

令和3年度 木材製品の消費拡大対策のうち
CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材開発・普及事業

単板積層材を用いた横架材及び床材の国産材比率の向上
ー 国産スギ利用ハイブリッド LVL 開発と床版開発 ー

実績報告書

令和5年 3月

一般社団法人全国 LVL 協会

目次

1. はじめに	-- P01
2. 国産スギ利用ハイブリッドLVL 開発	
2. 1 目的	-- P04
2. 2 実施体制	-- P05
2. 3 実施内容	-- P06
2. 3. 1 ハイブリッドLVL の製造試験	-- P07
2. 3. 2 ハイブリッドLVL の強度性能評価	-- P11
2. 3. 3 ハイブリッドLVL の接合性能評価	-- P35
2. 3. 4 広葉樹を用いたLVL の製造と性能評価	-- P41
2. 4 まとめ (ハイブリッドLVL)	-- P49
3. 厚板床版開発	
3. 1 目的	-- P51
3. 2 実施体制	-- P52
3. 3 実施内容	-- P53
3. 3. 1 詳細計算法による接合部性能の検討	-- P54
3. 3. 2 ロケット型接合部一面せん断性能の検討	-- P119
3. 3. 3 実大面内せん断性能の検討	-- P149
3. 4 まとめ (厚板床版開発)	-- P162
4. まとめと今後の課題	-- P163

1. はじめに

・国産スギ利用ハイブリッドLVL開発

LVL協会では、昨年度、単板積層材(以下、LVL)の日本農林規格(以下、JAS)には、他社製品の同一条件で製造されて同一品質を用いた2次接着が可能になる大きな変革ができ、間もなく施行を向かっていた。今までのLVLに関する流通の概念を大きく変えられる出来事であった。例えば、産地に近いところで生産した1次接着LVLを、消費地に近い工場で2次接着できるようなこと。また、JASでは認められていないことだが、集成材のラミナのようにLVLが流通することになれば、カラマツ等の高強度LVLとスギ等の低強度LVLを用いてハイブリッドLVLを製造することで横架材における国産材比率向上に大きく貢献できる。その根拠としては、国内で合板を含むベニヤ産業のインフラの強みが挙げられた。世界的にも稀ではあるが日本のベニヤ産業は針葉樹合板産業の成功も相まって、生産機械産業も健全であり、輸出までも行う国際競争力がある。近年の横架材における資源の問題から、より低強度の横架材が普及されつつある。従って、ハイブリッドで狙う強度も95E程度をターゲットにできる。ハイブリッド集成材と同様、芯に低強度LVLと外層に高強度LVLを接着した。(図1)ハイブリッド構造梁部材の製造技術の確立、曲げヤング係数・強度等の曲げ性能の検証、梁端部金物接合部強度等のデータを収集した。

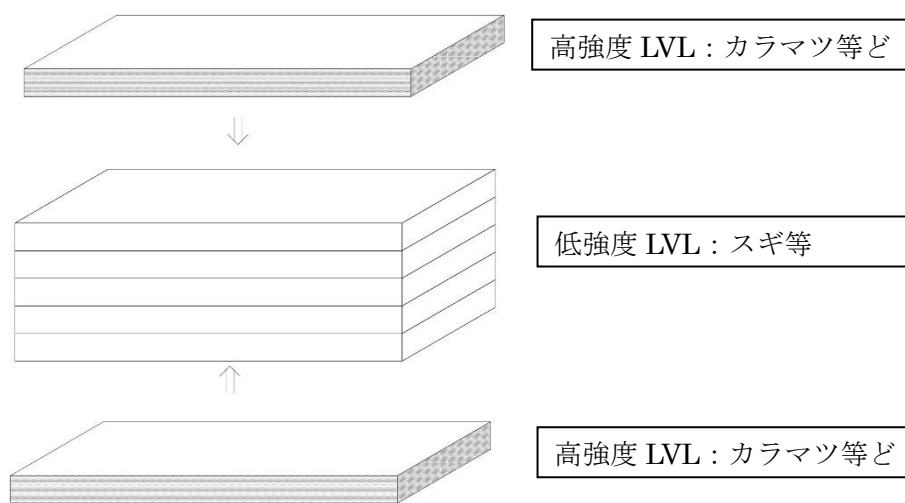


図1 ハイブリッドLVL横架材 (イメージ)

・国産 LVL を使用した厚板床板の開発

中大規模木造建築の水平構面において、厚さ 180mm 以上の CLT または 28mm の構造用合板を使うことが多い。しかし、中大規模建築では必要とされる積載荷重が住宅より大きくなることから構造用合板を使う場合は、小梁を多く入れる必要があり、材積が増えるのが現実である。CLT を使う場合は、材積が多くなることでコストアップや施工性の問題が残ってしまう。この問題を解決できるのが、幅広長尺で厚 40mm から厚 75mm 程度の LVL 床板である。LVL は幅 910～1200mm × 長 4～12M が製造可能であり、両方の間で上記の問題点を解決する。厚物合板で成功と同じ様に、一般化させることを目指しており、中大規模木造建築において、一般材として普及することを目的にする。今まで、全国 LVL 協会の技術部会 構造利用委員会では、材料の要素試験や接合部の要素試験を持続的に進めてきており、単年度で成果を出せる準備をしてきている。図 2 は、実際 LVL 床版を使った物件事例を紹介しており、流山おおぐろの小学校では、厚 75mm × 幅 1200mm × 長さ 12m 弱の LVL 床版を床と屋根で採用された。ノルウェーのミヨサタワーでは、厚さ 31mm の LVL を用いた床パネルが採用された。



図 2 構造用単板積層材を床版として採用した建築例
(左：流山おおぐろの小学校、右：ノルウェーのミヨサタワー)

2. 国産スギ利用ハイブリッドLVL開発

近年、木造建築に使用される部材の国産材比率が大きく向上しているものの、強度を要する横架材においては外国産の原料が約9割を占めている。国産材は外国産材に比べて強度的に不利となることが課題ではあるが、昨今は国際情勢等による高強度樹種の供給停止により国産材への代替が急務となっている。一般的に、構造用LVLの横架材利用においては、熱板プレスで一次接着したLVL原板を二次接着して主に縦使いで使用するが、現行のLVLの日本農林規格（JAS）においては、非等厚の原板や異なる強度等級の原板を二次接着して使用することは認められていない。しかし、構造用集成材のように外層にカラマツによる高強度LVL、内層にスギによる低強度LVLを二次接着して平使いで利用できれば、強度的に有利な断面構成となり、資源面や性能面において効率的な国産材活用が可能になる。また、将来的には、集成材ラミナと同様にLVLのラミナが流通できるようになれば、横架材における国産材比率の向上に大きく貢献できる。

2. 1 目的

本研究では、今後の LVL の JAS 改正に向けて活用できるデータを収集することを目的とし、カラマツ等の高強度 LVL とスギの低強度 LVL を用いたハイブリッド LVL を製造した上で、実大強度性能評価を行った。また、横架材としての性能検証として、代表的な在来仕口である腰掛け蟻掛け接合部のせん断試験を行い、ハイブリッド LVL と従来型 LVL の性能比較を行った。さらに、外層用の高強度 LVL としての利用を想定し、北海道産広葉樹（カンバ類）を用いた LVL ラミナを製造し、強度性能を評価した。

2. 2 実施体制

表 2.2-1 に示す LVL 協会技術部会の JAS 改正委員会において試験計画・実施・検討を行った。

表 2.2-1 JAS 改正委員会構成員

1.	委員長	宇都宮大学	中島史郎	地域デザイン科学部建築都市デザイン学科教授
2.	委員	森林総合研究所	宮本康太	複合化研究室 室長
3.		森林総合研究所	平松 靖	複合材料研究領域 領域長
4.		日本合板検査会	尾方伸次	専務理事
5.		日本合板検査会	板垣 悟	認証部長
6.		日本合板検査会	小関真琴	研究室室長
7.		北海道立総合研究機構 林産試験場	大橋義徳	技術部 生産技術G 研究主幹
8.		北海道立総合研究機構 林産試験場	古田直之	技術部 生産技術G 主査
9.		北海道立総合研究機構 林産試験場	戸田正彦	性能部 研究主幹
会員会社				
10.		株式会社オロチ	清水淳一	品質保証部 部長
11.		株式会社オロチ	滝田哲也	品質管理部 次長
12.		株式会社キーテック	西村圭史	品質管理課 課長
13.		株式会社ウッドワン	大西 英明	品質管理部品質管理課 課長
14.		株式会社ウッドワン	菅田 啓子	技術開発部 課長
15.		株式会社ウッドワン	泉谷龍彦	技術開発部 係長
16.		株式会社ファーストプライウッド	大河龍也	代表取締役
17.		株式会社ファーストプライウッド	齋藤寛之	製造部 生産本部長
18.		株式会社ファーストプライウッド	白山友樹	製造部 工場長
19.		株式会社ファーストプライウッド	渡辺 歩	次長
20.		株式会社ザイエンス	茂山知己	技術開発部 マネジャー
21.		株式会社 オーシカ	田中博史	中央研究所 主任研究員
22.		光洋産業株式会社	神谷正宣	KR化成品部 部長
23.		株式会社 名南製作所	伊藤誠一	開発部
24.		株式会社 名南製作所	小田博茂	営業部
25.		株式会社 太平製作所	齊藤 武	役員
26.		メツァ・ウッド (Metsa Wood)	田邊公彰	ケルトLVL部門 日本連絡役
27.		橋本電機工業株式会社	船瀬正裕	
28.		橋本電機工業株式会社	鈴木克巳	
オブザーバー				
29.		林野庁木材産業課	原田憲佑	住宅資材班 住宅資材企画係長
30.		木構造振興株式会社	平原章雄	常務取締役
31.		農林水産消費安全技術センター	山内 一浩	規格検査部 商品調査課 専門調査官
事務局				
32.		全国LVL協会	平沼孝太	事務局長
33.			李 元羽	技術部長
34.			成田敏基	技術課長
35.			崔 華暉	
36.			井上天仁	

2. 3 実施内容

2. 3. 1 ハイブリッド LVL の製造試験

2. 3. 2 ハイブリッド LVL の強度性能評価

2. 3. 3 ハイブリッド LVL の接合性能評価

2. 3. 4 広葉樹を用いた LVL の製造と性能評価

2. 3. 1 ハイブリッドLVLの製造試験

外層にカラマツLVL(120E以上)、内層にスギLVL(90E以上)を積層したハイブリッド型LVLを試作した。積層数と梁せい(h)は5プライ=150mm、10プライ=300mm、15プライ=450mmの3種類とした。梁幅は105mmの1種類とした。いずれのタイプも積層数に占めるカラマツLVLの割合は40%とした。一次接着の状態(ラミナと称する、厚さ30mm)で打撃ヤング係数を測定し、上下のラミナのヤング係数が対象となるように組み合わせた。一次接着はフェノール樹脂、二次接着はレゾルシノール樹脂を用いて積層した。作業の様子を写真2.3-1~2.3-4にラミナのヤング係数区分と組み合わせパターンを図2.3-1~2.3-6に示す。



写真 2.3-1 一次ラミナのヤング係数測定



写真 2.3-2 二次接着 接着剤塗布

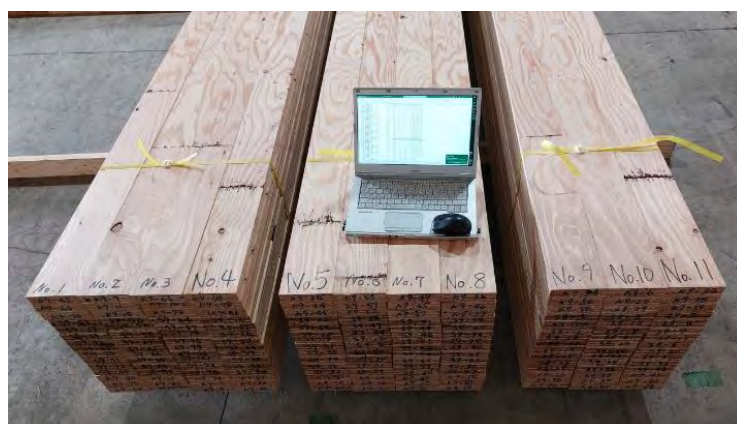


写真 2.3-3 二次プレス解圧後



写真 2.3-4 幅カット

ヤング係数測定結果

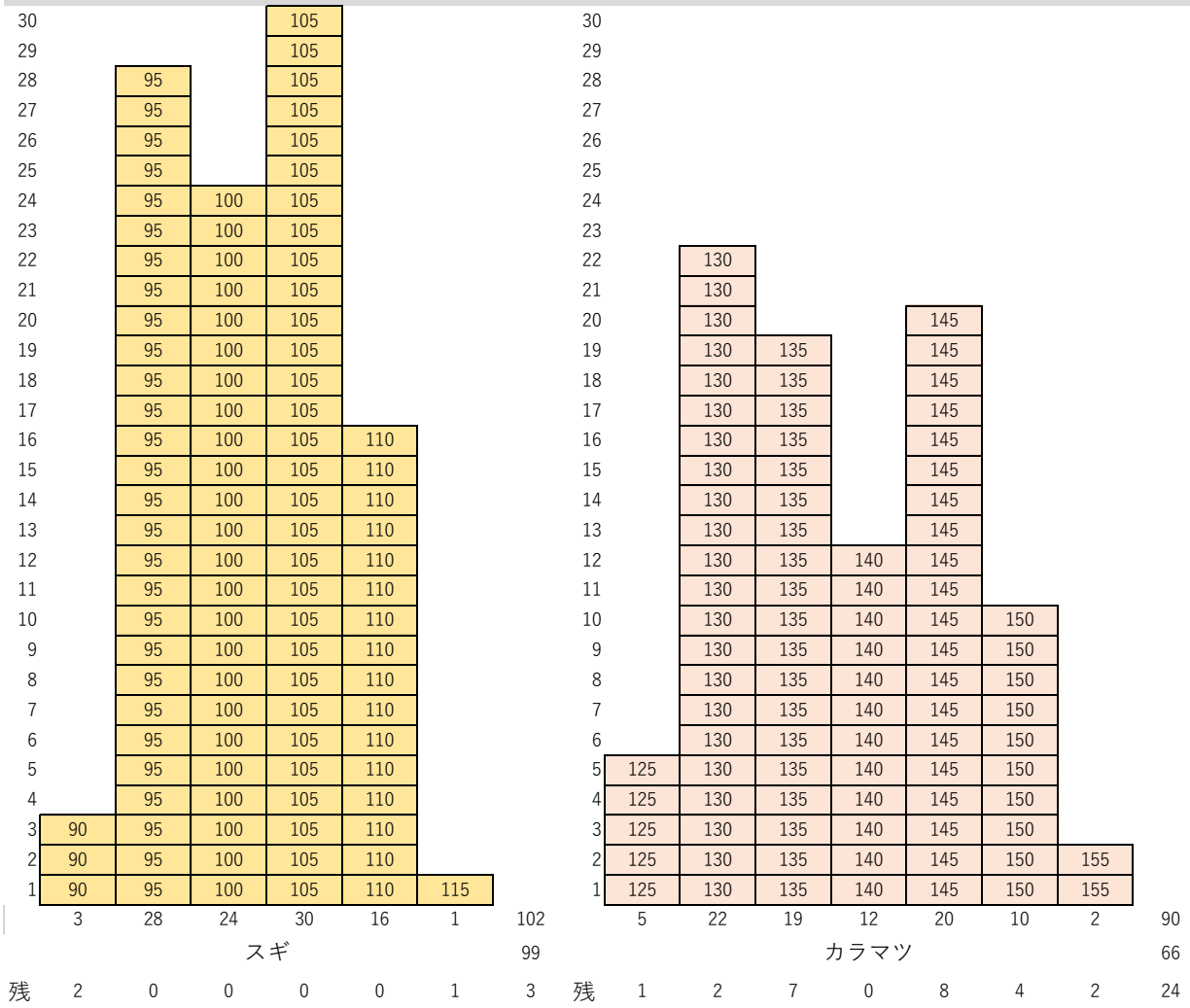


図 2.3-1 梁せい 450mm 材ヤング係数度数分布

1	130	130	130	135	135	140	145	150	130	140	145
2	125	130	130	135	135	140	145	150	130	140	145
3	125	130	130	135	135	140	145	150	130	140	145
4	95	95	105	95	105	100	105	110	100	105	110
5	95	95	105	95	105	100	105	110	100	105	110
6	95	95	100	95	105	100	105	110	100	105	110
7	95	95	100	95	100	100	105	110	100	105	110
8	90	95	100	95	100	95	105	105	90	105	105
9	95	95	105	95	105	100	105	110	100	105	110
10	95	95	105	95	105	100	105	110	100	105	110
11	95	95	100	95	105	100	105	110	100	105	110
12	95	95	100	95	100	100	105	110	100	105	110
13	130	130	130	135	135	140	145	150	130	140	145
14	125	130	130	135	135	140	145	150	130	140	145
15	125	130	130	135	135	140	145	150	130	140	145
	No-01	No-02	No-03	No-04	No-05	No-06	No-07	No-08	No-09	No-10	No-11
	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	予備	予備	予備

図 2.3-2 梁せい 450mm 材 組み合わせ

ヤング係数測定結果

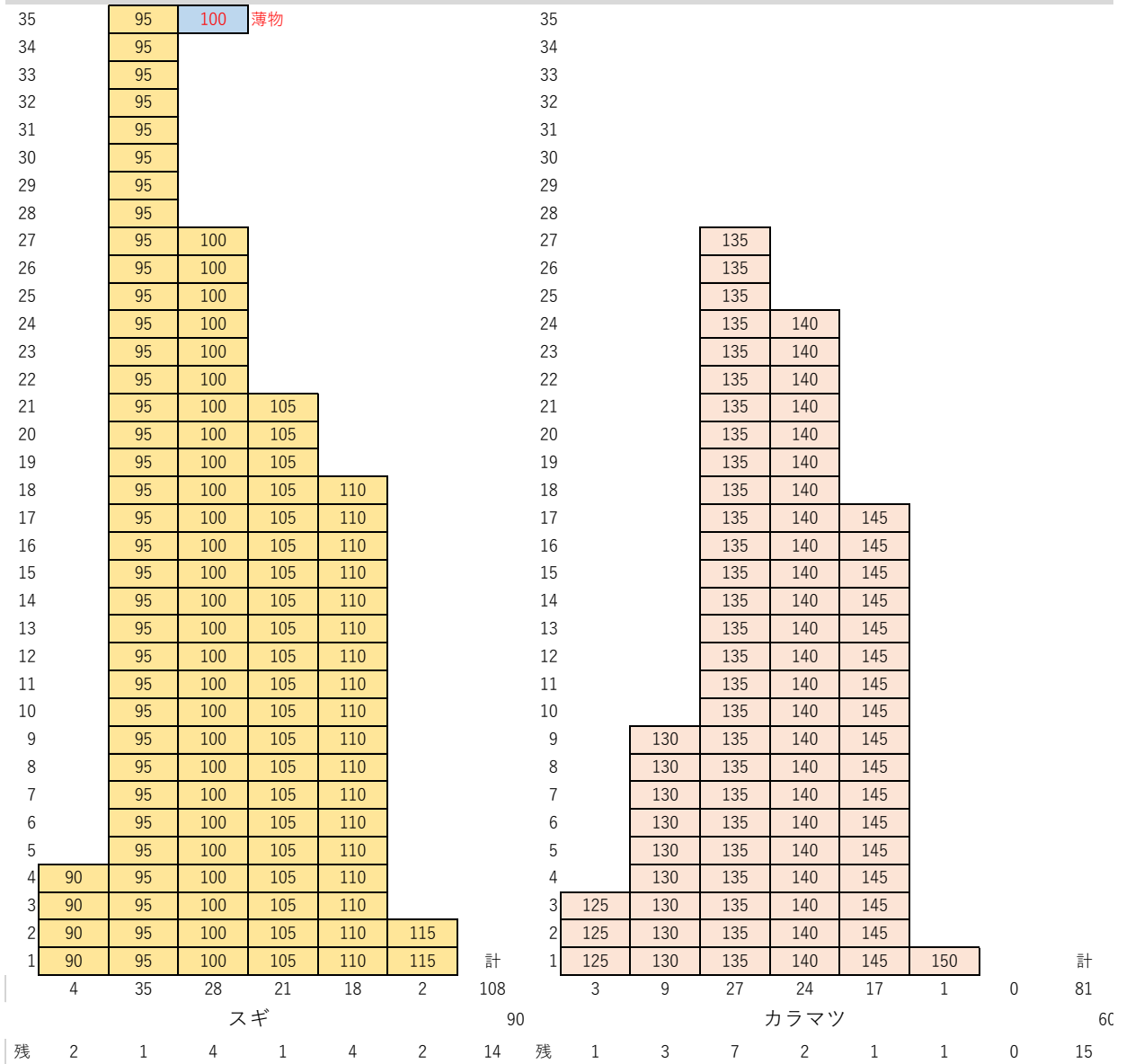


図 2.3-3 梁せい 300mm 材ヤング係数度数分布

1	130	135	135	135	140	140	140	145	135	140	140	130	135	145	145	145
2	130	135	135	135	140	140	140	145	135	140	140	125	135	145	145	145
3	95	95	100	105	95	100	105	105	95	100	110	95	110	100	110	140
4	90	95	100	105	95	100	105	105	95	100	110	95	110	100	95	105
5	95	95	100	105	95	100	105	105	95	100	110	95	110	100	90	95
6	95	95	100	105	95	100	105	105	95	100	110	95	110	100	90	95
7	95	95	100	105	95	100	105	105	95	100	110	95	110	100	95	105
8	95	95	100	105	95	100	105	105	95	100	110	95	110	100	110	140
9	130	135	135	135	140	140	140	145	135	140	140	125	135	145	145	145
10	130	135	135	135	140	140	140	145	135	140	140	130	135	145	145	145
	No-01	No-02	No-03	No-04	No-05	No-06	No-07	No-08	No-09	No-10	No-11	No-12	No-13	No-14	No-15	No-16
	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	接合部	接合部	接合部	予備	弱軸曲げ	弱軸曲げ	予備	曲げ

図 2.3-4 梁せい 300mm 材 組み合わせ

ヤング係数測定結果

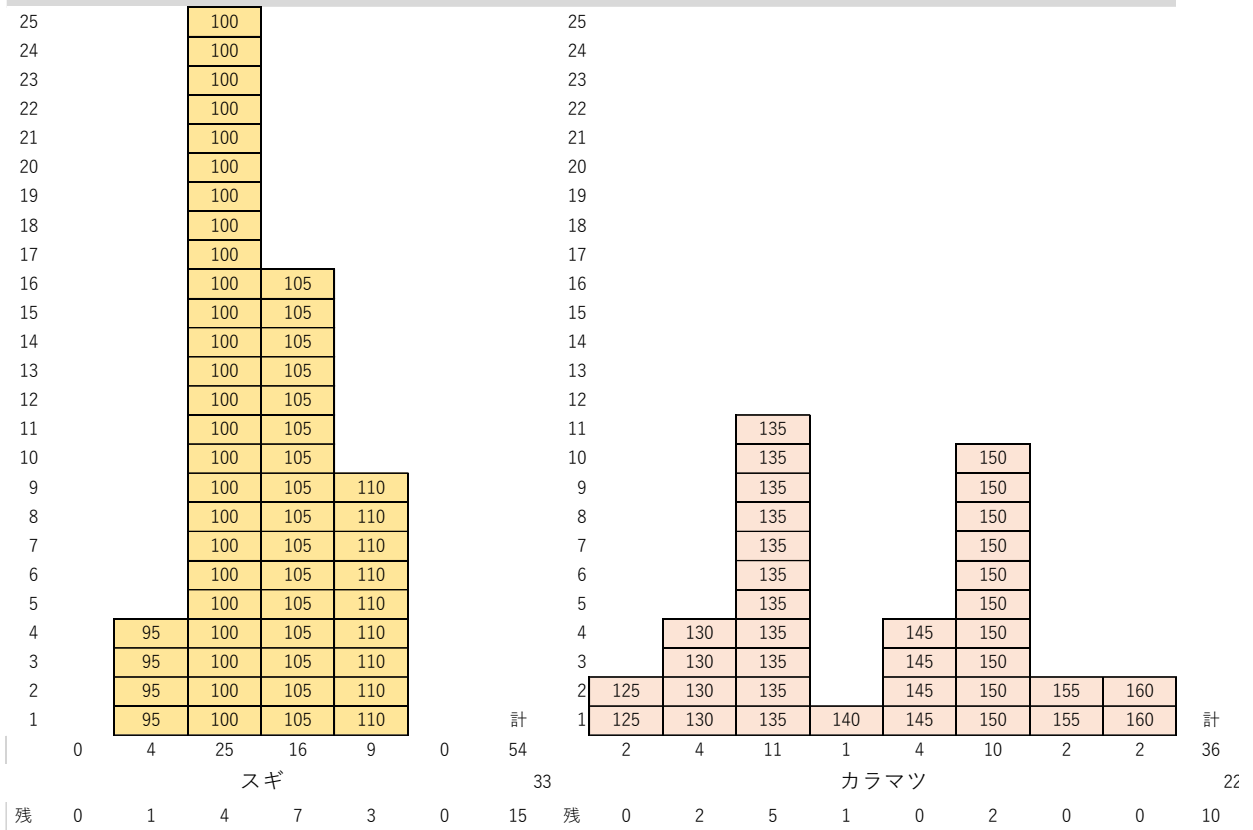


図 2.3-5 梁せい 150mm 材ヤング係数度数分布

1	125	130	135	135	145	150	155	160	135	145	150	150
2	95	100	100	105	100	100	105	105	100	100	100	110
3	95	100	100	105	100	100	105	105	100	100	100	110
4	95	100	100	105	100	100	105	105	100	100	100	110
5	125	130	135	135	145	150	155	160	135	145	150	150
	No-01	No-02	No-03	No-04	No-05	No-06	No-07	No-08	No-09	No-10	No-11	No-12
	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ	せん断	せん断	せん断	予備

図 2.3-6 梁せい 150mm 材 組み合わせ

2. 3. 2 ハイブリッド LVL の強度性能評価

〈1〉実大曲げ性能の検証

1) 試験体および試験方法

試験体の仕様を表 2.3-1 に示す。試験は木材実大強度試験（東京衡機製造所製 最大曲げ容量 200 kN）を用いて行った（写真 2.3-5）。曲げ試験の実施前に、縦振動法、たわみ振動法、T.G.H. 法によるヤング係数の測定を行った。T.G.H. 法による測定ではせん断弾性係数の算出も行った。曲げ試験の荷重条件は支点間スパンを材せいの 18 倍、荷重点間距離を材せいの 4 倍とした 4 点荷重方式とした。各試験体仕様における荷重条件を表 3-1 に示す。材長中央の中立軸で支点間スパンの全たわみ（ \cdot_t ）および、10 層平使いでは荷重点間中央区間 1000 mm、15 層平使いでは荷重点間中央区間 1600 mm で純曲げたわみ（ \cdot_b ）を測定した。以下の式により見かけの曲げヤング係数（ E_m ）、真の曲げヤング係数（ E_b ）、曲げ強度（ E_b ）を算出した。

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)\Delta P}{4bh^3\Delta\delta_t} \quad (1)$$

$$E_b = \frac{3al^2\Delta P}{4bh^3\Delta\delta_b} \quad (2)$$

$$\sigma_b = \frac{3aP_{\max}}{bh^2} \quad (3)$$

ここで、 a ：支点から荷重点までの距離、 L ：支点間スパン、 $\cdot P$ ：比例域における上限荷重と下限荷重の差、 b ：試験体幅、 h ：試験体材せい、 $\cdot \cdot_t$ ： $\cdot P$ に対応する支点間たわみ、

l ：荷重点間中央変位測定区間、 $\cdot \cdot_b$ ： $\cdot P$ に対応する荷重点間たわみ、 P_{\max} ：最大荷重

試験終了後、10 層縦使い曲げ試験に用いた試験体については、両外層 2 層分カラマツ、内層 3 層分スギ 2 片に分割して全乾法により含水率を測定した（表 2.3-2）。

2) 試験結果

試験体仕様ごとに試験結果を表 2.3-3～2.3-6 に示す。また、荷重変位関係（15 層平使い試験体は荷重-クロスヘッド移動量関係）を図 2.3-7 に示す。破壊形態はすべて曲げ破壊であり、主には荷重点間引張側で破壊の起点が生じていた（写真 2.3-6）。非破壊ヤング係数と曲げ試験により測定された曲げヤング係数の関係（図 2.3-8）では、線形関係が示された。みかけの曲げヤング係数と曲げ強度の関係（図 2.3-9）では平使い 3 種類の間にも明瞭な線形関係は見られなかったが、梁せいごとの曲げ強度の関係（図 2.3-10）では、曲げヤング係数と曲げ強度が梁せいに応じて低下する、いわゆる寸法効果が示された。曲げ強度の平均値を比較すると、5 層：10 層：15 層＝1.00：0.85：0.80 となり、現行の LVL の寸法調整係数（1.00：0.91：0.89）よりも低下率が大きくなった。

表 2.3-1 試験体仕様および荷重条件

仕様	試験体数	寸法			荷重条件		
		幅	材せい	長さ	支点間 距離	荷重点間 距離	クロスヘッド 移動速度
		mm	mm	mm	mm	mm	mm/分
5層平使い	8	105	150	4500	2700	600	8
10層平使い	9	105	300	6700	5400	1200	16
15層平使い	8	105	450	9000	8100	1800	24
10層縦使い	6	300	105	2090	1890	420	6



5層平使い



10層平使い



15層平使い



10層縦使い

写真 2.3-5 試験の様子

表 2.3-2 10層縦使い試験体の含水率 (%)

No.	外層カラマツ 1	内層スギ 1	内層スギ 2	外層カラマツ 2
13.1	9.3	12.0	10.8	8.7
13.2	8.9	12.6	14.1	9.0
13.3	8.8	12.0	12.3	9.0
14.1	8.8	11.9	12.2	8.6
14.2	8.7	12.6	12.2	8.9
14.3	8.7	12.7	12.2	9.0

表 2.3-3 曲げ試験結果 (5層平使い)

No.	密度	E_{fr}	E_{afb}	E_{ofb}	G	E_m	σ_b
	kg/m ³	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²
150.1	556	11.23	11.97	12.89	0.733	11.33	40.0
150.2	571	11.86	12.24	12.66	0.840	11.88	49.5
150.3	562	12.02	12.79	12.73	0.821	12.48	45.5
150.4	572	12.37	13.04	14.14	0.768	12.44	44.6
150.5	573	12.45	13.00	13.62	0.798	12.83	52.10
150.6	570	12.63	13.70	14.50	0.801	13.43	53.67
150.7	583	13.06	14.73	14.82	0.799	13.84	52.37
150.8	580	13.15	14.75	15.05	0.747	14.20	56.03
平均値	571	12.35	13.28	13.80	0.788	12.80	49.2
標準偏差	9	0.64	1.04	0.96	0.037	0.98	5.4
変動係数	1.5%	5.2%	7.9%	7.0%	4.6%	7.6%	11.0%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法ヤング係数、 E_{ofb} : T. G. H. 法によるヤング係数、 G : T. G. H. 法によるせん断弾性係数、 E_m : みかけの曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度

表 2.3-4 曲げ試験結果 (10 層平使い)

No.	密度 kg/m ³	E_{fr} kN/mm ²	E_{afb} kN/mm ²	E_{ofb} kN/mm ²	G kN/mm ²	E_m kN/mm ²	E_b kN/mm ²	σ_b N/mm ²
300.1	567	11.62	12.42	13.66	0.860	11.65	12.24	35.7
300.2	567	11.54	12.39	13.67	0.842	11.61	12.25	48.1
300.3	566	11.95	12.39	13.82	0.844	12.04	12.79	31.7
300.4	566	12.22	12.32	13.52	0.853	11.94	12.64	38.6
300.5	571	11.98	12.54	14.02	0.856	12.24	13.04	46.1
300.6	571	12.33	13.27	14.46	0.744	12.26	13.16	43.8
300.7	567	12.40	13.14	14.18	0.813	12.20	13.37	47.4
300.8	566	12.45	13.13	14.39	0.836	12.61	13.82	43.2
300.16	595	13.16	13.82	15.34	0.853	13.24	14.63	44.0
平均値	571	12.18	12.82	14.12	0.833	12.20	13.10	42.1
標準偏差	9	0.49	0.53	0.57	0.036	0.50	0.77	5.6
変動係数	1.6%	4.0%	4.2%	4.0%	4.4%	4.1%	5.9%	13.3%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法ヤング係数、 E_{ofb} : T.G.H.法によるヤング係数、 G : T.G.H.法によるせん断弾性係数、 E_m : みかけの曲げヤング係数、 E_b : 真の曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度

表 2.3-5 曲げ試験結果 (15 層平使い)

No.	密度 kg/m ³	E_{fr} kN/mm ²	E_{afb} kN/mm ²	E_{ofb} kN/mm ²	G kN/mm ²	E_m kN/mm ²	E_b kN/mm ²	σ_b N/mm ²
450.1	557	11.38	12.19	13.23	0.778	11.47	11.55	37.8
450.2	558	11.58	12.22	13.83	0.777	11.78	11.90	37.2
450.3	559	11.88	12.24	13.68	0.786	11.56	12.12	37.7
450.4	559	11.70	12.24	13.65	0.804	11.76	12.75	37.6
450.5	567	12.25	12.53	14.01	0.797	12.19	12.48	34.7
450.6	557	12.03	12.20	13.84	0.811	12.14	13.08	41.9
450.7	562	12.54	13.29	14.66	0.768	12.52	12.97	37.2
450.8	564	12.96	13.32	14.84	0.810	12.75	13.45	49.2
平均値	560	12.04	12.53	13.97	0.791	12.02	12.54	39.2
標準偏差	4	0.52	0.49	0.53	0.016	0.46	0.65	4.5
変動係数	0.7%	4.4%	3.9%	3.8%	2.1%	3.8%	5.2%	11.5%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法ヤング係数、 E_{ofb} : T. G. H. 法によるヤング係数、 G : T. G. H. 法によるせん断弾性係数、 E_m : みかけの曲げヤング係数、 E_b : 真の曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度

表 2.3-6 曲げ試験結果 (10 層縦使い)

No.	密度 kg/m ³	E_{fr} kN/mm ²	E_{afb} kN/mm ²	E_{ofb} kN/mm ²	G kN/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_b N/mm ²
13.1	563	12.06	11.38	12.38	0.963	11.17	50.0
13.2	557	11.73	10.87	11.16	1.027	10.80	52.0
13.3	558	11.80	11.09	12.06	0.949	10.75	44.4
14.1	565	12.47	11.62	12.17	1.003	11.32	49.5
14.2	576	12.95	12.04	12.58	1.027	11.61	53.7
14.3	570	12.70	11.73	13.06	0.998	11.16	49.3
平均値	565	12.28	11.46	12.23	0.994	11.14	49.8
標準偏差	7	0.50	0.43	0.64	0.033	0.32	3.1
変動係数	1.3%	4.1%	3.8%	5.2%	3.3%	2.9%	6.3%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法ヤング係数、 E_{ofb} : T. G. H. 法によるヤング係数、 G : T. G. H. 法によるせん断弾性係数、 E_m : みかけの曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度

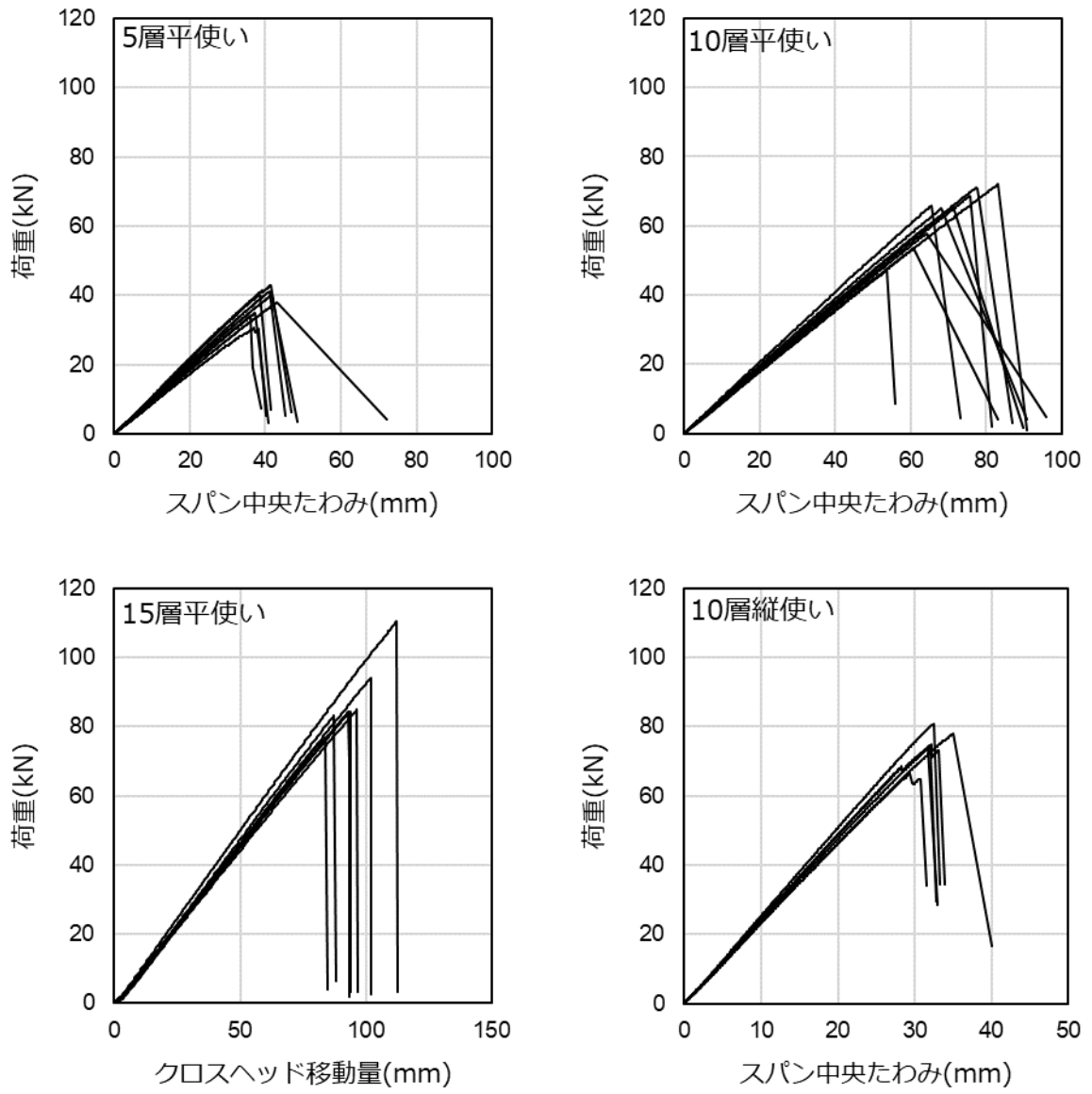
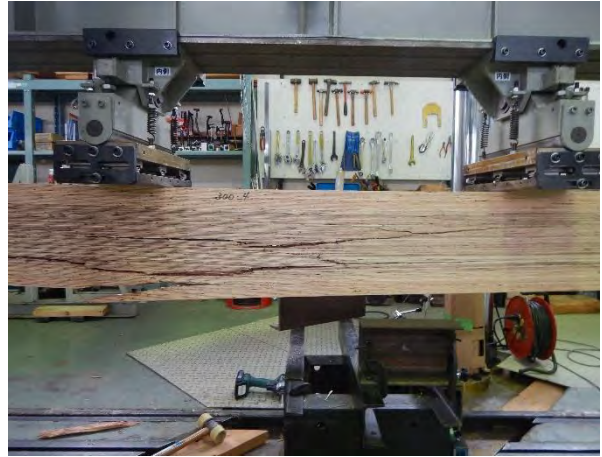


図 2.3-7 荷重変位関係



5層平使い



10層平使い

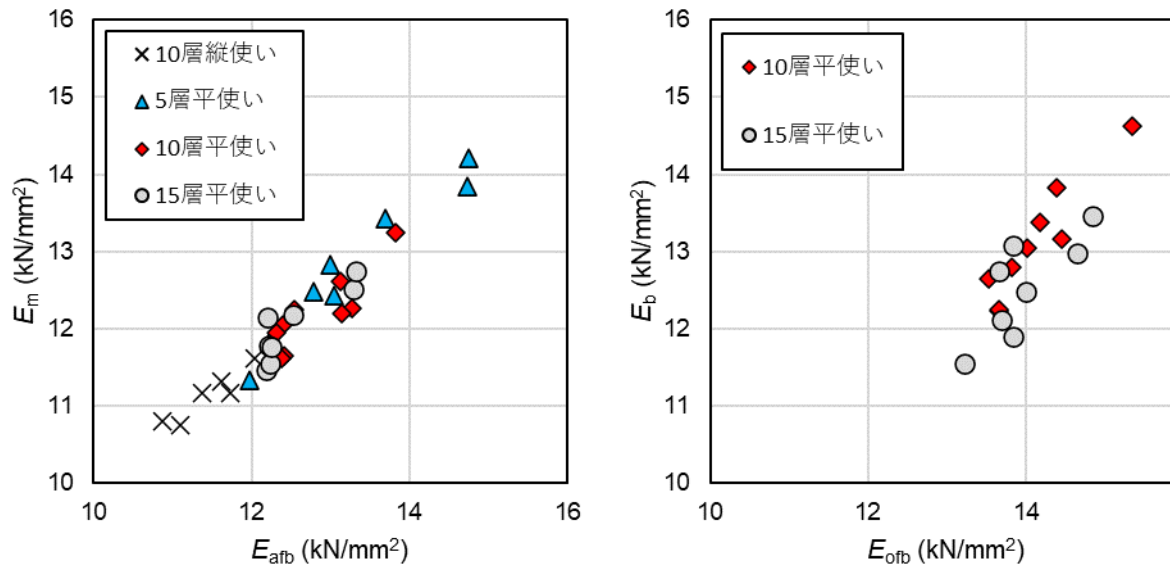


15層平使い



10層縦使い

写真 2.3-6 代表的な破壊形態



E_{afb} : たわみ振動法ヤング係数、 E_m : みかけの曲げヤング係数、 E_{ofb} : T.G.H. 法によるヤング係数、 E_b : 真の曲げヤング係数

図 2.3-8 非破壊ヤング係数と曲げ試験による弾性係数の関係

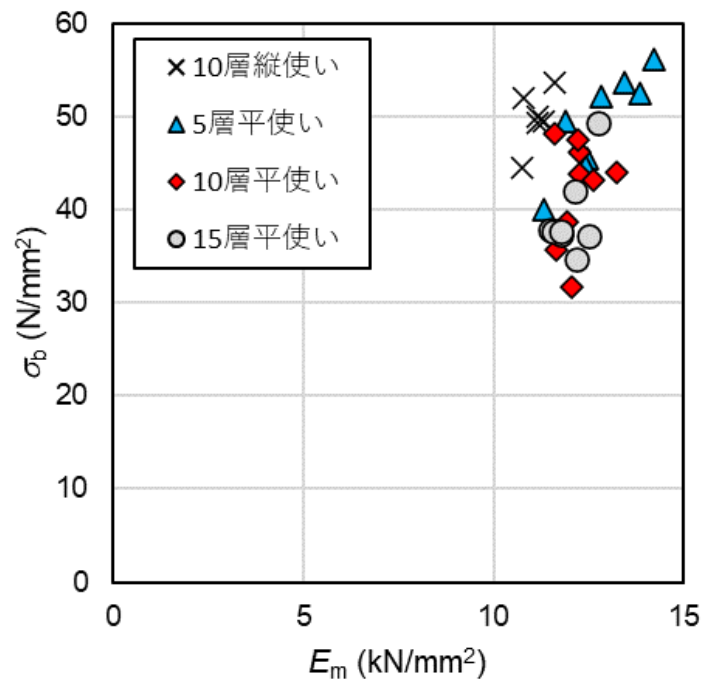


図 2.3-9 みかけの曲げヤング係数と曲げ強度の関係

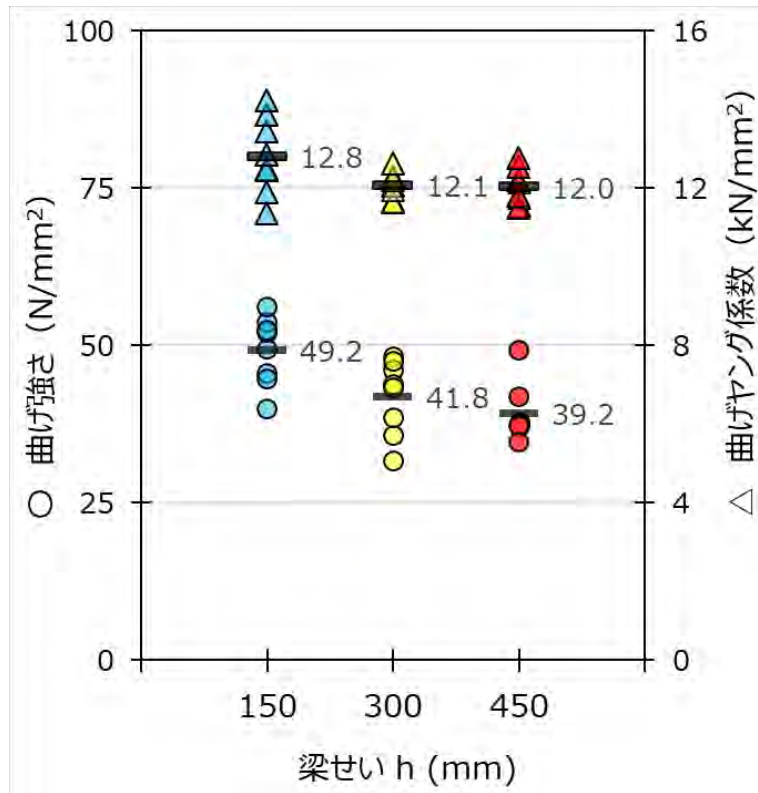


図 2.3-10 梁せいごとの曲げ強度と平均値

〈2〉実大曲げ性能の推定

1) 推定方法

等価断面法を用いて実大梁の曲げ性能の推定を行った。まず、実大梁の曲げヤング係数 E_b の推定式については以下の式で表される。

$$E_{b_cal} = \frac{\sum(E_i I_i)}{I_0} \quad (4)$$

E_i : i 番目層のラミナのヤング係数

I_i : i 番目層のラミナの中立軸に対する断面二次モーメント

I_0 : 実断面の断面二次モーメント

次に、実大梁の曲げ強さ σ_b の推定式については、曲げ破壊時に引張側の最外層ラミナのほとんどが引張応力のみを受けているため、最外層ラミナの引張強度を用いて下式で表される。

$$\sigma_{b_cal} = M_{cal} / Z_0 \quad (5)$$

$$M_{cal} = \sigma_{t_lmn} \times \frac{\sum(E_i I_i)}{E_t \times (h - \lambda)} \quad (6)$$

M_{cal} : 最大曲げモーメントの計算値

Z_0 : 実断面の断面係数

σ_{t_lmn} : 最外層ラミナの引張強度

E_t : 最外層ラミナのヤング係数

E_i : i 番目層のラミナのヤング係数

I_i : i 番目層のラミナの中立軸に対する断面二次モーメント

h : 梁せい

λ : 上面から中立軸までの距離

なお、(6)式の最外層ラミナの引張強度については、今回は引張実験ができなかったため、ラミナ曲げ実験の強度値を用いることとした。その際、下式のように曲げ強度値に引張と曲げの強度比 (K_{bt}) を乗じて、引張強度に換算した。今回は過去の知見から、 K_{bt} は 0.70 とした。

$$\sigma_{t_lmn} = \sigma_{b_lmn} \times K_{bt} \quad (7)$$

σ_{t_lmn} : 最外層ラミナの引張強度

σ_{b_lmn} : 最外層ラミナの曲げ強度

K_{bt} : 引張と曲げの強度比

2) LVL ラミナ曲げ試験 (フラットワイズ)

ラミナの曲げ強度値を求めるために、フラットワイズ曲げ試験を行った。試験体はカラマツ一次接着 LVL であり、寸法は幅 105 mm、厚さ 30 mm である。試験体数は縦振動ヤング係数により区分した 7 種類 (E125・E130・E135・E140・E145・E150・E155) から母材を各 1 本 (長さは 6.8m～9.1m) を選び、それぞれから長さ 690mm の曲げ試験体を 7 体または 10 体採取した。

曲げ試験はキーテック社所有の強度試験機を用いて行った。荷重条件は、支点間スパンを材せいの 21 倍 (630 mm) とした 3 等分 4 点荷重方式とした。材長中央部にて変位計を用いて全たわみ (δ_t) を測定した。以下の式により見かけの曲げヤング係数 (E_m) および曲げ強度 (σ_b) を算出した。

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)\Delta P}{4bh^3\Delta\delta_t} \quad (8)$$

$$\sigma_b = \frac{3aP_{\max}}{bh^2} \quad (9)$$

ここで、 a : 支点から荷重点までの距離 (210 mm)、 L : 支点間スパン (630 mm)、 ΔP : 比例域における上限荷重と下限荷重の差、 b : 試験体幅、 h : 試験体材せい、 $\Delta\delta_t$: ΔP に対応する支点間たわみ、 P_{\max} : 最大荷重

なお、試験終了後、全乾法により含水率を測定した。

LVL ラミナの曲げ試験結果を表 2.3-7 および図 2.3-11 に示す。図 2.3-11 で得られた見かけの曲げヤング係数 (E_m) と曲げ強度 (σ_b) の回帰式 ($\sigma_b = 5.29 \times E_m - 15.4$) および縦振動ヤング係数と静的曲げヤング係数の関係 (ここでは縦振動ヤング係数の 0.93 倍が静的曲げヤング係数と設定) を用いて、長尺状態のラミナで測定した縦振動ヤング係数から曲げ強度の設定値を求めた結果を表 2.3-8 に示す。ここでの曲げ強度値を (7) 式での最外層ラミナの曲げ強度として推定に用いることとした。

表 2.3-7 LVL ラミナ曲げ試験結果 (フラットワイズ)

No.	E 区分	E_{fr} (kN/mm ²)	n (本)	E_m (kN/mm ²)				σ_b (N/mm ²)			
				av	max	min	sd	av	max	min	sd
K9-31	125	12.9	10	13.6	15.2	12.1	0.9	57.1	70.9	42.2	9.1
K6-21	135	13.9	7	15.0	16.6	13.3	1.1	61.7	78.5	50.9	8.7
K9-25	135	13.7	10	14.7	16.7	12.9	1.2	64.0	75.3	49.9	9.9
K6-9	140	14.5	7	14.7	16.3	13.7	0.8	64.4	70.1	57.9	5.0
K9-26	145	14.8	10	14.9	17.2	12.1	1.3	62.8	84.7	46.7	13.6
K9-2	150	15.1	7	14.6	16.2	12.1	1.3	63.5	74.5	55.7	7.4
K9-22	155	15.6	7	15.2	16.5	13.7	1.0	64.1	81.7	55.4	9.0

E 区分: E_{fr} によるヤング係数の区分、 E_{fr} : 長尺状態での縦振動ヤング係数、 n : 長尺ラミナから採材した曲げ試験体数、 E_m : みかけの曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度、av: 平均値、max: 最大値、min: 最小値、sd: 標準偏差

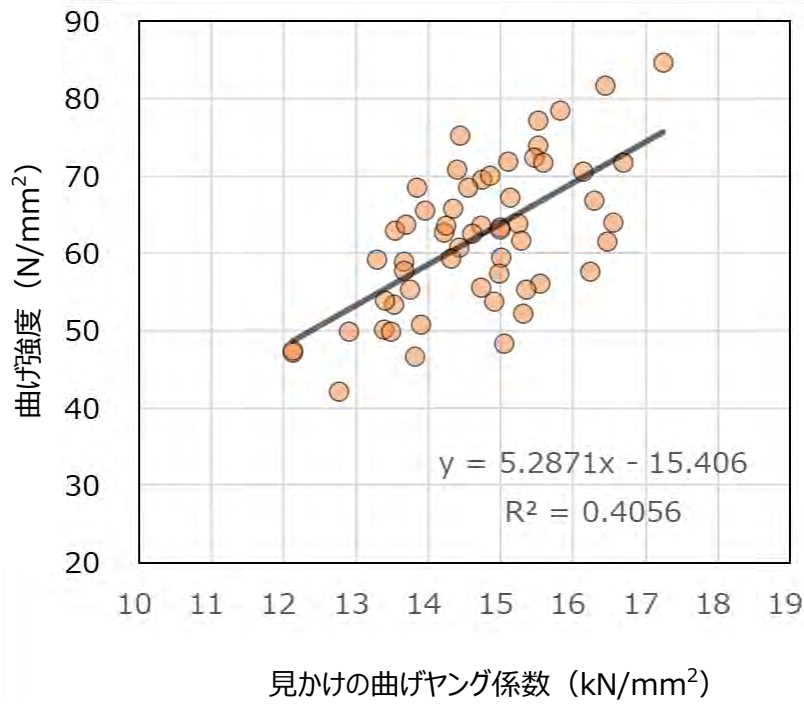


図 2.3-11 カラマツ LVL ラミナの曲げ試験で得られた見かけの曲げヤング係数と曲げ強さ

表 2.3-8 カラマツ LVL ラミナのヤング係数区分と曲げ強度の設定値

E 区分	125	130	135	140	145	150	155	160
E_{fr} (kN/mm ²)	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0
E_{m-con} (kN/mm ²)	11.6	12.1	12.6	13.0	13.5	14.0	14.4	14.9
σ_{b-set} (N/mm ²)	46.1	48.5	51.0	53.4	55.9	58.3	60.8	63.3

E 区分： E_{fr} によるヤング係数区分、 E_{fr} ：長尺状態での縦振動ヤング係数、 E_{m-con} ：縦振動ヤング係数が静的曲げ試験より高めの値となることを考慮して低減した見かけの曲げヤング係数への換算値 ($E_{m-con} = E_{fr} \times 0.93$)、 σ_{b-set} ：曲げヤング係数と曲げ強度の関係式 ($\sigma_{b-set} = 5.29 \times E_m - 15.4$) から求めた曲げ強度の設定値

3) LVL 梁の実測値と推定値の比較

ラミナの曲げ強度試験結果をもとに、等価断面法を用いて実大梁の曲げ性能の推定を行った。推定値と実測値の比較を行い、曲げヤング係数の結果を図 2.3-12 に、曲げ強度の結果を図 2.3-13 に示す。図 2.3-12 においては、前述の(4)式を用いて計算した実大梁の曲げヤング係数の推定値が実測値に対して概ね安全側かつ精度良く推定できることが明らかとなった。また、図 2.3-13 においては、最外層ラミナの打撃ヤング係数から曲げ強さ、さらには引張強さに換算（引張/曲げ強度比=0.70）して前述の(5)～(7)式を用いて計算した曲げ強度の推定値を概ね実測値が上回り、安全側に推定できることが明らかとなった。ただし、梁せいが大きくなるにつれて推定値より実測値が大きくなる傾向が示されており、図 2.3-10 に示されたような寸法効果を考慮して、ラミナの強度比を梁せいに応じて変えるべきと考えられた。

