

令和2年度建築基準整備促進事業

(S32)

差し鴨居接合部を有する垂れ壁の軸組の 壁倍率に関する検討

株式会社ドット・コーポレーション
京都大学 生存圏研究所

事業の背景と目的

調査の背景：

伝統的構法による木造建築物については、建築基準法施行令3章3節において規定されている仕様（以下「仕様規定」）に適合しない場合、地震等に対する安全性の確認にあたっては、限界耐力計算等の精緻な構造計算を行わなければならない。このため、伝統的構法による耐力壁、継手・仕口などの耐震要素について、仕様規定の整備が求められている。

目的：

本調査では、伝統的構法による木造建築物に用いられる耐震要素のうち、垂れ壁の軸組に併用される差し鴨居接合部を対象として実験的・解析的検討を行い、仕様規定としての技術基準の提案を行う。

実施体制

検討委員会

委員長	五十田博	京都大学
委員	鈴木祥之	立命館大学
	齋藤幸夫	齋藤建築構造研究室
	後藤正美	金沢工業大学
	大橋好光	東京都市大学
	河合直人	工学院大学
	腰原幹雄	東京大学
	槌本敬大	建築研究所
協力委員	山崎義弘	建築研究所
	荒木康弘	国土交通省国土技術政策総合研究所
	秋山信彦	国土交通省国土技術政策総合研究所

ワーキンググループ

主査委員	河合直人	工学院大学
	五十田博	京都大学
	荘所直哉	明石工業高等専門学校
	松本直之	東京大学
協力委員	荒木康弘	国土交通省国土技術政策総合研究所
	秋山信彦	国土交通省国土技術政策総合研究所
オブザーバー	北守顕久	大阪産業大学
	李 哲瑞	京都大学生存圏研究所博士課程

実施内容

令和元年度に、土壁を持つ差し鴨居構面で(a)接合部曲げ抵抗成分、(b)差し鴨居軸力成分、(c)土壁せん断抵抗成分、(d)柱の曲げ変形成分の重ね合わせが成立することが明らかとなり、構面の技術基準を検討するためのモデルを示すことができた。



- 今年度は、このモデルからパラメトリックスタディー用の簡易モデルを作成し、解析を実施し、壁倍率として加算できる条件の整理および仕様規定として技術基準の提案の前段階の検討を行う。
- その際、最終的な建物の性能は、柱の折損で決定することから、柱の折損をクライテリアとして進める。また、柱の折損に大きな影響を与える断面欠損については、現状、単純な断面係数しか存在しないことから、この影響を確認するための要素実験を実施する。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討

断面の大きい差し鴨居のあるまたは垂れ壁を持つ構面は耐震要素としての性能では、柱の折損がクライテリアとなる。

その際には、材料曲げ強度強度および断面欠損を考慮することになるが、現実的な設定を行うためにはそれらについては以下のような課題がある。

1. 製材の材料強度は梁せい150mmの試験体を用いて、曲げスパン2700mmとする3等分点4点曲げ試験を標準試験として算出されているが、実際の構面での柱は差し鴨居接合部を加力点とした3点加力の曲げとなっていることから、相違がある可能性がある。
2. 断面欠損の程度や位置によって断面係数にかける低減係数をどの程度とすべきかの知見は十分ではないことから定めることが難しい。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討

柱の断面欠損を考慮した曲げ耐力（最終的に求めたい曲げ耐力）を $F' \times Ze'$ としたときに、柱の曲げ強度 F' 、断面欠損を考慮した断面係数 Ze' はそれぞれ以下のようになる。

$$F' = \alpha \times F \quad Ze' = \beta \times Ze$$

ここで、 F ：基準強度 Ze ：有効断面係数

そこで、以下の実験を実施し、 α 、 β を求めることとした。

- (1) 試験方法による曲げ強度の相違の確認実験
柱と差鴨居の接合位置を想定した3点曲げ試験と3等分点4点曲げ試験の結果を比較して α を求める。
- (2) 断面欠損の有無による曲げ強度の相違の確認実験
断面欠損のある部分とない部分で柱と差鴨居の接合位置を想定した3点曲げ試験を実施して β を求める。

どちらの実験においても、各実験内で比較対象の試験体が同等の性能を持つものとする必要がある。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討

実験①



基準強度F 3等分点4点曲げ試験
断面による低減係数は製材は非考慮・集成材は考慮

実験②



曲げ強度 $F' \geq$ 基準強度F

実験③



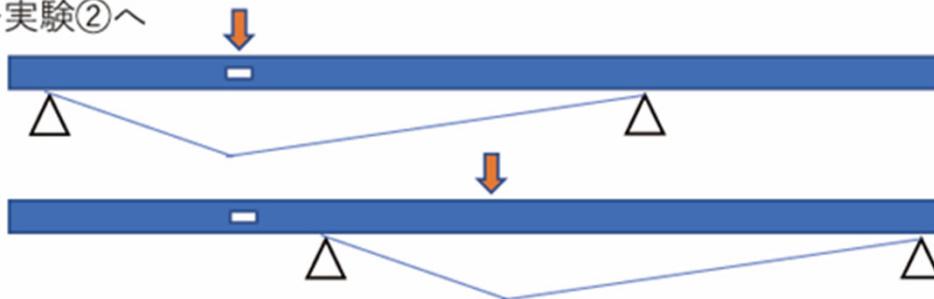
断面欠損 $Z_{e'} \leq$ 有効断面係数 Z_e

(1) 試験方法による曲げ強度の相違の確認実験 (第3章)

(2) 断面欠損の有無による曲げ強度の相違の確認実験 (第4章)



実験③→実験②へ



実験②、実験③は同一材料で実施することが重要であるため、1の試験体で支持点・加力点を変更し実施するよう工夫した。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

（1）試験方法による曲げ強度の相違の確認実験

試験体

樹種	断面 (mm)	長さ (mm)	背割り	本数	等級
スギ	150x150	3000	有	32本（3点曲げ16本、4点曲げ16本）	1等～上小節
	180x180	4000	有	32本（3点曲げ16本、4点曲げ16本）	1等～上小節
ヒノキ	150x150	3000	有	32本（3点曲げ16本、4点曲げ16本）	上小節
	180x180	4000	有	32本（3点曲げ16本、4点曲げ16本）	上小節

事前計測

1. 4面写真撮影
2. 含水率（高周波式×3か所）、重量、寸法
3. 縦振動法およびたわみ振動法によるヤング係数

スギの試験体一部



ヒノキの試験体一部



柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

動的ヤングの計測結果

製材の基準弾性係数（スギ：7000 N/mm²、ヒノキ：9000 N/mm²）に比べてやや高い数値を持つものであった。

	たわみ振動ヤング係数 E_{afb} N/mm ²		縦振動ヤング係数 E_{fd} N/mm ²	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
スギ150角	9326	1212	9157	1294
スギ180角	8685	1136	8444	1221
ヒノキ150角	11387	1116	12003	1150
ヒノキ180角	11374	1422	11898	1309

試験体の振り分け

事前計測値を元に、各寸法、樹種ごとに32本の製材を、実験①：4点曲げ（4P）と実験②：3点曲げ（3P）で母集団の条件がおおむね揃うように振り分けた。

手順：たわみ振動動的ヤング係数（ E_{afb} ）の値を基本として大小順に並べ替え、交互に選別。さらに加力時の引張面となる背割り面の欠点（節）の状況を加味し、グループごとの節ランクが平均化する操作を行い、2グループを決定。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

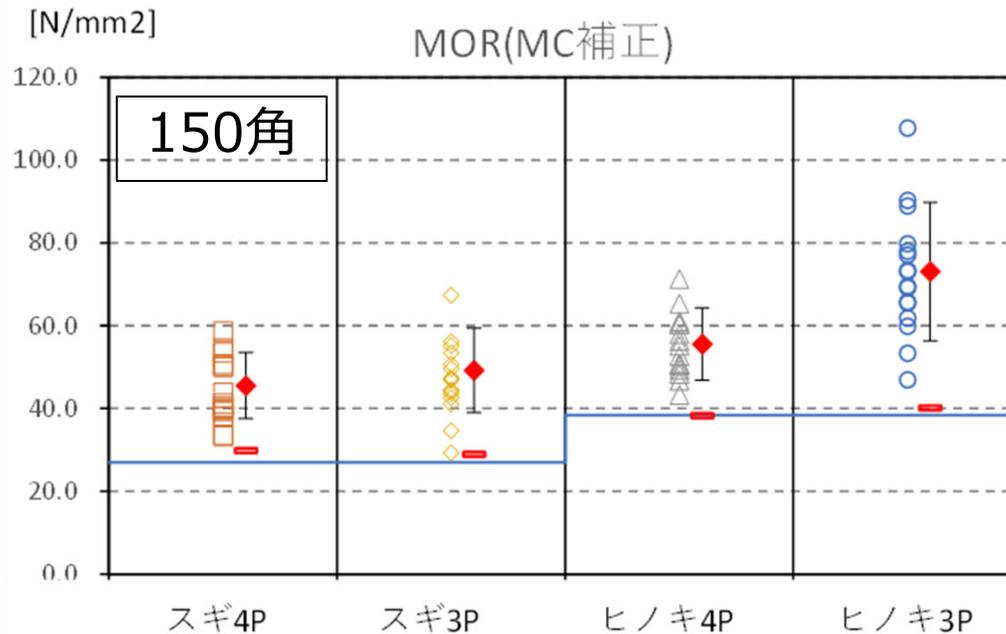
曲げ試験方法

	150角	180角
3点曲げ		
4点曲げ		

欠点記録について

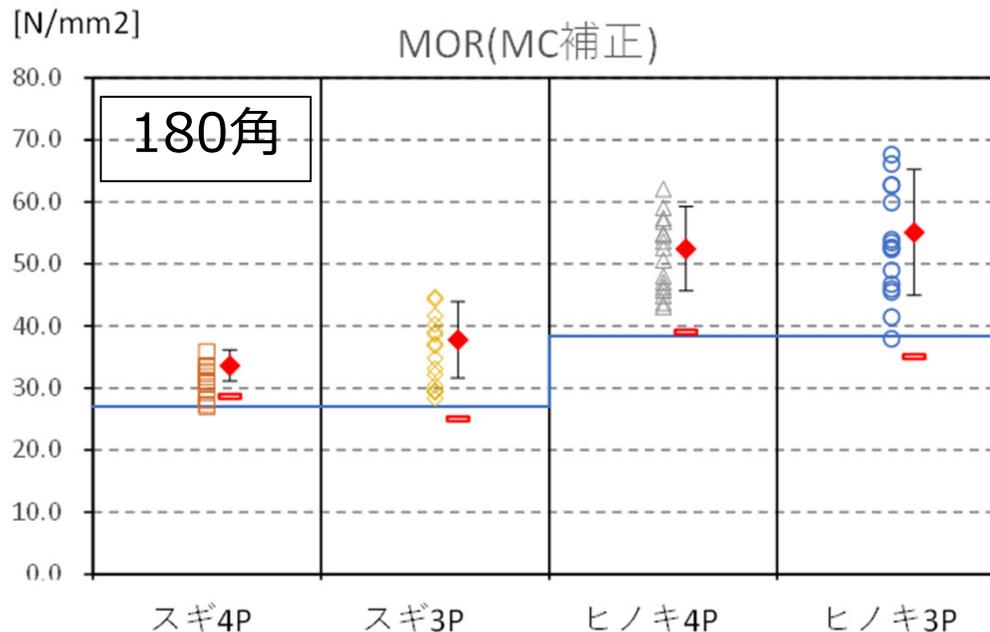
試験体の引張側となる背割り面の欠点について、試験前に詳細計測を行った。欠点計測区間は、4点曲げにおいては中央曲げモーメント一定区間及びその前後100mmの区間とし、3点曲げにおいてはモーメントが最大となる加力点の前後において、150mm角では300mm、600mm、180mm角では400mm、800mmとした。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）



