

各種木ダボによるスギ厚板の2面せん断性能^{*1}

中田 欣作

落とし込み板壁等の厚板耐力壁の面内せん断変形を決定する要素の一つである板相互のずれを減少させることを目的として、正方形および円形断面の14種類の木ダボを用いてスギ厚板の2面せん断試験を行った。

2面せん断試験における初期剛性は、木ダボの横ヤング係数および密度の増加とともに増加した。2面せん断試験における降伏耐力および最大耐力は、木ダボの曲げ強さおよび密度の増加とともに増加した。また、木ダボのヤング係数の増加とともにこれらの強度性能は増加したが、それらの相関関係は密度等との相関関係よりも低かった。

スギ強化LVLのダボは初期剛性および最大耐力が最も高かったが、塑性率で示される変形性能は最も低かった。アカガシ、ホワイトアッシュおよびユーカリのダボは初期剛性、最大耐力および塑性率が高くダボに適していた。正方形断面のダボでは、従来から用いられている円形断面のダボと比較すると、断面積の比と同等の初期剛性および最大耐力の向上が認められた。

ヨーロッパ型降伏理論式および弾性床上の梁の曲げ理論式により厚板の2面せん断試験のすべり剛性および最大耐力を算出したところ、これらの計算値は実験値と良く一致した。

1. はじめに

伝統構法である落とし込み板壁は、現在一般的に用いられている筋かいや合板を用いた耐力壁と比べると、初期剛性が低いために耐力壁としての性能の指標である壁倍率が低いのが現状である。

落とし込み板壁ではカシ、ケヤキおよびミズナラ等の広葉樹の円形断面の木ダボを用いて厚板に作用する水平せん断力に抵抗させるが、主に板相互のずれと板の圧縮筋かいゾーンの圧縮変形により板壁の面内せん断変形が決定される。板相互のずれは主に木ダボの強度性能で決定され、板の圧縮筋かいゾーンの圧縮変形は板の強度性能で決定される。そこで、密度および曲げヤング係数の非常に高い木質材料をダボに用いて板相互のずれを減少させることにより、板壁の面内せん断変形を減少させることができると考えられる。

木材の接合部の中で、曲げ降伏型接合具であるボルト、ドリフトピン、ラグスクリュー、くぎおよび木ねじを用いた接合部の耐力および剛性は、それぞれヨーロッパ型降伏理論式および弾性床上の梁の曲げ理論式を用いて求められる¹⁾。本研究の木ダボを用いた接合部では、基本的にはこれらの理論式を用いるが、前述の接合具を用いた接合部とは異なり、耐力に関しては木ダボのせん断破壊等の降伏モードを考慮した解析が、剛性に関しては接合具である木ダボ自身のせん断

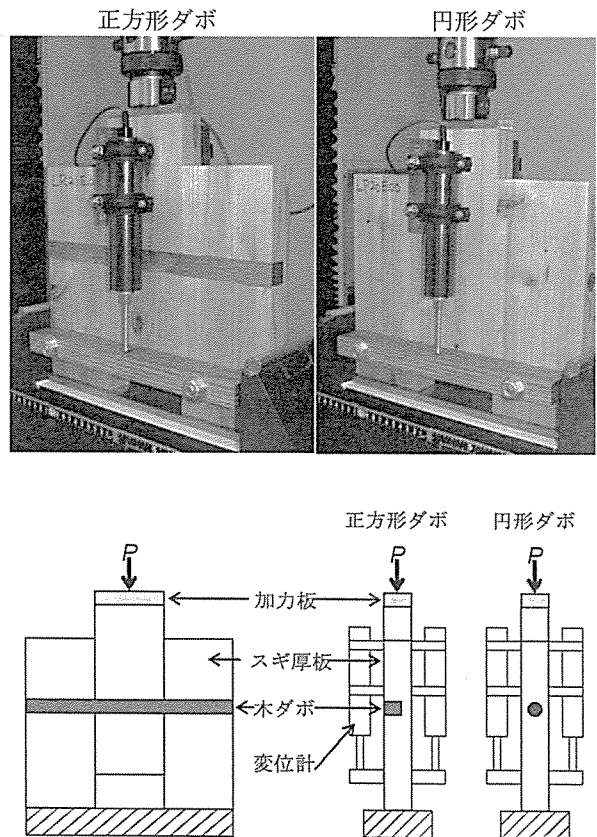


図1 2面せん断試験の方法

*1 本研究の一部は、第59回日本木材学会大会(2009年3月、松本)において発表した。

変形および横圧縮変形を考慮した解析が必要となる²⁾。

本研究では、各種の木ダボを用いて厚板の2面せん断試験を行うとともに、各種の理論式を用いて木ダボ接合部の強度性能を算出し、板壁のせん断性能の向上の可能性について検討した。

2. 材料と方法

2.1 供試材料

幅100mm×厚さ30mm×長さ247mmのスギ厚板3枚を用いて、図1に示すように圧縮荷重による2面せん断試験を行った。荷重速度2mm/minとし、精度

表1 正方形ダボの強度性能

樹種	略号	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	ヤング係 数 (kN/mm ²)	横ヤング 係数 (kN/mm ²)	比 ^{a)}	曲げ強さ (N/mm ²)	横圧縮強 さ (N/mm ²)
スギ	S	0.49	9.4	12.6	0.39	0.031	100.6	7.7
ヒノキ	H	0.47	14.4	10.6	0.26	0.025	87.5	5.6
ラジアタパイン	R	0.42	13.9	7.9	0.33	0.042	68.0	7.3
ベイマツ	B	0.56	13.7	12.4	0.39	0.032	103.8	9.3
ミズナラ	N	0.70	11.0	10.3	0.55	0.053	89.0	9.9
ケヤキ	K	0.69	12.0	12.0	0.93	0.077	121.4	15.6
ホワイトアッシュ	T	0.70	9.6	13.5	0.77	0.057	130.1	11.6
ゴムノキ	G	0.73	13.4	11.8	0.45	0.038	97.8	9.5
アピトン	P	0.77	13.6	20.2	0.50	0.025	135.3	7.8
ハードメイプル	D	0.71	12.4	14.2	0.81	0.057	132.0	17.6
ミズメ	M	0.68	13.5	12.1	0.79	0.065	110.1	14.2
アカガシ	A	0.87	13.0	15.6	1.10	0.071	140.0	24.6
ユーカリ	Y	1.02	11.3	23.3	1.02	0.044	172.5	19.0
強化LVL	L	1.33	6.7	26.7	1.77	0.066	266.3	75.5
平均値						0.049		

