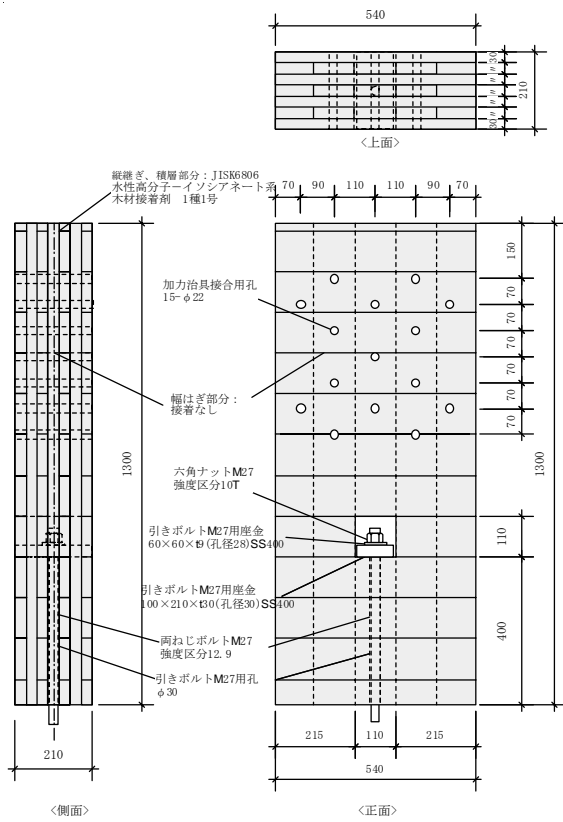
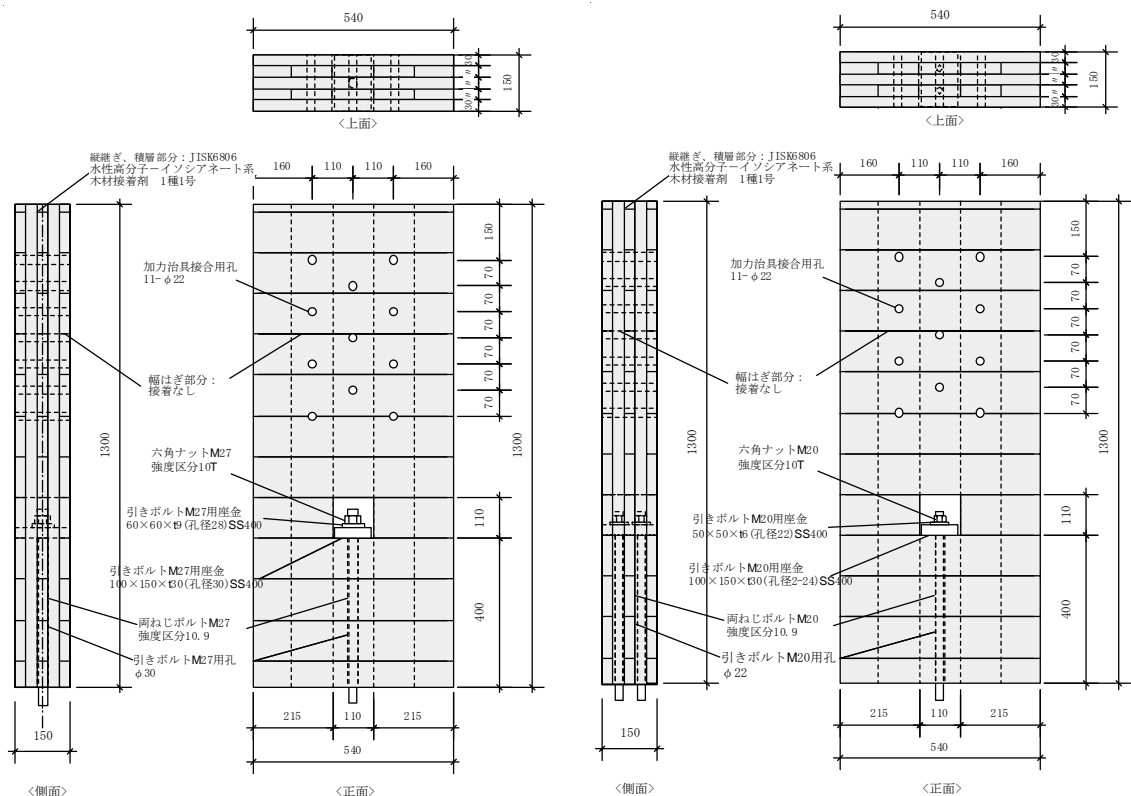


試験体 033-1

試験体 034-1

図 6.2-6 グループ 8 の試験体図(1)

単位: mm



単位: mm

図 6.2-7 グループ 8 の試験体図(2)

### (3) 試験体の含水率及び密度

試験体 1 体あたりの密度及び含水率を表 6.2-2 に示す。

表 6.2-2 グループ 7, 8 の木材の密度、含水率

試験体番号	密度(kg/m <sup>3</sup> )		
	密度(kg/m <sup>3</sup> )	含水率(%)	
P33	-1	399	14.0
	-2	404	12.0
	-3	407	12.0
	-4	412	12.5
	-5	416	13.5
	-6	417	13.0
	平均値	409	12.8
P34	-1	409	10.0
	-2	405	11.0
	-3	405	11.0
	-4	407	13.0
	-5	411	10.5
	-6	412	12.0
	平均値	408	11.3
P55 <sup>**1</sup>	-1	405	16.5
	-2	408	14.0
	-3	409	18.0
	-4	410	16.5
	-5	412	17.5
	-6	420	17.0
	平均値	411	16.6
P55D	-1	427	10.9
	-2	426	10.9
	-3	416	10.8
	-4	426	11.3
	-5	422	10.9
	-6	420	11.2
	平均値	423	11.0
P77	-1	423	9.9
	-2	421	11.1
	-3	419	10.5
	-4	424	10.4
	-5	427	11.3
	-6	416	10.6
	平均値	422	10.6

### 6.3 試験方法

試験方法は 4.3 と同様の方法で行った。

ただし、弾性域における座金の傾きが、初期剛性や降伏耐力に及ぼす影響を調べるため、図 6.3-1 に示すように座金の傾きを計測し、試験体厚さ及びボルトの本数による影響を確認することとした。

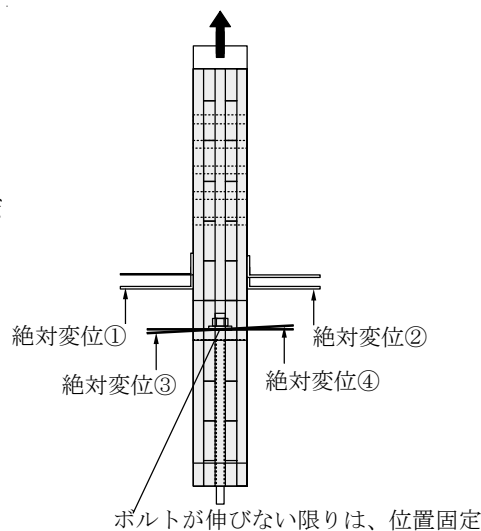


図 6.3-1 座金の傾きの計測



## 6.4 試験結果

### (1) CLTの厚さによる影響について

各試験体の荷重－変位包絡線を図 6.4-1 及び図 6.4-2 に示す。破壊性状は写真 6.4-1～写真 6.4-78 に示すとおりである。

強軸試験体については、P34 から P77 試験体までは第 5 章図 5.4-11 と同様に座金下部のめり込みにより降伏し、外層がせん断破壊する破壊性状となったが(写真 6.4-7～写真 6.4-30)、P33 のみ 70～100kN あたりで外層が左右に割り裂けた後、試験体下部が試験体幅方向に離間し、座金下部へのせん断破壊若しくは角穴の横の強軸ラミナの引張破壊となった(写真 6.4-1～写真 6.4-6)。これはボルト穴径が 30mm であることにより試験体中央部は繊維方向ラミナのみとなり、繊維と直交方向に割り裂けることになってしまったためである(図 6.4-5)。図 6.4-1 では試験体 P33 のみ降伏が早く、降伏後の最大荷重に至るまでの変形が大きいことが分かる。

弱軸試験体については、どの厚みも破壊性状に違いはなく、座金下部の降伏後、外層へのめり込みが進展し、外層が面外にめくれるように加力され、脱落することによって荷重が低下した(写真 6.4-30～写真 6.4-74)。例外として引張破壊も見られ、少なからず FJ が影響している(写真 6.4-75～写真 6.4-78)。

各特性値を比較したものを図 6.4-7～図 6.4-10 に示す。結果から、最大荷重及び降伏耐力は試験体の厚さに比例して大きくなるが、剛性については想定より CLT の厚みによる差が出ない結果となった。3 層 3 プライから 5 層 5 プライまでは、平行層の面圧面積に応じておおきくなっているが、5 層 5 プライから 7 層 7 プライまでは、やや低下しているように見える。また、厚みが同じで繊維方向が異なる試験体同士を比較すると強軸試験体(P●●)より弱軸試験体(O●●)の方が初期剛性が低くなる傾向にある。

降伏時の座金の傾きの測定結果を図 6.4-11 に示す。試験体 P33～O55 までは比較的座金の傾きが大きく、ボルト 2 本差しの P55D 及び O55D 並びに試験体厚さが厚い P77 及び O77 は傾きが少ない結果となった。傾きが少ない P55D～O77 は、図 6.4-9 に示すとおり初期剛性のばらつきが少なく傾向にあるが、図 6.4-7 に示すとおり降伏耐力にはあまり影響が無いことが分かった。

塑性率については、図 6.4-10 に示すとおり試験体 O33 が大きくなる結果となった。これは図 6.4-6 に示すとおり、平行層が 1 層分しか無いばかりでなく、ボルト穴によって更に平行層の面積の割合が少なくなっているためと考えられる。弱軸試験体は他の厚みにおいても強軸試験体より塑性率が大きくなる傾向が見られた。

### (2) ボルト 2 本差しの影響について

ボルト 1 本仕様と 2 本仕様を比較したグラフを図 6.4-3 及び図 6.4-4 に示す。降伏時の座金の傾きの測定結果は前述したとおり、初期剛性のばらつきが少なくなる効果は認められたが、その他の特性値や破壊性状には影響が無かった。

降伏時の座金の傾きの測定結果を図 6.4-11 に示す。試験体 P33～O55 までは比較的座金の傾きが大きく、ボルト 2 本差しの P55D 及び O55D 並びに試験体厚さが厚い P77 及び O77 は傾きが少ない結果となった。傾きが少ない P55D～O77 は、初期剛性のばらつきが少ない傾向にあるが、図 6.4-7 に示すとおり降伏耐力にはあまり影響が無いことが分かった。

このため、少なくとも剛性が面積比例しない原因は面圧部分の偏心によるものではないこと

が分かった。

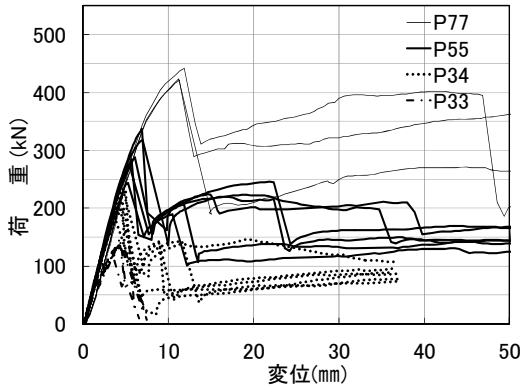


図 6.4-1 グループ 7 の荷重変位包絡線

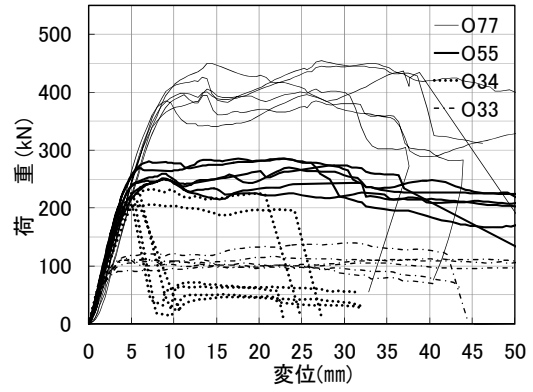


図 6.4-2 グループ 8 の荷重変位包絡線

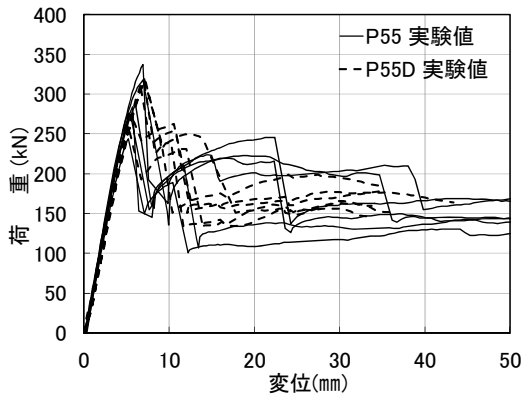


図 6.4-3 P55 及び P55D の荷重変位包絡線

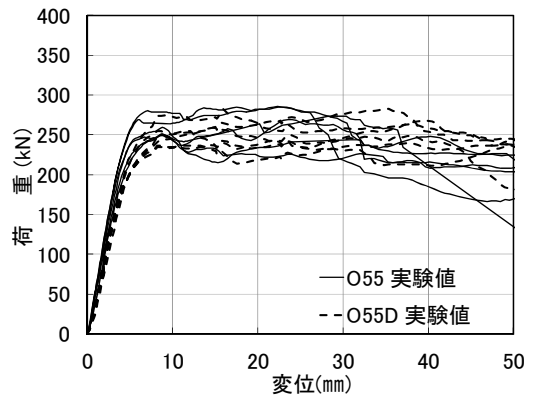


図 6.4-4 O55 及び O55D の荷重変位包絡線

この部分の平行層が割裂しやすく、割裂後は直交層が残らない

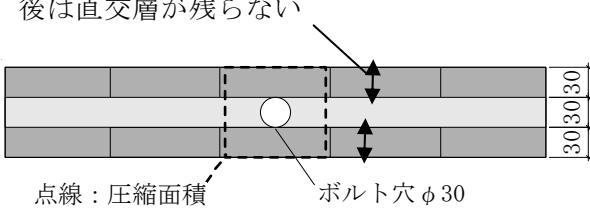


図 6.4-5 試験体 P33 の断面

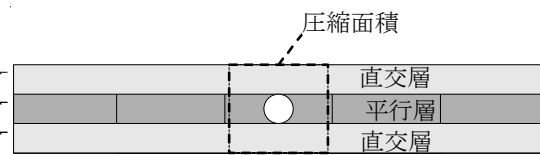


図 6.4-6 試験体 O33 の断面

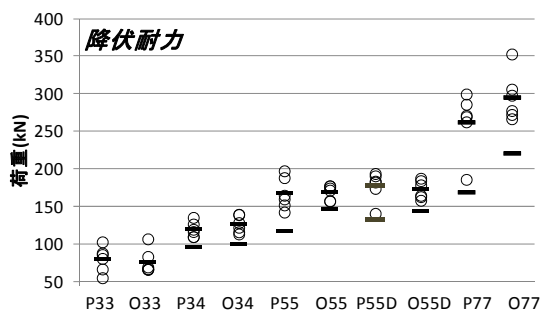


図 6.4-7 降伏耐力の比較

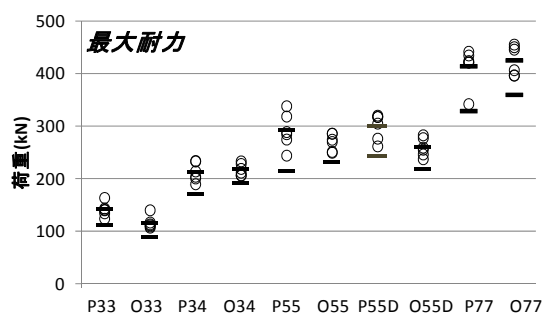


図 6.4-8 最大耐力の比較

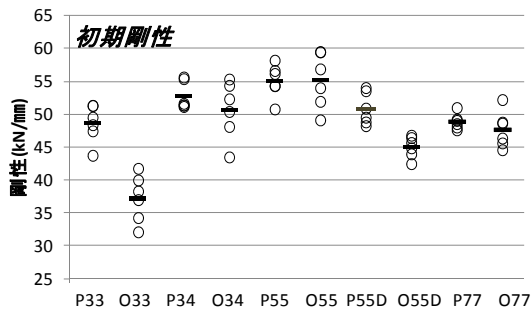


図 6.4-9 初期剛性の比較

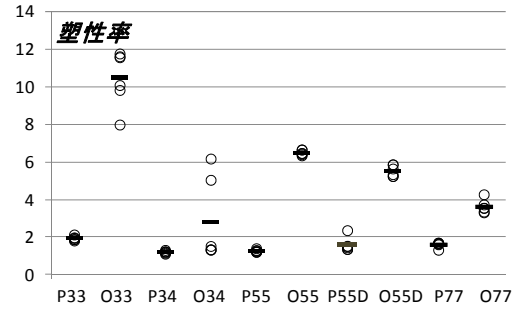


図 6.4-10 塑性率の比較

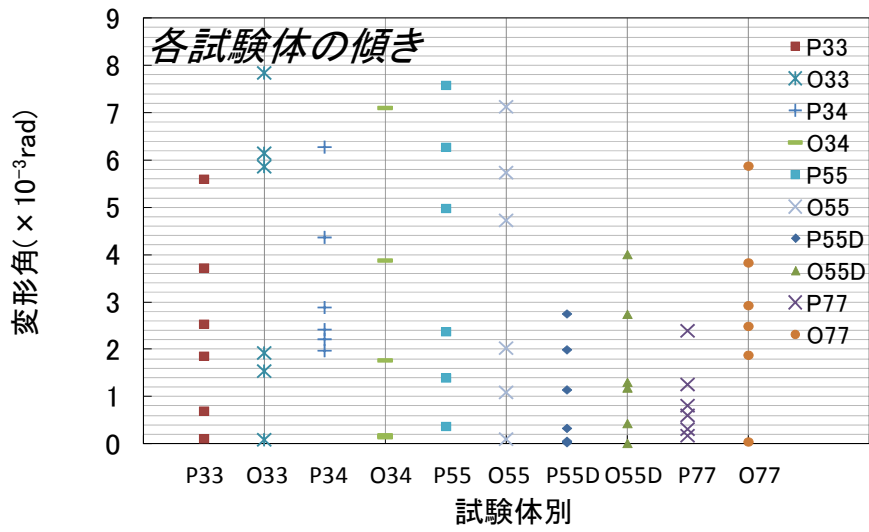


図 6.4-11 各試験体の  $P_y$  時における座金の傾き



写真 6.4-1 P33-1  
外層ラミナ中央部の割れ→  
積層接着面のせん断木部破壊、引張破壊

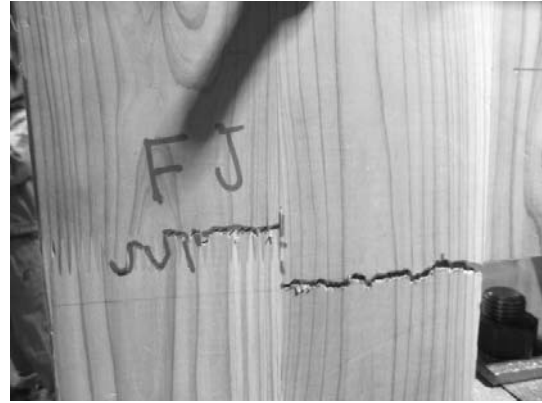


写真 6.4-2 P33-1  
引張破壊 (FJ)



写真 6.4-3 P33-2  
外層ラミナ中央部の割れ→  
積層接着面のせん断木部破壊、引張破壊



写真 6.4-4 P33-2  
外層ラミナ中央部の割れ→  
積層接着面のせん断木部破壊、引張破壊



写真 6.4-5 P33-2  
外層ラミナ中央部の割れ→  
積層接着面のせん断木部破壊、引張破壊



写真 6.4-6 P33-2  
外層ラミナ中央部の割れ→  
積層接着面のせん断木部破壊、引張破壊



写真 6.4-7 P34-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-8 P34-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-9 P34-1  
解体後



写真 6.4-10 P34-2  
裏面損傷無し



写真 6.4-11 P34-3  
解体後



写真 6.4-12 P34-4  
座金下部のめり込み



写真 6.4-13 P55-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-14 P55-1 座金による圧縮降伏、積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-15 P55-1  
解体後



写真 6.4-16 P55-2  
座金下部のめり込み



写真 6.4-17 P55-2  
座金下部のめり込み



写真 6.4-18 P55-4  
解体後



写真 6. 4-19 P55D-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6. 4-20 P55D-1  
解体後 座金下部のめり込み

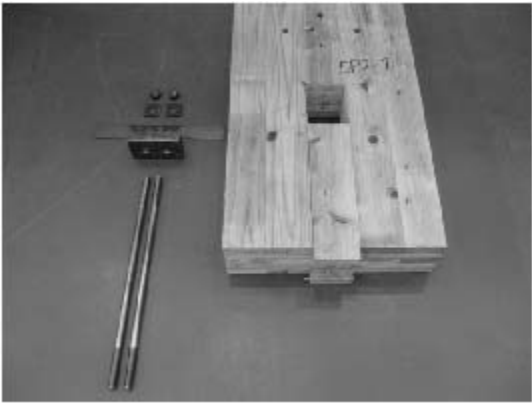


写真 6. 4-21 P55D-1  
解体後

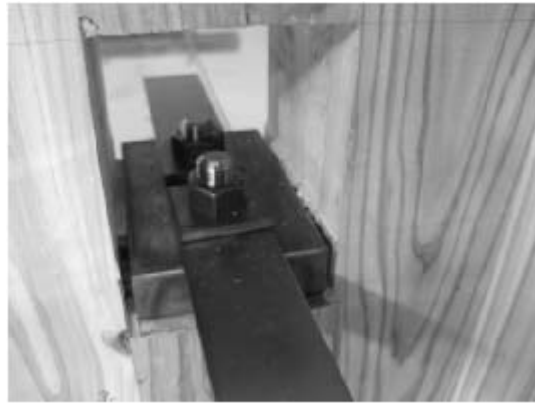


写真 6. 4-22 P55D-4  
座金下部のめり込み



写真 6. 4-23 P55D-4  
座金下部のめり込み



写真 6. 4-24 P55D-5  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-25 P77-1  
積層接着面のせん断木部破壊

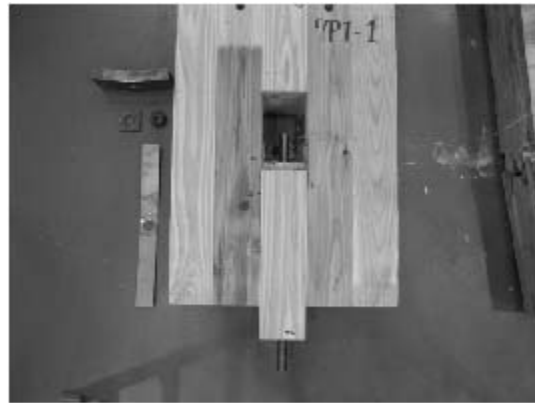


写真 6.4-26 P77-1  
解体後



写真 6.4-27 P77-2  
座金の曲げ変形



写真 6.4-28 P77-4  
解体後



写真 6.4-29 P77-6  
積層接着面のせん断木部破壊

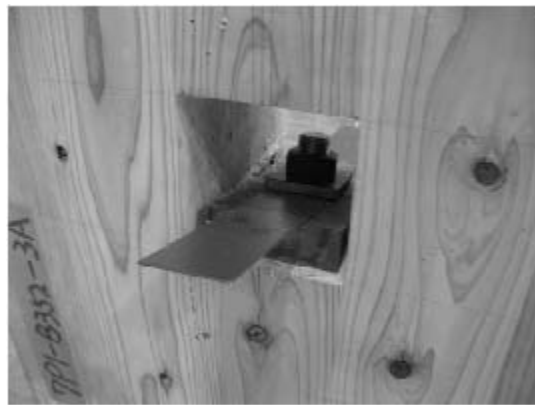


写真 6.4-30 P77-6  
座金下部のめり込み、座金の曲げ





写真 6.4-31 033-2  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-32 033-2  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-33 033-2  
積層接着面のせん断木部破壊

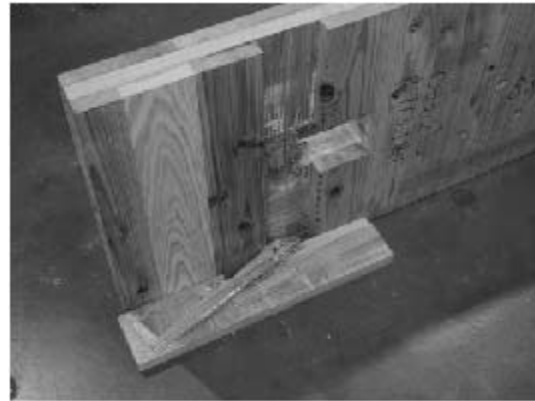


写真 6.4-34 033-2  
解体後



写真 6.4-35 033-3  
積層接着面のせん断木部破壊

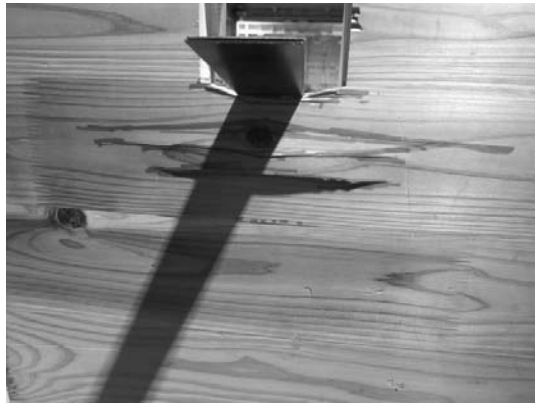


写真 6.4-36 033-3  
外層ラミナの割れ



写真 6.4-37 033-3  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-38 033-4  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-39 033-4  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-40 033-5  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-41 033-5  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-42 033-6  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-43 034-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-44 034-1  
裏面損傷無し



写真 6.4-45 034-1  
解体後



写真 6.4-46 034-2  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-47 034-3  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-48 034-4  
解体後



写真 6.4-49 055-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-50 055-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-51 055-1  
解体後



写真 6.4-52 055-1  
解体後



写真 6.4-53 試験体 055-2  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 4.4-54 試験体 055-2  
解体後

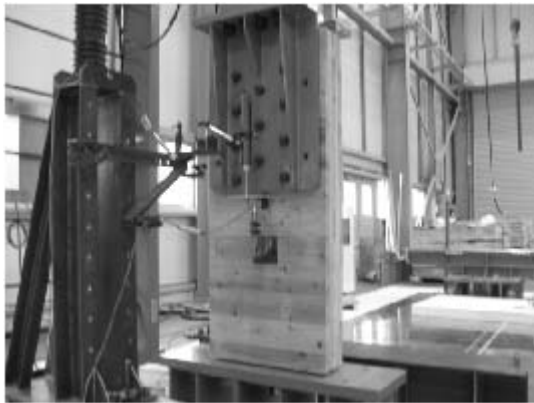


写真 6.4-55 055D-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-56 055D-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-57 055D-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-58 055D-1  
座金下部のめり込み

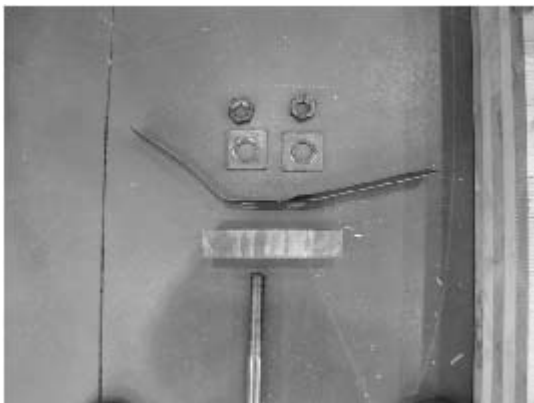


写真 6.4-59 055D-1  
解体後 ボルト及び座金



写真 6.4-60 055D-2  
解体後 座金下部のめり込み



写真 6.4-61 055D-4  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-62 055D-4  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-63 055D-4  
解体後 座金下部のめり込み