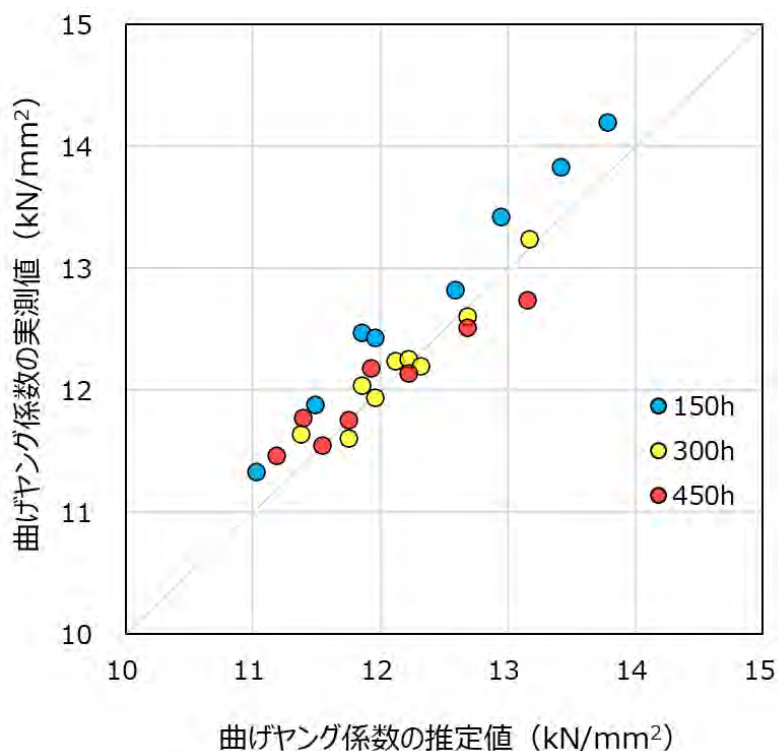


図 2.3-12 ハイブリッド LVL 梁の曲げヤング係数の推定値と実測値

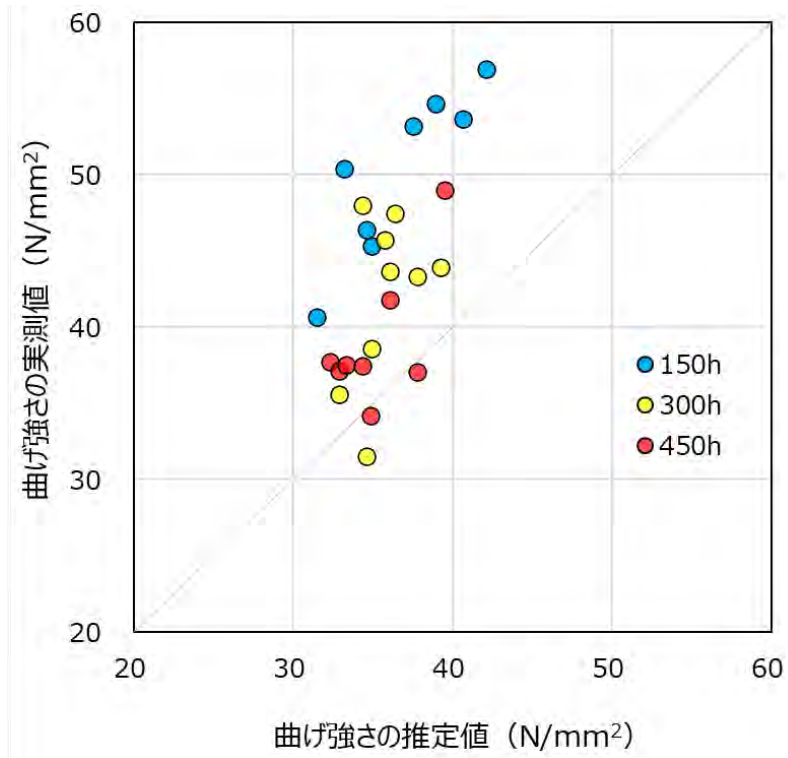


図 2.3-13 ハイブリッド LVL 梁の曲げ強度の推定値と実測値

〈3〉せん断性能の検証

ハイブリッド LVL のせん断性能は、内層のスギ LVL によって決まると考えられるが、実大梁のせん断強度をラミナ試験やブロックせん断試験から把握できるか検討を行った。

①実大せん断試験

1) 試験体および試験方法

実大せん断試験体は、5層平使いのハイブリッド LVL (材せい 150mm、長さ 4500 mm) 3本から各3体採取した。ハイブリッド LVL は図 2.3-2 に示す No-09~11 の3本とし、外層のカラマツ LVL の E 区分は 135・145・150、内層のスギ LVL は 100 とした。

試験は木材実大強度試験 (東京衡機製造所製 最大曲げ容量 200 kN) を用いて行った (写真 2.3-7)。荷重条件は支点間スパン 600 mm の中央集中3点曲げとした。加圧板幅は 150 mm、クロスヘッド移動速度は 2 mm/分とした、材長中央の中立軸で、支点間に渡したヨークでたわみ (・) を測定した。以下の式によりせん断強度 (・_s) を算出した。

$$\sigma_s = \frac{3P_{\max}}{4bh} \quad (10)$$

ここで、 P_{\max} : 最大荷重、 b : 試験体幅、 h : 試験体材せい

2) 試験結果

代表的な破壊形態を写真 2.3-8 に、クロスヘッド移動量と荷重の関係を図 2.3-14 に、試験結果を表 2.3-9 に示す。スギラミナの接着層付近でのせん断破壊が進展し、最終的にせん断破壊に至る試験体が多かった。一部の試験体は最終的に引張側で曲げ破壊が生じたが、そのような試験体でも最大荷重はせん断破壊時に示した。せん断強度の平均値は 5.3N/mm² となった。



写真 2.3-7 ハイブリッド LVL 梁の実大せん断試験の様子



写真 2.3-8 代表的な破壊形態

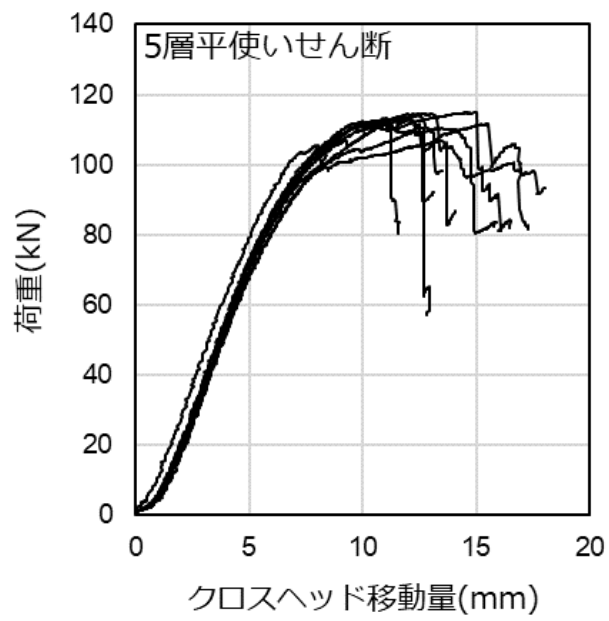


図 2.3-14 クロスヘッド移動量-荷重関係

表 2.3-9 せん断試験結果

No.	密度 kg/m ³	せん断強度 N/mm ²	破壊形態
9. S1	555	5.3	せん断
9. S2	567	5.4	せん断・曲げ
9. S3	559	5.3	せん断・曲げ
10. S1	565	5.4	せん断
10. S2	578	5.3	せん断
10. S3	570	5.4	せん断
11. S1	568	5.4	せん断
11. S2	572	5.4	せん断
11. S3	551	5.0	せん断
平均値	565	5.3	
標準偏差	9	0.1	
変動係数	1.5%	2.3%	

②ラミナのせん断試験

ラミナでのせん断強度を求めるために、フラットワイズせん断試験を行った。試験体はスギおよびカラマツの一次接着 LVL であり、寸法は幅 125 mm、厚さ 30 mm である。試験体数は縦振動ヤング係数により区分したスギ 6 種類およびカラマツ 7 種類から母材として各 1 本（長さは 6.8m～9.1m）を選び、それぞれから長さ 180mm のせん断試験体を 7 体採取した。

せん断試験はキーテック社所有の強度試験機を用いて行った。荷重条件は、支点間スパンを材せいの 4 倍（120 mm）とした中央集中荷重方式とした。最大荷重からせん断強度（ σ_s ）を算出した。

$$\sigma_s = \frac{3P_{\max}}{4bh} \quad (11)$$

ここで、 P_{\max} ：最大荷重、 b ：試験体幅、 h ：試験体厚さ

LVL ラミナのせん断試験結果を表 2.3-10 に示す。スギでは E 区分に応じてせん断強度の平均値が大きくなる傾向が見られたが、カラマツではその傾向は見られなかった。前節の実大梁の内層に使われたスギラミナは E 区分が 100 であったが、フラットワイズせん断試験では E 区分 100 のせん断強度の平均値は 5.5N/mm²であった。

表 2.3-10 LVL ラミナのせん断試験結果（フラットワイズ）

樹種	No.	E 区分	E_{fr} (kN/mm ²)	n (本)	σ_s (N/mm ²)			
					av	max	min	sd
スギ	S6-50	90	9.2	7	5.0	5.6	3.0	0.9
	S6-45	95	9.6	7	5.3	5.9	4.6	0.4
	S6-6	100	10.3	7	5.5	5.7	5.3	0.2
	S6-5	105	10.6	7	5.6	6.3	5.1	0.4
	S6-22	110	11.0	7	5.7	6.5	5.3	0.4
	S6-85	115	11.5	7	5.5	6.1	4.6	0.5
カラマツ	K6-6	125	12.9	7	7.2	7.6	6.4	0.4
	K6-28	130	13.3	7	6.8	7.3	6.3	0.3
	K6-21	135	13.9	7	6.8	7.4	6.0	0.5
	K6-9	140	14.5	7	7.0	7.6	6.7	0.3
	K6-14	145	15.0	7	7.4	7.9	5.5	0.8
	K9-2	150	15.1	7	7.0	7.4	6.7	0.3
	K9-22	155	15.6	7	7.0	7.4	6.1	0.4

E 区分： E_{fr} によるヤング係数の区分、 E_{fr} ：長尺状態での縦振動ヤング係数、 n ：長尺ラミナから採材したせん断試験体数、 σ_s ：せん断強度、av：平均値、max：最大値、min：最小値、sd：標準偏差

③ブロックせん断試験

次に、ハイブリッド LVL について、ブロックせん断方式でせん断強度の検討を行った。ハイブリッド LVL の接着層は一次接着層と二次接着層の 2 つに分けられるが、せん断応力が大きいと考えられる内層（スギ LVL ラミナ）を対象に、一次接着層と二次接着層について、ブロックせん断試験を行った。

1) 試験片および試験方法

ブロックせん断試験片は実大せん断試験体（<3>-①）と同一のハイブリッド LVL からエンドマッチングにより採取した。ブロックせん断試験片は、実大サイズの試験片（以下、実大サイズ）と JAS に即したサイズの試験片（以下、JAS サイズ）の 2 タイプを用意した。

実大サイズについては、①スギ LVL ラミナの一次接着層、②スギ LVL ラミナ同士の二次接着層を評価の対象とし、JAS サイズについては、①スギ LVL ラミナの一次接着層（以下、スギ一次接着層）、②スギ LVL ラミナ同士の二次接着層（以下、スギ二次接着層）、③スギ LVL ラミナとカラマツ LVL ラミナの二次接着層（以下、スギ-カラマツ二次接着層）を評価の対象とした。

各試験片の採取位置の概要を図 2.3-15 に、実大サイズにおける試験片の概要を図 2.3-16 に、JAS サイズにおける試験片の概要を図 2.3-17 に示す。ブロックせん断試験は、それぞれの試験片サイズに合わせたブロックせん断治具を用いて実施した。実大サイズについては実大材試験機（株式会社東京衡機製造所製、加力容量 1000 kN、曲げ容量 200 kN）、JAS サイズについては卓上型引張圧縮試験機（株式会社エー・アンド・デイ、ロードセル容量 50 kN）を用いて圧縮加力を行った。載荷速度は、実大サイズが 1.0 mm/min、JAS サイズが 0.5 mm/min とした。また、両者とも、治具の台座先端から接着層までのクリアランスは 0 mm とした。試験の様子を写真 2.3-9 および写真 2.3-10 に示す。試験後、試験片の破壊面を観察し、木部破断率（以下、木破率）の評価を行った。木破率の評価にあたっては、せん断面積の 1/100 サイズのメッシュを印刷したシート用い、1%単位で測定した。木破率の測定の様子を写真 2.3-11 に示す。また、破壊後の試験片より全乾法により含水率を測定した。含水率は、実大サイズについては、試験片のスギ LVL 部分を対象に、JAS サイズについては試験片の両側のブロック（スギ LVL およびカラマツ LVL）を対象に計測した。

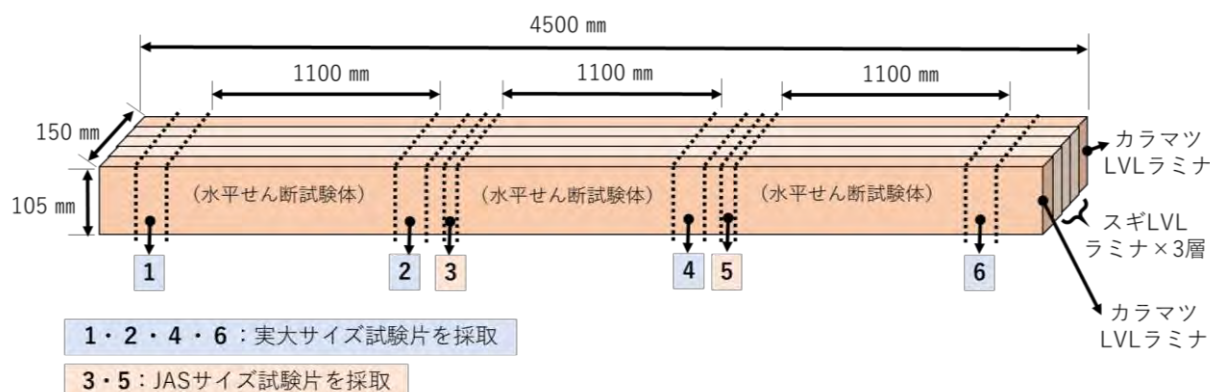


図 2.3-15 各試験片の採取の概要

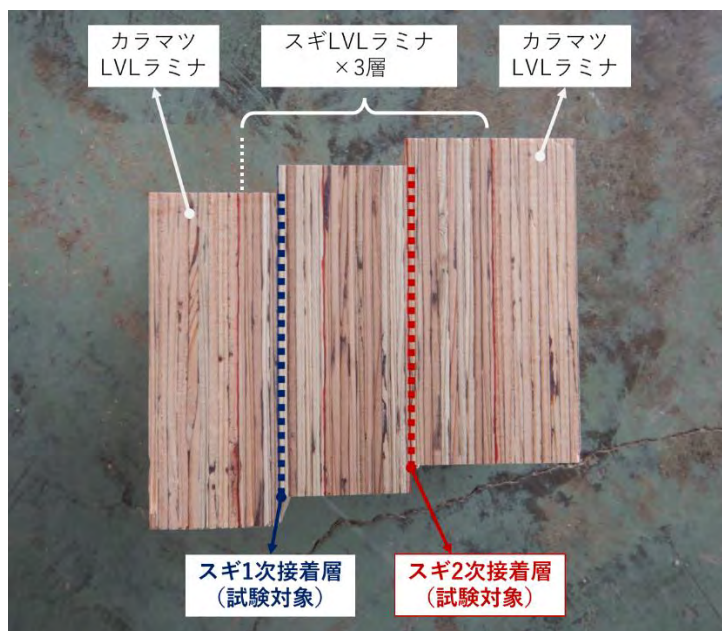
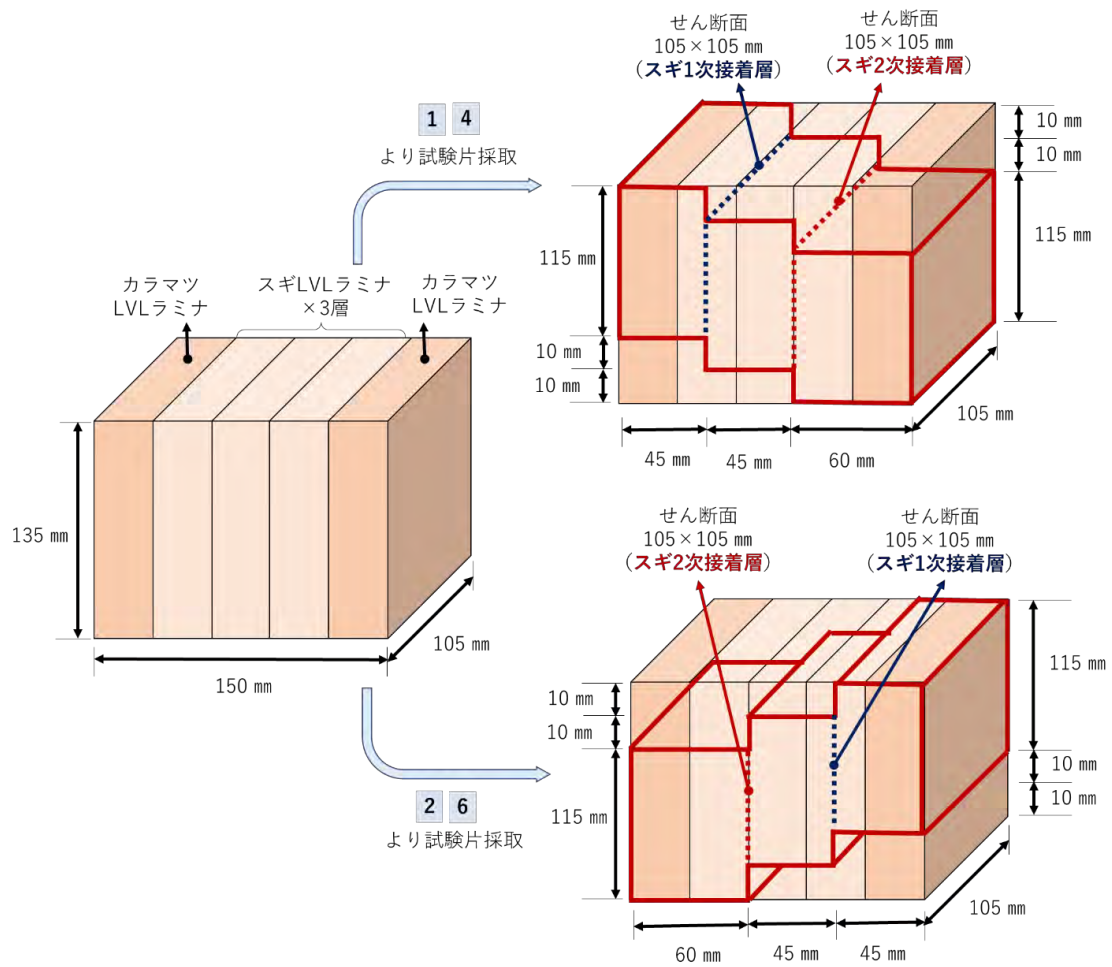


図 2.3-16 実大サイズ試験片の概要

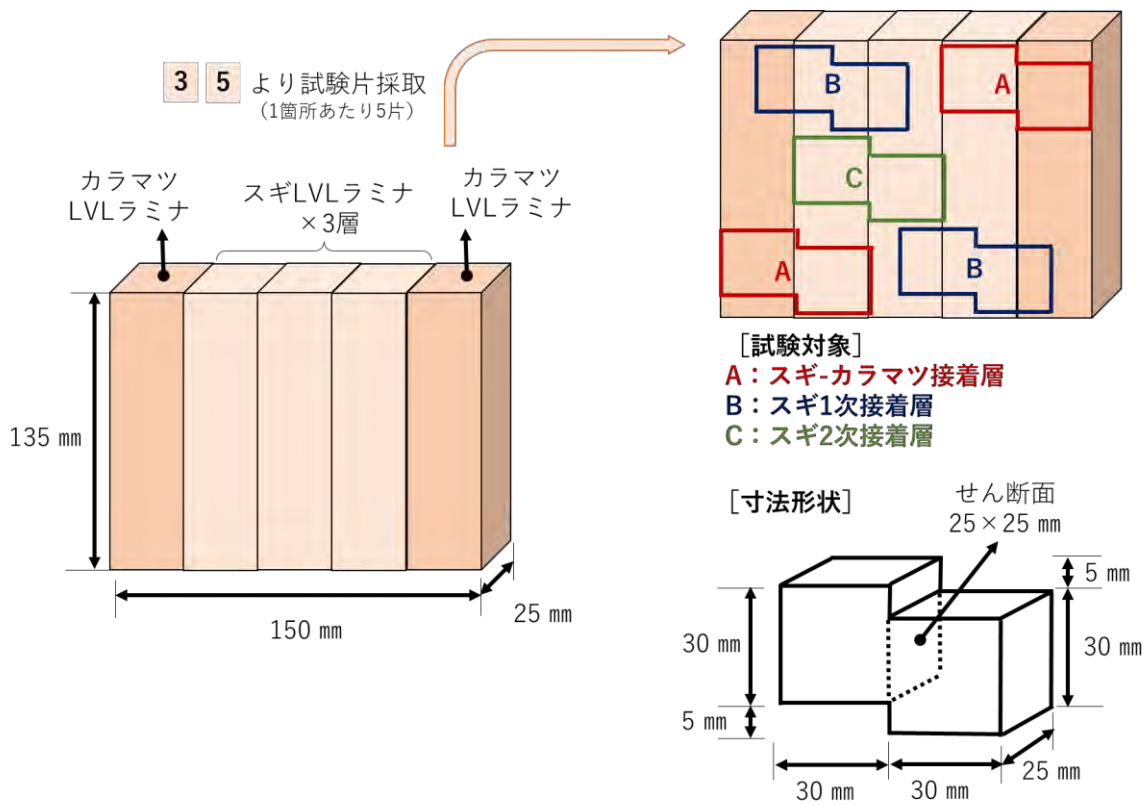


図 2.3-17 JAS サイズ試験片の概要

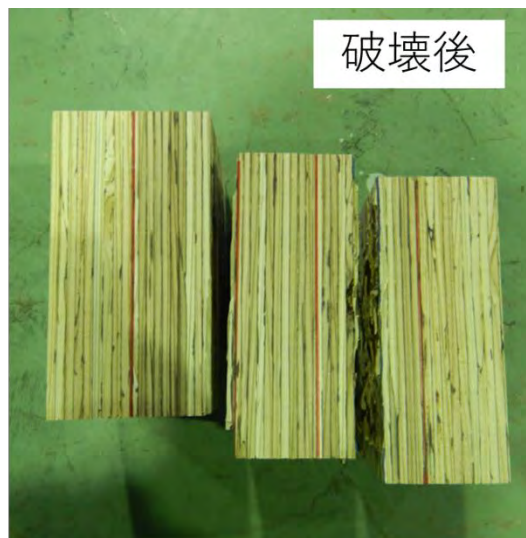


写真 2.3-9 ブロックせん断試験の様子 (実大サイズ)

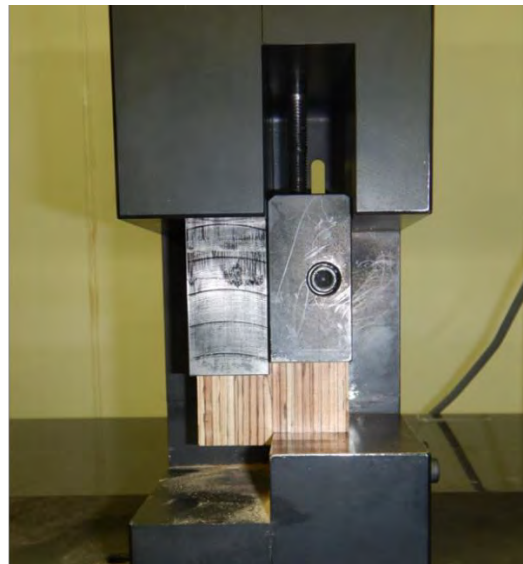


写真 2.3-10 ブロックせん断試験の様子 (JAS サイズ)

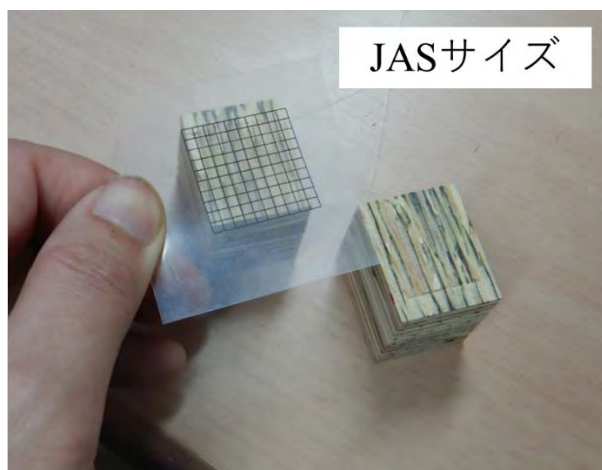


写真 2.3-11 木破率の測定

2) 試験結果

実大サイズの試験結果を表 2.3-11 に、JAS サイズの試験結果を表 2.3-12 に示す。また、各サイズにおけるブロックせん断強度について、図 2.3-18 に箱ひげ図を示す。

ブロックせん断強度について、有意差検定（実大サイズ：t 検定、JAS サイズ：分散分析）を行ったところ、いずれのサイズにおいても各条件間の有意差はみられなかった ($p > 0.05$)。

木破率は、二次接着層の方が一次接着層よりもやや低い傾向がみられた。有意差検定（実大サイズ：ウィルコクソンの順位和検定、JAS サイズ：Steel-Dwass test）を行ったところ、実大サイズにおいては、スギ一次接着層とスギ二次接着層の間に有意差がみられ ($p < 0.01$)、JAS サイズにおいては、スギ一次接着層とスギ-カラマツ二次接着層の間に有意差がみられた ($p < 0.05$)。

しかし、各条件とも平均して 90%以上の高い木破率を示していること、いずれのサイズにおいてもブロックせん断強度に両者の差異がみられないことから、二次接着部の接着性能は実用上問題ないと考えられる。

表 2.3-11 ブロックせん断試験結果（実大サイズ）

接着層	n	τ [N/mm ²]		WF [%]		MC [%]	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
スギ1次接着層	12	5.96	0.6	99.9	0.3	9.8	0.3
スギ2次接着層	12	5.50	0.5	95.0	6.6		

n：試験箇所（接着層）数、 τ ：ブロックせん断強度、WF：木部破断率、MC：（試験時）含水率、SD：標準偏差

表 2.3-12 ブロックせん断試験結果（JAS サイズ）

接着層	n	τ [N/mm ²]		WF [%]		MC [%]			
		Mean	SD	Mean	SD	(スギ)		(カラマツ)	
						Mean	SD	Mean	SD
スギ-カラマツ2次接着層	12	8.41	1.84	91.7	10.0	8.8	0.2	7.5	0.2
スギ1次接着層	12	7.36	1.07	98.5	2.4	8.4	0.4	-	-
スギ2次接着層	6	8.49	1.11	97.7	1.6	8.9	0.2	-	-

n：試験片数、 τ ：ブロックせん断強度、WF：木部破断率、MC：（試験時）含水率、SD：標準偏差

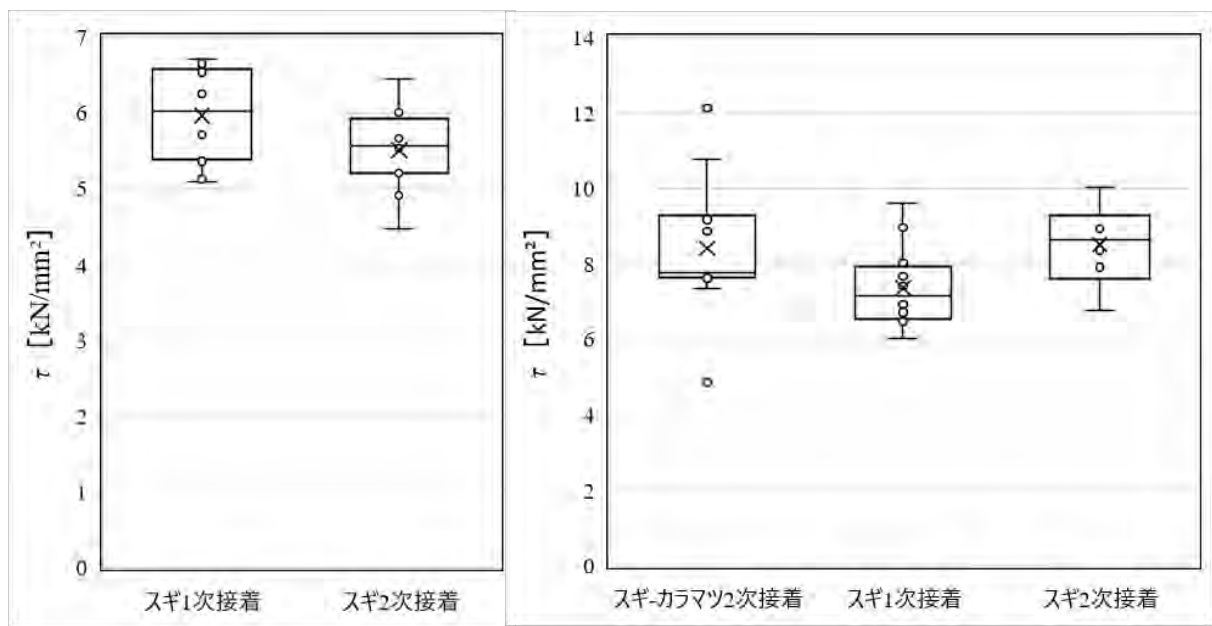


図 2.3-18 ブロックせん断強度 (左：実大サイズ、右：JAS サイズ)

④せん断強度のまとめ

実大梁のせん断試験では内層のスギ LVL (E 区分 100) でせん断破壊し、せん断強度の平均値が 5.3N/mm² となった。また、LVL ラミナのフラットワイズせん断試験では E 区分 100 のせん断強度の平均値が 5.5N/mm² となった。ブロックせん断試験では、せん断面積の大きな実大サイズに着目すると、ブロックせん断強度の平均値は一次接着層で 6.0 N/mm²、二次接着層で 5.5 N/mm² となった。実大梁のせん断破壊が一次接着層か二次接着層のいずれかで先行破壊したか区別できなかったが、実大梁のせん断強度がラミナせん断試験やブロックせん断試験よりもやや低めの値となっており、寸法効果によるのか、応力状態が異なるのか、さらなる検証が必要である。

2. 3. 3 ハイブリッドLVLの接合性能評価

梁や桁、母屋などの横架材が荷重に対して性能を十分に発揮するためには、支点となる端部の接合性能が確保されている必要がある。ここでは、代表的な在来仕口である腰掛け蟻掛け接合部のせん断試験を行い、ハイブリッドLVLと従来型LVLとの性能比較を行った。

1) 試験体と試験方法

試験材料は、これまで検討してきたハイブリッド型LVL（カラマツスギ）と従来型LVL（カラマツ、E120-F385）である。試験体は、2本の大梁のあいだに小梁を落とし込み、プレカット加工による腰掛け蟻掛け仕口によって接合したものである。試験材料の仕様および試験体の形状を図2.3-19～2.3-20に示す。

試験方法は、「木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017年版）」に記載されている継手・仕口接合部の試験に準拠して実施した。試験体は単調加力による予備試験1体と一方向繰り返し加力による本試験6体である。繰返し加力の履歴は、予備試験から得られた降伏変位の1/2、1、2、4、6、8、12、16倍、各1回とし、最大荷重に達した後、最大荷重の80%に低下するまで加力した。試験方法を図2.3-21に、試験実施状況を図2.3-22に示す。

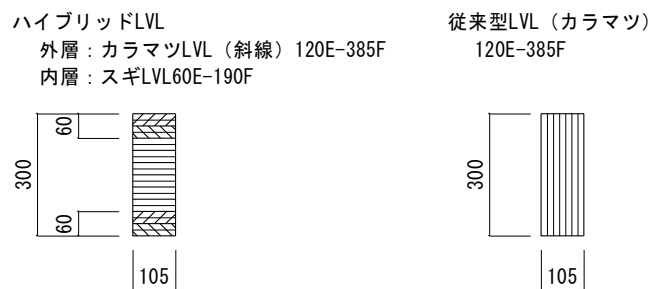


図 2.3-19 試験材料の仕様（単位：mm）

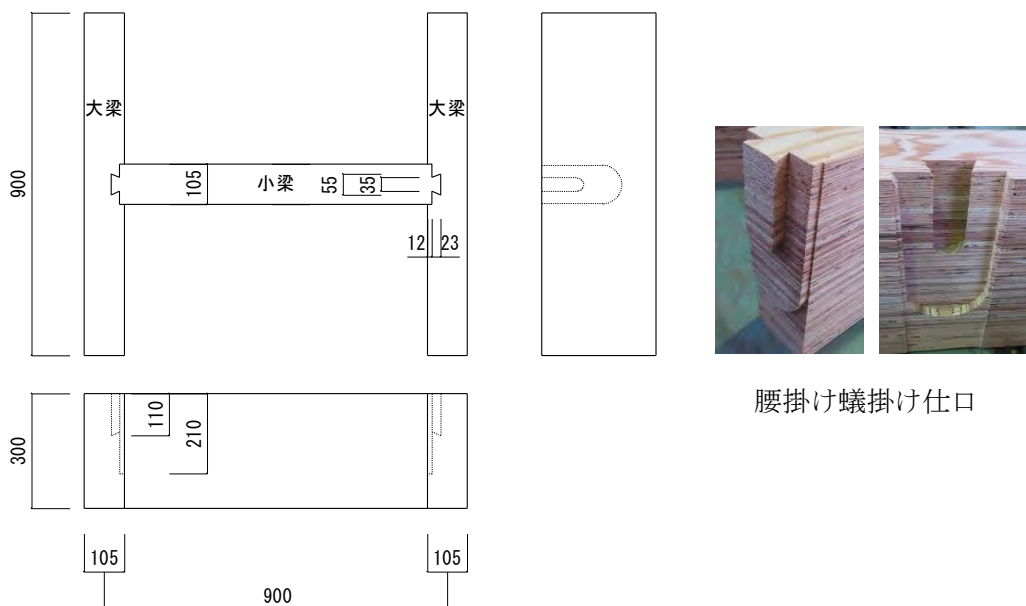


図 2.3-20 試験体の形状（単位：mm）

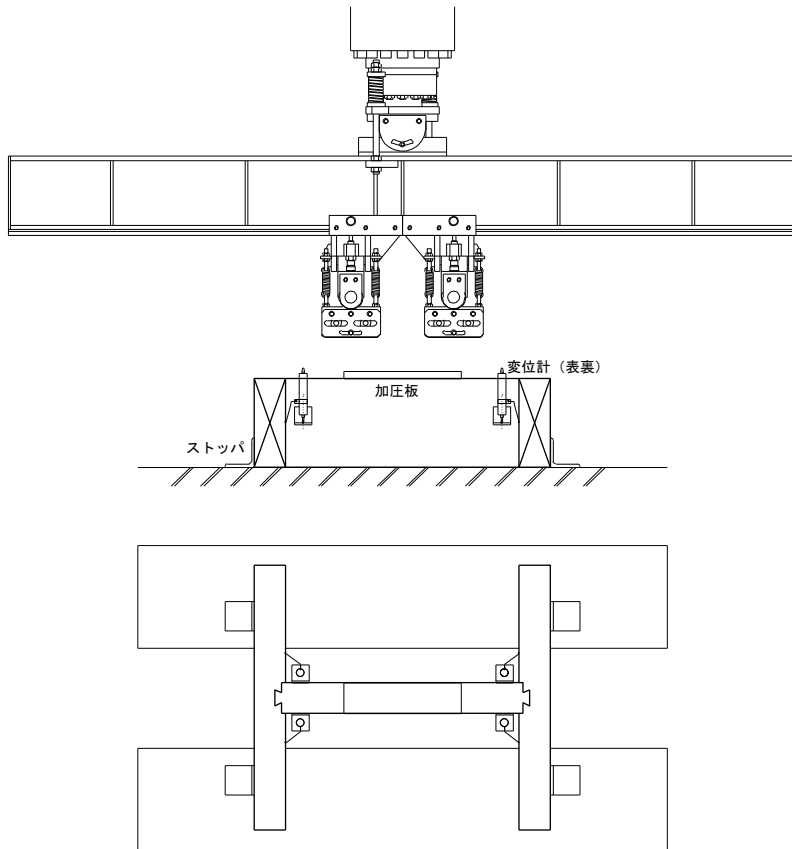


図 2.3-21 試験方法



従来型



ハイブリッド型

図 2.3-22 試験実施状況

2) 試験結果

試験結果を表 2.3-13～2.3-14 に示す。また荷重と変位の関係を図 2.3-23～2.3-24 に、試験終了後の様子を写真 2.3-12～2.3-13 に示す。

従来型 LVL では垂直方向に積層された単板が鉛直加力によって面外に膨らんでいくような変形挙動が観察され、降伏後の荷重上昇は小さかった。これに対してハイブリッド LVL では、単板が水平方向に積層されているため、木材の横圧縮に特徴的な変形挙動が顕著に発現し、終局的には内層の切欠き加工部からの水平積層面に沿った割裂破壊が発生した。初期剛性や耐力を比較すると、ハイブリッド LVL は従来型 LVL に比べて低かったものの、降伏後も荷重が上昇するねばり強い変形性能を有していた。

なお、ハイブリッド型では降伏後も荷重および変位が増加し続けたため、両仕様とも変位 15mm までのデータを対象として、荷重－変位曲線上の最大荷重の 10%、40%、90%に相当する点を用いて降伏耐力等を算出した。各仕様の短期基準耐力は、降伏耐力または最大荷重の 2/3 の 95%下限値のうち小さい方とすることから、ハイブリッド型は 36.6kN、従来型は 54.9kN と試算された（ただし耐力に影響を及ぼす係数 $\alpha = 1$ とした）。

表 2.3-13 試験結果 (ハイブリッド型)

試験体名	Pmax	δ max	Py	δ y	Pu	δ u	δ v	K	2/3Pmax
H0 (予備)	72.27	15.00	44.15	2.22	62.74	15.00	3.16	19.87	48.18
H1	74.39	15.00	42.87	2.09	63.04	15.00	3.08	20.48	49.59
H2	73.28	15.00	42.41	1.79	63.22	15.00	2.66	23.72	48.85
H3	69.16	15.00	38.20	2.10	57.99	15.00	3.19	18.16	46.11
H4	75.09	15.00	41.48	2.14	64.62	15.00	3.33	19.40	50.06
H5	69.72	15.00	39.20	2.78	59.67	15.00	4.23	14.10	46.48
H6	74.25	15.00	41.66	2.11	63.31	15.00	3.21	19.70	49.50
平均(1~6)	72.6	15.0	41.0	2.2	62.0	15.0	3.3	19.3	48.4
変動係数	0.04	0.00	0.05	0.15	0.04	0.00	0.16	0.16	0.04
95%下限値			36.6		56.0				44.5

表 2.3-14 試験結果 (従来型)

試験体名	Pmax	δ max	Py	δ y	Pu	δ u	δ v	K	2/3Pmax
N0 (予備)	113.11	14.31	77.29	2.59	104.17	15.00	3.49	29.84	75.41
N1	108.94	15.00	73.12	2.26	100.73	15.00	3.11	32.35	72.63
N2	106.97	14.59	70.10	1.96	99.84	15.00	2.78	35.85	71.31
N3	106.21	15.00	62.62	1.63	98.51	15.00	2.57	38.37	70.81
N4	106.97	15.00	65.94	1.91	97.13	15.00	2.81	34.53	71.31
N5	101.59	10.83	61.02	1.84	96.04	15.00	2.90	33.12	67.73
N6	104.55	15.00	63.16	1.78	97.97	15.00	2.76	35.49	69.70
平均(1~6)	105.9	14.2	66.0	1.9	98.4	15.0	2.8	35.0	70.6
変動係数	0.02	0.12	0.07	0.11	0.02	0.00	0.06	0.06	0.02
95%下限値			54.9		94.3				66.6

※Pmax : 最大耐力(kN)、 δ max : 最大荷重時の変位(mm)、Py : 降伏耐力(kN)、 δ y : 降伏変位(mm)、Pu : 終局耐力(kN)、 δ u : 終局変位(mm)、 δ v : 降伏点変位(mm)、K : 初期剛性(kN/mm)、2/3Pmax : 最大荷重の 2/3(kN)

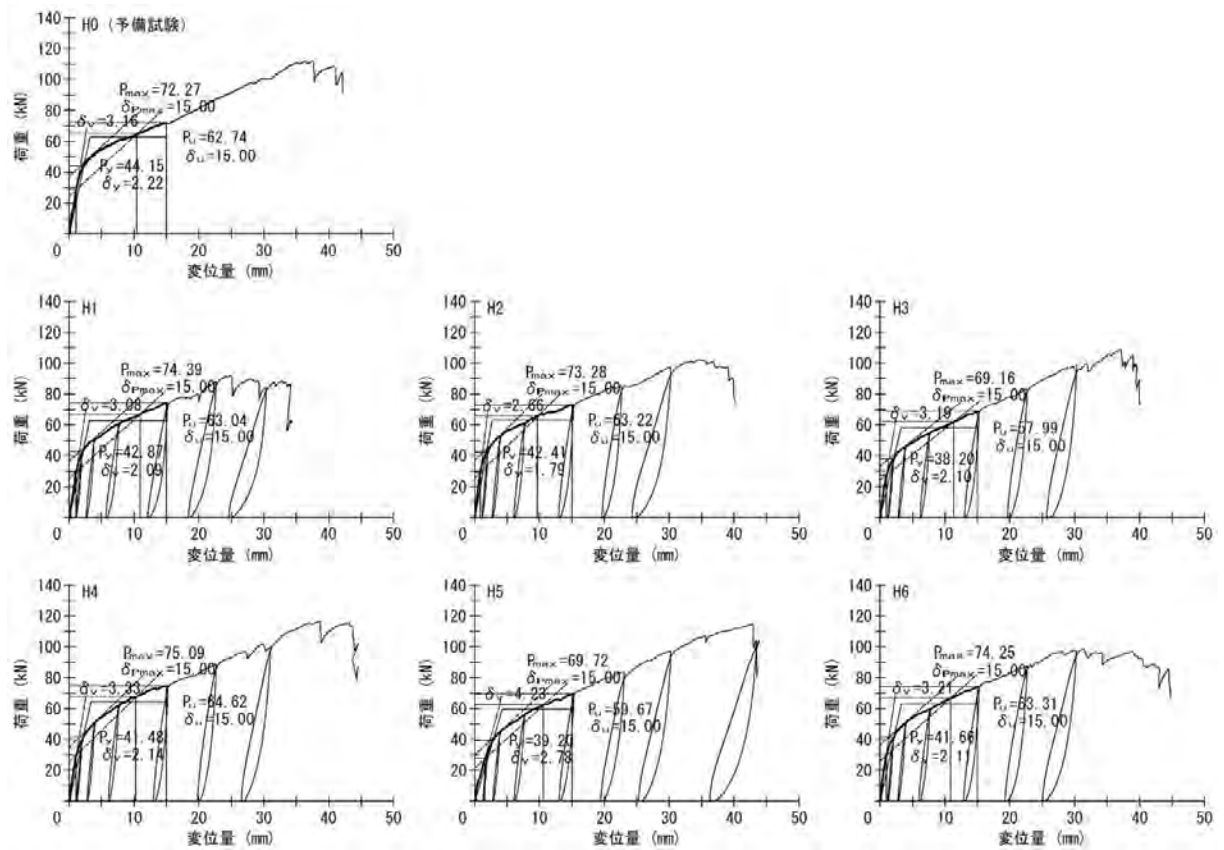


図 2.3-23 荷重と変位の関係 (ハイブリッド型)

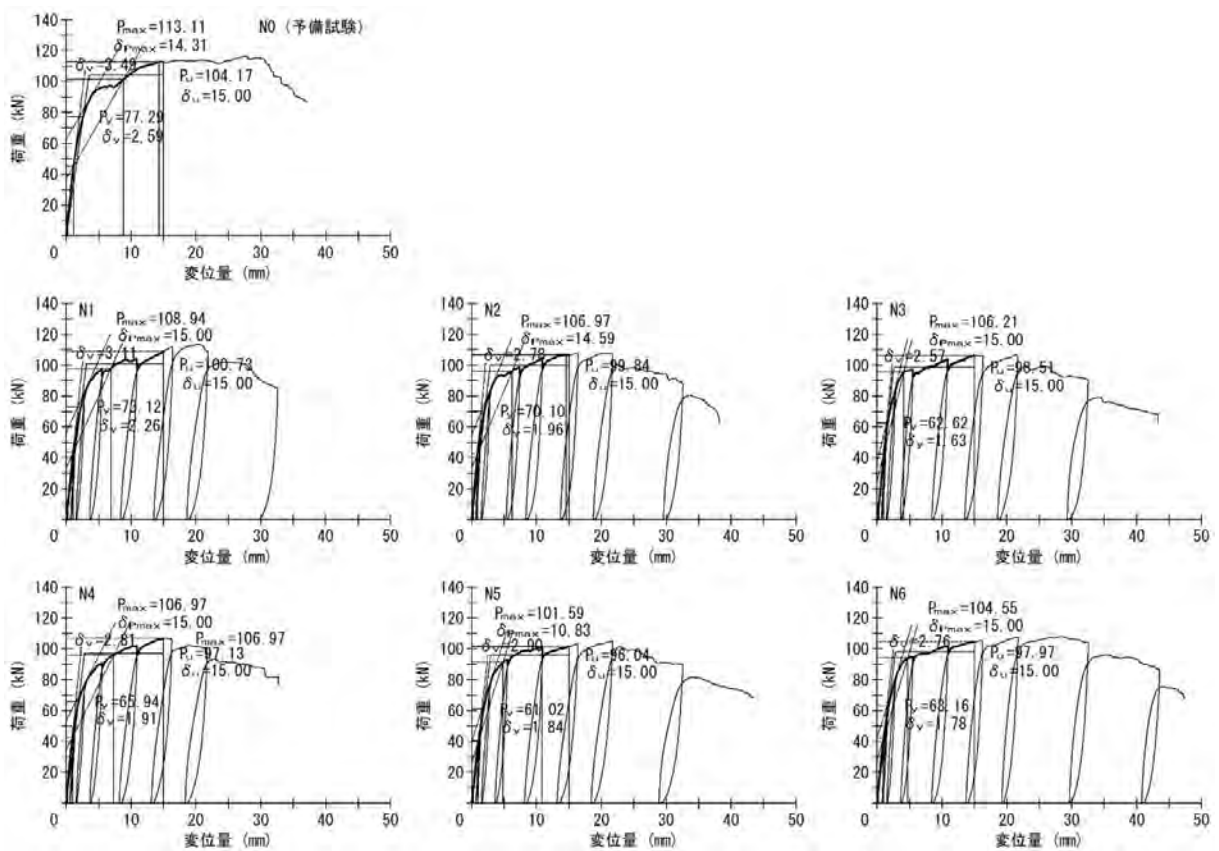


図 2.3-24 荷重と変位の関係 (従来型)

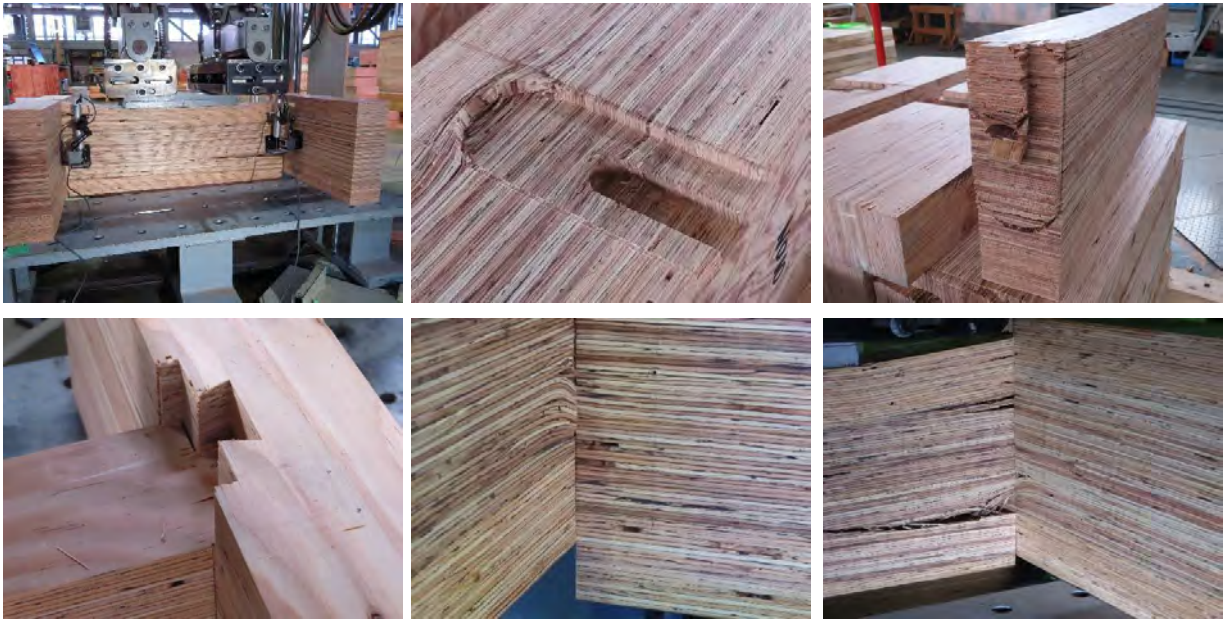


写真 2.3-12 試験終了後の状態（ハイブリッド型）



写真 2.3-13 試験終了後の状態（従来型）

考察

「LVL の使い方と構造設計の考え方」（（一社）全国 LVL 協会）に記載されている計算例を参考に、曲げを受ける LVL 梁の検定を表 2.3-15 のように行い、接合耐力の評価を行った。その結果、梁の最大スパンはたわみによって決定され、梁端部の接合耐力はハイブリッド型でも 3 倍程度の安全率が確保されていた。このことから、ハイブリッド型であっても十分な接合耐力を有していると考えられる。

表 2.3-15 曲げを受ける LVL 梁の検定

使用条件・荷重条件			従来型	ハイブリッドLVL
幅	b	mm	105	105
せい	h	mm	300	300
断面積	A		31500	31500
断面係数	Z	mm ³	1.58E+06	1.58E+06
断面二次モーメント	I	mm ⁴	2.36E+08	2.36E+08
梁間隔	B	m	1.0	1.0
スパン	l	m	8.0	8.0
単位面積あたり設計荷重				
自重+仕上げ荷重	W _G	kN/m ²	0.4	0.4
長期応力計算用積載荷重	L _L P	kN/m ²	1.3	1.3
長期たわみ計算用積載荷重	L _d P	kN/m ²	0.6	0.6
分布荷重				
長期応力計算用	L _L W=(W _G +L _L P)×B	kN/m	1.7	1.7
長期たわみ計算用	L _d W=(W _G +L _d P)×B	kN/m	1.0	1.0
含水率影響係数	K _m		1.0	1.0
寸法効果係数	K _Z		1.00	1.00
長期荷重に対する応力の検討				
曲げ基準強度	F _b	N/mm ²	33.0	30.0
長期許容応力度	L _L f _b =F _b ×(1.1/3)		12.10	11.00
設計曲げモーメント	L _L M=L _L W×l ² /8	N・mm	1.36E+07	1.36E+07
曲げ応力度	L _L σ _b =L _L M _{max} /Z		8.63	8.63
検定比	L _L σ _b /L _L f _b		0.714	0.785
判定基準			1.0	1.0
判定結果			OK	OK
長期荷重に対するたわみの検討				
曲げヤング係数	E	N/mm ²	12000	12000
初期たわみ	L _L δ ₀ =5×L _d W×l ⁴ /(384EI)		18.81	18.81
長期たわみ(たわみ増大係数2)	L _L δ=2×L _L δ ₀		37.62	37.62
スパン比	L _L δ/l		14/3000	14/3000
判定基準			1/300	1/300
判定結果			NG	NG
長期荷重に対する応力(せん断)の検討				
せん断基準強度	F _s	N/mm ²	3.0	3.0
長期せん断許容応力度	L _L F _s =F _s ×(1.1/3)	N/mm ²	1.1	1.1
長期設計せん断力	L _L Q=l×L _L W/2	kN	6.80	6.80
せん断応力度	L _L τ=L _L Q/A×3/2	N/mm ²	0.324	0.324
検定比	L _L τ/L _L F _b		0.294	0.294
判定基準			1.0	1.0
判定結果			OK	OK
長期荷重に対する接合部(せん断)の検討				
短期基準耐力(降伏耐力下限値、1か所あたり)	T ₀	kN	27.5	18.3
長期許容せん断耐力	L _L T _a =T ₀ ×1.1/2	kN	15.1	10.1
設計せん断力(1か所あたり)	L _L P _s =L _L Q/2	kN	3.40	3.40
検定比	L _L P _s /L _L T _a		0.225	0.338
判定基準			1.0	1.0
判定結果			OK	OK

2. 3. 4 広葉樹を用いた LVL の製造と性能評価

北海道におけるカンバ類の蓄積は 9200 万 m³ (令和 3 年 4 月) であり¹⁾、樹種別ではトドマツに次いで 2 番目に蓄積の多い樹種となっている。カンバ類に属する樹種 (種名) としては、ウダイカンバ、ダケカンバ、シラカンバの 3 種があり、天然林 (国有林) では、ダケカンバの蓄積が多いが、人工林 (一般民有林) ではシラカンバが大半を占めている²⁾。ウダイカンバは山地に、シラカンバは沼沢地や山地に、ダケカンバは亜高山～高山に生えるのが一般的であるが、北海道では 3 種が混生することも多い。カンバ類は、伐採跡地にいち早く侵入し定着する樹種であり、「かき起こし」と呼ばれる更新補助作業を行うことで、低コストな更新も可能とされている³⁾。しかし、現状では、家具や内装材などに加工されるものはウダイカンバなどの一部にとどまっており、シラカンバやダケカンバなどはパルプ材などの低位な利用に留まっている。カンバ類の資源の循環利用を進めていくには、付加価値の高い用途開拓が重要となる。本研究では、カンバ類のハイブリッド LVL のラミナとしての利用を想定し、シラカンバおよびダケカンバを用いた LVL を製造し、強度性能を評価した。

〈1〉試験方法

1) 単板の製造と材質測定

単板の製造は、株式会社湯の里木材工業所 (北海道知内町) において実施した。樹種はシラカンバおよびダケカンバの 2 樹種とした。長さ 1m の原木をベニヤレースで単板切削した後 (写真 2.3-14～写真 2.3-15)、ベニヤドライヤで乾燥させ、厚さ 2.9mm、幅 460mm、長さ 920mm の単板を得た。製造した単板は、シラカンバ、ダケカンバそれぞれ 150 枚であった。

単板は、厚さ、幅、長さおよび重量を測定し密度を算出した。また、超音波伝播時間測定器 (proceq 製 Pundit Lab) を用い、発信周波数 54 kHz の探触子を単板木口側に圧着することにより、超音波伝播時間を測定した (写真 2.3-16)。測定位置は、単板の幅方向をほぼ四等分する位置 (単板端部から 115mm、230mm、345mm) の 3 か所とした。測定した超音波伝播時間の平均値を用いて、単板のヤング係数を以下の式により算出した。

$$E_V = \rho V^2 \quad (12)$$

ここで、 E_V は単板のヤング係数、 ρ は単板の密度、 V は超音波伝播速度である。

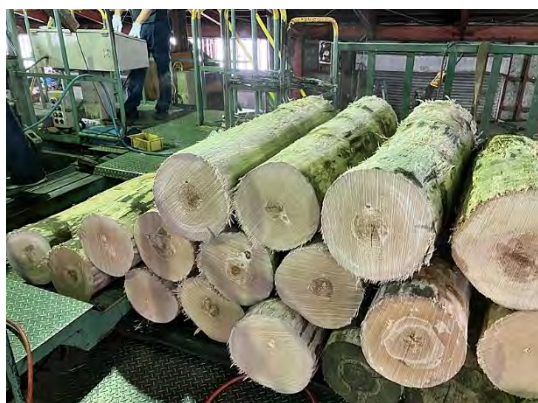


写真 2.3-14 使用原木の様子



写真 2.3-15 単板切削の様子

2) LVL の製造

LVL の製造は、道総研林産試験場において実施した。LVL の単板構成は 11ply とし、製造条件は表 2.3-16 に示す 4 条件とした。LVL の製造にはフェノール樹脂接着剤 (DIC 北日本ポリマ (株) 製) を使用し、グルースプレッダにより接着剤を塗布した (写真 2.3-17)。接着剤塗布量は $210\text{g}/\text{m}^2$ とし、製造枚数は各条件 6 体とした。冷圧および熱圧の様子を写真 2.3-18～写真 2.3-19 に示す。



写真 2.3-16 超音波伝播速度の測定



写真 2.3-17 接着剤の塗布



写真 2.3-18 冷圧の様子



写真 2.3-19 熱圧の様子

表 2.3-16 LVL の製造条件

樹種・条件	冷圧圧力 (MPa)	冷圧時間 (分)	熱圧温度 (°C)	熱圧圧力 (MPa)	熱圧時間 (s/mm)
シラカンバ・標準	1.1	60	125	1.1	40
シラカンバ・高圧				2.0	
ダケカンバ・標準				1.1	
ダケカンバ・高圧				2.0	

3) 強度試験

製造した LVL 原板から、平使い方向、縦使い方向それぞれ 2 体の試験体を採取し、曲げ試験を実施した。曲げ試験は、単板積層材の日本農林規格 (LVL の JAS) に準じ、スパンを厚さの 21 倍 (630mm) とした 3 等分点 4 点曲げ方式により行い、曲げヤング係数と曲げ強さを算出した。試験体寸法は、平使い方向が 30×40×690mm、縦使い方向が 30×30×690mm とし、試験体数は各方向 12 体とした。曲げ試験の様子を写真 2.3-20 に示す。