含水率補正を行った後の結果
 平均値 (◆)
 5%下限値 (-)
 JAS1級基準強度 (—)

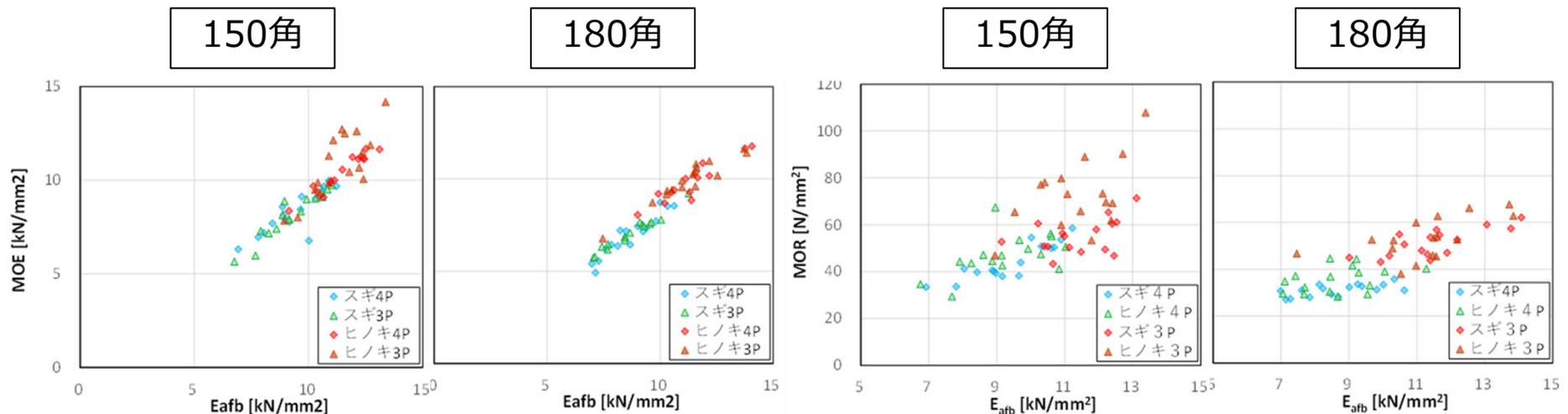
- MORの平均値は3点曲げが4点曲げよりも向上する。
- 一方で、ばらつきは3点曲げのほうが4点曲げよりも大きくなる。
- その結果として、下限値は3点曲げと4点曲げでの差が小さくなる。
- 180角材料では、下限値はむしろ3点曲げ条件の方が4点曲げよりも小さくなった。



柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

たわみ振動縦ヤング（ E_{afb} ）とMOE、MORとの関係

- E_{afb} とMOEの関係は強い比例関係が確認されたが、MOEは E_{afb} をやや下回る傾向が見られた。動的（打撃法）の場合は材全体の値を得られるが、静的の場合は、加力時の変形から値を得るため、モーメントの大きい（部分たわみ角の大きい）加力点近傍の材の影響が大きくなることが原因と考えられる。150角ヒノキ3点曲げでは若干の比例関係に乱れが見られたが、正確な原因は不明。
- MORと E_{afb} の関係は、150角ヒノキ3点曲げではややばらつきが大きいものの、両者には概ね比例関係が見られる。



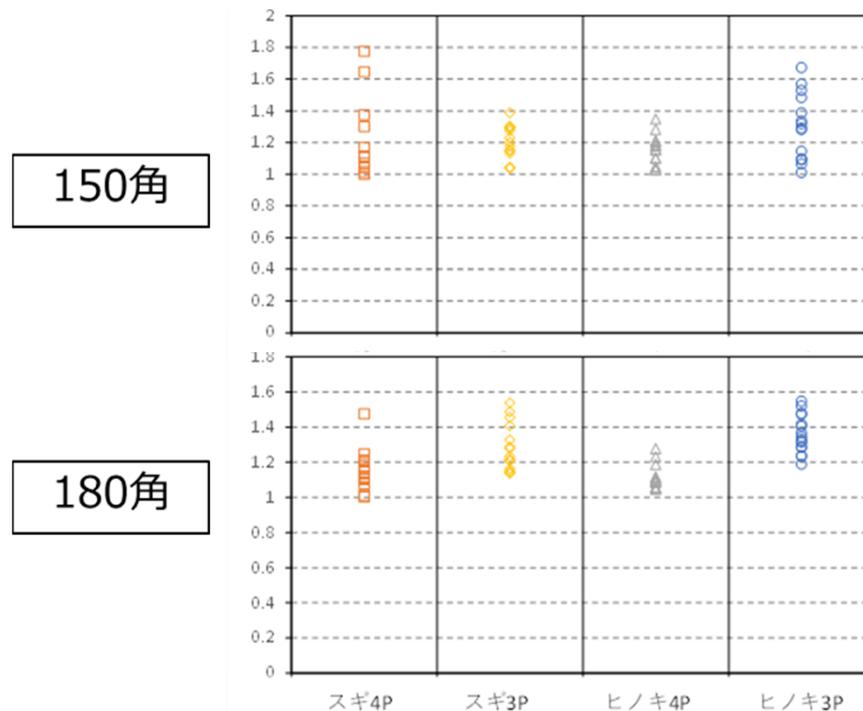
たわみ振動縦ヤング（ E_{afb} ）とMOEの関係

たわみ振動縦ヤング（ E_{afb} ）とMORの関係

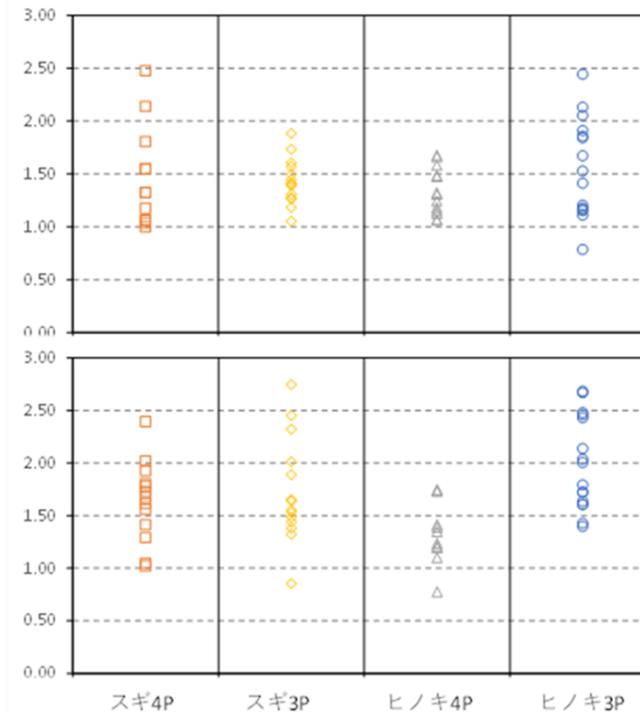
柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

最大荷重と降伏荷重の比、最大荷重時変位と降伏時変位の比

- 最大荷重と降伏荷重の比を見ると、3点曲げの方が4点曲げよりやや降伏後の耐力上昇が大きい。
- 最大荷重時変位と降伏時変位の比を見ると、180角では4点曲げより3点曲げの方が降伏後の変形性能がやや大きい傾向が見られた。また、スギ材では4点曲げでも降伏後大きな変形をするものがあった。



最大荷重と降伏荷重の比

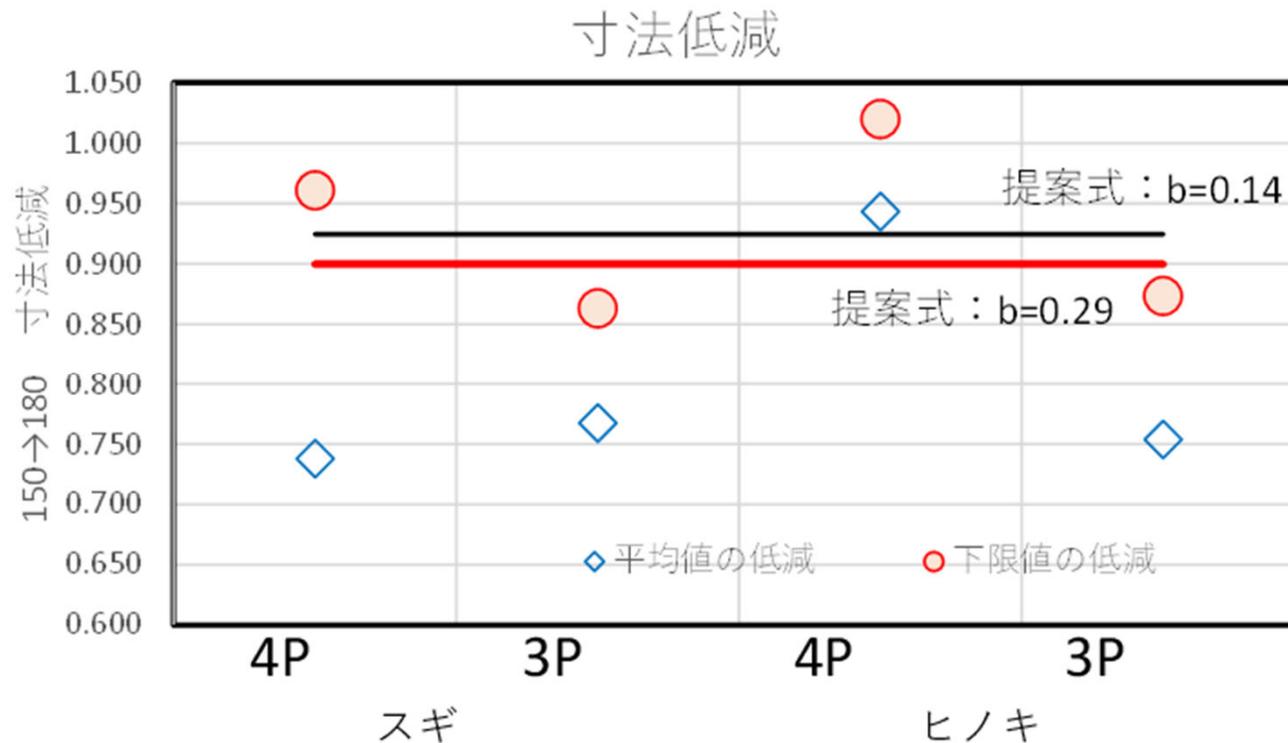


最大荷重時変位と降伏時変位の比

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

寸法効果

- 試験体が大きくなると、そこに含まれる欠点の存在確率が高まり強度が低減すると言われている。一般には体積比の乗数に比例する。そこで、その効果を確認するために、180角のMOR結果の150角の試験結果に対する比率(低減係数)を示す（含水率補正後）。



柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

寸法効果

- 180角の試験結果は150角のものに対して小さく、寸法低減の効果が認められた。
- 以下に示すASTM D 1990 - 07の提案式では寸法低減は0.92となる。この式ではせい方向 $a=0.29$ 、長さ方向 $b=0.14$ という係数を用いており、断面の幅寸法は考慮されておらず、また、長さ方向の寸法に比べて、梁せい方向の寸法が寸法低減により効果が大きいものとなっている。

$$k_3 = k_1 k_2 = (d/d_0)^a (L/L_0)^b$$

- スギ、ヒノキとも4点曲げにおいては下限値の寸法低減が提案式の値を上回ったが、3点曲げにおいては下回り、よりも大きい寸法低減がある事を示した。これは、3点曲げでは、長さ方向の影響が提案式より大きいことを示唆している。試みに、長さ方向の低減に関わる係数 b の値を、高さ方向と同様に0.29と仮定して寸法低減を推定した。今回の3点曲げの試験結果とより精度良く合致する傾向が見て取れる。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

欠点の影響

- 伝統構法で用いられる柱材は施工者による管理により、差鴨居付近に大きな欠点がないように調整されるものと考えられる。そこで、欠点記録と照合し、モーメント最大点付近に大きな節を有する試験体を除外した検討を行った。
 - ①最大節径が30mm以上の欠点Dを除外したもの
 - ②最大節径が20mm以上の欠点CおよびDを除外したもの
- それぞれの3点加力試験結果／4点加力試験結果（向上率）、MOR下限値のJAS1級基準強度との比について次ページに示す。比較として、欠点を除去していない値も掲載している。
- 150角の材料においては、節径30mm以上を除去すると、3点曲げ強度下限値は、JAS比1.39（スギ）となり、基準強度を上回った。ヒノキはこのレベルの欠点が無かったため、当初より1.05（ヒノキ）である。
- 一方で180角の材料では欠点除去前はスギ・ヒノキともJAS強度を下回り、これは寸法効果の影響を強く受けているためと考えられる。
- 欠点の除外範囲を節径20mm以上にすると、さらに下限強度のJAS強度に対する向上率が高まる傾向が見られた。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

欠点の影響

各補正後の 3P/4P 向上率と MOR 下限値の JAS1 級基準強度との比
 全ての値が含水率補正後の値

樹種	寸法	欠点除去	3P/4P		MOR 下限値/JAS1 級基準強度比	
			平均値	下限値	4 点加力	3 点加力
スギ	150 角	除去無し	1.08	0.97	1.11	1.07
		欠点 D 除去	1.10	1.24	1.11	1.39
		欠点 CD 除去	1.10	1.14	1.20	1.37
	180 角	除去無し	1.12	0.87	1.06	0.93
		欠点 D 除去	1.13	0.89	1.10	0.98
		欠点 CD 除去	1.18	0.91	1.20	1.09
ヒノキ	150 角	除去無し	1.31	1.05	1.00	1.05
		欠点 D 除去 ^{※1}	1.31	1.05	1.00	1.05
		欠点 CD 除去	1.31	1.06	1.01	1.08
	180 角	除去無し	1.05	0.90	1.02	0.91
		欠点 D 除去	1.07	0.96	1.00	0.96
		欠点 CD 除去 ^{※2}	1.07	0.96	1.00	0.96

※1：ヒノキ 150 角では、節ランク D がなかったため値は除去無しと同じ

※2：ヒノキ 180 角では、節ランク C がなかったため値は欠点 D 除去と同じ

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（試験方法）

（1）試験方法による曲げ強度の相違の確認実験のまとめ

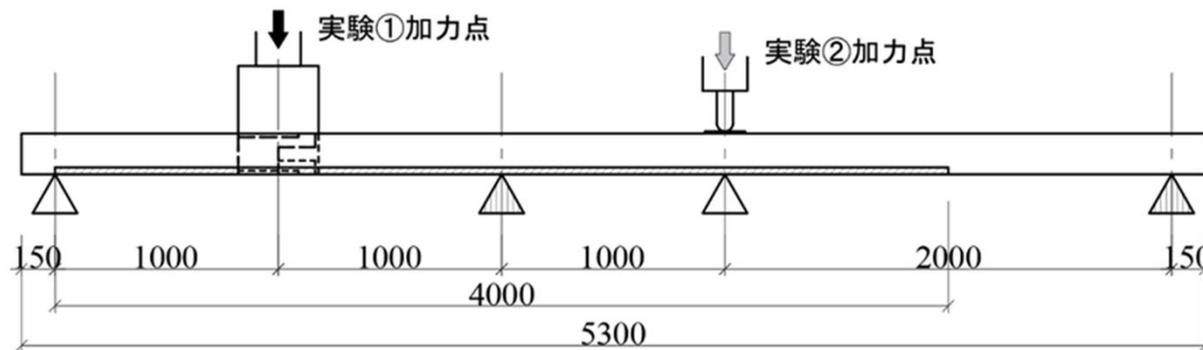
- 3点曲げは4点曲げに比べて強度の平均値は10%～30%程度向上する。しかし、ばらつきが大きくなる傾向があり、その結果下限値としては、87%～105%と、むしろ3点曲げ条件の方が4点曲げ強度を下回った。
- 今回用いた材料が、スギ・ヒノキとも概ねその150角4点曲げ下限強度がJAS1級基準強度と同等であったことを踏まえて、欠点を除去した条件を想定した検討を行った結果、下限強度のJAS強度に対する向上率が高まる傾向が見られた。
- 寸法効果の影響については、3点曲げ条件の方が、4点曲げよりも強くでる傾向がある。

以上を踏まえ、伝統構法の差鴨居柱の強度を検討する際には、その強度特性値は基準強度に対して高くなることを想定することが可能である。一方で、適切な寸法調整係数を併せて考慮する必要がある。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

（2）断面欠損の有無による曲げ強度の相違の確認実験

- 本実験では仕口有無の違いを検討する上で、材料の条件を同一として比較を行う。具体的には、1本の長い試験体を用いて、一回目の仕口有破壊試験①を行った後に、試験体をずらして健全部位で二回目の仕口無試験②を行った。
- このため比較的長い試験体を必要とするので材料調達の観点から集成材を用いた。加えて集成材作製において、強度に最も影響すると思われる最外層引張側のラミナが①②試験で同一の材料となるよう、4mのフィンガージョイント無しを通しラミナを使用した。



150角も180角も長さ、加力位置は共通

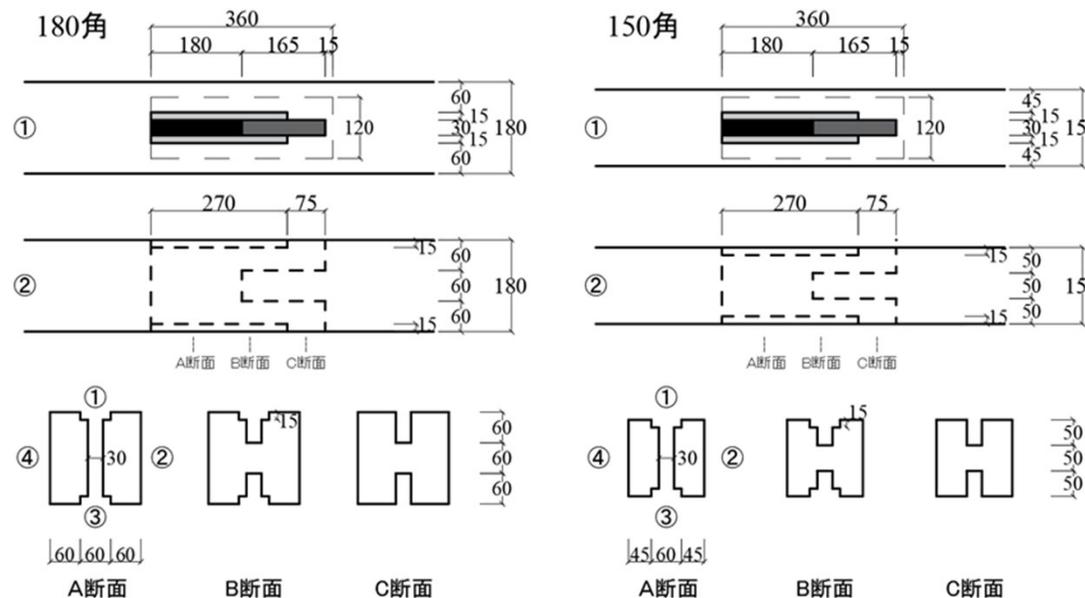
※引張を受ける最外層ラミナはFJなし（ハッチ部分4000m）

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

- 下に示す計120本の試験体を用いて試験を行った。なお、1本の試験で仕口有と仕口無の2試験を行うため、試験数量は、計240体となる。

樹種	断面寸法 (mm)	長さ (m)	断面欠損			合計 (体)
			二方差し	三方差し	四方差し	
構造用集成材同一構成等級 スギ E55-F225	150角	5.3	10	10	10	30
	180角	5.3	10	10	10	30
構造用集成材同一構成等級 ヒノキ E95-F315	150角	5.3	10	10	10	30
	180角	5.3	10	10	10	30