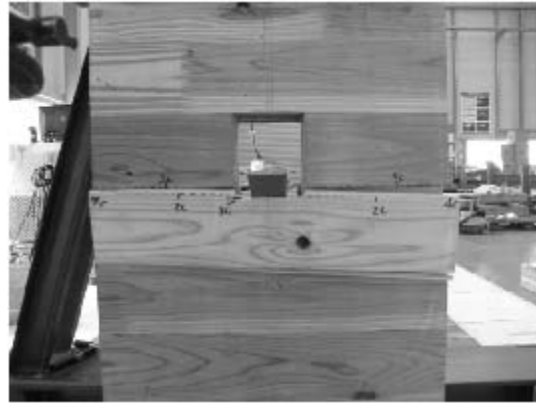


写真 6.4-64 055D-5  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-65 055D-5  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-66 055D-6  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-67 077-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-68 077-1  
座金下部のめり込み



写真 6.4-69 077-1  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 4.4-70 077-1  
解体後



写真 6.4-71 077-2  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-72 077-2  
解体後



写真 6.4-73 077-3  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-74 077-3  
積層接着面のせん断木部破壊



写真 6.4-75 077-6  
引張破壊 (FJ)



写真 6.4-76 077-6  
引張破壊 (FJ)



写真 6.4-77 077-6  
引張破壊 (FJ)



写真 6.4-78 077-6  
引張破壊 (FJ)



## 6.5 面圧面積と剛性についての考察

6.4 項で述べたとおり、面圧面積と初期剛性は必ずしも比例関係にないことが分かった。

CLT 厚さの違いによる平行層と直交層の割合は、総プライ数と必ずしも比例していない。また、初期剛性を比較する場合、直交層の影響力は平行層に比べて遙かに小さい。そこで、試験体の座金の平行層の面圧面積を x 軸に取り、接合部全体の初期剛性を y 軸に取ったものを図 6.5-1 のとおり作成した。グループ 7 すなわち強軸試験体については面圧面積と初期剛性が全く比例せず、平均値を取ると、どの面圧面積でもほぼ同じくらいになる。グループ 8 すなわち弱軸試験体については、比例しているように見える。

ただし、これは試験体全体の剛性であるため、角孔部横の CLT 木部での引張剛性、ボルトの引張剛性、更に直交層のめり込み剛性を計算によって除去すると図 6.5-2 のとおり、平行層の圧縮剛性が若干比例しているように見えるものの、ばらつきも大きいものとなっている。これを単位面積当たりになると図 6.5-3 のとおりとなり、平行層面圧面積の増加に伴って、単位面積当たりの圧縮剛性の低下率が大きいことが分かる。

これらの原因として考えられることは、文献 57 にも言及されているとおり、圧縮面積の増加に伴う圧縮剛性の増加率は一般的に低下する傾向にあることが考えられる。

もうひとつには、試験機容量の関係上、試験体 P33～P55、O33～O55 までは(公財)日本住宅・木材技術センターで、P55D～P77、O55D～O77 までは(一財)建材試験センター西日本試験所とそれぞれ異なる試験機関で実施したために試験装置等の差による影響が考えられる(写真 6.5-1 及び写真 6.5-2)。

最後に前項写真 6.4-27 にも示しているが写真 6.5-3 のように座金の曲げによる応力の分散が考えられる(図 6.5-4)。座金に曲げが生じたのは 7 層 7 プライ試験体のみであった。

なお、座金の傾きについては、6.4 項で述べたとおり、P55D、O55D、P77、O77 の方が傾きが少なく、ばらつきも小さい結果が得られている。均等に圧縮されている方が剛性が高くなるはずであるから、この影響は無いと考えている。

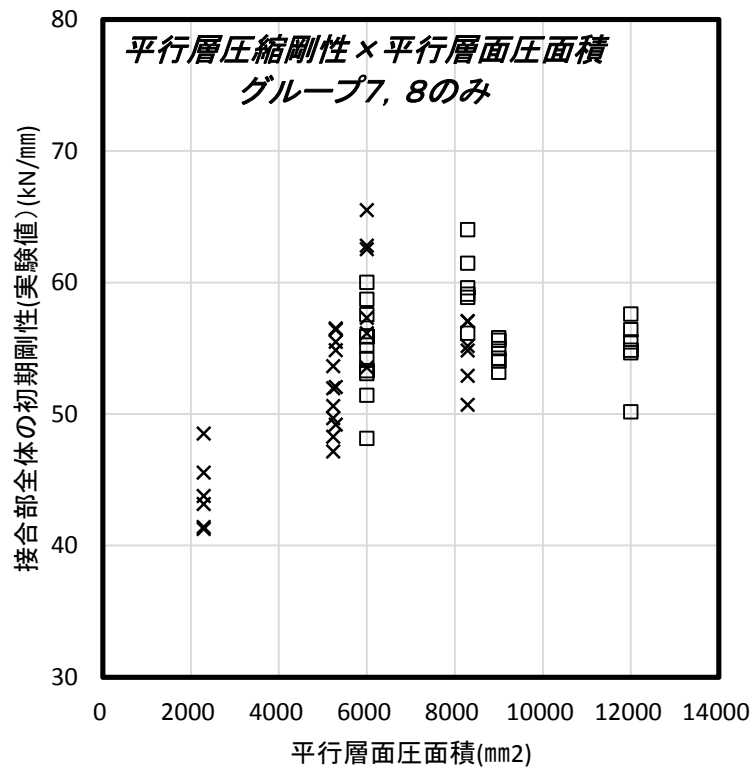


図 6.5-1 平行層面圧面積と初期剛性

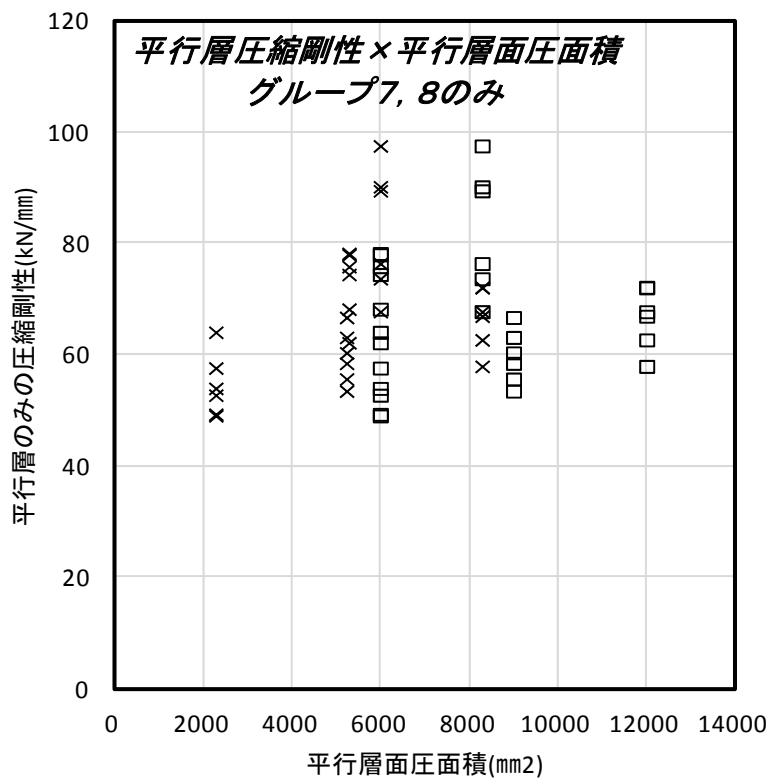


図 6.5-2 平行層面圧面積と平行層のみの圧縮剛性

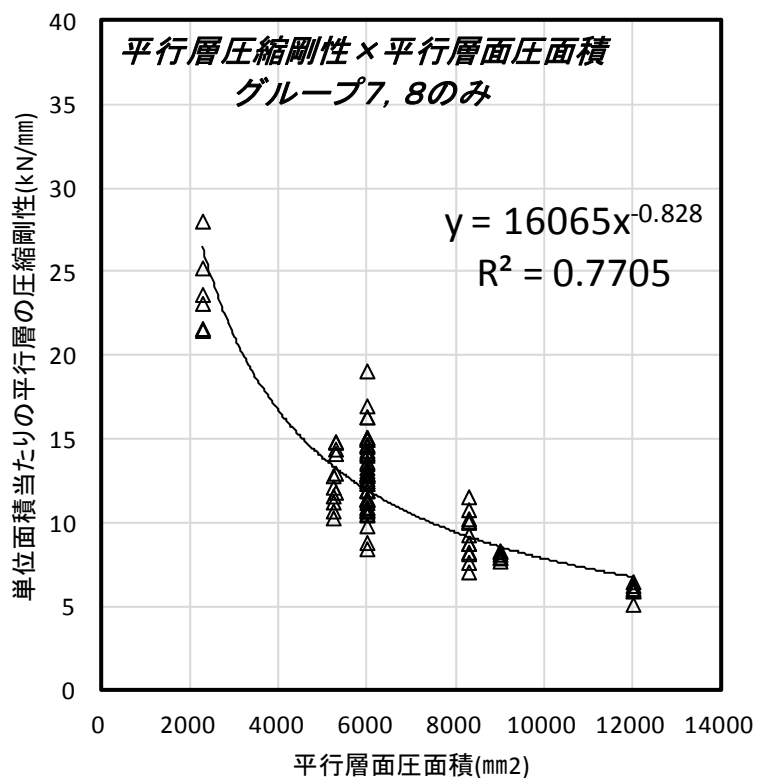


図 6.5-3 平行層面圧面積と平行層の単位面積あたりの圧縮剛性

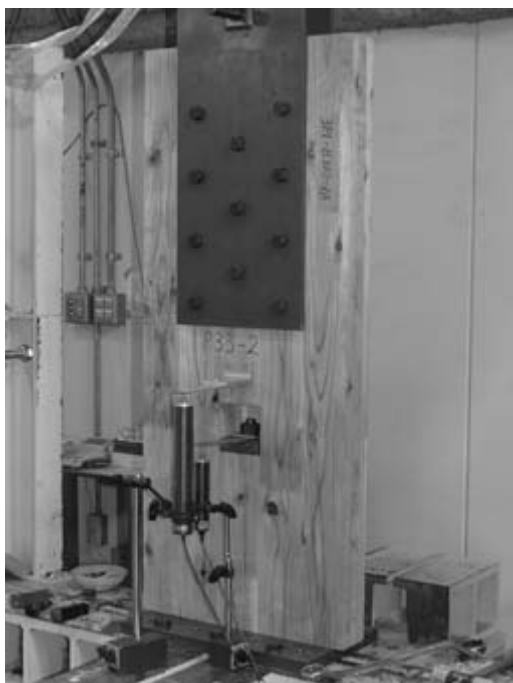


写真 6.5-1 (公財)日本住宅・木材技術センター試験装置



写真 6.5-2 (一財)建材試験センター西日本試験所試験装置



写真 6.5-3 座金の曲げ変形

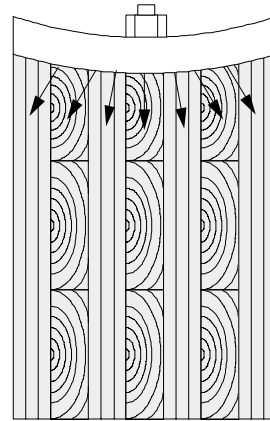


図 6.5-4 座金の曲がりによる応力分散

## 6.5 まとめ

最大荷重及び降伏耐力は試験体の厚さに比例して大きくなるが、剛性については想定より CLT の厚みによる差が出ない結果となった。

ボルトの本数の違いによる座金のめり込みの偏心による影響は見られなかった。

## 7. 引きボルト接合部の推定式の提案

### 7.1 破壊のメカニズムに対する考察

(1)座金下部の降伏後に破断する場合

座金下部で圧縮降伏することによって、積層接着面にせん断力が生じると仮定する。第3章より、平行層と直交層は、剛性が大きく異なり、また直交層は座金下部の近傍でめり込みが生じるのに対し、平行層では全体が歪むため、平行層と直交層の境界面にせん断応力が発生すると考えた(図 7.1-1)。更に平行層の端部剛性  $k_p$  の塑性化によって剛性配分が変わると考えられる。したがって、5層7プライの場合のように2プライ以上で構成されている場合は図 7.1-2 のように同じ繊維方向のプライが重なる場合は、その部分には応力が発生しないと考えている。同様に CLT パネルの厚み方向の座金の長さが CLT パネルの厚さより短い場合においても座金の鉛直方向の投影面積に含まれる積層接着層の数に応じて計算できると考えている。

したがって、5層5プライ、座金長さが5層分の長さの場合を例に挙げると、1-2プライ間、2-3プライ間、3-4プライ間、4-7プライ間にせん断応力が生じる。ここで、文献●より、拘束効果により、外層と2番目の層の接着層付近のせん断耐力より、内層の接着層付近のせん断耐力の方が高いことが分かっている。このため、実際の破断面は外層と2番目の層間のせん断破壊となっている。

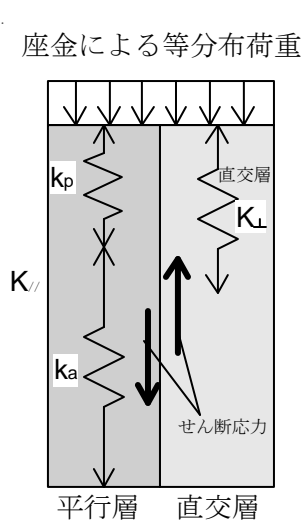


図 7.1-1 平行層と直交層の剛性及び剛性配分の違いによるせん断応力

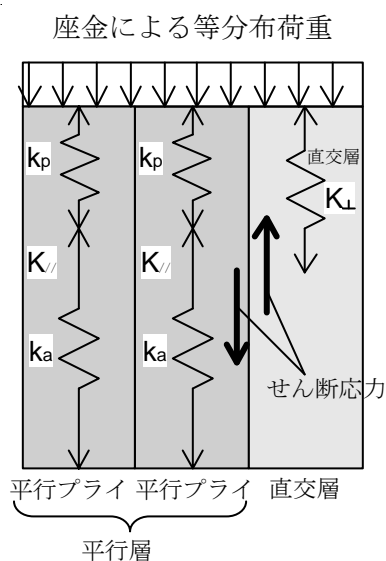


図 7.1-2 2プライ以上で構成される層を含む場合

次に圧縮応力度の分布について考察する。平行層は、図 7.1-3 に示すとおりと考えている。幅はぎ接着なしの場合はラミナ相互による力の伝達はないため、図 7.1-3a)及び b)のようにラミナ境界部の位置によって応力状態が決まる。一方幅はぎありの場合は図 7.1-3c)のように一様に分布すると考えられる。それに対して、直交層は図 7.1-4 のとおりとなると考えられる。幅はぎ接着がある場合は図 7.1-4a)のように放射状に分布するが、幅はぎ接着しない場合においては、図 7.1-4b)のようにラミナ境界部で応力が再配分される。

一方、せん断応力は図 7.1-3b)及び c)の点線部分に生じるため、最終破断は、点線で囲ま

れた部分の積層接着面のせん断破壊と、点線部分のラミナのせん断破壊によるものとなる。最終破壊の状況は図 7.1-5 のとおりとなる。弱軸試験体は外層の上部ラミナか、2 番目のラミナまでが面外へ剥がれるように全面がせん断破壊するが、強軸試験体と同様にせん断応力は図 7.1-3 の点線部分で生じているため、座金下部部分の面積で決まり、座金下部の両端部は二次的な破壊と考えている。

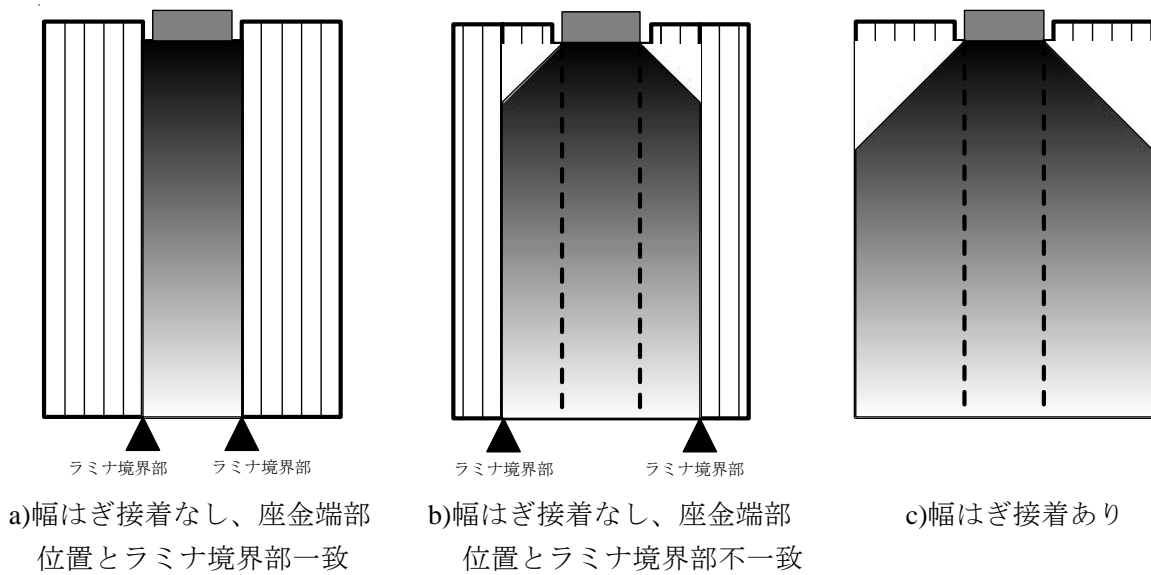


図 7.1-3 平行層の縦圧縮応力度分布とせん断位置(点線)

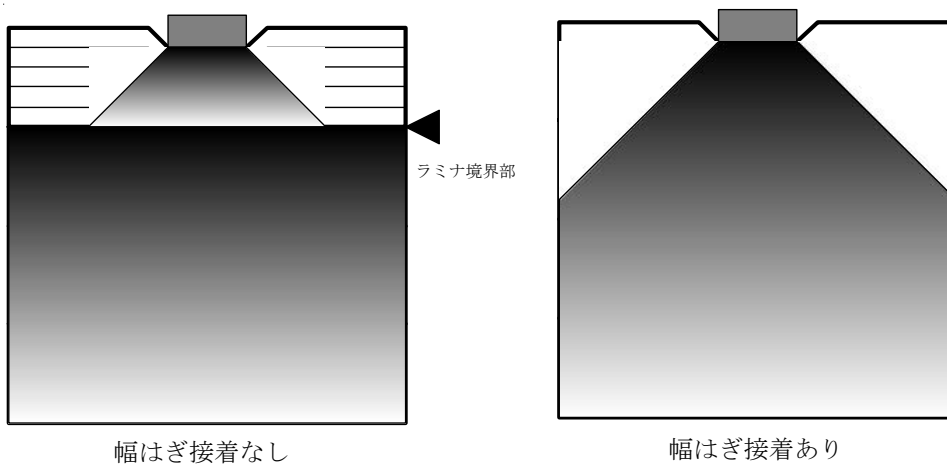


図 7.1-4 直交層の応力度分布

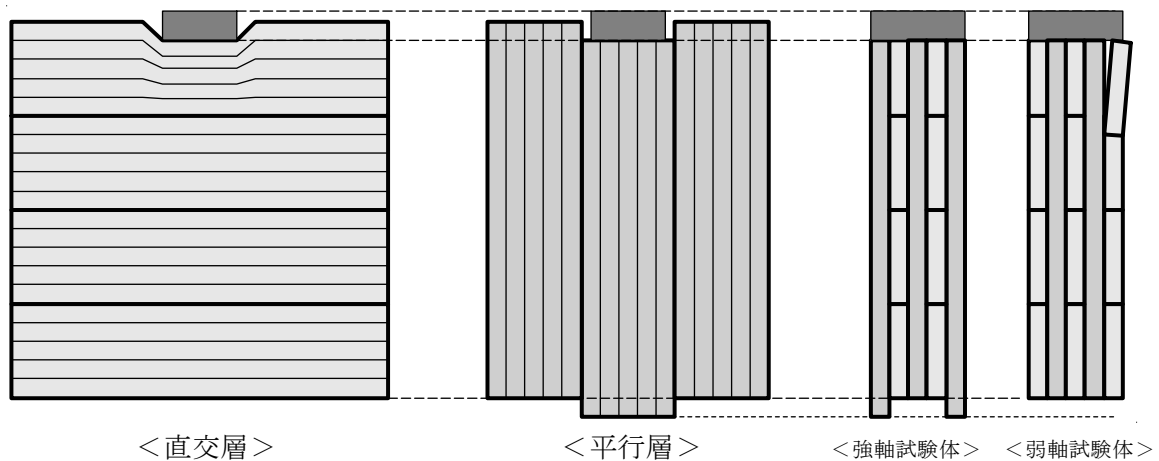


図 7.1-5 最終破断の状況

(2) 座金下部の降伏前に破断する場合

端距離、縁距離が短い場合には(1)と違って座金下部での圧縮降伏が発生する前に破断する。縁距離が短い場合には、角穴から端部までの引張断面積に依存した引張破壊が生じる。端距離が短い場合には、座金下部が圧縮降伏されていないため、直交層が押し出され、座金下部横の積層接着面付近でせん断が生じる。

## 7.2 推定式の策定

(1) 初期剛性

初期剛性  $K_p$ (7.2-1式)は、図 7.2-1 に示すとおり引きボルトの座金直下の木材の面圧による初期剛性  $K_c$ (7.2-2式)、引きボルトの引張による初期剛性  $K_B$ (7.2-3式)、切欠き部両端の木材の引張による初期剛性  $K_T$ (7.2-4式)の3つの要素の直列ばねで決定されるものとした。7.2-2 式中の平行層の端部圧縮剛性  $k_e$  及び平行層の全体歪みによる圧縮剛性  $k_c$  は 7.2-5 式、7.2-6 式より求める。7.2-6 式は外層にボルト孔が配置されないものとして作成しており、本研究に於ける実験でも検証されていない。

なお、異等級構成の場合、内層と外層でヤング係数が異なるが、実務に於いて支障ない場合は 7.2-4 式の括弧内を纏めてしまっても良い。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_T} \quad (7.2-1)$$

$$K_c = \frac{k_e \cdot k_c}{k_e + k_c} + k_{\perp} \quad (7.2-2)$$

$$K_B = \frac{E_B A_B \cdot (S_{//} + S_{\perp})}{l_B} \quad (7.2-3)$$

$$K_T = \frac{2 \cdot t \cdot l_n \cdot (n_{//0} \cdot E_{//0} + n_{//1} \cdot E_{//1} + n_{\perp 0} \cdot E_{\perp 0} + n_{\perp 1} \cdot E_{\perp 1})}{l_T} \quad (7.2-4)$$

$$k_e = k_{e0} \cdot \left\{ l_w \cdot t \cdot (n_{//0} + n_{//1}) - S_{//} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2 \right\} \quad (7.2-5)$$

$$k_c = \frac{l_w \cdot t \cdot n_{//0} \cdot E_{//0} + \left\{ l_w \cdot t \cdot n_{//1} - S_{//} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2 \right\} \cdot E_{//1}}{l_s} \quad (7.2-6)$$

ここで、

$k_{\perp}$  : 文献 47)による直交層のめり込み剛性(N/mm)

$E_B$  : ボルトのヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

$A_B$  : ボルトの断面積(mm<sup>2</sup>)

$l_B$  : 図 7.2-1 におけるボルトのナット間長さ(mm)

$A_{//T}$  : 図 7.2-2 における平行層の引張面積 (mm<sup>2</sup>)

$A_{\perp T}$  : 図 7.2-2 における直交層の引張面積 (mm<sup>2</sup>)

$S_{//}$  : 平行層にあるボルトの本数(本)

$S_{\perp}$  : 直交層にあるボルトの本数(本)

$t$  : 図 7.2-1 におけるラミナ 1 層分の厚さ(mm)

$l_n$  : 図 7.2-1 における縁距離(mm)

$n_{//0}$  : CLT の外層に位置する平行層の数 (枚)

$n_{//1}$  : CLT の内層に位置する平行層の数 (枚)

$n_{\perp 0}$  : CLT の外層に位置する直交層の数 (枚)

$n_{\perp 1}$  : CLT の内層に位置する直交層の数 (枚)

$E_{//0}$  : CLT の外層に位置する平行層のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_{//1}$  : CLT の内層に位置する平行層のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_{\perp 0}$  : CLT の外層に位置する直交層のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_{\perp 1}$  : CLT の内層に位置する直交層のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_{//1}$  : CLT の内層に位置する平行層のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$l_T$  : 図 7.2-1 における角穴切り欠き部分の長さ(mm)

$l_w$  : 図 7.2-1 における座金の幅(mm)

$D$  : 引きボルト用穴の直径 (mm)

$l_s$  : 図 7.2-1 における縁距離(mm)



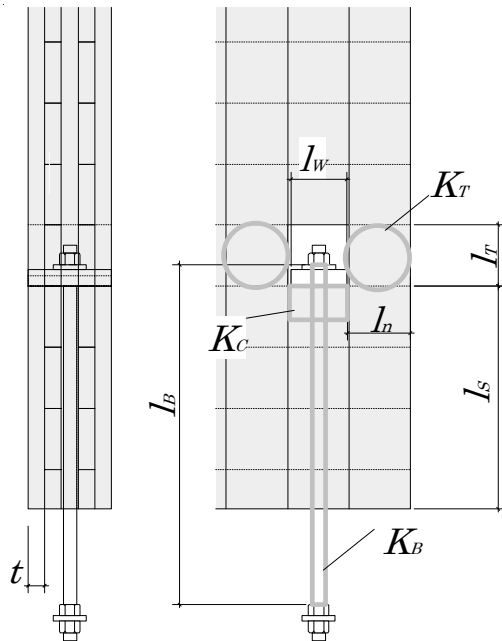


図 7.2-1 初期剛性に影響する要素

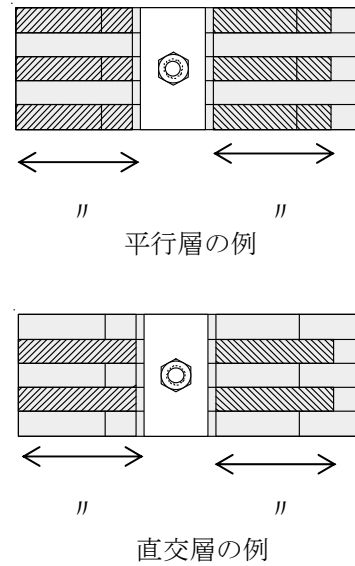


図 7.1-2 角孔部横の引張面積  
(CLT 端部からの距離の 2 倍とする)

## (2) 降伏耐力

繊維方向の圧縮試験では一般的に降伏点がなく、最大荷重を迎えた後は、荷重が低下していく。一方、繊維直交方向は徐々に降伏するが、荷重は上がり続ける。CLT は第 3 章図 3.7-2～図 3.7-4 の荷重変位曲線にあるとおり、両方の性質を兼ね揃えたグラフになる。

CLT においては、平行層ラミナの端部が圧縮破壊した後、めり込みが進展する。よって降伏耐力  $P_y$  は繊維方向の圧縮強度に平行層ラミナの加圧面積を乗じたものとした(図 7.2-3)。

また、7.3 節で求める最大耐力  $P_{max}$  が  $P_y$  以下となったときには降伏耐力は与えられない。すなわち降伏点のない接合部となる。

$$P_y = F_{//c} \left\{ l_w \cdot t \cdot (n_{//o} + n_{//l}) - S_{//} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2 \right\} \quad (7.2-7)$$

ここで、

$F_{//c}$  : 木材(繊維方向)の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

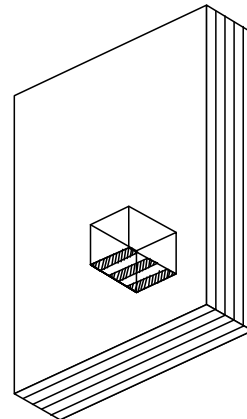


図 7.2-3 座金の圧縮によって降伏する部分(網掛け部)

### (3) 最大耐力

最大耐力は第 5 章の破壊性状を想定し、図 7.2-4 に示す 3 種の破壊モード((7.2-8 式～(7.2-12)式)の内の最小値((7.2-8)式)によって決定するものとした。

7.2-10 式は、7.2-6 式と同様に外層にボルト孔が配置されない前提で作成している。

$$P_{max} = \min[P_{pull}, P_{shear1}, P_{shear2}] \quad (7.2-8)$$

$$P_{pull} = A_{//T} \cdot F_{//T} / 2 \quad (7.2-9)$$

$$P_{shear0} = \{2F_{go} + (n_{//} + n_{\perp} - 1) \cdot F_{gi}\} \cdot l_{s0} \cdot l_w \quad (7.2-10)$$

$$P_{shear1} = \max[P_y, P_{shear0}] \quad (7.2-11)$$

$$P_{shear2} = \{2F_{go} + (n_{//} + n_{\perp} - 3) \cdot F_{gi}\} \cdot l_{s0} \cdot l_n \quad (7.2-12)$$