さらに、LVL 原板から、平使い方向、縦使い方向それぞれ 2 体の試験体を採取し、LVL の JAS に準じて水平せん断試験を実施した。スパンを厚さの 4 倍 (120mm) とした中央集中荷重の曲げ方式によりせん断強さを算出した。試験体寸法は、平使い方向が 30×40×180mm、縦使い方向が 30×30×180mm とし、試験体数は各方向 12 体とした。水平せん断試験の様子を図写真 2.3-21 に示す。曲げ試験及び水平せん断試験終了後、試験体の非破壊部分から含水率測定用の試験片を採取し、絶乾法により含水率を測定した。



写真 2.3-20 LVL の曲げ試験の様子



写真 2.3-21 LVL の水平せん断試験の様子

4) LVL の曲げ性能の推定

積層材のヤング係数は、構成するエレメントのヤング係数を用いて計算により求めることが可能である。LVL においては、単板が薄く、接着層の強度が単板強度に与える影響が大きいことが指摘されている⁴⁾が、ここでは、接着層の影響を考慮せず、測定した単板のヤング係数を用いて通常の計算式による LVL のヤング係数の推定を試みた。LVL の平使い方向および縦使い方向のヤング係数は以下の式によって算出した。

$$E_{LF} = \frac{\sum E_{vi} I_{vi}}{I_L} \quad (13)$$

$$E_{LE} = \frac{\sum E_{vi} A_{vi}}{A_L} \quad (14)$$

ここで、 E_{LF} 、 E_{LE} は平使い、縦使い方向の LVL のヤング係数、 E_{vi} は i 層の単板のヤング係数、 I_{vi} は i 層の単板の LVL の中立軸に対する断面二次モーメント、 I_L は LVL の断面二次モーメント、 A_{vi} は i 層の単板の断面積、 A_L は LVL の断面積である。

また、超音波伝播速度を用いて算出した動的ヤング係数は、一般的には静的なヤング係数よりも高い値が得られるので、ここでは、実測した単板のヤング係数 (E_{vi}) に 0.9 を乗じたものを上式に代入して使用した。

〈2〉試験結果

1) 単板の材質

単板の密度分布を図 2.3-25 に示す。また、(12)式によって算出された単板のヤング係数分布を図 2.3-26 に示す。単板密度 (気乾) の平均値は、シラカンバで 573kg/m^3 、ダケカンバで 656kg/m^3 であった。この値は、既往の報告 (シラカンバ 590kg/m^3 、ダケカンバ 700kg/m^3)⁵⁾ に比べてやや低い値であった。単板のヤング係数の平均値は、シラカンバで 16.0kN/mm^2 、ダケカンバで 17.9kN/mm^2 であった。

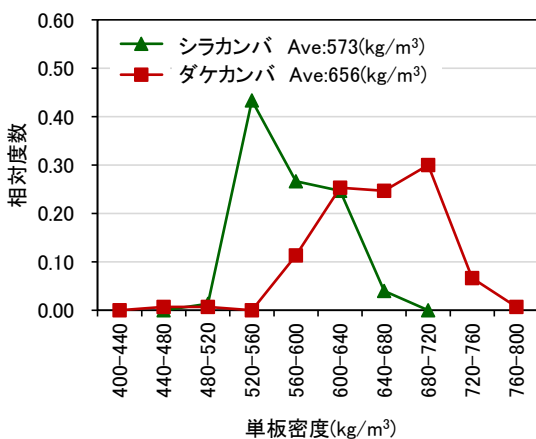


図 2.3-25 単板の密度分布

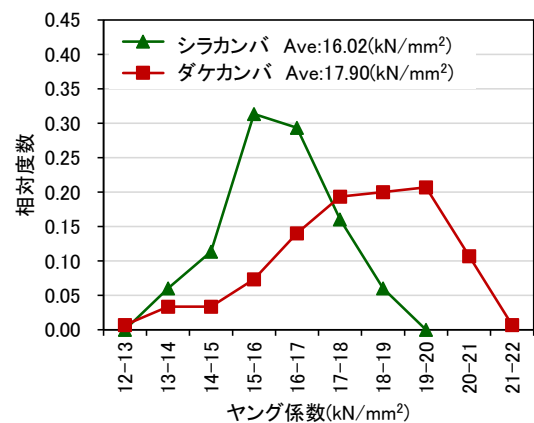


図 2.3-26 単板のヤング係数分布

2) LVL の曲げ試験

LVL の曲げ試験結果を表 2.3-17 に示す。また、LVL の密度とヤング係数の関係を図 2.3-27 に、密度と曲げ強さの関係を図 2.3-28 に示す。

いずれの荷重方向においても、LVL の密度とヤング係数および曲げ強さの間には高い正の相関が認められた。標準タイプと高圧タイプを比較すると、ヤング係数、曲げ強さともに高圧タイプが高くなり、t 検定の結果、ダケカンバ LVL においては、両者に有意差が認められた ($p < 0.05$)。製造した LVL の密度は、高圧タイプは標準タイプよりも、シラカンバで 3.2%、ダケカンバで 2.2% 高くなっており、これが強度性能に多少影響したものと考えられる。LVL の JAS の強度等級で判断すると、両樹種ともに JAS の「140E・特級」を満たす性能が得られた。

ヤング係数の計算値と実測値の関係を図 2.3-29 に示す。いずれの方向においても、曲げヤング係数の計算値と実測値の相関は高く、超音波伝搬速度から計算した単板のヤング係数を用いて、LVL のヤング係数を推定可能であることが示された。

表 2.3-17 LVL の曲げ試験結果

樹種 条件		平使い					縦使い				JAS 区分
		厚さ (mm)	密度 (kg/m ³)	ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	含水率 (%)	密度 (kg/m ³)	ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	含水率 (%)	
シラカンバ 標準	Ave	31.8	639.6	14.68	101.72	8.9	641.9	14.09	97.55	8.8	140E
	Max	32.1	682.1	16.67	117.86	9.3	685.2	15.56	105.01	9.0	特級
	Min	31.6	608.8	13.21	90.98	8.5	615.5	12.78	85.52	8.7	
	CV	0.47	3.8	7.3	9.1	2.9	3.7	6.4	5.8	1.7	
シラカンバ 高圧	Ave	31.3	662.2	15.09	107.91	9.0	659.6	14.27	100.75	9.0	140E
	Max	31.6	702.9	17.09	117.40	9.5	700.2	15.83	111.33	9.2	特級
	Min	31.0	635.6	13.11	80.37	8.2	631.7	12.58	93.18	8.8	
	CV	0.58	3.5	9.90	10.66	4.7	3.3	7.0	6.1	1.4	
ダケカンバ 標準	Ave	31.7	718.5	16.60	120.99	9.1	720.8	16.00	111.11	9.1	140E
	Max	32.0	775.3	18.38	136.59	9.4	781.5	19.03	126.54	9.4	特級
	Min	31.5	664.6	13.29	87.21	8.8	665.2	12.59	91.08	8.9	
	CV	0.55	4.5	10.03	13.27	2.1	4.7	12.4	9.7	2.7	
ダケカンバ 高圧	Ave	30.9	734.6	17.89	128.06	8.3	737.2	16.83	119.98	8.3	140E
	Max	31.1	793.0	21.77	142.41	8.4	790.7	20.14	150.11	8.5	特級
	Min	30.5	685.5	14.91	99.93	8.2	680.8	13.56	100.59	8.0	
	CV	0.52	4.1	12.14	10.77	0.9	4.2	11.9	11.5	2.3	

※Ave：平均値、Max：最大値、Min：最小値、CV(%)：変動係数

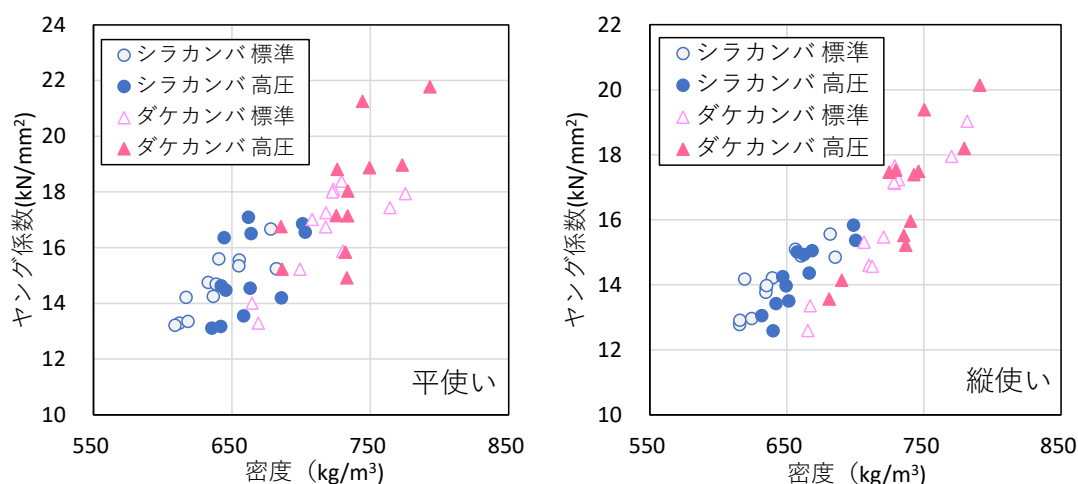


図 2.3-27 LVL の密度とヤング係数の関係

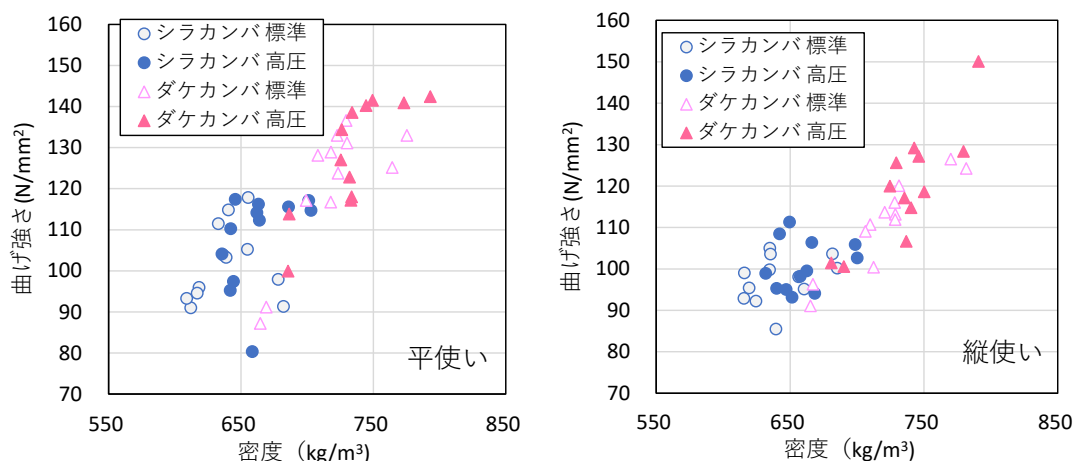


図 2.3-28 LVL の密度と曲げ強さの関係

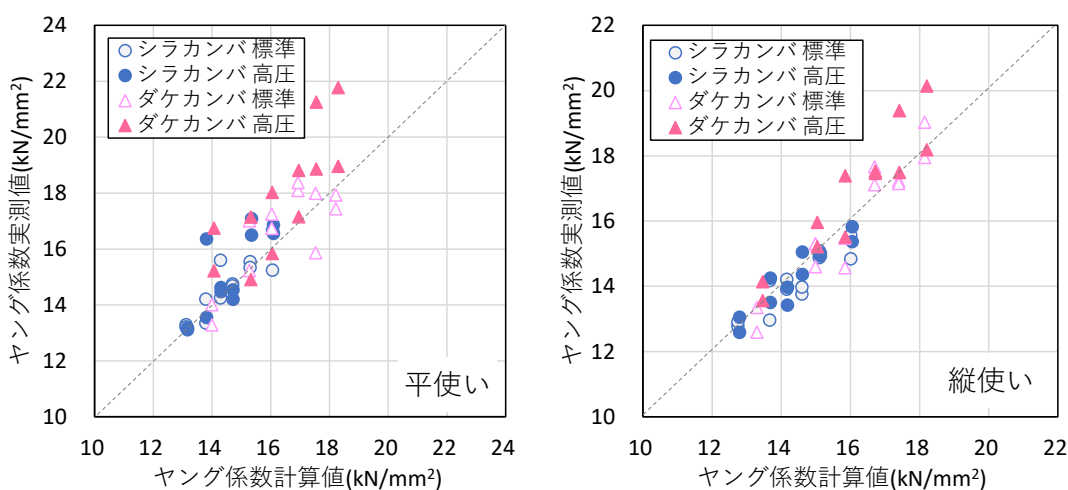


図 2.3-29 ヤング係数の計算値と実測値の関係

3) LVL のせん断試験

LVL のせん断試験結果を表 2.3-18 に示す。また、LVL の密度とせん断強さの関係を図 2.3-30 に示す。いずれの荷重方向においても、LVL の密度とせん断強さの間には高い正の相関が認められた。標準タイプと高圧タイプの平均値を t 検定で比較すると、平使いでは両者に有意差はなかったが、縦使いでは両者に有意差が認められた (シラカンバ : $p < 0.05$ 、ダケカンバ : $p < 0.01$)。

せん断試験時の破壊形態の例を写真 2.3-22 に示す。破壊形態は、平使いでは、せん断破壊、曲げ破壊および両者の複合破壊の 3 種類の形態がみられ、いずれの条件においてもせん断破壊が最も多かった。一方、縦使いでは、シラカンバの標準タイプの 1 体のみにおいて、せん断と曲げの複合破壊がみられたが、それ以外の試験体では曲げ破壊であった。このように、平使いではせん断破壊の割合が高いのに対し、縦使いでは曲げ破壊が支配的となる結果は、既往の報告^{6,7)}と同様であった。シラカンバおよびダケカンバ LVL のせん断強さを LVL の JAS 基準と比較すると、いずれの条件においても JAS の「65V-55H」の基準を大幅に上回る性能が得られた。

表 2.3-18 LVL の水平せん断試験結果

樹種 条件		平使い				縦使い				JAS区分
		密度	せん断強さ	含水率	破壊形態	密度	せん断強さ	含水率	破壊形態	
		(kg/m ³)	(N/mm ²)	(%)	(S/SB/B)	(kg/m ³)	(N/mm ²)	(%)	(S/SB/B)	
シラカンバ 標準	Ave	629.9	15.03	8.4	(7/5/0)	630.4	14.14	8.3	(0/1/11)	65V-55H
	Max	675.1	17.00	8.7		671.1	15.47	8.6		
	Min	600.8	12.76	8.2		598.7	12.64	8.1		
	CV	4.0	8.4	2.4		4.0	6.2	2.4		
シラカンバ 高圧	Ave	660.1	15.12	8.5	(6/3/3)	657.0	14.61	8.4	(0/0/12)	65V-55H
	Max	687.6	17.24	8.9		690.9	15.69	8.6		
	Min	627.1	13.07	8.1		629.5	13.73	8.1		
	CV	2.8	7.3	3.6		2.8	4.0	2.8		
ダケカンバ 標準	Ave	704.0	16.18	8.5	(7/2/3)	704.9	14.96	8.4	(0/0/12)	65V-55H
	Max	748.7	18.54	8.8		752.8	16.64	8.8		
	Min	651.5	13.54	8.1		657.9	11.71	7.7		
	CV	4.2	8.2	3.6		3.9	10.1	5.6		
ダケカンバ 高圧	Ave	728.2	16.70	7.9	(8/1/3)	731.5	16.38	7.8	(0/0/12)	65V-55H
	Max	775.8	19.46	8.2		774.2	19.06	8.2		
	Min	692.2	12.47	7.6		693.7	13.04	7.5		
	CV	3.4	11.7	3.3		3.6	11.5	4.3		

※Ave：平均値、Max：最大値、Min：最小値、CV(%)：変動係数

S：せん断破壊、B：曲げ破壊、SB：せん断と曲げの複合破壊

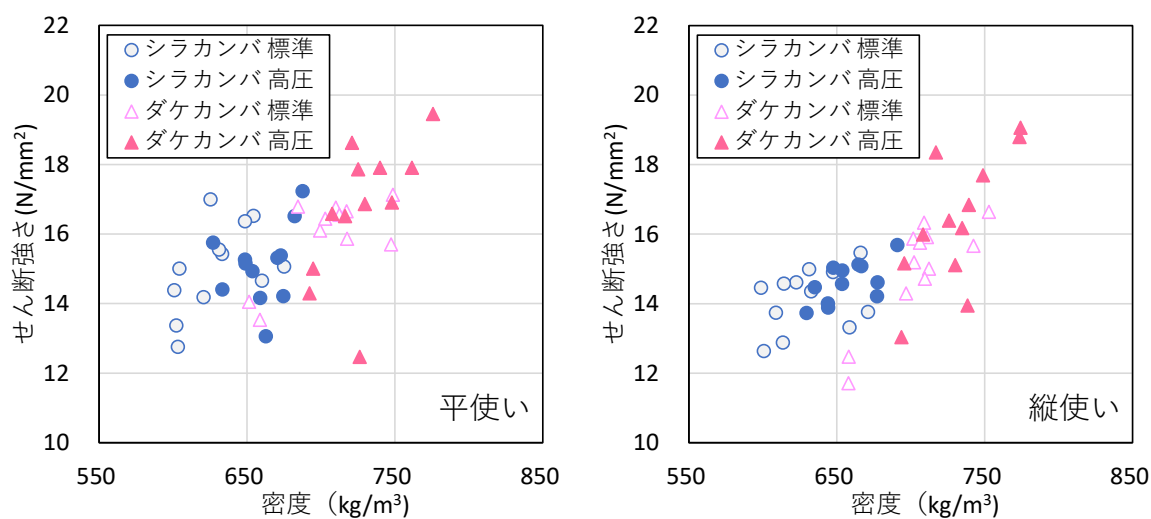
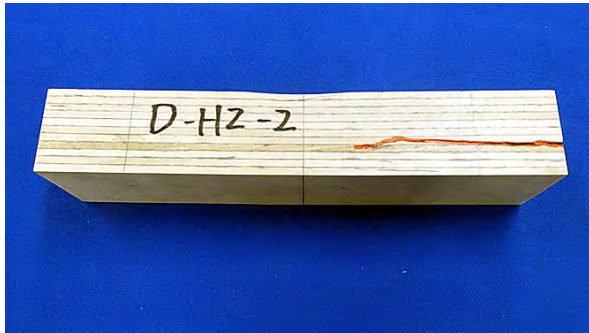


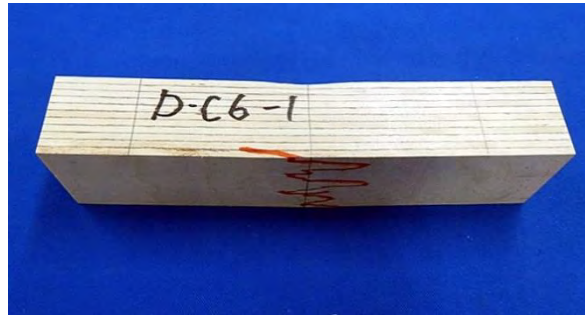
図 2.3-30 LVL の密度とせん断強さの関係



せん断破壊



せん断と曲げの複合破壊



曲げ破壊

写真 2.3-22 水平せん断試験時の破壊形態の例

【文献】

- 1) 令和2年度北海道林業統計:<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/kcs/rin-toukei/rin-toukei-index.html>
- 2) 大野泰之：北方林業 69(3)、1-4 (2018).
- 3) 嶋瀬拓也：山林 35-43 (2016).
- 4) 小関真琴ほか：木材学会誌 58(3)、125-136 (2012).
- 5) 大崎久司ほか：第68回日本木材学会大会研究発表要旨集、2018
- 6) 宮武敦ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集、2009、pp3-4
- 7) 古田直之ほか：木材学会誌 66(2)、93-100 (2020).

2. 4 まとめ

本研究では、横架材における国産材比率の向上を目指して、カラマツ等の高強度 LVL とスギの低強度 LVL を用いたハイブリッド LVL を製造した上で、実大強度性能および接合性能の評価を行った。得られた成果の概要を以下にまとめる。

【ハイブリッド LVL の強度性能評価】

◆外層にカラマツ LVL (120E 以上)、内層にスギ LVL (90E 以上) を積層したハイブリッド型 LVL を試作した。積層数と梁せい (h) は 5 プライ=150mm (8 体)、10 プライ=300mm (9 体)、15 プライ=450mm (8 体) の 3 種類とした。梁幅は 105mm の 1 種類とした。いずれのタイプも積層数に占めるカラマツ LVL の割合は 40%とした。一次接着はフェノール樹脂、二次接着はレゾルシノール樹脂を用いて積層した。一次接着の状態 (ラミナと称する、厚さ 30mm) で打撃ヤング係数を測定し、上下のラミナのヤング係数が対象となるように組み合わせた。

◆試作したハイブリッド LVL の実大曲げ試験を 4 点荷重方式 (荷重点間は梁せいの 4 倍、スパンは梁せいの 18 倍) で行い、曲げ強さと曲げヤング係数を求めた。その結果、曲げ強さは 150h : 300h : 450h=1.00 : 0.85 : 0.80 となり、現行の寸法調整係数 (1.00 : 0.91 : 0.89) よりも低下率が大きくなった。また、ラミナの曲げ強度試験結果をもとに、等価断面法を用いて実大梁の曲げ性能の推定を行った。最外層ラミナの打撃ヤング係数から実大梁の曲げヤング係数を推定した結果、精度よく推定できることが明らかとなった。また、最外層ラミナの打撃ヤング係数から曲げ強さ、さらには引張強さに換算 (引張/曲げ強度比=0.70) して実大梁の曲げ強さを推定した結果、ほとんどの試験体の実測値が推定値を上回り、安全側に推定できることが明らかとなったが、150h についてはかなり安全側となり、ラミナの強度比を梁せいに応じて変えるべきと考えられた。

◆実大せん断試験 (中央集中荷重方式、9 体) および実大ブロックせん断試験 (せん断面積 105×105mm、一次接着層、12 体) については、5 プライの内層スギ LVL を対象に行った。せん断強さの平均値は実大試験で 5.3N/mm²、ブロックせん断試験で 5.5N/mm² となり、ブロックせん断強さから実大性能を把握できることが確かめられた。

【ハイブリッド LVL の接合性能評価】

◆試作したハイブリッド LVL と従来型のカラマツ LVL (等級 E120) (いずれも断面 105mm×300mm) を対象に、在来工法での梁-梁の代表的な接合方法である在来仕口 (腰掛け蟻掛け) で接合したモデル試験体を作製し、繰り返し加力によるせん断試験 (試験体数は各 6 体) を実施した。その結果、従来型 LVL では垂直方向に積層された単板が鉛直加力によって面外に膨らんでいくような変形挙動が観察され、降伏後の荷重上昇は小さかった。これに対してハイブリッド LVL では、単板が水平方向に積層されているため、木材の横圧縮に特徴的な変形挙動が顕著に発現し、終局的には内層の切欠き加工部からの水平積層面に沿った割裂破壊が発生した。初期剛性や耐力を比較すると、ハイブリッド LVL は従来型 LVL に比べて低かったものの、降伏後も荷重が上昇するねばり強い変形性能を有していた。

【広葉樹を用いた LVL の性能評価】

◆ハイブリッド LVL のさらなる高性能化に向けて、広葉樹を用いた LVL ラミナの試作と性能評価を行った。道産シラカンバとダケカンバを厚さ 2.9mm で単板切削し、単板のヤング係数を測定した後、30×460×920mm のサイズの LVL ラミナを製造した。製造条件は、標準タイプ（圧力 1.1MPa）と高圧タイプ（圧力 2MPa）の 2 条件とした。LVL の曲げ性能は、密度との相関が高かったが、両樹種ともに LVL の日本農林規格（JAS）の「140E・特級」を満たす性能が得られた。単板のヤング係数から LVL の曲げ性能を計算した結果、曲げ性能の実測値を精度よく推定できた。水平せん断試験によるせん断強さの平均値は、すべての条件で 14 N/mm² 以上となり、JAS の最高基準の「65V-55H」を大幅に上回る値を示した。

以上のように、本研究により、カラマツおよびスギ LVL を水平積層したハイブリッド LVL の種々の強度性能や接合性能が明らかとなった。それらのデータや知見は今後の JAS 改正に向けた検証や提案に活用される見込みである。ただし、従来 JAS とは異なる製法と使い方のハイブリッド LVL を実用化するためには、クリープ等の他の材料性能も把握する必要があり、さらなる検証に取り組む必要がある。

3. 厚板床開発

3. 1 目的

中大規模木造の水平構面設計において、30mm から 50mm 厚で強度の高い厚板 LVL を面材とした、釘・ビスで接合した構面構成は今までに検討されてこなかった。本事業では現場の施工性を勘案して様々な厚みと釘・ビス・接着剤の組み合わせの検討を行い、データを収集した。図 3 に、厚板 LVL を使用した水平構面の一例を示した。

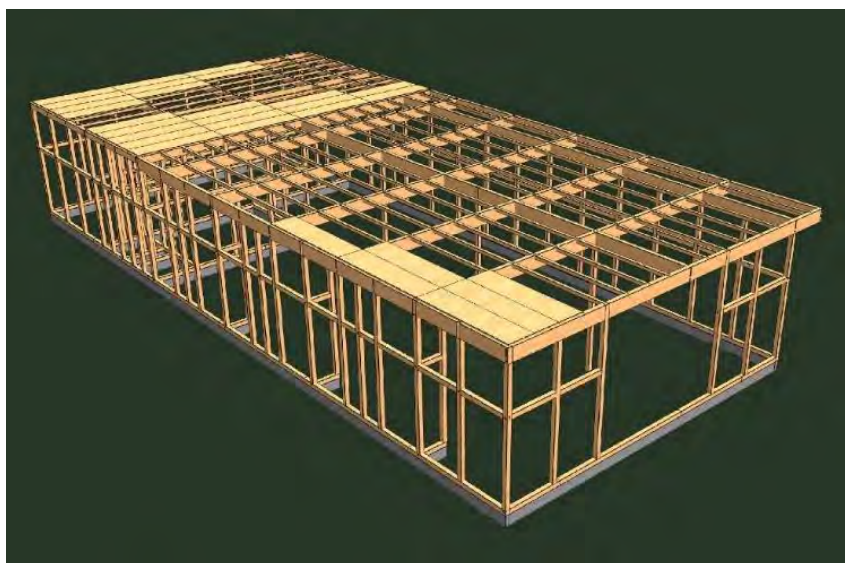


図 3 厚板 LVL を使用した水平構面のパース

3. 2 実施体制

本事業では下記委員会を設け、それぞれの有識者に参加いただき計画立案・試験の実施・性能検証を行った。

委員長	東京大学	稲山正弘	大学院農学生命科学研究科 教授
委員	島根県産業技術センター	河村 進	有機材料技術科
委員	建材試験センター	早崎洋一	西日本試験所 試験課 主査
会員会社			
	株式会社ウッドワン	牧野克己	構造システム営業部 シニアマネージャー
	株式会社ウッドワン	菅田啓子	技術開発部 課長
	株式会社ウッドワン	泉谷龍彦	技術開発部 係長
	株式会社ウッドワン	岡本肇	構造システム営業部 課長
	株式会社ウッドワン	疋田慎二	構造システム営業部 係長
	株式会社オーシカ	小竹宏明	建材事業部 係長
	シネジック株式会社	寺澤正広	営業本部 R&D推進室 マネージャー
	若井ホールディングス株式会社	橋本岳史	開発本部
	セメダイン株式会社	久住 明	技術部 専任部長
	セメダイン株式会社	橋向秀治	技術部開発グループ グループリーダー
	セメダイン株式会社	倉内晴久	技術部開発グループ第四チーム チームリーダー
	セメダイン株式会社	高橋 駿	技術部開発グループ第四チーム
	セメダイン株式会社	紺野 誠	技術部開発グループ第四チーム
	ファーストプライ	大河龍也	代表取締役
	ファーストプライ	齋藤寛之	製造部生産本部長
	ファーストプライ	白山 友樹	製造部工場長
	ファーストプライ	渡辺 歩	次長
	株式会社 日新	黄 箭波	常務
	株式会社 日新	松下 清	NS木質科学研究所 次長
	斎藤木材工業株式会社	貴船達也	建築部 課長
	斎藤木材工業株式会社	志村 智	建築部 課長
	株式会社 名南製作所	伊藤誠一	開発部
	株式会社 名南製作所	小田博茂	営業部
	株式会社 太平製作所	齊藤 武	役員
	メツァ・ウッド (Metsa Wood)	田邊公彰	ケルトLVL部門 日本連絡役
	橋本電機工業株式会社	船瀬正裕	
	橋本電機工業株式会社	鈴木克己	
	株式会社タツミ	田所洋介	営業企画開発管理本部長
オブザーバー			
	林野庁木材産業課	原田憲佑	住宅資材班 住宅資材企画係長
	木構造振興株式会社	平原章雄	常務取締役
事務局			
	全国LVL協会	平沼孝太	事務局長
		李 元羽	技術部長
		成田敏基	技術課長
		崔 華暉	
		井上天仁	

3. 3 実施内容

3. 3. 1 詳細計算法による接合部性能の検討

3. 3. 2 ロケット型接合部一面せん断性能の検討

3. 3. 3 実大面内せん断性能の検討

材料、接合仕様を決定するために、3. 3. 1では3×6サイズの面内せん断試験を実施し、面内釘1本あたりの特性値を算出した。3. 3. 2ではロケット型での接合部試験を実施し、3. 3. 1で算出した1本あたりの特性値と比較して整合性を検討した。3. 3. 3では3. 3. 1で行った材料・接合仕様のうちの実大サイズの性能を実験により確認し、算出した面内せん断試験との整合性を検討した。

3. 3. 1 詳細計算法による接合部性能の検討

この章における実施項目は以下の通りである。

3. 3. 1. 1	試験体	P55
3. 3. 1. 2	試験方法	P74
3. 3. 1. 3	結果	P75
3. 3. 1. 4	面内くぎ 1 本あたりの一面せん断耐力特性	P109
3. 3. 1. 5	実大サイズ構面面内性能の検討	P113
3. 3. 1. 6	まとめ（詳細計算法）	P118

3. 3. 1. 1 試験体

厚版水平構面本番試験の仕様を決めるため、下記表 3-1 のように 12 仕様、試験体寸法幅 910mm × 高 1820mm の面内せん断試験を行った。図面を図 3-2~3-15 に示した。

表 3-1 試験体仕様

		試験体No.	予備試験									本番試験		
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
		試験体数	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
		概要	躯体スギ厚板50	躯体スギ厚板30	躯体スギ厚板50 樹種違	躯体LVL 接着無し	躯体LVL 接着有り 短辺2辺	躯体LVL 接着有り 4辺	躯体スギ 接着有 4辺	躯体スギ 接着有 長辺2辺	躯体スギ 接着有 4辺@150	躯体スギ フレムの み 910×1820	躯体スギ 接着無し 910×1820	躯体スギ 接着有 4辺 910×1820
梁 1	樹種	集成材	○	○	○				○	○	○	○	○	○
		LVL				○	○	○						
		スギ集成 65E カラマツLVL 120E	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○
断面	幅120×せい120	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
梁 2	梁 1 と同じ													
梁-梁 接合	HD金物	高耐久フレックスホール ダウン60 カネシン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	大入れ	釘2本うち												
床版	樹種	材料	構造用LVL B種	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
		カラマツ E80	○			○	○	○				×		
		ラジアータバイン E80			○							×		
	スギ E50		○					○	○	○	×	○	○	
厚み	50mm	○		○	○	○	○				×			
	30mm		○					○	○	○	×	○	○	
ビス	材料	Xpoint若井 φ6×90	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
	ピッチ	75mm 千鳥	○	○	○	○	○		○	○	○	×	○	○
		150mm 一列							○		○	×		
接着剤	無し		○	○	○	○						×	○	
	有り	PU1000 セメダイン					○	○	○	○	○	×		○
	塗布ライン 短辺2辺					○						×		
	塗布ライン 四辺						○	○		○		×		○
	塗布ライン 長辺2辺								○		×			

表 3-2 材料詳細

部位	仕様詳細
試験体寸法	幅910 x 高1820mm (芯々寸法)
試験体数	仕様①~⑩ 各1体、仕様⑪、⑫ 各3体
面材：床パネル	面材寸法：幅910 x 高1820mm
	①スギLVL (B種) 厚30mm 50E-130F 35V-23H
	②カラマツLVL (B種) 厚50mm 80E-255F 35V-23H
	③ラジアータバインLVL (B種) 厚50mm 80E-255F 40V-26H
仕口接合	仕口：大入れ蟻掛け (釘2本斜め打ち) N90
木材 (軸組)	断面寸法：幅120mm x 厚120mm
	① 構造用スギ集成材 (E65-F225 対称異等級)
	② 構造用カラマツLVL (120E-385F 35V-23H)
ビス	品名・型番：Xポイントビス (フカミドリ) 6 x 90
接着剤	PU1000
面材-軸組 (ビス)	2列千鳥配置 ピッチ@75、1列配置 ピッチ@150
柱脚柱頭補強金物	品名：高耐久フレックスホールダウン60
	製造：BXカネシン株式会社
	その他：柱頭部1個 柱脚部 2個

試験体の含水率測定結果を表 3.2 に示す。含水率は、高周波容量式木材水分計（HM-520(株)ケックト科学研究所）を用い、3ヶ所測定の平均値とした。

表 3.3 試験体の含水率、比重 測定結果

項目	No.	横架材 (上)	柱 (加力)	柱 (非加力)	横架材 (下)	面材
含水率 (平均) (%)	1	16.30	16.50	13.50	14.80	7.20
	2	16.30	12.30	14.00	15.60	7.20
	3	15.10	15.10	14.80	13.00	7.80
	4	17.60	16.30	14.00	17.50	7.70
	5	18.50	14.60	9.30	18.30	7.70
	6	19.30	14.10	15.80	15.30	6.80
	7	6.10	6.00	6.60	7.80	7.00
	8	6.00	7.50	6.50	15.50	7.30
	9	5.50	5.80	5.60	14.10	8.00
	10	7.10	7.80	6.80	14.30	7.50
	11-1	8.16	8.83	9.50	13.16	8.00
	11-2	11.16	6.00	6.50	8.33	7.70
	11-3	7.66	8.83	8.83	11.16	7.20
	12-1	7.50	9.66	12.83	12.50	7.30
	12-2	7.16	6.66	6.33	10.00	8.00
	12-3	6.00	9.83	11.16	14.16	7.90
比重 (g/cm ³)	1	0.43	0.45	0.41	0.41	0.65
	2	0.44	0.42	0.43	0.44	0.51
	3	0.42	0.43	0.42	0.40	0.61
	4	0.63	0.66	0.65	0.63	0.65
	5	0.62	0.65	0.66	0.63	0.63
	6	0.62	0.65	0.66	0.61	0.64
	7	0.39	0.37	0.39	0.37	0.54
	8	0.36	0.36	0.36	0.41	0.53
	9	0.37	0.37	0.36	0.44	0.54
	10	0.38	0.40	0.35	0.40	-
	11-1	0.36	0.39	0.38	0.41	0.55
	11-2	0.39	0.37	0.36	0.36	0.53
	11-3	0.38	0.44	0.39	0.40	0.51
	12-1	0.34	0.39	0.39	0.43	0.51
	12-2	0.39	0.45	0.37	0.39	0.51
	12-3	0.38	0.39	0.38	0.43	0.53

接着剤は、セメダインのPU1000を使用した。ウレタン系接着剤である。セメダインが発行する施工要領書に従って塗布し、ビスで留め付けて圧縮、1週間以上の養生期間をとって試験に供した。

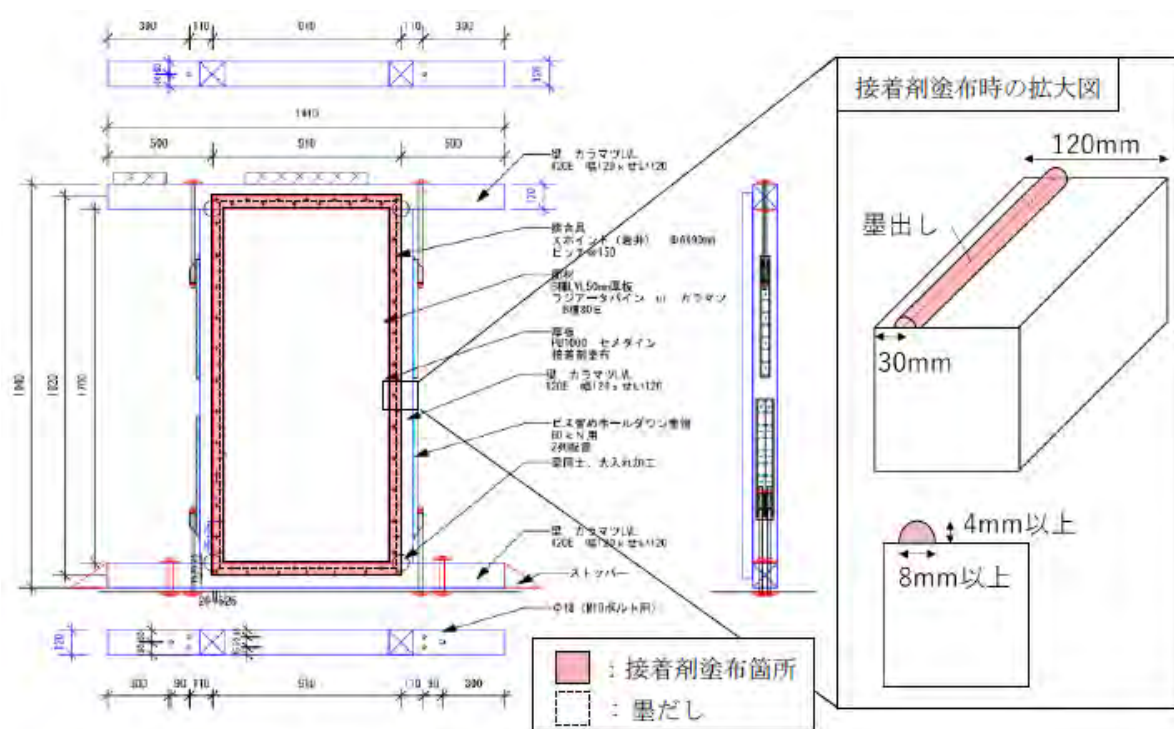


図 3-1 接着剤と施工要領

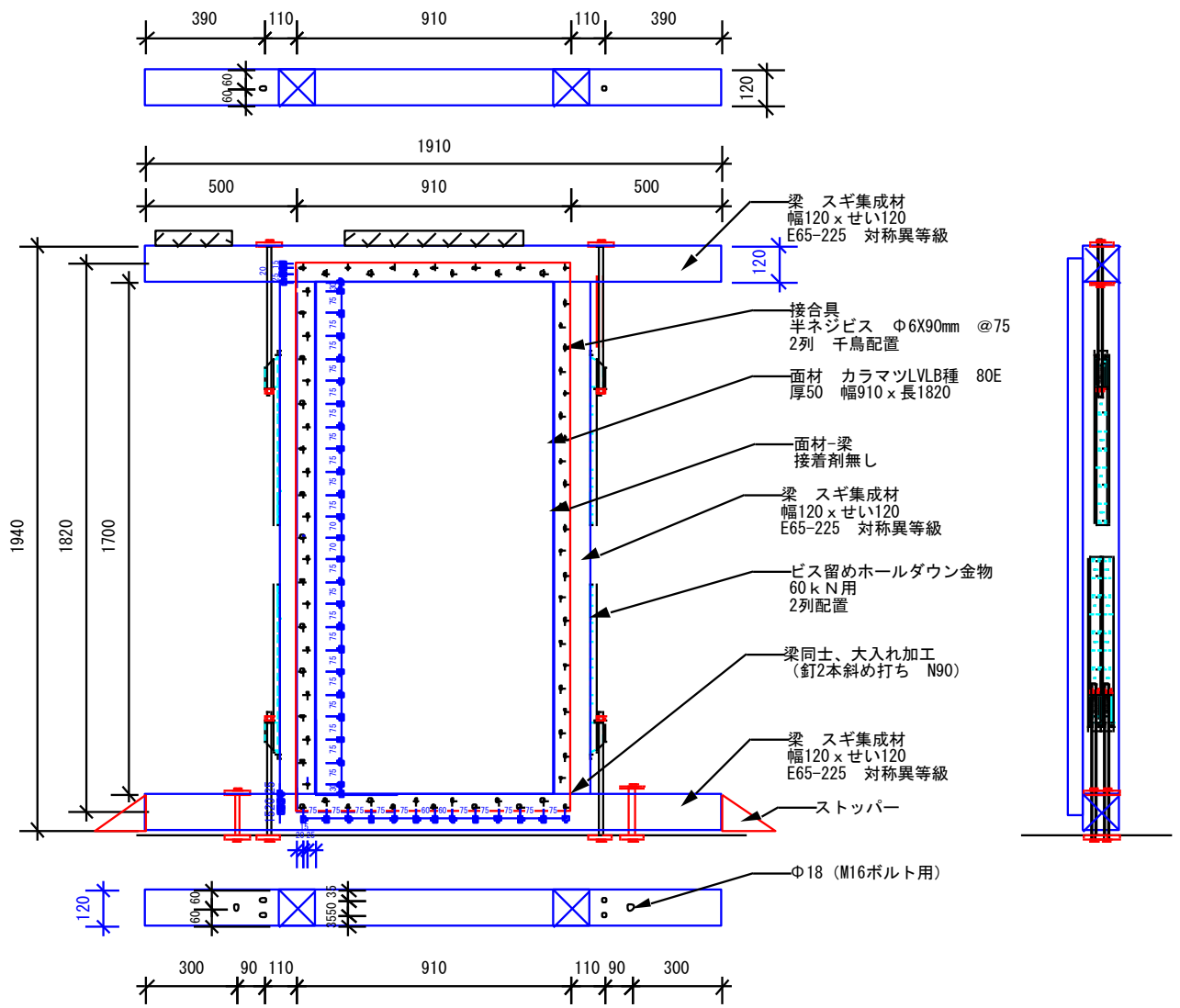


図 3-2 試験体 (No.1)

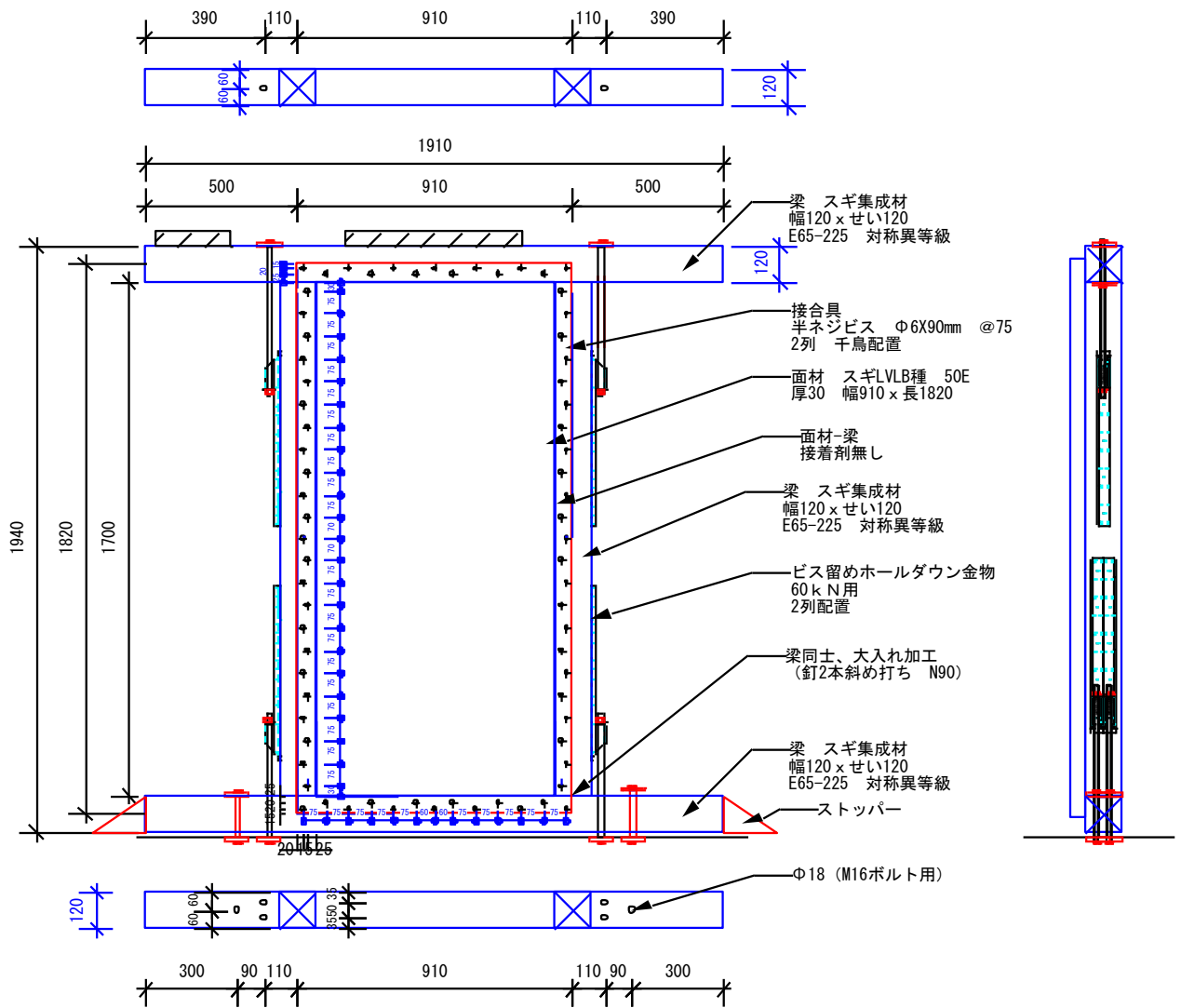


図 3-3 試験体 (No.2)

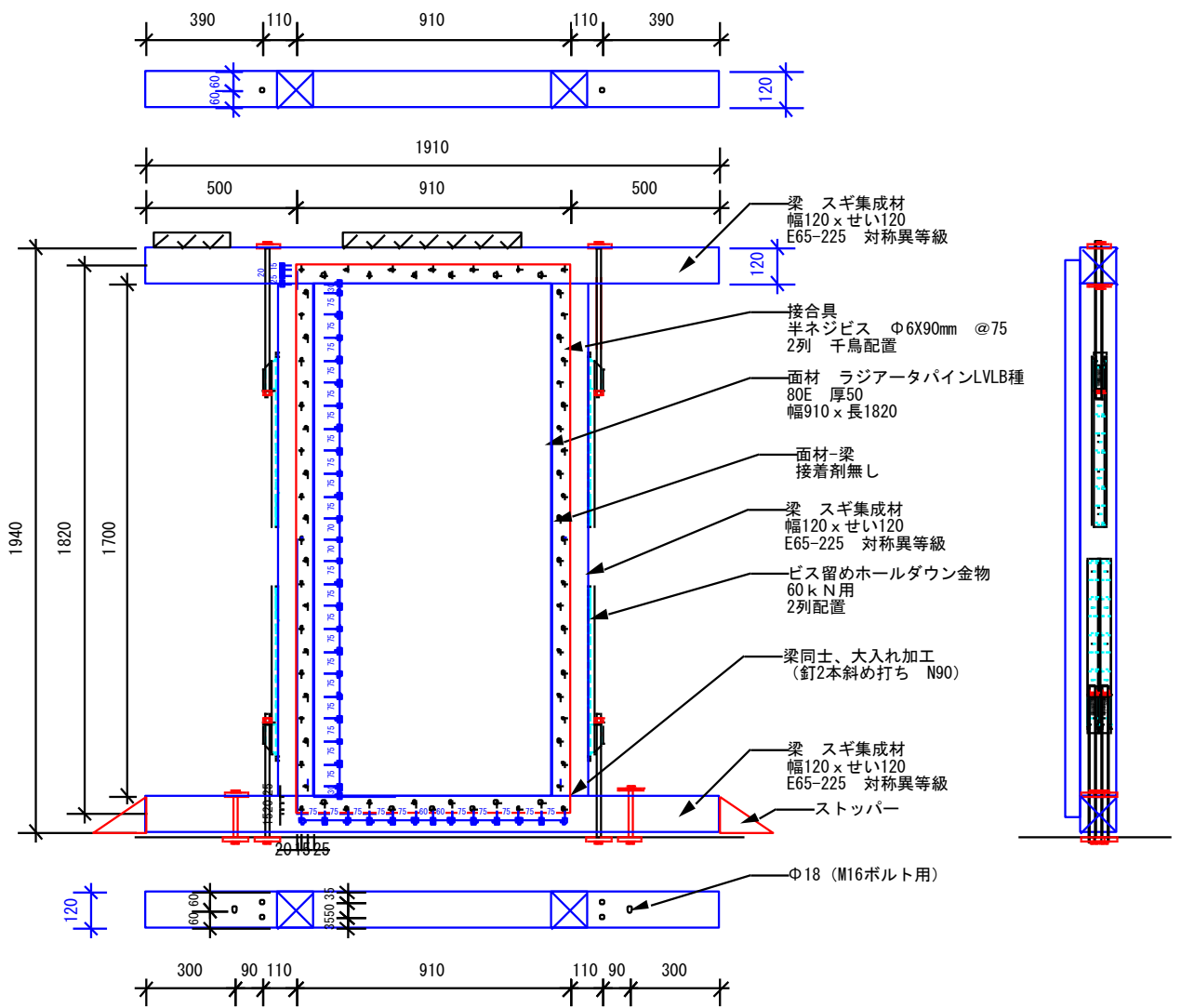


図 3-4 試験体 (No.3)

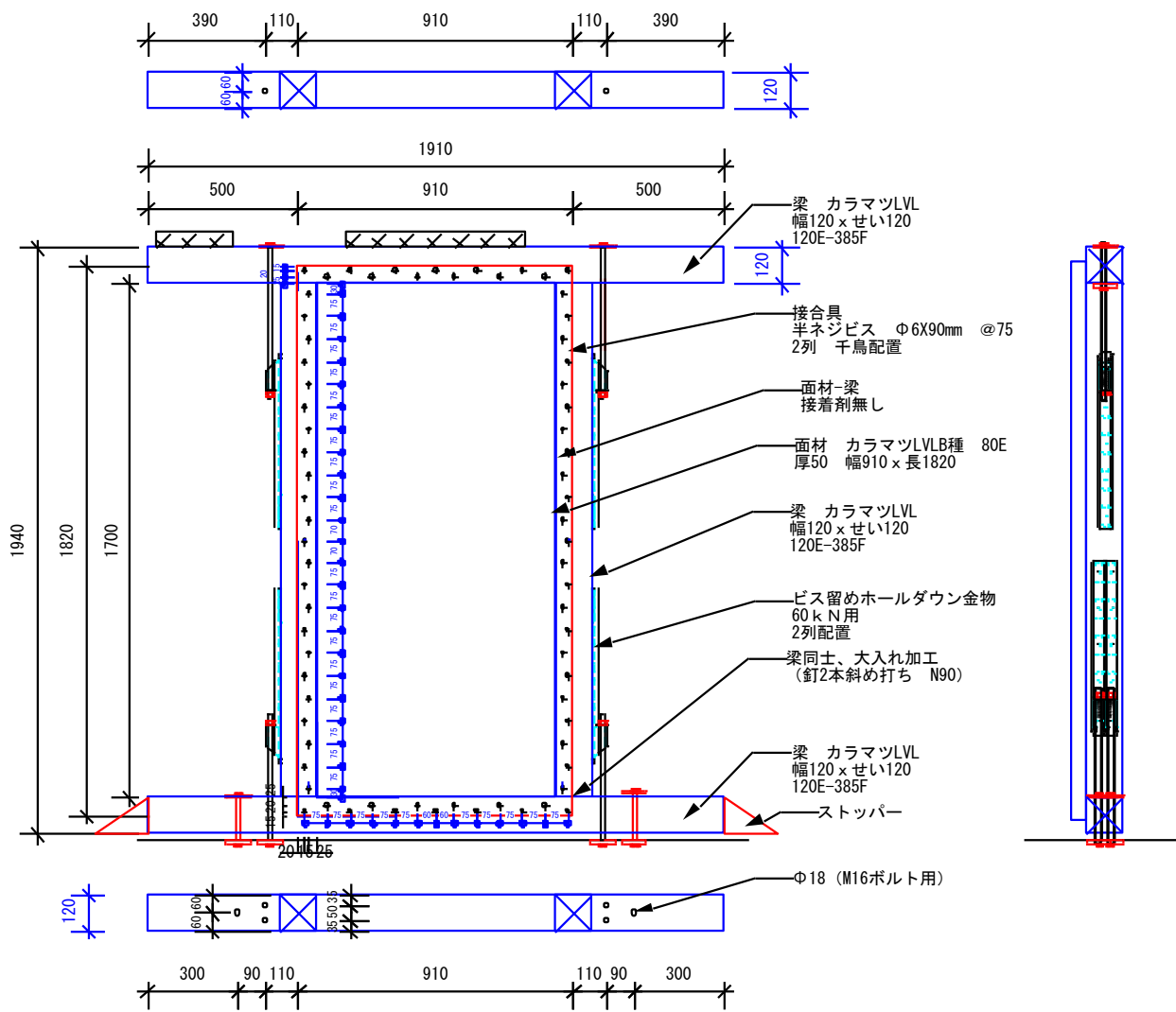


図 3-5 試験体 (No.4)

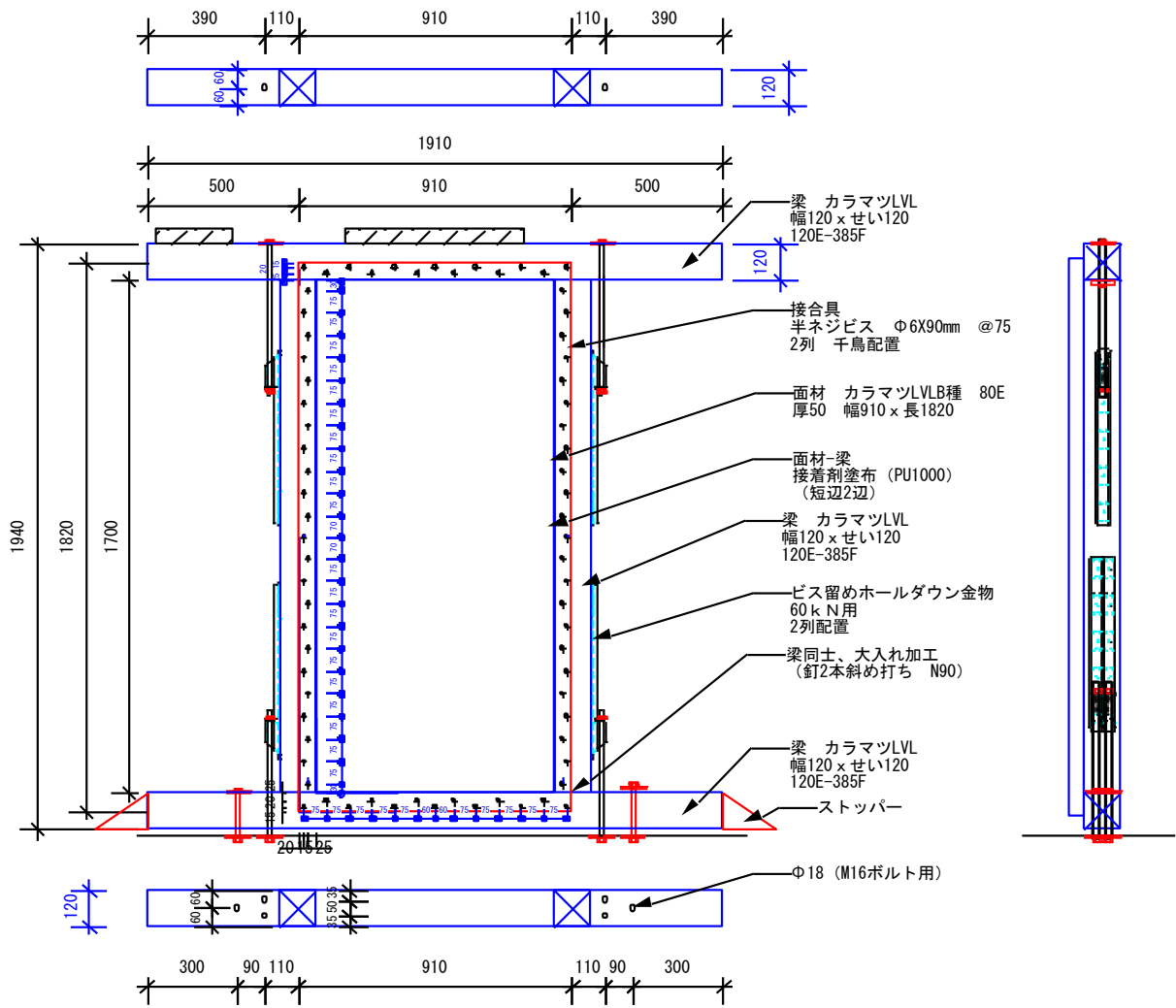


図 3-6 試験体 (No.5)