a) 横ヤング係数/ヤング係数

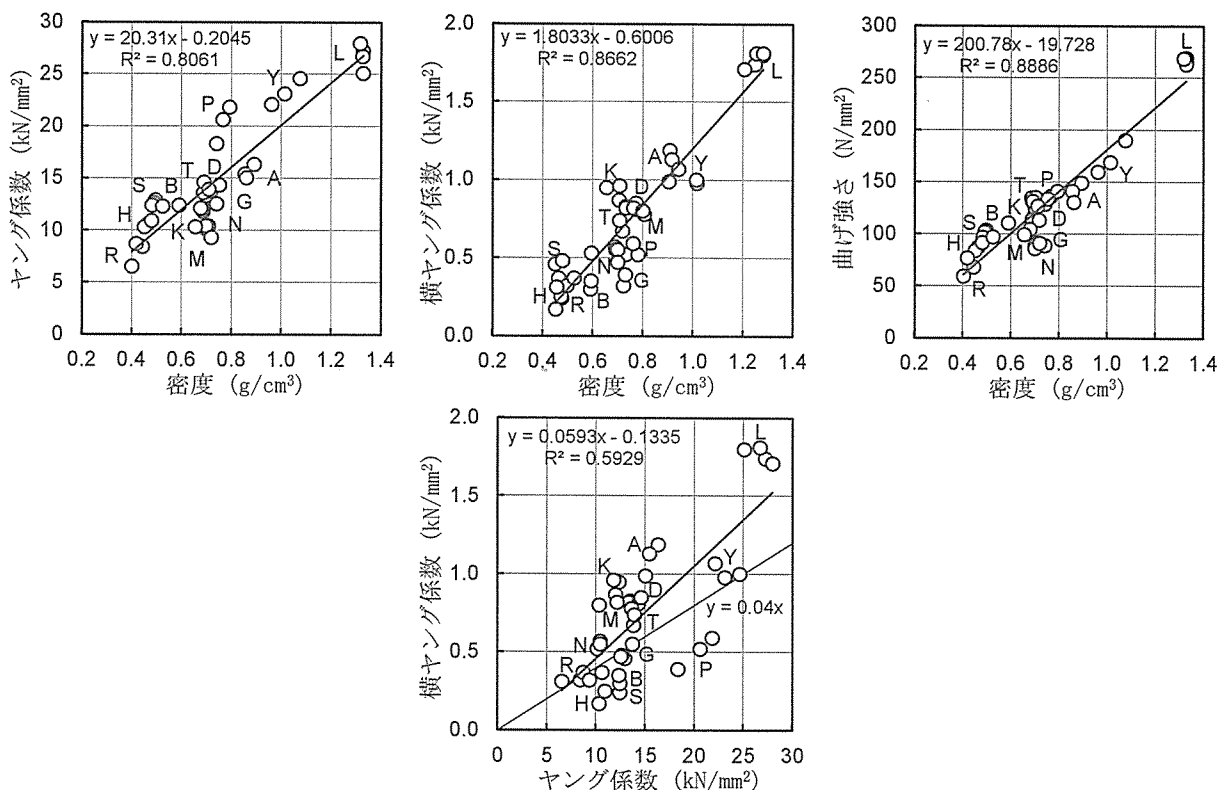


図2 正方形ダボの強度性能

略号：表1参照

1/200mmの変位計2個を用いて厚板の相対変位を測定した。

厚板は幅100mm×厚さ30mm×長さ500mmで曲げ剛性試験を行って曲げヤング係数を測定し、E90の

機械等級のものを使用した。なお、後述の強化LVLダボでは、厚板の曲げヤング係数の違いが2面せん断試験の剛性および耐力に及ぼす影響を検討するために、E70、E90およびE110の厚板を使用した。E70、E90

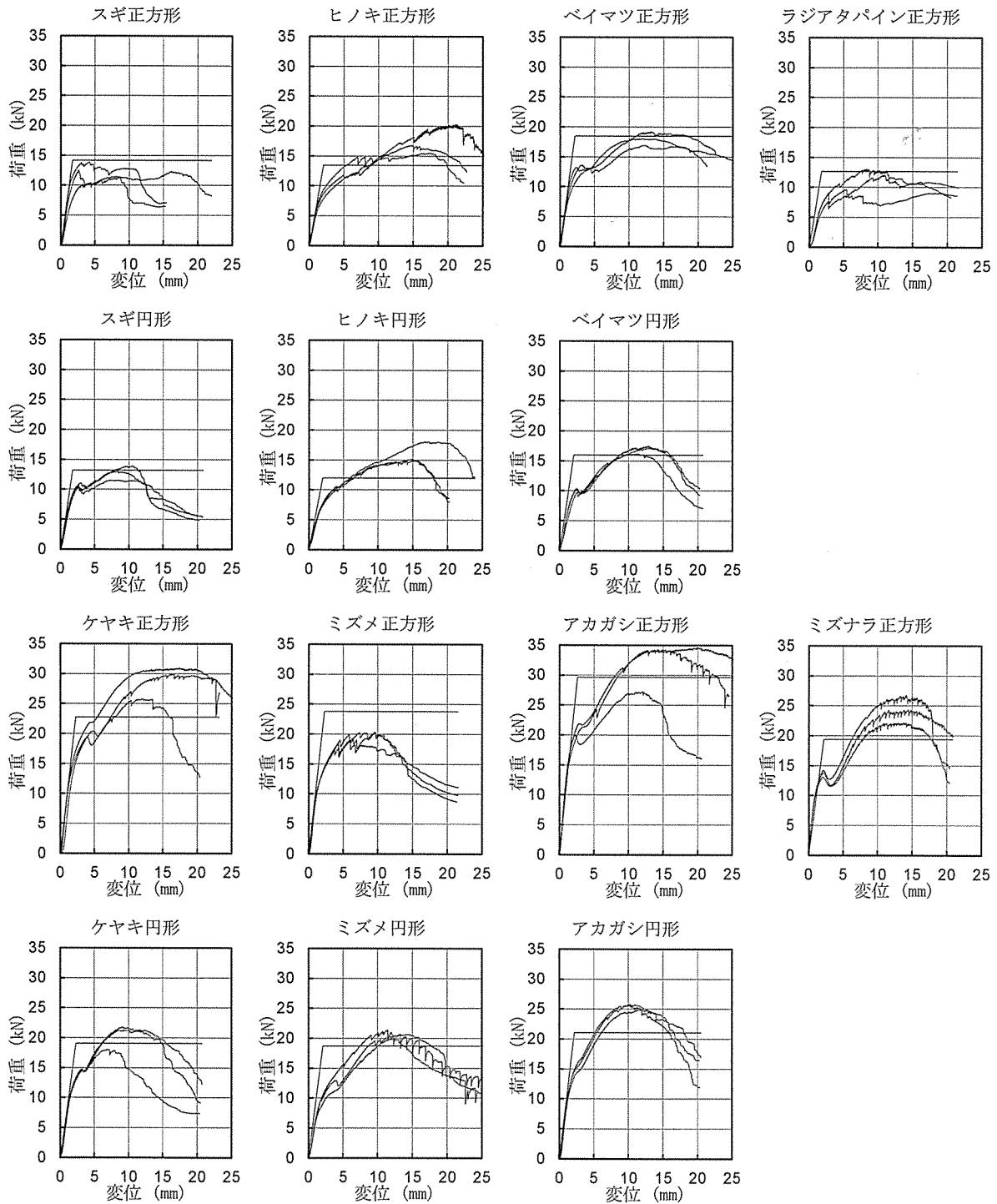


図3-1 2面せん断試験の荷重と変位との関係
 曲線：実験値、直線：計算値

およびE110では、ヤング係数の範囲をそれぞれ5.9～7.7、7.8～9.7および9.8～11.7kN/mm²とした。E70、E90およびE110の厚板の密度は、それぞれ0.37、0.40および0.44g/cm³であった。すべての厚板の含水率の平均値は10.7%であった。