ここで、

$F_{//T}$  : 木材(繊維方向)の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_{go}$  : 外層積層接着面のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_{gi}$  : 内層積層接着面のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$l_{s0}$  :  $l_s \leq 400$  mm のとき、 $l_{s0} = l_s$

$l_s > 400$  mm のとき、 $l_{s0} = 400$  mm

$P_{pull}$  は第 5 章における写真 5.4-1 のような角孔の縁距離部分の CLT の引張破壊、 $P_{shear1}$  は写真 5.4-25 のような座金直下部の積層接着面によるせん断破壊、 $P_{shear2}$  は写真 5.4-7 の座金下部の横部分の積層接着面によるせん断破壊を想定している。破壊性状より、 $P_{pull}$  及び  $P_{shear2}$  は偏心してから破断している試験体があったため、また実際に耐力壁として CLT パネルが使われた場合の端部引張接合として使われた場合には、純粋な引張ではなく、ロッキングによるモーメント応力となるため、安全側として片側のみの断面で決定されるものとした。

(7.2-11)式の  $P_{shear1}$  については、座金による木部の圧縮降伏後に積層接着面がせん断を受けることになるため、 $P_y$  と  $P_{shear0}$  を比較して数値の大きい方を  $P_{shear1}$  とした。

なお、第 5 章において、座金端部と幅はぎ位置が一致しない試験体の最大耐力は一致した場合と比べて、有意差が認められた。しかしながら 7.2-10 式においては、一致しない場合に生じる座金端部に沿ったラミナのせん断耐力を加味していない。これは、接着層のせん断耐力と木材そのもののせん断耐力の最大耐力時の変位  $\delta_{max}$  が必ずしも一致しないため、単純な足し合わせはできないと判断したためである。また、その場合、接着層のせん断耐力と木材そのもののせん断耐力の最大値を採用すべきであるが、実施工において幅はぎの位置を調整するのは困難であるため、安全側として座金端部と幅はぎ位置が一致する場合を想定した式とした。

なお、 $n_{//}$  や  $n_{\perp}$  は、式の説明にあるとおり、「層」を指しており、「プライ」ではない。したがって 5 層 7 プライの場合は  $n_{//} = 3$ 、 $n_{\perp} = 2$  と数える。

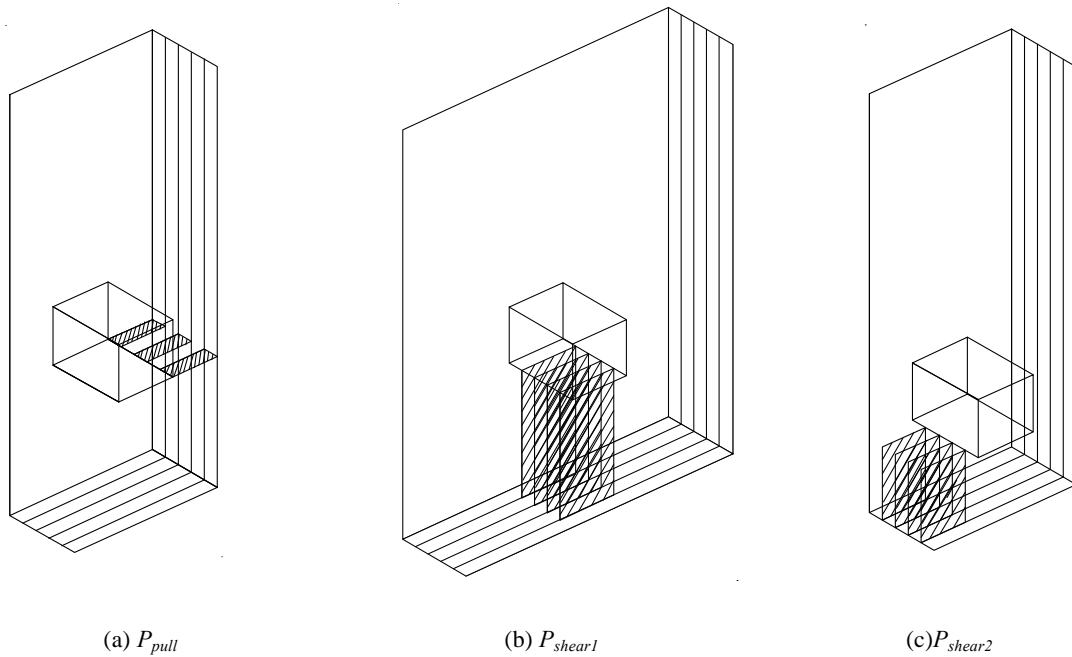


図 7.2-4 破壊モード

(4) 2次剛性

文献 42)では、梁木口のめり込みや柱座金のめり込み塑性変形による 2 次勾配は 1 次勾配の 1/12~1/6 であり、平均の 1/8 を算定式に採用している。本研究においても降伏後の 2 次剛性  $K_{C2}$  を(7.2-13)式のとおり 1 次勾配の 1/8 とした。これを(7.2-2)式の  $K_C$  に代入し、2 次剛性を算出するものとした。

$$K_{C2} = \frac{K_C}{8} \quad (7.2-13)$$

$K_{C2}$ : 座金直下の木材の面圧性能による 2 次剛性

(5) 座金が CLT 厚さより短い場合

仕上げを CLT 現しとしたい場合や燃えしろ設計としたい場合には、図 7.2-5 に示すように座金を小さくする必要がある。この場合には面圧面積  $K_c$  は座金の面圧面積のみで計算するものとする((7.1-5)式、(7.1-6)式)。降伏耐力についても、面圧面積から直交層の面積を差し引いた面積で計算を行う((7.1-7)式)。最大耐力については、(b) $P_{shear1}$  の破壊モードが影響し、(7.1-10)式で計算する  $n_{//}$  や  $n_{\perp}$  は、座金直下に配置された層数のみをカウントするものとする。

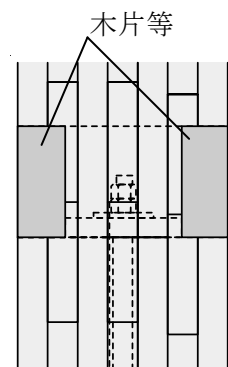


図 7.2-5 角孔を木片等で塞ぐ場合

## 7.3 実験値と推定値の比較

### (1) 入力条件

第4章から第6章の実験結果と本節で提案した推定式から算出した結果を比較した。

木材の圧縮強度は文献<sup>60)</sup>よりスギラミナの縦圧縮試験の実験値22シリーズ1047体(内、FJ無し試験体が182体)の平均値 $33.06\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $4.73\text{N/mm}^2$ )を、引張強度は同じくスギラミナの縦圧縮試験の実験値70シリーズ3830体(内、FJ無し試験体が1256体)の平均値 $25.91\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $6.01\text{N/mm}^2$ )を使用した。積層接着面のせん断強度は、文献<sup>61)</sup>のCLTを使った積層接着面の一面せん断試験結果から、面外拘束なし試験体のせん断強度の平均値 $1.53\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $0.41\text{N/mm}^2$ )を $F_{go}$ 、面外拘束ありのせん断強度の平均値 $1.82\text{N/mm}^2$ (標準偏差 $0.45\text{N/mm}^2$ )を $F_{gi}$ とした。

### (2) 実験値と推定値の比較

第4章の入力条件と推定結果を表7.3-1に、試験体パラメータ別に実験値と推定値を比較したものを図7.3-1～図7.3-10に示す。実験による最大耐力は、試験体によって違いがあるものの、推定値とほぼ一致する結果となった。剛性については、推定値①②がよく一致する結果となり、推定値③は低めに算定される結果となった。

第5章の入力条件と推定結果を表7.3-2～表7.3-4に、試験体パラメータ別に実験値と推定値を比較したものを図7.3-11～図7.3-42に示す。いずれの試験体も端距離・縁距離による最大耐力の増減をよく捉えており、よく一致する結果となった。初期剛性については、端距離が400mm以上且つ縁距離が80mm以下の試験体の場合(図7.3-11、図7.3-12、図7.3-19、図7.3-20、図7.3-27、図7.3-28、図7.3-35、図7.3-39)には、推定値①～③までの数値がほぼ同一の値となり、実験値ともよく一致したが、これら以外は推定値①、②が実験値より高く、推定値③が実験値より低くなる傾向となった。また、縁距離・端距離が短い試験体については、算定される降伏耐力より最大荷重が低い場合が多く、実際の脆性的な破壊性状と合致する。

第6章の入力条件と推定結果を表7.3-6に、試験体パラメータ別に実験値と推定値を比較したものを図7.3-43～図7.3-52に示す。第4章、第5章の結果と同じく、最大耐力はよく一致する結果となったが、6.4節で述べたとおりP33は破壊モードが想定外のものであったため、推定値が実験値より高めに評価されている。初期剛性については、強軸試験体、弱軸試験体共に5層5プライまでは推定値①、②が良く一致する結果となり、推定値③は低めに評価されることとなったが、7層7プライの試験体については強軸試験体、弱軸試験体共に推定値①、②は高めに評価され、推定値③が一致する結果となった。

以上の結果を最大耐力、降伏耐力、初期剛性別に纏めたものを図7.3-53～図7.3-57に示す。なお、図で示すグループ1～8とは、第4章から第6章までの試験体一覧表で呼称している試験体グループを示す名称で、グループ1は第4章の表4.2-1、グループ2～6は第5章の表5.2-1、グループ7,8は第6章の表6.2-1に示している。

図7.3-53の最大荷重の比較はよく一致しており、実験値の方がやや高く、安全側で評価される結果となった。

図7.3-54の降伏耐力の比較については、計算において $P_y > P_{max}$ と算出された試験体は除外していることに加え、脆性的に破壊した試験体(特にグループ2～6の縁距離・端距離が短い試験体)

は荷重変位曲線がほぼ直線となり、降伏耐力が算出不可能となるため、比較した試験体数は少なくなった。結果を見ると剛性と同様に推定値の方がやや高い評価となっている。この理由としては、実験値の方は文献(59)に基づいて完全弾塑性モデルから評価しており、見かけ上直線的な部分でも  $P_y$  と判断されているため、低めの評価となっている。加えて、当該推定式では、縦圧縮試験結果のような直線的なグラフにおいては比例限度を超えた辺りを狙って  $P_y$  を定めているため、高めの評価となる傾向があるためである。

図 7.3-55～図 7.3-57 では試験体全体の剛性の分布を示しているが、CLT の厚みがパラメータとなっているグループ 7,8 は、横長に分布しており、実験値は推定値と比べると面圧面積が剛性に比例していないことが分かる。図 7.3-55 に示す推定値①は、比較的合っているように見えるが、縦圧縮試験(固定端)の実験結果を元にしてしているので、グループ 2～6 の内、端距離が短いものが高く評価されてしまっていることが分かる。推定値②は端距離を短いものを除けば推定値①と同じような分布となった。推定値③については、全般的に計算値が低く評価され、あまり合わない結果となった。

3 章の集成材及び CLT 材の圧縮試験では推定値②が低く算定されており、引きボルト接合の結果では推定値②と③が逆転しているように見える。3 章と傾向が異なる理由としては、推定値③の算定方法を、3 章の圧縮試験では固定端の算定式、本章の引きボルト接合引張試験では自由端として圧縮反力がないとして計算しているためである。

### (3) 推定値と破壊性状

最後に計算による破壊モードと実際の破壊性状に着目する(表 7.3-7～表 7.3-9)。実際の破壊性状と計算による破壊モードは比較的良好に一致する結果となった。ただし、表 7.3-7 及び表 7.3-8 には同一等級(記号 S を冠するもの)と異等級(記号 Mx を冠するもの)の実際の破壊性状を見ていくと、同一等級は比較的同じような壊れ方で、異等級は破壊性状がばらつく傾向にある。異等級の内層ラミナはヤング係数が 2.5GPa から上限まで様々な値のものが含まれるため、破壊性状もばらつくと考えられる。

表 7.3-7 のグループ 1 では試験体形状が同じで、ヤング係数若しくは密度制御を行った試験体であるため、計算による結果では最大耐力と破壊性状は全ての試験体に於いて同一となっている。これは第 4 章の試験結果から見ても妥当であると考えられる。実際の破壊性状を見ていくと、前述のとおり同一等級と比べ異等級の試験体は、引張破壊モード  $P_{pull}$  やそれを伴うせん断破壊モード  $P_{shear1}$  など破壊性状がばらつくものが多いが、全体から見て大半を占める破壊性状は破壊モード  $P_{shear1}$  であり、計算による破壊モードと一致する結果となった。

表 7.3-8 では縁距離・端距離を変えていくことで破壊モードも切り替わっていく様子が見て取れ、その中間地点では複数の破壊モードが混在している。

計算による破壊モードの値が比較的近いものについては、実験結果も複数の破壊性状や複合的な破壊となっているものがある(例えばグループ 2 の S60SPC0540 やグループ 6 の Mx60AOS0840 等)。例外もあり、例えばグループ 6 の試験体 Mx60AOS1750 の実際の破壊性状は  $P_{pull}$  2 体、 $P_{shear1}$  4 体であるが、計算では  $P_{pull}$  で決定しており、 $P_{shear1}$  の算定値はその次に小さい値である。しかしながら  $P_{pull}$  と  $P_{shear1}$  は約 100kN ほどの差があり、その差は小さいとは言えない。これは、ラミナ材のばらつきによって生じるものと考えられ、本節(1)入力条件で示したとおり、計算に用いている引張強度やせん断強度の標準偏差が大きいことから分かる。ばら

つきが大きくなる原因としては節や FJ の有無(第 5 章写真 5.4-4、写真 5.4-6 等)等による影響が考えられる。

表 7.3-9 は縁距離・端距離による影響を避けるため、縁距離・端距離を十分に大きく取っており、計算では全て  $P_{shear1}$  による破壊モードとなっている。これは実際の破壊性状とも一致する結果となった。グループ 7 の試験体 P55 は第 6 章図 6.4-1 のとおり外層の積層接着面が段階的にせん断破壊していく試験体であり、端距離及び縁距離は十分に確保しているため、破壊モードは  $P_{shear1}$  となった。最大荷重後の荷重の推移に着目すると、変位 5~7mm 付近で外層がせん断破壊し、4 層で抵抗する形となるが、これは 4 層分として算出した  $P_{shear1}$  と一致し、更に 2 枚目の外層がせん断破壊した後は、3 層  $P_{shear1}$  と一致する結果となっており、最大荷重が積層せん断面積に比例することの裏付けとなっている。

表 7.3-1 第 4 章グループ 1 の引きボルト接合部の強度性能の入力条件と推定結果

項目		S30A 1-6	S30A 7-12	S30A' スギ	S30B スギ	Mx60A 1-6	Mx60A 7-12	Mx60A' スギ	Mx60B スギ	60S スギ	Ds スギ	
入力条件	樹種											
	繊維方向に対する置換係数 $k_{II}$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	最外层 繊維平行方向層の数 $n_{II0}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	内層 繊維平行方向層の数 $n_{II}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	最外层 繊維直交方向層の数 $n_{\perp 0}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	内層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	ラミナの厚み $t$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	CLTの幅 $L$	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	
	最外层繊維平行方向のヤング係数 $E_{II0}$	N/mm <sup>2</sup>	5937.5	6500.0	4812.5	5112.5	6562.5	7125.0	5375.0	7187.5	6500.0	6300.0
	内層繊維平行方向のヤング係数 $E_{II}$	N/mm <sup>2</sup>	5940.5	6007.1	5071.4	5044.6	5976.2	6228.6	4964.3	5083.3	6500.0	6531.0
	最外层繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp 0}$	N/mm <sup>2</sup>	118.8	130.0	96.3	102.3	131.3	142.5	107.5	143.8	130.0	126.0
	内層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp}$	N/mm <sup>2</sup>	118.8	120.1	101.4	100.9	119.5	124.6	99.3	101.7	130.0	130.6
	繊維平行方向の圧縮強度 $F_{c0}$	N/mm <sup>2</sup>	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7
	繊維平行方向の引張強度 $F_{t0}$	N/mm <sup>2</sup>	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9
	外層接着面のせん断強度 $F_{g0}$	N/mm <sup>2</sup>	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
内層接着面のせん断強度 $F_{g1}$	N/mm <sup>2</sup>	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	
ボルトの仕様	ボルトの強度区分	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	
	ボルトの0.2%耐力 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	
	ボルトの呼び引張強さ $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
	ボルトの有効断面積 $A_B$	mm <sup>2</sup>	459	459	459	459	459	459	459	459	459	
	ボルトのヤング係数 $E_B$	N/mm <sup>2</sup>	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	
	ボルトのナット間長さ $l_B$	mm <sup>2</sup>	550	650	550	650	550	650	550	650	550	
	繊維平行方向の引きボルトの本数 $S_{II}$	本	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	繊維直交方向の引きボルトの本数 $S_{\perp}$	本	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	引きボルト用穴の直径 $D$	mm	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	座金の奥行き長さ $W_w$	mm	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
引きボルト接合部の仕様	座金の幅 $l_w$	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	縁距離 $l_e$	mm	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
	端距離 $l_f$	mm	400	400	400	400	400	400	400	400	400	
	角孔の長さ $l_i$	mm	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
	剛性①算定用 $\theta$ (スギの場合)	N/mm <sup>3</sup>	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	
	剛性②算定用 120角時の表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $K_{c120}$	kN/mm	400	400	400	400	400	400	400	400	400	
	強度性能に係る断面積	最外层 繊維平行方向の加圧面積 $A_{IIc}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
		内層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{IIc}$	mm <sup>2</sup>	2293	2293	2293	2293	2293	2293	2293	2293	2293
		最外层 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		内層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
最外层 繊維平行方向の引張面積 $A_{IIT}$		mm <sup>2</sup>	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	
内層 繊維平行方向の引張面積 $A_{IIT}$		mm <sup>2</sup>	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	
最外层 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$		mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
内層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$		mm <sup>2</sup>	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	
角穴の両端部の木材の引張剛性 $K_T$		kN/mm <sup>2</sup>	1477.1	1574.8	1219.0	1265.8	1582.4	1695.9	1302.0	1608.7	1616.7	1586.6
ボルトの引張剛性 $K_B$		kN/mm <sup>2</sup>	167.7	141.9	167.7	141.9	167.7	141.9	167.7	141.9	167.7	
出力結果	直交層のめり込み剛性											
	弱軸試験体のみ $y1, y2$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$C_x$		3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	
	$C_y$		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	直交層のめり込み剛性 $k_{\perp}$	kN/mm	6.0	6.0	5.1	5.1	6.0	6.3	5.0	5.1	6.5	
	剛性①(本研究提案式)	端部圧縮剛性 $k_e$	kN/mm <sup>2</sup>	378.2	378.2	378.2	378.2	378.2	378.2	378.2	378.2	378.2
		全体歪みによる圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup>	123.1	131.9	101.3	105.6	132.7	142.6	109.1	137.0	134.8
		平行層の圧縮剛性 $k_{II}$	kN/mm	92.9	97.8	79.9	82.6	98.2	103.5	84.7	100.5	99.4
		CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	98.9	103.9	85.0	87.6	104.2	109.8	89.7	105.7	104.4
		推定値①の初期剛性 $K_P$	kN/mm	59.7	57.8	53.9	52.0	61.8	59.7	55.9	58.4	61.8
推定値①の2次剛性 $K_{P2}$		kN/mm	11.4	11.8	9.9	10.1	12.0	12.4	10.4	12.0	12.2	
初期剛性②(文献56)による提案式)		$\alpha$		0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244
		$L_f$		491.6	491.6	491.6	491.6	491.6	491.6	491.6	491.6	491.6
		$L'$		650.2	650.2	650.2	650.2	650.2	650.2	650.2	650.2	650.2
		全体歪みによる圧縮剛性 $k_{II,m}$	kN/mm	143.4	153.0	118.3	122.9	153.8	164.9	126.5	156.7	157.0
	単位面積あたりの表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{IC0}$	N/mm <sup>3</sup>	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	
	表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{IC}$	kN/mm	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4	
	平行層の圧縮剛性 $k_{II}$	kN/mm	88.4	91.9	78.2	80.2	92.2	96.1	81.7	93.2	93.4	
	CLTの圧縮剛性 $K_{IC}$	kN/mm <sup>2</sup>	94.4	98.0	83.3	85.2	98.2	102.4	86.7	98.4	99.9	
	推定値②の初期剛性 $K_P$	kN/mm	58.0	55.9	53.2	51.1	59.6	57.5	54.7	56.1	60.3	
	推定値②の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	10.9	11.2	9.7	9.8	11.4	11.7	10.1	11.2	11.5	
初期剛性③(文献57)による提案式)	文献56)の単位面積あたりの圧縮剛性 $k_{II,m0}$	N/mm <sup>3</sup>	7.5	7.9	6.2	6.4	7.9	8.4	6.5	7.7	8.2	
	文献56)の平行層の圧縮剛性 $k_{II,m}$	kN/mm	61.9	65.2	51.5	53.0	65.4	69.6	53.9	64.0	67.8	
	平行層の圧縮剛性 $k_{II}$	kN/mm	48.8	50.8	42.1	43.1	50.9	53.5	43.7	50.1	52.4	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	54.8	56.9	47.2	48.1	56.9	59.7	48.7	55.2	58.9	
	推定値③の初期剛性 $K_P$	kN/mm	40.2	39.6	35.8	35.0	41.4	41.0	36.7	38.8	42.5	
	推定値③の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	6.6	6.7	5.7	5.7	6.8	7.1	5.8	6.6	7.0	
	降伏耐力	降伏耐力 $P_v$	kN	271.46	271.46	271.46	271.46	271.46	271.46	271.46	271.46	271.46
		引張耐力 $P_{pull}$	kN	349.8	349.8	349.8	349.8	349.8	349.8	349.8	349.8	349.8
	最大耐力	座金下部の接着面のせん断耐力 $P_{shear0}$	kN	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8
		$P_{shear1}$ の適用判定 $\text{Max}(P_{shear1}, P_v)$	kN	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8
座金下部両端の接着面のせん断耐力 $P_{shear2}$		kN	409.2	409.2	409.2	409.2	409.2	409.2	409.2	409.2	409.2	
最大耐力 $P_{max}$		kN	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	272.8	
ボルトを先行降伏させないための強度判定	ボルトの降伏耐力 $P_{vB}$	kN	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	
	ボルト採用の判定	kN	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	
	ボルトの最大耐力 $P_{max}$	kN	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	