2方差し

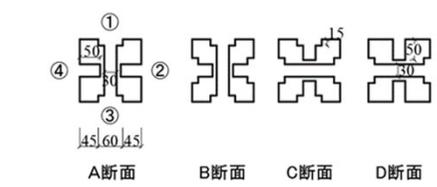
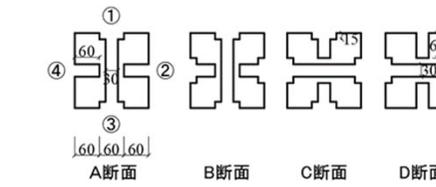
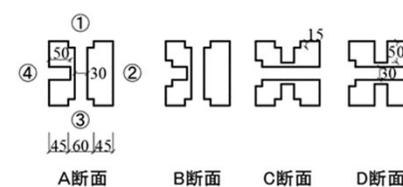
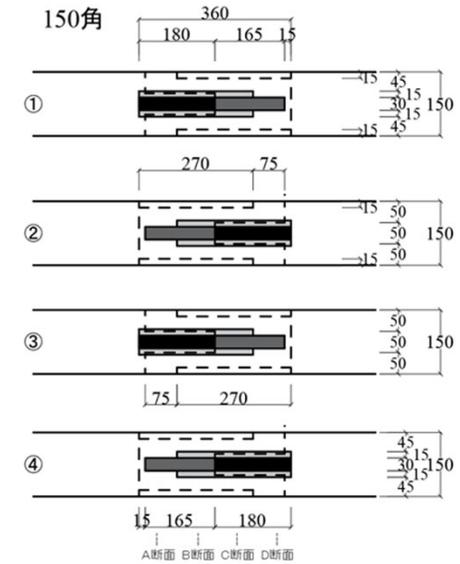
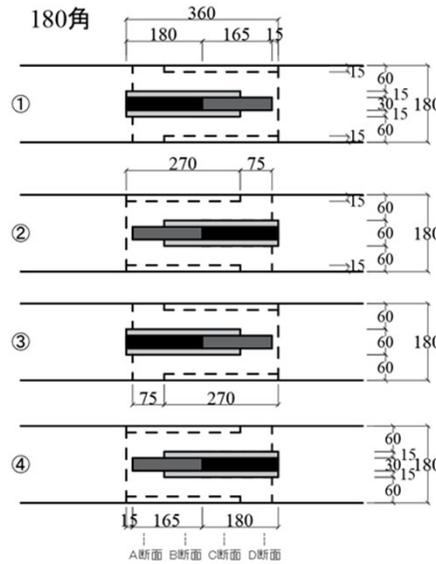
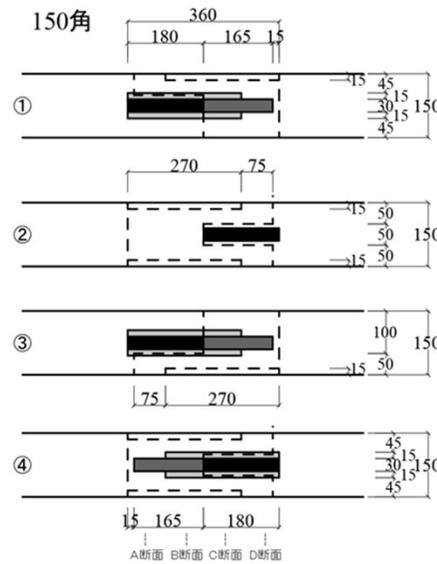
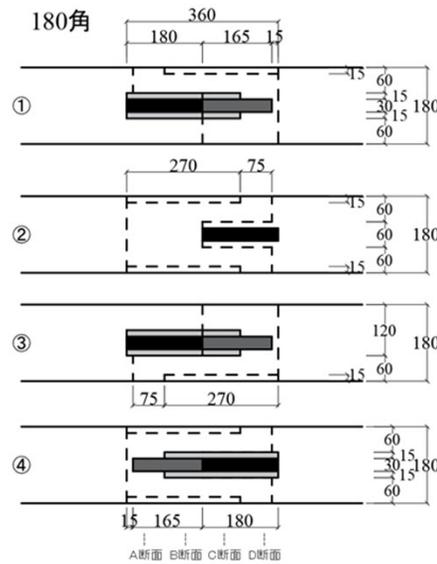


※③面が連続ラミナとなる引張側 ①面が加力面

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

3方差し

4方差し



※②面が連続ラミナとなる引張側 ④面が加力面

※③面が連続ラミナとなる引張側 ①面が加力面

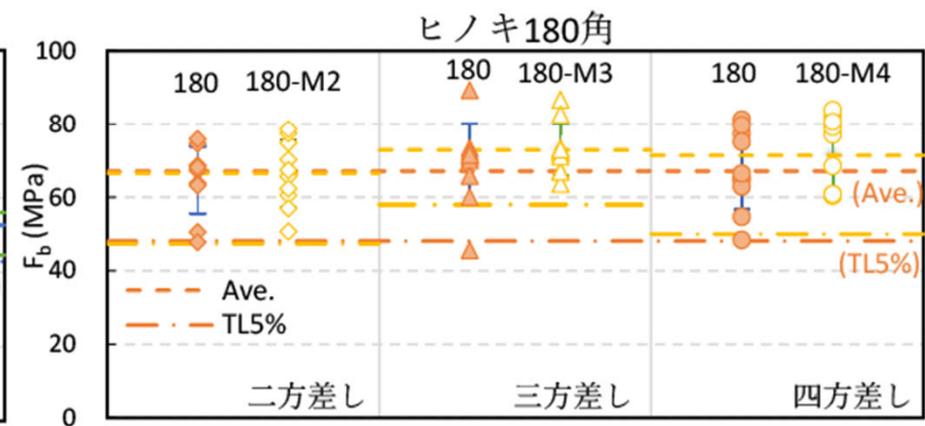
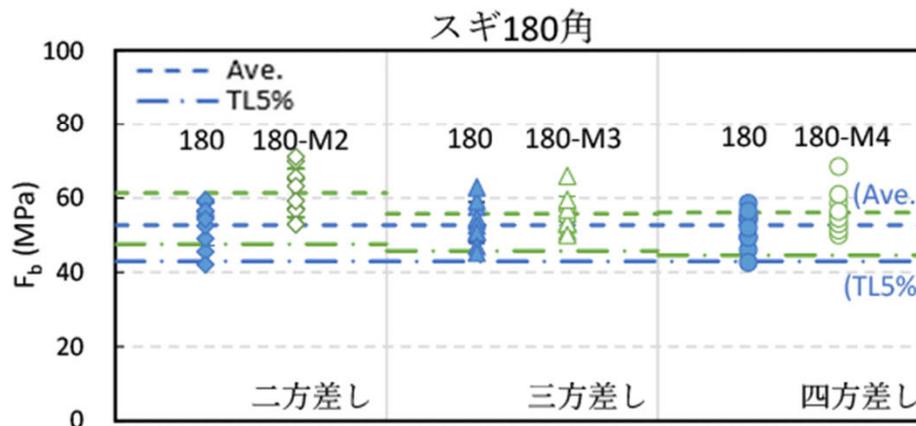
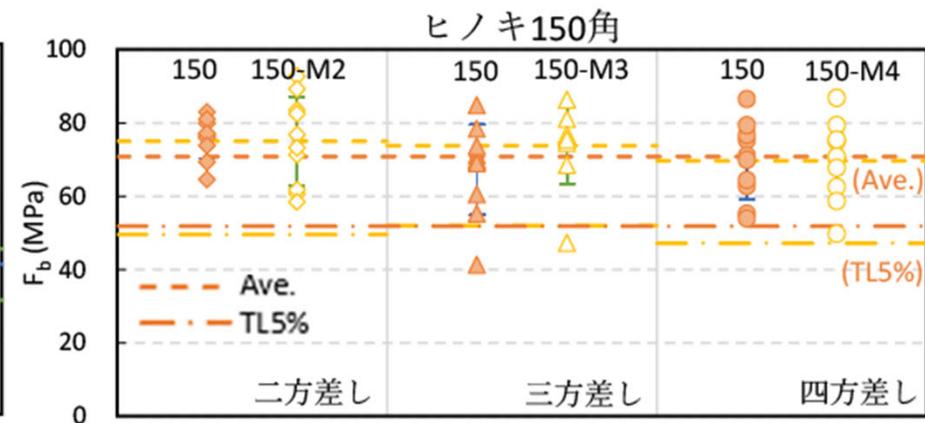
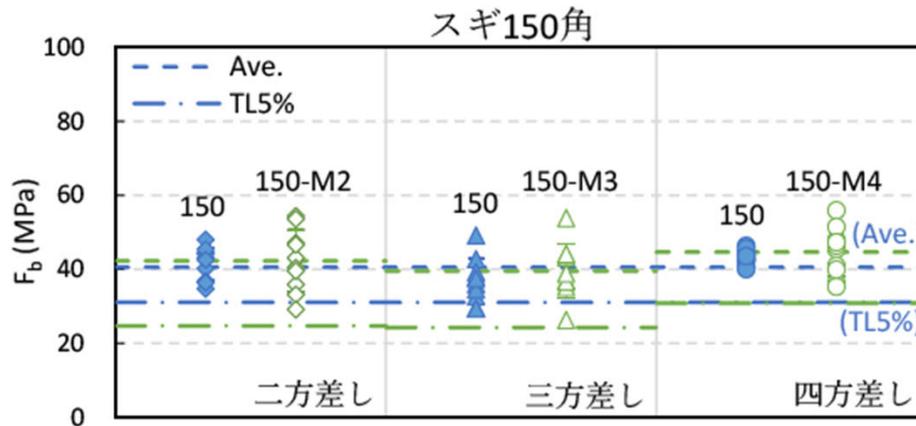
- 断面欠損には、差鴨居構面において120×360mmの断面の差鴨居が取り付くことを想定し、一般的と思われる形状の欠損形状を施した。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

- 曲げ強度 F_b を算定する場合の見かけの断面係数は仕口部分の最弱断面を用いて計算した。

仕口の有無による断面係数 Z_0 比 (Z_{0-M} : 仕口有、 Z_{0-0} : 仕口無)

Z_{0-M2}/Z_{0-0}		Z_{0-M3}/Z_{0-0}		Z_{0-M4}/Z_{0-0}	
150 角	180 角	150 角	180 角	150 角	180 角
0.70	0.76	0.73	0.79	0.69	0.75

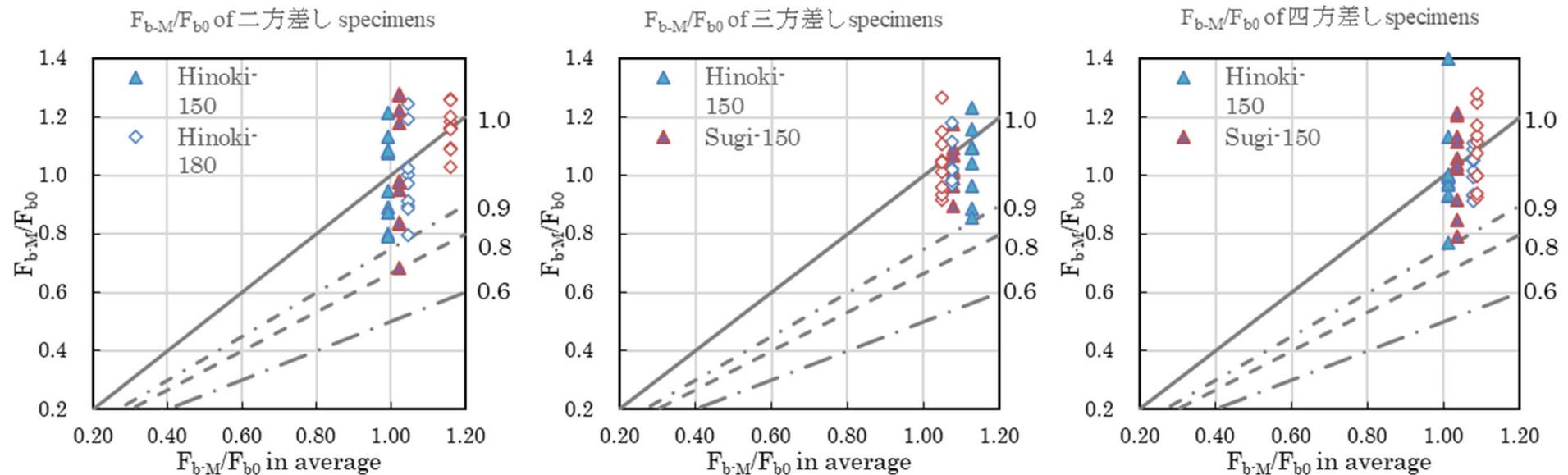


柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

- 同一材での仕口有（Fb-M）と仕口無し（Fb0）の平均曲げ強度は、どの断面、どの欠損においても、近い値を示した。
- 強度は平均値でも5%下限値でも、仕口有試験体 > 仕口無試験体 となる場合が多かった。また、仕口無しでは、破壊点は荷重点付近下層ラミナの節等欠点の影響が見られた。
- 試験体標準偏差（ばらつき）は 仕口有条件 > 仕口無し条件 となる仕様が多かった。
- 水平方向の仕口の影響を見るために、水平方向の仕口が無い二方差しと四方差しを比較すると、水平方向仕口の影響はほとんど見られなかった。
- 試験体寸法の影響として、180角の試験体は150角の試験体に比べて、標準偏差（ばらつき）が小さく、5%下限値が大きめに算出される結果となった。これは、180角試験体の方が、相対的に全断面に対する仕口穴の寸法比率が小さく、欠点などの影響が緩和されるためと考えられる。