木ダボは表1に示す針葉樹4種類、広葉樹9種類および強化LVLとし、21mm角の正方形断面および直径20mmの円形断面を用いた。正方形および円形断面のダボは、正方形断面の状態では曲げヤング係数を測定した。針葉樹は、スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.)、ラジアタパイン (*Pinus radiata* D. Don) およびベイマツ (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) である。広葉樹は、ミズナラ (*Quercus crispula* Bl.)、ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino)、ホワイ

トアッシュ (*Fraxinus americana* L.)、ゴムノキ (*Hevea brasiliensis* Muell.-Arg.)、アピトン (*Dipterocarpus* spp.)、ハードメイプル (*Acer saccharum* Marsh.)、ミズメ (*Betula grossa* S. & Z.)、アカガシ (*Quercus acuta* Thunb.) およびユーカリ (*Eucalyptus* spp.) である。強化LVLは、スギ材ロータリー単板にフェノール樹脂を含浸し、もとの厚さの1/3まで加熱圧縮して作製した³⁾。試験体数は各3体とした。

2面せん断試験における剛性および耐力の算定に用いるために、同ロットの試験体を用いて曲げ試験および横圧縮試験を行った。曲げ試験は、幅21mm×厚さ21mm×長さ336mmの試験体を用いて、スパン294mmの中央集中荷重で行い、繊維方向の曲げヤング係数(以下、ヤング係数と記す。)および曲げ強さを

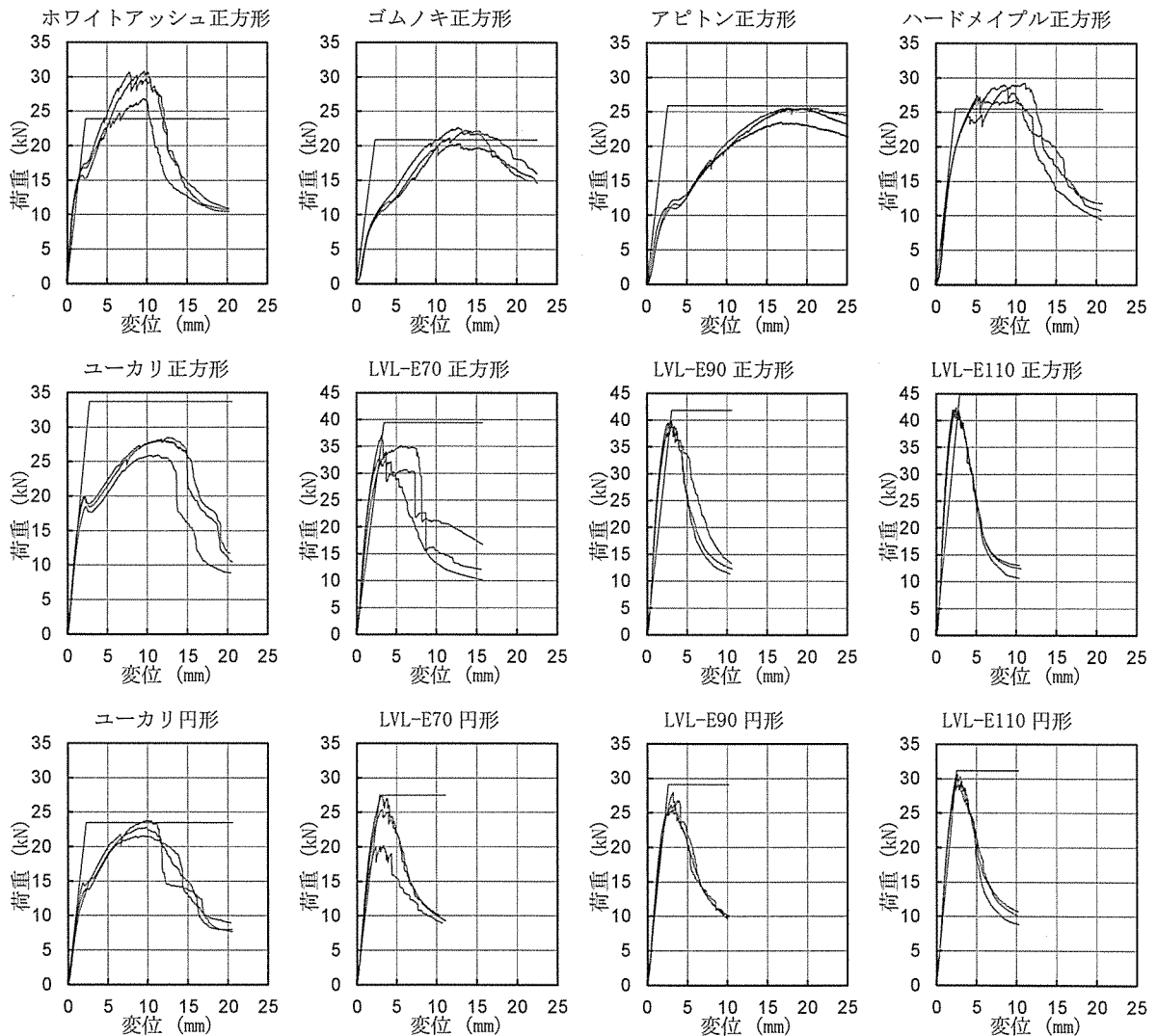


図3-2 2面せん断試験の荷重と変位との関係
 曲線：実験値、直線：計算値

求めた。横圧縮試験は、幅 21mm × 厚さ 21mm × 長さ 42mm の試験体を用いて行い、繊維と直交方向のヤング係数（以下、横ヤング係数と記す。）および横圧縮強さを求めた。両試験ともに、試験体数は各 3 体、荷重方向は針葉樹では接線方向、広葉樹では半径方向とした。

3. 結果と考察

3.1 2面せん断試験の結果

表 1 および図 2 に正方形ダボの曲げおよび横圧縮試験の結果を示す。ヤング係数、横ヤング係数および曲げ強さは密度の増加とともに増加した。横ヤング係数は、ヤング係数の 0.025 ~ 0.077 倍となり、樹種により大きく変動した。横ヤング係数とヤング係数との関係