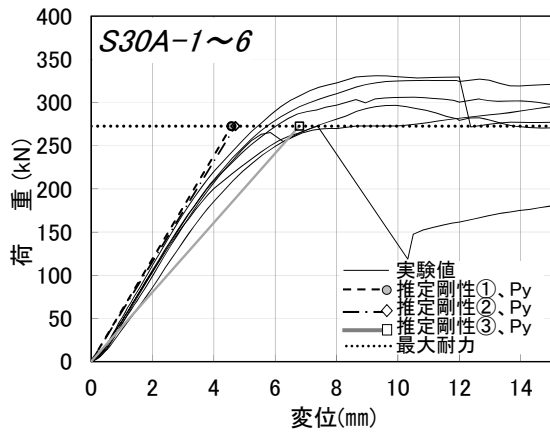


図 7.3-1 S30A-1~6 の実験値と推定値の比較

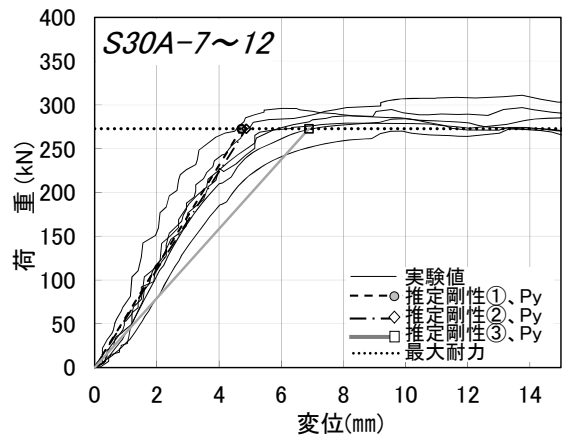


図 7.3-2 S30A-7~12 の実験値と推定値の比較

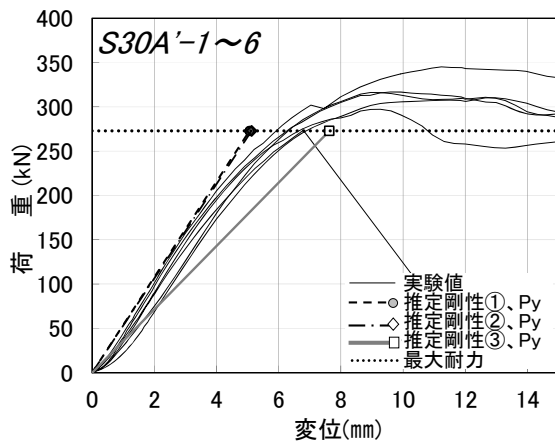


図 7.3-3 S30A'-1~6 の実験値と推定値の比較

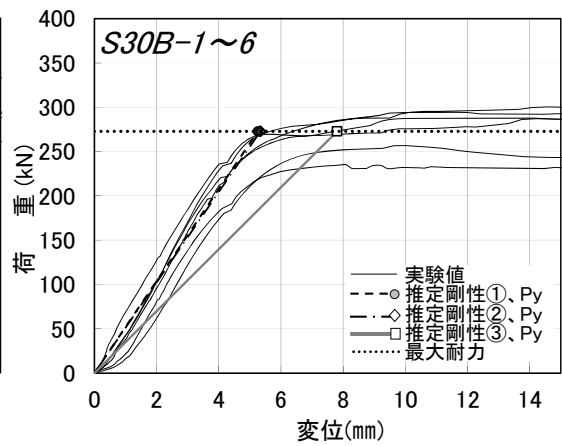


図 7.3-4 S30B-1~6 の実験値と推定値の比較

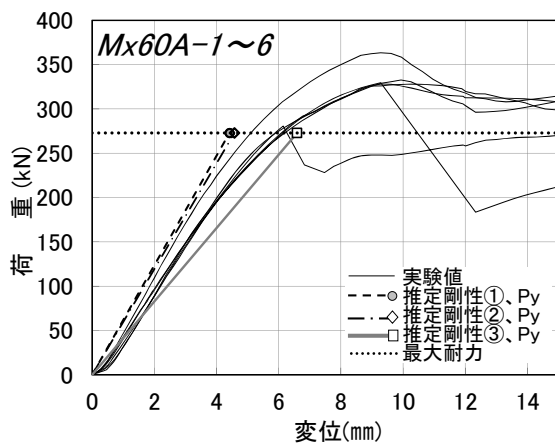


図 7.3-5 Mx60A-1~6 の実験値と推定値の比較

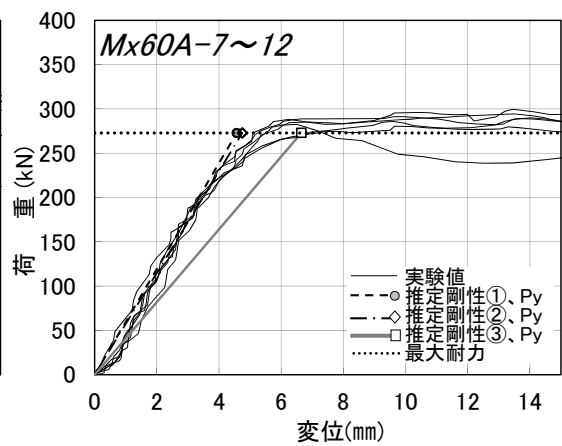


図 7.3-6 Mx60A7~12 の実験値と推定値の比較



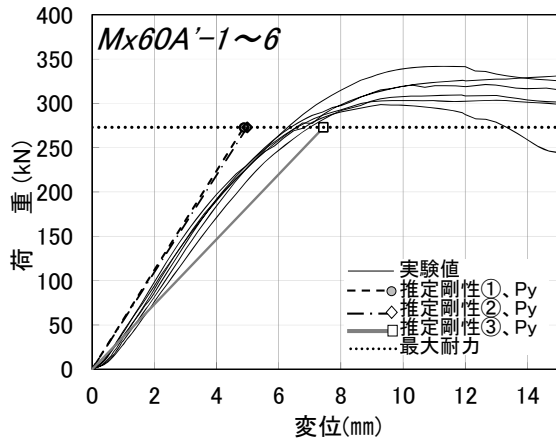


図 7.3-7 Mx60A'-1~6 の実験値と推定値の比較

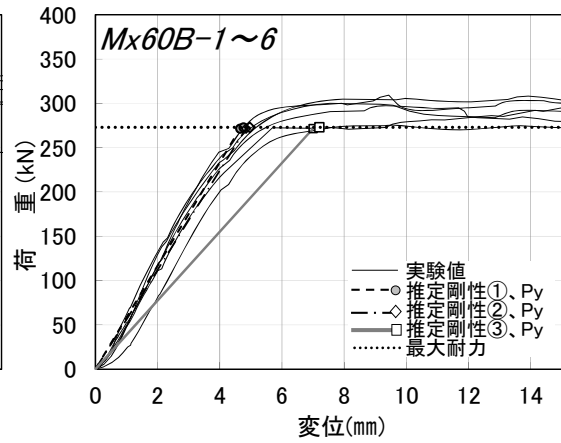


図 7.3-8 Mx60B-1~6 の実験値と推定値の比較

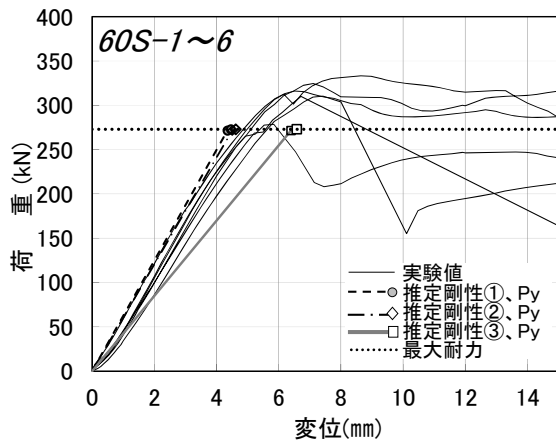


図 7.3-9 60S-1~6 の実験値と推定値の比較

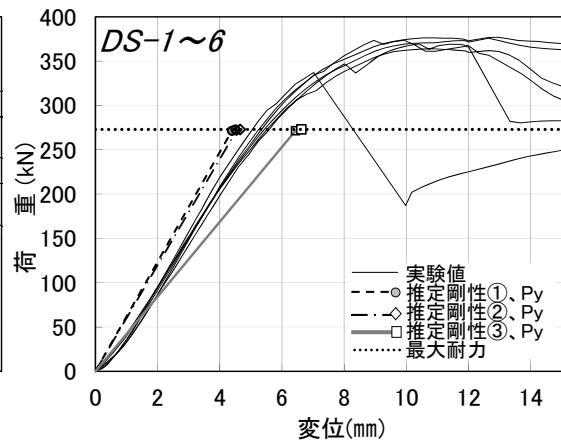


図 7.3-10 DS-1~6 の実験値と推定値の比較

表 7.3-2 第 5 章グループ 2 の引きボルト接合部の強度性能の入力条件と推定結果

項目		S60SPC 0540	S60SPC 0840	S60SPC 1040	S60SPC 1515	S60SPC 1520	S60SPC 1530	S60SPC 1540	S60SPC 1550
入力条件	CLT材の仕様	繊維方向に対する置換係数 $n$	5	5	5	5	5	5	5
	最外層 繊維平行方向層の数 $n_{//O}$	枚	2	2	2	2	2	2	2
	内層 繊維平行方向層の数 $n_{//I}$	枚	1	1	1	1	1	1	1
	最外層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp O}$	枚	0	0	0	0	0	0	0
	内層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp I}$	枚	2	2	2	2	2	2	2
	ラミナの厚み $t$	mm	30	30	30	30	30	30	30
	CLTの幅 $L$	mm	210	270	310	410	410	410	410
	最外層繊維平行方向のヤング係数 $E_{//O}$	N/mm <sup>2</sup>	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500
	内層繊維平行方向のヤング係数 $E_{//I}$	N/mm <sup>2</sup>	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500
	最外層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp O}$	N/mm <sup>2</sup>	130	130	130	130	130	130	130
	内層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp I}$	N/mm <sup>2</sup>	130	130	130	130	130	130	130
	繊維平行方向の圧縮強度 $F_{//c}$	N/mm <sup>2</sup>	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7
	繊維平行方向の引張強度 $F_{//T}$	N/mm <sup>2</sup>	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9
	外層接合面のせん断強度 $F_{go}$	N/mm <sup>2</sup>	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
	内層接合面のせん断強度 $F_{gi}$	N/mm <sup>2</sup>	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
	ボルトの仕様	ボルトの強度区分	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
	ボルトの0.2%耐力 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	900	900	900	900	900	900	900	
	ボルトの呼び引張強さ $P_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
ボルトの有効断面積 $A_B$	mm <sup>2</sup>	459	459	459	459	459	459		
ボルトのヤング係数 $E_B$	N/mm <sup>2</sup>	201000	201000	201000	201000	201000	201000		
ボルトのナット間長さ $l_B$	mm	650	650	650	400	450	550	650	
引きボルト接合部の仕様	繊維平行方向の引きボルトの本数 $S_{//}$	本	1	1	1	1	1	1	
	繊維直交方向の引きボルトの本数 $S_{\perp}$	本	0	0	0	0	0	0	
	引きボルト用穴の直径 $D$	mm	30	30	30	30	30	30	
	座金の奥行き長さ $W_w$	mm	150	150	150	150	150	150	
	座金の幅 $l_w$	mm	100	100	100	100	100	100	
	縁距離 $l_n$	mm	50	80	100	150	150	150	
	端距離 $l_e$	mm	400	400	400	150	200	300	
	角孔の長さ $l_f$	mm	110	110	110	110	110	110	
	剛性①算定用	単位面積あたりの端部圧縮剛性 $k_{e0}$	N/mm <sup>3</sup>	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6
	剛性②算定用	$\theta$ (スギの場合)	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	
	120角時の表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c120}$	kN/mm	400	400	400	400	400		
出力結果	強度性能に係る断面積	最外層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	6000
	内層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup>	2293	2293	2293	2293	2293	2293	
	最外層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	
	内層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	6000	
	最外層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup>	6000	9600	12000	18000	18000	18000	
	内層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup>	3000	4800	6000	9000	9000	9000	
	最外層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	
	内層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup>	6000	9600	12000	18000	18000	18000	
	角穴の両端部の木材の引張剛性 $K_T$	kN/mm <sup>2</sup>	538.9	862.3	1077.8	1616.7	1616.7	1616.7	
	ボルトの引張剛性 $K_B$	kN/mm <sup>2</sup>	141.9	141.9	141.9	230.6	205.0	167.7	
	直交層のめり込み剛性	弱軸試験体のみ $y_{I,y2}$	0	0	0	0	0	0	
	$C_x$	2.0	2.5	2.7	2.6	2.8	3.2		
	$C_y$	1	1	1	1	1	1		
	直交層のめり込み剛性 $k_d$	kN/mm	3.9	4.8	5.3	13.4	11.0	8.2	
	剛性①(本研究提案式)	端部圧縮剛性 $k_e$	kN/mm <sup>2</sup>	378.2	378.2	378.2	378.2	378.2	
全体歪みによる圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup>	134.8	134.8	134.8	359.4	269.5	179.7		
平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm	99.4	99.4	99.4	184.3	157.4	121.8		
CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	103.2	104.1	104.7	197.7	168.4	130.0		
推定値①の初期剛性 $K_P$	kN/mm	53.8	56.2	57.1	99.9	87.5	70.1		
推定値①の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	11.6	11.8	11.9	22.0	18.9	14.7		
初期剛性②(文献56)による提案式)	$\alpha$	0.476	0.370	0.323	0.244	0.244	0.244		
$L_f$	174.4	269.6	333.0	491.6	491.6	491.6			
$L'$	333.0	428.2	491.6	650.2	650.2	650.2			
全体歪みによる圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm	194.1	190.5	182.4	190.9	183.0	169.0		
単位面積あたりの表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c0}$	N/mm <sup>3</sup>	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8		
表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c}$	kN/mm	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4	230.4		
平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm	105.3	104.3	101.8	104.4	102.0	97.5		
CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm <sup>2</sup>	109.2	109.1	107.1	117.8	113.0	105.7		
推定値②の初期剛性 $K_P$	kN/mm	55.4	57.6	57.8	74.4	69.7	62.3		
推定値②の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	12.2	12.3	12.1	13.7	13.1	12.2		
初期剛性③(文献57)による提案式)	文献56)の単位面積あたりの圧縮剛性 $k_{//m0}$	N/mm <sup>3</sup>	14.7	11.5	10.2	3.3	4.3		
文献56)の平行層の圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm	122.2	95.7	84.9	27.1	35.9	52.5		
平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm	79.8	67.6	62.0	24.3	31.0	42.8		
CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	83.7	72.4	67.4	37.7	42.1	51.0		
推定値③の初期剛性 $K_P$	kN/mm	48.0	45.4	43.8	31.7	34.2	38.2		
推定値③の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	9.6	8.4	7.9	4.6	5.1	6.1		
降伏耐力	降伏耐力 $P_y$	kN	271.46	271.46	271.46	271.46	271.46		
最大耐力	引張耐力 $P_{pull}$	kN	116.6	186.6	233.2	349.8	349.8		
	座金下部の接合面のせん断耐力 $P_{shear0}$	kN	272.8	272.8	272.8	102.3	136.4		
	$P_{shear0}$ の適用判定 $\text{Max}(P_{shear1}, P_y)$	kN	272.8	272.8	272.8	271.5	271.5		
	座金下部両端の接合面のせん断耐力 $P_{shear2}$	kN	136.4	218.2	272.8	153.5	204.6		
	最大耐力 $P_{max}$	kN	116.6	186.6	233.2	153.5	204.6		
ボルトを先行降伏させないための強度判定	ボルトの降伏耐力 $P_{yB}$	kN	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1		
	ボルト採用の判定	kN	適用	適用	適用	適用	適用		
	ボルトの最大耐力 $P_{max}$	kN	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0		

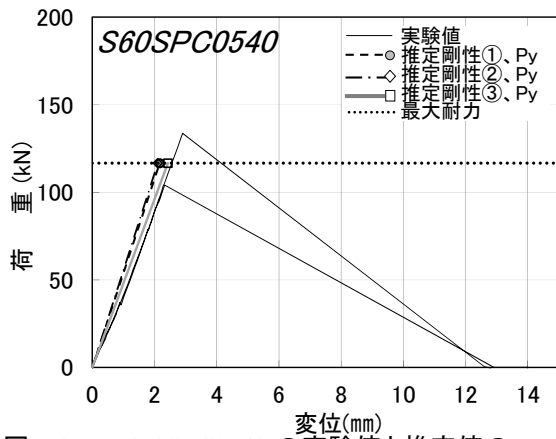


図 7.3-11 S60SPC0540 の実験値と推定値の比較

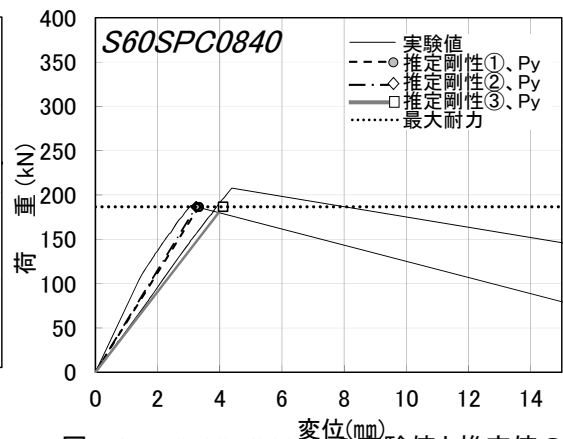


図 7.3-12 S60SPC 0840 の実験値と推定値の比較

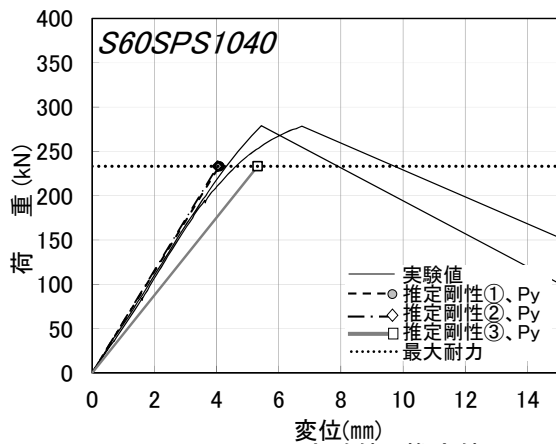


図 7.3-13 S60SPC1040 の実験値と推定値の比較

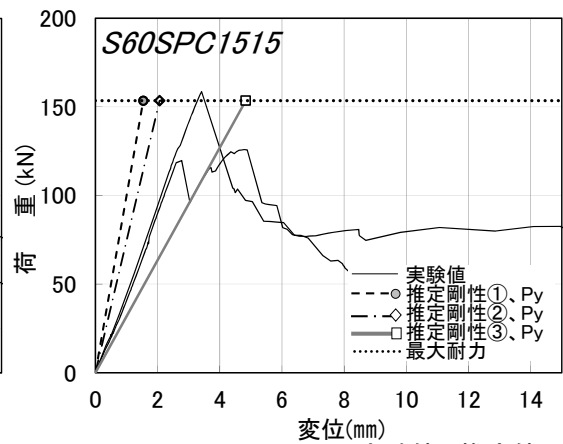


図 7.3-14 S60SPC 1515 の実験値と推定値の比較

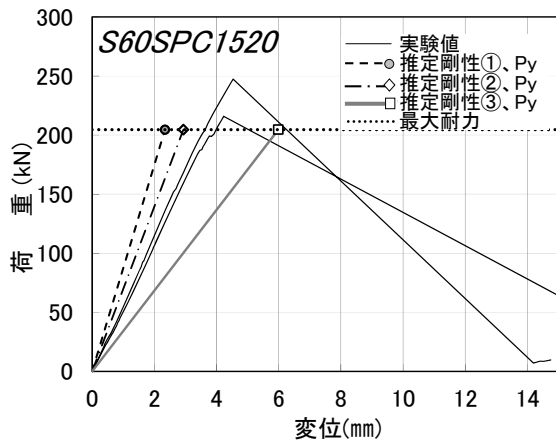


図 7.3-15 S60SPC1520 の実験値と推定値の比較

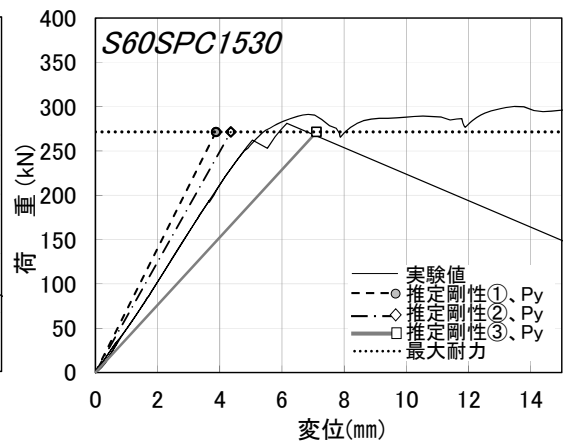


図 7.3-16 S60SPC 1530 の実験値と推定値の比較

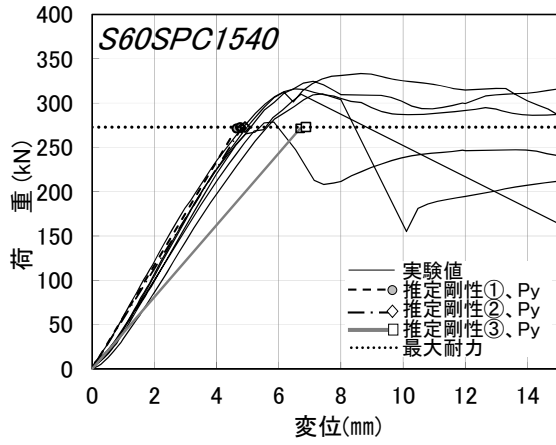


図 7.3-17 S60SPC1540 の実験値と推定値の比較

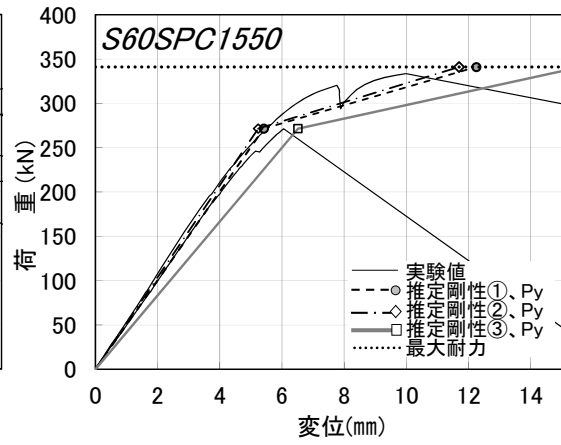


図 7.3-18 S60SPC 1550 の実験値と推定値の比較

表 7.3-3 第 5 章グループ 3 の引きボルト接合部の強度性能の入力条件と推定結果

項目		S30APC 0540	S30APC 0840	S30APC 1040	S30APC 1515	S30APC 1520	S30APC 1530	S30APC 1540	S30APC 1550	
入力条件	樹種	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	
	繊維方向に対する置換係数 $n$	5	5	5	5	5	5	5	5	
	最外層 繊維平行方向層の数 $n_{//O}$	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	
	内層 繊維平行方向層の数 $n_{//I}$	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1	
	最外層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp O}$	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0	
	内層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp I}$	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	
	ラミナの厚み $t$	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	
	CLTの幅 $L$	mm 210	mm 270	mm 310	mm 410	mm 410	mm 410	mm 410	mm 410	
	最外層 繊維平行方向のヤング係数 $E_{//O}$	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	N/mm <sup>2</sup> 6218.75	
	内層 繊維平行方向のヤング係数 $E_{//I}$	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	N/mm <sup>2</sup> 5973.81	
	最外層 繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp O}$	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	N/mm <sup>2</sup> 124.375	
	内層 繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp I}$	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	N/mm <sup>2</sup> 119.476	
	繊維平行方向の圧縮強度 $F_{//c}$	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	
	繊維平行方向の引張強度 $F_{//T}$	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	
	外層接着面のせん断強度 $F_{gs}$	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	
内層接着面のせん断強度 $F_{gi}$	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85		
ボルトの仕様	ボルトの強度区分	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	
	ボルトの0.2%耐力 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	900	900	900	900	900	900	900	900	
	ボルトの呼び引張強さ $P_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
	ボルトの有効断面積 $A_B$	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	
	ボルトのヤング係数 $E_B$	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	
引きボルト接合部の仕様	ボルトのナット間長さ $l_B$	mm <sup>2</sup> 650	mm <sup>2</sup> 650	mm <sup>2</sup> 650	mm <sup>2</sup> 400	mm <sup>2</sup> 450	mm <sup>2</sup> 550	mm <sup>2</sup> 650	mm <sup>2</sup> 750	
	繊維平行方向の引きボルトの本数 $S_{//}$	本 1	本 1	本 1	本 1	本 1	本 1	本 1	本 1	
	繊維直交方向の引きボルトの本数 $S_{\perp}$	本 0	本 0	本 0	本 0	本 0	本 0	本 0	本 0	
	引きボルト用穴の直径 $D$	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	
	座金の奥行き長さ $W_w$	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	
	座金の幅 $W$	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	
	縁距離 $l_e$	mm 50	mm 80	mm 100	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	
	端距離 $l_s$	mm 400	mm 400	mm 400	mm 150	mm 200	mm 300	mm 400	mm 500	
剛性①算定用	単位面積あたりの端面圧縮剛性 $k_{ed}$	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	
	$\theta$ (スギの場合)	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	
剛性②算定用	120°角時の表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{/c120}$	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400		
強度性能に係る断面積	最外層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	
	内層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	
	最外層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	
	内層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	
	最外層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 9600	mm <sup>2</sup> 12000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	
	内層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup> 3000	mm <sup>2</sup> 4800	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 9000	
	最外層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	
	内層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 9600	mm <sup>2</sup> 12000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	
	角欠の両端部の木材の引張剛性 $K_T$		kN/mm <sup>2</sup> 508.6	kN/mm <sup>2</sup> 813.8	kN/mm <sup>2</sup> 1017.3	kN/mm <sup>2</sup> 1525.9	kN/mm <sup>2</sup> 1525.9	kN/mm <sup>2</sup> 1525.9	kN/mm <sup>2</sup> 1525.9	kN/mm <sup>2</sup> 1525.9
	ボルトの引張剛性 $K_B$		kN/mm <sup>2</sup> 141.9	kN/mm <sup>2</sup> 141.9	kN/mm <sup>2</sup> 141.9	kN/mm <sup>2</sup> 230.6	kN/mm <sup>2</sup> 205.0	kN/mm <sup>2</sup> 167.7	kN/mm <sup>2</sup> 141.9	kN/mm <sup>2</sup> 123.0
直交層のめり込み剛性	弱軸試験体のみ $\nu_{I,Y2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	
	$C_x$	2.0	2.5	2.7	2.6	2.8	3.2	3.4	3.5	
	$C_y$	1	1	1	1	1	1	1	1	
剛性①(本研究提案式)	直交層のめり込み剛性 $k_d$	kN/mm 3.6	kN/mm 4.4	kN/mm 4.9	kN/mm 12.3	kN/mm 10.2	kN/mm 7.5	kN/mm 6.0	kN/mm 5.0	
	端面圧縮剛性 $k_e$	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup> 127.5	kN/mm <sup>2</sup> 127.5	kN/mm <sup>2</sup> 127.5	kN/mm <sup>2</sup> 340.1	kN/mm <sup>2</sup> 255.1	kN/mm <sup>2</sup> 170.0	kN/mm <sup>2</sup> 127.5	kN/mm <sup>2</sup> 102.0	
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm 95.4	kN/mm 95.4	kN/mm 95.4	kN/mm 179.1	kN/mm 152.3	kN/mm 117.3	kN/mm 95.4	kN/mm 80.3	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm 98.9	kN/mm 99.8	kN/mm 100.3	kN/mm 191.4	kN/mm 162.5	kN/mm 124.8	kN/mm 101.4	kN/mm 85.3	
	推定値①の初期剛性 $K_P$	kN/mm <b>52.3</b>	kN/mm <b>54.7</b>	kN/mm <b>55.6</b>	kN/mm <b>97.9</b>	kN/mm <b>85.6</b>	kN/mm <b>68.4</b>	kN/mm <b>56.9</b>	kN/mm <b>48.8</b>	
	推定値①の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm <b>11.1</b>	kN/mm <b>11.3</b>	kN/mm <b>11.4</b>	kN/mm <b>21.4</b>	kN/mm <b>18.3</b>	kN/mm <b>14.1</b>	kN/mm <b>11.5</b>	kN/mm <b>9.8</b>	
初期剛性②(文献S6)による提案式)	$\alpha$	0.476	0.370	0.323	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	
	$L_f$	174.4	269.6	333.0	491.6	491.6	491.6	491.6	491.6	
	$L'$	333.0	428.2	491.6	650.2	650.2	650.2	650.2	650.2	
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm 183.3	kN/mm 179.9	kN/mm 172.2	kN/mm 180.2	kN/mm 172.8	kN/mm 159.6	kN/mm 148.2	kN/mm 138.4	
	単位面積あたりの表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{/co}$	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	
	表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{/c}$	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm 102.1	kN/mm 101.0	kN/mm 98.5	kN/mm 101.1	kN/mm 98.7	kN/mm 94.3	kN/mm 90.2	kN/mm 86.5	
	CLTの圧縮剛性 $K_{/c}$	kN/mm <sup>2</sup> 105.6	kN/mm <sup>2</sup> 105.4	kN/mm <sup>2</sup> 103.4	kN/mm <sup>2</sup> 113.4	kN/mm <sup>2</sup> 108.9	kN/mm <sup>2</sup> 101.8	kN/mm <sup>2</sup> 96.2	kN/mm <sup>2</sup> 91.4	
	推定値②の初期剛性 $K_P$	kN/mm <b>54.1</b>	kN/mm <b>56.3</b>	kN/mm <b>56.5</b>	kN/mm <b>72.4</b>	kN/mm <b>67.9</b>	kN/mm <b>60.8</b>	kN/mm <b>55.3</b>	kN/mm <b>50.7</b>	
	推定値②の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm <b>11.8</b>	kN/mm <b>11.9</b>	kN/mm <b>11.7</b>	kN/mm <b>13.2</b>	kN/mm <b>12.7</b>	kN/mm <b>11.7</b>	kN/mm <b>11.0</b>	kN/mm <b>10.4</b>	
初期剛性③(文献S7)による提案式)	文献S6)の単位面積あたりの圧縮剛性 $k_{//m0}$	N/mm <sup>3</sup> 13.5	N/mm <sup>3</sup> 10.5	N/mm <sup>3</sup> 9.4	N/mm <sup>3</sup> 3.0	N/mm <sup>3</sup> 4.0	N/mm <sup>3</sup> 5.8	N/mm <sup>3</sup> 7.5	N/mm <sup>3</sup> 9.0	
	文献S6)の平行層の圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm 111.7	kN/mm 87.4	kN/mm 77.6	kN/mm 24.8	kN/mm 32.8	kN/mm 48.0	kN/mm 62.0	kN/mm 74.4	
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm 75.2	kN/mm 63.4	kN/mm 58.0	kN/mm 22.4	kN/mm 28.7	kN/mm 39.7	kN/mm 48.8	kN/mm 56.3	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm 78.8	kN/mm 67.8	kN/mm 62.9	kN/mm 34.7	kN/mm 38.8	kN/mm 47.3	kN/mm 54.8	kN/mm 61.2	
	推定値③の初期剛性 $K_P$	kN/mm <b>46.1</b>	kN/mm <b>43.4</b>	kN/mm <b>41.8</b>	kN/mm <b>29.6</b>	kN/mm <b>32.0</b>	kN/mm <b>36.0</b>	kN/mm <b>38.6</b>	kN/mm <b>39.8</b>	
推定値③の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm <b>9.0</b>	kN/mm <b>7.9</b>	kN/mm <b>7.4</b>	kN/mm <b>4.2</b>	kN/mm <b>4.7</b>	kN/mm <b>5.7</b>	kN/mm <b>6.5</b>	kN/mm <b>7.2</b>		
降伏耐力	降伏耐力 $F_p$	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	kN <b>271.46</b>	
	引張耐力 $P_{max}$	kN 116.6	kN 186.6	kN 233.2	kN 349.8	kN 349.8	kN 349.8	kN 349.8	kN 349.8	
最大耐力	座金下部の接着面のせん断耐力 $P_{shear0}$	kN 272.8	kN 272.8	kN 272.8	kN 102.3	kN 136.4	kN 204.6	kN 272.8	kN 341.0	
	$P_{shear1}$ の適用判定 $\text{Max}(P_{shear1}, P_p)$	kN 272.8	kN 272.8	kN 272.8	kN 271.5	kN 271.5	kN 271.5	kN 272.8	kN 341.0	
	座金下部両端の接着面のせん断耐力 $P_{shear2}$	kN 136.4	kN 218.2	kN 272.8	kN 153.5	kN 204.6	kN 306.9	kN 409.2	kN 511.5	
	最大耐力 $P_{max}$	kN <b>116.6</b>	kN <b>186.6</b>	kN <b>233.2</b>	kN <b>153.5</b>	kN <b>204.6</b>	kN <b>271.5</b>	kN <b>272.8</b>	kN <b>341.0</b>	
ボルトを先行降伏させないための強度判定	ボルトの降伏耐力 $P_{dB}$	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	
	ボルト採用の判定	kN 適用	kN 適用	kN 適用	kN 適用	kN 適用	kN 適用	kN 適用	kN 適用	
	ボルトの最大耐力 $P_{max}$	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	