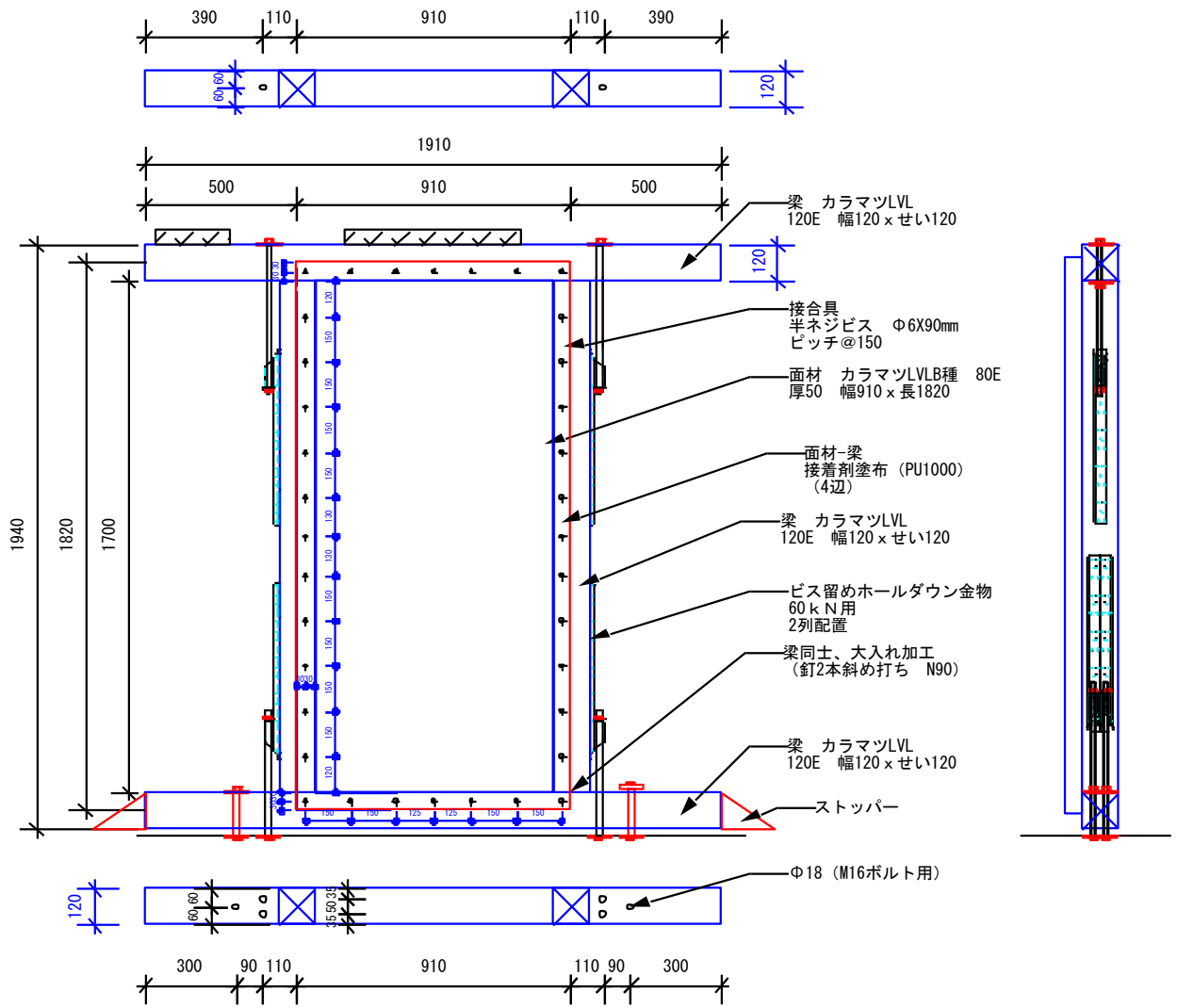


図 3-7 試験体 (No.6)

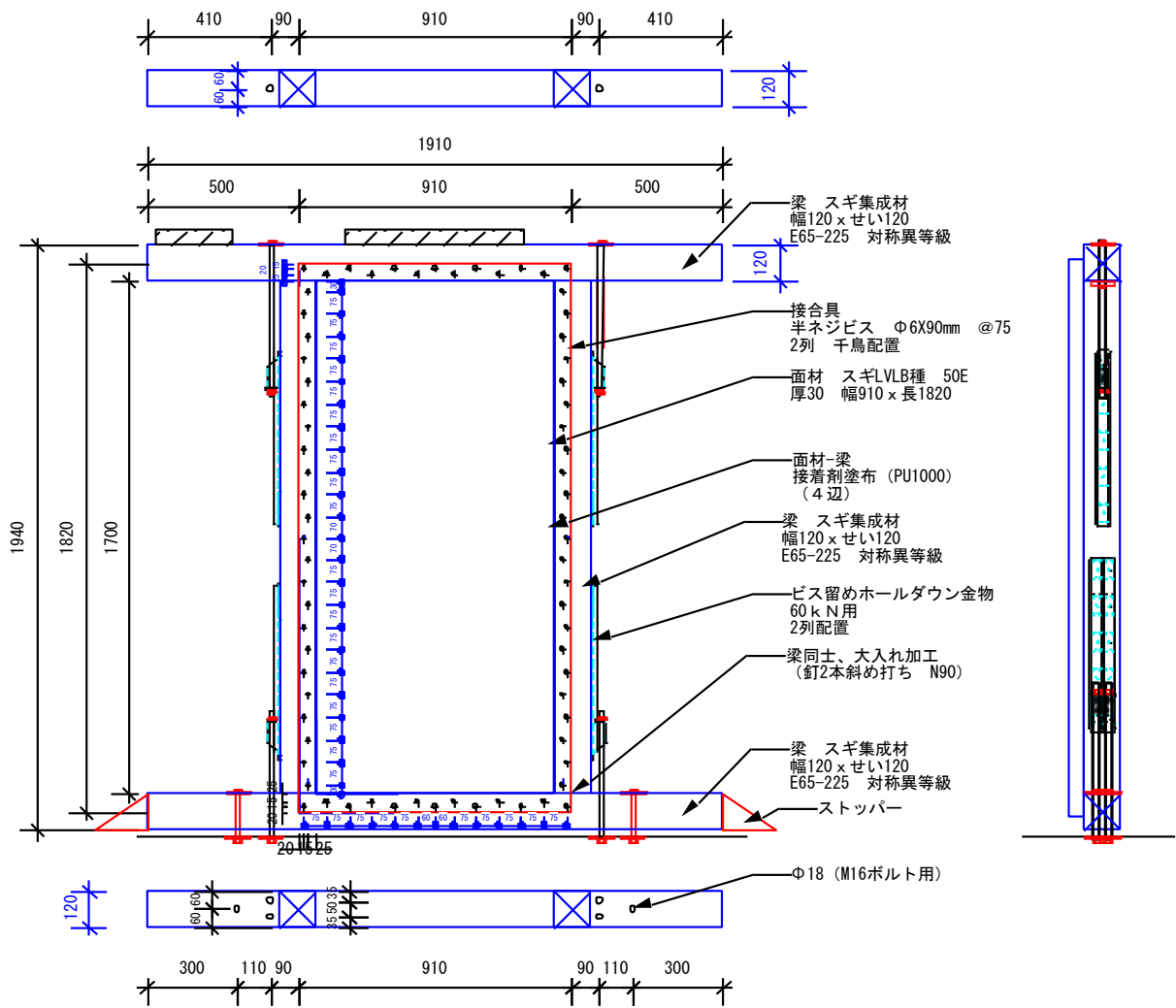


図 3-8 試験体 (No.7)

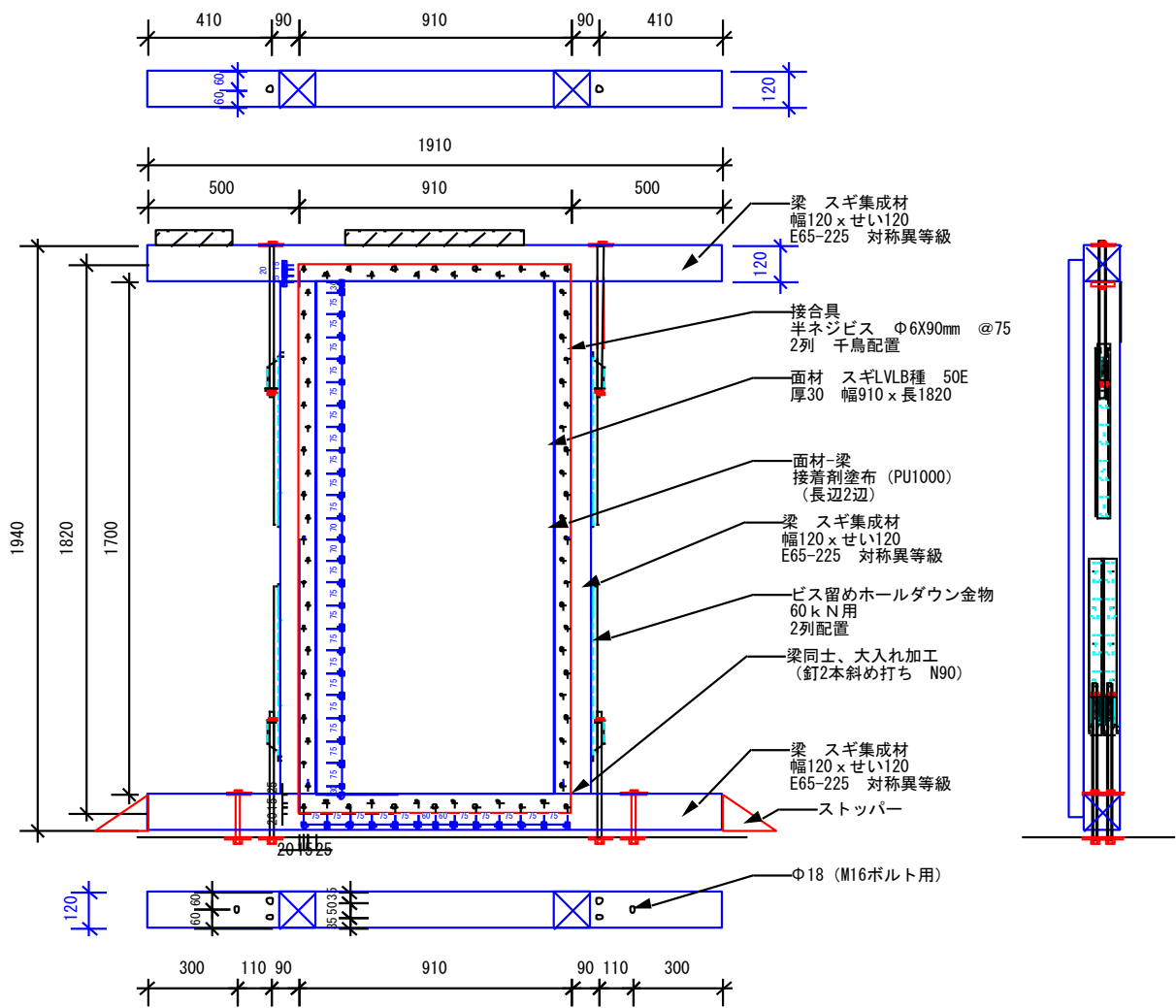


図 3-9 試験体 (No.8)

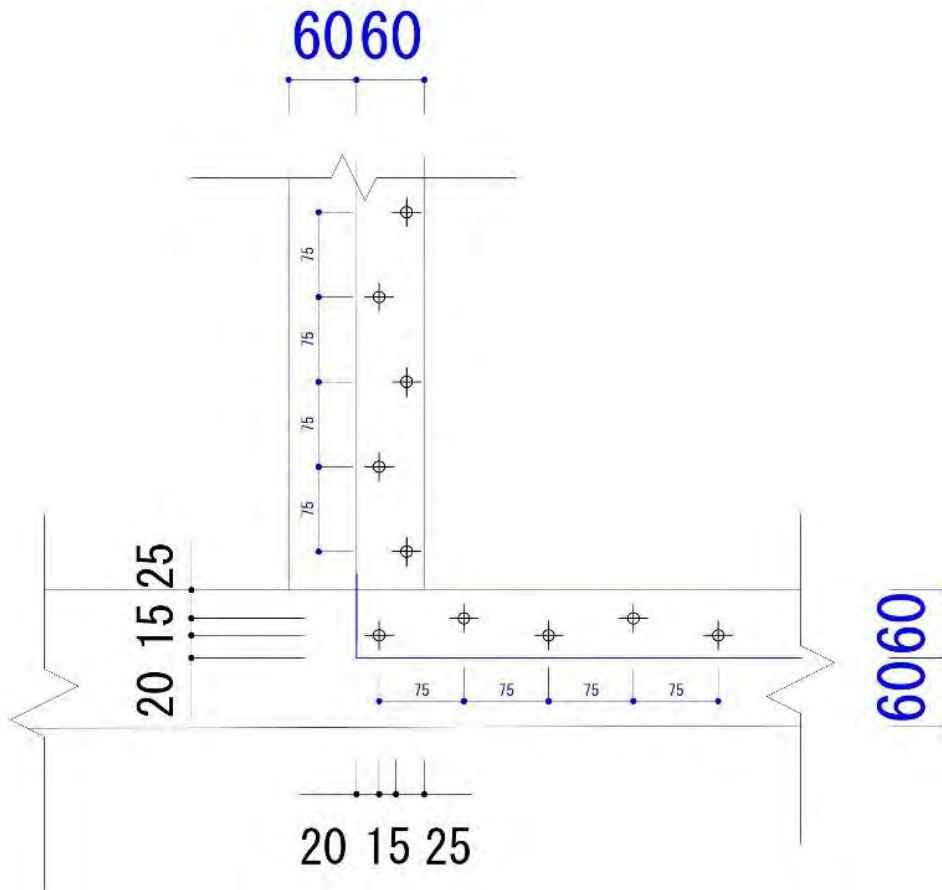


図 3-10 ビス位置拡大
 (No1~5、No7、No8、No11、No12)

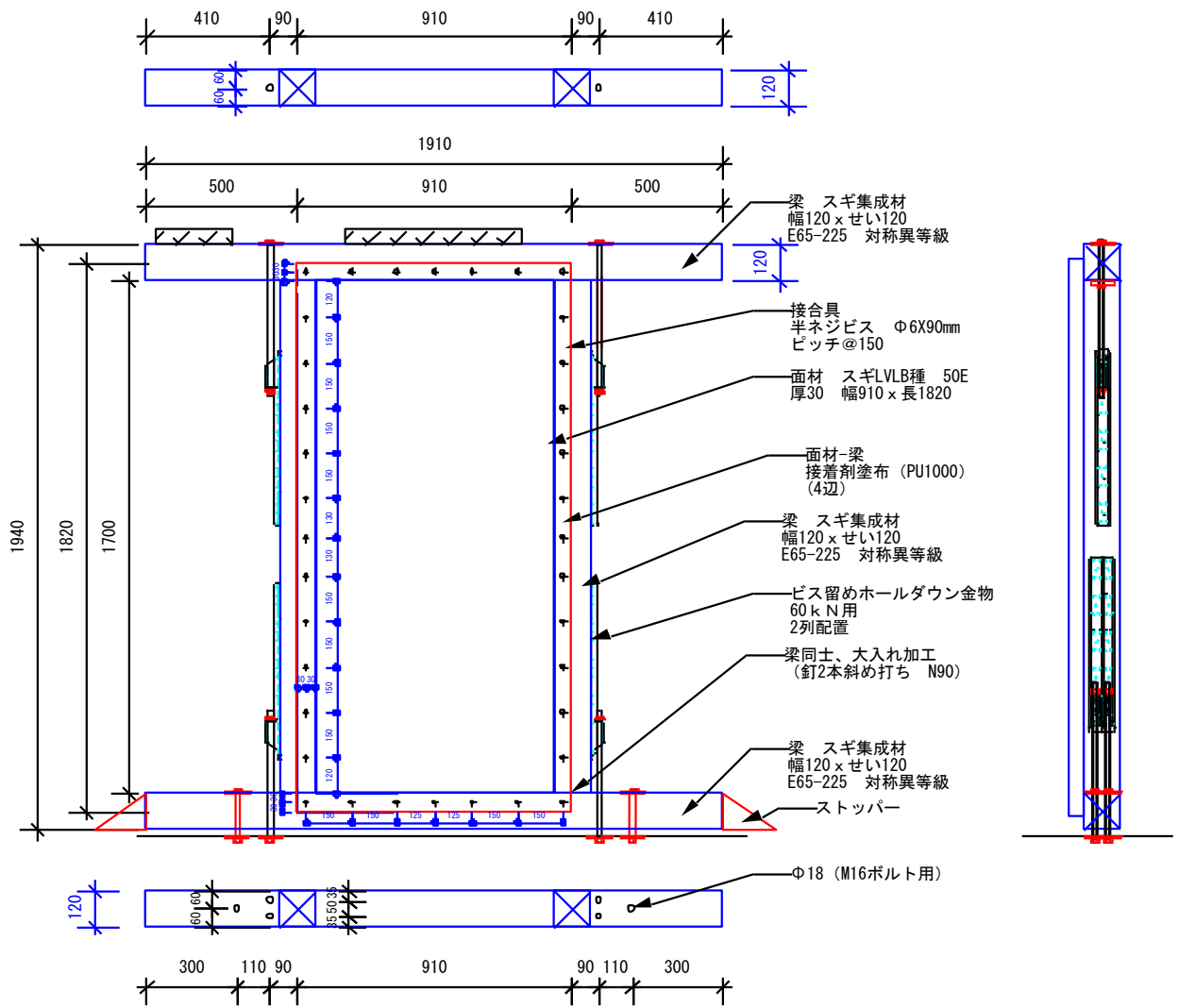


図 3-11 試験体 (No.9)

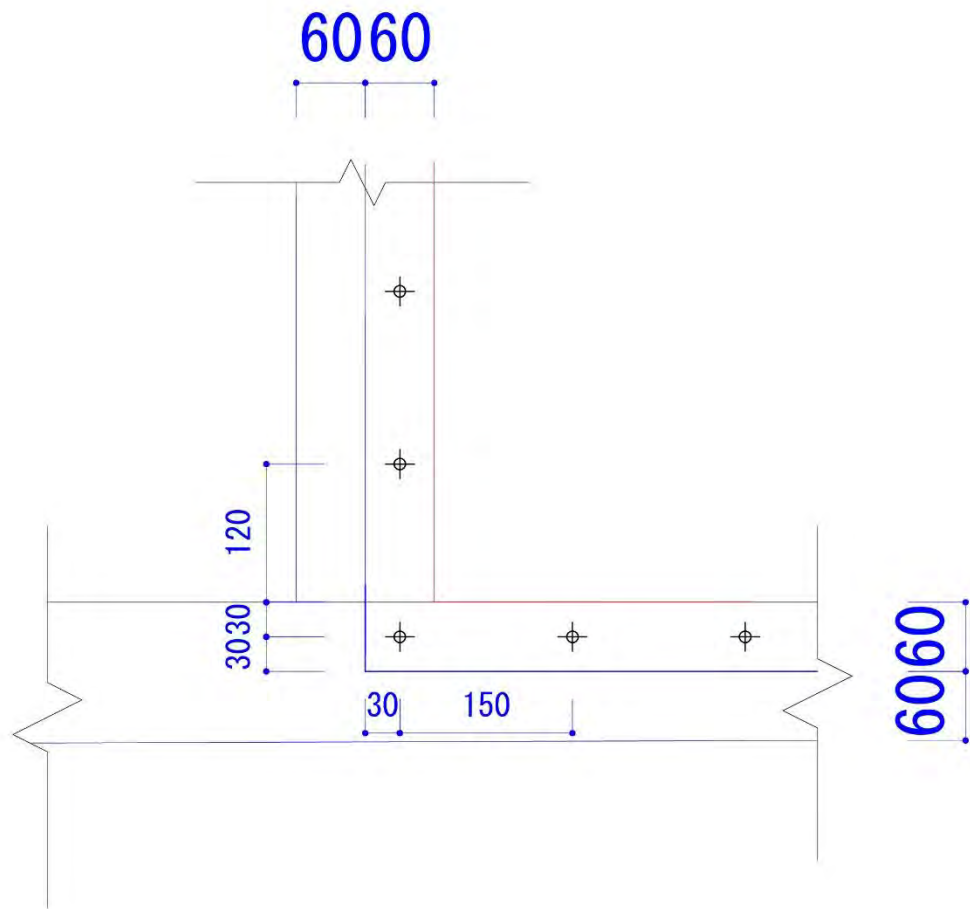


図 3-12 ビス位置拡大
(No6、No9)

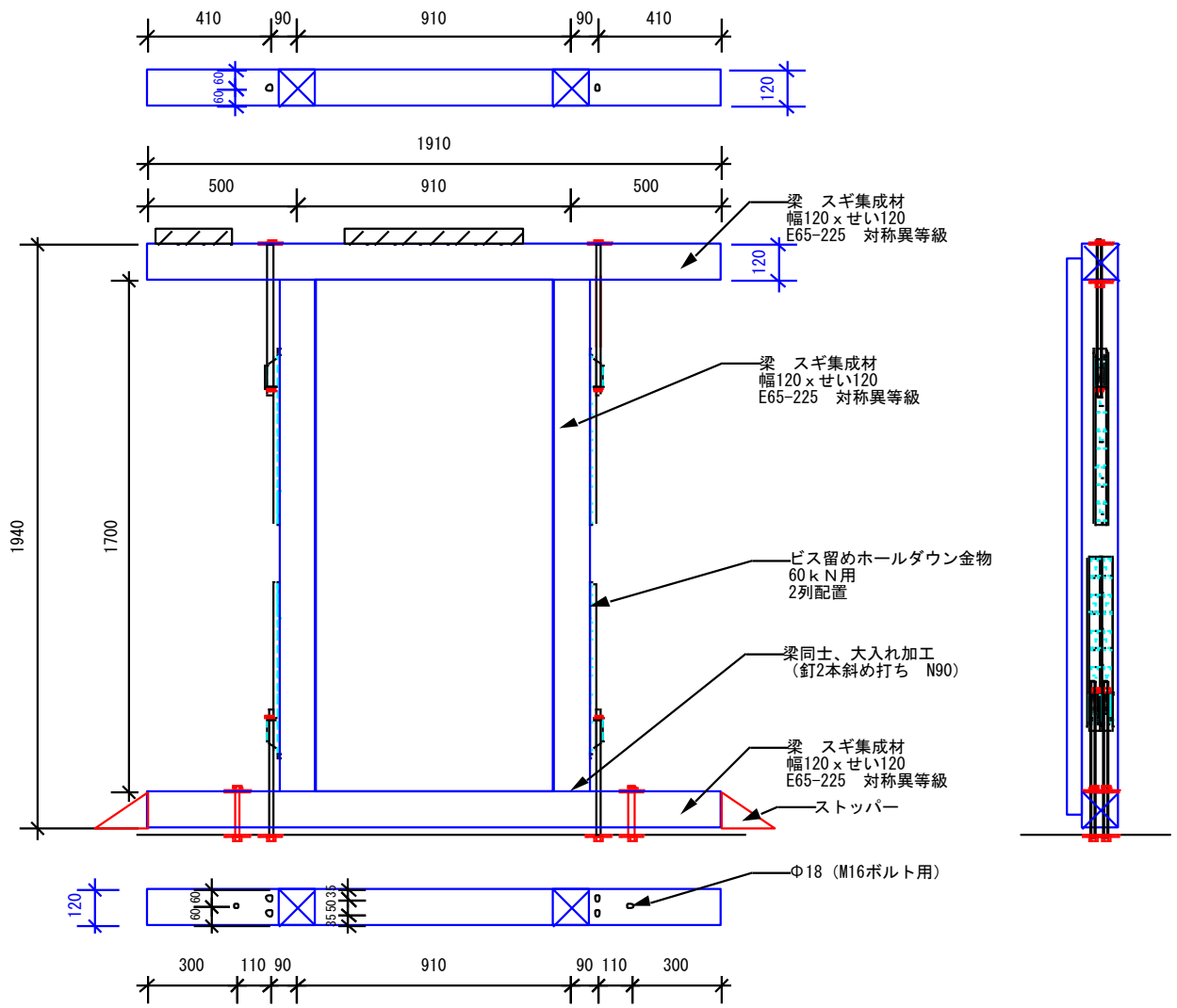


図 3-13 試験体 (No.10)

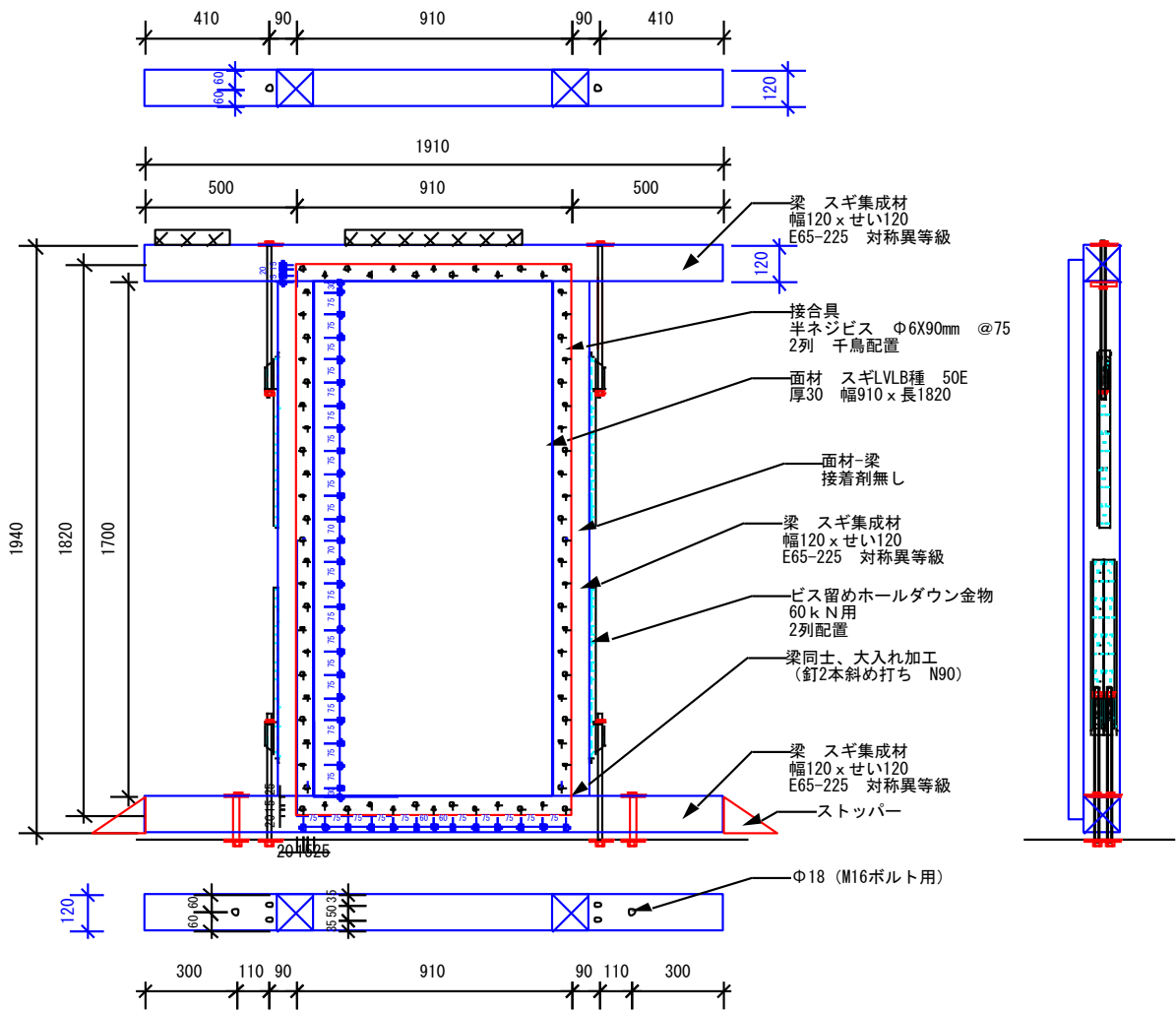


図 3-14 試験体 (No.11)

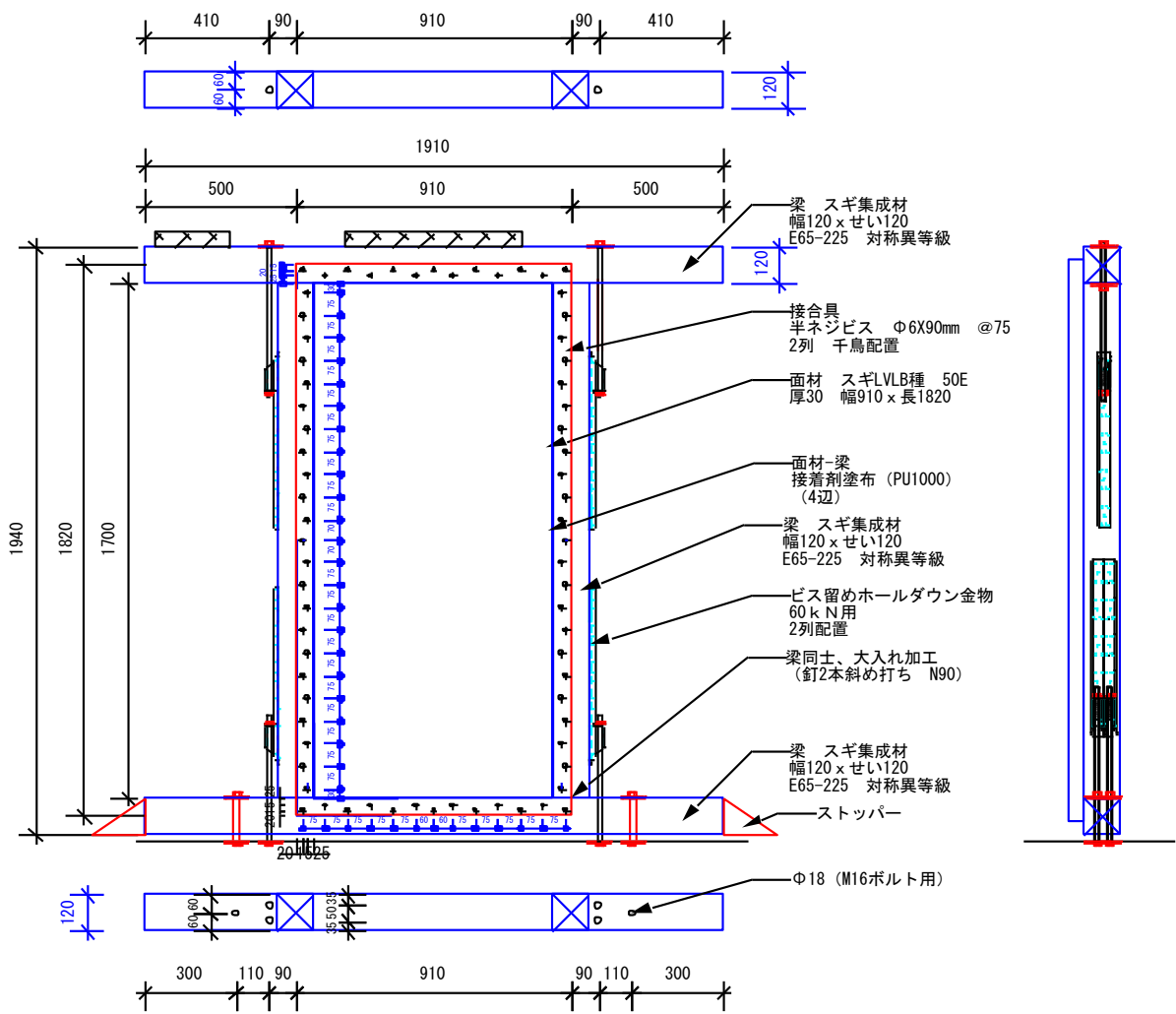


図 3-15 試験体 (No.12)



写真 3-1 試験体 (No.1)



写真 3-2 試験体 (No.2)



写真 3-3 試験体 (No.3)



写真 3-4 試験体 (No.4)



写真 3-5 試験体 (No.5)

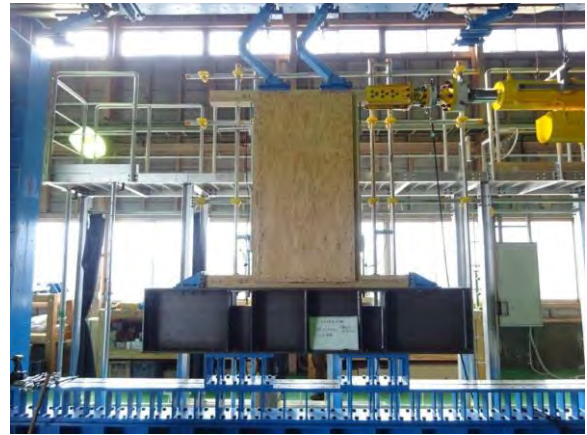


写真 3-6 試験体 (No.6)

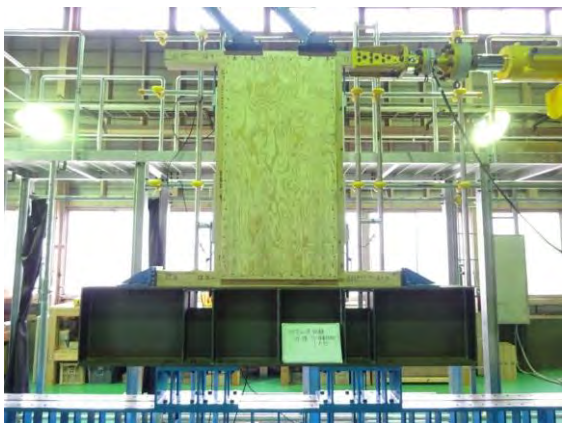


写真 3-7 試験体 (No.7)



写真 3-8 試験体 (No.8)



写真 3-9 試験体 (No.9)



写真 3-10 試験体 (No.10)



写真 3-11 試験体 (No.11-1)



写真 3-12 試験体 (No.11-2)

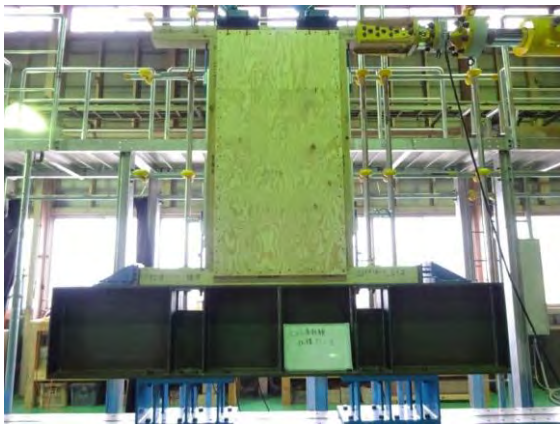


写真 3-13 試験体 (No.11-3)



写真 3-14 試験体 (No.12-1)



写真 3-15 試験体 (No.12-2)

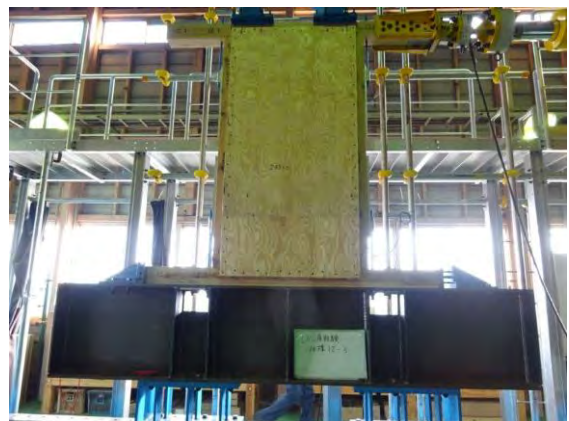


写真 3-16 試験体 (No.12-3)

3. 3. 1. 2 試験方法

試験は、木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017年版）第4章 試験方法と評価方法 4.5 面材・くぎ等1本あたりの一面せん断特性を算出するための試験に従った。

なお試験方法は、上述 4.5 の試験方法に従い、木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017年度）第4章 試験方法と評価方法 4.3.4 鉛直構面及び水平構面の剛性と許容せん断耐力を算定するための試験 4.3.4 試験方法とし、柱脚固定式において見かけの変形角で 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50rad 変形角で、水平構面に用いる接合仕様は、正負1回繰り返しを行った。

加力装置は、容量±500kN ストローク±300mm のハイブリッドアクチュエータ（㈱巴技研）とし、荷重はアクチュエータ先端に設置した±200kN 荷重計（㈱共和電業）で計測した。変位は、横架材水平変位2点（上下）及び鉛直部材鉛直変位2点（加力側、非加力側脚部）の計4点（いずれも㈱東京測器研究所）とした。荷重計、変位計の出力は、ハイブリッドアクチュエータのAD変換器を介してパーソナルコンピュータに記録した。

水平加力は、加力点高さ（ $h=1820\text{mm}$ ）に対して 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/50rad 変形角（見かけの変形）で床構面の場合、正負1回繰り返しを行い、正側 1/15rad を超えるまで加力した。なお加力途中で試験体が破壊する、もしくは最大耐力の80%まで耐力が低下したことが確認された段階で、試験を終了した。なおジャッキ水平変位で正は引き側とした。

荷重及び変位は、アクチュエータ引き方向を正、鉛直方向変位は上を正とした。

3. 3. 1. 3 結果

各試験体について、No.10 のフレームの荷重変形曲線を差し引いたうえで、参考値として特定値算出ソフト PicPoint で包絡線および特性値を算出した。荷重-変位曲線はフレームの曲線を差し引く前のものを示した。No.4,5,6 は躯体に LVL を使用しており、本来ならば LVL のみのフレーム曲線を差し引くものであるが、ここではスギ集成材フレームを差し引いた結果を使用している。

荷重変形曲線、フレームを差し引いた特性値評価を図 3-16 から図 3-31 に示した。写真を写真 3-17 から写真 3-32 に示した。

表 3-1 仕様（再掲載）

		予備試験										本番試験		
試験体No.		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	
試験体数		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	
概要		躯体スギ厚板50	躯体スギ厚板30	躯体スギ厚板50 樹種違	躯体LVL 接着無し	躯体LVL 接着有り 短辺2辺	躯体LVL 接着有り 4辺	躯体スギ 接着有り 4辺	躯体スギ 接着有り 長辺2辺	躯体スギ 接着有り 4辺@150	躯体スギ フレームのみ 910×1820	躯体スギ 接着無し 910×1820	躯体スギ 接着有り 4辺 910×1820	
梁 1	集成材	○	○	○					○	○	○	○	○	
	LVL				○	○	○							
	樹種	スギ集成 65E	○	○	○				○	○	○	○	○	
	カラマツLVL 120E				○	○	○							
	断面	幅120×せい120	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
梁 2	梁 1 と同じ													
梁-梁 接合	HD金物	高耐久フレックスホール ダウン60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	大入れ	釘2本うち												
床版	材料	構造用LVL B種	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	
	樹種	カラマツ E80	○			○	○	○				×		
		ラジアータバイン E80			○							×		
		スギ E50		○					○	○	○	×	○	
厚み	50mm	○	○	○	○	○	○				×			
	30mm		○					○	○	○	×	○		
ビス	材料	Xpoint若井 φ6×90	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	
	ピッチ	75mm 千鳥	○	○	○	○	○	○	○	○		×	○	
		150mm 一列							○		○	×		
接着剤	無し		○	○	○	○						×	○	
	有り	PU1000 セメダイン					○	○	○	○	○	×	○	
		塗布ライン 短辺2辺					○					×		
		塗布ライン 四辺						○	○		○	×	○	
	塗布ライン 長辺2辺								○		×			

表 3-3 特定値まとめ 荷重変形曲線

試験体番号		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11-1	No.11-2	No.11-3	No.12-1	No.12-2	No.12-3
Pmax	kN	53.05	67.77	53.07	68.61	68.22	94.35	79.79	72.57	69.59	10.20	51.12	52.54	55.38	73.78	77.40	82.76
D(Pmax)	kN	70.50	144.00	77.50	144.00	144.00	88.50	64.50	64.00	69.00	143.50	79.50	118.50	125.00	45.50	61.50	78.50
D(0.1Pmax)	kN	2.45	3.17	2.18	2.91	3.60	4.98	3.61	3.85	3.95	8.50	2.37	2.79	3.26	3.36	3.97	4.63
D(0.4Pmax)	kN	10.57	19.07	10.53	13.32	13.72	17.38	14.40	14.17	13.50	36.25	11.24	12.63	12.54	14.04	13.93	17.12
D(0.9Pmax)	kN	44.35	143.65	46.52	70.72	91.98	61.39	46.31	46.15	50.11	117.75	48.93	65.68	64.82	38.58	47.16	53.57
曲線に接する点P		39.27	55.03	36.30	52.15	56.93	62.16	58.66	50.27	50.11	6.46	37.74	37.86	39.36	55.15	64.47	53.65
曲線に接する点D		27.50	84.50	24.00	42.50	46.50	33.00	31.00	28.50	27.50	67.50	30.50	33.50	34.00	28.50	34.00	30.50
二直線の交点Py	kN	29.16	39.97	29.60	37.85	46.86	52.22	45.63	39.82	43.69	5.06	27.40	30.44	30.44	43.68	51.20	45.59
二直線の交点D(Py)	kN	14.62	29.13	14.92	18.58	23.40	23.73	20.57	19.29	20.75	45.15	15.26	18.52	17.16	20.87	22.61	23.40
曲線上の点 δy	mm	16.85	40.10	17.05	22.76	29.89	26.24	22.26	20.65	22.74	48.39	17.60	22.22	20.61	21.42	25.11	24.78
D(0.8Pmax): δu	mm	112.50	155.50	115.00	164.00	169.50	91.50	87.50	65.50	71.50	143.50	139.00	138.50	138.00	45.50	79.00	86.00
初期剛性K	kN/rad	1.73	1.00	1.74	1.66	1.57	1.99	2.05	1.93	1.92	0.10	1.56	1.37	1.48	2.04	2.04	1.84
Pu	kN	49.46	58.83	49.04	60.92	61.23	85.23	74.00	65.16	62.79	8.73	48.27	48.70	51.19	66.28	72.88	76.03
D(Pu): δv	mm	28.59	59.02	28.24	36.62	39.06	42.82	36.10	33.78	32.68	83.45	31.01	35.54	34.65	32.51	35.74	41.32
μ = δu / δv		3.94	2.63	4.07	4.48	4.34	2.14	2.42	1.94	2.19	1.72	4.48	3.90	3.98	1.40	2.21	2.08
Ds=1/sqrt(2μ-1)		0.38	0.48	0.37	0.35	0.36	0.55	0.51	0.59	0.54	0.64	0.35	0.38	0.38	0.75	0.54	0.56
Energy		4857.02	7411.38	4946.88	8875.25	9182.74	5973.64	5139.10	3167.18	3463.55	888.28	5961.73	5879.09	6177.66	1938.46	4455.06	4967.91

No.1 から No.6 では、面材接着無し、ビスピッチを統一した上で、仕様で、躯体と面材材料を検討した。躯体はスギ集成材 30mm 厚とし、面材はスギ LVL30mm 厚、カラマツ LVL50mm 厚、ラジアータパイン LVL50mm 厚とした。カラマツとラジアータパインは同じ厚みであることもあり、ほぼ同程度の性能であった。

No.7,8,9 では、面材をスギ LVL30mm として躯体にビス接着し、接着剤が剛性や靱性に及ぼす影響を検討した。No.7 は最大耐力に達した後同ビスピッチ 75mm の No.2 の曲線にほぼ重なった。残念ながら 0.8Pmax を下回り、特性値評価はそこで切らざるを得なかったが、当初の、接着して剛性をあげ、かつ靱性を確保するという性能を得ることができた。No.8 では4辺の接着では性能があがりすぎるのではないかとということで長辺2辺のみの接着とした。土台と柱が破断し、早期に終了した。No.9 ではビスピッチを 150mm に開けた。こちらも土台と柱が早期に破断して終了した。

これらの結果を踏まえた上で、同仕様3体のデータを収集する仕様を決定した。躯体は性能提示において汎用性のあるスギ集成材梁を採用した。面材は性能とコストのバランス、および国産材であることの2つからスギ LVL30mm 厚を採用した。ビスピッチは 75mm 千鳥とし、これらの仕様で、No.11 接着無し No.12 接着有りとし、3体ずつ実施した。

No.11 では3体とも問題なく性能を確保した。No.12のうち、No.12-1では、1/50rad 前後でアクチュエータがつかむ梁付近で早期に破断した。梁の在来仕口部分の欠損部分が引張側にきており、引張で終了すると試験途中で破断する可能性が高かったので、No.12-2 と 3 は押しで終了とすることにした。どちらで終了しても評価は同等ということを建材試験センターの早崎委員に確認した上で試験を行った。

3. 3. 1. 3の接合部評価に使用する3体ずつの評価は、接着無しは No.11-1,2,3 の3体、接着有は No.7、No.12-2、No.12-3 の3体を採用した。

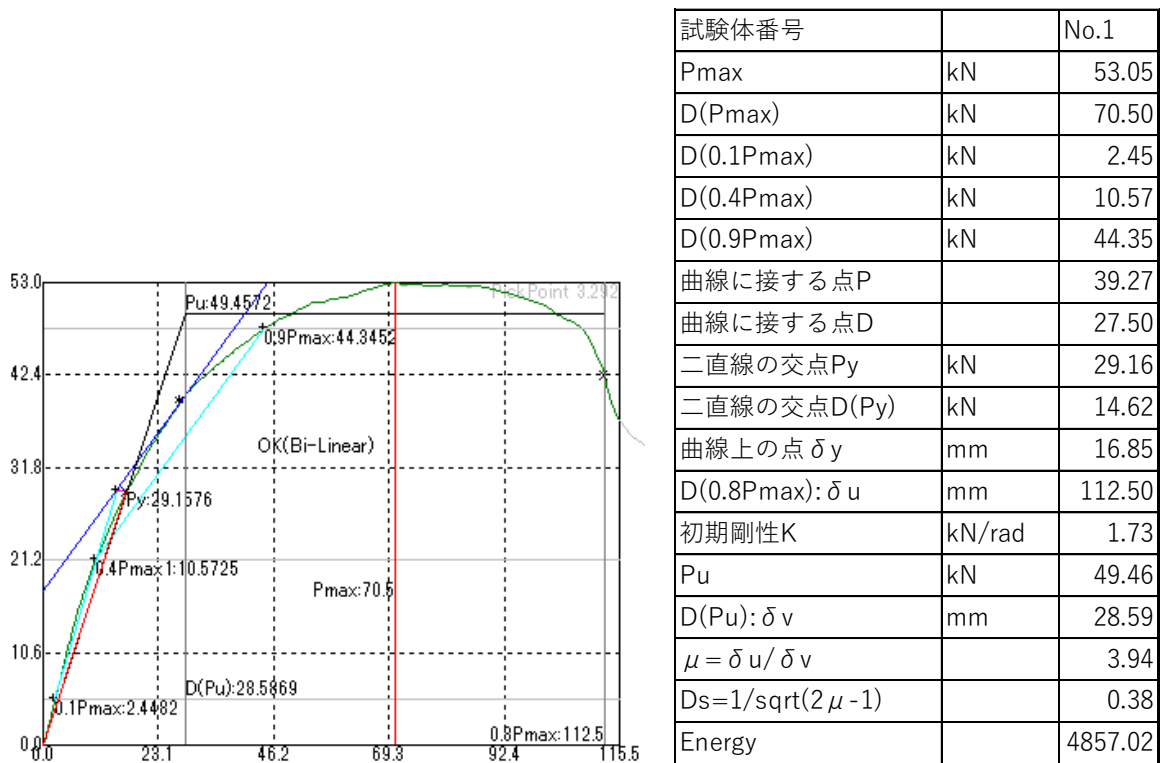
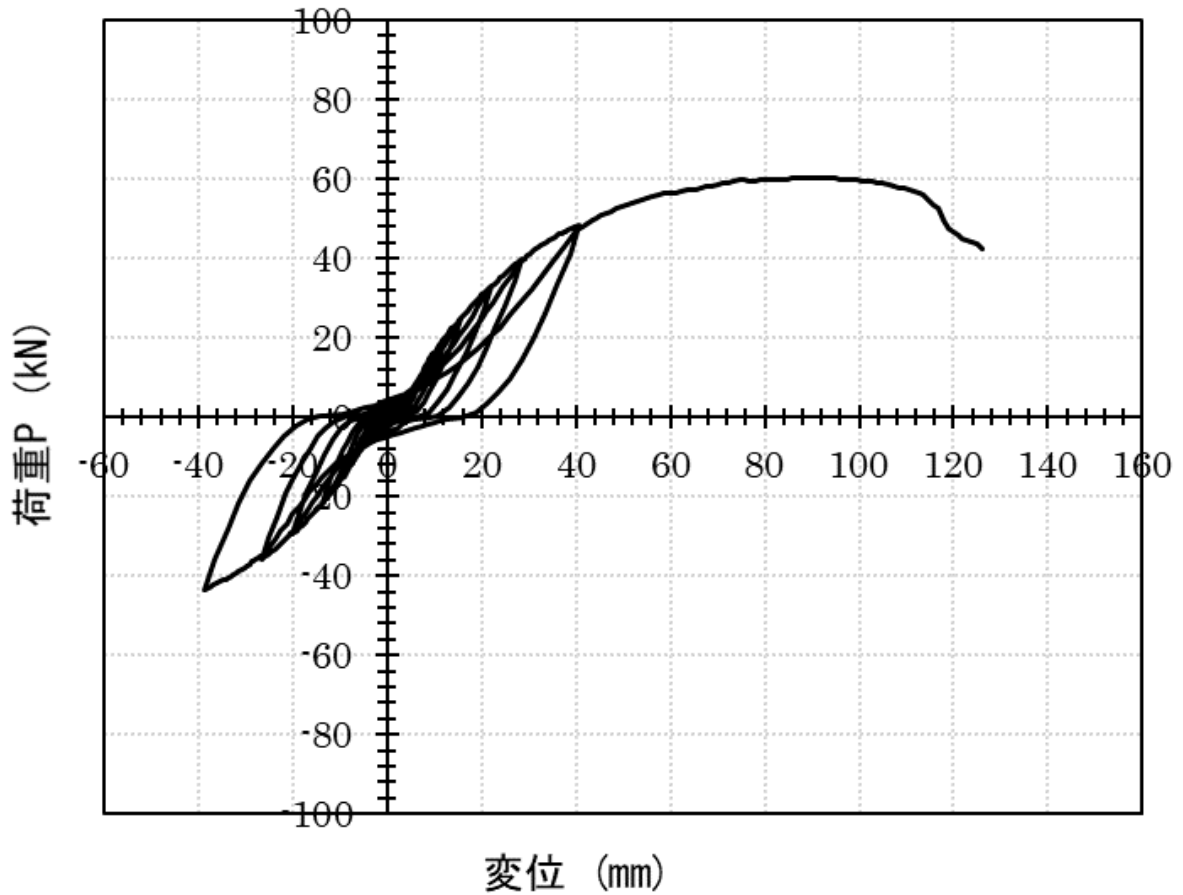


図 3-16 荷重変位曲線・特定値 No.1

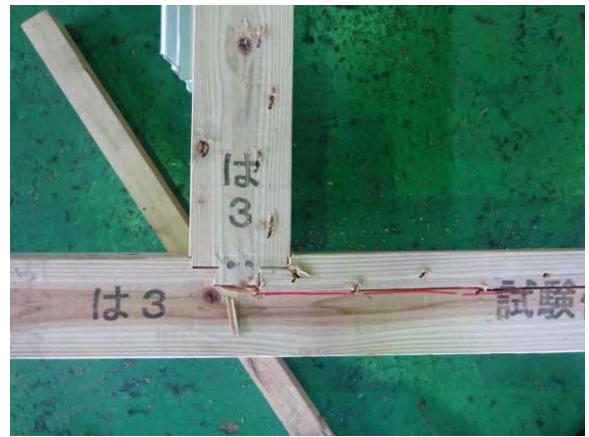
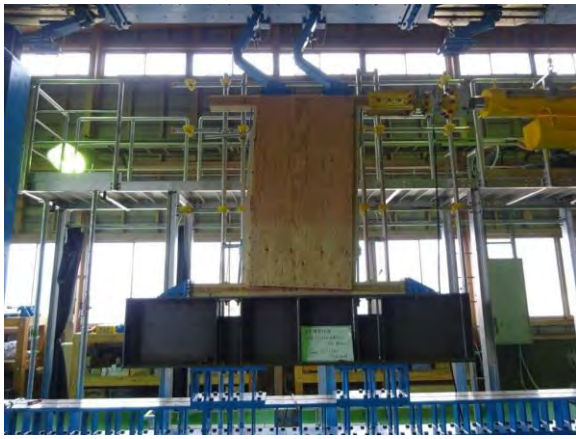
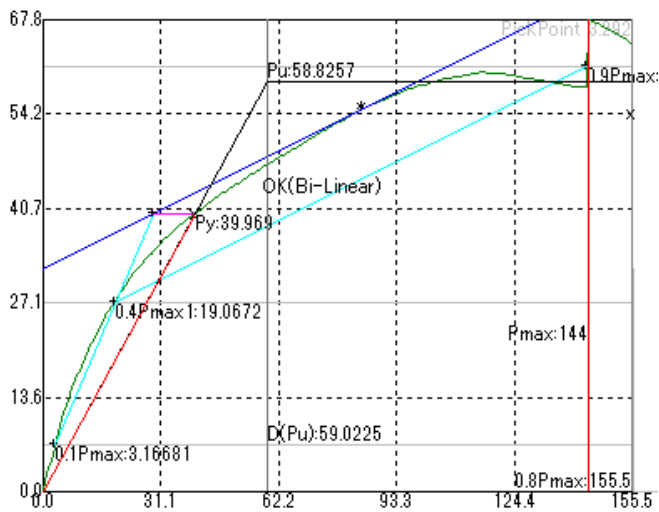
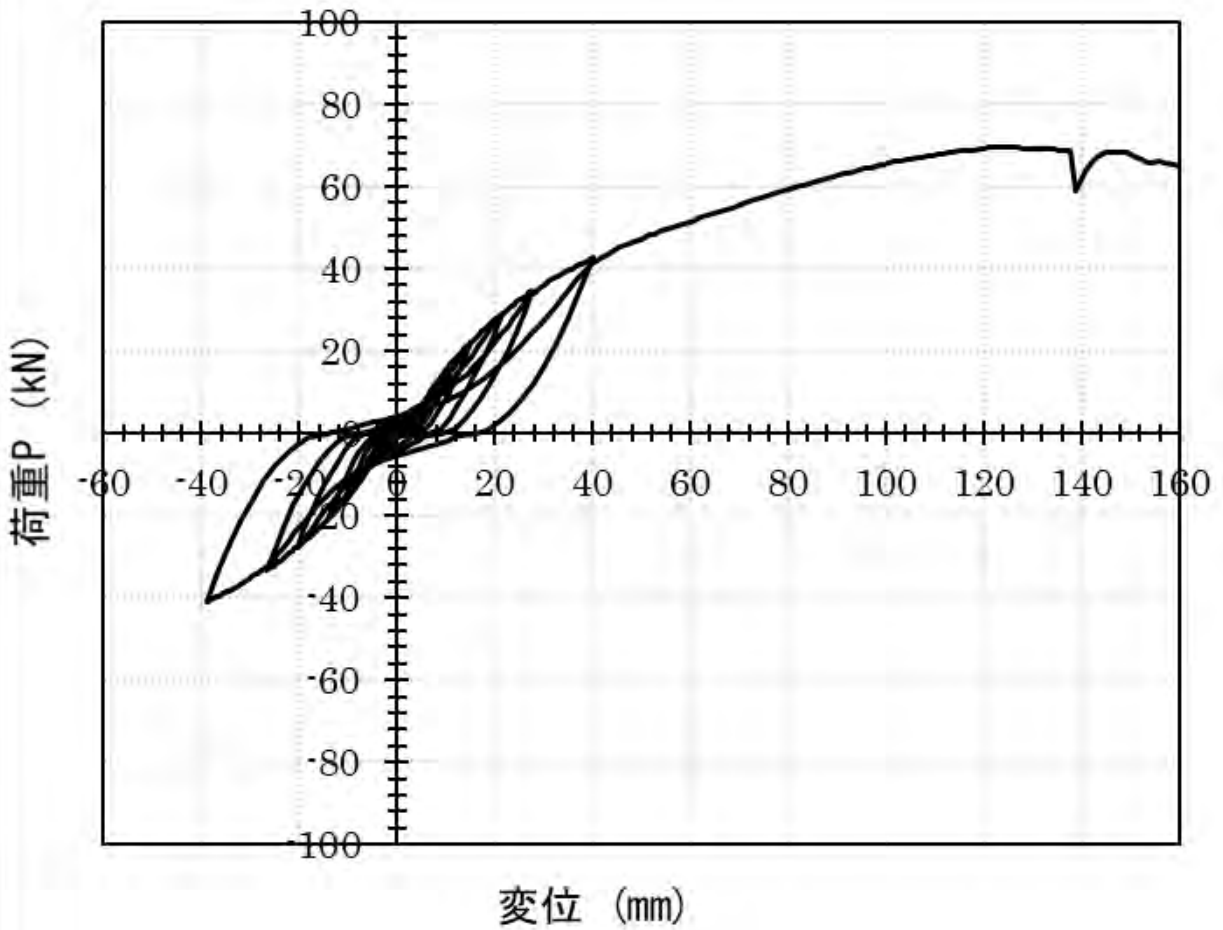