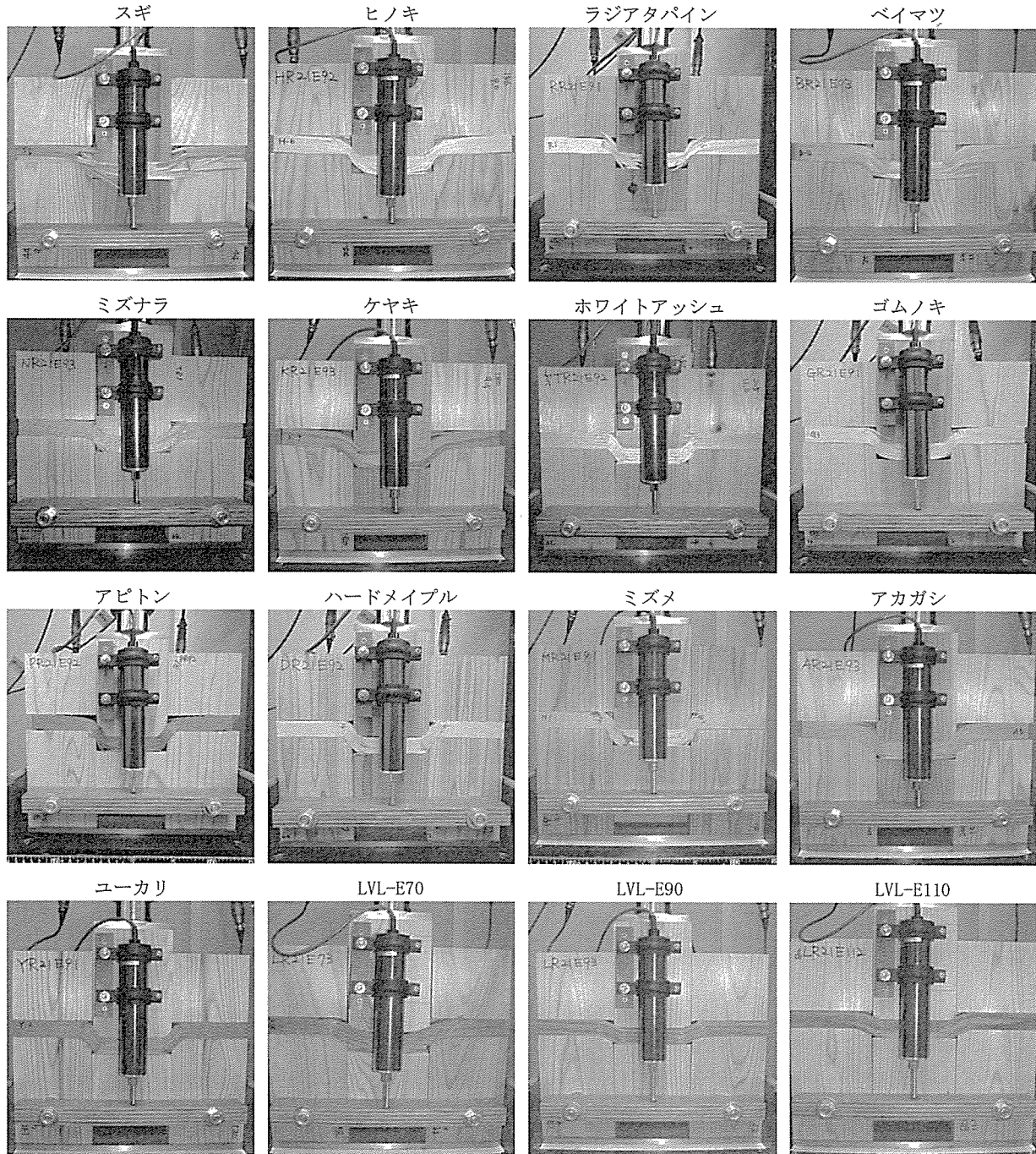


図 4 2面せん断試験終了時の正方形ダボの破壊形態

では、ヤング係数に関してすべての樹種の回帰直線より横ヤング係数が高いグループと低いグループに分かれた。横ヤング係数は、一般的には図中に原点を通る直線で示したようにヤング係数の0.04倍としてよい¹⁾が、後述する剛性の算出において、正確な予測を行うためには、実験値を用いる必要があると考えられる。

図3に2面せん断試験の荷重-変位曲線、図4に試験終了時の正方形ダボの破壊形態を示す。ほぼすべての試験体において、中央と両側の厚板の界面の内側において、変位2~5mmで木ダボの下面から繊維方向にせん断クラックが発生し荷重が降伏した。また、ミズナラ、ケヤキ、ホワイトアッシュ、アピトン、アカガシおよびユーカリでは変位2~3mmにおいて外観的な破壊を伴わない荷重の低下が生じた。針葉樹および散孔材では同様の現象が認められないことから、これは木材中の道管が横方向の荷重により圧縮破壊を受

け荷重が低下したためと考えられる。環孔材のミズナラおよびケヤキの全面横圧縮試験では、降伏後の荷重が増加しない現象が観察されており⁴⁾、今回の実験と同様の理由であると考えられる。

荷重の降伏後には、厚板の界面で木ダボが圧縮変形を大きく受けたもの(a)、同様に圧縮変形を大きく受けるとともにその近傍で曲げ破壊したもの(b)、厚板の界面で圧縮変形を受けずに曲げ破壊したもの(c)および厚板の界面で圧縮変形を受けずに曲げ破壊も生じないもの(d)があった。それぞれ、(a)スギ、ヒノキ、ゴムノキおよびアピトン、(b)ラジアタパイン、ベイマツおよびミズナラ、(c)ホワイトアッシュ、ハードメイプル、ミズメ、ユーカリおよび強化LVL、(d)ケヤキおよびアカガシであった。bとcのグループでは曲げ破壊とともに荷重が低下した。

表2および図5に2面せん断試験の結果を示す。

表2 2面せん断試験の結果

正方形ダボ										
樹種	密度 ^{a)} (g/cm ³)	ヤング係数 ^{a)} (kN/mm ²)	初期剛性 ^{b)} (kN/mm)	最大耐力		降伏耐力		塑性率	最大/降伏	
				荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)		荷重	変位
スギ	0.46	12.5	9.0	12.9	7.7	12.1	2.9	6.94	1.08	2.49
ヒノキ	0.46	9.9	5.3	17.5	17.7	12.7	5.8	6.04	1.41	3.11
ラジアタパイン	0.49	9.8	5.0	11.6	8.2	9.0	3.3	7.34	1.31	2.63
ベイマツ	0.59	15.4	8.7	18.1	12.6	13.3	3.3	8.25	1.36	4.02
ミズナラ	0.69	11.8	10.0	24.4	13.8	13.7	2.2	7.85	1.78	6.38
ケヤキ	0.70	12.4	10.4	28.9	15.3	20.0	4.5	6.08	1.45	3.42
ホワイトアッシュ	0.71	15.2	13.3	29.5	9.0	16.6	2.0	5.38	1.78	4.48
ゴムノキ	0.72	13.7	4.9	21.8	13.1	12.0	4.0	4.35	1.83	3.33
アピトン	0.77	18.1	5.2	25.0	18.2	11.7	3.2	6.06	2.13	5.81
ハードメイプル	0.77	16.0	12.3	28.5	8.4	26.3	5.0	4.12	1.09	1.76
ミズメ	0.79	14.7	10.9	20.1	8.3	18.3	4.2	6.03	1.11	2.03
アカガシ	0.92	16.6	14.0	32.1	15.4	21.1	3.0	7.92	1.52	5.18
ユーカリ	0.98	22.4	14.1	27.6	11.9	19.5	2.2	6.32	1.42	5.20
LVL-E70	1.28	24.2	19.9	34.7	3.2	33.2	2.8	3.70	1.02	1.12
LVL-E90	1.29	24.3	25.3	39.6	2.9	38.9	2.6	2.69	1.05	1.17
LVL-E110	1.29	24.3	29.9	42.2	2.5	41.5	2.2	2.43	1.02	1.13