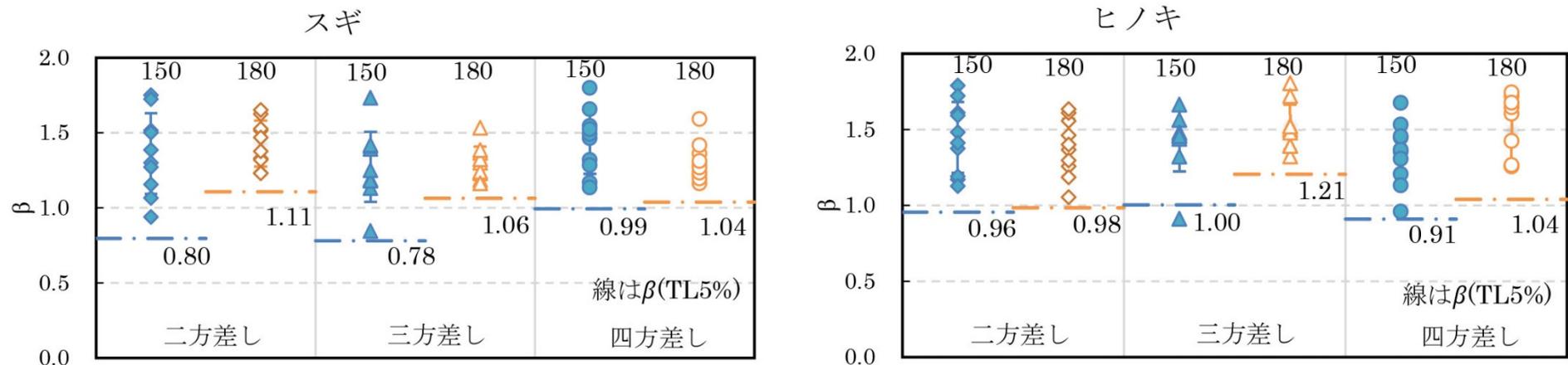
柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

- 同一試験体の値で比較した、仕口の有無による曲げ強度の比率（ F_{b-M}/F_{b0} ）を示す。横軸には条件ごとの F_{b-M}/F_{b0} の平均値を取った。これを見ると、樹種や断面寸法、仕口穴形状の違いにかかわらず、 F_{b-M}/F_{b0} 比は概ね0.9以上を取ると見なすことができる。



柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

- 仕口による低減率 β を、仕口無し条件の強度下限値（fb0）に対する比率として求めた。なお、下限値fb0は、今回の集成材全体の下限值とするため、仕口寸法によらず、樹種、断面が同一な各条件全数30本の値を用いた5%下限値とした。 β の値は試験体ごとに求められる。



- 条件ごとにらつきがあるが、おおむね0.8以上の値を示した。
- β （TL 5%）は、0.8から1.0の範囲の低減係数として定義され、 β （TL5%）：SG15 < HG15 < SG18 = HG18 \approx 1の結果となった。ほぞ穴の種類が低減係数に与える影響の傾向は明確でないが、断面寸法に対する欠損寸法の相対的な比率（Z0-M / Z0の比率に関連）が大きいほど、強度の低下が大きくなる傾向が見られた。

柱の折損にかかわる曲げ強度の検討（断面欠損）

まとめ

- 仕口加工の有無が異なる同一材料の試験体から得られた曲げ強度は、条件ごとの平均値で比較すると全体として同様の値であった。
- 仕口加工を有する試験体の強度は、仕口加工の無い試験体よりも高くなる傾向があった。
- 引張側の断面欠損の比率が大きくなると、曲げ強度のばらつきが顕著に大きくなった。
- 仕口加工がある個々の試験体強度と仕口の無いの柱の強度下限値の比率を用いて、正味断面係数に乗じる低減係数 β の値を定めた。仕口形状が β に与える傾向は明確ではない。一方で、柱の断面寸法に対する仕口寸法の相対的な比率が大きいくほど（欠損率が高いほど）、つまり180角と比較し150角の方が、柱の強度低下が大きくなる（ β が大きくなる）様子が得られた。150角（スギ・ヒノキ）では $\beta = 0.8 \sim 1.0$ 、180角（スギ・ヒノキ）では $\beta = 1.0$ という値が得られた。

解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

解析モデルの構築の方針

既往の研究より以下の重ね合わせで可能。

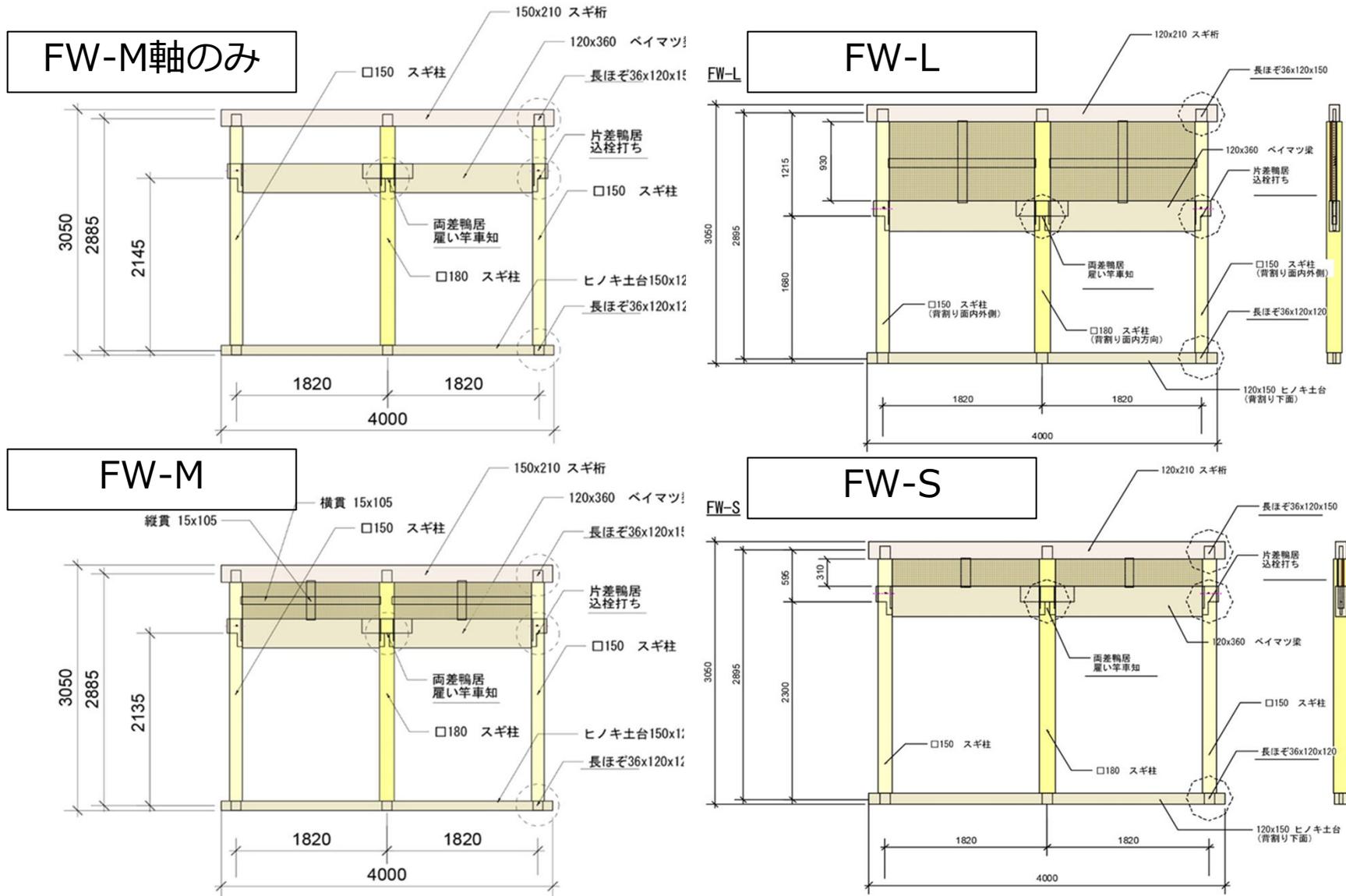
①接合部のモーメント抵抗成分	回転バネ・せん断バネで表現可能
②差鴨居の軸抵抗成分	差鴨居端部に材せいを再現するための剛域を設け、柱材との接合部においては、接触部分を多数の単位面積に分割してそれぞれに設定しためり込み圧縮バネや、ほぞ差し込栓や雇い竿・車知栓による引張バネ、貫の回転バネによって抵抗機構を再現した。これにより、軸力の変化による接合部の回転抵抗、柱の曲げ抵抗との相互作用の影響を考慮することを試みた。
③垂れ壁の水平せん断抵抗成分	回転バネ・せん断バネで表現可能
④柱の曲げ変形	材料特性として組み込むことで表現可能

②では、土壁のせん断バネを、1)上下面のせん断抵抗、2)隅角部の対角圧縮による圧縮ストラットに分けて評価し、これを適用した土壁垂れ壁付きの差し鴨居構面モデルを構築。