写真 3-17 試験体写真 (No 1)

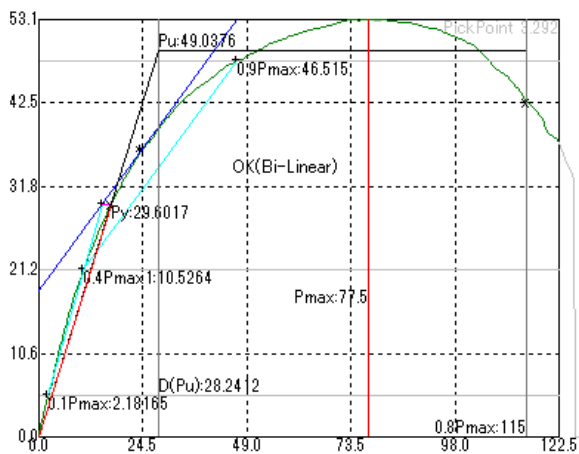
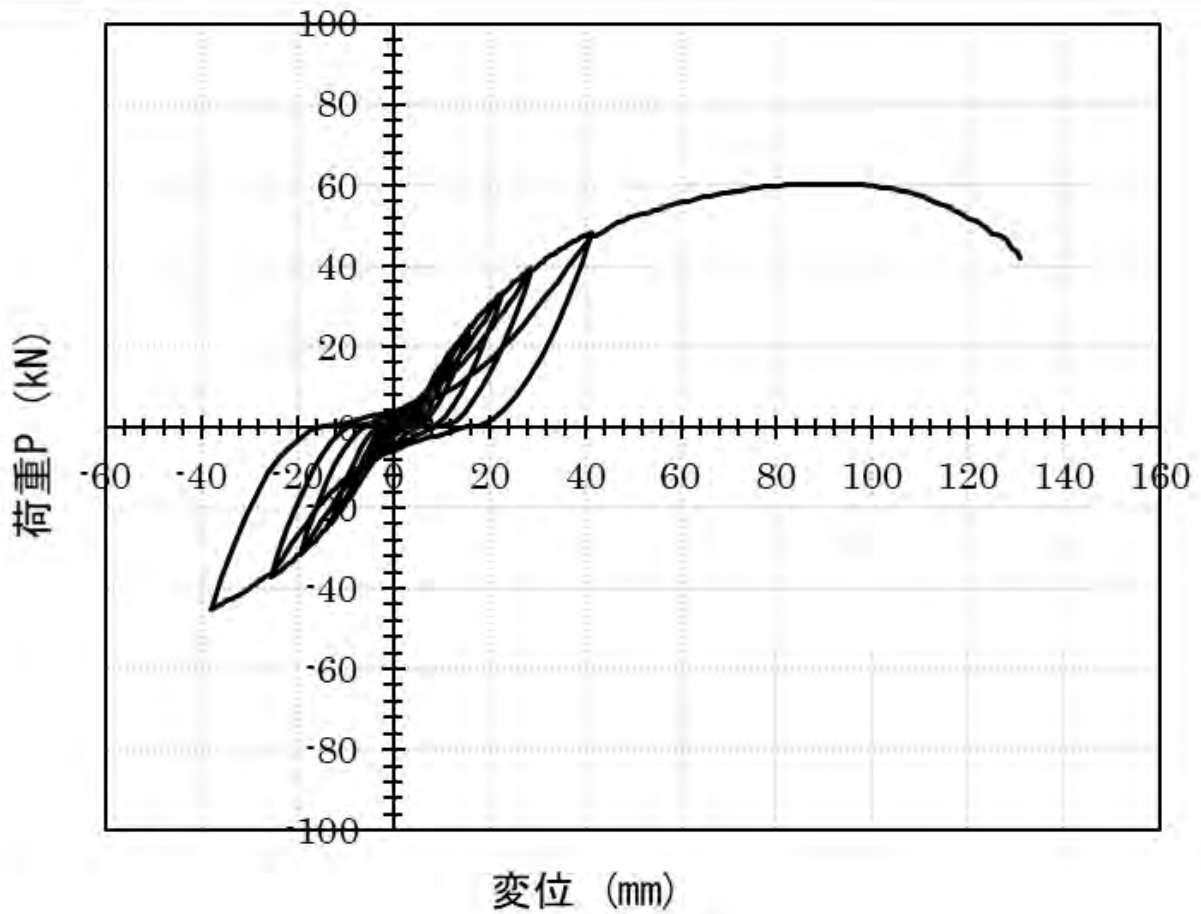


試験体番号		No.2
Pmax	kN	67.77
D(Pmax)	kN	144.00
D(0.1Pmax)	kN	3.17
D(0.4Pmax)	kN	19.07
D(0.9Pmax)	kN	143.65
曲線に接する点P		55.03
曲線に接する点D		84.50
二直線の交点Py	kN	39.97
二直線の交点D(Py)	kN	29.13
曲線上の点 δy	mm	40.10
D(0.8Pmax): δu	mm	155.50
初期剛性K	kN/rad	1.00
Pu	kN	58.83
D(Pu): δv	mm	59.02
$\mu = \delta u / \delta v$		2.63
Ds=1/sqrt(2 μ -1)		0.48
Energy		7411.38

図 3-17 荷重変位曲線・特定値 No.2



写真 3-18 試験体写真(No2)



試験体番号		No.3
Pmax	kN	53.07
D(Pmax)	kN	77.50
D(0.1Pmax)	kN	2.18
D(0.4Pmax)	kN	10.53
D(0.9Pmax)	kN	46.52
曲線に接する点P		36.30
曲線に接する点D		24.00
二直線の交点Py	kN	29.60
二直線の交点D(Py)	kN	14.92
曲線上の点 δy	mm	17.05
D(0.8Pmax): δu	mm	115.00
初期剛性K	kN/rad	1.74
Pu	kN	49.04
D(Pu): δv	mm	28.24
$\mu = \delta u / \delta v$		4.07
$Ds = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.37
Energy		4946.88

図 3-18 荷重変位曲線・特定値 No.3

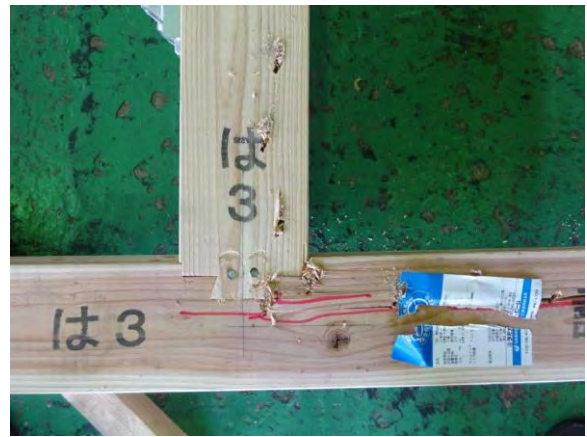
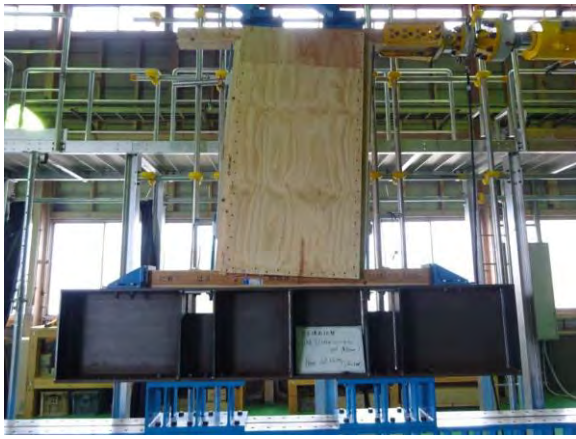
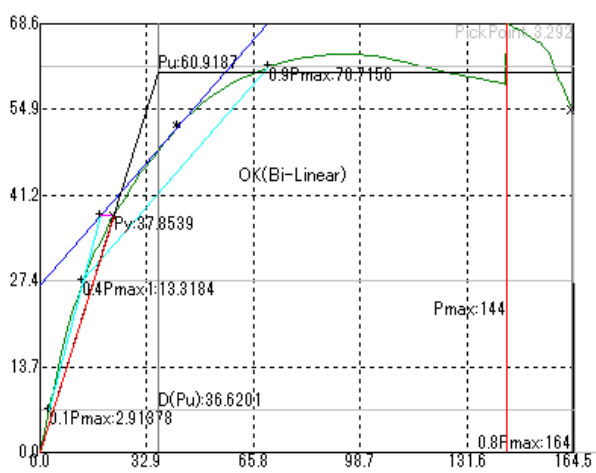
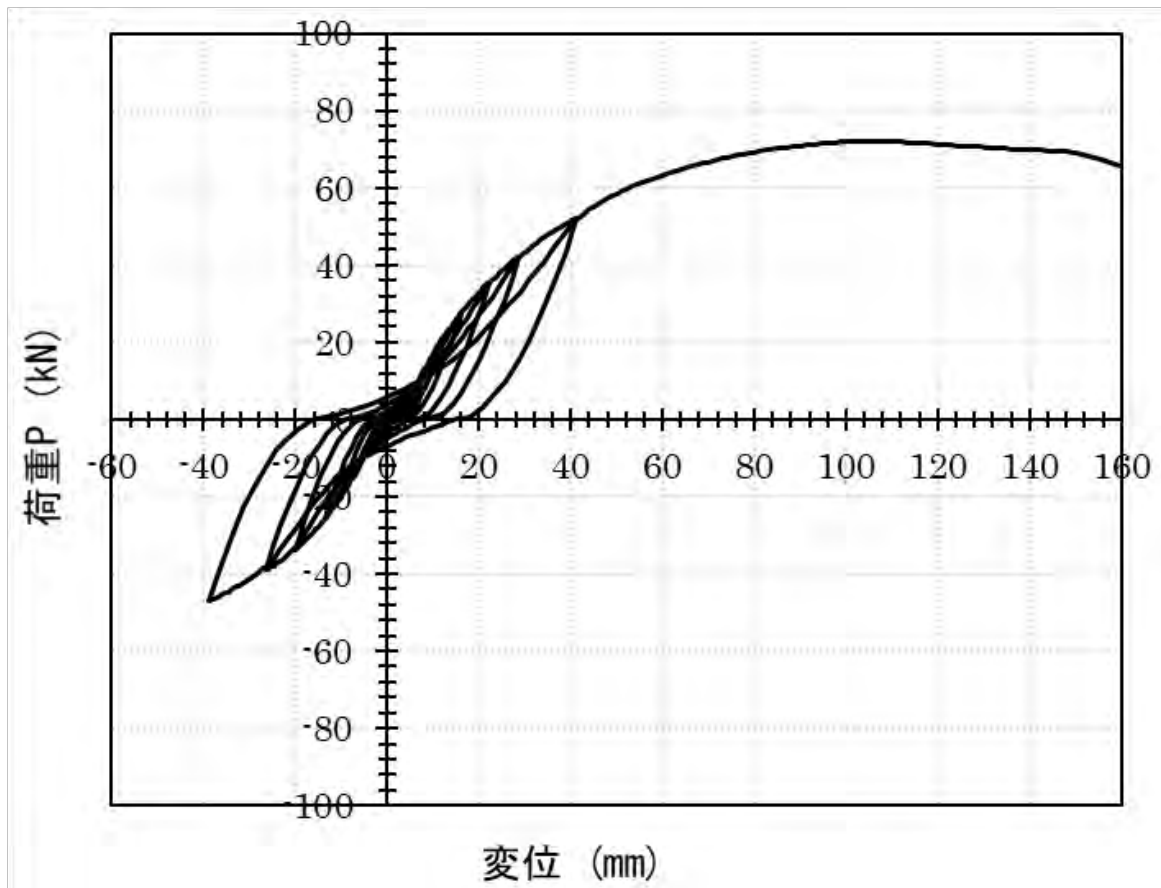


写真 3-19 試験体写真(No3)



試験体番号		No.4
Pmax	kN	68.61
D(Pmax)	kN	144.00
D(0.1Pmax)	kN	2.91
D(0.4Pmax)	kN	13.32
D(0.9Pmax)	kN	70.72
曲線に接する点P		52.15
曲線に接する点D		42.50
二直線の交点Py	kN	37.85
二直線の交点D(Py)	kN	18.58
曲線上の点 δy	mm	22.76
D(0.8Pmax): δu	mm	164.00
初期剛性K	kN/rad	1.66
Pu	kN	60.92
D(Pu): δv	mm	36.62
$\mu = \delta u / \delta v$		4.48
$Ds = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.35
Energy		8875.25

図 3-19 荷重変位曲線・特定値 No.4

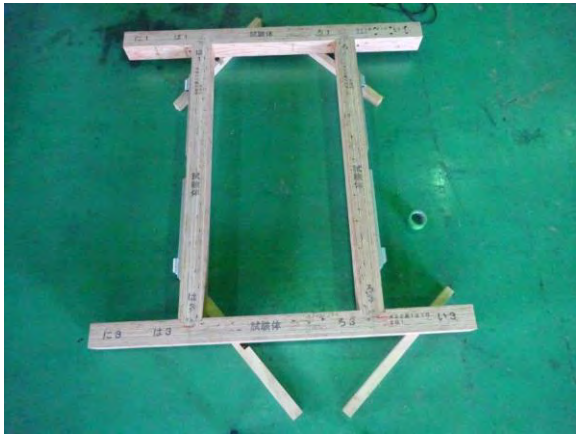
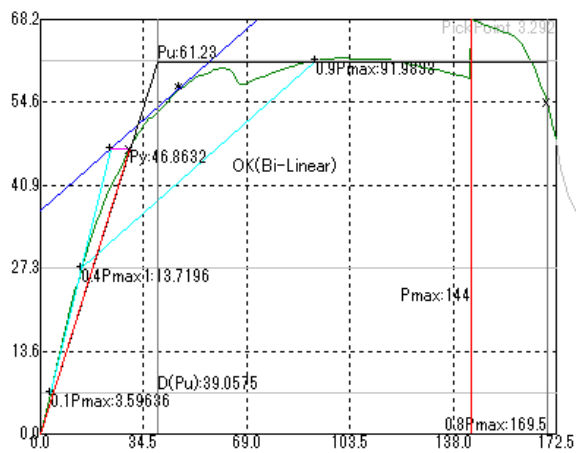
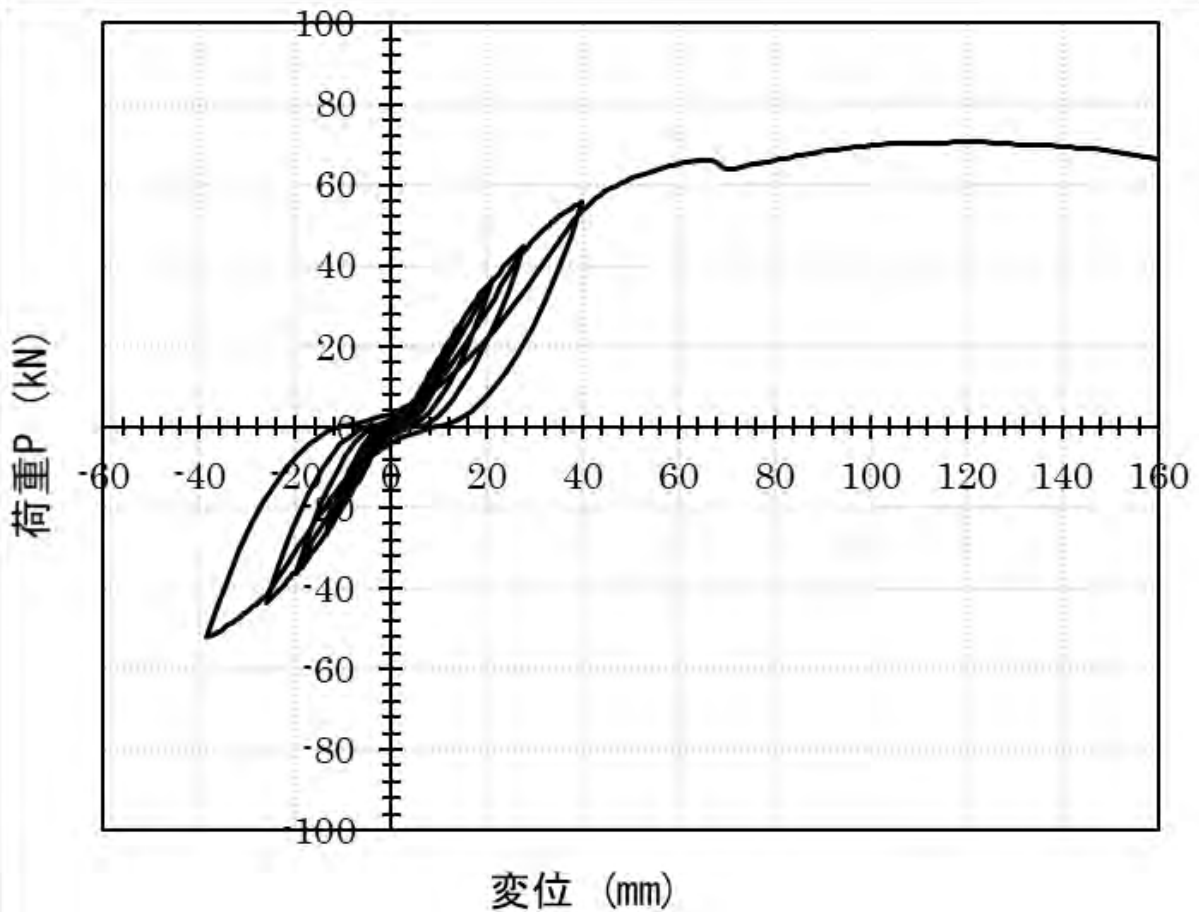


写真 3-20 試験体写真 (No 4)



試験体番号		No.5
Pmax	kN	68.22
D(Pmax)	kN	144.00
D(0.1Pmax)	kN	3.60
D(0.4Pmax)	kN	13.72
D(0.9Pmax)	kN	91.98
曲線に接する点P		56.93
曲線に接する点D		46.50
二直線の交点Py	kN	46.86
二直線の交点D(Py)	kN	23.40
曲線上の点 δy	mm	29.89
D(0.8Pmax): δu	mm	169.50
初期剛性K	kN/rad	1.57
Pu	kN	61.23
D(Pu): δv	mm	39.06
$\mu = \delta u / \delta v$		4.34
$Ds = 1 / \sqrt{2\mu - 1}$		0.36
Energy		9182.74

図 3-20 荷重変位曲線・特定値 No.5

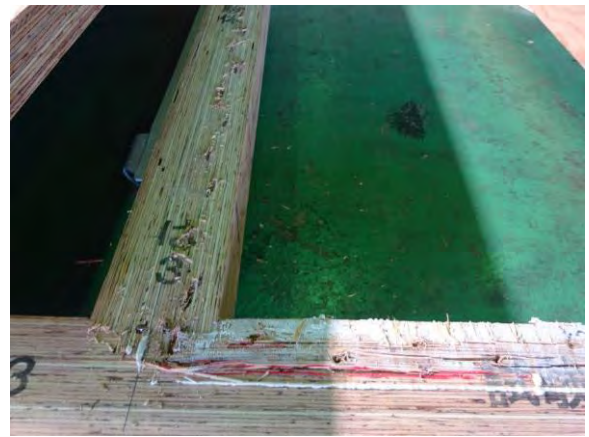
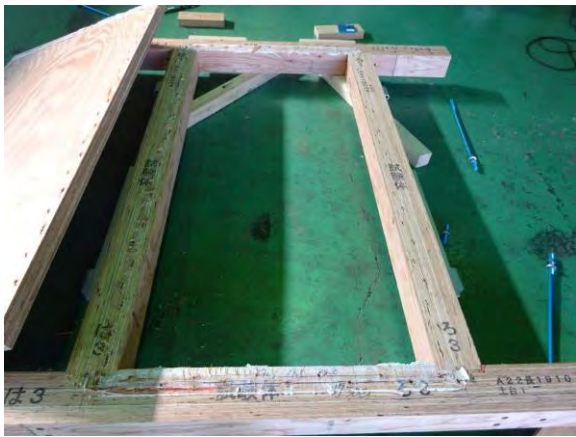
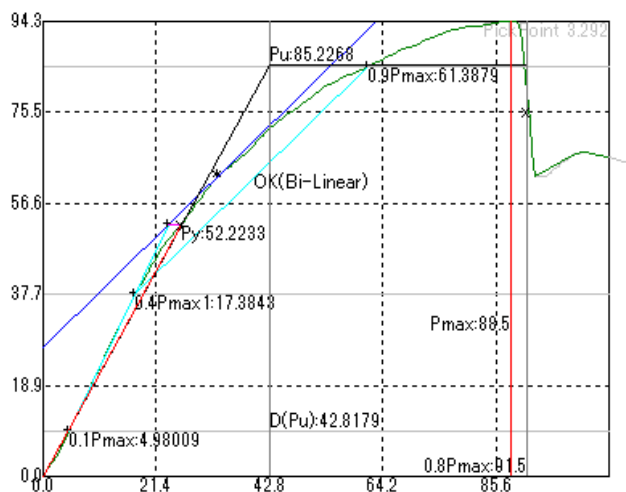
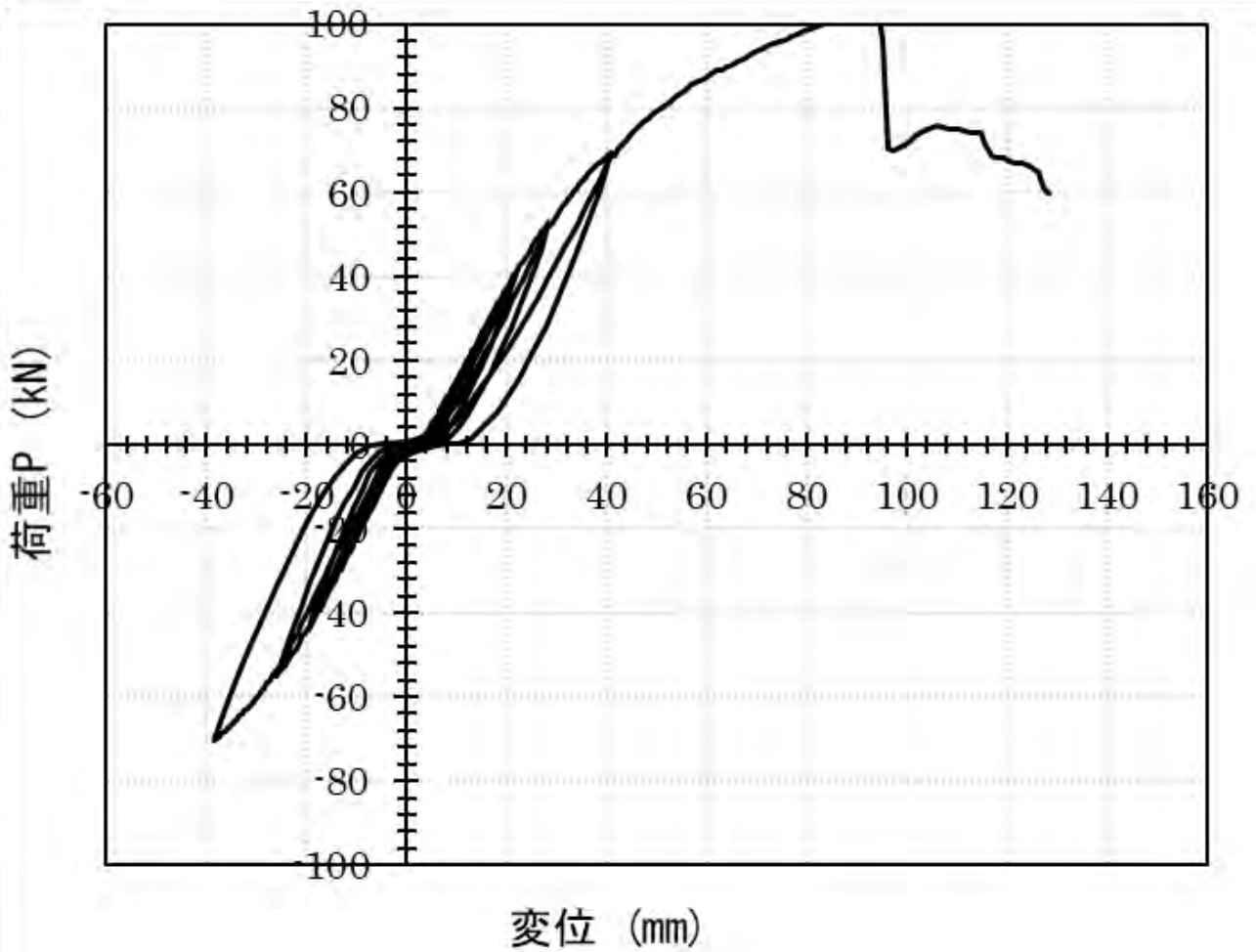


写真 3-21 試験体写真 (No5)

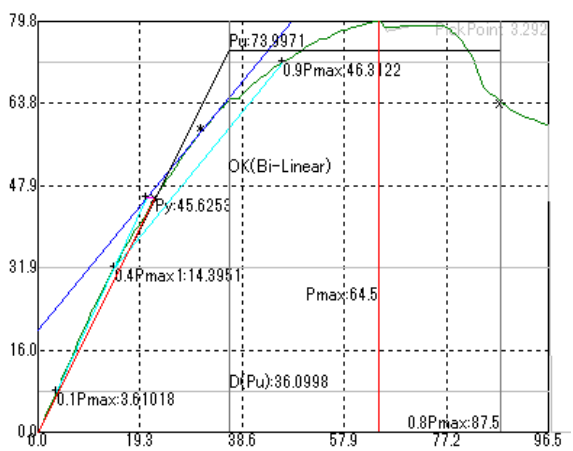
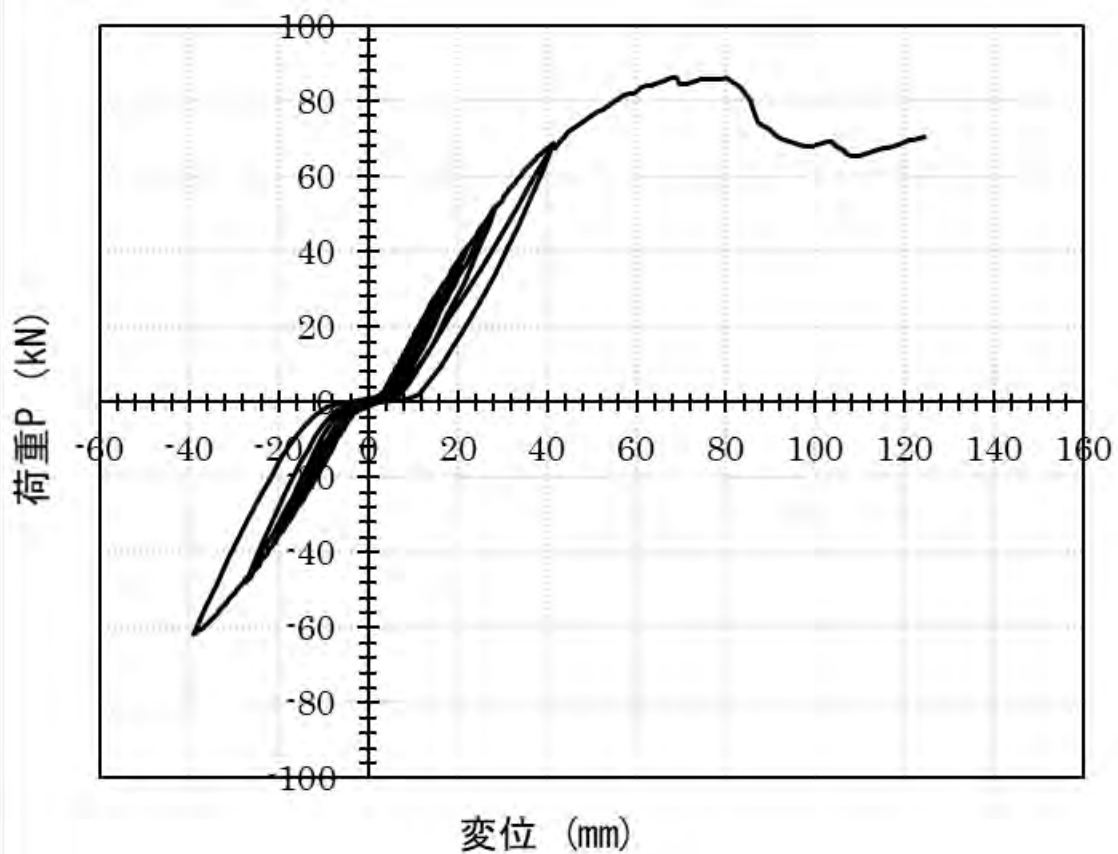


試験体番号		No.6
Pmax	kN	94.35
D(Pmax)	kN	88.50
D(0.1Pmax)	kN	4.98
D(0.4Pmax)	kN	17.38
D(0.9Pmax)	kN	61.39
曲線に接する点P		62.16
曲線に接する点D		33.00
二直線の交点Py	kN	52.22
二直線の交点D(Py)	kN	23.73
曲線上の点 δy	mm	26.24
D(0.8Pmax): δu	mm	91.50
初期剛性K	kN/rad	1.99
Pu	kN	85.23
D(Pu): δv	mm	42.82
$\mu = \delta u / \delta v$		2.14
$D_s = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.55
Energy		5973.64

図 3-21 荷重変位曲線・特定値 No.6



写真 3-22 試験体写真 (No6)



試験体番号		No.7
Pmax	kN	79.79
D(Pmax)	kN	64.50
D(0.1Pmax)	kN	3.61
D(0.4Pmax)	kN	14.40
D(0.9Pmax)	kN	46.31
曲線に接する点P		58.66
曲線に接する点D		31.00
二直線の交点Py	kN	45.63
二直線の交点D(Py)	kN	20.57
曲線上の点 δy	mm	22.26
D(0.8Pmax): δu	mm	87.50
初期剛性K	kN/rad	2.05
Pu	kN	74.00
D(Pu): δv	mm	36.10
$\mu = \delta u / \delta v$		2.42
$D_s = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.51
Energy		5139.10

図 3-22 荷重変位曲線・特定値 No.7

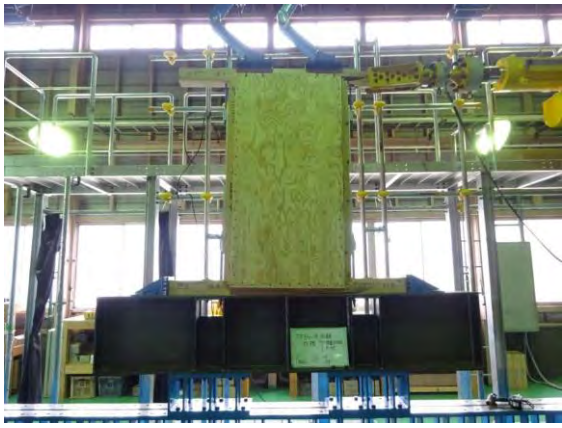
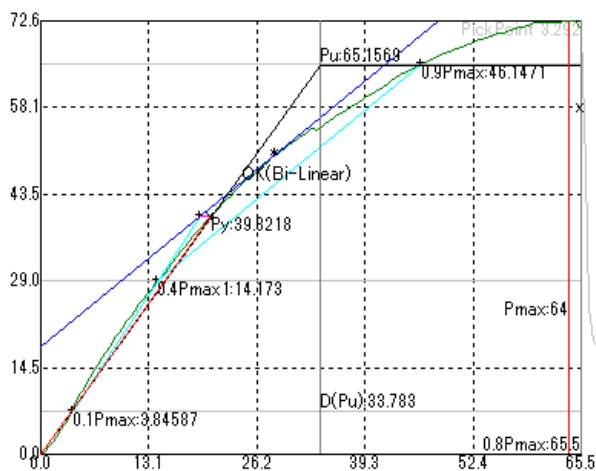
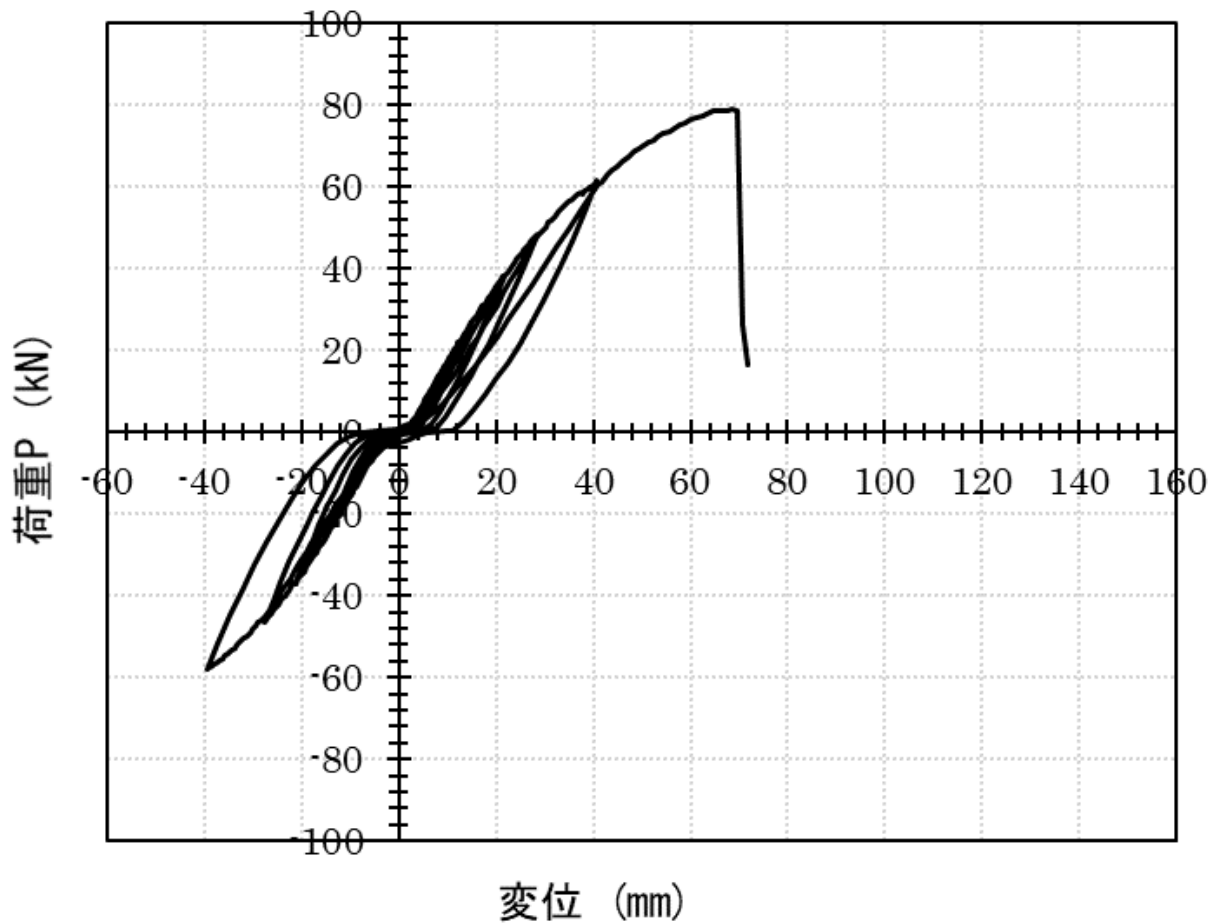


写真 3-23 試験体写真 (No7)



試験体番号		No.8
Pmax	kN	72.57
D(Pmax)	kN	64.00
D(0.1Pmax)	kN	3.85
D(0.4Pmax)	kN	14.17
D(0.9Pmax)	kN	46.15
曲線に接する点P		50.27
曲線に接する点D		28.50
二直線の交点Py	kN	39.82
二直線の交点D(Py)	kN	19.29
曲線上の点 δy	mm	20.65
D(0.8Pmax): δu	mm	65.50
初期剛性K	kN/rad	1.93
Pu	kN	65.16
D(Pu): δv	mm	33.78
$\mu = \delta u / \delta v$		1.94
$Ds = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.59
Energy		3167.18

図 3-23 荷重変位曲線・特定値 No.8

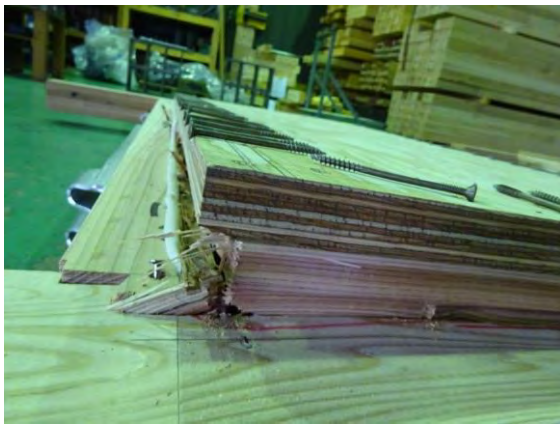
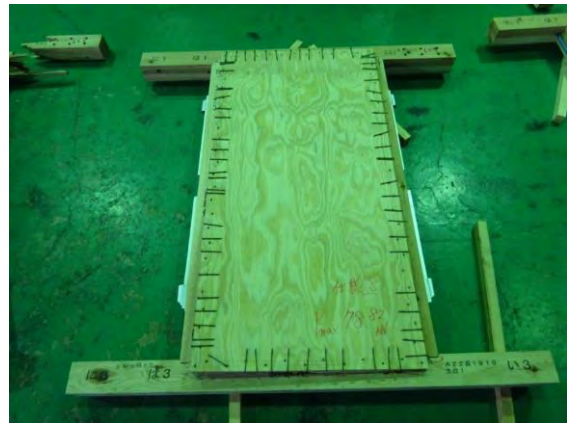
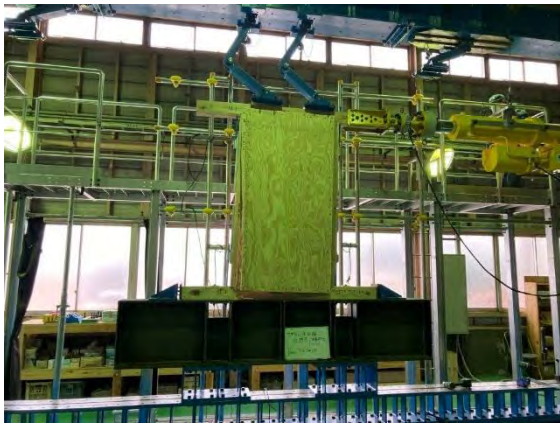
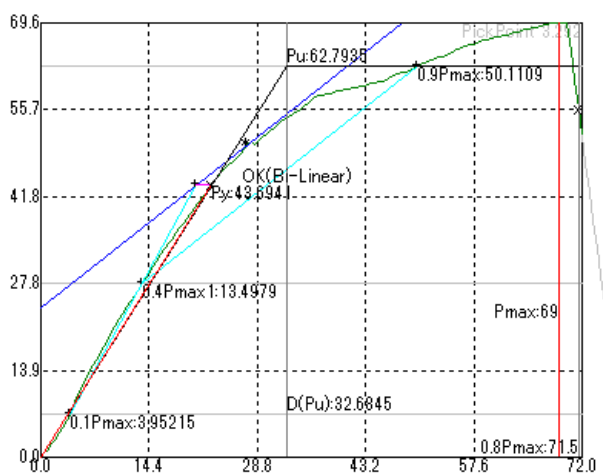
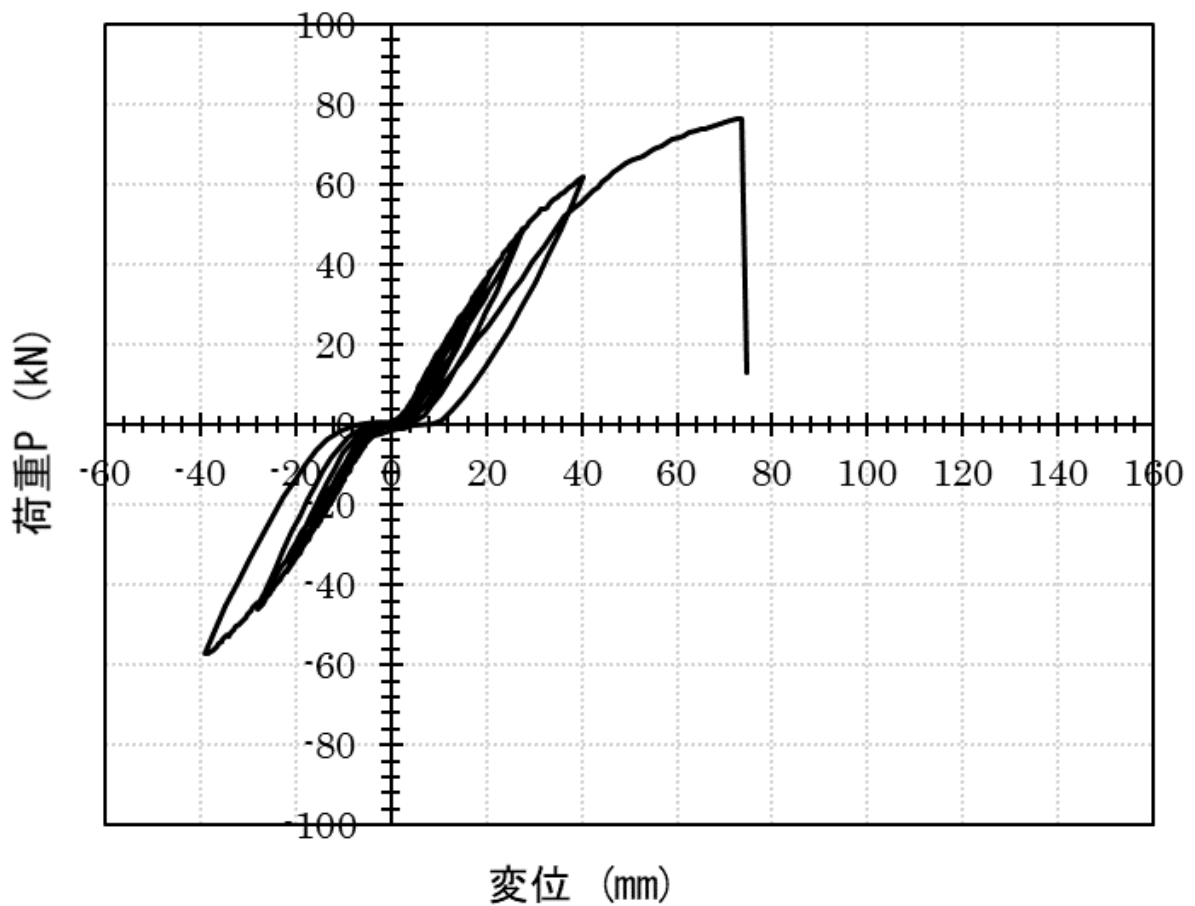


写真 3-24 試験体写真 (No8)



試験体番号		No.9
Pmax	kN	69.59
D(Pmax)	kN	69.00
D(0.1Pmax)	kN	3.95
D(0.4Pmax)	kN	13.50
D(0.9Pmax)	kN	50.11
曲線に接する点P		50.11
曲線に接する点D		27.50
二直線の交点Py	kN	43.69
二直線の交点D(Py)	kN	20.75
曲線上の点 δy	mm	22.74
D(0.8Pmax): δu	mm	71.50
初期剛性K	kN/rad	1.92
Pu	kN	62.79
D(Pu): δv	mm	32.68
$\mu = \delta u / \delta v$		2.19
$Ds = 1 / \sqrt{2\mu - 1}$		0.54
Energy		3463.55

図 3-24 荷重変位曲線・特定値 No.9

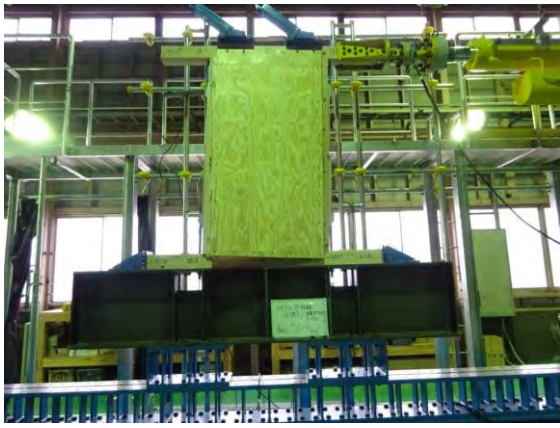
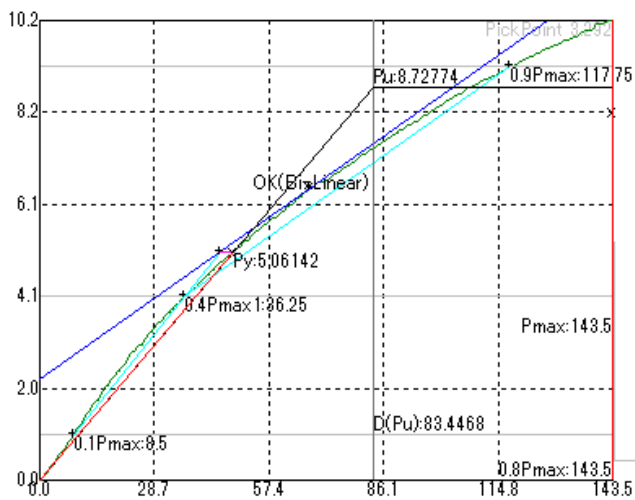
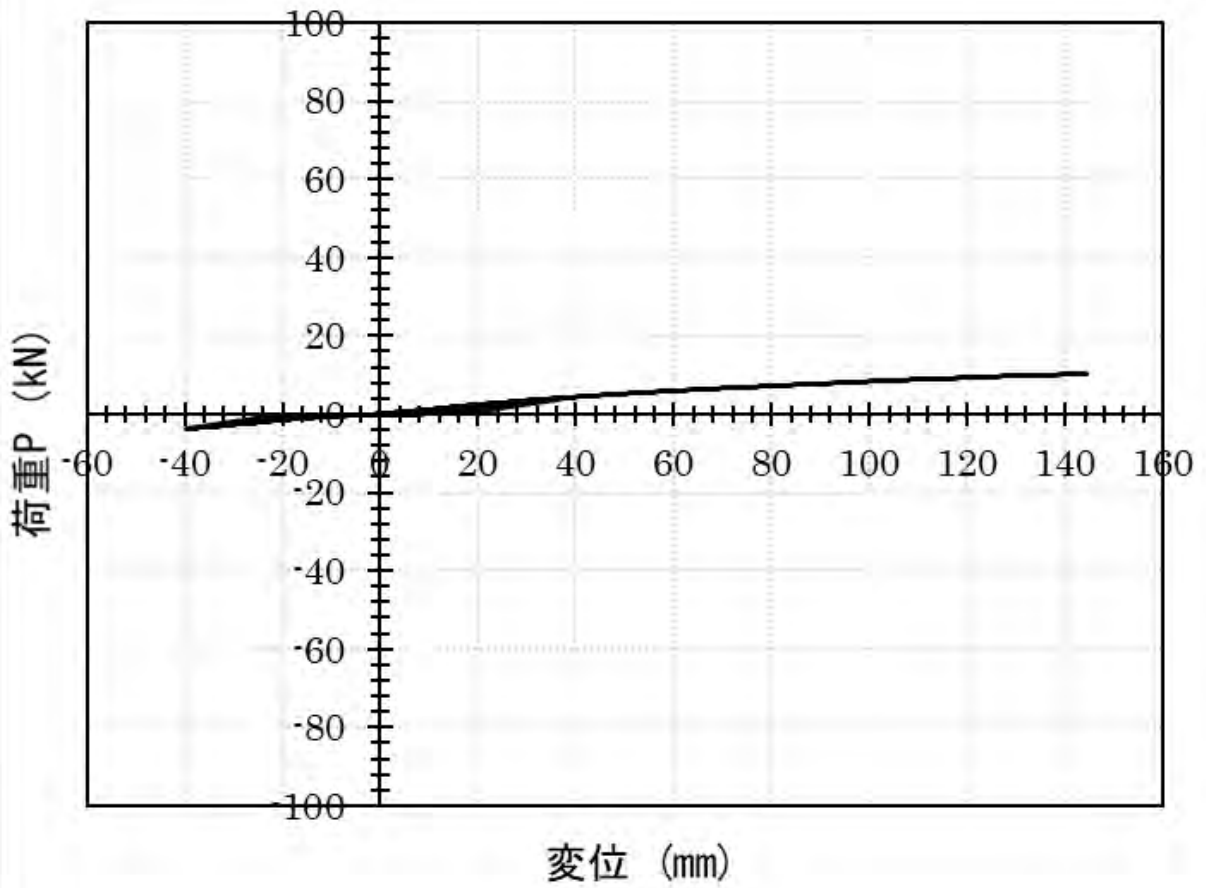


写真 3-25 試験体写真(No9)



試験体番号		No.10
Pmax	kN	10.20
D(Pmax)	kN	143.50
D(0.1Pmax)	kN	8.50
D(0.4Pmax)	kN	36.25
D(0.9Pmax)	kN	117.75
曲線に接する点P		6.46
曲線に接する点D		67.50
二直線の交点Py	kN	5.06
二直線の交点D(Py)	kN	45.15
曲線上の点 δy	mm	48.39
D(0.8Pmax): δu	mm	143.50
初期剛性K	kN/rad	0.10
Pu	kN	8.73
D(Pu): δv	mm	83.45
$\mu = \delta u / \delta v$		1.72
$D_s = 1 / \sqrt{2\mu - 1}$		0.64
Energy		888.28

図 3-25 荷重変位曲線・特定値 No.10



写真 3-26 試験体写真(No10)フレーム

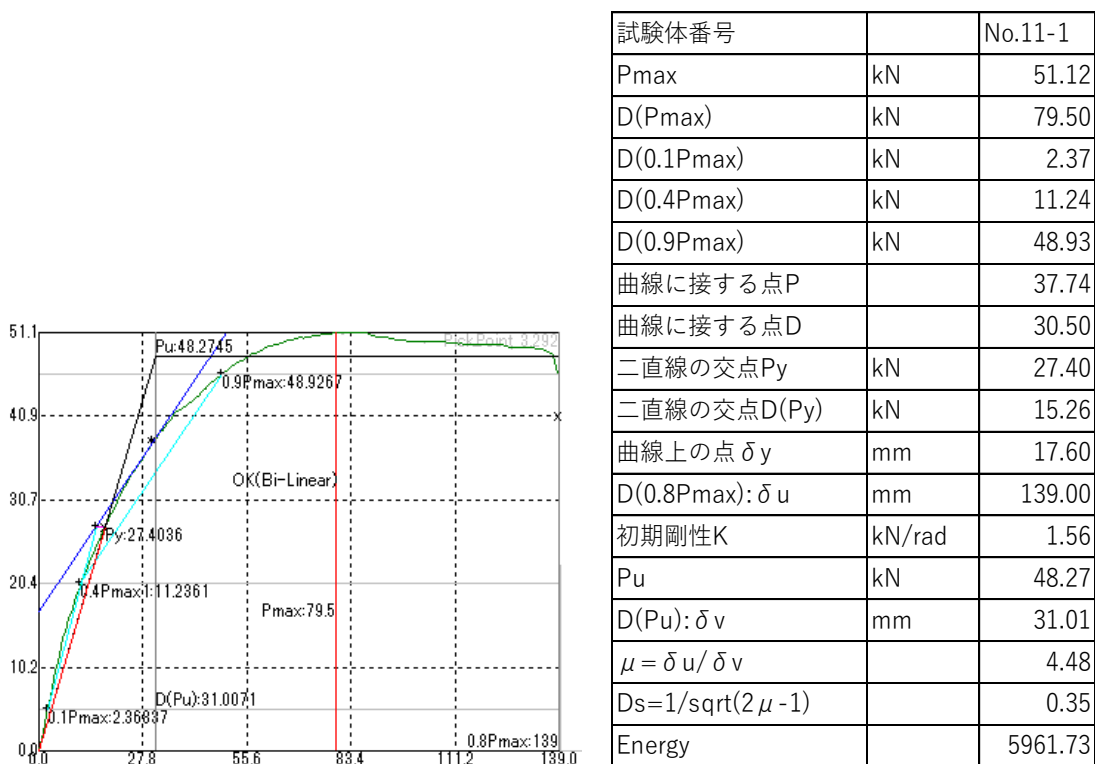
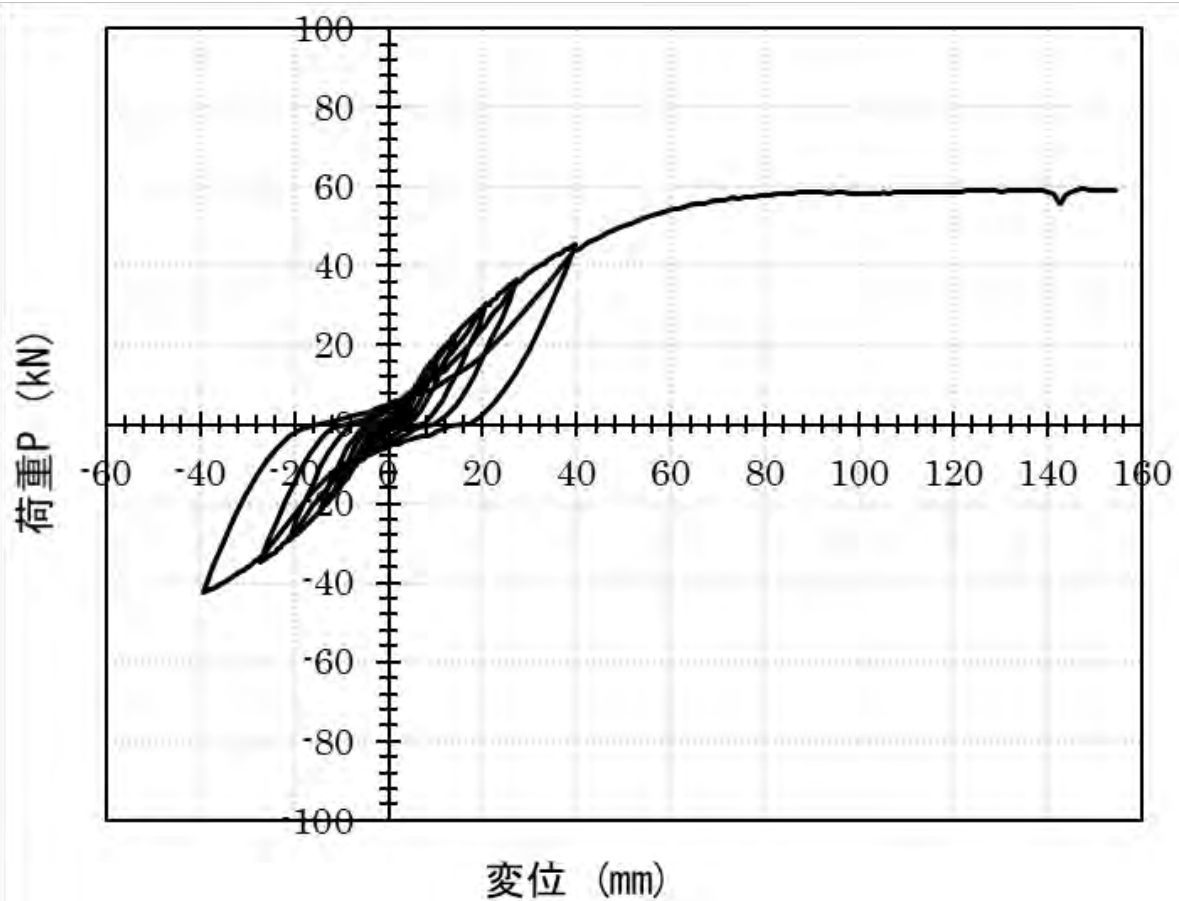