円形ダボ										
樹種	密度 ^{a)} (g/cm ³)	ヤング係数 ^{a)} (kN/mm ²)	初期剛性 ^{b)}		最大耐力			降伏耐力		塑性率
			初期剛性 (kN/mm)	比 ^{c)}	荷重 (kN)	比 ^{c)}	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	
スギ	0.49	13.2	6.4	1.41	12.8	1.01	9.0	2.7	10.7	5.33
ヒノキ	0.48	10.1	4.3	1.24	16.0	1.09	15.6	3.8	10.2	4.81
ベイマツ	0.60	15.0	5.9	1.49	17.0	1.06	12.4	2.5	10.1	5.30
ケヤキ	0.68	11.2	8.7	1.19	20.4	1.42	8.7	3.2	14.6	5.10
ミズメ	0.82	15.0	6.1	1.79	20.6	0.98	12.6	4.3	13.3	4.85
アカガシ	0.91	16.9	9.3	1.50	25.5	1.26	10.7	2.9	15.6	5.59
ユーカリ	0.98	22.3	9.4	1.50	22.7	1.21	9.7	2.4	14.7	4.83
LVL-E70	1.27	23.6	13.3	1.81	24.3	1.49	3.2	2.7	23.5	2.62
LVL-E90	1.27	23.6	14.0	1.50	26.6	1.42	3.1	2.8	25.8	2.62
LVL-E110	1.27	23.6	17.0	1.76	30.3	1.39	2.8	2.5	30.1	2.50

a) 木ダボの測定値、b) 割線剛性、c) 正方形ダボ/円形ダボ

PickPoint[®]を用いて荷重-変位曲線の特徴点の抽出と完全弾塑性モデル化を行い、降伏耐力、最大耐力および塑性率を求めた。なお、最大荷重 P_{max} を求め $0.1P_{max}$ と $0.4P_{max}$ を結ぶ割線剛性を初期剛性とした。ここで、

横ヤング係数および曲げ強さは、それぞれ前述の横圧縮試験および曲げ試験における平均値を用いた。

初期剛性は木ダボの密度、ヤング係数および横ヤング係数の増加とともに増加した。初期剛性とこれらと

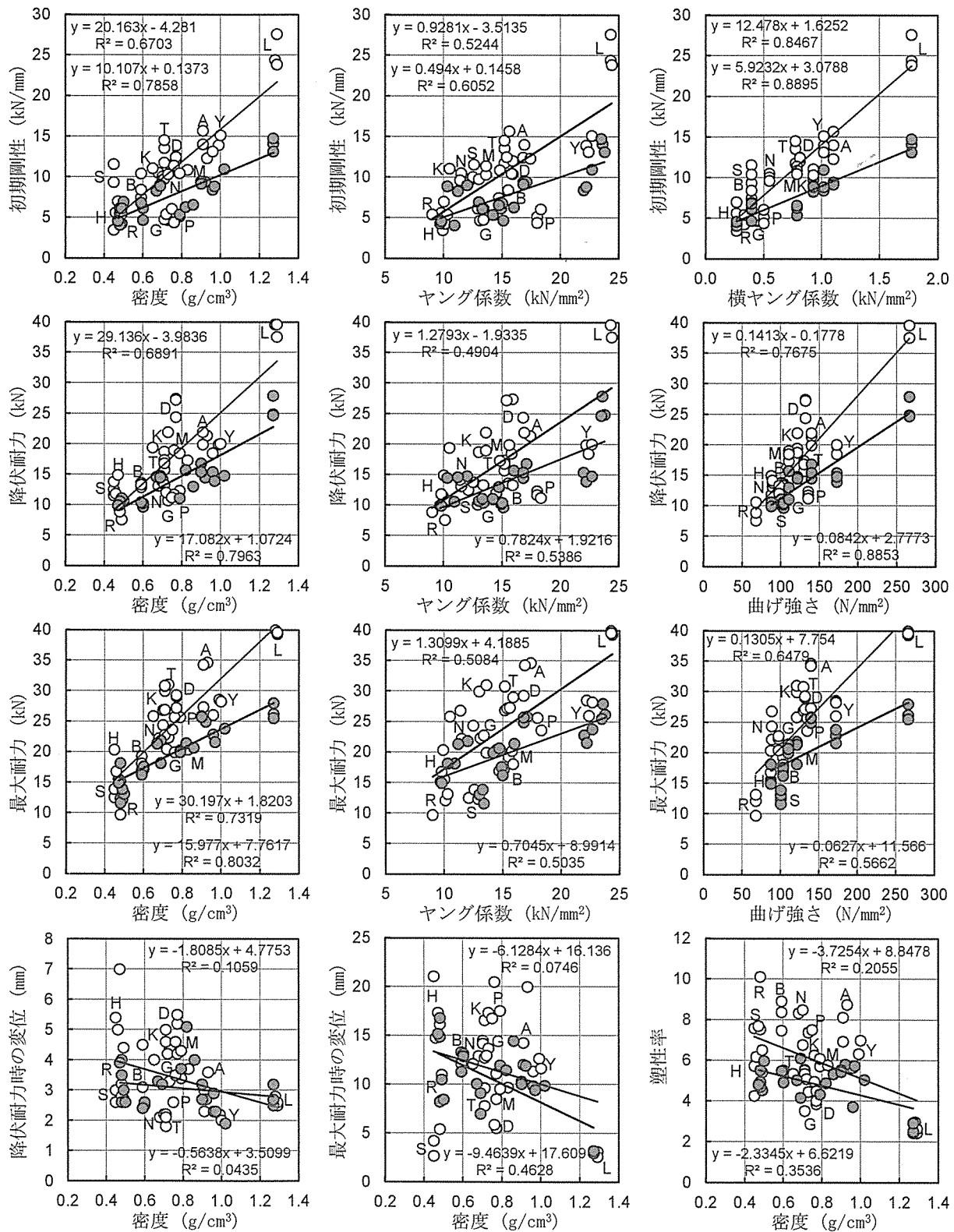


図 5-1 2面せん断試験の結果

○：正方形ダボ、●：円形ダボ、略号：表 1 参照、上段および下段の回帰式はそれぞれ正方形ダボおよび円形ダボ

の関係では、横ヤング係数、密度、ヤング係数の順に相関が低くなった。降伏耐力および最大耐力は木ダボの密度、ヤング係数および曲げ強さの増加とともに増加した。降伏耐力とこれらとの関係では、曲げ強さ、密度、ヤング係数の順に相関が低くなった。最大耐力とこれらとの関係では、密度、曲げ強さ、ヤング係数の順に相関が低くなった。降伏耐力時の変位、最大耐力時の変位および塑性率と密度との間には相関関係が認められなかった。降伏耐力と初期剛性との間には高い相関関係が認められたが、最大耐力と初期剛性との相関関係はやや低くなった。これは、最大耐力と降伏耐力との相関関係が樹種により異なるためと考えられる。ミズナラ、ケヤキ、ホワイトアッシュ、ゴムノキ、アピトンおよびアカガシでは、最大耐力は降伏耐力に関してすべての試験体の回帰直線より高く、すなわち降伏耐力を示した後の耐力の増加が大きいと言える。

円形ダボと正方形ダボを比較すると、断面積の比は1:1.4であり、初期剛性の比はこれと同等であった。しかし、ケヤキ、アカガシ、ユーカリおよび強化LVLでは、最大耐力の比は断面積の比と同等であるが、スギ、ヒノキ、ベイマツおよびミズメでは、その比は1.0に近く、円形ダボと正方形ダボの耐力はほぼ同等であった。これらの木ダボでは、円形断面の場合、木ダボ自身の変形による横方向へ伸長が厚板の母材により拘束されるため、本来の耐力よりも高い値を示す⁶⁾と考えられる。