解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

実験値と解析値の比較（解析モデルの妥当性の確認）

昨年度実施した以下の構面の実験データと解析値を比較した。



解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

FW-Mの軸のみと土壁有の結果

解析では初期剛性が低く、荷重は8-9割程度の値で推移した。

土壁有のFW-S、M、Lの結果

S、M試験体では比較的良い一致をみているが、L試験体では初期剛性が約半分、実験の最大値であった1/15rad.時の荷重で約0.8倍の結果となった。

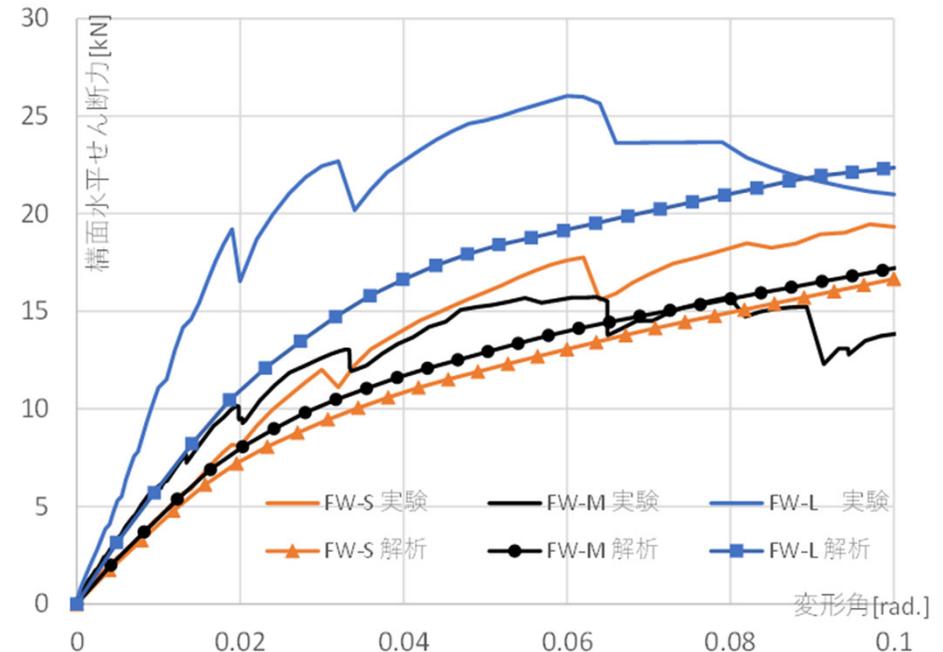
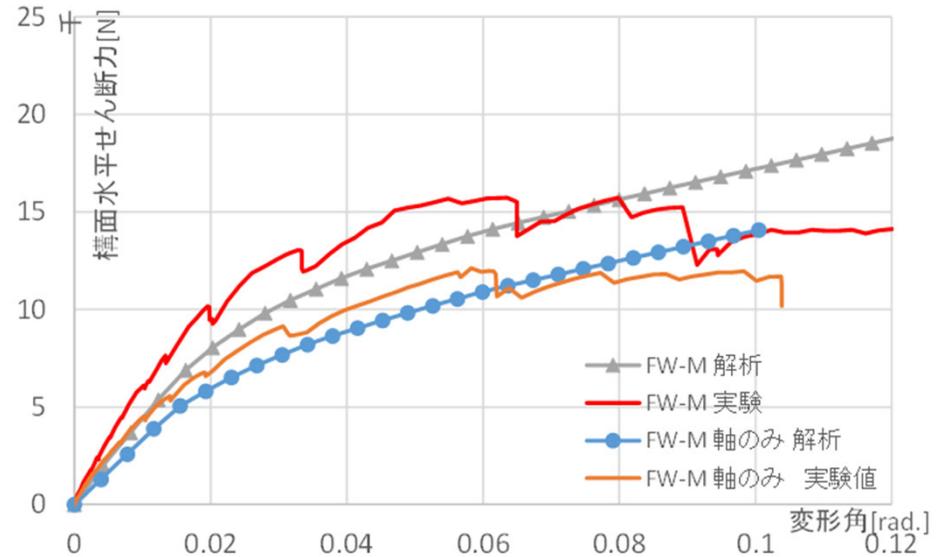
アスペクト比は、

S : $310/1655=0.19$ 、

M : $465/1655=0.28$ 、

L : $930/1655=0.56$ である。

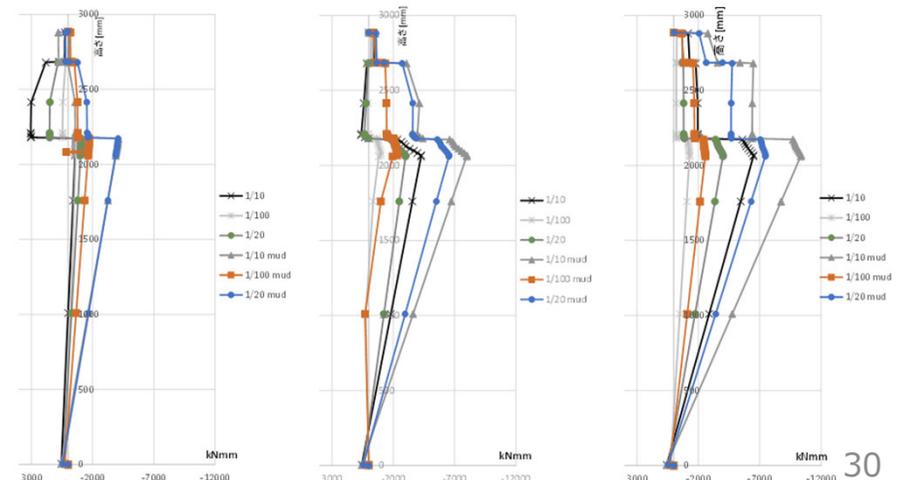
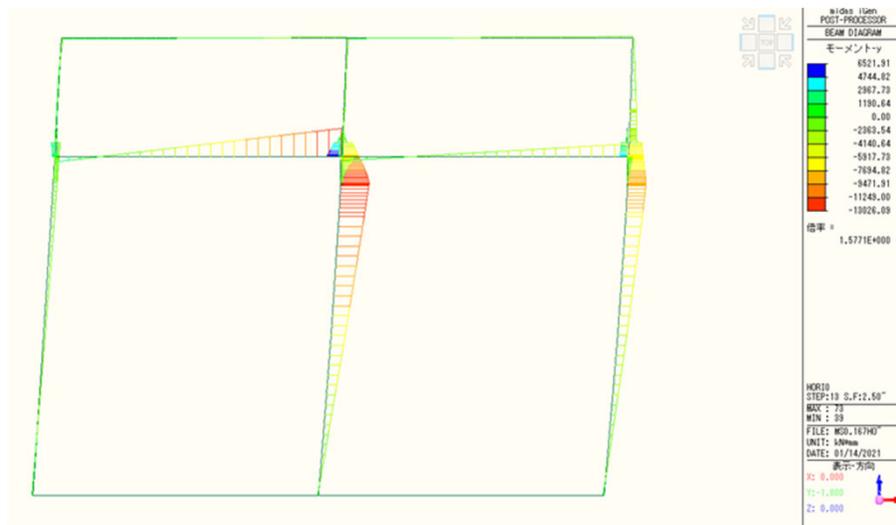
別途行った要素実験の解析結果からは、圧縮ストラットの荷重は左右の柱にのみ作用するとしても、よい一致をみているが、実大試験結果の解析においては、アスペクト比の大きいL試験体において、初期剛性、特定変形角時の荷重ともにやや低い結果となった。



解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

解析モデルの構築についてのまとめ

- このほか、応力分布図の確認や柱の曲げモーメントについての実験結果との照合なども行った。
- その結果、アスペクト比の小さい（0.2-0.3程度）S、M試験体においてはよい一致をみた。
- 圧縮ストラットによる荷重を左右の柱のみで負担するとした今回のモデルを用いる場合は、以降のパラメトリックスタディにおいても、土壁のアスペクト比は比較的小さいものを対象とすることが妥当であると考えられる。



解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

パラメトリックスタディー

全構面で以下の要素は共通とし、標準的な差鴨居・垂れ壁付構面の構造性能を提示することを目的とする。

- 構面は2スパンとする。
- 土台一桁の芯々距離：2885mm
- 土台一差鴨居の芯々距離：2135mm
- 柱芯々距離（左右とも1820mm）

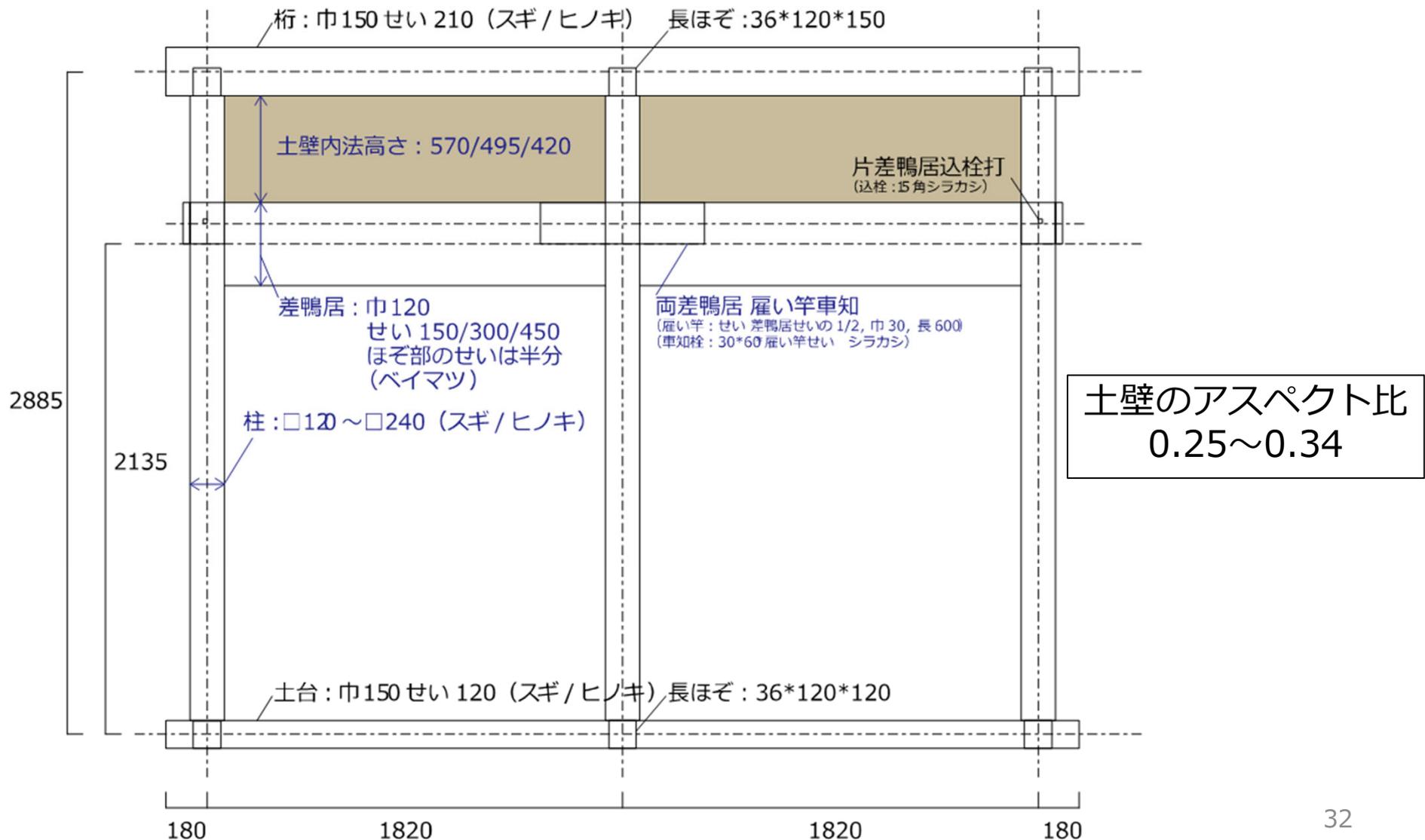
部位	寸法
柱	120□, 135□, 150□, 180□, 210□, 240□
土台	巾150*せい120
桁	巾150*せい210
差し鴨居	巾120*せい150, 300, 450
込栓	15□
車知栓	30*6.5

以下の項目をパラメータとした。

- A：軸材の樹種（差し鴨居：ベイマツを除く） 全てスギ、全てヒノキ
- B：柱の断面寸法 120、135、150、180、210、240mm角
- C：差鴨居のせい 150、300、450mm
- D：垂れ壁（土壁）の内法高さ〔差鴨居のせいに対応する〕
570、495、420mm
- 差鴨居に対して、左右端の片差し部分はせいが差鴨居せいの半分とし、巾は30mmで一定とした。雇い竿についても、せいは差鴨居の半分、巾30mm、長さ600mmは固定とした。車知栓も断面30×60mmを固定、長さは雇い竿せいと同じ、左右両柱の込栓も断面は15×15mmで一定とし、長さは母材（柱）巾以上あるものとした。