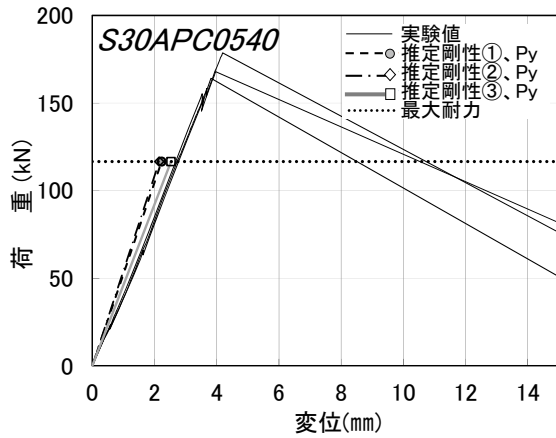


図 7.3-19 S30APC0540 の実験値と推定値の比較

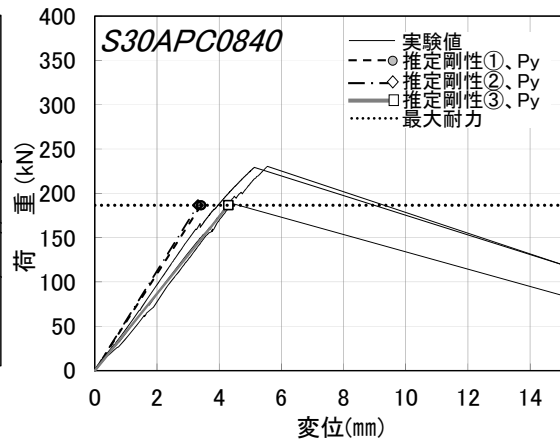


図 7.3-20 S30APC0840 の実験値と推定値の比較

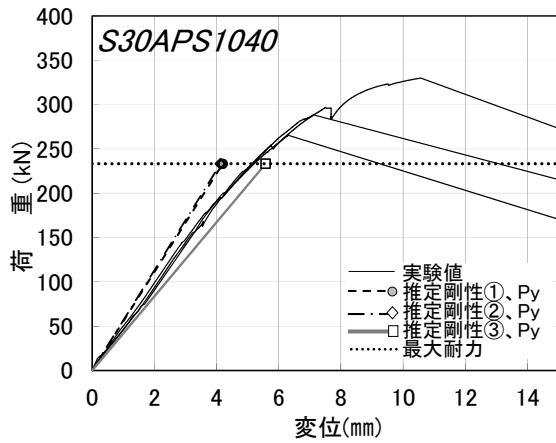


図 7.3-21 S30APC1040 の実験値と推定値の比較

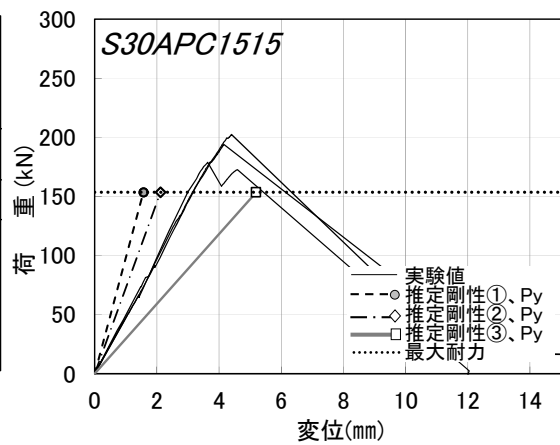


図 7.3-22 S30APC1515 の実験値と推定値の比較

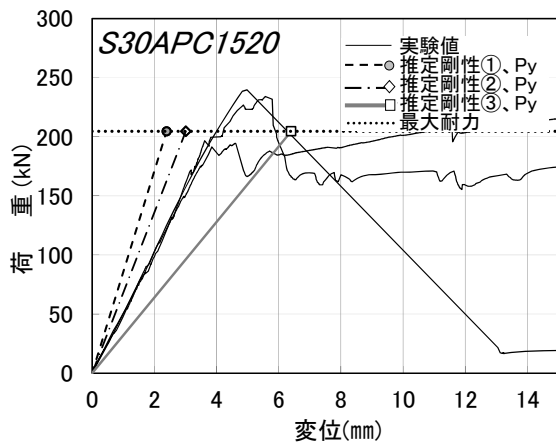


図 7.3-23 S30APC1520 の実験値と推定値の比較

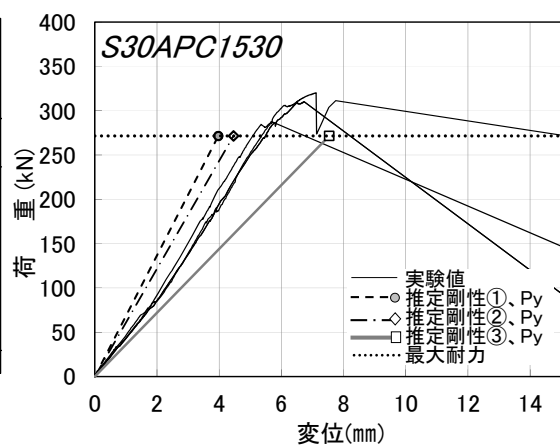


図 7.3-24 S30APC1530 の実験値と推定値の比較

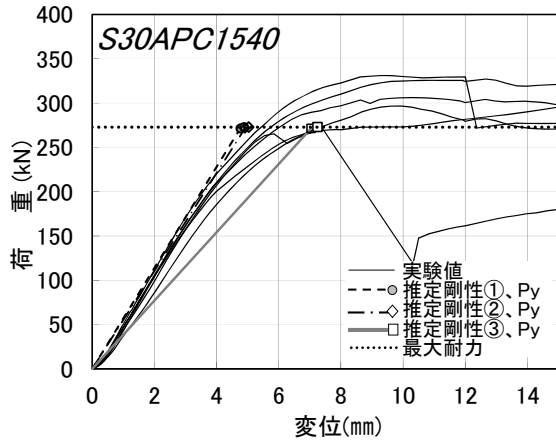


図 7.3-25 S30APC1540 の実験値と推定値の比較

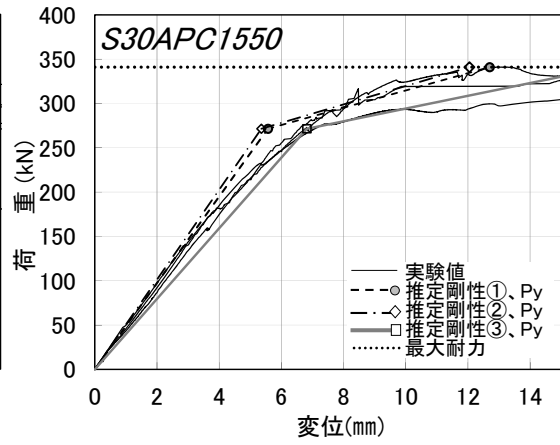


図 7.3-26 S30APC1550 の実験値と推定値の比較

表 7.3-4 第 5 章グループ 4 の引きボルト接合部の強度性能の入力条件と推定結果

項目		S30AOC	S30AOC	S30AOC	S30AOC	S30AOC	S30AOC	S30AOC	S30AOC		
		0540	0840	1040	1515	1520	1530	1540	1550		
入力条件	樹種	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ		
	繊維方向に対する置換係数 $n$	5	5	5	5	5	5	5	5		
	最外層 繊維平行方向層の数 $n_{//O}$	0	0	0	0	0	0	0	0		
	内層 繊維平行方向層の数 $n_{//I}$	2	2	2	2	2	2	2	2		
	最外層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp O}$	2	2	2	2	2	2	2	2		
	内層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp I}$	1	1	1	1	1	1	1	1		
	ラミナの厚み $t$	mm	30	30	30	30	30	30	30	30	
	CLTの幅 $L$	mm	210	270	310	410	410	410	410	410	
	最外層繊維平行方向のヤング係数 $E_{//O}$	N/mm <sup>2</sup>	6218.75	6218.75	6218.75	6218.75	6218.75	6218.75	6218.75	6218.75	
	内層繊維平行方向のヤング係数 $E_{//I}$	N/mm <sup>2</sup>	5973.81	5973.81	5973.81	5973.81	5973.81	5973.81	5973.81	5973.81	
	最外層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp O}$	N/mm <sup>2</sup>	124.375	124.375	124.375	124.375	124.375	124.375	124.375	124.375	
	内層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp I}$	N/mm <sup>2</sup>	119.476	119.476	119.476	119.476	119.476	119.476	119.476	119.476	
	繊維平行方向の圧縮強度 $F_{//c}$	N/mm <sup>2</sup>	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	
	繊維平行方向の引張強度 $F_{//T}$	N/mm <sup>2</sup>	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	
	外層接着面のせん断強度 $F_{gs}$	N/mm <sup>2</sup>	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	
	内層接着面のせん断強度 $F_{gl}$	N/mm <sup>2</sup>	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	
	ボルトの仕様	ボルトの強度区分		10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	
		ボルトの0.2%耐力 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )		900	900	900	900	900	900	900	
		ボルトの呼び引張強さ $P_m$ (N/mm <sup>2</sup> )		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
		ボルトの有効断面積 $A_B$	mm <sup>2</sup>	459	459	459	459	459	459	459	
		ボルトのヤング係数 $E_B$	N/mm <sup>2</sup>	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	
		ボルトのナット間長さ $l_B$	mm	650	650	650	400	450	550	650	750
	引きボルト接合部の仕様	繊維平行方向の引きボルトの本数 $S_{//}$	本	0	0	0	0	0	0	0	
		繊維直交方向の引きボルトの本数 $S_{\perp}$	本	1	1	1	1	1	1	1	
		引きボルト用穴の直径 $D$	mm	30	30	30	30	30	30	30	
		座金の奥行き長さ $W_w$	mm	150	150	150	150	150	150	150	
		座金の幅 $l_w$	mm	100	100	100	100	100	100	100	
		縁距離 $l_n$	mm	50	80	100	150	150	150	150	
	出力結果	端距離 $l_e$	mm	400	400	400	150	200	300	400	500
		角孔の長さ $l_f$	mm	110	110	110	110	110	110	110	110
剛性①算定用		単位面積あたりの端部圧縮剛性 $k_{e1}$	N/mm <sup>3</sup>	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	
剛性②算定用		$\theta$ (スギの場合)		0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	
		120角時の表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $K_{rc120}$	kN/mm	400	400	400	400	400	400	400	
強度性能に係る断面積		最外層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	
		内層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	
		最外層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	
		内層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	2293	2293	2293	2293	2293	2293	2293	
		最外層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0	0	
		内層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup>	6000	9600	12000	18000	18000	18000	18000	
		最外層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup>	6000	9600	12000	18000	18000	18000	18000	
	内層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup>	3000	4800	6000	9000	9000	9000	9000		
	角穴の両端部の木材の引張剛性 $K_T$	kN/mm <sup>2</sup>	335.9	537.4	671.8	1007.7	1007.7	1007.7	1007.7		
	ボルトの引張剛性 $K_B$	kN/mm <sup>2</sup>	141.9	141.9	141.9	230.6	205.0	167.7	141.9	123.0	
直交層のめり込み剛性	弱軸試験体のみ $y_1, y_2$		0	0	0	0	0	0	0		
	$C_x$		2.0	2.5	2.7	2.6	2.8	3.2	3.4	3.5	
	$C_y$		1	1	1	1	1	1	1		
剛性①(本研究提案式)	直交層のめり込み剛性 $k_d$	kN/mm	5.5	6.8	7.6	19.0	15.6	11.6	9.3	7.7	
	端部圧縮剛性 $k_e$	kN/mm	273.6	273.6	273.6	273.6	273.6	273.6	273.6		
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup>	89.6	89.6	89.6	239.0	179.2	119.5	89.6	71.7	
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm	67.5	67.5	67.5	127.6	108.3	83.2	67.5	56.8	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	73.0	74.3	75.1	146.5	123.9	94.8	76.8	64.5	
	推定値①の初期剛性 $K_P$	kN/mm	42.2	44.7	45.8	82.3	71.7	57.1	47.5	40.6	
推定値①の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	8.4	8.6	8.7	16.7	14.2	10.9	8.9	7.5		
初期剛性②(文献56)による提案式)	$\alpha$		0.476	0.370	0.323	0.244	0.244	0.244	0.244		
	$L_f$		174.4	269.6	333.0	491.6	491.6	491.6	491.6		
	$L'$		333.0	428.2	491.6	650.2	650.2	650.2	650.2		
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_{//cm}$	kN/mm	129.1	126.7	121.3	126.9	121.7	112.4	104.4	97.5	
	単位面積あたりの表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c0}$	N/mm <sup>3</sup>	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8		
	表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c}$	kN/mm	166.7	166.7	166.7	166.7	166.7	166.7	166.7		
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm	72.7	72.0	70.2	72.1	70.3	67.1	64.2	61.5	
	CLTの圧縮剛性 $K_{//C}$	kN/mm <sup>2</sup>	78.2	78.8	77.8	91.0	86.0	78.7	73.4	69.2	
	推定値②の初期剛性 $K_P$	kN/mm	43.9	46.3	46.7	61.3	57.1	50.9	46.2	42.4	
	推定値②の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	8.9	9.1	9.0	10.7	10.1	9.2	8.5	8.0	
初期剛性③(文献57)による提案式)	文献56)の単位面積あたりの圧縮剛性 $k_{//m0}$	N/mm <sup>3</sup>	16.0	12.5	11.0	3.5	4.6	6.7	8.6	10.4	
	文献56)の平行層の圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm	96.3	74.9	66.0	20.8	27.5	40.2	51.9	62.3	
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm	61.0	51.7	47.3	18.5	23.6	32.4	39.6	45.4	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	66.5	58.5	54.9	37.4	39.2	44.0	48.8	53.1	
推定値③の初期剛性 $K_P$	kN/mm	39.9	38.4	37.4	31.2	31.9	33.7	35.1	35.8		
推定値③の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	7.7	6.9	6.5	4.6	4.8	5.3	5.8	6.3		
降伏耐力	降伏耐力 $P_y$	kN	196.4	196.4	196.4	196.4	196.4	196.4	196.4		
最大耐力	引張耐力 $P_{pull}$	kN	77.7	124.4	155.5	233.2	233.2	233.2	233.2		
	座金下部の接着面のせん断耐力 $P_{shear0}$	kN	272.8	272.8	272.8	102.3	136.4	204.6	272.8	341.0	
	$P_{shear1}$ の適用判定 $\text{Max}(P_{shear1}, P_y)$	kN	272.8	272.8	272.8	196.4	196.4	204.6	272.8	341.0	
	座金下部両端の接着面のせん断耐力 $P_{shear2}$	kN	136.4	218.2	272.8	153.5	204.6	306.9	409.2	511.5	
最大耐力 $P_{max}$	kN	77.7	124.4	155.5	153.5	196.4	204.6	233.2	233.2		
ボルトを先行降伏させないための強度判定	ボルトの降伏耐力 $P_{yB}$	kN	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1	413.1		
	ボルト採用の判定	kN	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用		
	ボルトの最大耐力 $P_{max}$	kN	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0	459.0		



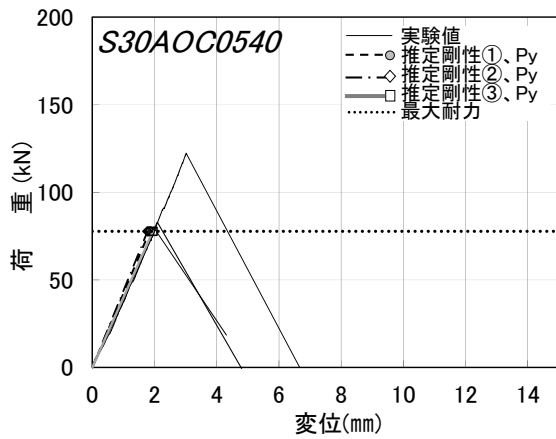


図 7.3-27 S30AOC0540 の実験値と推定値の比較

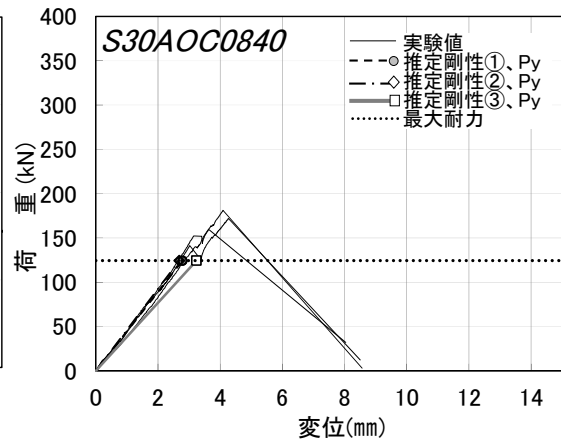


図 7.3-28 S30AOC0840 の実験値と推定値の比較

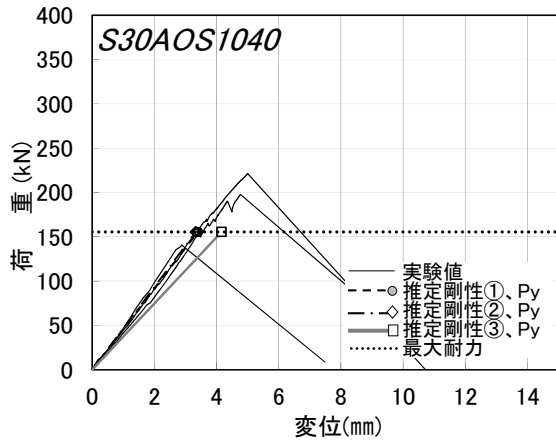


図 7.3-29 S30AOC1040 の実験値と推定値の比較

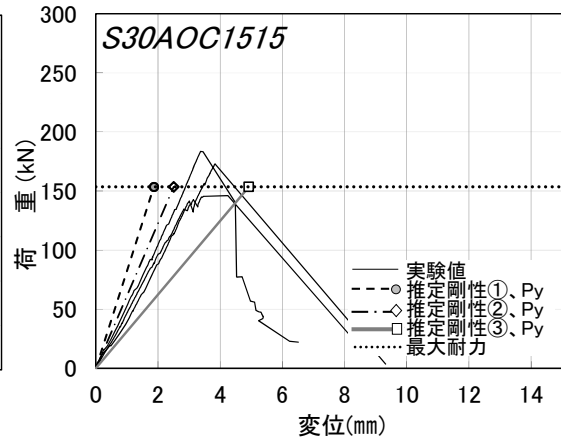


図 7.3-30 S30AOC1515 の実験値と推定値の比較

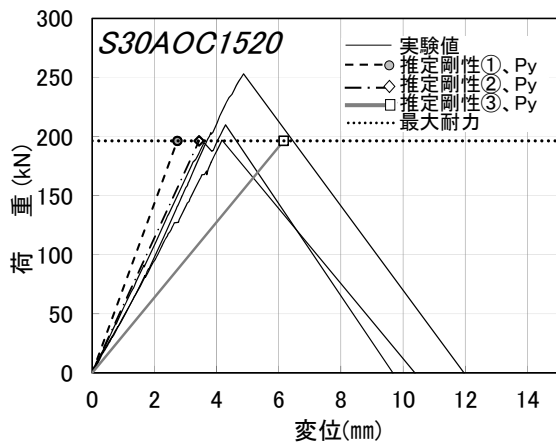


図 7.3-31 S30AOC1520 の実験値と推定値の比較

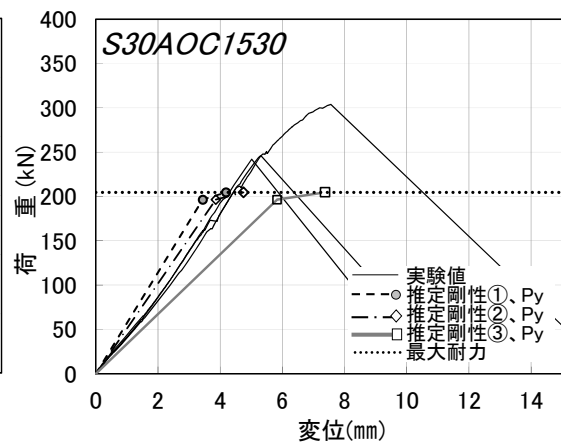


図 7.3-32 S30AOC1530 の実験値と推定値の比較

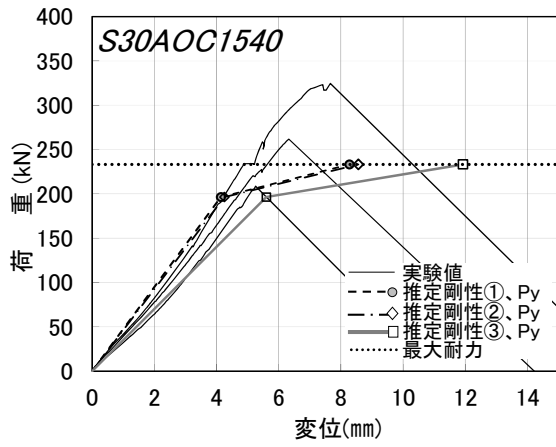


図 7.3-33 S30AOC1540 の実験値と推定値の比較

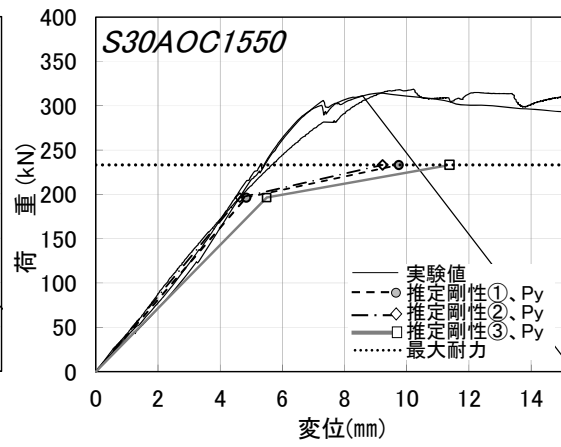


図 7.3-34 S30AOC1550 の実験値と推定値の比較

表 7.3-5 第5章グループ5,6の引きボルト接合部の強度性能の入力条件と推定結果

項目		Mx60AP	Mx60AP	Mx60AP	Mx60AP	Mx60AO	Mx60AO	Mx60AO	Mx60AO
		S0840	S1520	S1540	S1750	S0840	S1520	S1540	S1750
		スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ
入力条件	樹種								
	繊維方向に対する置換係数 $n$	5	5	5	5	5	5	5	5
	最外層 繊維平行方向層の数 $n_{//O}$	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0
	内層 繊維平行方向層の数 $n_{//I}$	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2
	最外層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp O}$	枚 0	枚 0	枚 0	枚 0	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2
	内層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp I}$	枚 2	枚 2	枚 2	枚 2	枚 1	枚 1	枚 1	枚 1
	ラミナの厚み $t$	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30
	CLTの幅 $L$	mm 270	mm 410	mm 410	mm 450	mm 270	mm 410	mm 410	mm 450
	最外層繊維平行方向のヤング係数 $E_{//O}$	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75	N/mm <sup>2</sup> 6843.75
	内層繊維平行方向のヤング係数 $E_{//I}$	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38	N/mm <sup>2</sup> 6102.38
	最外層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp O}$	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875	N/mm <sup>2</sup> 136.875
	内層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp I}$	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048	N/mm <sup>2</sup> 122.048
	繊維平行方向の圧縮強度 $F_{//c}$	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7	N/mm <sup>2</sup> 32.7
	繊維平行方向の引張強度 $F_{//T}$	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9	N/mm <sup>2</sup> 25.9
	外層接着面のせん断強度 $F_{gs}$	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56	N/mm <sup>2</sup> 1.56
	内層接着面のせん断強度 $F_{gi}$	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85	N/mm <sup>2</sup> 1.85
	ボルトの強度区分	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
	ボルトの0.2%耐力 $R_{0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	900	900	900	900	900	900	900	900
	ボルトの呼び引張強さ $P_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	ボルトの有効断面積 $A_B$	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459	mm <sup>2</sup> 459
ボルトのヤング係数 $E_B$	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	N/mm <sup>2</sup> 201000	
ボルトのナット間長さ $l_B$	mm <sup>2</sup> 550	mm <sup>2</sup> 350	mm <sup>2</sup> 550	mm <sup>2</sup> 650	mm <sup>2</sup> 550	mm <sup>2</sup> 350	mm <sup>2</sup> 550	mm <sup>2</sup> 650	
引きボルト接合部の仕様	繊維平行方向の引きボルトの本数 $N_{//}$	本 1	本 1	本 1	本 1	本 0	本 0	本 0	本 0
	繊維直交方向の引きボルトの本数 $N_{\perp}$	本 0	本 0	本 0	本 0	本 1	本 1	本 1	本 1
	引きボルト用穴の直径 $D$	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30	mm 30
	座金の奥行き長さ $W_w$ (mm)	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150	mm 150
	座金の幅 $T_w$	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100	mm 100
	縁距離 $l_e$	mm 80	mm 150	mm 150	mm 170	mm 80	mm 150	mm 150	mm 170
	端距離 $l_s$	mm 400	mm 200	mm 400	mm 500	mm 400	mm 200	mm 400	mm 500
	角孔の長さ $l_l$	mm 110	mm 110	mm 110	mm 110	mm 110	mm 110	mm 110	mm 110
	剛性①算定用	単位面積あたりの端部圧縮剛性 $k_{c0}$	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6	N/mm <sup>3</sup> 45.6
	剛性②算定用	$\theta$ (スギの場合)	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305
出力結果	120角時の表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $K_{c120}$	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400	kN/mm 400
	強度性能に係る断面積	最外層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0
	内層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{//c}$	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000
	最外層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000
	内層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 6000	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293	mm <sup>2</sup> 2293
	最外層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup> 9600	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 20400	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0
	内層 繊維平行方向の引張面積 $A_{//T}$	mm <sup>2</sup> 4800	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 10200	mm <sup>2</sup> 9600	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 20400
	最外層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 0	mm <sup>2</sup> 9600	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 20400
	内層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$	mm <sup>2</sup> 9600	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 18000	mm <sup>2</sup> 20400	mm <sup>2</sup> 4800	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 9000	mm <sup>2</sup> 10200
	角穴の両端部の木材の引張剛性 $K_T$	kN/mm <sup>2</sup> 874.2	kN/mm <sup>2</sup> 1639.1	kN/mm <sup>2</sup> 1639.1	kN/mm <sup>2</sup> 1857.7	kN/mm <sup>2</sup> 549.8	kN/mm <sup>2</sup> 1031.0	kN/mm <sup>2</sup> 1031.0	kN/mm <sup>2</sup> 1168.4
	ボルトの引張剛性 $K_B$	kN/mm <sup>2</sup> 167.7	kN/mm <sup>2</sup> 263.6	kN/mm <sup>2</sup> 167.7	kN/mm <sup>2</sup> 141.9	kN/mm <sup>2</sup> 167.7	kN/mm <sup>2</sup> 263.6	kN/mm <sup>2</sup> 167.7	kN/mm <sup>2</sup> 141.9
	直交層のめり込み剛性	弱軸試験体のみ $y1, y2$	0	0	0	0	0	0	0
	$C_x$	2.5	2.8	3.4	3.7	2.5	2.8	3.4	3.7
	$C_y$	1	1	1	1	1	1	1	1
	直交層のめり込み剛性 $k_d$	kN/mm 4.5	kN/mm 10.4	kN/mm 6.1	kN/mm 5.5	kN/mm 7.3	kN/mm 16.8	kN/mm 9.9	kN/mm 8.8
	剛性①(本研究提案式)	端部圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 378.2	kN/mm <sup>2</sup> 273.6	kN/mm <sup>2</sup> 273.6	kN/mm <sup>2</sup> 273.6
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup> 137.6	kN/mm <sup>2</sup> 275.3	kN/mm <sup>2</sup> 137.6	kN/mm <sup>2</sup> 110.1	kN/mm <sup>2</sup> 91.5	kN/mm <sup>2</sup> 183.1	kN/mm <sup>2</sup> 91.5	kN/mm <sup>2</sup> 73.2
	平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm 100.9	kN/mm 159.3	kN/mm 100.9	kN/mm 85.3	kN/mm 68.6	kN/mm 109.7	kN/mm 68.6	kN/mm 57.8
	CLTの圧縮剛性 $k_c$	kN/mm 105.4	kN/mm 169.7	kN/mm 107.0	kN/mm 90.7	kN/mm 75.9	kN/mm 126.5	kN/mm 78.5	kN/mm 66.6
	推定値①の初期剛性 $K_P$	kN/mm 60.3	kN/mm 97.1	kN/mm 62.8	kN/mm 53.7	kN/mm 47.7	kN/mm 78.9	kN/mm 50.9	kN/mm 43.6
推定値①の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm 12.0	kN/mm 19.4	kN/mm 12.3	kN/mm 10.4	kN/mm 8.8	kN/mm 14.7	kN/mm 9.2	kN/mm 7.8	
初期剛性②(文献56)による提案式)	$\alpha$	0.370	0.244	0.244	0.222	0.370	0.244	0.244	
$L_f$	269.6	491.6	491.6	555.0	269.6	491.6	491.6	555.0	
$L'$	428.2	650.2	650.2	713.6	428.2	650.2	650.2	713.6	
全体歪みによる圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm 193.4	kN/mm 185.7	kN/mm 159.3	kN/mm 140.8	kN/mm 129.4	kN/mm 124.3	kN/mm 106.6	kN/mm 94.2	
単位面積あたりの表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c0}$	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	N/mm <sup>3</sup> 27.8	
表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{//c}$	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 230.4	kN/mm 166.7	kN/mm 166.7	kN/mm 166.7	kN/mm 166.7	
平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm 105.1	kN/mm 102.8	kN/mm 94.2	kN/mm 87.4	kN/mm 72.8	kN/mm 71.2	kN/mm 65.0	kN/mm 60.2	
CLTの圧縮剛性 $k_{//c}$	kN/mm <sup>2</sup> 109.6	kN/mm <sup>2</sup> 113.2	kN/mm <sup>2</sup> 100.3	kN/mm <sup>2</sup> 92.8	kN/mm <sup>2</sup> 80.1	kN/mm <sup>2</sup> 88.0	kN/mm <sup>2</sup> 75.0	kN/mm <sup>2</sup> 69.0	
推定値②の初期剛性 $K_P$	kN/mm 61.6	kN/mm 75.5	kN/mm 60.5	kN/mm 54.5	kN/mm 49.4	kN/mm 62.0	kN/mm 49.3	kN/mm 44.7	
推定値②の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm 12.5	kN/mm 13.3	kN/mm 11.6	kN/mm 10.7	kN/mm 9.3	kN/mm 10.5	kN/mm 8.8	kN/mm 8.1	
初期剛性③(文献57)による提案式)	文献56)の単位面積あたりの圧縮剛性 $k_{//m0}$	N/mm <sup>3</sup> 11.3049	N/mm <sup>3</sup> 4.23771	N/mm <sup>3</sup> 8.01125	N/mm <sup>3</sup> 8.98764	N/mm <sup>3</sup> 13.3866	N/mm <sup>3</sup> 4.90632	N/mm <sup>3</sup> 9.27524	
文献56)の平行層の圧縮剛性 $k_{//m}$	kN/mm 93.8	kN/mm 35.1	kN/mm 66.4	kN/mm 74.5	kN/mm 80.3	kN/mm 29.4	kN/mm 55.7	kN/mm 62.1	
平行層の圧縮剛性 $k_{//}$	kN/mm 66.6	kN/mm 30.5	kN/mm 51.6	kN/mm 56.3	kN/mm 54.2	kN/mm 25.0	kN/mm 41.7	kN/mm 45.2	
CLTの圧縮剛性 $k_c$	kN/mm 71.1	kN/mm 40.9	kN/mm 57.7	kN/mm 61.8	kN/mm 61.5	kN/mm 41.8	kN/mm 51.7	kN/mm 54.1	
推定値③の初期剛性 $K_P$	kN/mm 47.2	kN/mm 34.6	kN/mm 41.8	kN/mm 42.1	kN/mm 41.6	kN/mm 34.9	kN/mm 38.0	kN/mm 37.9	
推定値③の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm 8.4	kN/mm 5.0	kN/mm 6.9	kN/mm 7.3	kN/mm 7.3	kN/mm 5.1	kN/mm 6.2	kN/mm 6.4	
降伏耐力	降伏耐力 $P_v$	kN 271.46	kN 271.46	kN 271.46	kN 271.46	kN 196.4	kN 196.4	kN 196.4	
引張耐力 $P_{pull}$	kN 186.6	kN 349.8	kN 349.8	kN 396.5	kN 124.4	kN 233.2	kN 233.2	kN 264.3	
最大耐力	座金下部の接着面のせん断耐力 $P_{shear0}$	kN 272.8	kN 136.4	kN 272.8	kN 341.0	kN 272.8	kN 136.4	kN 272.8	
$P_{shear1}$ の適用判定 $\text{Max}(P_{shear1}, P_v)$	kN 272.8	kN 271.5	kN 272.8	kN 341.0	kN 272.8	kN 196.4	kN 272.8	kN 341.0	
座金下部両端の接着面のせん断耐力 $P_{shear2}$	kN 218.2	kN 204.6	kN 409.2	kN 579.7	kN 218.2	kN 204.6	kN 409.2	kN 579.7	
最大耐力 $P_{max}$	kN 186.6	kN 204.6	kN 272.8	kN 341.0	kN 124.4	kN 196.4	kN 233.2	kN 264.3	
ボルトを先行降伏させないための強度判定	ボルトの降伏耐力 $P_{1\theta}$	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	kN 413.1	
ボルト採用の判定	kN 適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	
ボルトの最大耐力 $P_{max}$	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	kN 459.0	