強化LVLは初期剛性および最大耐力が最も高く、木ダボの材料として高い性能を示すが、塑性率で示される変形性能は最も低くなった。これに対して、アカガシ、ホワイトアッシュおよびユーカリのダボは初期剛性、最大耐力および疎性率が高く木ダボに適していた。

表3に強化LVLダボにおける厚板のヤング係数の違いによる2面せん断試験の強度性能を示す。E70およびE110の厚板のヤング係数はE90のそれぞれ0.78および1.22倍である。2面せん断試験の正方形ダボにおける初期剛性の比は、それぞれ0.79および1.18倍となり、ヤング係数の比と同等であった。最大耐力の比は、それぞれ0.88および1.07倍となり、曲げヤング係数の比よりも小さくなった。円形ダボにおいては、初期剛性および最大耐力ともにE70における比は正方形ダボの最大耐力における比よりも小さく、E110における比はヤング係数における比と同等であった。

3.2 剛性および最大耐力の算出

2面および1面せん断の最大耐力 P_{y2} および P_{y1} をヨーロッパ型降伏理論に基づく式(1)²⁾および式(2)²⁾により算出した。また、2面および1面せん断のすべり剛性 K_{s2} および K_{s1} を弾性床上の梁の曲げ理論に基づく式(3)¹⁾および式(4)²⁾で求めた。なお、式(3)ではボルト等の曲げ降伏型接合具に対応した理論式に木ダボ自身の横圧縮変形を考慮することとし、式(4)は木ダボ自身のせん断変形および横圧縮変形を考慮した式となっている。

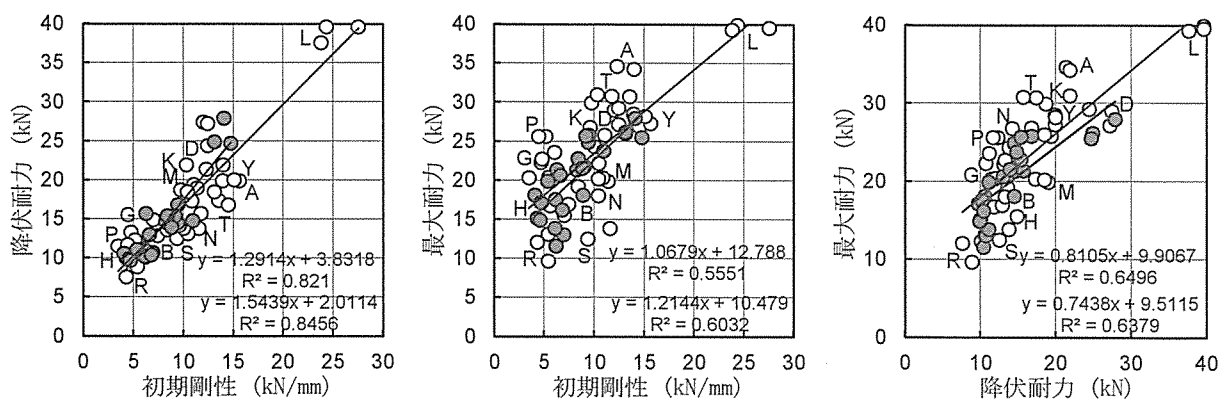


図5-2 2面せん断試験の結果

○：正方形ダボ、●：円形ダボ、略号：表1参照、上段および下段の回帰式はそれぞれ正方形ダボおよび円形ダボ

表3 厚板のヤング係数の違いによる2面せん断試験の強度性能

ヤング係数	ヤング係数の比 ^{a)}	正方形ダボでの比 ^{a)}			円形ダボとの比 ^{a)}		
		初期剛性	最大耐力	降伏耐力	初期剛性	最大耐力	降伏耐力
E70	0.78	0.79	0.88	0.85	0.95	0.92	0.91
E90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E110	1.22	1.18	1.07	1.07	1.21	1.14	1.17

a) E90 との比

$$P_{y2} = \min \left[\begin{array}{l} bL_1 F_{Ecp1} \\ bL_1 F_{Ecp1} \times 2\alpha\beta \\ bL_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{16\beta M_y}{bL_1^2 F_{Ecp1} (2\beta+1)} + \frac{8\alpha^2 \beta^2 (\beta+1)}{(2\beta+1)^2}} - \frac{2\alpha\beta}{2\beta+1} \right] \\ \sqrt{\frac{16bF_{Ecp1} M_y \beta}{1+\beta}} \\ \frac{2AF_S}{\kappa} \end{array} \right] \quad (1)$$

$$P_{y1} = \min \left[\begin{array}{l} bL_1 F_{Ecp1} \\ bL_1 F_{Ecp1} \times \alpha\beta \\ bL_1 F_{Ecp1} \times \frac{\sqrt{\alpha^2 \beta^3 + (2\alpha^2 + 2\alpha + 2)\beta^2 + \beta - \beta(\alpha+1)}}{1+\beta} \\ bL_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{4\beta M_y}{bL_1^2 F_{Ecp1} (\beta+2)} + \frac{2\beta(\beta+1)}{(\beta+2)^2}} - \frac{\beta}{\beta+2} \right] \\ bL_1 F_{Ecp1} \times \left[\sqrt{\frac{4\beta M_y}{bL_1^2 F_{Ecp1} (2\beta+1)} + \frac{2\alpha^2 \beta^2 (\beta+1)}{(2\beta+1)^2}} - \frac{\alpha\beta}{2\beta+1} \right] \\ \sqrt{\frac{4bF_{Ecp1} M_y \beta}{1+\beta}} \\ \frac{AF_S}{\kappa} \end{array} \right] \quad (2)$$

ただし、 L_1 、 L_2 ：主材及び側材厚さ（=100mm）、
 $\alpha = L_2 / L_1$ 、 $F_{Ecp1} = \min [F_{E1}, \alpha_F F_{cvf}]$ 、
 $F_{Ecp2} = \min [F_{E2}, \alpha_F F_{cvf}]$ 、 $\beta = F_{Ecp2} / F_{Ecp1}$ 、 F_{E1} 、
 F_{E2} ：主材及び側材の面圧降伏応力、
 $F_E = (932.15\rho_T - 113.79) \times 9.8 / 100$ 、 ρ_T ：厚板の密度、
 α_F ：めり込み降伏応力増大係数（正方形=1、円形=1.5）、
 $F_{cvf} = -8.2 + 35.4\rho$ ：木ダボのめり込み降伏応力、 ρ ：木
 ダボの密度、 b ：木ダボの幅、 h ：木ダボの厚さ、
 $M_y = ZF_b$ ：木ダボの曲げモーメント、 $Z = bh^2 / 12$ ：断
 面係数、 F_b ：木ダボの曲げ強さ、 A ：木ダボの断面積
 （正方形= bh 、円形= $\pi d^2 / 4$ ）、
 $F_S = (-7.7 + 100\rho)d^{-0.4}$ ：木ダボのせん断強さ、 d ：木ダ
 ボの直径（正方形= b ）、 κ ：せん断補正係数（正方形
 =3/2、円形=4/3）。

$$K_{S2} = \frac{1}{K_{L1} + K_{L2} - \frac{(K_{J1} - K_{J2})^2}{2(K_{K1} + K_{K2})}} \quad (3)$$