図 3-26 荷重変位曲線・特定値 No.11-1

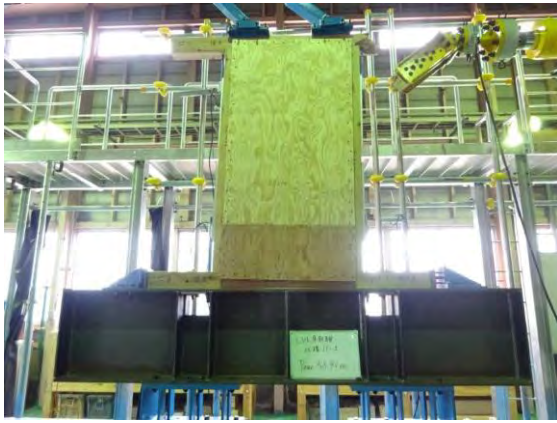
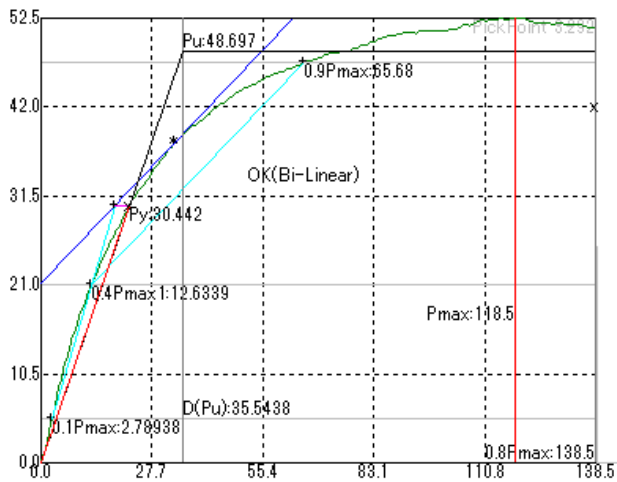
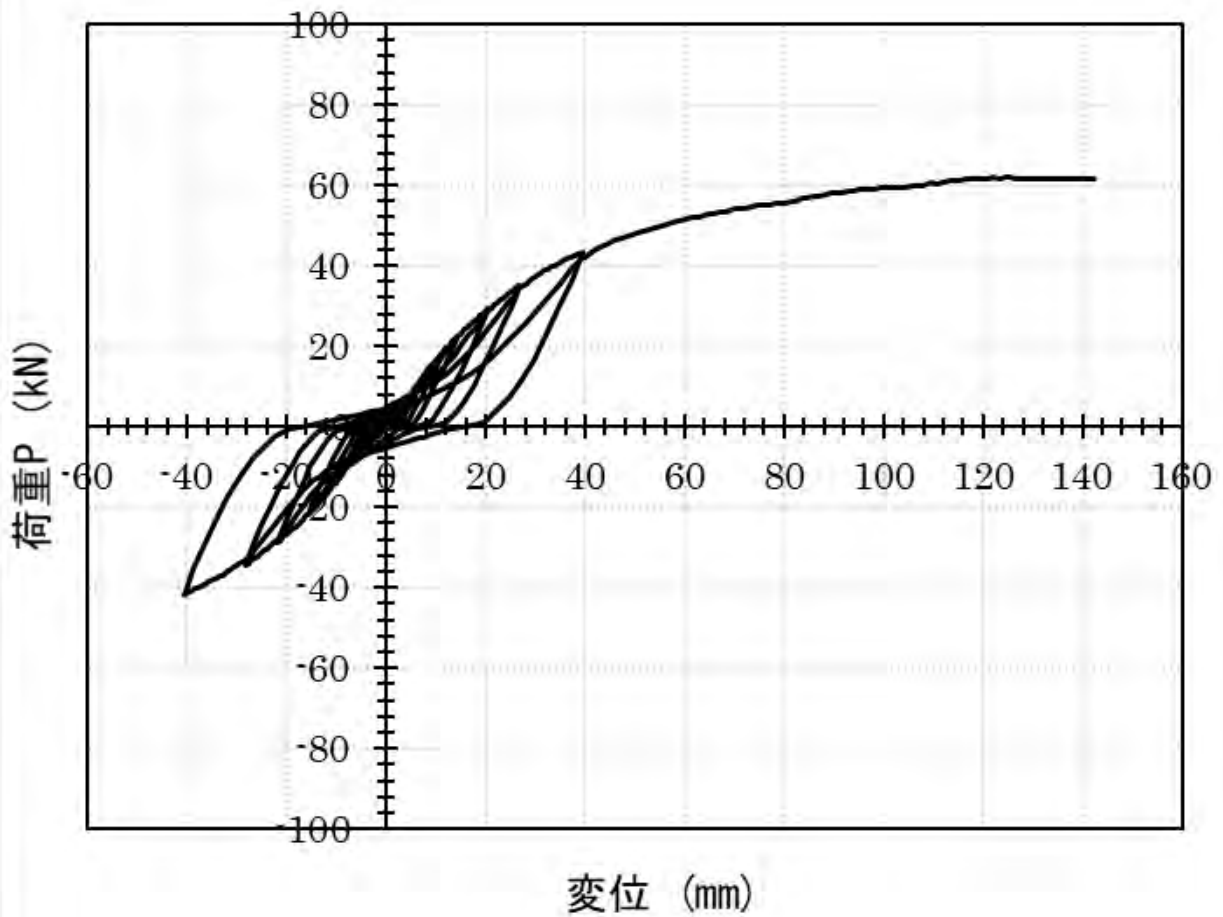


写真 3-27 試験体写真 (No11-1)



試験体番号		No.11-2
Pmax	kN	52.54
D(Pmax)	kN	118.50
D(0.1Pmax)	kN	2.79
D(0.4Pmax)	kN	12.63
D(0.9Pmax)	kN	65.68
曲線に接する点P		37.86
曲線に接する点D		33.50
二直線の交点Py	kN	30.44
二直線の交点D(Py)	kN	18.52
曲線上の点 δy	mm	22.22
D(0.8Pmax): δu	mm	138.50
初期剛性K	kN/rad	1.37
Pu	kN	48.70
D(Pu): δv	mm	35.54
$\mu = \delta u / \delta v$		3.90
$Ds = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.38
Energy		5879.09

図 3-27 荷重変位曲線・特定値 No.11-2

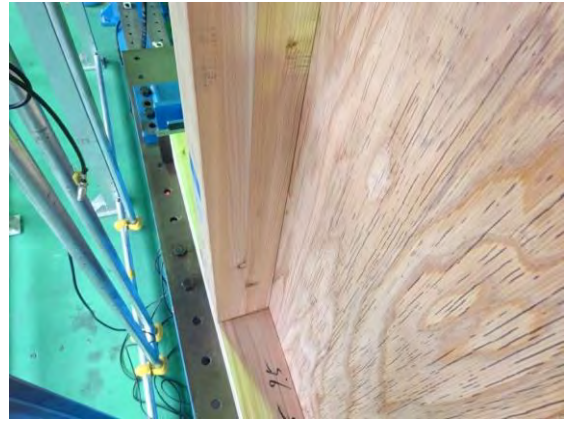
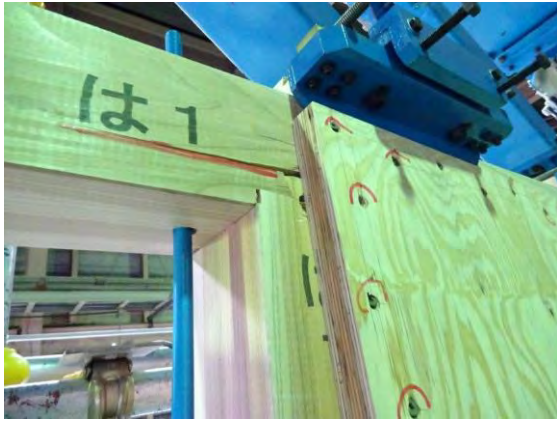
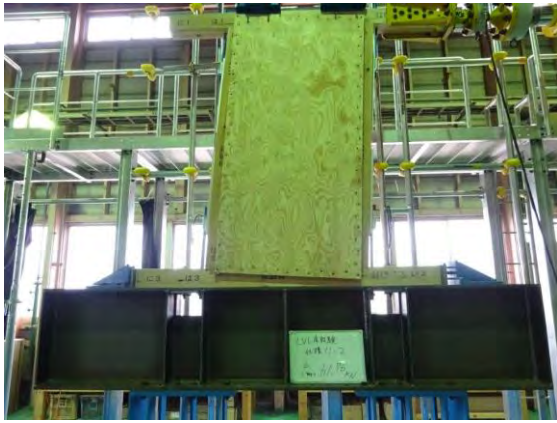
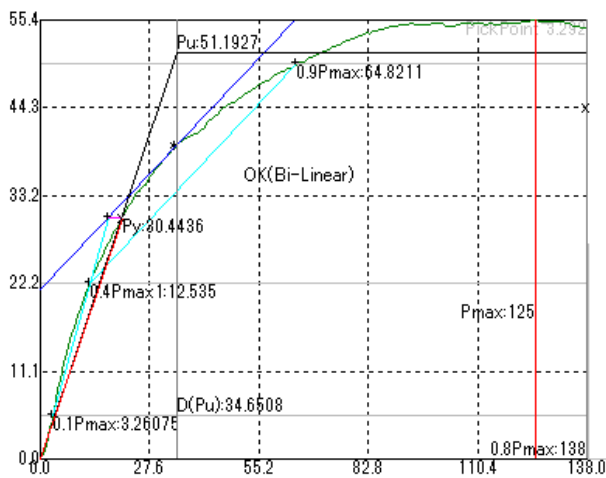
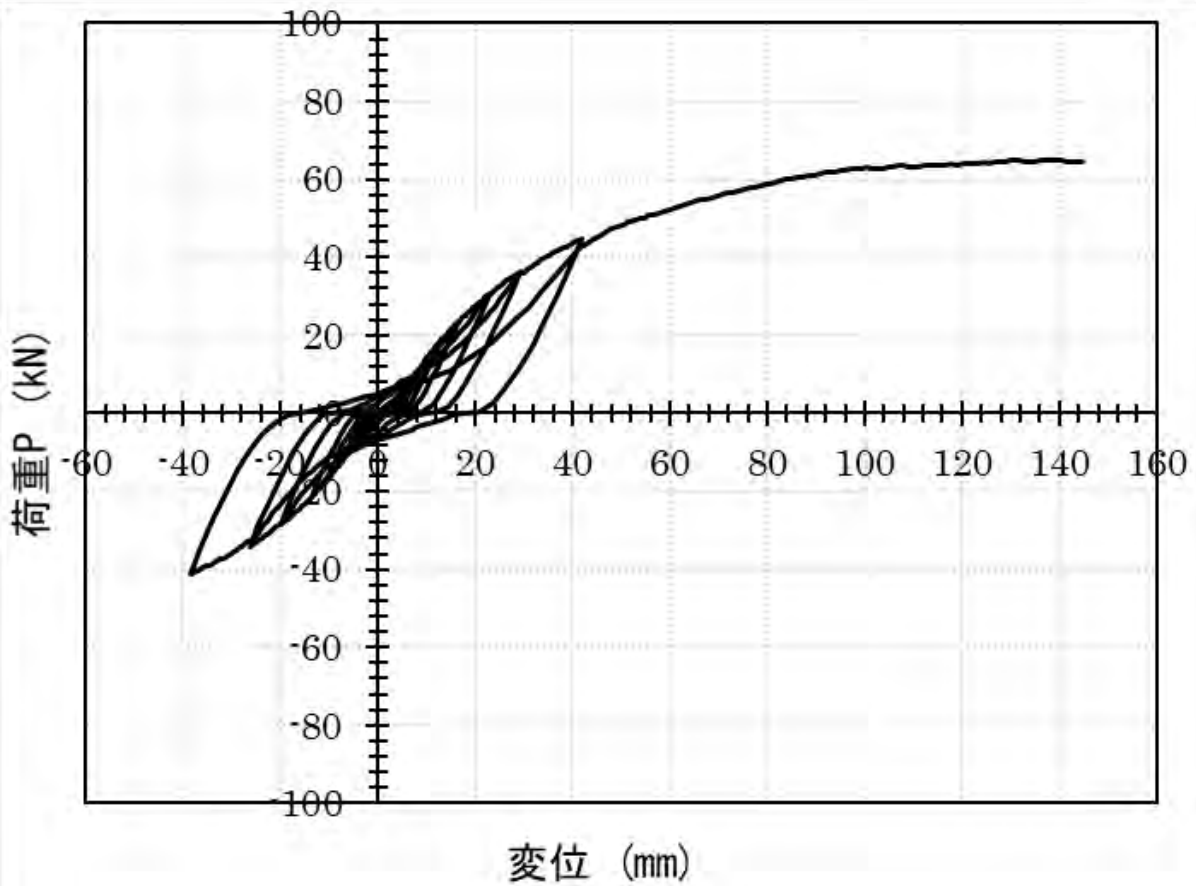


写真 3-28 試験体写真 (No11-2)



試験体番号		No.11-3
Pmax	kN	55.38
D(Pmax)	kN	125.00
D(0.1Pmax)	kN	3.26
D(0.4Pmax)	kN	12.54
D(0.9Pmax)	kN	64.82
曲線に接する点P		39.36
曲線に接する点D		34.00
二直線の交点Py	kN	30.44
二直線の交点D(Py)	kN	17.16
曲線上の点 δy	mm	20.61
D(0.8Pmax): δu	mm	138.00
初期剛性K	kN/rad	1.48
Pu	kN	51.19
D(Pu): δv	mm	34.65
$\mu = \delta u / \delta v$		3.98
$Ds = 1 / \sqrt{2\mu - 1}$		0.38
Energy		6177.66

図 3-28 荷重変位曲線・特定値 No.11-3

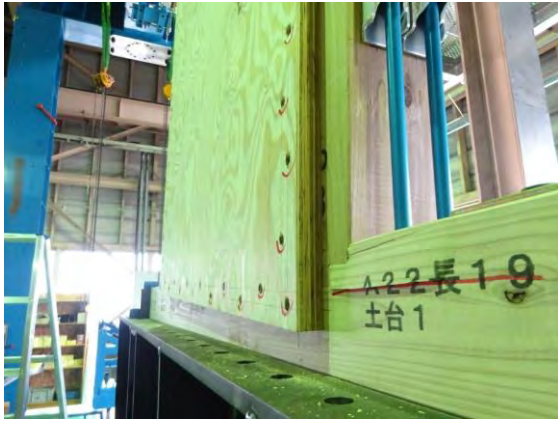
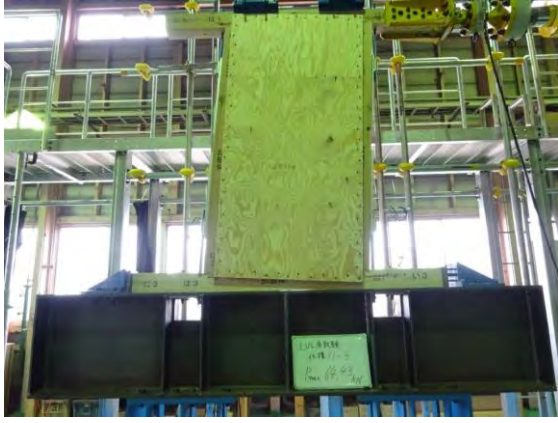


写真 3-29 試験体写真 (No11-3)

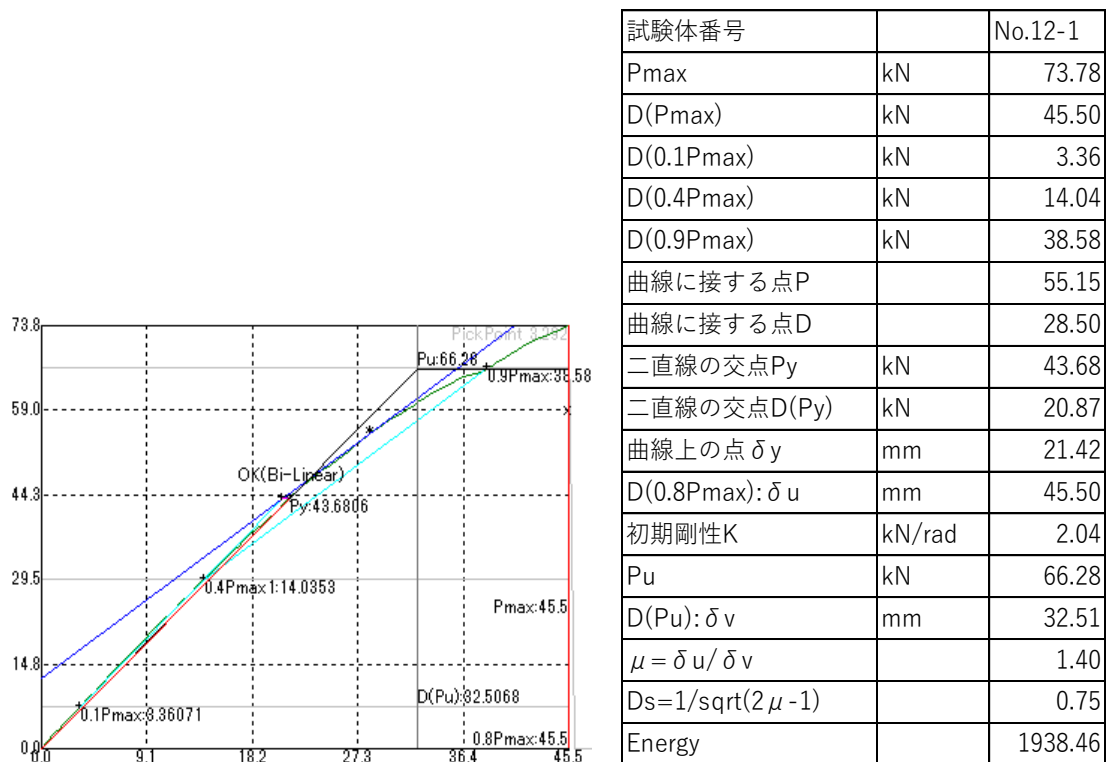
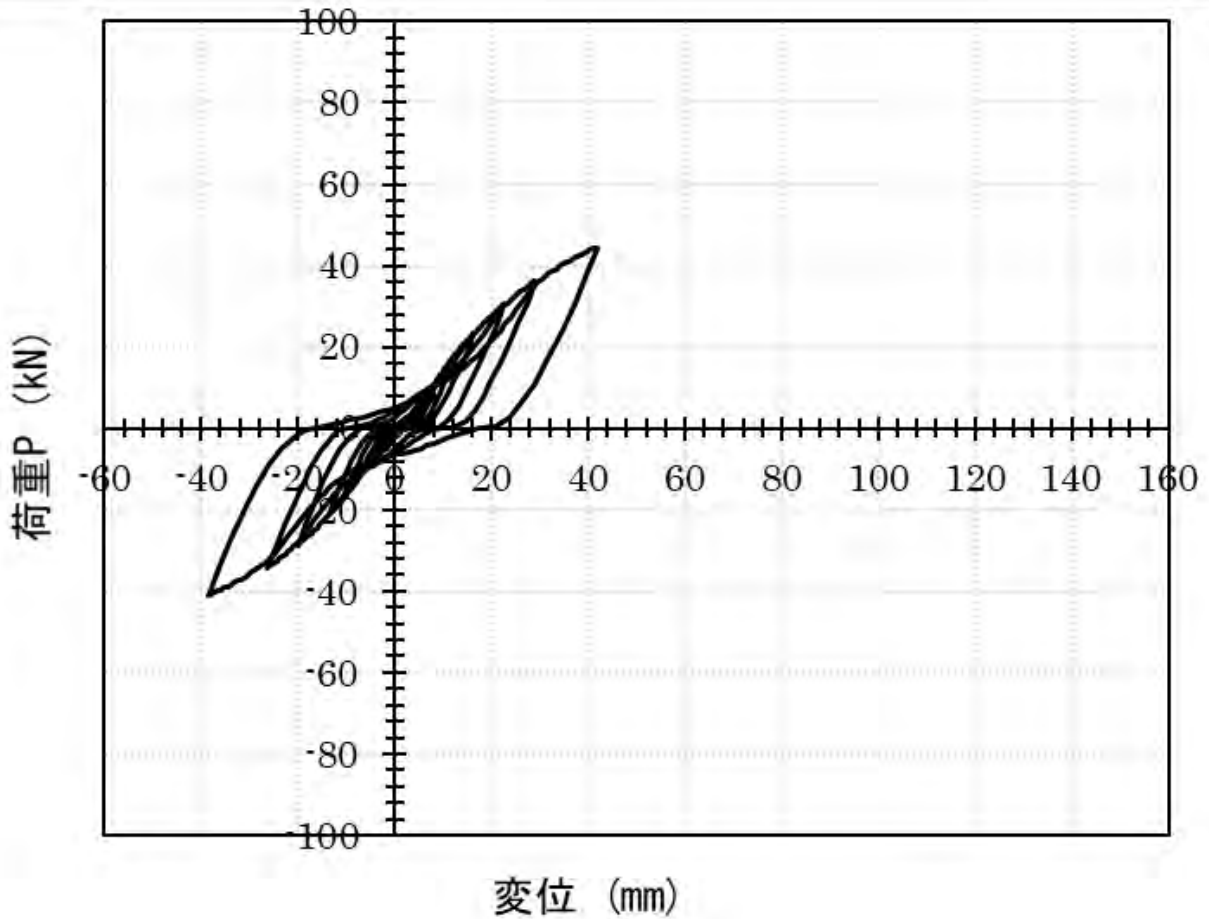


図 3-29 荷重変位曲線・特定値 No.12-1

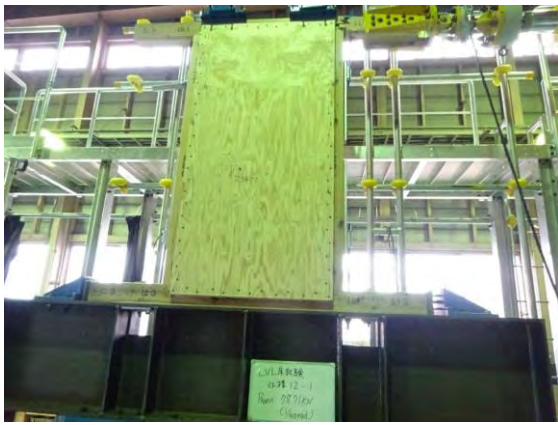
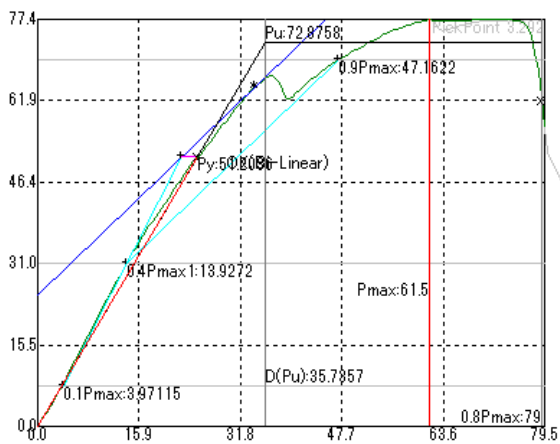
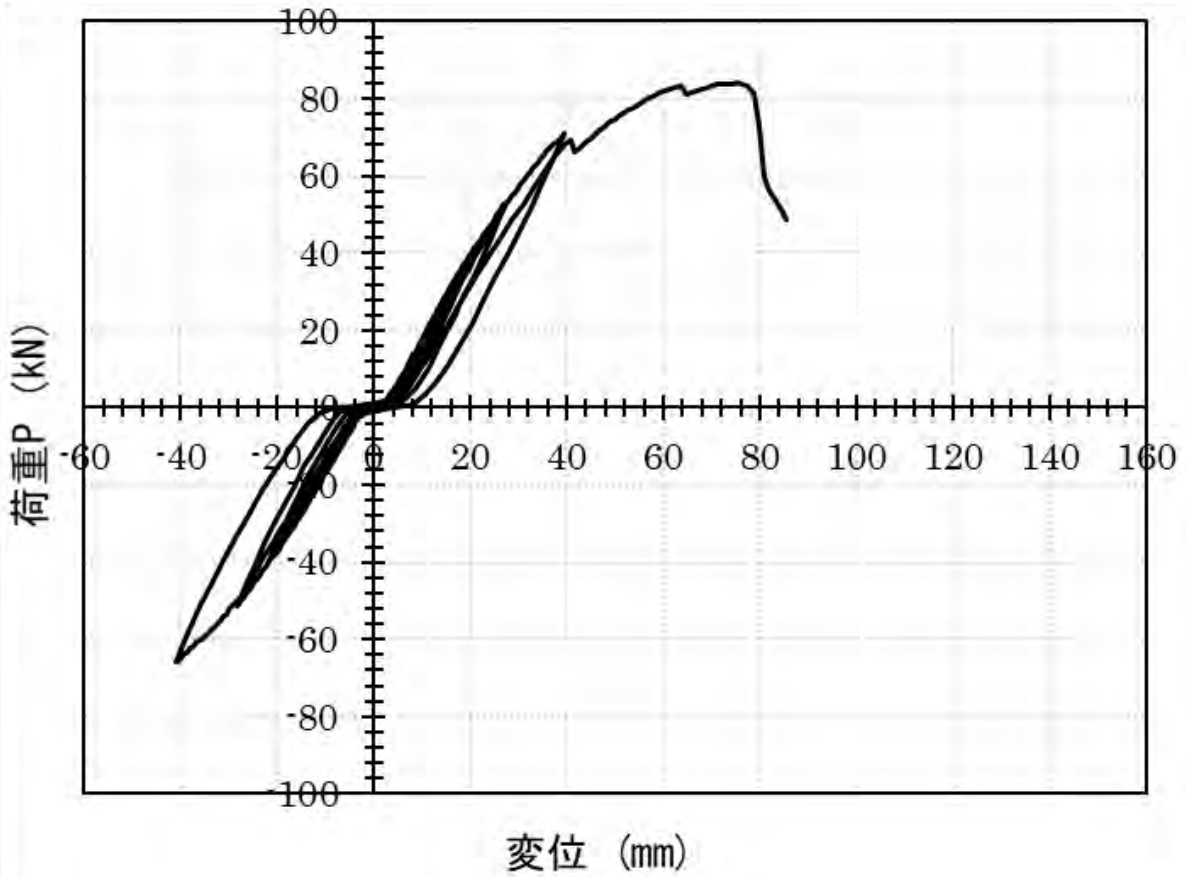


写真 3-30 試験体写真 (No12-1)



試験体番号		No.12-2
Pmax	kN	77.40
D(Pmax)	kN	61.50
D(0.1Pmax)	kN	3.97
D(0.4Pmax)	kN	13.93
D(0.9Pmax)	kN	47.16
曲線に接する点P		64.47
曲線に接する点D		34.00
二直線の交点Py	kN	51.20
二直線の交点D(Py)	kN	22.61
曲線上の点 δy	mm	25.11
D(0.8Pmax): δu	mm	79.00
初期剛性K	kN/rad	2.04
Pu	kN	72.88
D(Pu): δv	mm	35.74
$\mu = \delta u / \delta v$		2.21
Ds=1/sqrt(2 μ -1)		0.54
Energy		4455.06

図 3-30 荷重変位曲線・特定値 No.12-2

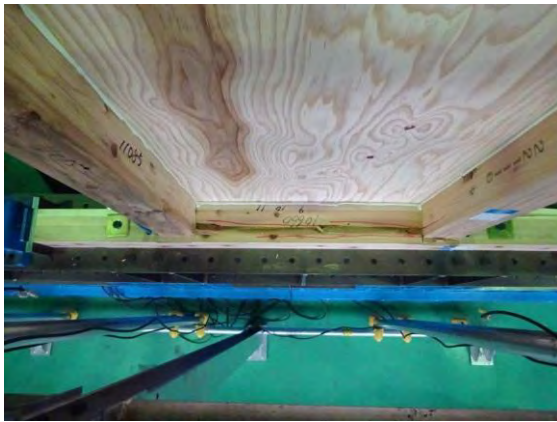
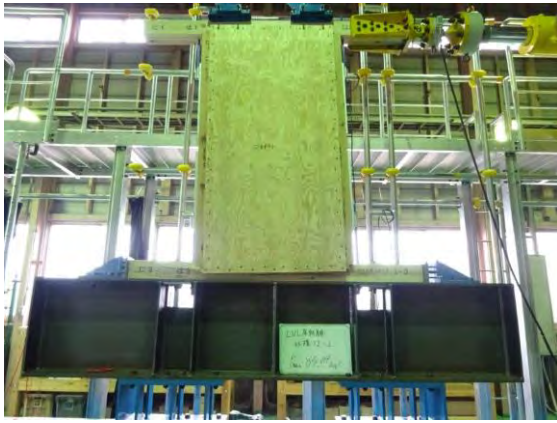
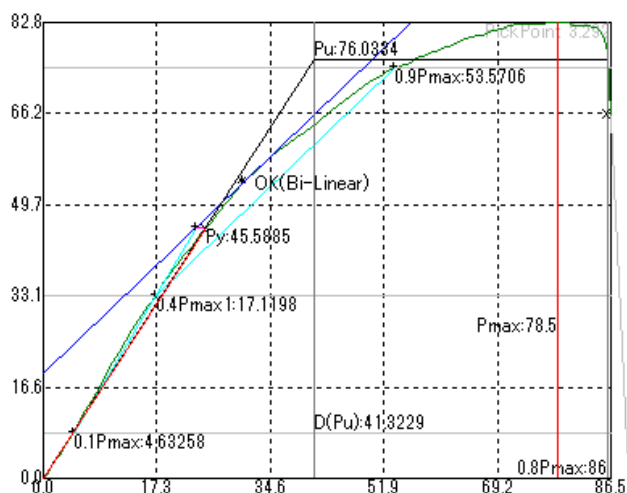
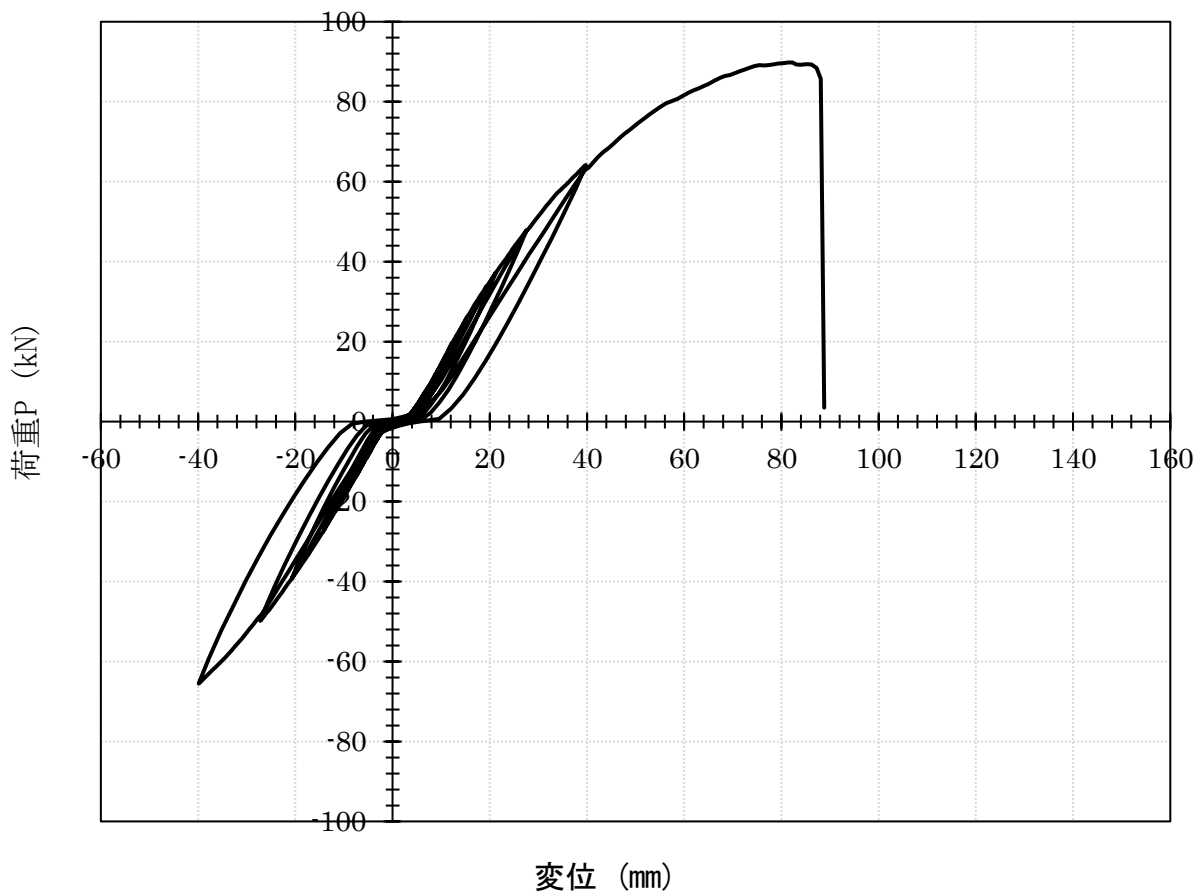


写真 3-31 試験体写真 (No12-2)



試験体番号		No.12-3
Pmax	kN	82.76
D(Pmax)	kN	78.50
D(0.1Pmax)	kN	4.63
D(0.4Pmax)	kN	17.12
D(0.9Pmax)	kN	53.57
曲線に接する点P		53.65
曲線に接する点D		30.50
二直線の交点Py	kN	45.59
二直線の交点D(Py)	kN	23.40
曲線上の点 δy	mm	24.78
D(0.8Pmax): δu	mm	86.00
初期剛性K	kN/rad	1.84
Pu	kN	76.03
D(Pu): δv	mm	41.32
$\mu = \delta u / \delta v$		2.08
$D_s = 1/\sqrt{2\mu - 1}$		0.56
Energy		4967.91

図 3-31 荷重変位曲線・特定値 No.12-3

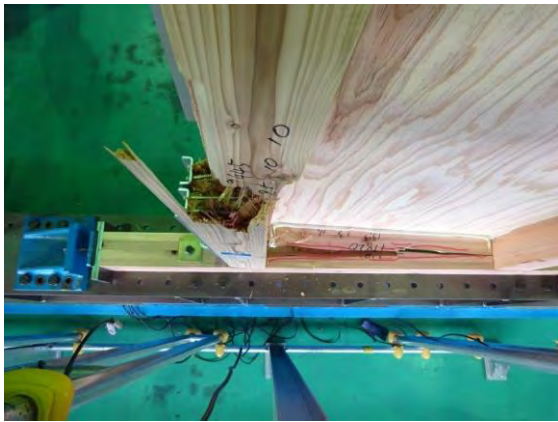
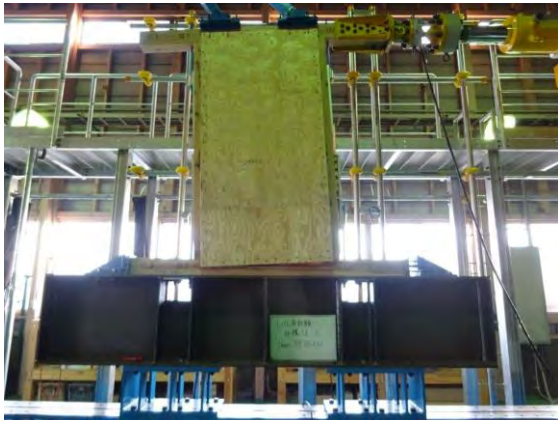


写真 3-32 試験体写真 (No12-3)

3. 3. 1. 4 面内くぎ1本あたりの一面せん断耐力特性

3. 3. 1. 2で得られた面内くぎ1本あたりの一面せん断耐力特性を算定するためのデータよりを使用し、接合部1本あたりデータを算出した。

荷重変形関係のデータから真のせん断変形角-モーメント関係を算出し、図 3-32 に示した。

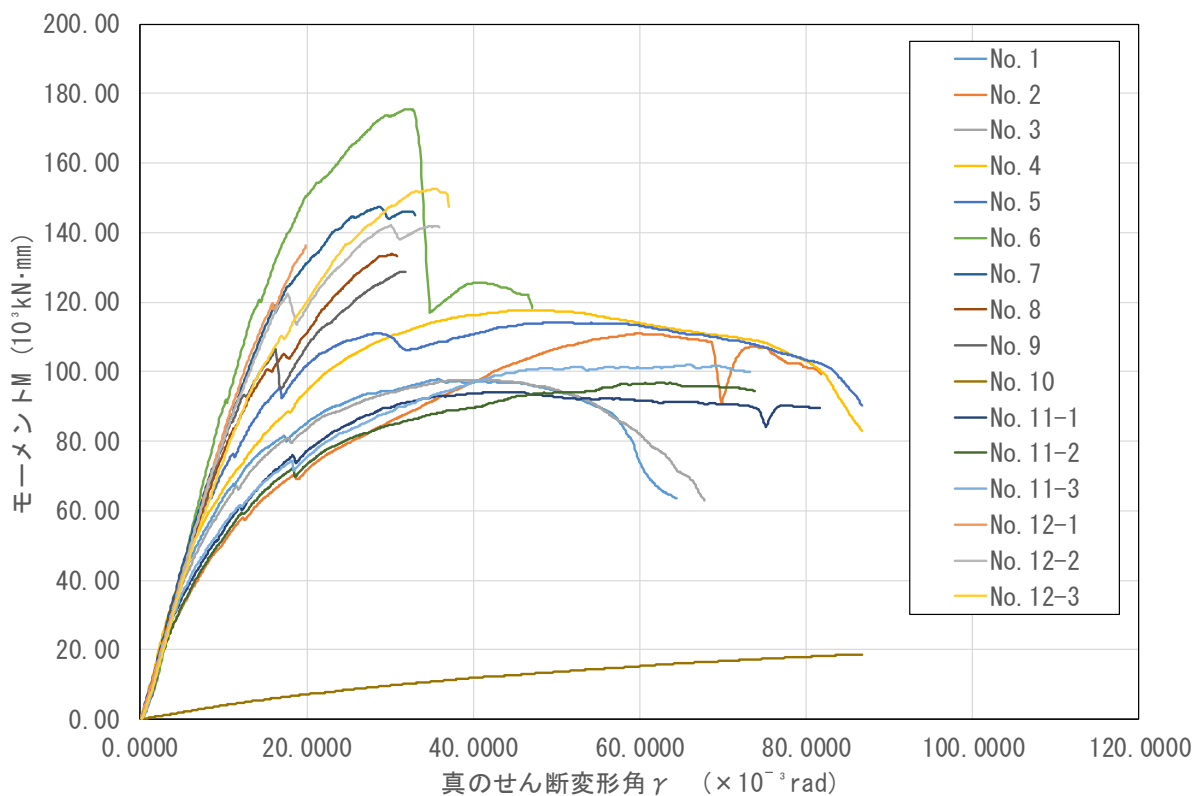


図 3-32 M-θ 曲線 (全試験体)

No.1 から No.12-3 に関して No.10 のフレームのみの曲線を差し引いた上で、特定値算出ソフト PicPoint による特性値を算出し、表 3-4 に示した。

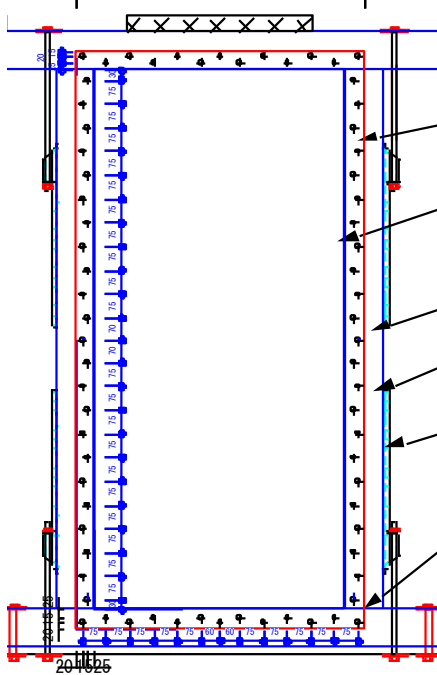
表 3-4 特性値 (M- θ 曲線)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11-1	No. 11-2	No. 11-3	No. 12-1	No. 12-2	No. 12-3
Pmax	96554	123343	96582	124870	124166	171714	145218	132070	126654	18563	93033	95616	100797	134284	140869	150628
D (Pmax)	0.0387	0.0791	0.0426	0.0791	0.0791	0.0486	0.0354	0.0352	0.0379	0.0788	0.0437	0.0651	0.0687	0.0250	0.0338	0.0434
D (0.1Pmax)	0.0013	0.0017	0.0012	0.0016	0.0020	0.0027	0.0020	0.0021	0.0022	0.0047	0.0013	0.0015	0.0018	0.0018	0.0022	0.0025
D (0.4Pmax1)	0.0058	0.0105	0.0058	0.0073	0.0075	0.0096	0.0079	0.0078	0.0074	0.0199	0.0062	0.0069	0.0069	0.0077	0.0077	0.0094
D (0.4Pmax2)	0.0058	0.0105	0.0058	0.0073	0.0075	0.0096	0.0079	0.0078	0.0074	0.0199	0.0062	0.0069	0.0069	0.0077	0.0077	0.0094
D (0.9Pmax)	0.0244	0.0789	0.0256	0.0389	0.0506	0.0337	0.0254	0.0254	0.0275	0.0647	0.0269	0.0361	0.0356	0.0212	0.0259	0.0294
曲線に接する点P	71476	99906	66058	94921	103620	113125	106769	91494	91204	11693	68691	68913	71631	100380	117333	97650
曲線に接する点D	0.0151	0.0462	0.0132	0.0234	0.0255	0.0181	0.0170	0.0157	0.0151	0.0368	0.0168	0.0184	0.0187	0.0157	0.0187	0.0168
二直線の交点Py	53089	72745	53857	68910	85311	95022	83048	72475	79524	9190	49870	55413	55401	79512	93195	83001
二直線の交点D (Py)	0.0080	0.0160	0.0082	0.0102	0.0129	0.0130	0.0113	0.0106	0.0114	0.0247	0.0084	0.0102	0.0094	0.0115	0.0124	0.0129
曲線上の点 δy	0.0093	0.0220	0.0094	0.0125	0.0164	0.0144	0.0122	0.0113	0.0125	0.0265	0.0097	0.0122	0.0113	0.0118	0.0138	0.0136
D (0.8Pmax) : δu	0.0618	0.0854	0.0632	0.0901	0.0931	0.0503	0.0481	0.0360	0.0393	0.0788	0.0764	0.0761	0.0768	0.0250	0.0434	0.0473
初期剛性K	5.73E+06	3.30E+06	5.75E+06	5.51E+06	5.19E+06	6.59E+06	6.79E+06	6.39E+06	6.36E+06	346686	5.16E+06	4.54E+06	4.89E+06	6.75E+06	6.75E+06	6.09E+06
Energy	4857	7411	4947	8875	9183	5974	5139	3167	3464	888	5962	5879	6178	1938	4455	4968
Pu	90017	107072	89248	110877	111442	155101	134674	118581	114282	15877	87864	88628	93172	120643	132641	138398
D (Pu) : δv	0.0157	0.0324	0.0155	0.0201	0.0215	0.0235	0.0198	0.0186	0.0180	0.0458	0.0170	0.0195	0.0190	0.0179	0.0196	0.0227
$\mu = \delta u / \delta v$	3.93	2.63	4.07	4.48	4.34	2.14	2.42	1.94	2.19	1.72	4.48	3.90	3.98	1.40	2.21	2.08
De=1/sqrt(2 μ -1)	0.382	0.484	0.374	0.355	0.361	0.553	0.510	0.589	0.544	0.640	0.354	0.384	0.379	0.746	0.541	0.562

図 3-33 に示した No.11 と 12 のビス配列に基づき、 I_{xy} 、 Z_{xy} 、 C_{xy} を算出した。数値は以下となった。

釘配列係数																				
	I_{xy} 下 =	4.670	cm ² /cm ² ,	Z_{xy} 下 =	0.118	cm/cm ² ,	C_{xy} 下 =	1.100												

表 3-5 釘配列の釘配列定数計算



名称	LVL水平横	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
面材サイズ	3尺×6尺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
釘ピッチ	ピッチ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I_{xy} (cm ²)	4.67	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Z_{xy} (cm)	0.118	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
C_{xy}	1.10	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

VL水平横面		L(cm)	H(cm)	面材幅cm	面材高cm															
3尺×6尺	72	87	178	91	182															
ビス	釘X(cm)	釘Y(cm)	X0(cm)	Y0(cm)	Xr-X0(cm)	Yr-Y0(cm)	Xr-X0 ²	Yr-Y0 ²	Zr(cm)	Zx(cm)	Zy(cm)	Zz(cm)								
No.1	0	0	43.5	89	-43.5	-89	1892.25	7921	38.60653	41.01076										
No.2	7.5	1.5	43.5	89	-36	-87.5	1296	7656.25	30.64039	45.9347										
No.3	15	0	43.5	89	-28.5	-89	812.25	7921	22.33661	55.27683										
No.4	22.5	1.5	43.5	89	-21	-87.5	441	7656.25	14.42961	63.57225										
No.5	30	0	43.5	89	-13.5	-89	182.25	7921	6.926379	76.39312										
No.6	37.5	1.5	43.5	89	-6	-87.5	36	7656.25	1.56515	84.4705										
No.7	43.5	0	43.5	89	0	-89	0	7921	0	89										
No.8	49.5	1.5	43.5	89	6	-87.5	36	7656.25	1.56515	84.4705										
No.9	57	0	43.5	89	13.5	-89	182.25	7921	6.926379	76.39312										
No.10	64.5	1.5	43.5	89	21	-87.5	441	7656.25	14.42961	63.57225										
No.11	72	0	43.5	89	28.5	-89	812.25	7921	22.33661	55.27683										
No.12	79.5	1.5	43.5	89	36	-87.5	1296	7656.25	30.64039	45.9347										
No.13	87	0	43.5	89	43.5	-89	1892.25	7921	38.60653	41.01076										
No.14	85.5	7	43.5	89	42	-82	1764	6724	37.63418	36.40384										
No.15	87	14.5	43.5	89	43.5	-74.5	1892.25	5550.25	39.89502	29.69534										
No.16	85.5	22	43.5	89	42	-67	1764	4489	38.30999	25.14097										
No.17	87	29.5	43.5	89	43.5	-59.5	1892.25	3540.25	41.09477	19.51091										
No.18	89.5	37	43.5	89	42	-52	1764	2704	40.06886	15.58657										
No.19	87	44.5	43.5	89	43.5	-44.5	1892.25	1980.25	42.10437	11.18161										
No.20	85.5	52	43.5	89	42	-37	1764	1369	40.98824	8.072344										
No.21	87	59.5	43.5	89	43.5	-29.5	1892.25	870.25	42.8698	5.003254										
No.22	85.5	67	43.5	89	42	-22	1764	484	41.63379	2.898867										
No.23	87	74.5	43.5	89	43.5	-14.5	1892.25	210.25	43.3452	1.222177										
No.24	85.5	82	43.5	89	42	-7	1764	49	41.96248	0.295797										
No.25	87	89	43.5	89	43.5	0	1892.25	0	43.5	0										
No.26	85.5	96	43.5	89	42	7	1764	49	41.96248	0.295797										
No.27	87	103.5	43.5	89	43.5	14.5	1892.25	210.25	43.3452	1.222177										
No.28	85.5	111	43.5	89	42	22	1764	484	41.63379	2.898867										
No.29	87	118.5	43.5	89	43.5	29.5	1892.25	870.25	42.8698	5.003254										
No.30	85.5	126	43.5	89	42	37	1764	1369	40.98824	8.072344										
No.31	87	133.5	43.5	89	43.5	44.5	1892.25	1980.25	42.10437	11.18161										
No.32	85.5	141	43.5	89	42	52	1764	2704	40.06886	15.58657										
No.33	87	148.5	43.5	89	43.5	59.5	1892.25	3540.25	41.09477	19.51091										
No.34	85.5	156	43.5	89	42	67	1764	4489	38.30999	25.14097										
No.35	87	163.5	43.5	89	43.5	74.5	1892.25	5550.25	39.89502	29.69534										
No.36	85.5	171	43.5	89	42	82	1764	6724	37.63418	36.40384										
No.37	87	178	43.5	89	43.5	89	1892.25	7921	38.60653	41.01076										
No.38	79.5	176.5	43.5	89	36	87.5	7656.25	30.64039	45.9347											
No.39	72	178	43.5	89	28.5	89	812.25	7921	22.33661	55.27683										

図 3-33 釘配列 (No.11)

本計算で用いる面内せん断剛性 G_b は、過去に試験したスギ LVL B 種の実験値 0.80kN/mm^2 を用いた。(文献: Large Panel-Shear Test による構造用単板積層材の面内せん断性能 中島他、2016年建築学会梗概集)

面材くぎ 1 本あたりの一面せん断の数値 ΔP_v 、 δv 、 δu 、 k を表 3-6 に示した。ここで示している値は試験体 1 体毎の数値である。

表 3-6 面材くぎ 1 本あたりの 1 面せん断特性 (1 体毎)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11-1	No. 11-2	No. 11-3	No. 12-1	No. 12-2	No. 12-3
l	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910	910
h	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820	1820
t	50	30	50	50	50	50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
G_b	1.27	0.8	1.27	1.27	1.27	1.27	0.8	0.8	0.8	0.774	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
γ_B	0.0009	0.0025	0.0009	0.0010	0.0010	0.0015	0.0035	0.0030	0.0030	0.0004	0.0022	0.0023	0.0024	0.0030	0.0033	0.0035
Γ_v	0.0123	0.0184	0.0128	0.0144	0.0130	0.0169	0.0139	0.0124	0.0124	0.0487	0.0134	0.0156	0.0145	0.0148	0.0139	0.0155
Γ_u	0.0584	0.0793	0.0608	0.0825	0.0854	0.0326	0.0295	0.0278	0.0278	0.0863	0.0794	0.0716	0.0709	0.0220	0.0326	0.0336
ΔP_v	4.20	4.57	4.17	5.02	4.95	7.39	6.41	5.43	5.43	0.74	4.12	4.14	4.34	5.57	6.14	6.37
δv	4.40	6.57	4.57	5.14	4.63	6.02	4.93	4.42	4.42	17.40	4.75	5.55	5.15	5.30	4.94	5.51
δu	20.87	28.32	21.73	29.45	30.49	11.63	10.50	9.94	9.94	30.82	28.32	25.56	25.31	7.84	11.59	11.97
k	0.96	0.70	0.91	0.98	1.07	1.23	1.30	1.23	1.23	0.04	0.87	0.75	0.84	1.05	1.24	1.16

ビス 75mm ピッチの接着有り・無しタイプの各 3 体ずつを抽出して 3 体の値を計算した。荷重変位曲線を図 3-34 に、包絡線を図 3-35 に、計算結果を表 3-7 に示した。

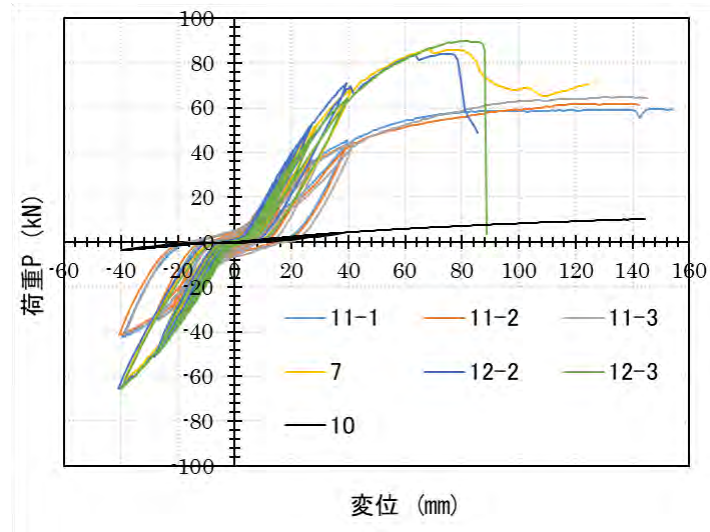


図 3-34 荷重変位曲線 (No.7、No10、No11、No12)

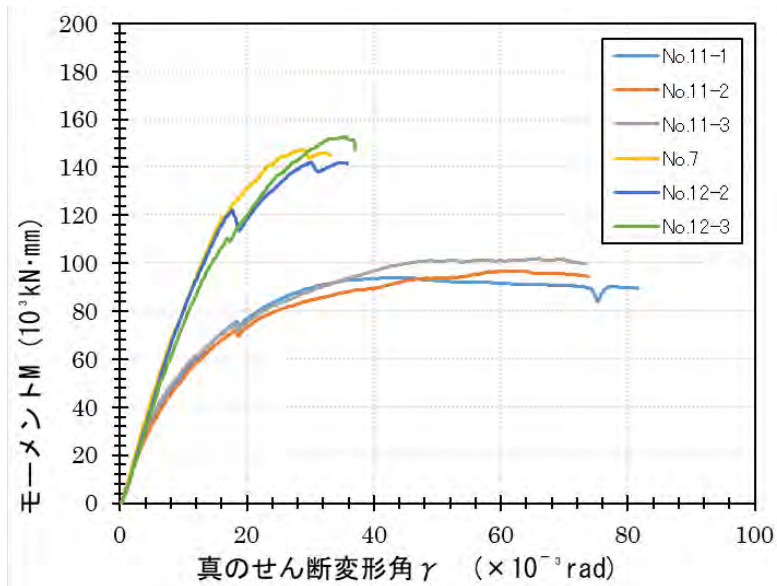


図 3-35 包絡線比較 (No7、No11、No12)

表 3-7 面材くぎ 1 本あたりの 1 面せん断特性 (3 体毎)

ビス@75 接着無し										
	No. 11-1	No. 11-2	No. 11-3	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	k		
										kN/mm
ΔPv	4.12	4.14	4.34	4.20	0.125	0.030	0.986	4.14	0.835	
δv	4.75	5.55	5.15	5.15	0.403	0.078	0.963	4.96		
δu	28.32	25.56	25.31	26.39	1.669	0.063	0.970	25.61		
ビス@75 接着有り										
	No. 7	No. 12-2	No. 12-3	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	k		
ΔPv	6.41	6.14	6.37	6.31	0.145	0.023	0.989	6.24	1.256	
δv	4.93	4.94	5.51	5.12	0.331	0.065	0.970	4.97		
δu	10.50	11.59	11.97	11.35	0.764	0.067	0.968	10.99		

3. 3. 1. 5 実大サイズ構面内性能の検討

3. 3. 1. 3で算出した1本あたりの特性値を使用し、3. 3. 3で実施する実大サイズの水平構面のせん断耐力を推定した。実大試験体図面を図 3-36 に示した。計算結果を表 3-8 に示した。

表 3-8 910mm×3640mm 構面のせん断耐力計算値

	K0 kN/cm	M150 kN*cm	My kN*cm	Mu kN*cm	μ	$0.2(2\mu - 1 \cdot Mu)$ kN*cm	Pa kN	決定	相当床倍率
接着無し	1,217,904	8,119	16,593	17,588	4.52	9,981	22.31	M150	12.5
接着有り	1,700,603	11,337	25,009	26,510	1.95	9,035	24.82	Mu	13.9

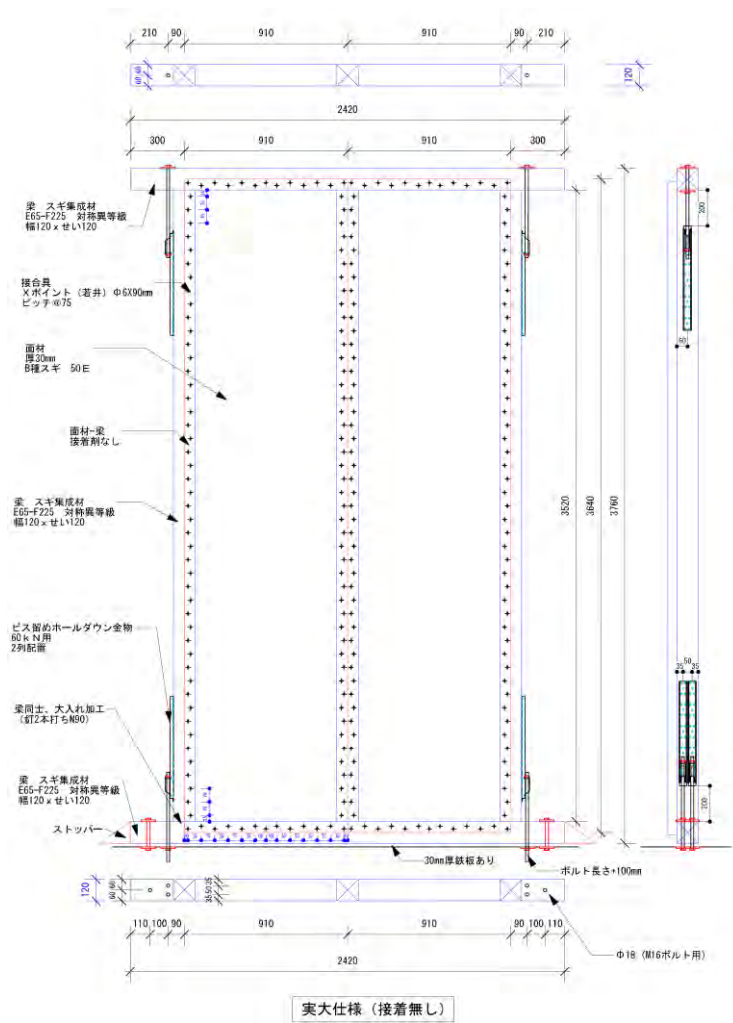


図 3-36 実大サイズ試験体 (面材 幅 910 mm×高 3640mm)

面材張り大壁の計算書

右図に示す面材張り大壁について、詳細計算法により、許容せん断耐力を計算する。

・仕様

幅: 91 cm

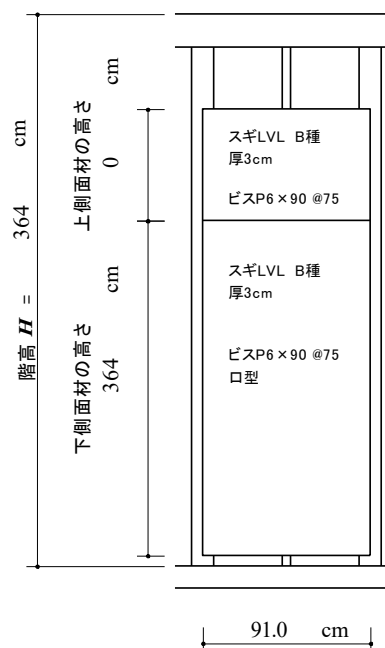
高さ: 364 cm

面材: スギLVL B種
厚さ 3 cm

釘: ビスP6×90
ピッチ 7.5 cm

・参照資料

- ・ 木造軸組工法住宅の許容応力度設計
(財)日本住宅・木材技術センター編(以下 許.)