解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

パラメータスタディの対象とする架構（青色部がパラメータ）



構面条件により変化させた設定

①MS要素（圧縮バネ）

差鴨居の左右端部と柱の接触面を等分割し、分割面積ごとに一つのめり込み圧縮バネを設定した。10分割以上とすれば10mm毎にばねを設置したときを基準として各特性値（初期剛性、降伏耐力・変位）の相違が5%以下となることが知られており、これに従い、10等分以上かつ、差鴨居せいによって単位のめり込み面積が大きく変化しないように（25～30mm）設定。

差鴨居の端部を等分割した箇所のうち、上下端の面積分については片側の余長部ありとして初期剛性、二次剛性（初期剛性の1/6）、降伏耐力を算出した。それ以外の中間部分については、めり込み面積が連続して並ぶことから余長部なしとして初期剛性、二次剛性、降伏耐力等を算定した。

②雇い竿（中央）・差鴨居の片差し（左右）の貫効果

中央の雇い竿や左右柱に差し込まれた片差しの差鴨居は、回転に伴い柱との間でめり込み抵抗を発生する。どちらも、柱との接触部の三角形めり込みの偶力として剛性を算出した。ただし、雇い竿は回転時に差し鴨居にも接触することによる相互作用を受けるため、剛性は低下するものと考えられる。ここでは、通し貫のめり込み回転剛性から求めた初期剛性の0.5倍が作用すると仮定。また、解析の設定上は中央の雇い柄の回転剛性は柱の両側に半分ずつ割り振れるものと仮定。

③ 雇い竿車知栓接合部の引張抵抗

雇い竿車知栓接合部の引張剛性、降伏耐力を雇い竿のせいに応じて変化させた。ただし、材料特性は、差し鴨居ベイマツ、雇い竿ベイマツ、込栓シラカシである。ベイマツは無等級材を使用するものとして、 10000N/mm^2 、シラカシは比重による推定式より栓の剛性を求め、 13471N/mm^2 のヤング係数としている。

なお、引張性能は差鴨居、雇い竿、車知栓の材料・寸法のみで決定されるため、柱巾には影響を受けない。

④ 片差差鴨居接合部の引張抵抗（長ほぞ込栓打）

左右の柱に差し込まれる片差し差し鴨居接合部の引張剛性、降伏耐力を柱幅によって変化させた。材料特性は、差し鴨居ベイマツ、込栓シラカシ、柱はスギまたはヒノキである。ベイマツは無等級材を使用するものとして、 10000N/mm^2 、シラカシは比重による推定式より栓の剛性を求め、 13471N/mm^2 、スギは 7000N/mm^2 、ヒノキは 9000N/mm^2 のヤング係数としている。なお、初期剛性は母材（差し鴨居）と側材（柱）の面圧剛性に依存するため、柱材種により異なる。降伏耐力は込栓のせん断降伏で決定され、どの場合も共通となる。

解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

⑤ 柱の断面性能

解析結果の評価において、部材に作用する曲げモーメント、せん断力による折損の有無を判定している。

柱巾・せいは120mm角から240mm角であるが、中央、左右のそれぞれの柱で実際の接合部の納まりに合わせた断面欠損を想定し断面性能を算出。

折損の検定は、曲げモーメントおよびせん断力の大小、断面欠損の大小を考慮し、材軸位置、及各接合部の上下端の圧縮MS要素の接合位置で行った。

解析結果に対する部材応力の検定は、せん断破壊・曲げ破壊をともに評価した場合、曲げ破壊のみを評価した場合の2種類実施した。

⑥ 土壁の抵抗要素

土壁材料は1種類とし、壁の形状に合わせてパラメータを設定した。既往の研究で用いた荒壁土と中塗り土よりなる、厚さ約70mm、圧縮強度各約 0.6N/mm^2 の土を用いるものとする。

なお荒壁土、中塗り土の初期剛性は 124N/mm^2 、 48N/mm^2 であり、厚みに応じて算定したばねを並列ばねとして合成して全体の土の単位圧縮剛性とできるものと仮定する。

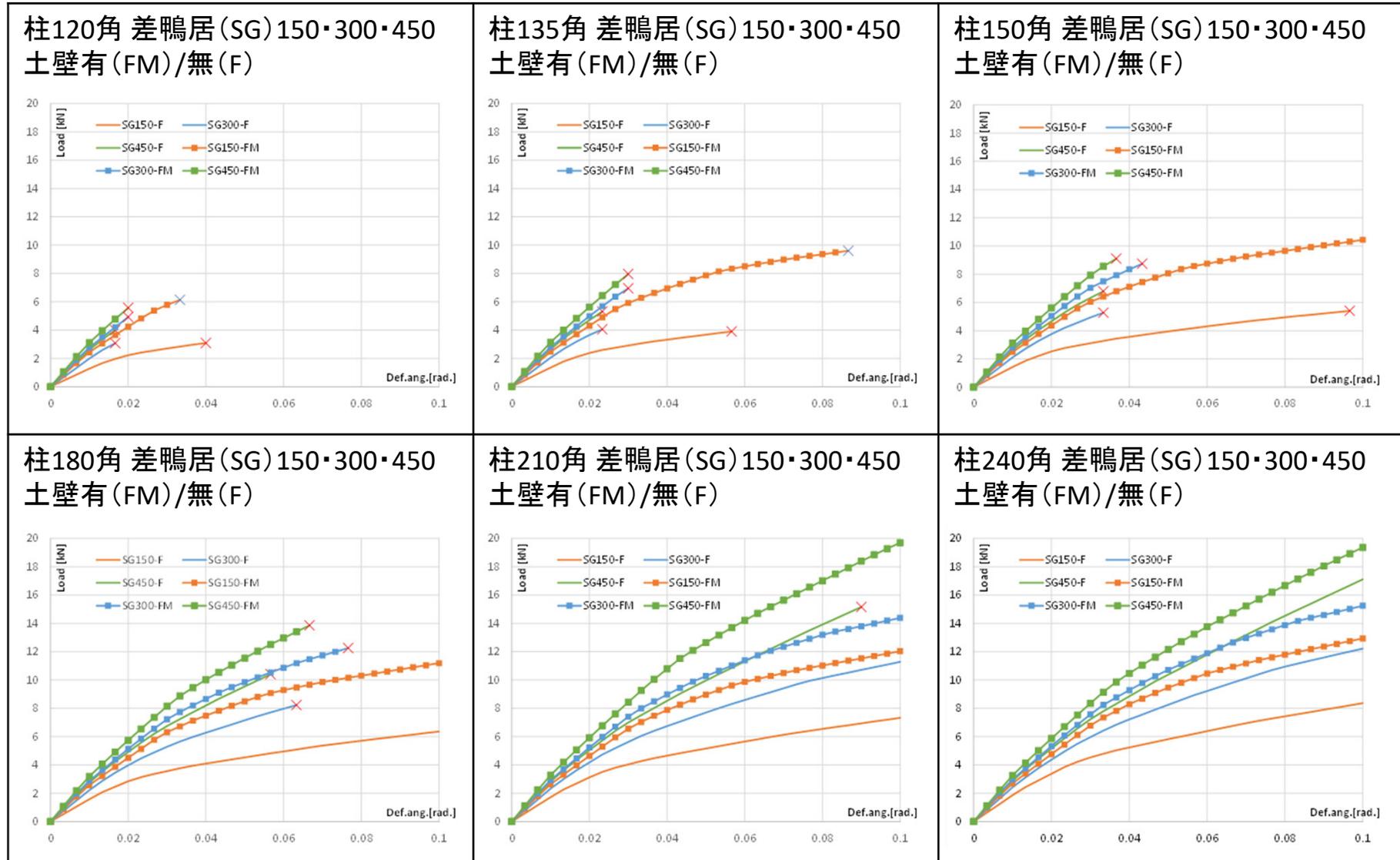
解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

柱の曲げおよびせん断の検定について

- パラスタにおける有効断面係数 Z_e は切り欠きを考慮した正味の断面係数 Z_x を用い、曲げ強度は基準強度 F_b （無等級材相当）を用いた。
- また、柱の曲げ実験での検討の結果より、①4点曲げ試験によって得られている基準強度の値と差鴨居等の実架構における局所的曲げ強度（3点曲げ）の関係、②柱のほぞ穴の欠損と曲げ強度の関係、に関する影響をともに考慮すると、曲げ強度の低減係数 β は、 $\beta = 1$ とみなせることとした。
- せん断力については、作用せん断力に対して、柱断面内の最大せん断応力度 t_{max} を算出し、基準強度 F_s （無等級材相当）との比較で検定した。最大せん断応力度の算出に当たっては、平均せん断応力度と最大せん断応力度（中立軸位置）の比（形状係数）を算出した。

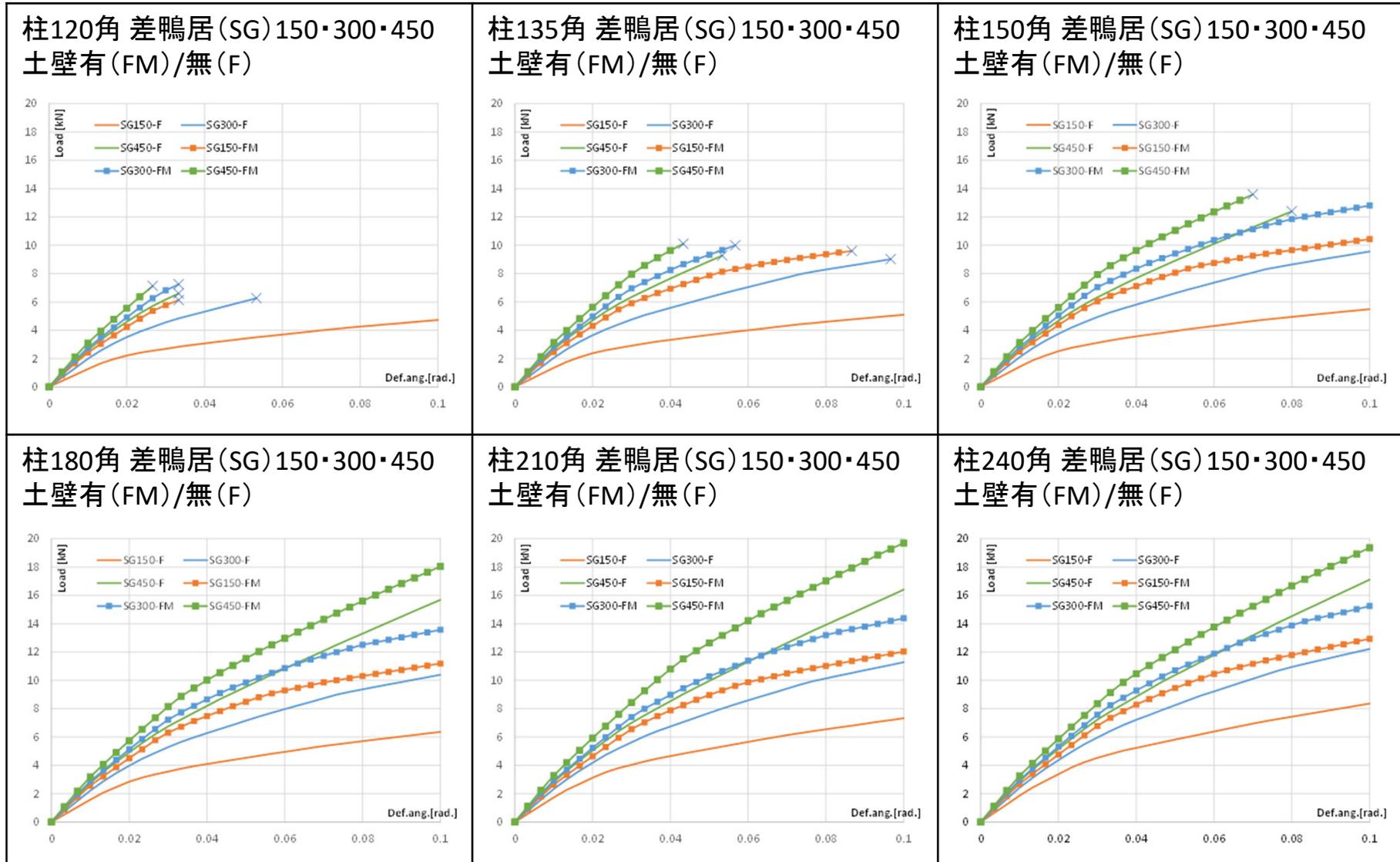
解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