$$K_{S1} = \frac{1}{2(K_{L3} + K_{L2}) - \frac{(K_{J3} - K_{J2})^2}{K_{K3} + K_{K2}}}$$

$$K_{L1} = \frac{\lambda_1 \cosh(\lambda_1 L_1) + \cos(\lambda_1 L_1)}{S_1 \sinh(\lambda_1 L_1) + \sin(\lambda_1 L_1)}$$

$$K_{L2} = \frac{\lambda_2 \sinh(\lambda_2 L_2) \cosh(\lambda_2 L_2) - \sin(\lambda_2 L_2) \cos(\lambda_2 L_2)}{S_2 \sinh^2(\lambda_2 L_2) - \sin^2(\lambda_2 L_2)}$$

$$K_{L3} = \frac{\lambda_2 \sinh(\lambda_1 L_1) \cosh(\lambda_1 L_1) - \sin(\lambda_1 L_1) \cos(\lambda_1 L_1)}{S_2 \sinh^2(\lambda_1 L_1) - \sin^2(\lambda_1 L_1)}$$

$$K_{J1} = \frac{\lambda_1^2 \sinh(\lambda_1 L_1) - \sin(\lambda_1 L_1)}{S_1 \sinh(\lambda_1 L_1) + \sin(\lambda_1 L_1)}$$

$$K_{J2} = \frac{\lambda_2^2 \sinh^2(\lambda_2 L_2) + \sin^2(\lambda_2 L_2)}{S_2 \sinh^2(\lambda_2 L_2) - \sin^2(\lambda_2 L_2)}$$

$$K_{J3} = \frac{\lambda_2^2 \sinh^2(\lambda_1 L_1) + \sin^2(\lambda_1 L_1)}{S_2 \sinh^2(\lambda_1 L_1) - \sin^2(\lambda_1 L_1)}$$

$$K_{K1} = \frac{\lambda_1^3 \cosh(\lambda_1 L_1) - \cos(\lambda_1 L_1)}{S_1 \sinh(\lambda_1 L_1) + \sin(\lambda_1 L_1)}$$

$$K_{K2} = \frac{\lambda_2^3 \sinh(\lambda_2 L_2) \cosh(\lambda_2 L_2) + \sin(\lambda_2 L_2) \cos(\lambda_2 L_2)}{S_2 \sinh^2(\lambda_2 L_2) - \sin^2(\lambda_2 L_2)}$$

$$K_{K3} = \frac{\lambda_2^3 \sinh(\lambda_1 L_1) \cosh(\lambda_1 L_1) + \sin(\lambda_1 L_1) \cos(\lambda_1 L_1)}{S_2 \sinh^2(\lambda_1 L_1) - \sin^2(\lambda_1 L_1)}$$

$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{S_1}{4E_0 I}}$$

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{S_2}{4E_0 I}}$$

$$K_{S2} = \frac{2K_1 K_2}{K_1 + K_2} \quad (4)$$

$$K_{S2} = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

$$K_1 = K_2 = \frac{1}{3} (E_0 d^7 k_{cp}^3)^{\frac{1}{4}} \times \left(1 + 0.188 \times \eta \times \sqrt{\frac{k_{cp} d}{E_0}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ただし、 E_0 ：木ダボのヤング係数、 $I = bh^3 / 12$ ：木ダ
 ボの断面2次モーメント、 $S_1 = S_2 = k_{cp} b$ 、 k_{cp} ：木ダボの単
 位長さ当たりのめり込み剛性、 $k_{cp} = \frac{k_E \times \alpha_k k_{cvf}}{k_E + \alpha_k k_{cvf}}$ ：複合

面圧定数、 $k_E = \frac{E_T}{31.6 + 10.9b}$ ：厚板の面圧定数、 α_k ：め

り込み補剛効果係数（正方形=1、円形=1.5）、

$k_{cvf} = \frac{7E_{90}}{3b}$ ：木ダボのめり込み剛性、 E_{90} ：木ダボの横

ヤング係数、 E_T ：厚板のヤング係数、 $\eta = \frac{E_0}{G} = 15$ 、

G ：木ダボのせん断弾性係数。

なお、木ダボの密度、曲げ強さ、ヤング係数および横ヤング係数は前述の実験値を用いた。

表4に2面せん断試験の実験値および計算値を示す。また、図3に計算値より求めた剛性および最大耐力を示す。正方形ダボでの式(3)による剛性の計算値(以下、計算値1と記す。)は、ヒノキ、ラジアタパイン、ゴムノキおよびアピトンでは実験値より大きくなり、強化LVLでは逆に小さくなったが、その他の条件では実験値とほぼ一致した。円形ダボでの剛性の計算値1は、強化LVLでは実験値より小さくなったが、その他の条件では実験値とほぼ一致した。また、式(4)による剛性の計算値(以下、計算値2と記す。)では、計算値1で

大きな値を示した樹種では計算値と実験値がほぼ一致したが、その他の条件では実験値より低い値となった。

図6に2面せん断試験の計算値と実験値の比と横ヤング係数とヤング係数の比との関係を示す。剛性の計算値1の比では、前述のようにヒノキ、ラジアタパイン、ゴムノキおよびアピトンでは比が大きくなるが、これらの横ヤング係数とヤング係数の比は小さい。同様に横ヤング係数とヤング係数の比が小さいスギおよびベイマツでは両者はほぼ一致しているが、横ヤング係数とヤング係数の比が小さい樹種では、計算値が大きく算出される可能性があると言える。以上より、過大な計算値となる場合があるが、剛性の計算式には式(3)が

表4 2面せん断試験の実験値と計算値との比較

正方形ダボ

樹種	2面せん断試験									1面せん断試験	
	剛性					最大耐力				剛性 計算値1	最大耐力 計算値
	実験値 (kN/mm)	計算値1 (kN/mm)	比 ^{a)}	計算値2 (kN/mm)	比 ^{a)}	実験値 (kN)	計算値 (kN)	比 ^{a)}			
スギ	9.0	8.2	0.91	5.4	0.60	12.9	14.2	1.10	3.7	7.0	
ヒノキ	5.3	6.7	1.26	4.4	0.83	17.5	13.5	0.77	3.0	6.8	
ラジアタパイン	5.0	7.2	1.45	4.8	0.95	11.6	12.7	1.09	3.3	6.3	
ベイマツ	8.7	8.7	1.00	5.8	0.67	18.1	18.5	1.02	3.9	9.2	
ミズナラ	10.0	8.9	0.89	5.8	0.58	24.4	19.4	0.79	4.1	9.7	
ケヤキ	10.4	10.1	0.97	6.6	0.63	28.9	22.8	0.79	4.7	11.4	
ホワイトアッシュ	13.3	10.4	0.78	6.8	0.51	29.5	23.9	0.81	4.7	12.0	
ゴムノキ	4.9	8.8	1.80	5.8	1.19	21.8	20.9	0.95	4.0	10.5	
アピトン	5.2	9.9	1.89	6.6	1.26	25.0	25.9	1.03	4.3	12.9	
ハードメイプル	12.3	10.6	0.86	7.0	0.57	28.5	25.5	0.90	4.8	12.8	
ミズメ	10.9	10.3	0.95	6.8	0.62	20.1	23.8	1.18	4.7	11.9	
アカガシ	14.0	11.3	0.81	7.5	0.53	32.1	29.7	0.93	5.1	14.9	
ユーカリ	14.1	12.2	0.87	8.2	0.58	27.6	33.7	1.22	5.4	16.8	
LVL-E70	19.9	11.5	0.58	7.8	0.39	34.7	39.5	1.14	5.0	19.7	
LVL-E90	25.3	13.5	0.53	9.0	0.36	39.6	41.9	1.06	5.9	20.9	
LVL-E110	29.9	15.2	0.51	10.1	0.34	42.2	44.8	1.06	6.8	22.4	
平均値			1.00		0.66			0.99			