(1) 面材釘の1面せん断データ

- ・ スギLVL B種 厚3cm+ビスP6×90
より

$$k = 8.35 \text{ kN/cm}, \quad \Delta P_v = 4.14 \text{ kN},$$

$$\delta_v = 0.50 \text{ cm}, \quad \delta_u = 2.56 \text{ cm}$$

(2) 面材のせん断弾性係数、および、寸法

- ・ せん断弾性係数 $G_B = 80 \text{ kN/cm}^2$

- ・ 面材の厚さ $t = 3 \text{ cm}$

- ・ 面材の面積: 下側の面材 $A_{w下} = 91.0 \text{ cm} \times 364.0 \text{ cm} = 33124.0 \text{ cm}^2$
上側の面材 $A_{w上} = 0.0 \text{ cm} \times 0.0 \text{ cm} = 0.0 \text{ cm}^2$

(3) 釘の配列による係数

- ・ 下側の面材: 縦, 間柱@cm, 口型, 釘ピッチ7.5cm
より

$$I_{xy下} = 5.200 \text{ cm}^2/\text{cm}^2, \quad Z_{xy下} = 0.121 \text{ cm}/\text{cm}^2, \quad C_{xy下} = 1.060$$

- ・ 上側の面材: , 間柱@cm, , 釘ピッチ7.5cm
より

$$I_{xy上} = 0.000 \text{ cm}^2/\text{cm}^2, \quad Z_{xy上} = 0.000 \text{ cm}/\text{cm}^2, \quad C_{xy上} = 0.000$$

(4) 面材張り大壁の回転剛性 K_θ の計算

・ 許.4.4.3式より,

$$\text{下側の面材: } K_{\theta下} = \frac{A_{w下}}{\frac{1}{I_{xy下} \cdot k} + \frac{1}{G_B \cdot t}} = \frac{33124.0}{\frac{1}{5.2 \times 8.35} + \frac{1}{80.0 \times 3.0}} = 1217904.8 \text{ kN/cm}$$

$$\text{上側の面材: } K_{\theta上} = \frac{A_{w上}}{\frac{1}{I_{xy上} \cdot k} + \frac{1}{G_B \cdot t}} = \frac{0.0}{\frac{1}{0.00 \times 8.35} + \frac{1}{80.0 \times 3.0}} = 0.0 \text{ kN/cm}$$

・ 壁全体の剛性 K_θ の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の合計)

$$K_\theta = K_{\theta下} + K_{\theta上} = 1217904.8 + 0.0 = 1217904.8 \text{ kN/cm}$$

(5) 変形角 $1/150$ [rad] 時のモーメント M_{150} ($=K_\theta/150$) の計算

・ $M_{150} = K_\theta / 150 = 1217904.8 / 150 = 8119.4 \text{ kN}\cdot\text{cm}$

(6) 降伏モーメント M_y の計算

・ 許.4.4.4式より,

$$\text{下側の面材: } M_{y下} = A_{w下} \times Z_{xy下} \times \Delta P_v = 33124.0 \times 0.121 \times 4.140 = 16593.1 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$\text{上側の面材: } M_{y上} = A_{w上} \times Z_{xy上} \times \Delta P_v = 0 \times 0 \times 4.140 = 0.0 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

・ 壁全体の降伏モーメント M_y の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の合計)

$$M_y = M_{y下} + M_{y上} = 16593.1 + 0.0 = 16593.1 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

(7) 終局モーメント M_u の計算

・ 許.4.4.5式より,

$$\text{下側の面材: } M_{u下} = C_{xy下} \times M_{y下} = 1.06 \times 16593.1 = 17588.7 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$\text{上側の面材: } M_{u上} = C_{xy上} \times M_{y上} = 0.00 \times 0.0 = 0.0 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

・ 壁全体の終局モーメント M_u の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の合計)

$$M_u = M_{u下} + M_{u上} = 17588.7 + 0.0 = 17588.7 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

(8) 塑性率 μ の計算

・ 許.4.4.6式より,

$$\text{下側の面材: } \mu_{下} = \frac{\delta_u \cdot G_B \cdot t + \delta_v \cdot I_{xy下} \cdot k}{\delta_v (G_B \cdot t + I_{xy下} \cdot k)} = \frac{2.56 \times 80 \times 3 + 0.50 \times 5.2 \times 8.35}{0.50 (80 \times 3 + 5.2 \times 8.35)} = 4.53$$

$$\text{上側の面材: } \mu_{上} = \frac{\delta_u \cdot G_B \cdot t + \delta_v \cdot I_{xy上} \cdot k}{\delta_v (G_B \cdot t + I_{xy上} \cdot k)} = \frac{2.56 \times 80 \times 3 + 0.50 \times 0 \times 8.35}{0.496 (80 \times 3 + 0 \times 8.35)} =$$

・ 壁全体の塑性率 μ の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の最小値)

$$\mu = \min(\mu_{下}, \mu_{上}) = \min(4.53,) = 4.53$$

(9) $0.2\sqrt{2\mu-1} \cdot M_u$ の計算

・ $0.2\sqrt{2\mu-1} \cdot M_u = 0.2 \sqrt{2 \times 4.53 - 1} \times 17588.7 = 9981.3 \text{ kN}\cdot\text{cm}$

(10) 許容せん断耐力 P_a の計算

・ 許.4.4.1式より,

$$P_a = \frac{1}{H} \times \min \left\{ \begin{array}{l} M_y \\ M_{150} (=K_\theta/150) \\ 0.2\sqrt{2\mu-1} \cdot M_u \end{array} \right\} = \frac{1}{364} \times \min \left\{ \begin{array}{l} 16593.1 \\ 8119.4 \\ 9981.3 \end{array} \right\} = 22.31 \text{ kN}$$

面材張り大壁の計算書

右図に示す面材張り大壁について、詳細計算法により、許容せん断耐力を計算する。

・仕様

幅: 91 cm

高さ: 364 cm

面材: スギLVL B種

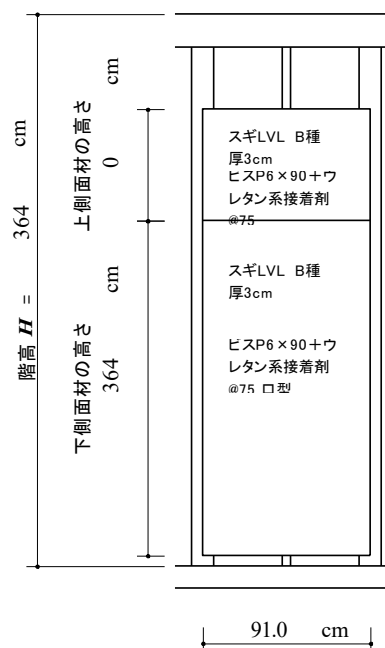
厚さ 3 cm

釘: ビスP6×90+

ピッチ 7.5 cm

・参照資料

- ・ 木造軸組工法住宅の許容応力度設計
(財)日本住宅・木材技術センター編(以下 許.)



(1) 面材釘の1面せん断データ

- ・ スギLVL B種 厚3cm+ビスP6×90+ウレタン系接着剤
LVL4種ビス1面せん断試験結果より

$$k = 12.56 \text{ kN/cm}, \quad \Delta P_v = 6.24 \text{ kN},$$

$$\delta_v = 0.50 \text{ cm}, \quad \delta_u = 1.10 \text{ cm}$$

(2) 面材のせん断弾性係数、および、寸法

- ・ せん断弾性係数 $G_B = 80 \text{ kN/cm}^2$

- ・ 面材の厚さ $t = 3 \text{ cm}$

- ・ 面材の面積: 下側の面材 $A_{w下} = 91.0 \text{ cm} \times 364.0 \text{ cm} = 33124.0 \text{ cm}^2$
上側の面材 $A_{w上} = 0.0 \text{ cm} \times 0.0 \text{ cm} = 0.0 \text{ cm}^2$

(3) 釘の配列による係数

- ・ 下側の面材: 縦, 間柱@cm, 口型, 釘ピッチ7.5cm
より

$$I_{xy下} = 5.200 \text{ cm}^2/\text{cm}^2, \quad Z_{xy下} = 0.121 \text{ cm}/\text{cm}^2, \quad C_{xy下} = 1.060$$

- ・ 上側の面材: , 間柱@cm, , 釘ピッチ7.5cm
より

$$I_{xy上} = 0.000 \text{ cm}^2/\text{cm}^2, \quad Z_{xy上} = 0.000 \text{ cm}/\text{cm}^2, \quad C_{xy上} = 0.000$$

(4) 面材張り大壁の回転剛性 K_θ の計算

・ 許.4.4.3式より,

$$\text{下側の面材: } K_{\theta下} = \frac{A_{w下}}{\frac{1}{I_{xy下} \cdot k} + \frac{1}{G_B \cdot t}} = \frac{33124.0}{\frac{1}{5.2 \times 12.56} + \frac{1}{80.0 \times 3.0}} = 1700603.7 \text{ kN/cm}$$

$$\text{上側の面材: } K_{\theta上} = \frac{A_{w上}}{\frac{1}{I_{xy上} \cdot k} + \frac{1}{G_B \cdot t}} = \frac{0.0}{\frac{1}{0.00 \times 12.56} + \frac{1}{80.0 \times 3.0}} = 0.0 \text{ kN/cm}$$

・ 壁全体の剛性 K_θ の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の合計)

$$K_\theta = K_{\theta下} + K_{\theta上} = 1700603.7 + 0.0 = 1700603.7 \text{ kN/cm}$$

(5) 変形角 $1/150$ [rad] 時のモーメント M_{150} ($=K_\theta/150$) の計算

・ $M_{150} = K_\theta / 150 = 1700603.7 / 150 = 11337.4 \text{ kN}\cdot\text{cm}$

(6) 降伏モーメント M_y の計算

・ 許.4.4.4式より,

$$\text{下側の面材: } M_{y下} = A_{w下} \times Z_{xy下} \times \Delta P_v = 33124.0 \times 0.121 \times 6.240 = 25009.9 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$\text{上側の面材: } M_{y上} = A_{w上} \times Z_{xy上} \times \Delta P_v = 0 \times 0 \times 6.240 = 0.0 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

・ 壁全体の降伏モーメント M_y の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の合計)

$$M_y = M_{y下} + M_{y上} = 25009.9 + 0.0 = 25009.9 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

(7) 終局モーメント M_u の計算

・ 許.4.4.5式より,

$$\text{下側の面材: } M_{u下} = C_{xy下} \times M_{y下} = 1.06 \times 25009.9 = 26510.5 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$\text{上側の面材: } M_{u上} = C_{xy上} \times M_{y上} = 0.00 \times 0.0 = 0.0 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

・ 壁全体の終局モーメント M_u の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の合計)

$$M_u = M_{u下} + M_{u上} = 26510.5 + 0.0 = 26510.5 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

(8) 塑性率 μ の計算

・ 許.4.4.6式より,

$$\text{下側の面材: } \mu_{下} = \frac{\delta_u \cdot G_B \cdot t + \delta_v \cdot I_{xy下} \cdot k}{\delta_v (G_B \cdot t + I_{xy下} \cdot k)} = \frac{1.10 \times 80 \times 3 + 0.50 \times 5.2 \times 12.56}{0.50 (80 \times 3 + 5.2 \times 12.56)} = 1.95$$

$$\text{上側の面材: } \mu_{上} = \frac{\delta_u \cdot G_B \cdot t + \delta_v \cdot I_{xy上} \cdot k}{\delta_v (G_B \cdot t + I_{xy上} \cdot k)} = \frac{1.10 \times 80 \times 3 + 0.50 \times 0 \times 12.56}{0.497 (80 \times 3 + 0 \times 12.56)} =$$

・ 壁全体の塑性率 μ の計算 (下側の面材の値と上側の面材の値の最小値)

$$\mu = \min(\mu_{下}, \mu_{上}) = \min(1.95,) = 1.95$$

(9) $0.2\sqrt{2\mu-1} \cdot M_u$ の計算

・ $0.2\sqrt{2\mu-1} \cdot M_u = 0.2 \sqrt{2 \times 1.95 - 1} \times 26510.5 = 9035.9 \text{ kN}\cdot\text{cm}$

(10) 許容せん断耐力 P_a の計算

・ 許.4.4.1式より,

$$P_a = \frac{1}{H} \times \min \left\{ \begin{array}{l} M_y \\ M_{150} (=K_\theta/150) \\ 0.2\sqrt{2\mu-1} \cdot M_u \end{array} \right\} = \frac{1}{364} \times \min \left\{ \begin{array}{l} 25009.9 \\ 11337.4 \\ 9035.9 \end{array} \right\} = 24.82 \text{ kN}$$

3. 3. 1. 6 まとめ

厚板 LVL を面材とした詳細計算法に基づく面内せん断試験を実施し、面材くぎ 1 本あたりのせん断特性値を算出、実大サイズ構面のせん断耐力を予測した。この結果をもととして、強度等級の高い LVL をはじめとした様々な躯体材料、LVL 面材を使用した構面を検討していくきっかけをつくることができたと考える。

3.3.2 ロケット型接合部一面せん断性能の検討

1. 研究の目的

中大規模木造建築を構成する床構造の設計に際して約 30mm 厚の構造用合板を利用する場合、鉛直性能を確保する必要性から小梁を多用する設計になる。CLT 厚板を床版として利用すれば小梁は不要となる反面、材積が増加するので重量物の施工方法に関する検討も必要となる。これらを解決する方法として、50mm～75mm 厚さの B 種 LVL を床版として利用し、横架材に接着剤を併用してビス留めする設計が考えられる。島根県産業技術センターと全国 LVL 協会はこれまでストレススキパネル(SSP)や合わせ梁などの組み立て梁の設計に関して、接合部に接着剤を併用すると、ビス留めのみで接合する接合部より剛性が増加し、振動問題やたわみ性能が大きく改善されることを明らかにした¹⁾。

本研究では、全国 LVL 協会構造利用委員会における取り組みである、床版として LVL 厚板を用い、梁材にビスや接着剤で接合した水平構面の設計にあたって、接合部の詳細な仕様を決定するための要素試験を行った。

接合部の要素試験の評価値から実大水平構面のせん断性能を予測する手法として面材釘試験による評価方法ⁱⁱ⁾(以下、面材釘試験という)が知られている。面材釘試験は実大試験と同じように面材を接合具で枠材に多数本接合した試験体に対して繰り返し加力を行って評価値を求めるものであるが、この評価には以下の課題がある。

①面材釘試験に用いる試験体は、ロケット型一面せん断試験体と比較して試験体の準備に時間や費用を要する。代案としてロケット型一面せん断試験で得られる評価値を利用する方法が考えられるが、面材釘試験と異なる一方向加力試験の評価値を繰り返し加力試験の結果と同等に扱えるのか不明であるため、文献²⁾においてはロケット型一面せん断試験の結果は詳細計算法のバックデータとしては利用できないと記載されている。ロケット型一面せん断試験の結果を詳細計算法に適用できるようにするには試験方法の改良が必要と考えられる。

②面材釘試験に用いる試験体は面材全体を多数本の接合具で接合されるが、各接合部は面材中心に対して異なる方向と荷重により変形をうける。ロケット型一面せん断試験体と比較して接合具が有する性能を平均化した評価値が得られる反面、異方性を有する面材における方向性の違いは明らかではない。面材の配置によっては危険側評価がなされる可能性がある。

③水平構面の設計にあたっては剛性向上の目的から現場施工型接着剤が併用されることが多いが、接着剤を併用したビス接合に関する接合部の要素試験の評価値から実大試験の結果を予測することは確立されていない。

これらの課題に対して、本研究では水平構面の実大試験の評価に即した要素試験の方法を考案し、考案した手法によって得られた評価値の妥当性について検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験方法の概要

実大試験の評価に即した要素試験を行うため、本研究で考案した改良点の概要を Table 1 に記載する。

Table 1 試験方法の改良点の概要

	従来法		本研究で考案した方法
	面材釘試験 詳細計算法を行うための公定法として知られる。	ロケット型一面せん断試験 研究報告は多数あるが、詳細計算法のバックデータとしては利用できないとされている。	ロケット型一面せん断試験
2.2 試験体の作製	試験体形状、ビス配列は標準的な試験手順に従う。 (面材寸法 910 × 1820mm、ビスピッチ 100mm~150mm)	試験体形状、ビス配列は標準的な試験手順に従う。 (長さ 300mm、ビス本数 4本--ビスピッチ 100~150mm 程度)	<ul style="list-style-type: none"> ・ビス配列、接着剤の塗布方法を実大試験体と同一仕様の接合部形状として評価を行った。 ・正負交番加力、すなわち試験体を圧縮、引張両方向の試験に対応させるため、試験体を両方向に固定可能な形状とした。
2.3 加力スケジュール	変形角に基づく正負交番加力を行う。	一方向に圧縮または引張を行う(単調加力)による研究報告が大多数である。 繰り返し加力を行う場合は、ISO 16670 または文献 ²⁾ による方法がある。	文献 ²⁾ による方法を正負交番加力に拡張して適用した。
2.4 一面せん断試験	横方向に加力可能な油圧ジャッキ(面内せん断試験機)を用いる。 正負交番加力を行うため、4台の変位計による計測を行うとともに、変形角に基づく制御を行う。	万能引張圧縮試験機を用いる。 圧縮または引張(一方向)試験による評価では、1台以上の変位計による計測を行い、変位による制御は行わない。	万能引張圧縮試験機を用いた。 正負交番加力を行うため、4台の変位計による計測を行うとともに、相対変位に基づく制御を行った。

2.2 試験体の作製

試験に用いた材料を Table 2 に、試験体の図面を Fig. 1 に示す。参考として実大試験体の形状を Fig. 2 に、接合部の詳細図を Fig. 3 に示した。既往の共同研究ⁱⁱⁱ⁾と同様、本研究でもロケット型一面せん断試験体を作製して評価を行ったが、圧縮加力だけで評価を行ったこれまでの試験に対して正負交番加力による評価が行えるようにするため、ロケット型一面せん断試験体を構成する主材の余長を長くとり、主材に引張加力を加えるためのピン穴を設けた。接着剤を併用した試験体によっては、接合部が最大荷重に達する前に引張加力により主材のピン穴から割裂破壊するものがあった。割裂破壊を防止するため、主材のピン穴周辺に X-point 110 (若井産業製)6 本を打ち込んだ。

接合部の仕様については実大試験体である床構面の仕様を考慮して、ビスピッチを 75mm または 150mm、ビス配列は千鳥配列とし、1 枚の側材に 2 本または 4 本のビス接合部を有する試験体長さとした。また、主材と側材の幅や配置を Fig. 3 に示す実大試験体接合部と同一形状にした試験体を作製すると座屈することから、側材は主材と同じ 120mm 幅とし、側材の中心にビス接合部および接着剤塗布部を配置する形状とした。この試験体に接着剤を塗布すると、接合部に実大試験体より広い幅で接着剤が広がることから、あらかじめ主材の両側 30mm にテフロンテープを貼付して主材の中心から幅 60mm だけに接着剤が塗布されるよう接着面積を制限した。接着剤の塗布量については施工要領書^{iv)}に従い、主材両側の接着面を合わせた一試験体あたり 20g~30g 塗布した。

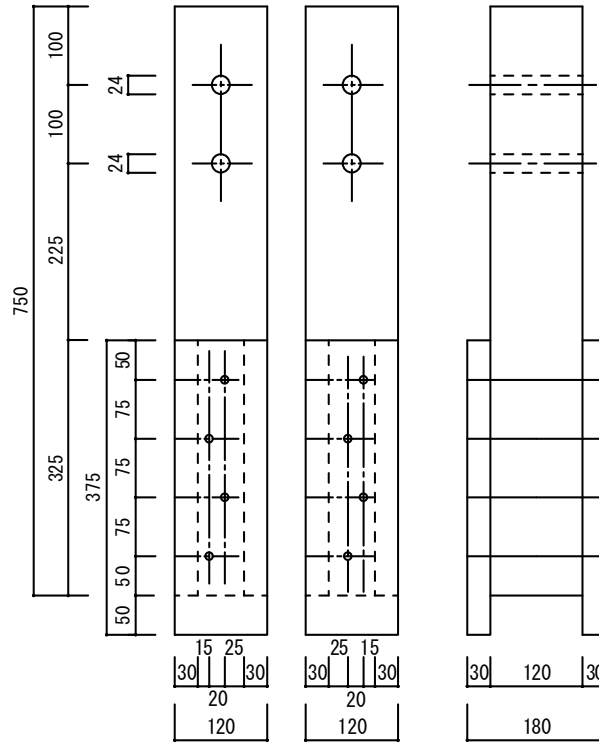
ここで、主材と側材をビスや接着剤を用いて手作業で接合すると、製作中に側材が主材に対して 1~2mm 程度ずれることがあった。両側 2 個の側材と主材の平行度が異なる試験体を試験装置に設置するとガタツキにより初期剛性の低下が懸念されるが、特に接着剤を併用した試験体ではその影響が大きいと考えられる。側材下部が 2 辺とも主材頂部と平行になるよう、製作が終了した試験体の側材下部を 5mm 程度切断して試験体のガタツキを除去したものを試験に供した。

試験体は 7 日以上放置したのち一面せん断試験に供した。

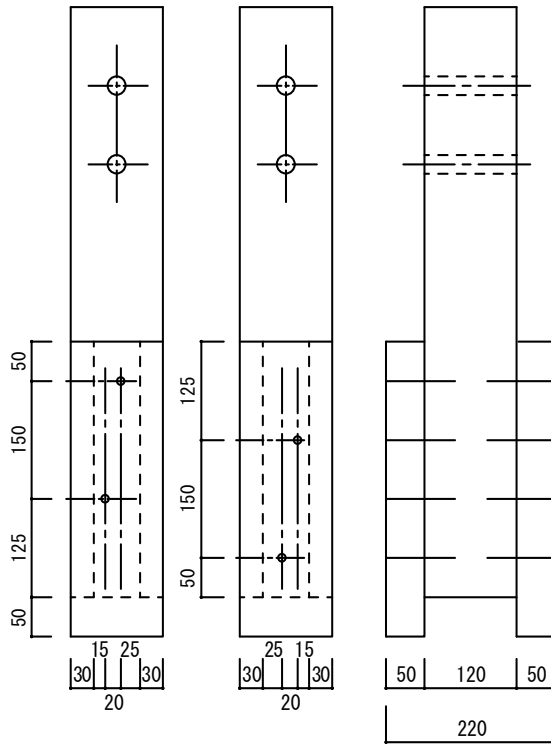
試験体を構成する主材や側材の種類、ビスの本数、接着剤の有無の組み合わせについて Table 3 に示す。

Table. 2 試験に用いた材料

主材	スギ集成材 E65-F225 対称異等級 幅 120x せい 120
	カラマツ LVL A 種 幅 120x せい 120
側材	スギ LVL B 種 厚さ 30mm
	カラマツ LVL B 種 厚さ 50mm
ビス	X-point 90 (若井産業製)
接着剤	PU1000 (セメダイン製)
テフロンテープ	チューコーフローテープ ASF-110FR(厚さ 0.08mm) (中興化成工業製)

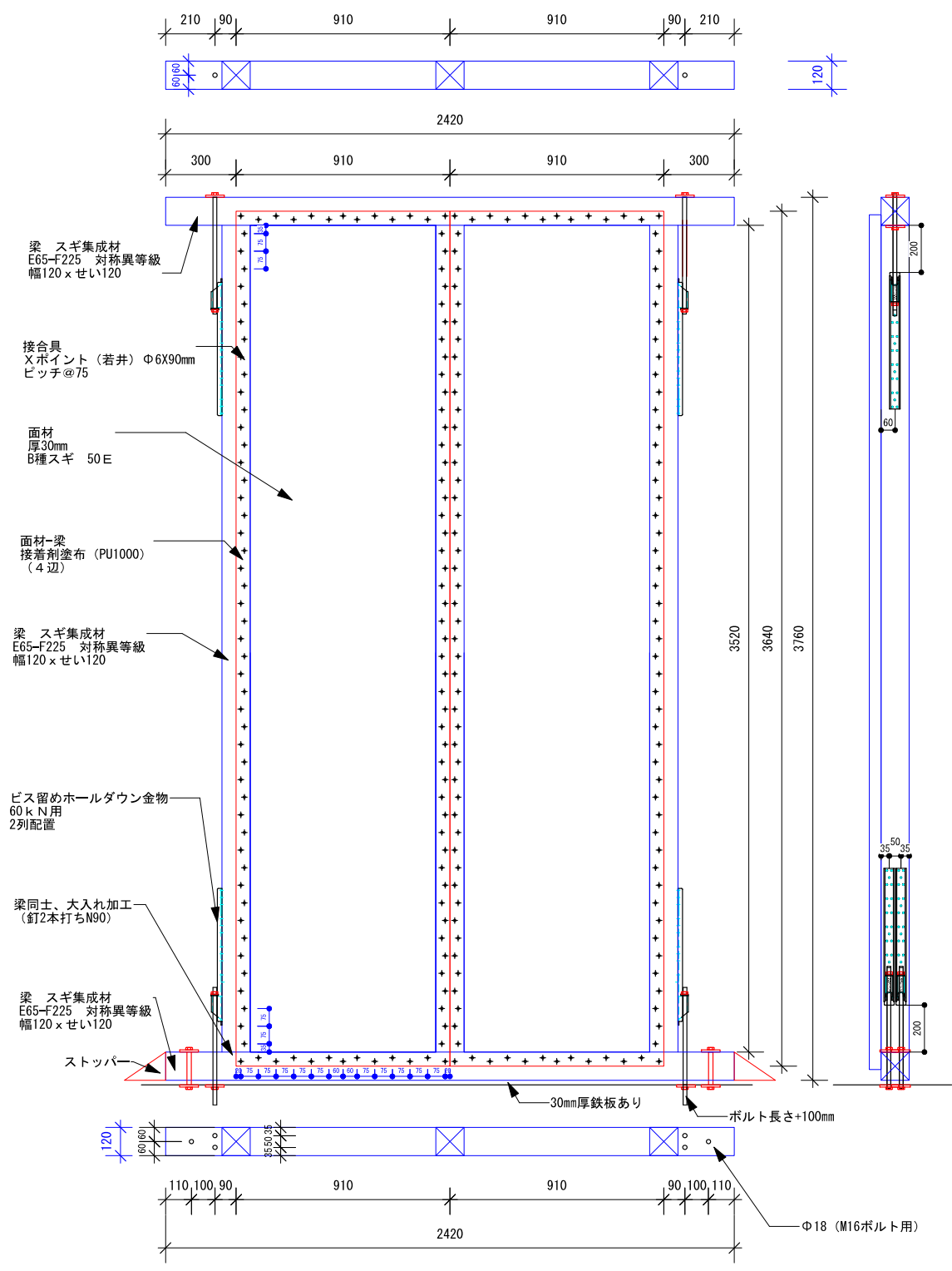


スギLVL/ビスピッチ75mm



カラマツLVL/ビスピッチ150mm

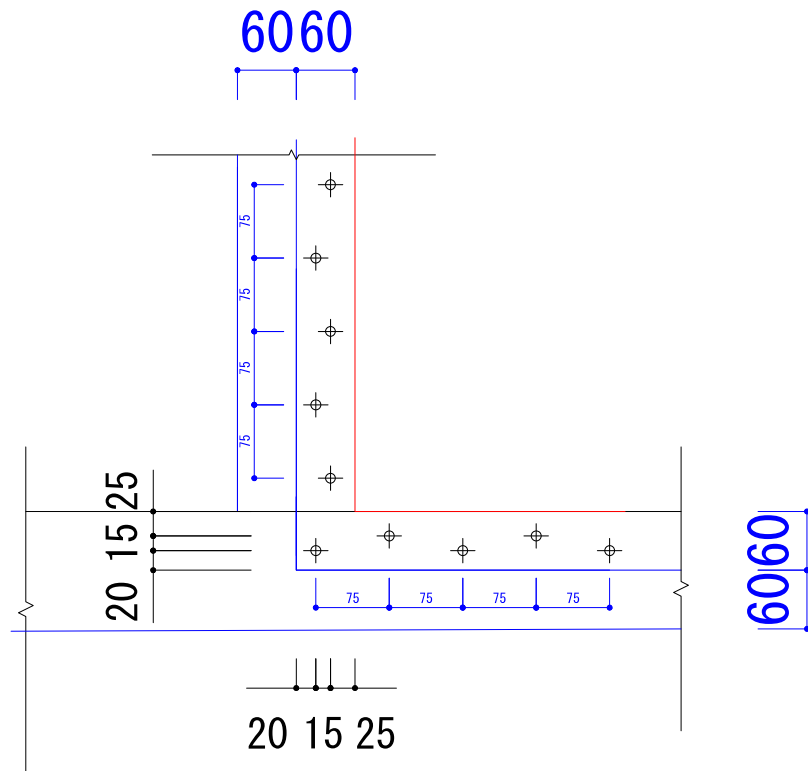
Fig. 1 作成した試験体の寸法 単位 mm



実大仕様 接着あり

2022.11.22

Fig. 2 実大試験体の形状



実大仕様 ビス位置拡大図

Fig. 3 実大試験体接合部の詳細図



Fig. 4 試験体の作製状況

Table. 3 試験体の略称と、試験体の構成

主材種類	側材種類	側材表層単板 木目方向	ビス 本数	接着剤	試験体 略称	試験体数		
						単調加力	正負交番	
スギ集成材 (S)	スギ LVL (S)	0 度	8	なし	SS080	1	6	
		90 度	8		SS980	1	6	
カラマツ LVL (K)	スギ LVL (S)	0 度	8		KS080	1	1	
		90 度	8		KS980	1	1	
スギ集成材 (S)	スギ LVL (S)	0 度	8		あり	SS08A	1	6
		90 度	8			SS98A	1	10
カラマツ LVL (K)	スギ LVL (S)	0 度	8	KS08A		1	1	
		90 度	8	KS98A		1	1	
スギ集成材 (S)	スギ LVL (S)	0 度	4	SS04A		2		
		90 度	4	SS94A		1	1	
カラマツ LVL (K)	スギ LVL (S)	0 度	4	KS04A		1	1	

(試験体略称の命名規則例)

S	S	9	8	A	【試験体 No.】
主材スギ 集成材	側材 B 種スギ LVL	側材木目 90 度	ビス 8 本 (75mm ピッチ)	接着剤あり	

※試験体数は、接合部の変形以外(主材の割裂破壊、側材の圧壊)が発生したため試験を中止したり、解析対象から除外した試験体を含む総数を示す。

2.3 加力スケジュール

本研究においては接合部の加力に関して、単調加力試験ではなく実大試験の条件に即した繰り返し加力試験とした。

接合性能の評価に関する繰り返し加力の試験方法として知られたものとして①ISO 16670⁹⁾による方法②文献²⁾による方法がある。いずれも単調加力試験によって評価値を求め、求められた評価値に対する倍率で計算した相対変位の目標値で加力方向を逆転させながら試験を行うが、①では D_u (最大荷重の80%に対応するピーク後の相対変位)を評価値として、設定した折り返し点での引張加力と圧縮加力とを原則3回繰り返すのに対し、②は δ_y (P_y 時変位)を基準とし、繰り返し回数は1回であり、また加力方向は一方向(引張または圧縮方向のみ)である。このような試験方法の違いから、①についてはビスの変形方向が繰り返し逆転するため変形量が少なくてもビスが破断し、②についてはビスの変形方向が逆転しないまま最後まで試験が進行するため単調加力試験とほとんど変わらない結果が得られるという問題がある。

そこで今回の試験における加力スケジュールは②を基準とし、折り返し点を δ_y の1/2、1、2、4、6、8、12、16倍に設定した。ビスの変形方向を逆転させるため、設定した折り返し点まで試験体に引張加力を与えた後に逆方向の折り返し点まで試験体に圧縮加力を与えた。ただし、今回作製したロケット型一面せん断試験体は側材の余長が40mm程度しかなかったことから、圧縮側の目標変位が余長を越えた時点で引き切りによる最終加力を行い、引張側の相対変位が30mmを越えて荷重が最大値の80%以下に低下するまで試験を行った。

2.4 一面せん断試験

産業技術センターが保有する万能引張圧縮試験機(オートグラフ AG-250kNX、島津製作所製)は、圧縮試験を行う際に圧縮ロッドを用いる仕様となっている。圧縮ロッドはクロスヘッド上側のロードセルとクロスヘッド下側の圧縮加力用ブロックとを接続する円柱部と、圧縮ロッドをクロスヘッドに取り付けるためのスリーブから構成されており、中心部の円柱がベアリングを介してスリーブ内を上下に摺動する機構となっている。これは圧縮試験時にロードセルに横座屈力が加わって損傷するのを防止する機構であり、この機構を利用すれば加力方向にかかわらず圧縮ブロックを垂直に上下させることが可能となる^{vi)}ことから、圧縮ブロックを引張加力にも用いて正負交番加力を行った。正負交番加力に用いた機構各部位の構造を Fig. 5 に示す。

試験体の固定方法や相対変位の測定・記録方法の概要を Fig. 6 に示す。本研究においては、万能引張圧縮試験機、およびレーザ式変位センサ(IL-S100 または IL-300、キーエンス製)を評価に利用した。接着剤を併用した試験体では微小変形を精度よく計測できる IL-S100(計測レンジ ± 30 mm、分解能 0.002mm、直線性 0.042mm)を用いた。この変位計を用いた場合計測レンジ(おおむね相対変位 30mm 付近)を超えた変位の計測はできなくなるので、計測レンジを超過した変位以降は万能引張圧縮試験機のクロスヘッド移動量を相対変位につなぎ合わせて評価した。よって変位計の計測レンジを超える測定は参考値程度でしか議論できないが、接着剤を併用した試験体では相対変位 30mm までに荷重が大きく低下しており、性能評価上は問題とされないと考えられる。一方、接着なし試験体においては相対変位 30mm 付近を過ぎても荷重の低下は緩やかであったことから、荷重が 0.8Pmax 以下に低下するまで変形を計測できる IL-300(計測レンジ ± 145 mm、分解能 0.01mm、直線性 0.7mm)を用いた。

万能引張圧縮試験機の定盤上に試験体を設置し、試験体を構成する 2 つの側材それぞれの相対変位が測定できるよう、変位センサ 4 台を主材の両側に取り付け、側材 4 か所にセンサ受光用当て板をねじ止めた。ただし島根県産業技術センターの万能引張圧縮試験機のアナログ入力アンプは変位センサ 2 台(相対変位 ch1, ch2)のみを接続できる仕様であったので、残り 2 台の変位センサ(相対変位 ch3, ch4)は通信ユニット(DL-RS1A、キーエンス製)を用いてパソコンソフトにより記録した。

試験体に加わる圧縮加力に対しては万能引張圧縮試験機定盤を反力とした。引張加力に対しては側材上部に鋼材を両側から設置し、定盤から鉛直に設置した M12 ボルト 4 本を使って鋼材を固定することで反力とした。また、試験体が回転しながら変形することが判明したため、側材を前後から鋼材で挟み込み、試験体の回転拘束を行った。

試験の制御には万能引張圧縮試験機付属のソフトウェア(TrapeziumX コントロール、島津製作所製)を用い、相対変位 ch1, ch2 の平均値を折り返し点に設定して制御を行った。単調加力試験における加力速度はクロスヘッドスピード 5mm/min とした。正負交番加力試験における加力速度は、包絡線部分についてはクロスヘッドスピード 5mm/min とし、試験時間の短縮のためこれ以外の加力スケジュールについては最大 500mm/min から 5mm/min まで段階的に変化させた。試験中の相対変位 ch1~4 および荷重を 100msec 毎に記録した。



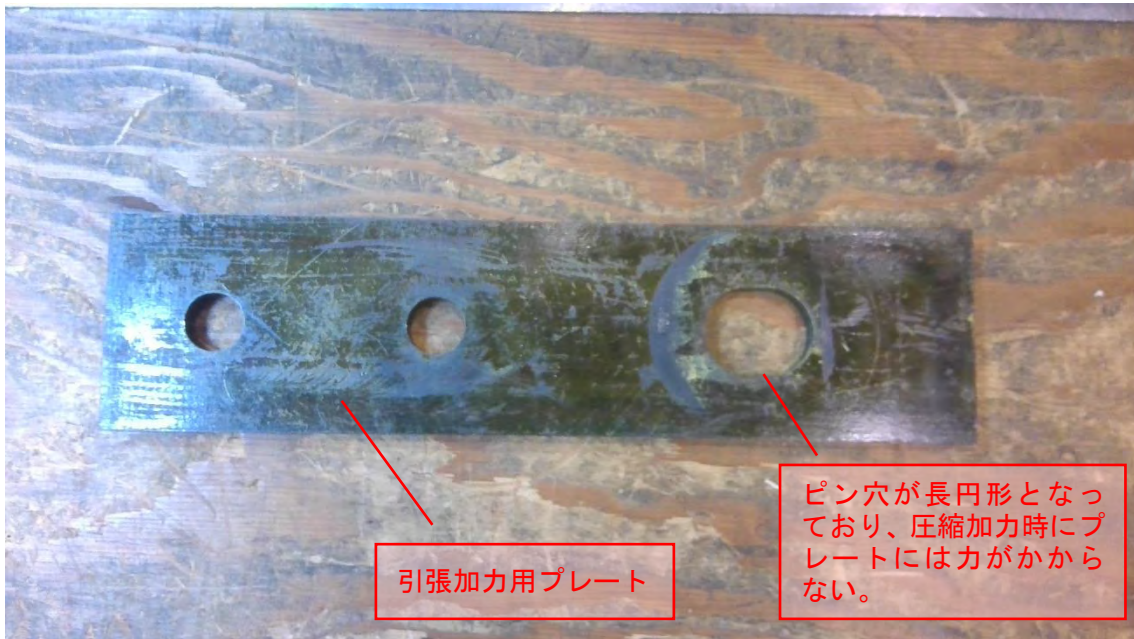
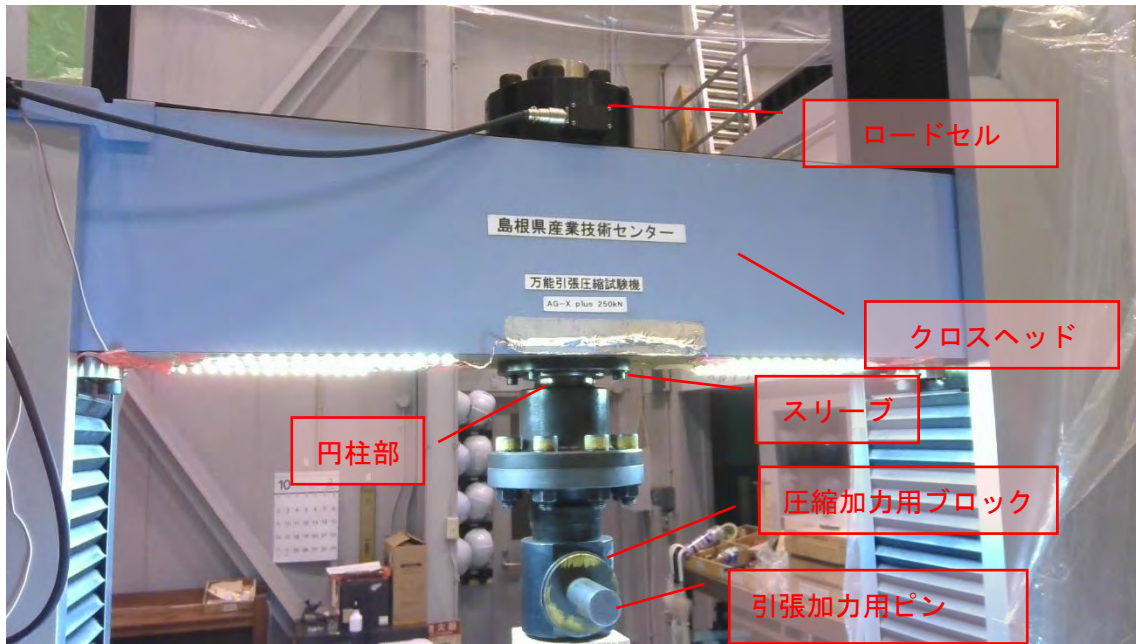


Fig. 5 正負交番加力に用いた機構各部位の構造

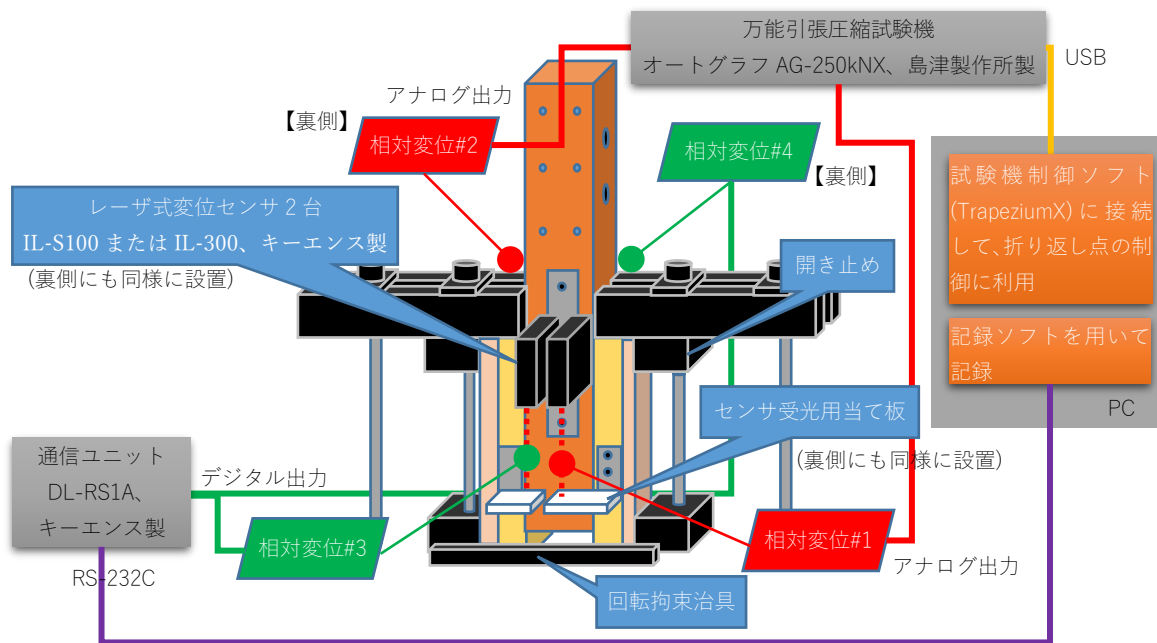


Fig. 6 試験体の固定方法、相対変位の測定・記録方法の概要

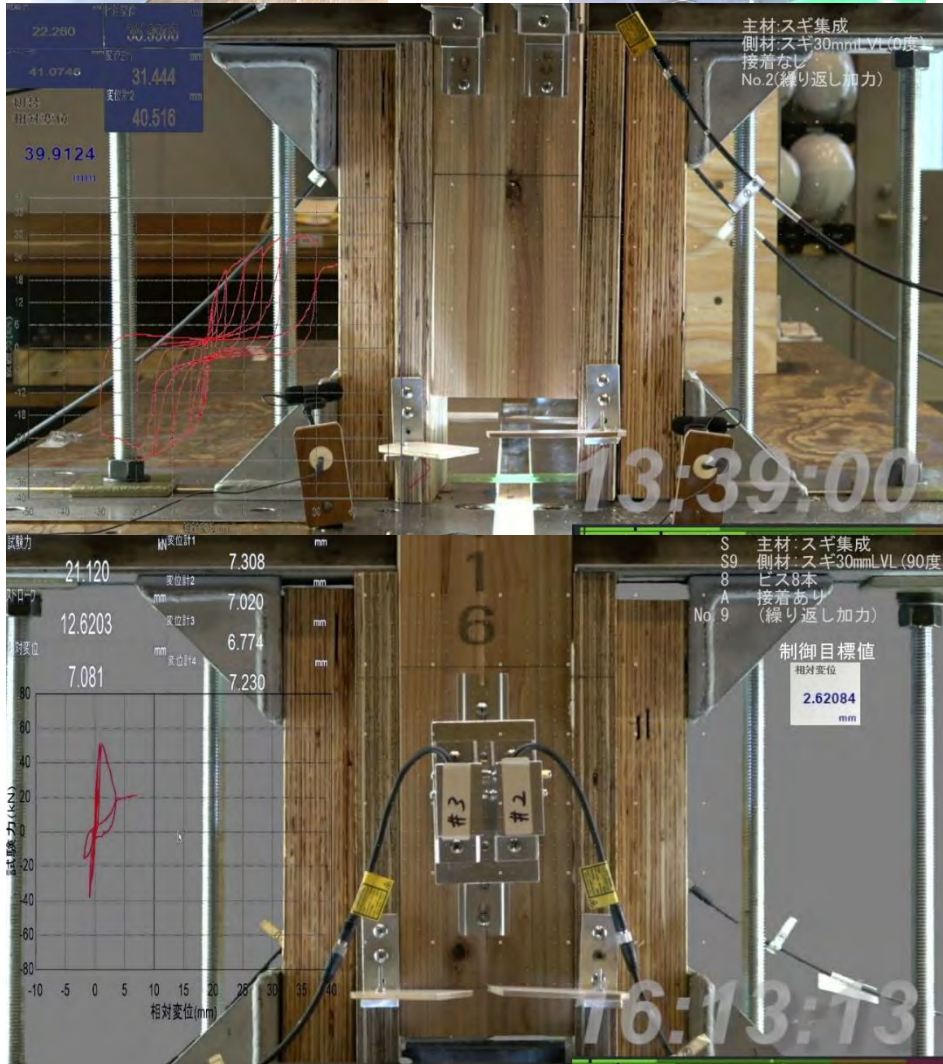


Fig. 7 試験中の様子

2.5 評価値の計算

得られた荷重-相対変位のデータを PickPoint (森林総合研究所軽部氏作成) に読み込み、包絡線および評価値の算定を行った。また、荷重-相対変位曲線を試験体ごとに比較するため、相対変位 0.01mm ごとの荷重を直線補間して包絡線データの正規化を行った。

3. 試験結果

3.1 試験体の破壊形状

試験体の破壊形状を Fig. 8 に示す。接着剤を併用した試験体において、下段右側の写真に示すように側材の表層単板が加力方向に対して 90 度としたものでは側材の圧壊が確認されるものも少なくなかった。これは加力中に引張加力の反力となる鋼材が両側にずれて、接合面に対して純粋な一面せん断力が働かなくなってしまったことも原因であったが、LVL の単板方向が主材に対して 90 度とした接合において接着剤を併用したときは、接着接合性能と LVL の座屈性能が拮抗していることが推察される。

相対変位 30mm までの正負交番加力を行ったところ、接着剤を塗布しない試験体では若干の曲がりが生じたものの、ビスが折れることはなかった。一方、接着剤を塗布した試験体で、ビスの曲がりには生じなかった。繰り返し加力であっても、ビスの曲がりほとんど生じなかったことから、今回考案した加力スケジュールを用いれば実大試験において接合部に加わる加力をよりよく再現できると考えられる。相対変位 30mm を超えて正負交番加力を行った試験体ではビス折れが発生した。

また接着剤を塗布した試験体における破壊形状は凝集破壊であり、木部の破壊はほとんど観察されなかった。ただし、上段右側の写真に示すように側材の表層単板が加力方向に対して 90 度とした試験体では、表層単板がローリングシアにより破壊した。

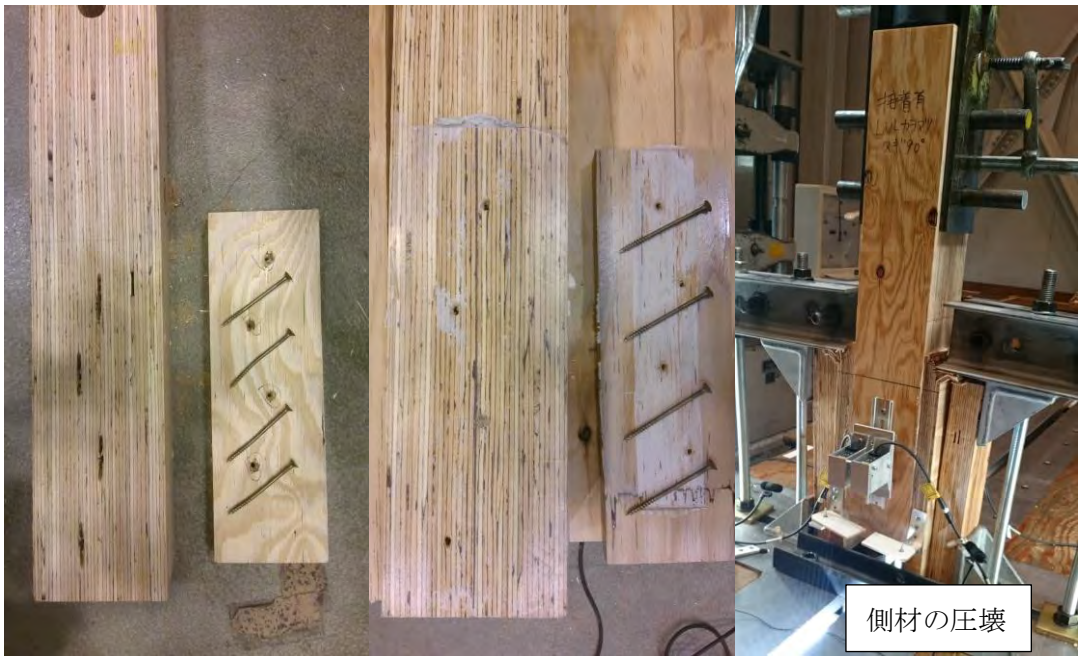
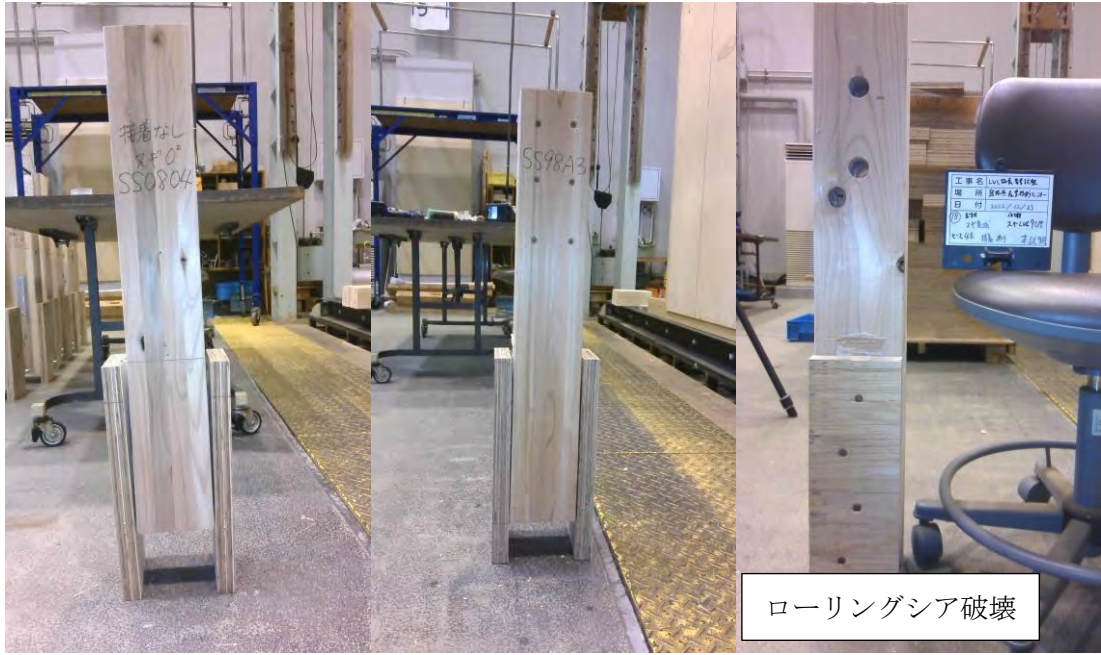


Fig. 8 試験体の破壊形状

3.2 荷重-変位曲線の比較

荷重-相対変位曲線(正負交番加力を行ったものについては包絡線)を Fig.9～15 に示す。Fig.9 および Fig.12 に示すように、単調加力では相対変位 40mm を過ぎても荷重の大きな低下は生じなかったのに対し、繰り返し加力を行った試験体では包絡線の折り返し点で荷重が低下し、特に相対変位 30mm 付近ではいずれの試験体も荷重が大きく低下した。これはビス折れの発生によるものである。

次に主材をスギ集成材としたときの接着剤塗布の有無(Fig. 11)について考察する。接着剤を塗布しない試験体(SSx80)についてはおおむね相対変位 20mm で最大荷重に達し、その後緩やかに荷重は低下した。これに対して接着剤を塗布した試験体(SSx8A)については相対変位 1.5mm～2mm 程度で最大荷重に達し、急速に荷重は低下した。単調加力試験と正負交番加力試験の結果とを比較すると、加力方向を切り替える変位で荷重は大きく低下したが、これは、正負交番加力試験においては包絡線として描画されない逆方向加力によるエネルギー吸収を考慮に入れば当然の結果と考えられるが、逆方向加力によるエネルギー吸収絶対量の比較に関してはさらに検討が必要である。

なお、Fig. 10 に示すようにビス本数を 4 本(ビスピッチ 150mm)とした試験体では、ビスが荷重を負担する相対変位 5mm 以上は当然ながら、主として接着剤が荷重を負担すると考えられる相対変位 5mm 以下の領域でもビス本数が多い試験体よりも荷重は低くなった。これは接着剤の圧縮効果が低いことが原因として考えられる。

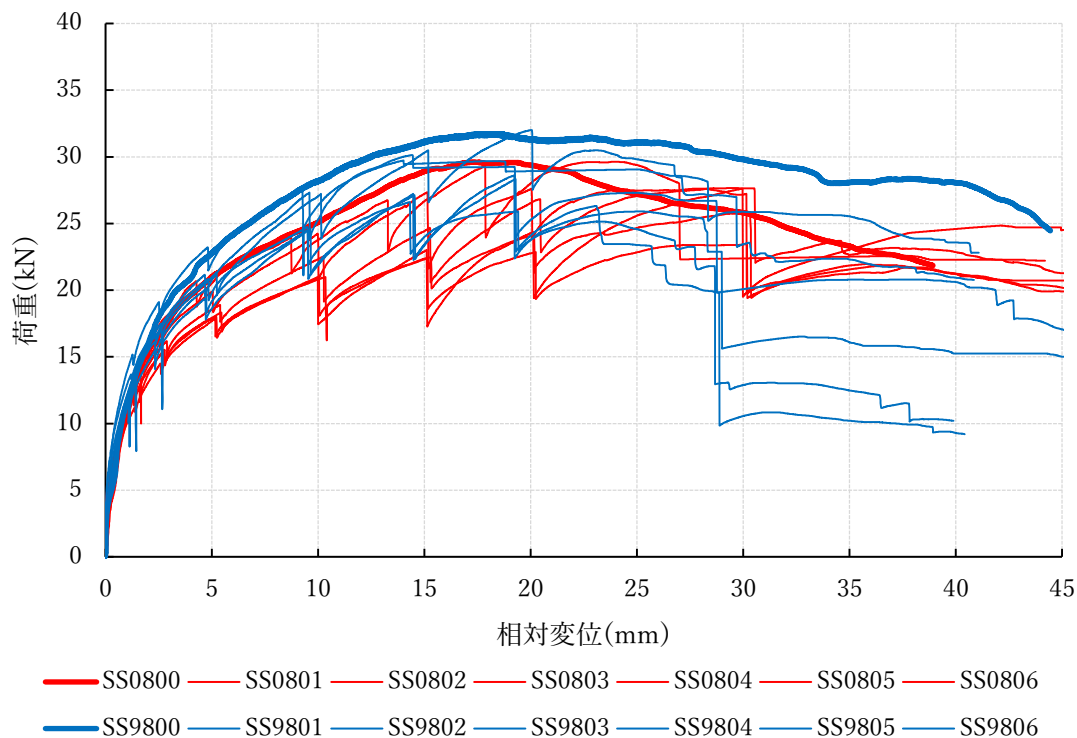


Fig.9 荷重-変位曲線(接着なし/主材スギ集成)