結果 1 : 全軸材スギの場合の荷重変形関係〔柱のせん断・曲げ破壊を検定〕



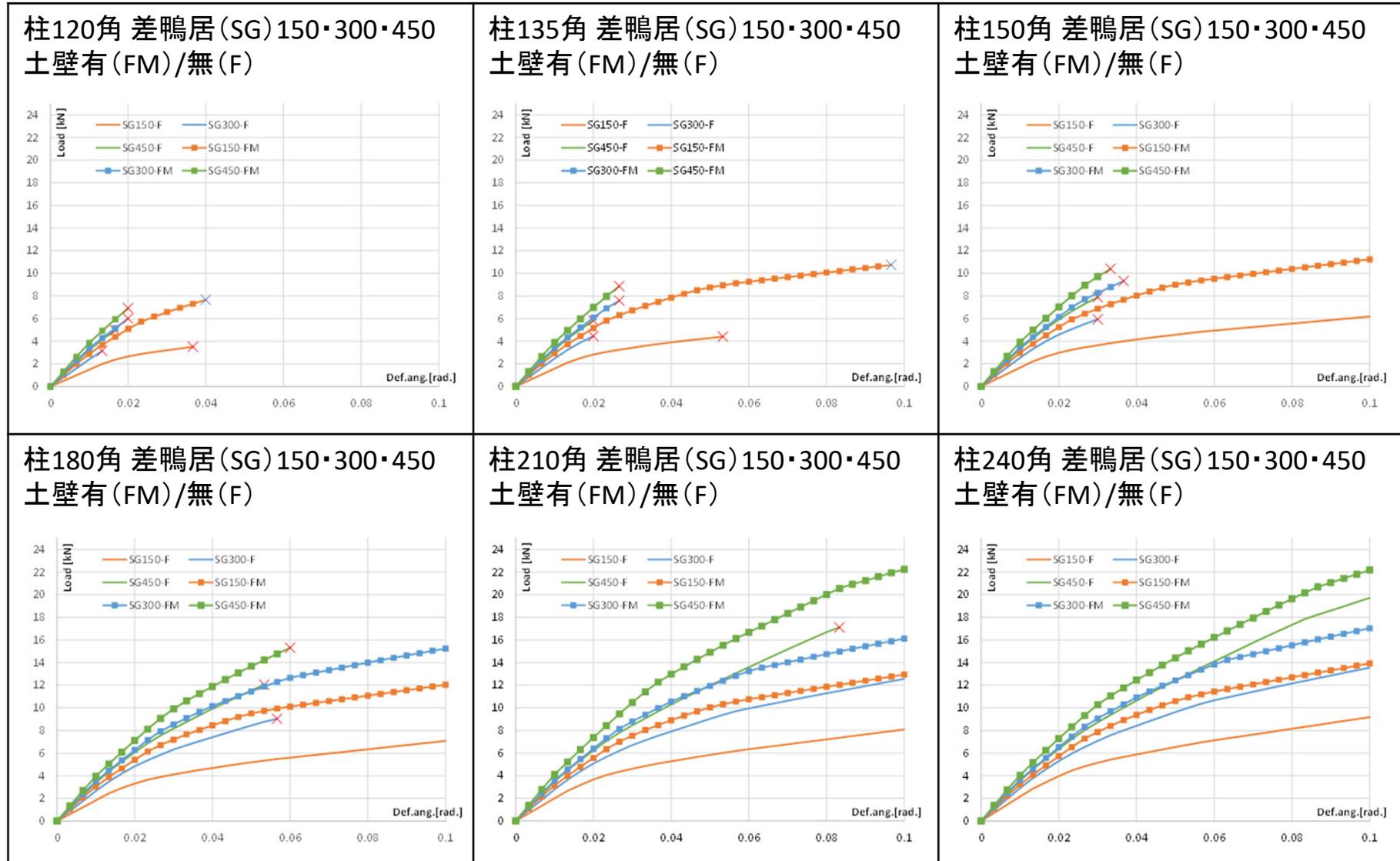
解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

結果 2 : 全軸材スギの場合の荷重変形関係〔柱の曲げ破壊のみ検定〕



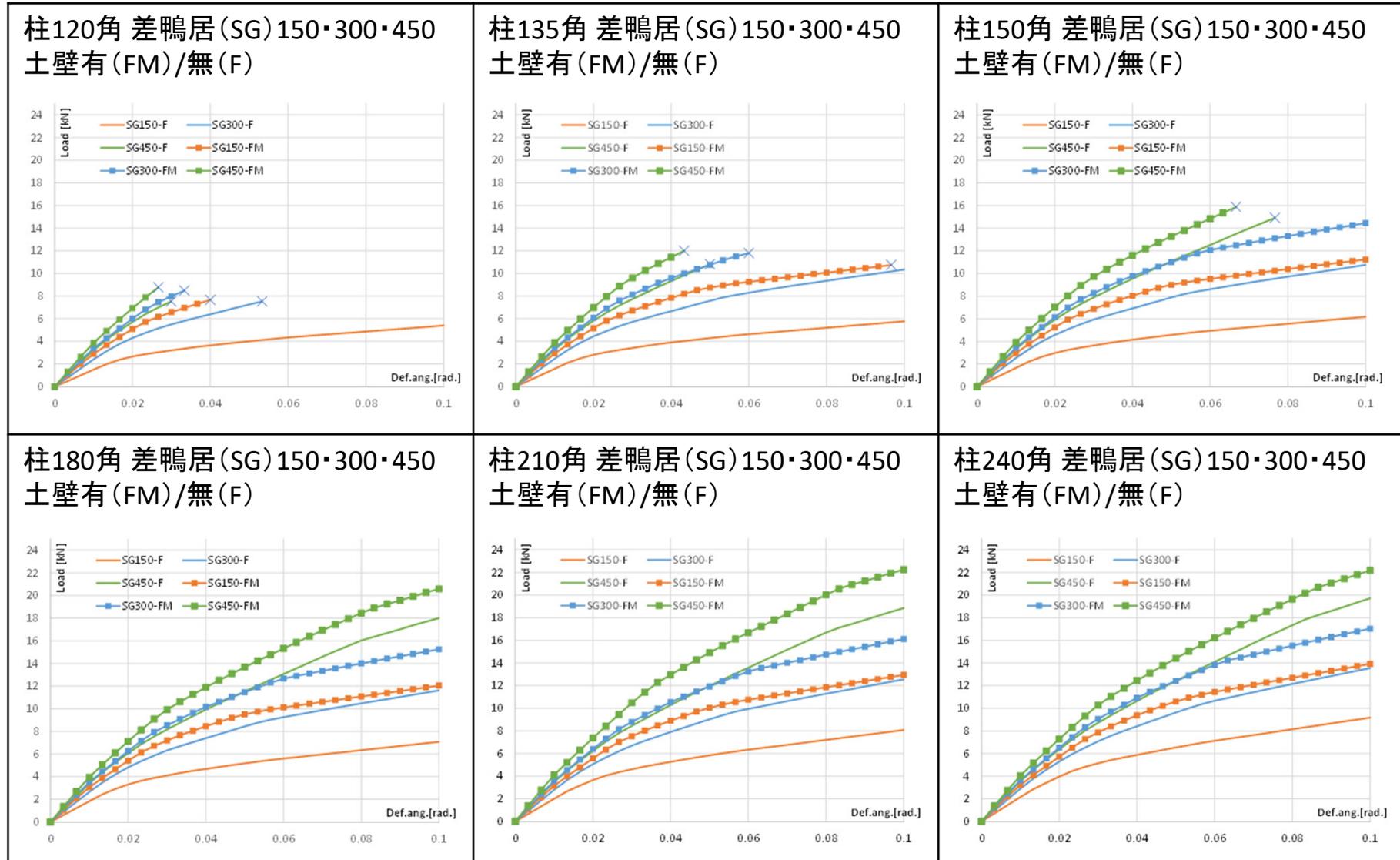
解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

結果 3 : 全軸材ヒノキの場合の荷重変形関係〔柱のせん断・曲げ破壊を検定〕



解析モデルの構築とパラメトリックスタディ

結果 4 : 全軸材ヒノキの場合の荷重変形関係〔柱の曲げ破壊のみ検定〕



解析の結果 1

- 解析中の部材の損傷について、引張バネの破損に至る接合具の変形量を確認したところ、全ての解析結果において、差鴨居－柱接合部の込栓、雇い竿車知接合部の車知栓ともに、実験より得られた破壊の基準（込栓：20mm、車知栓：10mm）以下の変形量となっており、接合具の破損は確認されなかった。
- 柱の折損に関しては、全ての折損した場合において、最初に曲げ破壊またはせん断破壊を生じたのは、中央の柱の差鴨居材軸と接する位置であった。
- せん断破壊、曲げ破壊をともに考慮した場合、ほとんどの場合せん断破壊が先行した。柱がスギの場合、柱巾が120mmでは $1/50 \sim 1/25$ rad.でせん断または曲げ破壊、150mmでは $1/25$ rad.前後、180mmでも $1/15$ rad.以降には破壊が発生した。210mm以上では殆どの場合で $1/10$ rad.までには破壊は生じない。

解析の結果 2

- 曲げ破壊のみを考慮した場合、基準強度に達する変形角は遅くなり、柱巾180mm以上では1/10rad.までに破壊は生じない。なお、せん断破壊に関しては、土壁付きよりも、軸組のみの方が厳しいが、曲げモーメントで見ると土壁付のほうが厳しい結果となっており、土壁の付加による応力分布の変化が影響を与えていると推測される。
- 差鴨居（ベイマツ）を除く軸材をスギからヒノキへ変化させた場合、最大荷重等は増加するが、仕様同士の性能の相対的な関係、柱折損に至る変形角には大きな変化は見られない。
- 短期許容せん断耐力は、柱巾が小さく早期にせん断で破壊しているものには靱性指標で決定している場合もみられるものの、ほとんどの場合で特定変形角時の荷重（1/120rad.変形時）で決定している。

短期許容せん断耐力の最大値は スギ：軸組のみ約2.4kN、土壁付約2.7kN、ヒノキ：軸組のみ約3kN、土壁付約3.4kN。