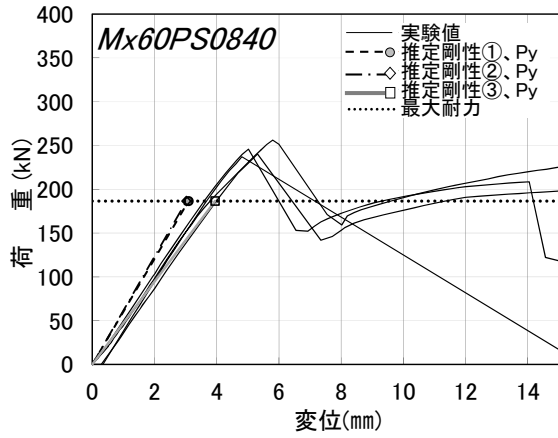


図 7.3-35 Mx60APC0840 の実験値と推定値の比較

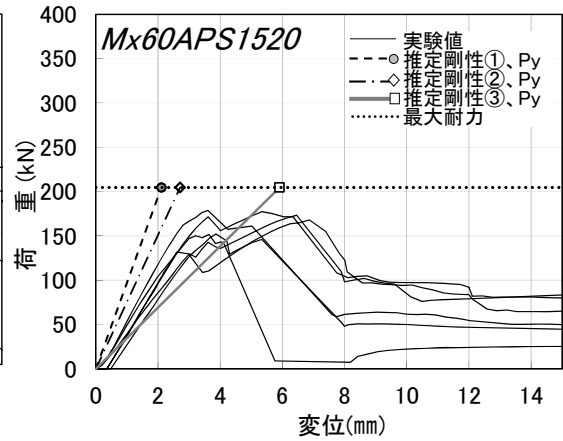


図 7.3-36 Mx60APC1520 の実験値と推定値の比較

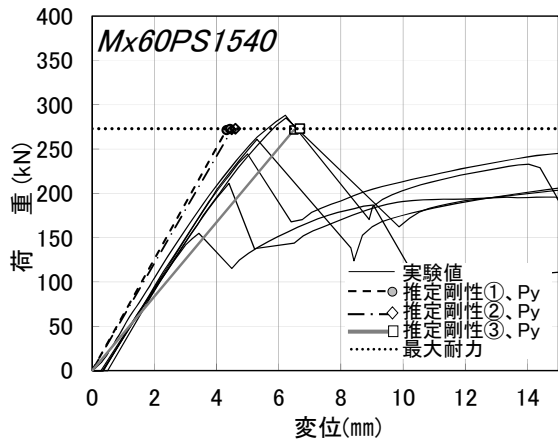


図 7.3-37 Mx60APC1540 の実験値と推定値の比較

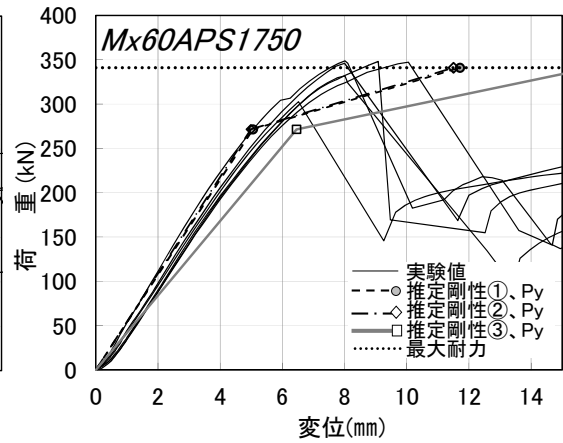


図 7.3-38 Mx60APC1520 の実験値と推定値の比較

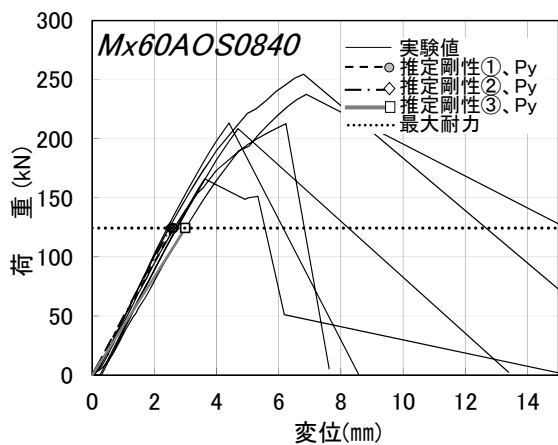


図 7.3-39 Mx60AOC0840 の実験値と推定値の比較

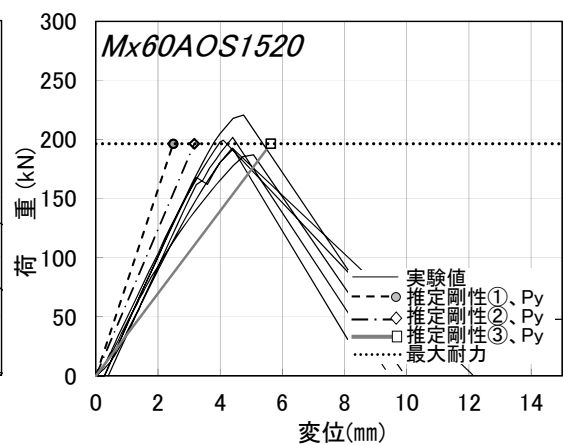


図 7.3-40 Mx60AOC1520 の実験値と推定値の比較

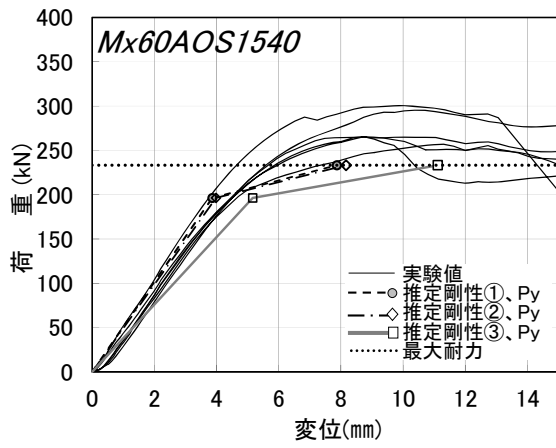


図 7.3-41 Mx60AOC1540 の実験値と推定値の比較

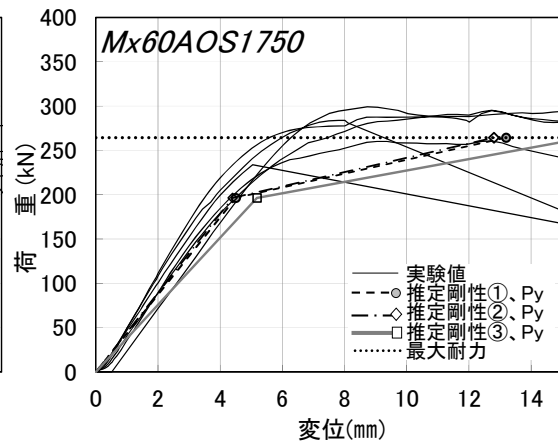


図 7.3-42 Mx60AOC1550 の実験値と推定値の比較

表 7.3-6 第6章グループ7,8の引きボルト接合部の強度性能の入力条件と推定結果

項目		P33	P34	P55	P55D	P77	O33	O34	O55	O55D	O77	
入力条件	樹種	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	スギ	
	繊維方向に対する置換係数 $n$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	最外層 繊維平行方向層の数 $n_{\parallel O}$	枚	2	2	2	2	2	0	0	0	0	
	内層 繊維平行方向層の数 $n_{\parallel I}$	枚	0	0	1	1	2	1	2	2	3	
	最外層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp O}$	枚	0	0	0	0	0	2	2	2	2	
	内層 繊維直交方向層の数 $n_{\perp I}$	枚	1	2	2	2	3	0	0	1	1	
	ラミナの厚み $t$	mm	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	CLTの幅 $L$	mm	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540
	最外層繊維平行方向のヤング係数 $E_{\parallel O}$	N/mm <sup>2</sup>	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75	6843.75
	内層繊維平行方向のヤング係数 $E_{\parallel I}$	N/mm <sup>2</sup>	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38	6102.38
	最外層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp O}$	N/mm <sup>2</sup>	136.875	136.875	136.875	136.875	136.875	136.875	136.875	136.875	136.875	136.875
	内層繊維直交方向のヤング係数 $E_{\perp I}$	N/mm <sup>2</sup>	122.048	122.048	122.048	122.048	122.048	122.048	122.048	122.048	122.048	122.048
	繊維平行方向の圧縮強度 $F_{\parallel c}$	N/mm <sup>2</sup>	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7
	繊維平行方向の引張強度 $F_{\parallel T}$	N/mm <sup>2</sup>	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9	25.9
	外層接着面のせん断強度 $F_{go}$	N/mm <sup>2</sup>	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
	内層接着面のせん断強度 $F_{gi}$	N/mm <sup>2</sup>	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
	ボルトの仕様	ボルトの強度区分		10.9	10.9	10.9	10.9	12.9	10.9	10.9	10.9	12.9
		ボルトの0.2%耐力 $R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )		900	900	900	900	1080	900	900	900	1080
		ボルトの呼び引張強さ $P_m$ (N/mm <sup>2</sup> )		1000	1000	1000	1000	1200	1000	1000	1000	1200
		ボルトの有効断面積 $A_B$	mm <sup>2</sup>	459	459	459	245	459	459	459	459	245
ボルトのヤング係数 $E_B$		N/mm <sup>2</sup>	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	201000	
ボルトのナット間長さ $l_B$		mm	550	550	550	550	550	550	550	550	550	
繊維平行方向の引きボルトの本数 $S_{\parallel}$		本	0	0	1	0	0	1	1	0	2	
繊維直交方向の引きボルトの本数 $S_{\perp}$		本	1	1	0	2	1	0	0	1	0	
引きボルト用穴の直径 $D$		mm	30	30	30	22	30	30	30	30	22	
座金の奥行き長さ $W_w$ (mm)		mm	90	120	150	150	210	90	120	150	150	
引きボルト接合部の仕様	座金の幅 $l_w$	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	縁距離 $l_e$	mm	215	215	215	215	215	215	215	215	215	
	端距離 $l_s$	mm	400	400	400	400	400	400	400	400	400	
	角孔の長さ $l_f$	mm	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
	剛性①算定用	単位面積あたりの端部圧縮剛性 $k_{e0}$	N/mm <sup>3</sup>	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6	45.6
		$\theta$ (スギの場合)		0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305
	剛性②算定用	120角時の表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $K_{i/220}$	kN/mm	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	強度性能に係る断面積	最外層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{\parallel c}$	mm <sup>2</sup>	6000	6000	6000	6000	6000	0	0	0	0
		内層 繊維平行方向の加圧面積 $A_{\parallel c}$	mm <sup>2</sup>	0	0	2293	3000	6000	2293	5293	6000	5240
		最外層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$	mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	6000	6000	6000	6000
内層 繊維直交方向の加圧面積 $A_{\perp c}$		mm <sup>2</sup>	2293	5293	6000	5240	8293	0	0	2293	3000	
最外層 繊維平行方向の引張面積 $A_{\parallel T}$		mm <sup>2</sup>	25800	25800	25800	25800	25800	0	0	0	0	
内層 繊維平行方向の引張面積 $A_{\parallel T}$		mm <sup>2</sup>	0	0	12900	12900	25800	12900	25800	25800	38700	
最外層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$		mm <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	25800	25800	25800	25800	
内層 繊維直交方向の引張面積 $A_{\perp T}$		mm <sup>2</sup>	12900	25800	25800	25800	38700	0	0	12900	25800	
角穴の両端部の木材の引張剛性 $K_T$		kN/mm <sup>2</sup>	1619.5	1633.8	2349.4	2349.4	3079.4	747.7	1463.4	1477.7	1477.7	
ボルトの引張剛性 $K_B$		kN/mm <sup>2</sup>	167.7	167.7	167.7	179.1	167.7	167.7	167.7	167.7	179.1	
直交層のめり込み剛性		弱軸試験体のみ $y_1, y_2$		0	0	0	0	0	0	0	0	0
		$C_x$		4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
		$C_y$		1	1	1	1	1	1	1	1	1
直交層のめり込み剛性 $k_d$		kN/mm	3.7	7.3	7.3	7.3	11.0	8.2	8.2	11.9	11.9	
剛性①(本研究提案式)		端部圧縮剛性 $k_e$	kN/mm <sup>2</sup>	273.6	273.6	378.2	410.4	547.2	104.6	241.4	273.6	378.2
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_c$	kN/mm <sup>2</sup>	102.7	102.7	137.6	148.4	194.2	35.0	80.8	91.5	79.9	
	平行層の圧縮剛性 $k_{\parallel}$	kN/mm	74.6	74.6	100.9	109.0	143.3	26.2	60.5	68.6	59.9	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	78.3	82.0	108.2	116.3	154.3	34.4	68.7	80.5	71.8	
	推定値①の初期剛性 $K_P$	kN/mm	51.7	53.3	64.0	68.5	78.3	27.5	47.2	52.4	49.5	
	推定値①の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	9.2	9.6	12.5	13.4	17.2	4.2	8.1	9.4	8.5	
初期剛性②(文献5)による提案式)	$\alpha$		0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	
	$L_f$		697.8	697.8	697.8	697.8	697.8	697.8	697.8	697.8	697.8	
	$L'$		856.3	856.3	856.3	856.3	856.3	856.3	856.3	856.3	856.3	
	全体歪みによる圧縮剛性 $k_{\parallel m}$	kN/mm	97.1	97.1	129.3	140.4	183.7	33.1	76.4	86.6	75.6	
	単位面積あたりの表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{e0}$	N/mm <sup>3</sup>	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	27.8	
	表面の凹凸に起因する圧縮剛性 $k_{\parallel c}$	kN/mm	166.7	166.7	230.4	250.0	333.3	63.7	147.0	166.7	145.5	
	平行層の圧縮剛性 $k_{\parallel}$	kN/mm	61.3	61.3	82.8	89.9	118.4	21.8	50.3	57.0	49.8	
	CLTの圧縮剛性 $K_{\parallel c}$	kN/mm	65.0	68.7	90.2	97.2	129.4	30.0	58.5	68.8	61.6	
	推定値②の初期剛性 $K_P$	kN/mm	45.5	47.3	57.2	61.4	71.4	24.6	42.1	47.2	44.5	
	推定値②の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	7.7	8.1	10.5	11.3	14.7	3.6	7.0	8.1	7.3	
初期剛性③(文献6)による提案式)	文献5)の単位面積あたりの圧縮剛性 $k_{\parallel m0}$	N/mm <sup>3</sup>	7.2	7.5	6.5	6.5	5.8	8.4	7.5	7.4	6.5	
	文献5)の平行層の圧縮剛性 $k_{\parallel m}$	kN/mm	43.3	44.7	53.8	58.4	70.0	19.3	39.5	44.2	38.6	
	平行層の圧縮剛性 $k_{\parallel}$	kN/mm	34.4	35.3	43.6	47.3	57.9	14.8	31.1	35.0	30.5	
	CLTの圧縮剛性 $K_C$	kN/mm	38.0	42.6	50.9	54.6	68.9	23.0	39.3	46.8	42.4	
	推定値③の初期剛性 $K_P$	kN/mm	30.4	33.3	38.4	41.1	48.1	19.7	31.2	35.7	33.5	
	推定値③の2次剛性 $K_{P2}$	kN/mm	4.6	5.1	6.1	6.6	8.2	2.8	4.8	5.6	5.1	
降伏耐力	降伏耐力 $P_y$	kN	196.4	196.4	271.46	294.6	392.8	75.062	173.26	196.4	171.51	
	引張耐力 $P_{tull}$	kN	334.3	334.3	501.4	501.4	668.6	167.1	334.3	334.3	501.4	
最大耐力	座金下部の接着面のせん断耐力 $P_{shear0}$	kN	124.8	198.8	272.8	272.8	420.8	124.8	198.8	272.8	272.8	
	$P_{shear1}$ の適用判定 $\text{Max}(P_{shear1}, P_y)$	kN	196.4	198.8	272.8	294.6	420.8	124.8	198.8	272.8	272.8	
	座金下部両端の接着面のせん断耐力 $P_{shear2}$	kN	268.3	427.4	586.5	586.5	904.7	268.3	427.4	586.5	586.5	
	最大耐力 $P_{max}$	kN	196.4	198.8	272.8	294.6	420.8	124.8	198.8	272.8	272.8	
ボルトを先行降伏させないための強度判定	ボルトの降伏耐力 $P_{yB}$	kN	413.1	413.1	413.1	441.0	495.7	413.1	413.1	413.1	441.0	
	ボルト採用の判定	kN	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	適用	
	ボルトの最大耐力 $P_{max}$	kN	459.0	459.0	459.0	490.0	550.8	459.0	459.0	459.0	550.8	