円形ダボ

樹種	2面せん断試験									1面せん断試験	
	剛性					最大耐力				剛性 計算値1	最大耐力 計算値
	実験値 (kN/mm)	計算値1 (kN/mm)	比 ^{a)}	計算値2 (kN/mm)	比 ^{a)}	実験値 (kN)	計算値 (kN)	比 ^{a)}			
スギ	6.4	7.5	1.16	5.8	0.91	12.8	13.2	1.03	3.6	6.6	
ヒノキ	4.3	6.1	1.43	4.8	1.12	16.0	12.0	0.75	3.0	6.0	
ベイマツ	5.9	7.8	1.31	6.1	1.03	17.0	16.0	0.94	3.7	8.0	
ケヤキ	8.7	8.3	0.95	6.4	0.74	20.4	19.1	0.93	4.1	9.5	
ミズメ	6.1	8.9	1.45	6.9	1.14	20.6	18.7	0.91	4.3	9.4	
アカガシ	9.3	9.6	1.03	7.5	0.81	25.5	21.1	0.83	4.6	10.6	
ユーカリ	9.4	10.3	1.10	8.2	0.87	22.7	23.5	1.03	4.9	11.7	
LVL-E70	13.3	9.5	0.71	7.5	0.56	24.3	27.5	1.13	4.4	13.8	
LVL-E90	14.0	11.1	0.79	8.7	0.62	26.6	29.1	1.10	5.3	14.6	
LVL-E110	17.0	12.5	0.74	9.8	0.58	30.3	31.2	1.03	6.0	15.6	
平均値			1.07		0.84			0.97			

a) 計算値/実験値、計算値1は式(3)による値、計算値2は式(4)による値。

適していると考えられる。

2面および1面せん断試験の最大耐力については、それぞれ式(1)の第5式および式(2)の第7式が最小値となったが、これは木ダボのせん断破壊が生じるモードであるので除外し、それぞれ第1~4式および第1~6式の最小値を計算値とした。2面および1面せん断試験での最小値はスギ正方形ダボのみ第3式であり、その他の条件ではそれぞれ第4式および第6式が最小値となった。

最大耐力の計算値はすべての条件で実験値とはほぼ一致し、最大耐力の計算式には式(1)および(2)が適していると考えられる。

まとめ

落とし込み板壁等の厚板耐力壁の面内せん断変形を決定する要素の一つである板相互のずれを減少させることを目的として、正方形および円形断面の14種類の木ダボを用いてスギ厚板の2面せん断試験を行った。

2面せん断試験における初期剛性は、木ダボの横ヤング係数および密度の増加とともに増加した。2面せん断試験における降伏耐力および最大耐力は、木ダボの曲げ強さおよび密度の増加とともに増加した。また、木ダボのヤング係数の増加とともにこれらの強度性能は増加したが、それらの相関関係は密度等との相関関係よりも低かった。

スギ強化LVLのダボは初期剛性および最大耐力が最も高かったが、塑性率で示される変形性能は最も低かった。アカガシ、ホワイトアッシュおよびユーカリのダボは初期剛性、最大耐力および塑性率が高くダボに適していた。正方形断面のダボでは、従来から用

いられている円形断面のダボと比較すると、断面積の比と同等の初期剛性および最大耐力の向上が認められた。

ヨーロッパ型降伏理論式および弾性床上の梁の曲げ理論式により厚板の2面せん断試験のすべり剛性および最大耐力を算出したところ、これらの計算値は実験値と良く一致した。

引用文献

- 1) (社)日本建築学会：“木質構造設計基準・同解説”、東京、(社)日本建築学会、2006、p.231-234,399.
- 2) (社)日本建築学会：“木質構造接合部設計マニュアル”、東京、(社)日本建築学会、2009、p.98-101.
- 3) 中田欣作、小松幸平：強化LVL接合板および接合ピンを用いた木質構造フレームの開発（第1報）：弾性床上の梁の曲げ理論を用いて求めた強化LVL接合のせん断性能、木材学会誌 53(6)、313-319 (2007).
- 4) 藤田克則、稲山正弘、安藤直人：接合具に用いられる広葉樹材の横圧縮性能、木材学会誌 58(4)、181-192 (2012)
- 5) 軽部正彦、原田真樹、林 知行：荷重変形曲線のモデル化とその問題点共有のための提案：特徴点抽出の自動化ツールについて、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造Ⅲ、関東、2001、p.215-216.
- 6) 福山弘、安藤直人、稲山正弘、竹村雅行、井上雅文：木栓によるせん断接合の解析式の提案：細長比の大きい円形断面木栓による1面せん断接合、日本建築学会構造系論文集、622、129-136 (2007)

(2014年4月15日受理)

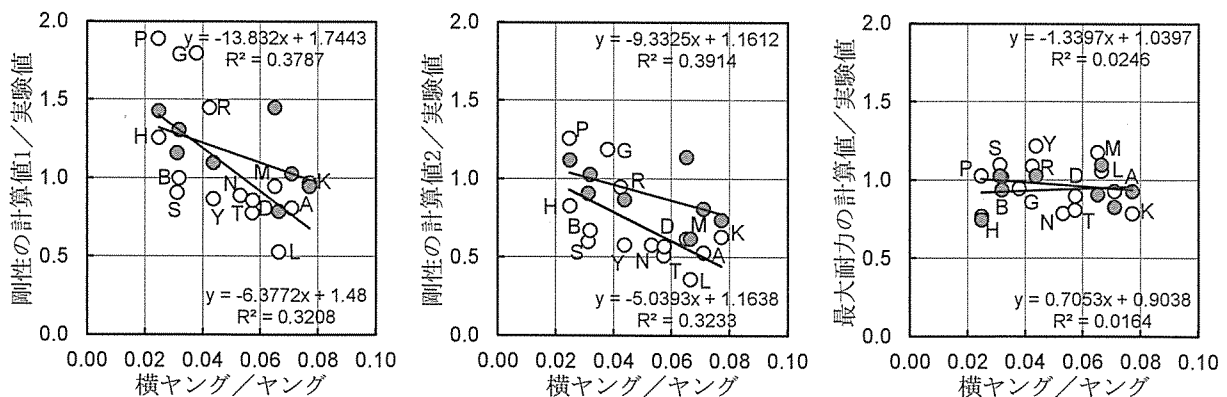


図6 2面せん断試験の計算値と実験値の比

計算値1は式(3)による計算値、計算値2は式(4)による計算値

○：正方形ダボ、●：円形ダボ、略号：表1参照、上段および下段の回帰式はそれぞれ正方形ダボおよび円形ダボ