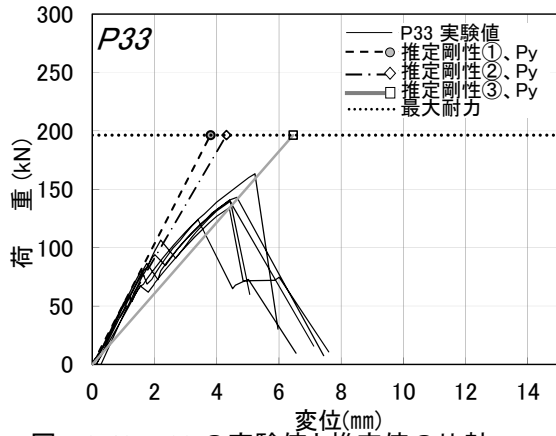


図 7.3-43 P33 の実験値と推定値の比較

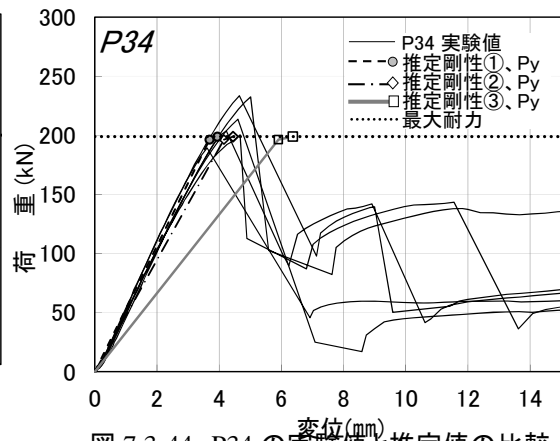


図 7.3-44 P34 の実験値と推定値の比較

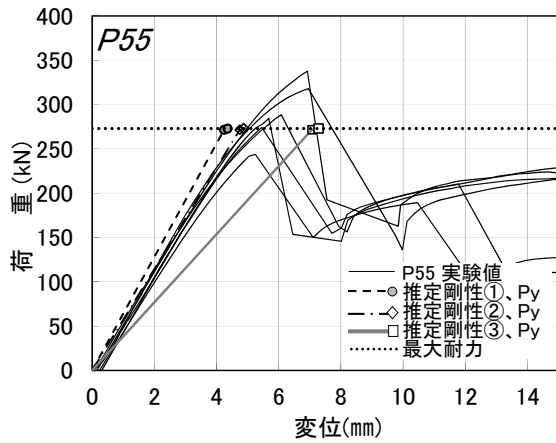


図 7.3-45 P55 の実験値と推定値の比較

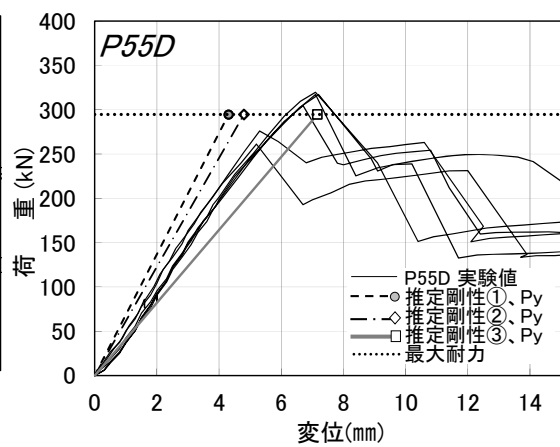


図 7.3-46 P55D の実験値と推定値の比較

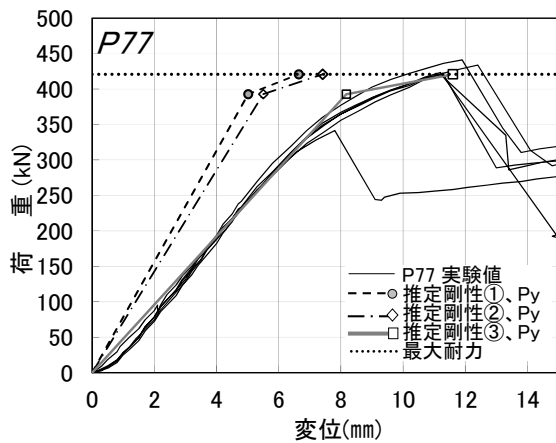


図 7.3-47 P77 の実験値と推定値の比較

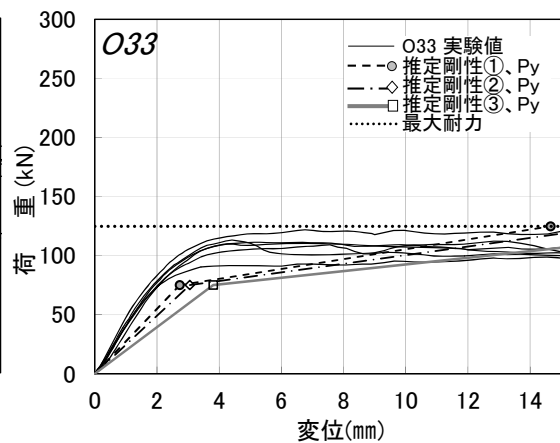


図 7.3-48 O33 の実験値と推定値の比較

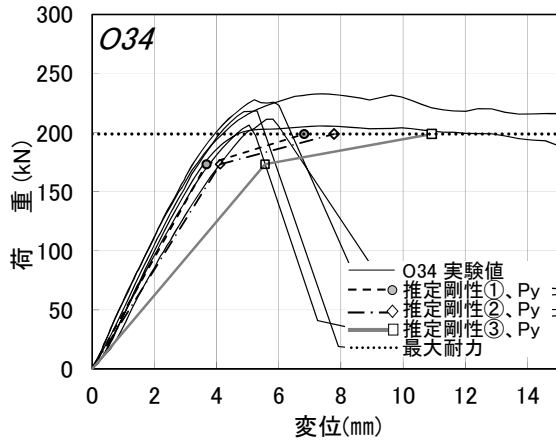


図 7.3-49 O34 の実験値と推定値の比較

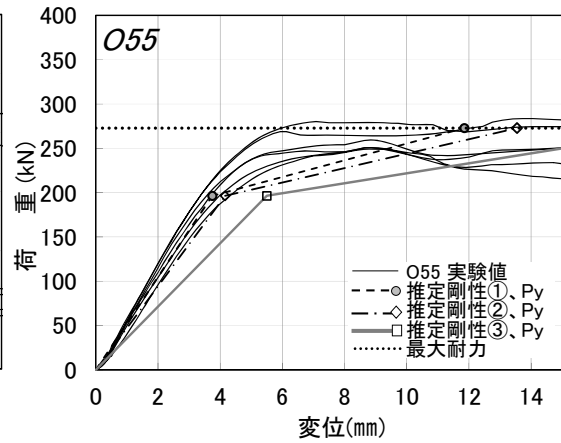


図 7.3-50 O55 の実験値と推定値の比較

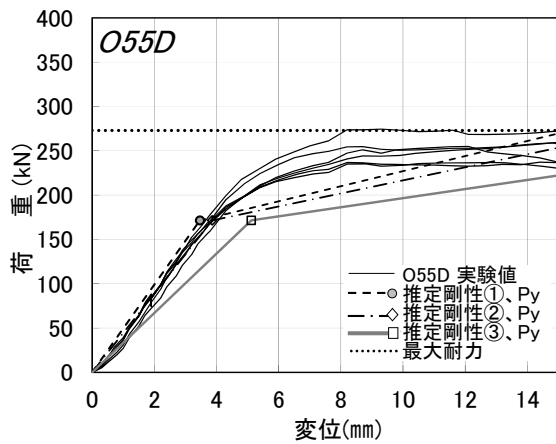


図 7.3-51 O55D の実験値と推定値の比較

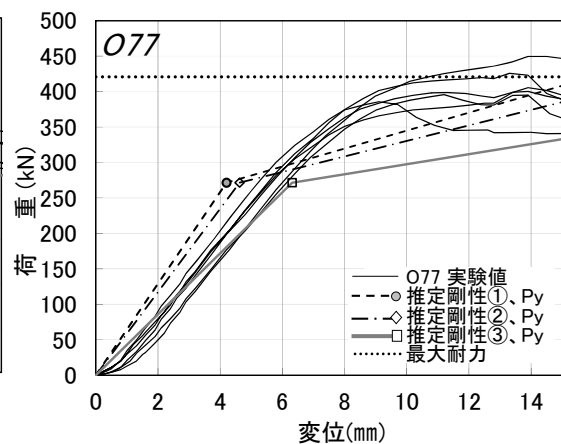


図 7.3-52 O77 の実験値と推定値の比較



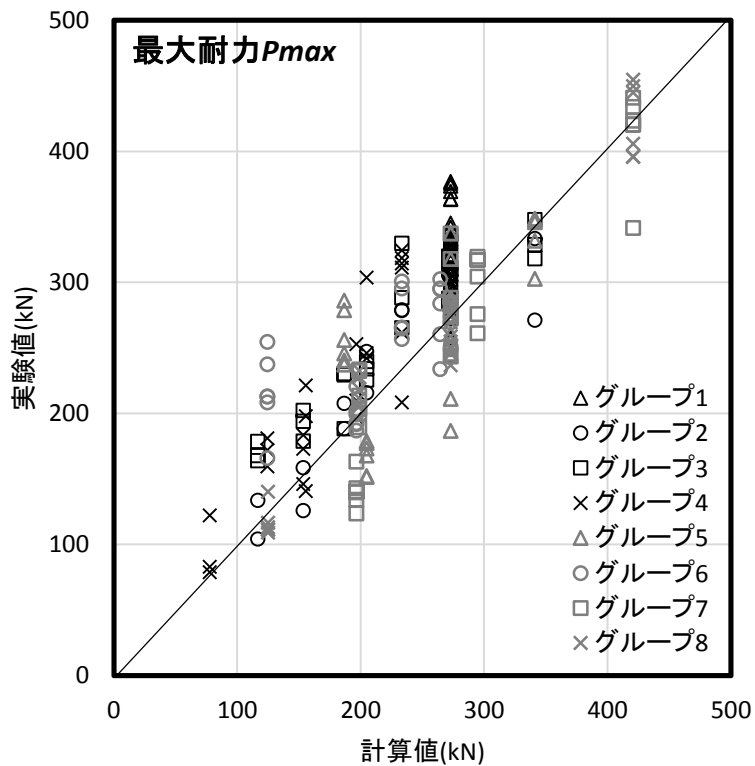


図 7.3-53 最大耐力における実験値と推定値の比較

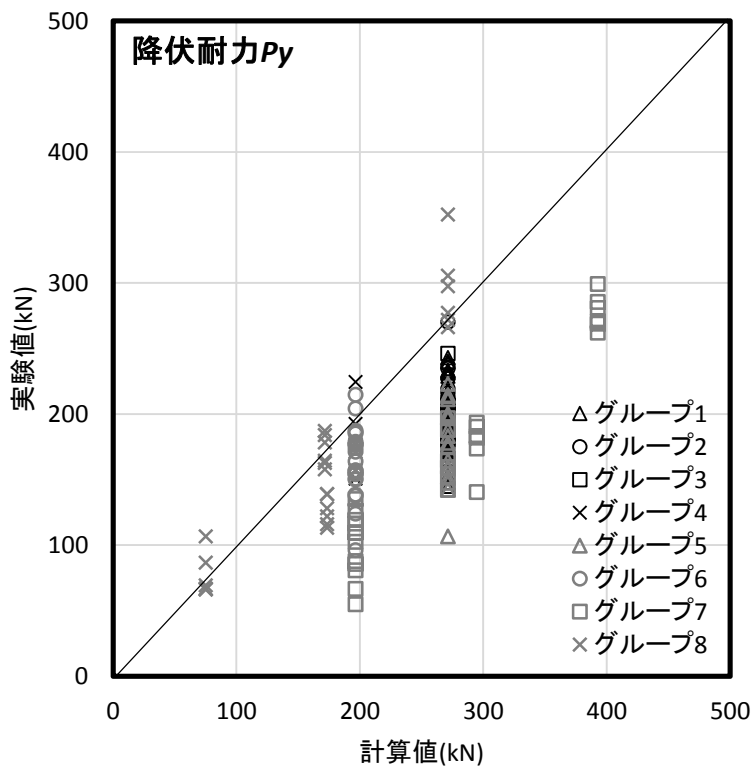


図 7.3-54 降伏耐力における実験値と推定値の比較

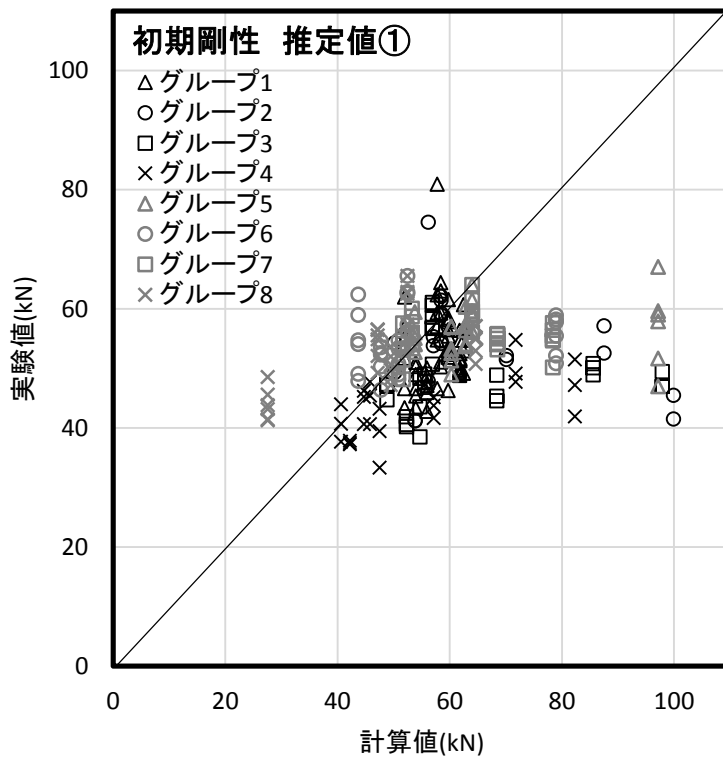


図 7.3-55 初期剛性における実験値と推定値①の比較

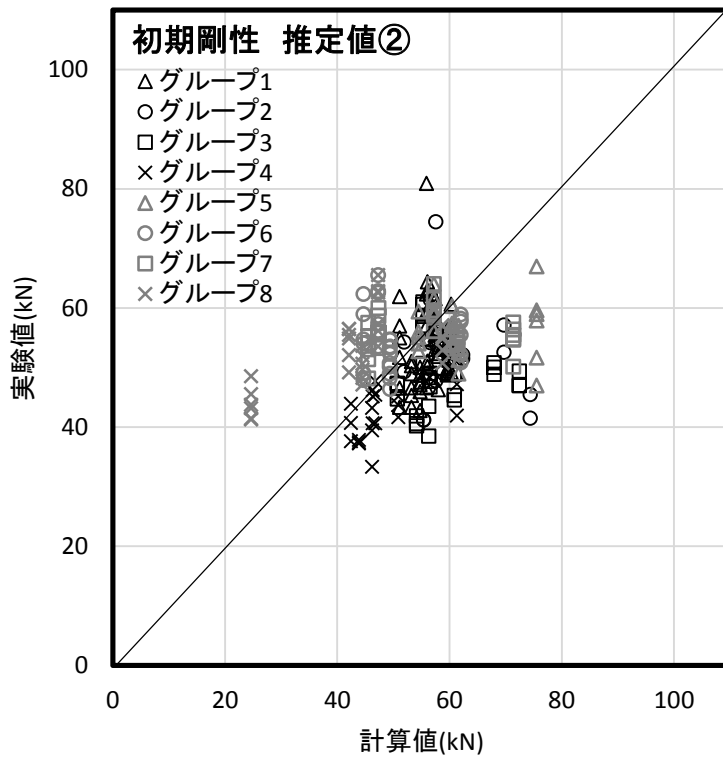


図 7.3-56 初期剛性における実験値と推定値②の比較

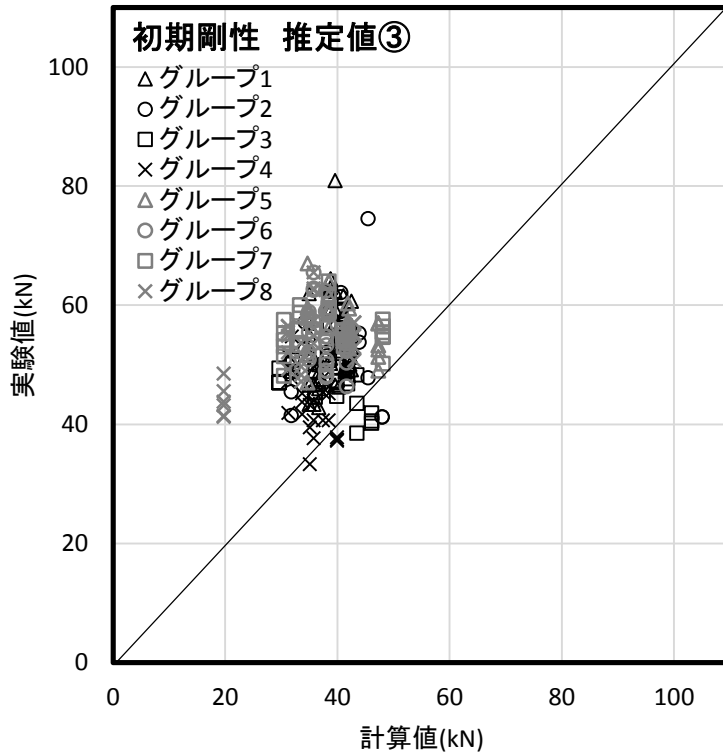


図 7.3-57 初期剛性における実験値と推定値③の比較

表 7.3-7 第 4 章の実験と計算の破壊モードの比較

グループ	試験体番号	計算による破壊性状			実際の破壊性状(試験体数)
		$a. P_{pull}$	$b. P_{shear1}$	$c. P_{shear2}$	
1	S30A	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$b(12)$
	S30A'	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$a(1), b(5)$
	S30B	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$b(6)$
	Mx60A	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$a+b(2), b(10)$
	Mx60A'	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$a(1), a+b(1), a+c(1), b(3)$
	Mx60B	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$a+b(1), b(5)$
	60S	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$a(2), b(4)$
	DS	349.8	<b>272.8</b>	409.2	$b(6)$

表 7.3-8 第 5 章の実験と計算の破壊モードの比較

グループ	試験体番号	計算による破壊性状			実際の破壊性状(試験体数)
		$a. P_{pull}$	$b. P_{shear1}$	$c. P_{shear2}$	
2	S60SPC0540	<u>116.6</u>	272.8	136.4	$a(2)$
	S60SPC0840	<u>186.6</u>	272.8	218.2	$a(2)$
	S60SPC1040	<u>233.2</u>	272.8	272.8	$a(1), a+b(1)$
	S60SPC1515	349.8	271.5	<u>153.5</u>	$c(2)$
	S60SPC1520	349.8	271.5	<u>204.6</u>	$c(2)$
	S60SPC1530	349.8	<u>271.5</u>	306.9	$c(2)$
	S60SPC1540	349.8	<u>272.8</u>	409.2	$a+b(1), b(5)$
	S60SPC1550	349.8	<u>341.0</u>	511.5	$a(2)$
3	S30APC0540	<u>77.7</u>	272.8	136.4	$a(3)$
	S30APC0840	<u>124.4</u>	272.8	218.2	$a(3)$
	S30APC1040	<u>155.5</u>	272.8	272.8	$a(3)$
	S30APC1515	233.2	271.5	<u>153.5</u>	$c(3)$
	S30APC1520	233.2	271.5	<u>204.6</u>	$c(3)$
	S30APC1530	<u>233.2</u>	271.5	306.9	$a(1), a+c(2)$
	S30APC1540	<u>233.2</u>	272.8	409.2	$b(6)$
	S30APC1550	<u>233.2</u>	341.0	511.5	$b(3)$
4	S30AOC0540	<u>77.7</u>	272.8	136.4	$a(3)$
	S30AOC0840	<u>124.4</u>	272.8	218.2	$a(3)$
	S30AOC1040	<u>155.5</u>	272.8	272.8	$a(3)$
	S30AOC1515	233.2	196.4	<u>153.5</u>	$c(3)$
	S30AOC1520	233.2	<u>196.4</u>	204.6	$c(3)$
	S30AOC1530	233.2	<u>204.6</u>	306.9	$a(1), c(2)$
	S30AOC1540	<u>233.2</u>	272.8	409.2	$a(3)$
	S30AOC1550	<u>233.2</u>	341.0	511.5	$a(1), b(2)$
5	Mx60APS0840	<u>186.6</u>	272.8	218.2	$a+c(4), b(2)$
	Mx60APS1520	349.8	271.5	<u>204.6</u>	$b(1), c(5)$
	Mx60APS1540	<u>233.2</u>	272.8	272.8	$b(6)$
	Mx60APS1750	349.8	<u>341.0</u>	511.5	$b(6)$
	Mx60APS2140	501.4	<u>272.8</u>	586.5	$b(6)$
6	Mx60AOS0840	<u>124.4</u>	272.8	218.2	$a(5), a+b(1)$
	Mx60AOS1520	233.2	<u>196.4</u>	204.6	$a+c(2), c(4)$
	Mx60AOS1540	<u>155.5</u>	272.8	272.8	$b(6)$
	Mx60AOS1750	<u>233.2</u>	341.0	511.5	$a(2), b(4)$
	Mx60AOS2140	334.3	<u>272.8</u>	586.5	$b(6)$

表 7.3-9 第 6 章の実験と計算の破壊モードの比較

グループ	試験体番号	計算による破壊性状			実際の破壊性状(試験体数)
		a. $P_{pull}$	b. $P_{shear1}$	c. $P_{shear2}$	
7	P33	334.3	<b>173.3</b>	268.3	b(6)
	P34	334.3	<b>198.8</b>	427.4	b(6)
	P55	501.4	<b>272.8</b>	586.5	b(6)
	P55D	501.4	<b>294.6</b>	586.5	b(6)
	P77	668.6	<b>420.8</b>	904.7	b(6)
8	O33	167.1	<b>124.8</b>	268.3	b(6)
	O34	334.3	<b>198.8</b>	427.4	b(6)
	O55	334.3	<b>272.8</b>	586.5	b(6)
	O55D	334.3	<b>272.8</b>	586.5	b(6)
	O77	501.4	<b>420.8</b>	904.7	b(6)

(4) 平行層と面圧面積についての考察

第 6 章で述べたとおりグループ 7 及びグループ 7 の試験体は、CLT の厚みの増加に伴い剛性は緩やかに上昇し、5 層 5 プライ以上は横ばいになった。このため、計算値と比較すると図 7.3-55 及び図 7.3-56 のとおり、面圧面積が大きい試験体 P77 の計算値は高く算出される結果となった。縦圧縮の剛性算出に引用した文献<sup>14)</sup>では、実験値との比較において加圧面積の増加に伴う単位面積あたりの剛性の減少率も良く推定できており、本試験結果はそれよりも減少率が大きかったということになる。

グループ 7,8 の試験結果から逆算した実験値を剛性の推定値①の木材の縦圧縮剛性で除したものを y 軸に取り、図 7.3-57 のとおり作成した。ここで得られた累乗近似より、面圧面積の増加に伴う圧縮剛性低減率  $R$  を 7.3-1 式のとおり求めた。この  $R$  を 7.3-2 式の平行層の圧縮剛性に乗じたものを補正後の  $K_c$  とする(7.3-2 式)。

$$R = 1527.2 \left\{ l_w \cdot t \cdot (n_{//0} + n_{//1}) - S_{//} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^2 \right\}^{-0.839} \quad (7.3-1)$$

$$K_c = \frac{k_e \cdot k_c}{k_e + k_c} \cdot R + k_{\perp} \quad (7.3-2)$$

7.3-2 式より求めた推定値と実験値の比較を図 7.3-58 に示す。図 7.3-55 と比較すると実験値との一致がよくなっている。ただし、剛性は同一種類の試験体であっても個体差があるだけでなく、面積効果以外に縁距離やラミナの等級など、様々な要素が影響していると考えられるので、7.3-1 式の適用範囲は今のところ、グループ 7, 8 の試験条件に合致するという極めて限定的とせざるを得ない。

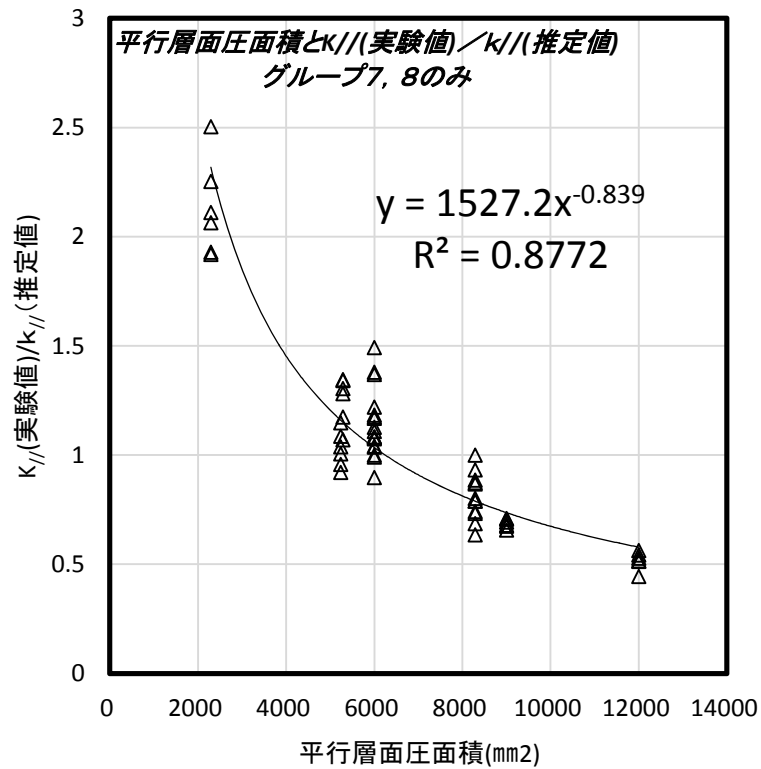


図 7.3-57 平行層面圧面積と実験値を推定値で除した縦圧縮剛性の関係(グループ7, 8のみ)

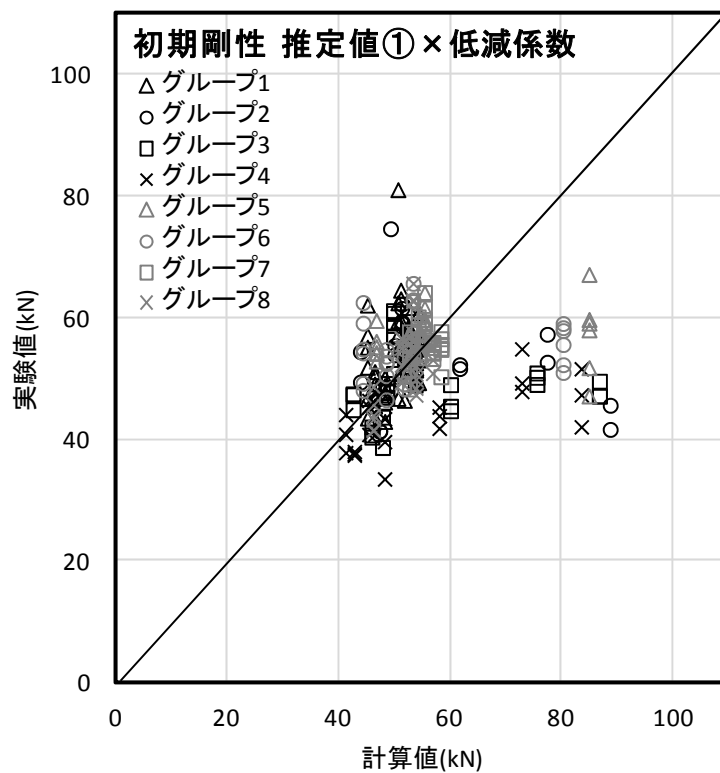


図 7.3-58 低減係数 R によって補正された推定値と実験値の比較

## 7.4 まとめ

本研究で、CLT 工法における引きボルト接合部の設計法を提案することを目的として、各種実験と推定式の検証を行った。

めり込み試験では、計算値が実験値に比べやや低めに算出される結果となった。引きボルト接合部の引張試験では、縁距離、端距離、強軸・弱軸、ラミナ境界部位置及び CLT の厚さ等が強度性能に影響を及ぼし、特に縁距離及び端距離については破壊モードが変わる重要な要素であることが分かった。また、実験結果を元に剛性、降伏耐力、最大耐力の推定式を作成し、最大耐力については実験結果を踏まえて 3 つの破壊モードの最小値で算出することとした結果、最大耐力は実験値と計算値で概ね一致する結果となった。一方、降伏耐力は比例限度を過ぎた辺りの値を狙っているため、完全弾塑性モデルによる実験値よりも高くなった。剛性の算出については、推定式によって傾向が異なり、推定値①、②の方が推定値③よりもやや合う結果となった。

以上より、CLT 構造における引きボルト接合部の推定式は概ね適用可能であることが分かった。しかし、面圧面積が大きいものは剛性が小さめに評価される結果となり、剛性の評価に課題を残した。

## 8. 耐力壁のせん断性能の推定

### 8.1 本章の目的

第1章で述べたとおり、CLT構造の耐力壁要素は、接合部性能に依存しているといっても過言ではない。本章では第7章までに行った引きボルト接合部の性能について、実設計を想定した壁のせん断性能へ変換する過程を示す。

### 8.2 ボルトの先行降伏を想定した接合部の設計方法

1.4節で述べたとおり、告611号ではボルト部分に構造用アンカーボルトに適合するものを使うことによって、靱性に富む接合部を実現している。本研究の実験では、木破での限界を調べるためにボルト及び座金は十分強度が高いものを使用した。したがって構造用アンカーボルトを先行降伏させるとして設計を行うためには、当該実験の終局耐力が文献4)に示す判定用終局耐力を満たすボルトを選択すればよい(表8.2-1)。

表 8.2-1 ABR の判定用終局耐力と設計用終局耐力及び降伏耐力

ボルト径	ねじ部の有効断面積 $A_{be}$ ( $\text{mm}^2$ )	軸部断面積 $A_b$ ( $\text{mm}^2$ )	ABR400			ABR490			
			判定用終局耐力 $P_{ub}$ (kN)	設計用終局耐力 $P_{ud}$ (kN)	降伏耐力 $P_y$ (kN)	判定用終局耐力 $P_{ub}$ (kN)		設計用終局耐力 $P_{ud}$ (kN)	降伏耐力 $P_y$ (kN)
						計算値	告示※5		
M16	157	166	73.0	42.9	36.9	89.5	86.0	59.3	51.0
M20	245	260	114.4	67.2	57.6	140.1	135.0	93.0	79.6
M22	303	320	140.8	82.7	71.2	172.5	—	114.4	98.5
M24	353	375	165.0	96.9	83.0	202.1	—	134.1	114.7
M27	459	485	213.4	125.4	107.9	261.4	—	173.4	149.2
M30	561	594	261.4	153.5	131.8	320.2	—	212.4	182.3
M33	694	731	321.6	189.0	163.1	394.0	—	261.3	225.6
M36	817	864	380.2	223.3	192.0	465.7	—	308.9	265.5
M39	976	1030	453.2	266.3	229.4	555.2	—	368.2	317.2
M42	1120	1180	519.2	305.0	263.2	636.0	—	421.9	364.0

#### ①接合部の実験値からの算定方法

- ・実験における終局耐力  $P_{u0}$  が表 8.1-1 の判定用終局耐力  $P_{ud}$  を上回るボルトを選択。
- ・剛性は、実験値→実験用ボルトの剛性を除去→ABR の剛性を付与

#### ②接合部の計算値からの算定方法

- ・計算における終局耐力  $P_{uc}$  が表 8.1-1 の判定用終局耐力  $P_{ud}$  を上回るボルトを選択。

### 8.3 壁のせん断性能の推定方法と推定結果

試験体は、第5章 Mx60APS0840 とし、計算には実験値を使用する。

#### (1) ボルトの選択

Mx60APS0840 の実験値の終局耐力  $P_{u0}$  は、平均 228.9kN、標準偏差 26.14、5%下限値 168.0kN である。したがってボルトで先行降伏させるためには、ABR400 における M24 か、ABR490 における M20 より径の小さいボルトとなる。ここでは ABR400 の M24 を使用することとする。



## (2) 剛性及び降伏変位の算出

実験による剛性は平均値 50.15kN/mm である。実験で使用した M27 のボルトの剛性は、ボルトの有効断面積  $A_{Be}=459 \text{ mm}^2$ 、ヤング係数  $E_B=201\text{kN/mm}^2$ 、ナット間長さ  $l_B=550 \text{ mm}$  であるので、 $459 \times 201 / 550 = 167.74\text{kN/mm}$  となる。したがって実験の剛性からボルトの剛性を除去すると、 $(167.74 \times 50.15) / (167.74 - 50.15) = 71.53\text{kN/mm}$  となる。

次に実際に使用するアンカーボルト ABR400 の M24 のナット間長さを基礎への定着長さ含めて 800 mm とすると、有効断面積  $A_{Be}=353 \text{ mm}^2$  であるので、 $353 \times 201 / 800 = 88.69\text{kN/mm}$  となる。これを上記の剛性に付与すると、 $K_p=(71.53 \times 88.69) / (71.53+88.69) = 39.59\text{kN/mm}$  となる。降伏耐力は表 8.2-1 より 83.0kN であるので、降伏変位は  $83.0 / 39.59 = 2.09 \text{ mm}$  となる。

設計用終局耐力  $P_{ud}$  は表 8.2-1 より 96.9kN、終局変位は、ABR の伸び率を 10% とすると、 $800 \times 0.1 = 80 \text{ mm}$  となる。

## (3) 耐力壁のせん断性能の算出方法

耐力壁の仕様は図 8.2-1 を想定する。

計算方法は、文献 62) 参考 1-1 に示されている木造ラーメン接合部の計算式を準用する。

図 8.2-2 に示すとおり、圧縮側の CLT 木口のめり込み合力  $\Sigma N$  と引きボルト接合部の引張力  $T$  の力の釣り合いによって、応力中心間距離を求め、回転剛性を算出する。

$\Sigma N$  と変形角  $\theta$  は、CLT 木口の平行層の面圧剛性を  $k_{//}$ 、直交層の面圧剛性を  $k_{\perp}$  とすると、8.2-1 式、8.2-2 式、8.2-3 式のとおりとなる。

$$\Sigma N = (k_{//} + k_{\perp}) \cdot \theta \quad (8.2-1)$$

$$k_{//} = \frac{1}{2} x_p^2 \cdot y_{P//} \cdot \left( \frac{E_{//}}{31.6 + 10.9 \cdot x_p / 2} \right) \quad (8.2-2)$$

$$k_{\perp} = \frac{1}{6.8} x_p^2 \cdot y_{P\perp} \cdot \left( \frac{E_{c0}}{31.6 + 10.9 \cdot x_p / 2} \right) \quad (8.2-3)$$

(2) で求めた  $K_p$  を使うと、引張力  $T$  による変形  $\delta_T$  は 8.2-4 式のとおり与えられる。

$$\delta_T = \frac{T}{K_p} \quad (8.2-4)$$

力の釣り合いより、

$$\Sigma N = T \quad (8.2-5)$$

変形の釣り合いより、

$$(d - x_p) \cdot \theta = \delta_T \quad (8.2-6)$$

8.2-4 式及び 8.2-6 式より、

$$T = K_p \cdot (d - x_p) \cdot \theta \quad (8.2-7)$$

8.2-1 式、8.2-2 式、8.2-3 式及び 8.2-7 式を 8.2-5 式に代入すると中立軸から圧縮側縁までの距離  $x_p$  が得られる。なお、文献 62) では木材の繊維方向の圧縮剛性を平井小松式<sup>42)</sup>から繊維直交方向の三角形めり込み剛性を稲山式<sup>47)</sup>から求めているが、CLT 材は繊維方向直交方向が複合しているため、平井小松式<sup>42)</sup>から両方の剛性を求めることとした。

$$\left\{ \frac{1}{2} x_p^2 \cdot y_{P//} \cdot \left( \frac{E_{//}}{31.6 + 10.9 \cdot x_p/2} \right) + \frac{1}{6.8} x_p^2 \cdot y_{P\perp} \cdot \left( \frac{E_{//}}{31.6 + 10.9 \cdot x_p/2} \right) \right\} = K_P \cdot (d - x_p) \quad (8.2-8)$$

$$x_p = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + a \cdot c}}{a} \quad (8.2-9)$$

$$a = y_{P//} \cdot E_{//} + \frac{y_{P\perp} \cdot E_{//}}{3.4} + 10.9 K_P \quad (8.2-9a)$$

$$b = 5.45 K_P \cdot d - 31.6 K_P \quad (8.2-9b)$$

$$c = 63.2 K_P \cdot d \quad (8.2-9c)$$

応力中心間距離は 8.2-10 式のとおり算出される。

$$j = d - \frac{x_p}{3} \quad (8.2-10)$$

柱脚モーメントと回転角  $\theta$  の関係より回転  $K_\theta$  は 8.2-11 式及び 8.2-12 式より求める。

$$M = \Sigma N \cdot j = T \cdot j = K_P \cdot (d - x_p) \cdot j \cdot \theta \quad (8.2-11)$$

$$K_\theta = K_P \cdot (d - x_p) \cdot j \quad (8.2-12)$$

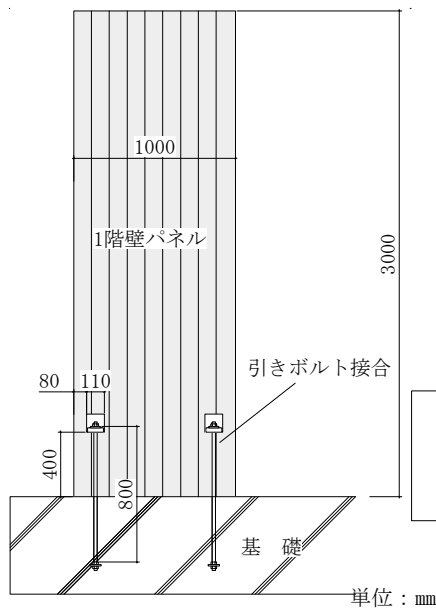


図 8.2-1 想定する耐力壁の仕様

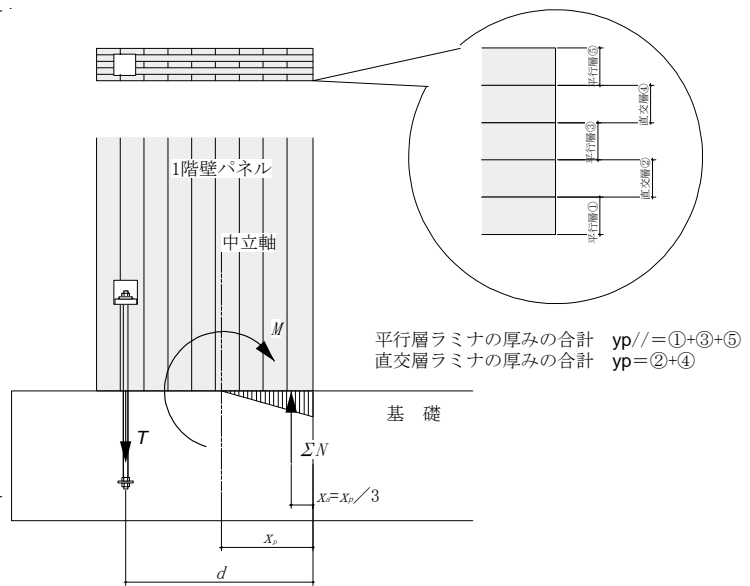


図 8.2-2 力学モデル

(4) 耐力壁のせん断性能の算出結果

(2)、(3)より耐力壁のせん断性能の算定を行った。入力条件と出力結果を表 8.2-2 に示す。結果から、壁倍率換算すると 19.4 倍の耐力壁に相当する。層間変形角の計算を用いる場合は、表 8.2-2 より  $Q_{200}$  または  $Q_{150}$  の値を用いる。

当該特性値をグラフ化したものが図 8.2-3 である。参考として、実験値そのもの(ボルトの種類、ねじ規格、ナット間長さが計算と異なる)の荷重変位関係を耐力壁の性能に置換したものを重ねた。木部による破壊前に適切にアンカーボルトが降伏し、終局に至ることが分かる。

表 8.2-2 入力条件と出力結果

		項目			値
入力条件	引きボルト 接合部の 特性値	降伏耐力(5%下限値)	$P_y$	kN	149.2
		終局耐力(5%下限値)	$P_u$	kN	175.4
		終局変位	$\delta_u$	mm	80
	耐力壁の 仕様	耐力壁の高さ	$h$	mm	3000
		平行層の厚みの合計	$y_{p//}$	mm	90
		平行層のヤング係数	$E_{//}$	GPa	6.37
		直交層の厚みの合計	$y_{p\perp}$	mm	60
		ABRを使った引きボルト 接合部全体の引張剛性	$K_p$	kN/mm	39.59
		耐力壁端部からボルトま での距離	$d$	mm	865
	出力結果	耐力壁の 性能		$a$	
			$b$		159303.16
			$c$		2164306.12
			$x_p$	mm	291.8
			$j$	mm	767.7
			$K_\theta$	kN·m/rad	17421.8
降伏モーメント			$M_y$	kN·m	114.5
終局モーメント			$M_u$	kN·m	134.7
降伏変形角			$\theta_y$	$\times 10^3 \text{rad}$	6.57
			$\theta_v$	$\times 10^3 \text{rad}$	7.73
終局変形角			$\theta_u$	$\times 10^3 \text{rad}$	139.57
降伏耐力			$Q_y$	kN	38.2
終局耐力			$Q_u$	kN	44.9
変形角 1/200 時の耐力			$Q_{200}$	kN	29.0
変形角 1/150 時の耐力			$Q_{150}$	kN	38.7

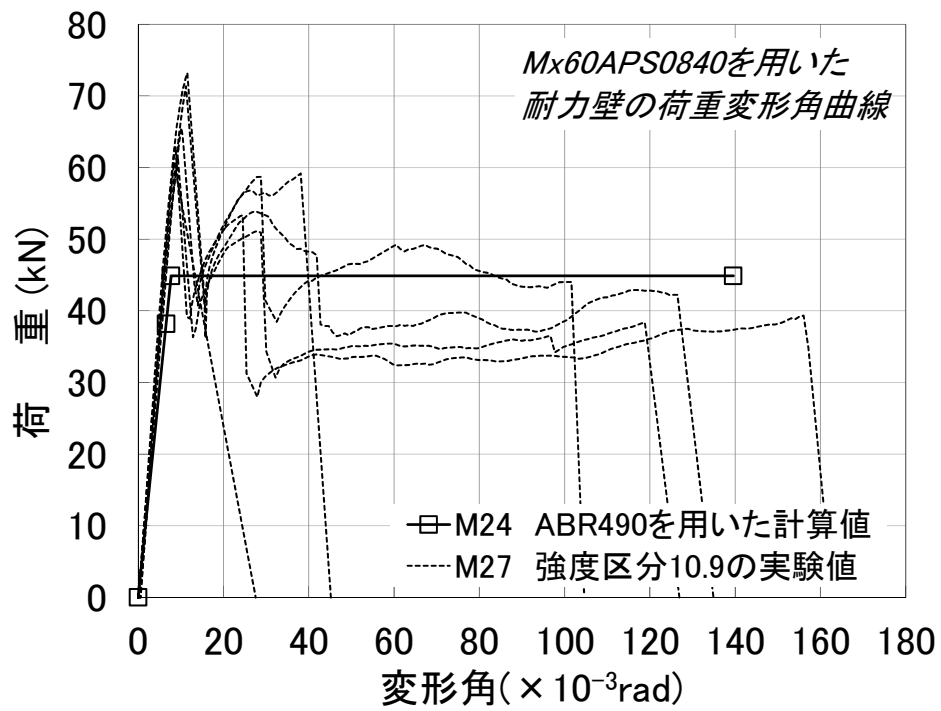


図 8.2-3 想定する耐力壁の仕様

## 9. 結言

### (1)本研究のまとめ

本研究では、スギラミナを用いた CLT パネルを構造部材とした CLT パネル工法の接合部の 1 種である引きボルト接合部に焦点を当てて研究を実施した。

第 1 章の諸言では、研究の目的と背景と CLT の品質及び製造方法、CLT 工法の種類及び CLT 接合部の要求性能等について整理を行った。

第 2 章の既往の研究では、CLT 接合部に関する国内外の既往の研究内容と CLT 以外に使用される引きボルト接合に関する研究内容について整理を行った。日本では集成材、製材を使ったラーメン工法の接合部として、研究が行われており、海外では耐震基準の違いなどから引きボルト接合は扱われていないことが分かっている。

第 3 章の集成材及び CLT 材の圧縮試験では、スギラミナの縦圧縮性能及び部分圧縮性能(めり込み性能)から引きボルト接合部の面圧剛性及び圧縮降伏耐力を求めため、集成材及び CLT 材の圧縮(めり込み)試験を実施した。縦圧縮の剛性式にはオーソライズされたものが無いため、実験結果の部位別の変位の違いから CLT 全体の圧縮歪みと加力端部のめり込みによる直列バネとしてバネモデルを作成し、推定式を考案した。繊維方向と繊維直交方向のそれぞれの剛性は並列バネとして計算し、CLT の圧縮の最大耐力及び剛性の推定を行い、実験値と比較を行った。

第 4 章では、CLT の材料物性(曲げヤング係数及び密度)の違いが強度性能に及ぼす影響を実験的に調べた。対象は、スギ CLT5 層 5 プライにおける引きボルト接合部の引張試験とし、パラメータとなる材料物性は、直交集成板の日本農林規格(以下「CLT の JAS」という)に定める同一等級、異等級、A 種、B 種に加え、JAS にはないヤング係数を 5.0~6.0GPa に特定したもの、密度管理を行い 405~435kg/mm<sup>3</sup> としたものについて比較試験を行った。結果として、曲げヤング係数と初期剛性、密度と最大荷重の間には僅かに比例関係が見られた。これ以外の特性値については、これとあって傾向が見られなく、むしろ個体間のばらつきによる影響の方が大きかったことから、構造設計においてはこれらを意図的に使い分けることはあまり意味がないと思われる。

第 5 章では、せん断面積や引張断面積の違いによる影響を調べるため、縁距離、端距離及びラミナ境界部位置をパラメータとした試験を行うこととした。その結果、縁距離、端距離の違いが最大耐力と破壊性状に大きな影響を及ぼすことが分かった。端距離と縁距離の違いによって破壊性状は大きく 3 種類に分類できることが分かった。

第 6 章では、試験体の厚さと偏心荷重の低減効果を期待して、5 層 5 プライ CLT の 2 層目と 4 層目にボルトを合計 2 本入れた仕様についても確認を行った。その結果、最大荷重及び降伏耐力は試験体の厚さに比例して大きくなるが、剛性については想定より CLT の厚みによる差が出ない結果となった。ボルトの本数の違いによる座金のめり込みの偏心による影響は見られなかった。

第 7 章では、第 4 章から第 6 章までの実験結果を基に剛性、降伏耐力、最大耐力の推定式の作成を行った。なお、座金下部の CLT の圧縮剛性は、第 3 章で得られた圧縮剛性の計算式を使用したものとした。推定値と実験値を比較した結果、最大耐力は実験値と計算値で概ね一致する結果となった。一方、降伏耐力は比例限度を過ぎた辺りの値を狙っているため、完全弾塑性モデルによる実験値よりも高くなった。剛性の算出については、本研究提案式によるものに加

え、既往の研究の設計式から木材の縦圧縮剛性を求めたものと比較した結果、本研究の結果は良好な結果が得られた。しかし、面圧面積が大きいものは剛性が小さめに評価される結果となり、剛性の評価に課題を残した。

8章では、第4章～第6章までに行った引きボルト接合部の性能について、実設計を想定した壁のせん断性能へ変換する過程を示す。また、CLT材で破壊させると靱性が安定しないことから、ボルトを構造用アンカーボルトとし、ボルト部分で先行降伏させることによって、安定した終局性能が得られることを示した。

以上より、本研究では引きボルトの力学的性能を実験的に把握し、引きボルトの推定式を提案した。

## (2) 本研究の成果

本研究では、CLTパネル工法の接合部として、引きボルト接合を取り上げた。その他の一般的な接合方法である鋼板添え板ビス接合、鋼板挿入ドリフトピン接合などは建築物が高層化していけばそれに伴い、接合具の数を増やさなければならず、コストや施工性に影響を及ぼすが、引きボルト接合の場合は、高層化による積載荷重の増大によってCLT厚さも必然的に厚くなり、CLTの厚み方向に座金寸法を増やしていけるので、基本的にボルトの径や座金を変えていくだけで耐力も向上していくため、特に中高層建築物に有効な接合方法であると言える。また、中高層であれば、防火被覆が必要であるため、CLTパネルを現しで使えないため、引きボルトの座金を収めるための角穴もデメリットにはなり得ない。また、座金を短くし、木材等で角孔を塞ぐことで、現しや燃えしろ設計に用いることも可能である。

本研究の成果としては、平成23年から開始されたCLTパネル工法の設計法の策定のための構造解析へデータが活用され、実大振動台実験の接合部として実験に使用された(写真9-1)。更に振動台試験体を元に日本初の時刻歴応答解析によるCLT建築物であるおおとよ製材寮にも使われた(写真9-2、写真9-3)。平成28年4月に制定された告示第611号の構造計算ルート1の仕様規定として位置づけられ、同年に発行された「CLTを用いた建築物の設計施工マニュアル」に本研究の設計法及び接合部データの一部分が掲載された。



写真9-1 振動台試験の様子



写真 9-2 おおとよ製材寮

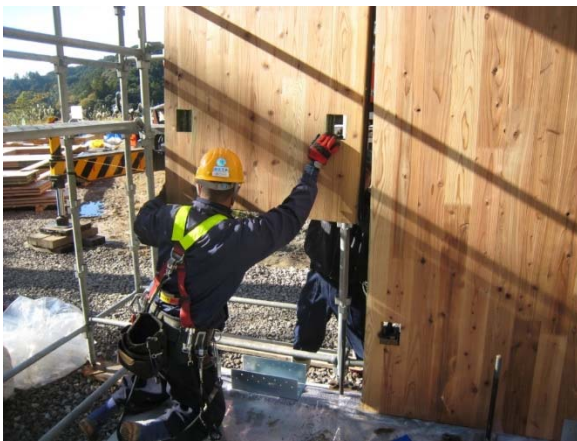


写真 9-3 おおとよ製材寮 建て方の様子



写真 9-4 CLT を用いた建築物の設計施工  
マニュアル

## 文献リスト

- 1) R.Brandner, G.Flatscher, A.Ringhofer, G.Schickhofer, A.Thiel: Cross Laminated Timber (CLT):overview and development: European Journal of Wood and Wood Products, vol.74, pp.331-351,2016.5
- 2) 渡部博: 欧州における CLT 研究開発の現況, 木材工業, 69(2),50-55(2014)
- 3) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター発行: 2016 年公布・施行 CLT 関連告示等解説書
- 4) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター発行: 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル
- 5) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター:平成 26 年度 CLT 等新たな製品・技術の発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進(CLT 普及戦略の作成)事業報告書, 第 2 章 CLT 施工マニュアルに向けた調査, pp.6-57, 2015.3
- 6) 直交集成板の日本農林規格、制定:平成 25 年 12 月 20 日農林水産省告示第 3079 号
- 7) 木構造振興(株):平成 25 年度林野庁補助事業地域材供給倍増事業 CLT パネルを用いた中高層建築物の接合部性能の検証事業報告書, 5. ビス接合を用いたパネル相互接合部のせん断性能についての検証, p.64,2014.3
- 8) (一社)日本 CLT 協会:平成 25 年度林野庁補正委託事業 CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進(接合部データ等の収集・分析) 床版として CLT を使用する枠組壁工法建築物の開発成果報告書, 2.3 接合部, p.33, 2015.3
- 9) KLH 社のカタログ;  
[http://www.klh.at/fileadmin/klh/kunde/2011/Technische%20Anwendungen/Konstruktion/120223\\_Eigenheim\\_dt.pdf?PHPSESSID=ccfb1c9edb113db00ebcb99043cfd148](http://www.klh.at/fileadmin/klh/kunde/2011/Technische%20Anwendungen/Konstruktion/120223_Eigenheim_dt.pdf?PHPSESSID=ccfb1c9edb113db00ebcb99043cfd148)(参照 2015.11.26)
- 10) 鈴木圭、後藤隆洋、清水庸介、森拓郎、渡邊拓史、河合直人:CLT 実物件のための構造設計に関する研究 その 2 LSB 及びビス金物接合部, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.559-560, 2015.9
- 11) FPInnovations: CLT Handbook(Canadian Edition), Chapter5 Connection in cross-laminated timber buildings, 2011
- 12) FPInnovations: CLT Handbook(US Edition), Chapter5 Connection in cross-laminated timber buildings, 2013
- 13) 例えば、Wood innovation design Centre  
<http://www.archdaily.com/630264/wood-innovation-design-centre-michael-green-architecture>
- 14) Uibel, T.; Blaß, H. J., “Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels”, in: Proceedings, CIB-W18/39-7-5, 2006.8
- 15) Uibel, T.; Blaß, H. J., “Edge joints with dowel type fasteners in cross laminated timber”, in: Proceedings, CIB-W18/40-7-2, 2007.8
- 16) Johansen, K. W.:Theory of timber connections. International Association of bridge and structural Engineering, Bern, 1949, pp. 249-262
- 17) Williams Muñoz, Mohammad Mohammad, Sylvain Gagnon : Lateral and withdrawal resistance of typical CLT connections, WCTE2010, No.839, 2010.7



- 18) Maurizio Follesa, Michele Brunetti, Rita Cornacchini, Silvio Grasso: Mechanical In-Plane Joints between Cross Laminated Timber Panels, WCTE2010, No.785, 2010.7
- 19) Katarina Bratulic, Georg Flatscher, Reinhard Brandner: Monotonic and cyclic behavior of joints with self-tapping screws in CLT structures, COST Action FP1004 Experimental Research with Timber, pp1-8, 2014. 5
- 20) C Sandhaas, J W G van de Kuilen, L Boukes, A Ceccotti: Analysis of X-lam panel-to-panel connections under monotonic and cyclic loading, CIB-W18/42-12-2, 2009.8
- 21) Blaß H. J., Bejtka I. Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben, Bauen mit Holz,105(10):68–85, 2003 (in German)
- 22) Martino Negri, Igor Gavrić, Mario Marra, Marco Fellin, Ario Ceccotti; USING LOW QUALITY TIMBER FOR X-LAM: RAW MATERIAL CHARACTERISATION AND STRUCTURAL PERFORMANCE OF WALLS UNDER SEMI-DYNAMIC TESTING , WCTE2012, Mon. pp511-518, 2012. 7
- 23) P Schädle, H J Blaß: Influence of Different Standards on the Determination of Earthquake Properties of Timber Shear Wall Systems: CIB-W18/43-15-2, 2010.8
- 24) Johannes Schneider, Siegfried F. Stiemer, Solomon Tesfamariam, Erol Karacabeyli, Marjan Popovski: Damage Assessment Of Cross Laminated Timber Connections Subjected To Simulated Earthquake Loads, WCTE2012, Mon.pp398-406, 2012. 7
- 25) Marjan Popovski, Erol Karacabeyli; SEISMIC BEHAVIOUR OF CROSS-LAMINATED TIMBER STRUCTURES , WCTE2012, Wed. pp335-344, 2012. 7
- 26) EN1998-1: 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium
- 27) Igor Gavric, Massimo Fragiaco, Ario Ceccotti: Strength and Deformation Characteristics Oftypical X-lam Connections, WCTE2012, Tue.pp146-155, 2012. 7
- 28) Igor Gavric, Massimo Fragiaco, Ario Ceccotti: Capacity seismic design of X-LAM wall systems based on connection mechanical properties, CIB-W18/46-15-2,2013.8
- 29) Peter Mestek, Stefan Winter: Cross Laminated Timber (CLT) – Reinforcements with Self-Tapping Screws, WCTE2010, No.549, 2010.7
- 30) Nicolas Jacquier, Ulf Arne Girhammar: Tests On Shear Connections In Prefabricated Composite Cross-Laminated-Timber and Concrete Elements, WCTE2012, Wed. pp441-450, 2012. 7
- 31) 木構造振興(株): 平成25年度林野庁補助事業地域材供給倍増事業CLTパネルを用いた中高層建築物の接合部性能の検証事業報告書, 5.ビス接合を用いたパネル相互接合部のせん断性能についての検証, p64,2014.3
- 32) (一社)日本CLT協会: 平成25年度林野庁補正委託事業 床版としてCLTを使用する枠組壁工法建築物の開発報告書,2.3接合部, p33, 2015.3
- 33) 並木淳史, 大西郷, 荏部泰輝, 那須秀行: 長ビスを用いた CLT 接合部のせん断性能に関する研究【その 3】 打ち込み角度と端空き距離の影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.109-110, 2015.9

- 34) 鈴木圭, 小林研治、青木謙治、稲山正弘、槌本敬大: CLT 構造における引きボルト接合部の強度性能の推定, 日本建築学会構造系論文集 第 81 巻 第 726 号,1289-1298,2016.8
- 35) 小林研治、稲山正弘、安藤直人: 構造用面材を側材に用いたビス接合部における一面せん断剛性・耐力推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集 第 81 巻 第 726 号,1289-1298,2016.8
- 36) 鈴木圭、後藤隆洋、清水庸介、森拓郎、渡邊拓史、河合直人: CLT 実物件のための構造設計に関する研究: その 2 LSB 及びビス金物接合部, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.559-560, 2015.9
- 37) ポンマサック スッサダー、中島昌一、増田浩志: CLT 鋼板添え板木ねじ接合部の降伏理論と面圧実験, 日本木材学会大会研究発表要旨集, H18-10-0945, 2015.3
- 38) Soutsada Phommasak、中島昌一、鈴木圭、荒木康弘、小林研治: 鋼板を添え板に用いたビス多数本打ち CLT 接合部の一面せん断性能 その 1 1列あたりの接合具本数の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.15-16, 2016.8
- 39) 鈴木圭、後藤隆洋、清水庸介、中島昌一、荒木康弘、小林研治: 鋼板を添え板に用いたビス多数本打ち CLT 接合部の一面せん断性能 その 2 集合型破壊による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.13-14, 2016.8
- 40) 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説ー許容応力度・許容耐力設計法ー, P37-38, P58-59,2006.12
- 41) 中島昌一、北守顕久、小松幸平: クロス・ラミネイティド・ティンバーを用いた鋼板挿入型ドリフトピン接合部の引張加力下の耐力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集 第 78 巻 第 687 号,969-975,2013.5
- 42) 日本建築学会: 木質構造接合部設計マニュアル P138-141,P232,2009.11
- 43) 中谷誠、森拓郎、鈴木圭: CLT からのラグスクリーボルトの引き抜き性能 縁端距離、埋め込み深さと繊維方向の影響,構造工学論文,61B,pp223-228,2015.3
- 44) 野口弘行、門脇達嘉: 引きボルト接合された集成材接合部の引張試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.95-96, 1988.10
- 45) 大橋好光、坂本功、安達文男、五十田博: 集成材による柱-梁接合部の強度実験: その 5 引きボルト型接合部に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.143-144, 1990.10
- 46) 五十田博、坂本功、大橋好光、安達文男: 集成材による柱-梁接合部の強度実験: その 6 引きボルト型接合部の実験結果の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.145-146, 1990.10
- 47) 稲山正弘: 木材のめりこみ理論とその応用 靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究, 東京大学学位論文, 1991
- 48) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター発行: 通直集成材を用いたラーメン構造の設計法, 1996
- 49) 稲山正弘、山口和弘、宮田 雄二郎: 引きボルトを利用した木造ラーメン接合部の設計法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.355-356, 2008.9
- 50) 宮田 雄二郎、山口和弘、川原 重明、稲山正弘, : プレカット加工を用いた引きボルト

- 式木質ラーメン構造の研究：(その 1)門型ラーメン架構の開発と力学モデルによる解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.389-390，2008.9
- 51) 山口和弘、宮田雄二郎、川原重明、稲山正弘，：プレカット加工を用いた引きボルト式木質ラーメン構造の研究：(その 2)構造性能および力学モデルの実験による検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.391-392，2008.9
- 52) 中村正芳、山口和弘、家住良太、川原重明、稲山正弘，：引きボルトを利用した木造ラーメン接合部の設計法の実験による検証：その 2 要素試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.99-100，2009.8
- 53) 山口和弘、中村正芳、家住良太、川原重明、稲山正弘，：引きボルトを利用した木造ラーメン接合部の設計法の実験による検証：その 3 設計法の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.101-102，2009.8
- 54) 稲山正弘：引きボルト式木造ラーメン柱脚接合部の設計法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.621-622，2013.8
- 55) 山口和弘：引きボルト式木質ラーメン架構の挙動の解明と解析モデルの提案，東京大学学位論文，2013
- 56) 野口昌宏、中村昇、飯島泰男：縦部分圧縮の支圧剛性の算定法の提案と強度特性，日本建築学会構造系論文集 第76巻 第662号，803-809，2011.4
- 57) 蒲池健、井上雅文：木材の繊維方向面圧剛性算定式，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.197-198，2010.9
- 58) 鈴木圭、後藤隆洋、藤田和彦、槌本敬大、青木謙治、相馬智明、稲山正弘：CLT を用いた引きボルト接合部の引張性能に材料密度および曲げヤング係数が及ぼす影響，木材工業，70(4)，pp.158-163，2015
- 59) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター編：木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008年度版)，pp.579-587,2009.6
- 60) 木構造振興(株)編：木材の強度等データおよび解説，pp.116-119，2011.03
- 61) 木構造振興(株)：平成 24 年度林野庁補助事業地域材供給倍増事業 CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書，3.2. CLT 材等の圧縮試験及び接着試験，pp.10-22,2013.3
- 62) (公財)日本住宅・木材技術センター発行：2016 年版 木造ラーメンの評価方法・構造設計の手引き

## 謝 辞

本研究は、様々な方々にご尽力戴き、完成に漕ぎ着けることができました。

平成 23 年当時、日本システム設計が主催する国土交通省委託事業の検討委員会において稲山正弘先生からの引きボルト接合をご発案いただいたことが始まりでした。稲山正弘先生のご提案がなければ、この研究も存在しなかったといっても過言ではありません。その後、当時私が出向に行っておりました木構造振興(株)として、林野庁補助事業により引きボルトをはじめとする接合部の実験的な研究が進められました。私が博士課程に入学したのは平成 25 年度からですが、CLT の引きボルト接合をテーマにしようと決めたのは平成 26 年度からでした。その頃から稲山正弘先生、青木謙治先生、相馬智明先生(現：大成建設)のご指導を戴き、投稿論文 2 報を提出することができました。特に青木謙治先生には研究の考え方から論文の書き方に至るまで、綿密なご指導をいただきました。

CLT の材料物性の違いによる影響試験は、直交集成板の JAS が制定されたときに建築研究所榎本敬大氏(当時国総研)からご提案いただいたものであり、試験計画にも適確なアドバイスをいただき、端距離縁距離試験の試験計画においてもご相談に乗っていただきました。

実験の実施につきましては、栃木県林業センターの亀山雄揮氏(圧縮試験)、広島県林業センターの藤田和彦氏(材料物性試験、端距離縁距離試験)、建材試験センターの早崎洋一氏(CLT の厚さ試験の一部)、そして私が所属する日本住宅・木材技術センターの構造試験室の方々(材料物性試験、端距離縁距離試験、CLT の厚さ試験)にご尽力いただきました。

本論文の審査にあたっては、信田聡教授、井上雅文教授、腰原幹雄教授に貴重なご意見・ご指導を戴きました。

また、当該論文本文に掲載することはできませんでしたが、静岡大学の小林研治先生には木構造振興(株)との共同研究により CLT の積層接着面のせん断試験を行っていただきました。

最後にご支援くださった研究室の皆様に感謝します。

平成 28 年 12 月 鈴木 圭