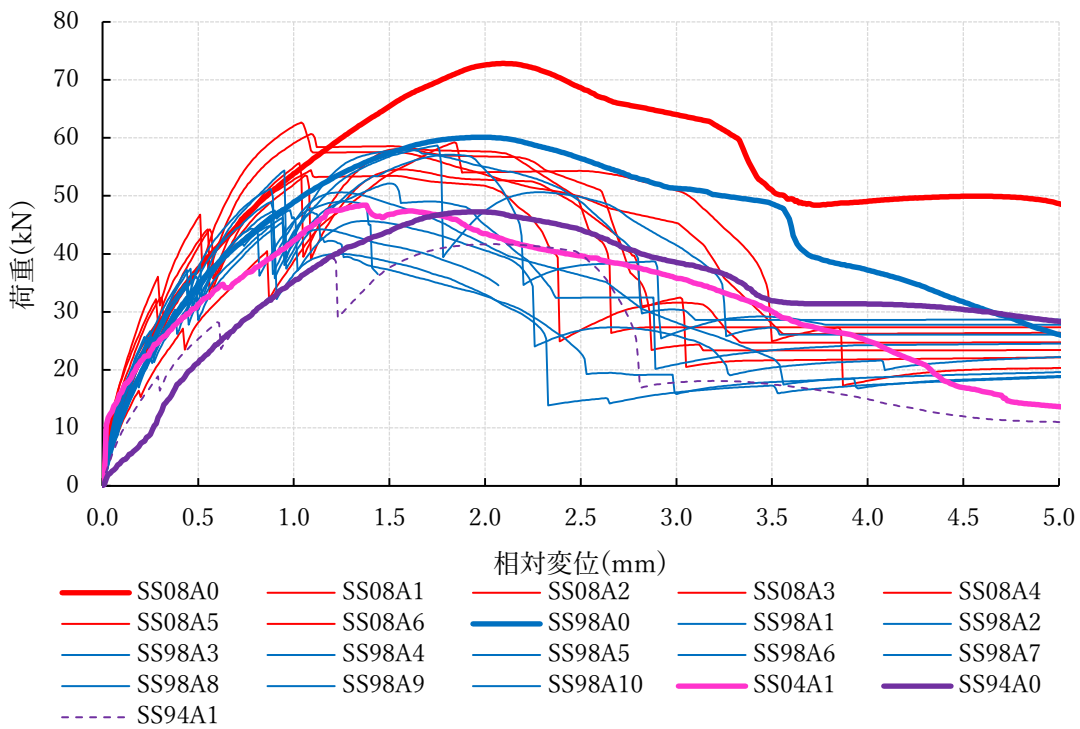
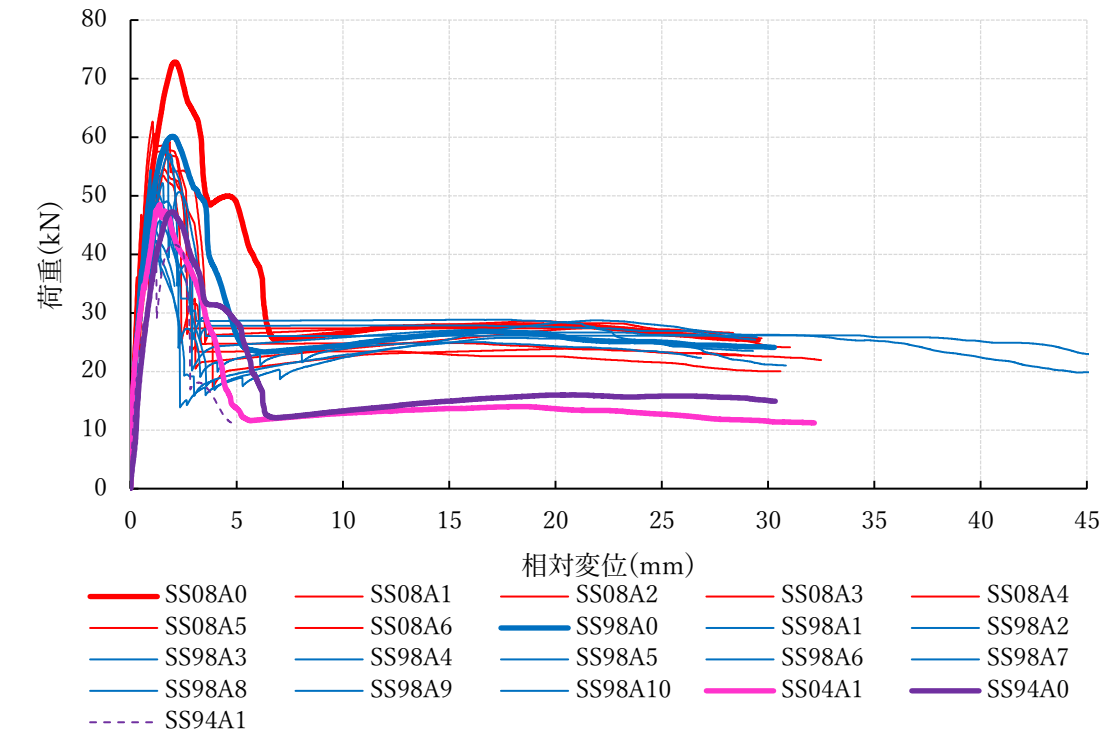


Fig. 10 荷重変位曲線(接着あり/主材スギ集成)
 上: 試験終了時までの全体図、下: 変位 5mm までの拡大図

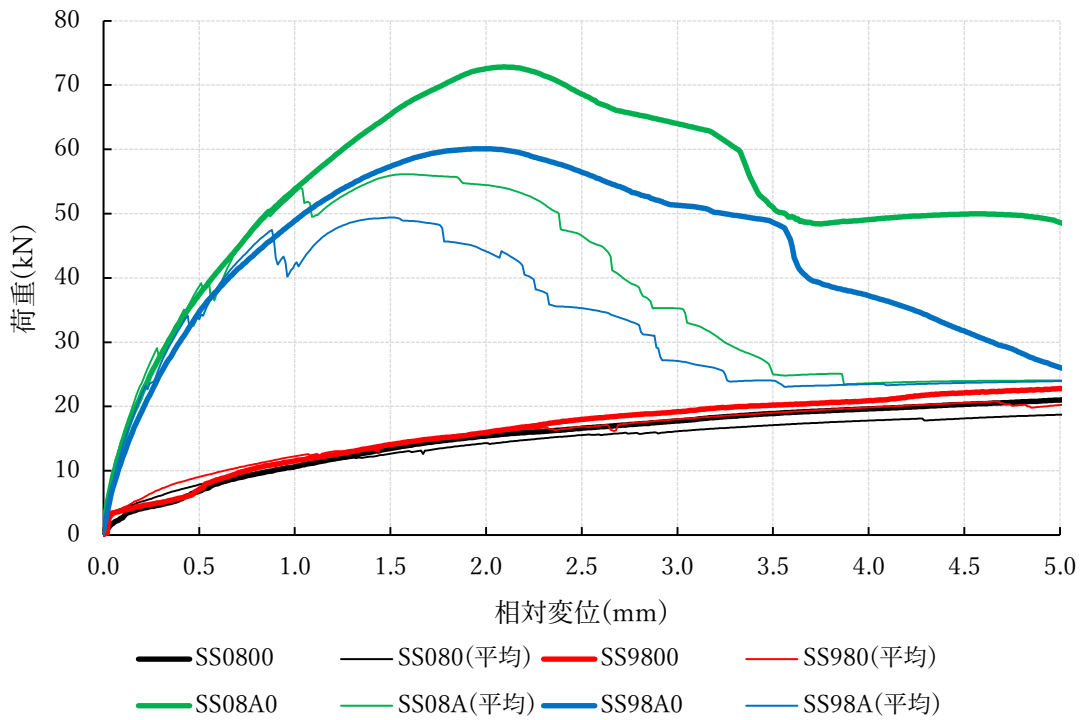
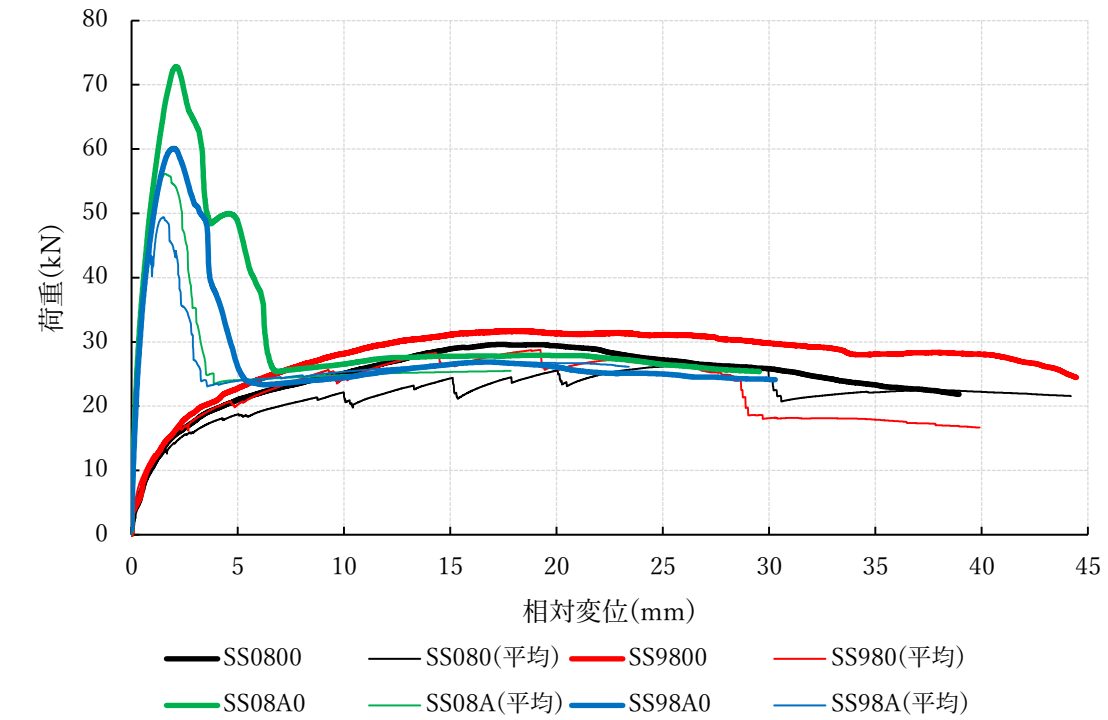


Fig. 11 荷重-変位曲線(主材スギ集成材)

上: 試験終了時までの全体図、下: 変位 5mm までの拡大図

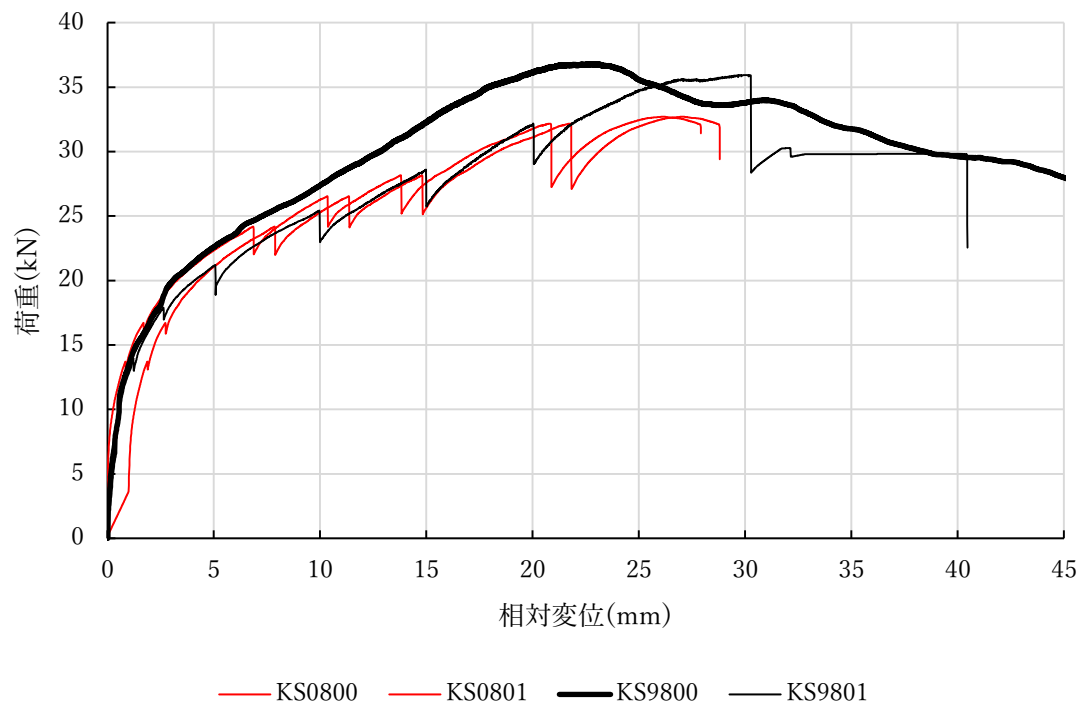


Fig. 12 荷重変位曲線(接着なし/主材カラマツ LVL)

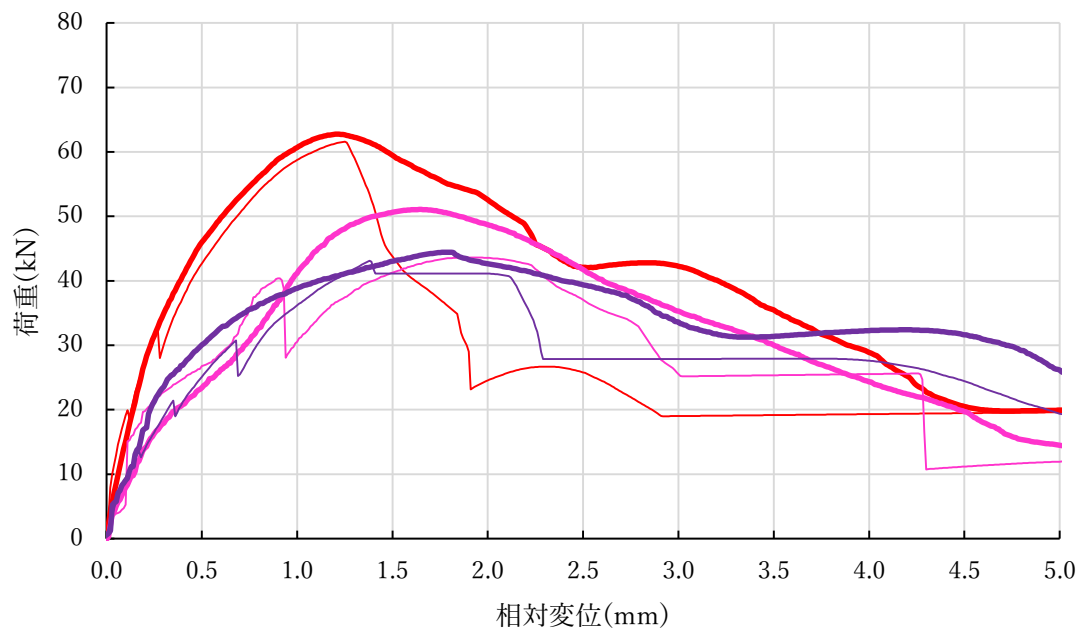
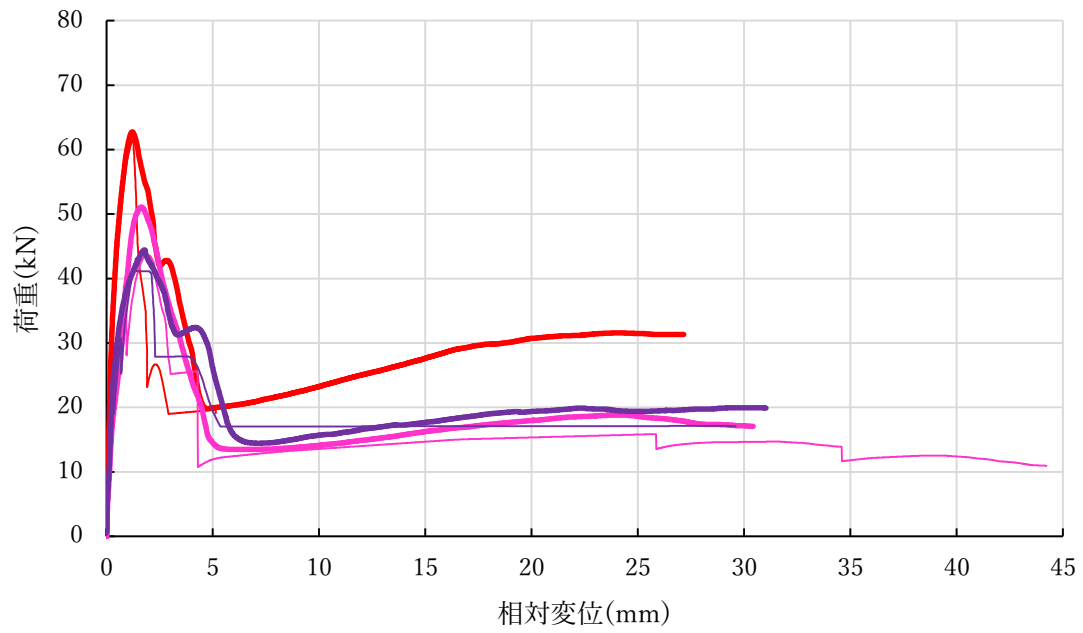


Fig. 13 荷重-変位曲線(接着あり/主材カラマツ LVL)
 上: 試験終了時までの全体図、下: 変位 5mm までの拡大図

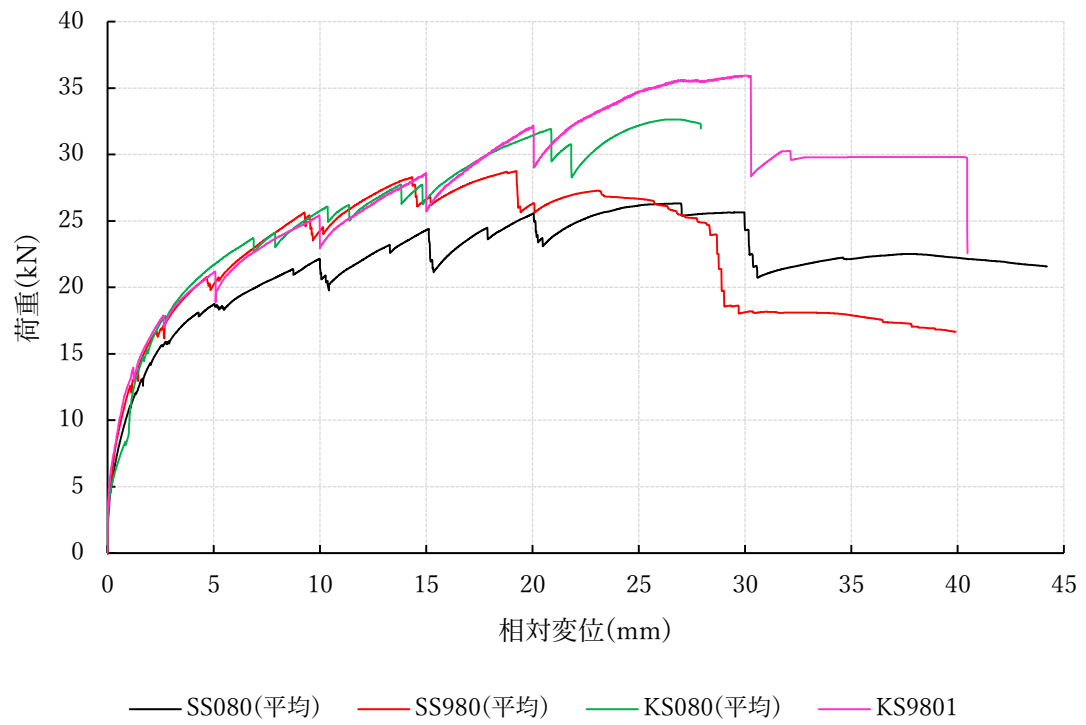


Fig. 14 荷重-変位曲線(接着なし/正負交番加力)

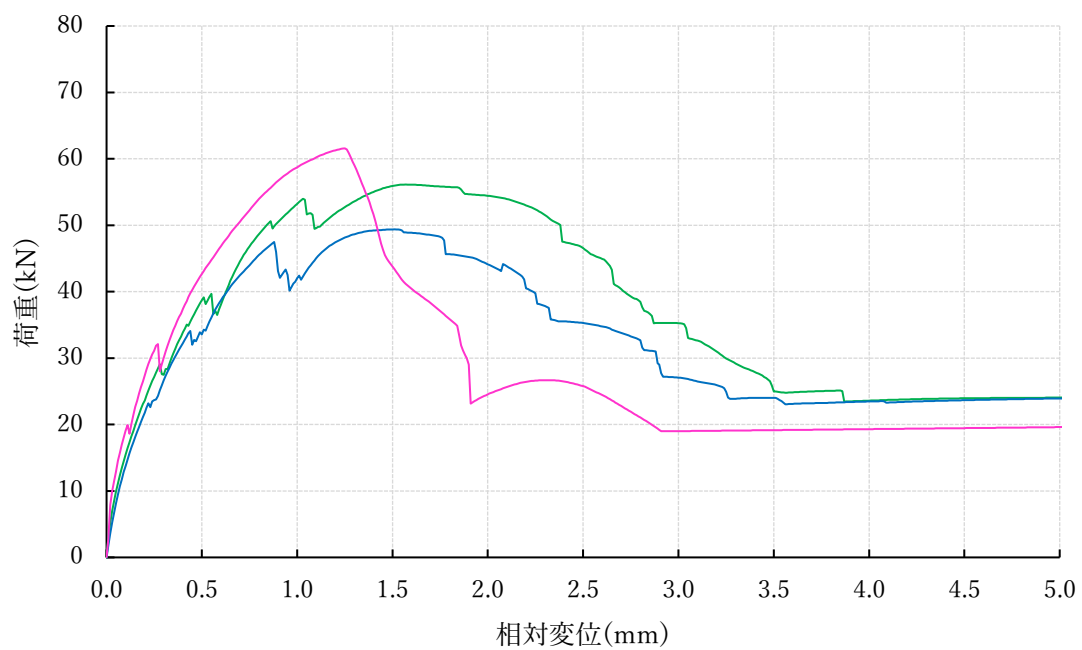
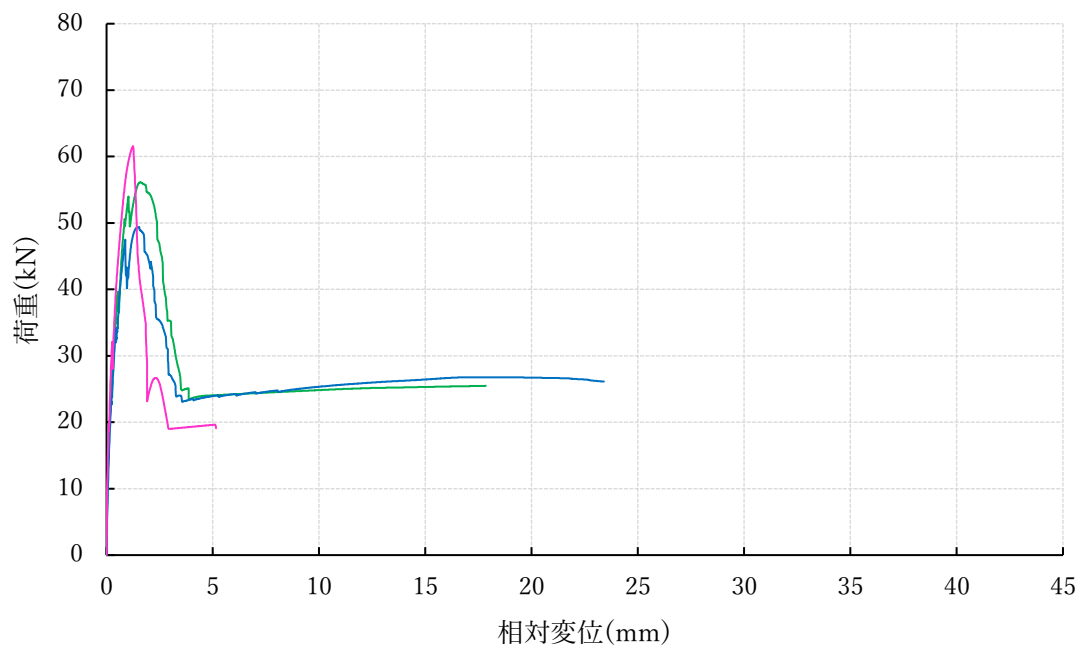


Fig. 15 荷重-変位曲線(接着あり/正負交番加力)
 上: 試験終了時までの全体図、下: 変位 5mm までの拡大図

3.3 評価値の比較

評価値を Table 4～10 に示す。SS98A の正負交番加力試験、KS98A の単調加力試験および正負交番加力試験について最大荷重に達する前に引張加力の反力となる鋼材が両側にずれて側材が圧壊したものを解析から除外した。SS98A については解析から除外する試験体が多く見られたため、文献²⁾に従って $n \geq 6$ で評価するため試験体を追加作製したところ、追加作製した 4 体とも側材の圧壊は生じなかったため SS98A の 95%下限値、50%下限値の評価については $n=8$ で算定した。

接着剤を塗布しない試験体と塗布した試験体を比較すると、接着剤を塗布した試験体では全般にばらつきが大きく、結果として 95%下限値あるいは 50%下限値が低くなっている。しかし接着剤を塗布した試験体では接着剤を塗布しない試験体よりも P_{max} が 2 倍、剛性は 10 倍以上を示し、接着剤の塗布により接合部の剛性の向上が期待される。

側材の表層単板が加力方向に対して 0 度とした試験体(SS98x)と 90 度とした試験体(SS08x)を比較すると、接着剤を塗布しない試験体(SS080、SS980)では SS980 の最大荷重や剛性が SS080 より大きいのにに対し、接着剤を塗布した試験体(SS08A、SS98A)を比較すると SS08A の最大荷重や剛性が SS98A より大きくなった。これは、接着剤を塗布しない試験体については単板が荷重に対して 90 度方向であることがビスのせん断力に優位に働くのに対し、接着剤を塗布した場合は LVL の座屈性能が問題になることが理由として考えられる。

参考として、全国 LVL 協会が行った面材釘試験の結果を、今回考案した試験と比較した結果を Table 11 に示す。接着なし試験体については面材釘試験と今回考案した試験では同程度の値を示し、今回考案した試験方法を用いれば妥当な評価が行えることを確認できた。しかし接着あり試験体については面材釘試験で算出された δv 、 δu および k と今回考案した試験とは 10 倍もの差が生じた。これは、面材釘試験体においては接着剤が部分的に剥離を生じて荷重が徐々に低下することもあったが、接着面積が少ないロケット型一面せん断試験では面材釘試験体よりビスによる圧縮力が大きく、材料間が密着した状態で接着されて、接着強度や剛性は面材釘試験より大きな値となったことが理由として考えられる。この接着条件では接着剤の剥がれが一気に進行して荷重が大きく低下するため、既往の詳細計算法の適用は難しい。接着併用接合を既往の詳細計算法に適用するには、今後さらに検討を行う必要がある。

Table 4 各試験体の Pmax(ビス 1 本あたり)

単位 kN

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	3.70	3.70	2.93	3.22	3.45	3.45	3.46			3.37	0.27	2.75	3.29
SS980	3.97	3.72	3.54	3.33	3.58	3.77	4.00			3.66	0.23	3.12	3.59
KS080	3.64	4.09											
KS980	4.60	4.49											
SS08A	9.10	7.41	7.26	7.59	7.83	6.80	6.82			7.29	0.41	6.32	7.16
SS98A	7.51	7.14	7.24	5.96	6.52	5.61	6.12	6.41	7.34	6.54	0.64	5.14	6.38
KS08A	7.84	7.70											
SS04A	12.10												
SS94A	11.81	10.42											
KS04A	12.76	10.90											
KS94A	11.11	10.79											

Table 5 各試験体の Py(ビス 1 本あたり)

単位 kN

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	2.07	2.23	1.78	1.93	2.00	1.97	1.99			1.98	0.15	1.64	1.94
SS980	2.21	2.03	1.93	1.87	2.04	1.89	2.08			1.97	0.09	1.77	1.95
KS080	2.03	2.30											
KS980	2.31	2.31											
SS08A	4.56	3.73	3.51	3.61	4.04	3.88	3.31			3.68	0.26	3.07	3.60
SS98A	3.97	3.67	3.66	3.10	3.66	2.89	3.17	3.18	4.00	3.42	0.38	2.59	3.32
KS08A	4.22	3.71											
SS04A	5.83												
SS94A	6.09	5.40											
KS04A	5.70	6.03											
KS94A	6.47	5.72											

Table 6 各試験体のK(ビス1本あたり) 単位 kN

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	0.83	0.81	0.72	0.71	0.59	0.84	0.73			0.74	0.09	0.53	0.71
SS980	0.92	1.28	0.84	1.06	0.78	1.17	0.93			1.01	0.19	0.56	0.95
KS080	1.11	0.95											
KS980	0.90	0.74											
SS08A	9.54	6.89	10.65	16.03	16.83	14.01	13.21			12.94	3.68	4.34	11.84
SS98A	9.08	8.85	11.45	14.32	9.38	13.97	12.02	14.69	9.43	11.76	2.38	6.55	11.17
KS08A	15.03	14.98											
SS04A	23.19												
SS94A	10.27	13.88											
KS04A	12.04	46.44											
KS94A	17.89	12.97											

Table 7 各試験体のEnergy(ビス1本あたり) 単位 kN・mm

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	105.7	82.2	126.6	126.3	165.5	88.5	119.4			118.1	30.2	47.6	109.1
SS980	151.9	127.8	71.9	81.4	81.4	90.5	95.8			91.4	19.6	45.6	85.6
KS080	89.0	92.5											
KS980	155.0	140.8											
SS08A	23.6	17.3	15.2	15.5	14.8	13.0	13.6			14.9	1.5	11.3	14.4
SS98A	20.6	11.4	14.9	10.4	10.4	7.7	7.9	10.4	14.8	11.0	2.7	5.11	10.31
KS08A	13.0	8.4											
SS04A	25.4												
SS94A	27.5	21.9											
KS04A	24.3	14.1											
KS94A	25.9	18.1											

Table 8 各試験体の $P_u (= \Delta P_v)$ 、ビス 1 本あたり) 単位 kN

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	3.31	3.29	2.62	2.73	2.90	3.13	2.95			2.94	0.2	2.36	2.86
SS980	3.63	3.36	3.01	2.99	3.09	3.31	3.44			3.20	0.2	2.74	3.14
KS080	3.28	3.55											
KS980	3.97	3.71											
SS08A	8.13	6.49	6.62	6.80	6.78	6.24	6.13			6.51	0.3	5.86	6.43
SS98A	6.78	6.24	6.53	5.24	5.78	4.83	5.26	5.80	6.19	5.73	0.58	4.46	5.59
KS08A	7.07	6.63											
SS04A	10.55												
SS94A	10.65	9.36											
KS04A	11.70	9.39											
KS94A	10.02	9.81											

Table 9 各試験体の δu 単位 mm

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	33.92	27.01	50.21	48.19	59.53	30.16	42.41			42.92	12.4	13.88	39.23
SS980	43.80	39.31	25.70	28.67	28.34	28.75	29.69			30.08	4.7	19.05	28.68
KS080	28.59	27.93											
KS980	41.25	40.44											
SS08A	3.33	3.14	2.61	2.48	2.38	2.30	2.45			2.56	0.3	1.86	2.47
SS98A	3.41	2.17	2.56	2.16	2.11	1.77	1.72	2.00	2.71	2.15	0.35	1.40	2.07
KS08A	2.07	1.48											
SS04A	2.63												
SS94A	3.10	2.68											
KS04A	2.56	1.60											
KS94A	2.86	2.23											

Table 10 各試験体の δv 単位 mm

試験体 略称	加力方法											95% 下限値	50% 下限値
	単調 引張	正負交番											
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均	標準 偏差		
SS080	3.98	4.05	3.64	3.85	4.89	3.71	4.03			4.03	0.5	2.97	3.89
SS980	3.96	2.63	3.58	2.81	3.95	2.83	3.72			3.26	0.6	1.95	3.09
KS080	2.95	3.73											
KS980	4.42	5.03											
SS08A	0.85	0.94	0.62	0.42	0.40	0.45	0.46			0.55	0.2	0.07	0.49
SS98A	0.75	0.71	0.57	0.37	0.62	0.35	0.44	0.39	0.66	0.51	0.14	0.20	0.48
KS08A	0.47	0.44											
SS04A	0.46												
SS94A	1.04	0.67											
KS04A	0.97	0.20											
KS94A	0.56	0.76											

Table 11 試験方法による評価値の比較

		ΔPv (kN)	δv (mm)	δu (mm)	k (kN/mm)
接着なし	面材釘試験	4.14	4.96	25.61	0.84
	考案した	2.86	3.89	39.23	0.71
	方法 SS980	3.14	3.09	28.68	0.95
接着あり	面材釘試験	6.24	4.97	10.99	1.26
	考案した	6.43	0.49	1.86	11.84
	方法 SS98A	5.59	0.48	1.40	11.17

※面材釘試験：LVL 協会提供データより引用

4. 結論

LVL 厚版を用いた水平構面の設計において B 種 LVL と集成材とを接着・ビス留め併用接合とした場合の接合性能について、実大試験の評価に即した要素試験の方法を考案し、考案した手法によって得られる評価値の妥当性についての検討を行った。

今回の試験からは、ロケット型一面せん断試験に対して繰り返し交番加力を行ったところ単調加力と比較して最大荷重や剛性が低下したが、これは逆方向加力時のエネルギー吸収が原因として考えられる。また、単板の方向を 90 度変えた LVL を用いたロケット型一面せん断試験の結果から、LVL と集成材の接合性能は LVL の表層単板の方向によって若干異なることも明らかとなった。接着剤を用いない試験体については、今回考案した試験方法は面材釘試験とも近い値が得られる試験方法といえる。

他方、接着剤を用いた試験体については、今回考案したロケット型一面せん断試験は面材釘試験と異なる結果が得られた。その理由として、実大試験(面材釘試験)では接着剤の塗布面積が広く、面材中心に対して異なる方向から異なる荷重で接合具が変形をうけて、接着剤が部分的な剥離を生じたためと考えられる。また、ロケット型一面せん断試験体では接着剤の塗布面積が狭く、接合部に塗布した接着剤が剥がれたときに著しい荷重低下が生じたためと考えられる。よって、接着ビス留め接合に対して今回考案した試験方法を適用することは難しいといえる。

接着ビス留めされた要素試験で得られた荷重変位曲線から実大試験の結果を適切に予測するには、さらに検討が必要であると考えられる。

謝辞

今回の事業は「令和 3 年度 木材製品の消費拡大対策のうち CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材開発・普及事業」で実施した。また、加力スケジュールの検討にあたっては全国 LVL 協会構造利用委員会において建材試験センター西日本試験所試験課 早崎洋一主査より助言いただいた。お礼申し上げます。

文献

- 1) 河村進, 稲山正弘, 李元羽, 成田敏基, “床根太用接着剤を併用したビス留め部の接合性能”, 木材学会誌, 2014, 60(4), p. 227-234.
 - 2) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会 編, “木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年版)”, 日本住宅木材技術センター, 2017.
 - 3) 島根県産業技術センター, 一般社団法人全国 LVL 協会, “共同研究報告書「LVL 接着ビス接合一面せん断試験」”, 2021.
 - 4) セメダイン(株), “試験体作製 施工要領書(2022年10月3日版)”, 2022.
 - 5) ISO 16670:2003, “Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - Quasi-static reversed-cyclic test method”, 2003.
 - 6) 河村進, “強度試験におけるシステム構築に関する取り組み”, 木材工業, 2014. 69(7). p. 302-305.
-

3. 3. 3 実大面内せん断性能の検討

1. 目的

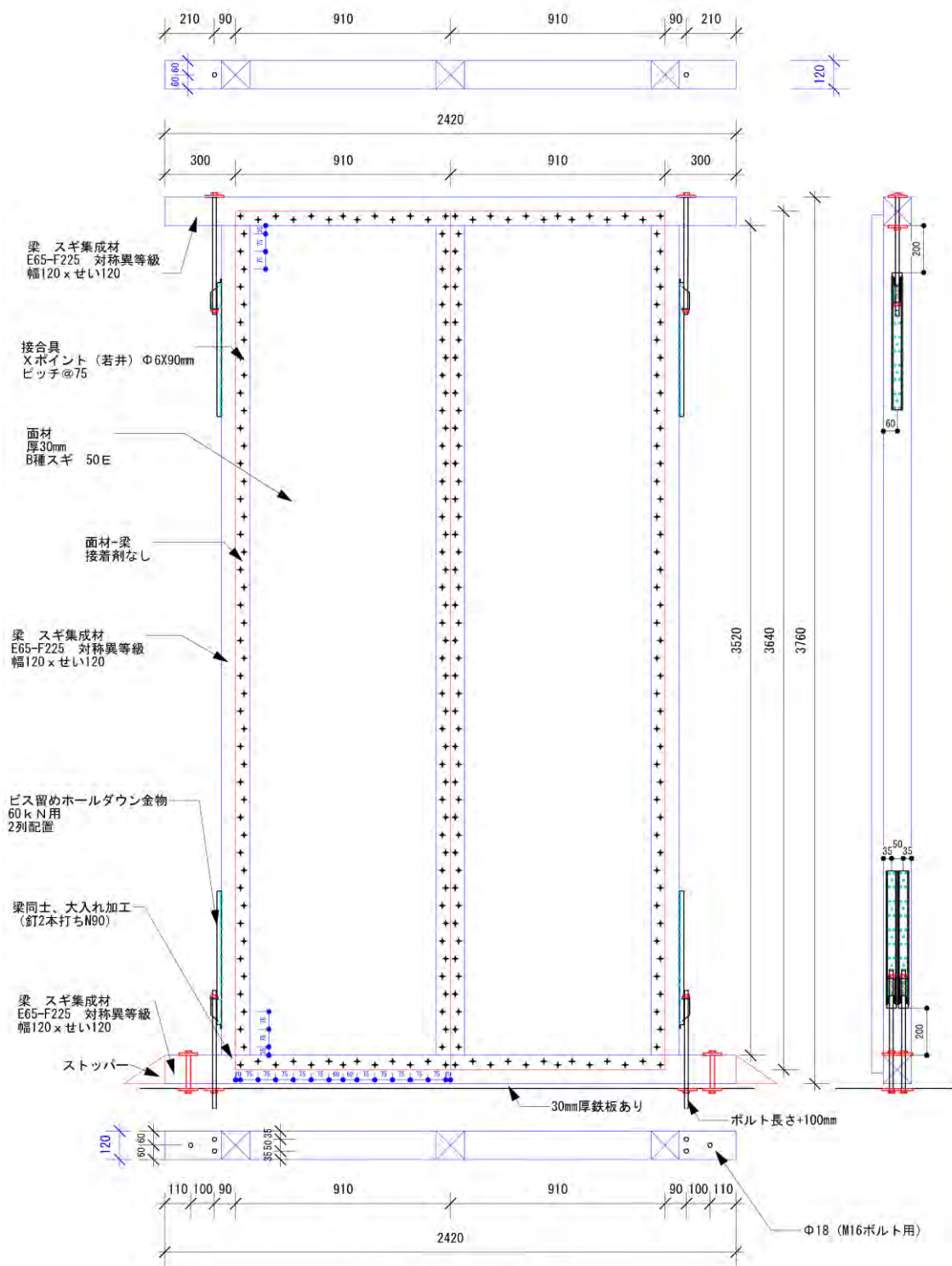
3. 3. 1章にある 仕様 11、12 に基づく実大サイズ（910 x 3640）面内せん断試験は建材試験センター西日本試験所にむいて実施した。

2. 試験概要

試験名称	厚板LVLを使用した水平構面の面内せん断試験				
依頼者	名称：一般社団法人全国LVL協会 所在地：東京都江東区新木場1-7-22 新木場タワー8F				
試験項目	水平構面の面内せん断試験				
試験体	試験体名	面材及び接着剤の有無	主な構成材	主な接合方法	体数
	フレーム	面材：無 接着剤：無	軸組寸法： 1820mm×3640mm 梁（対称異等級集成材）： 強度区分；E65-F225 寸法；120mm×120mm 種類；すぎ	面材の留付け： 種類；Xポイントビス 寸法；φ6×90mm@75 梁仕口： 蟻掛け+N90-2 梁相互（上部側）： HD金物 60kN用；1個	1体
	接着剤無	面材：厚さ；30mm 寸法；910mm×3640mm 材質；B種すぎLVL 50E 枚数；2 接着剤：無			1体
	接着剤有	面材：厚さ；30mm 寸法；910mm×3640mm 材質；B種すぎLVL 50E 枚数；2 接着剤：PU1000 （セメダイン製）		梁相互（下部側）： HD金物 60kN用；2個	1体
[備考]・図3.3.3.1～図3.3.3.3（試験体） ・記載事項は、依頼者の提出資料による。					
試験方法	木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017年版）① （企画発行：公益財団法人 日本住宅・木材技術センター） 第4章 試験方法と評価方法 4.3 鉛直構面及び水平構面の剛性と許容せん断耐力を算定するための試験 4.3.4 試験方法 4.3.5 評価方法				
	[備考] 表3.3.3.1（試験方法の詳細及び短期基準せん断耐力算出方法）				

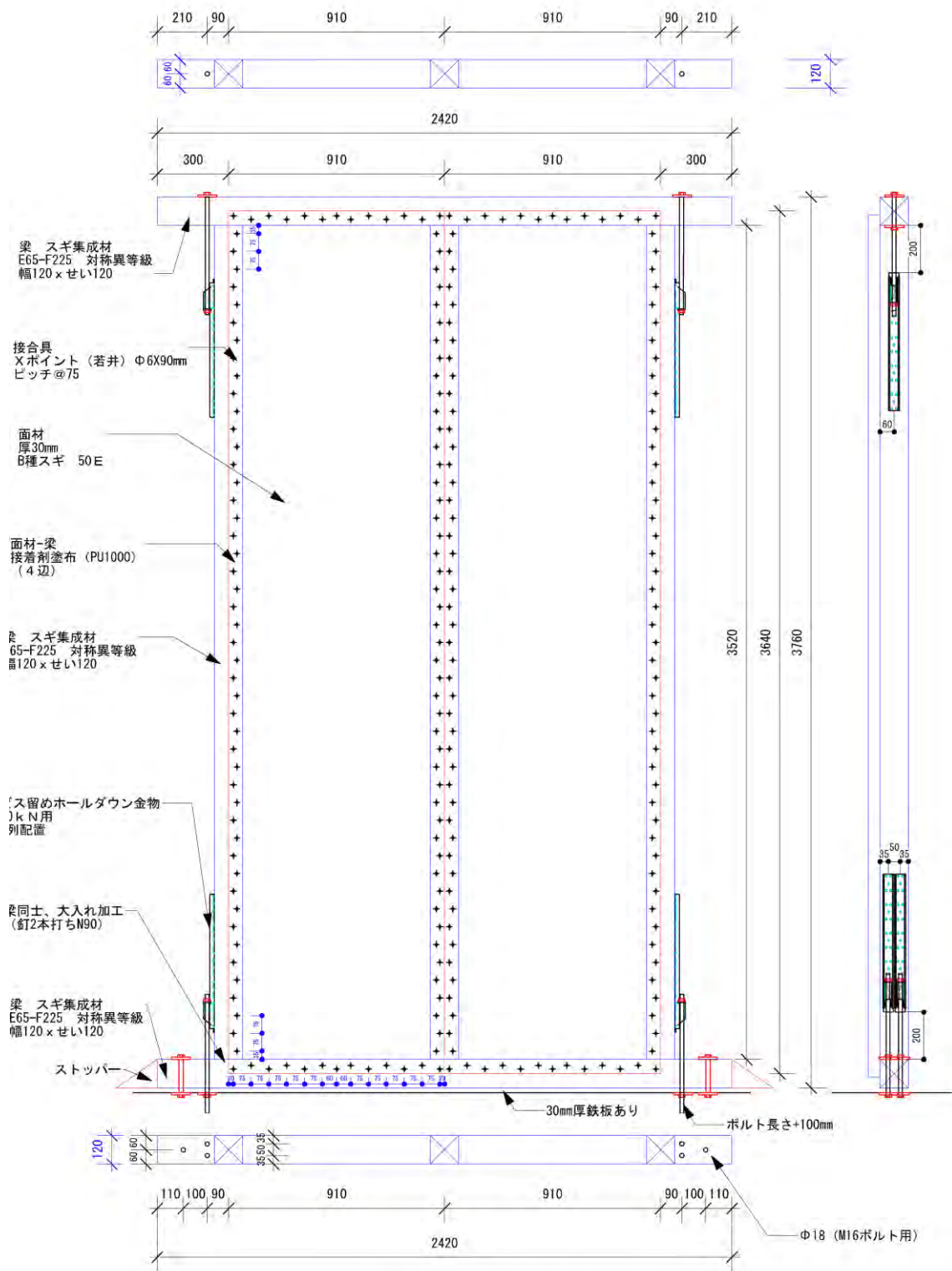
試験結果	試験体名	(a) 降伏耐力 P_y (kN)	(b) $P_u \cdot 0.2 \cdot \sqrt{2\mu - 1}$ (kN)	(c) $2/3 \cdot P_{max}$ (kN)	(d) 特定変形角時 $\gamma = 1/120 \text{ rad}$ (kN)
	軸組	1.9	1.0	2.6	0.8
	接着剤あり	46.2	36.5	58.1	43.5
	接着剤なし	38.6	21.0	50.2	61.9
<p>[備考]・表3.3.3.2 (特定変形角時の荷重, 最大荷重, 破壊状況等)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・表3.3.3.3 (降伏耐力, 終局耐力, 初期剛性等) ・図3.3.3.2 (包絡線及び完全弾塑性モデル) ・図3.3.3.3 (各曲線の比較) ・図3.3.3.4及び図3.3.3.5 (各部の変位) ・写真3.3.3.1～写真3.3.3.12 (試験体の状況) 					
試験期間	2023年 1月20日 ~ 23日				
担当者	試験課長 佐川 修 早崎 洋一 (主担当) 小森谷 誠 品末 竹彦				
試験場所	西日本試験所 (山口県山陽小野田市大字山川)				

単位mm



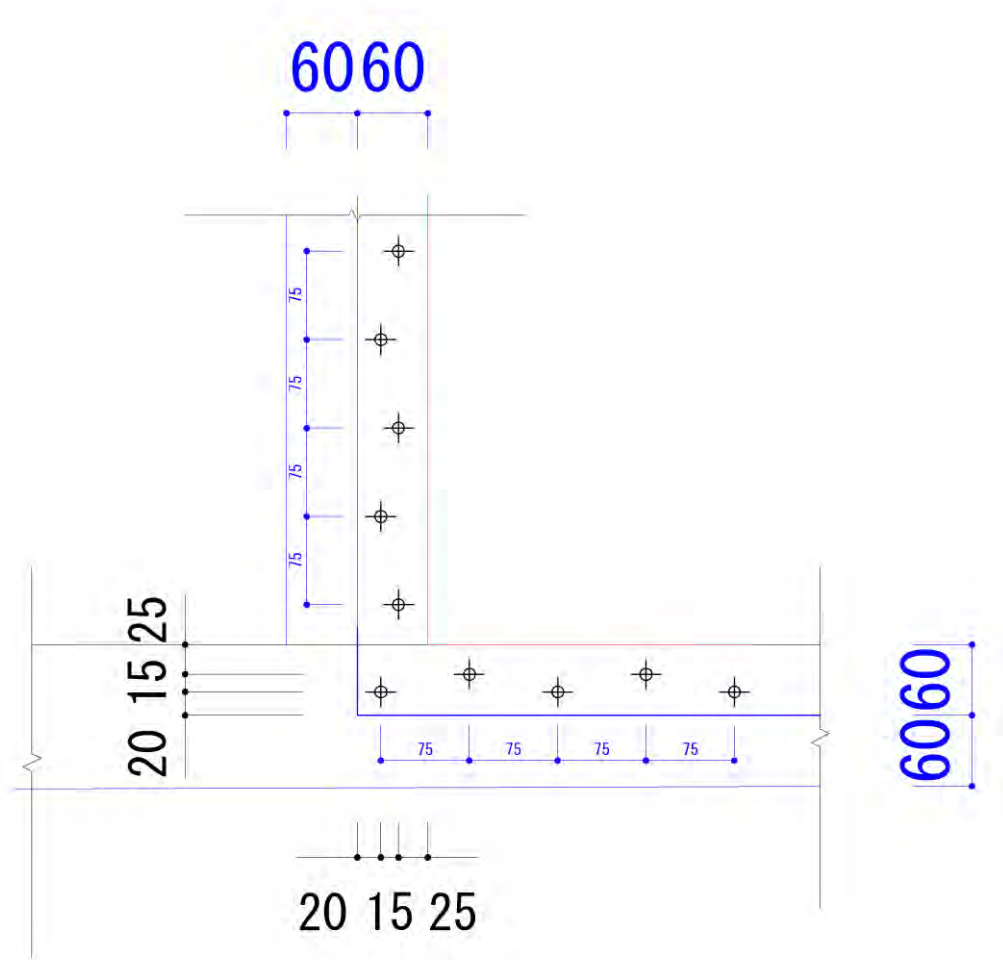
実大仕様 (接着無し)

図3.3.3.1 試験体



実大仕様 接着あり

図3.3.3.2 試験体



実大仕様 ビス位置拡大図

部材名	含水率 (%)			密度 (g/cm ³)			
	フレーム	接着剤無	接着剤有	フレーム	接着剤無	接着剤有	
梁 (上部)	8.6	8.3	8.9	0.39	0.38	0.37	
梁	加力側	9.0	9.3	9.4	0.39	0.37	0.38
	中間	9.4	9.4	8.8	0.40	0.36	0.35
	反加力側	9.3	8.7	9.4	0.39	0.38	0.36
梁 (下部)	9.9	9.4	9.5	0.36	0.38	0.34	
面材	加力側	-	18.6	17.8	-	0.54	0.54
	反加力側	-	21.6	19.8	-	0.54	0.53

〔備考〕 含水率は、試験後に測定した値である。

測定は、木材水分計（測定範囲：7.0～80.0%）を用いて行い、各試験体3箇所測定した平均値を示す。

図 3.3.3.3 試験体

表3.3.3.1 試験方法の詳細及び短期基準せん断耐力算出方法

試験方法

1. 加力方法

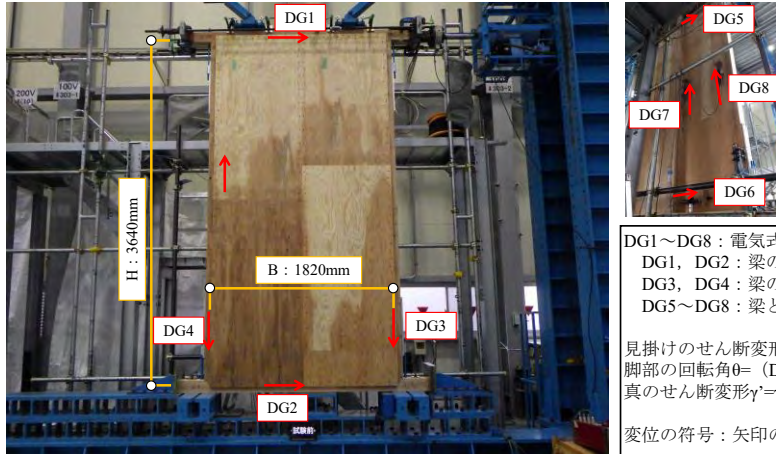
加力は、200kN自動コントロール式アクチュエータを使用して、次の順序で行った。

(1) 正負交番繰返し加力を行った。繰返しは、見掛けのせん断変形角が1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75及び1/50radの正負変形角とし、同一変形角について各1回繰返した。

(2) 正側で最大荷重に達した後、最大荷重の80%の荷重に低下するまで、または、見掛けのせん断変形角が1/15rad以上に達するまで加力した。なお、見掛けのせん断変形角が1/15radを超えても荷重が低下しない場合には、見掛けのせん断変形角1/15radを終局変形角とし、1/15rad以内の最高荷重を最大荷重 (P_{max}) とした。

2. 変位測定

変位は、梁の水平方向変位、上下方向変位及び梁と面材の水平ずれ変位について、電気式変位計（容量：500mm, 100mm, 50mm）を使用して測定した。



DG1～DG8：電気式変位計
 DG1, DG2：梁の水平方向変位
 DG3, DG4：梁の上下方向変位
 DG5～DG8：梁と面材の水平ずれ

見掛けのせん断変形角 $\gamma = (DG1-DG2) / H$
 脚部の回転角 $\theta = (DG3-DG4) / B$
 真のせん断変形角 $\gamma' = \gamma - \theta$

変位の符号：矢印の方向を (+)

面内せん断試験方法（柱脚固定式）

短期基準せん断耐力の算出方法

以下の要領で短期基準せん断耐力 P_0 を算出した。短期基準せん断耐力の基準値は、

(a) 降伏耐力 P_y , (b) $P_u \cdot 0.2 \cdot \sqrt{2\mu - 1}$, (c) $2/3 \cdot P_{max}$, (d) $\gamma = 1/120rad$ 時の荷重の平均値に、それぞれのばらつき係数を乗じて算出した値のうち最も小さい値とした。ただし、すべての試験体において、下記の手順により求めた降伏変形角 γ_y が、真のせん断変形角1/300rad時の見掛けのせん断変形角より小さく、かつ、真のせん断変形角1/300rad時に著しい損傷がない場合、(d)の特定変形角時の荷重を真のせん断変形角1/300rad時の荷重とし、(b)～(d)の平均値にそれぞれのばらつき係数を乗じて算出した値のうち最も小さい値とした。

なお、ばらつき係数は、母集団の分布形を正規分布とみなし、統計的処理に基づく信頼水準75%の50%下側許容限界値をもとに次式より求めた。

$$\text{ばらつき係数} = 1 - CV \cdot k \quad \text{ここに、} CV: \text{変動係数, } k = 0.471 \text{ (} n = 3 \text{)}$$

また、降伏耐力 P_y , 降伏変形角 γ_y , 初期剛性 K 及び終局耐力 P_u は、荷重－見掛けのせん断変形角曲線の包絡線より、次の手順に従って求めた。

- (1) 包絡線上の0.1 P_{max} と0.4 P_{max} を結ぶ直線（第Ⅰ直線）を引く。
- (2) 包絡線上の0.4 P_{max} と0.9 P_{max} を結ぶ直線（第Ⅱ直線）を引く。
- (3) 包絡線に接するまで第Ⅱ直線を平行移動し、これを第Ⅲ直線とする。
- (4) 第Ⅰ直線と第Ⅲ直線との交点の荷重を降伏耐力 P_y とし、この点からX軸に平行に直線（第Ⅳ直線）を引く。
- (5) 第Ⅳ直線と包絡線との交点の変形角を降伏変形角 γ_y とする。
- (6) 原点と (γ_y, P_y) を結ぶ直線（第Ⅴ直線）を初期剛性 K と定める。
- (7) 最大荷重後の0.8 P_{max} 荷重低下域の包絡線上の変形角又は1/15rad時変形角のいずれか小さい変形角を終局変形角 γ_u と定める。
- (8) 包絡線とX軸及び γ_u で囲まれる面積を S とする。
- (9) 第Ⅴ直線と γ_u とX軸及びX軸に平行な直線で囲まれる台形の面積が S と等しくなるようにX軸に平行な直線（第Ⅵ直線）を引く。
- (10) 第Ⅴ直線と第Ⅵ直線との交点の荷重を完全弾塑性モデルの降伏耐力と定め、これを終局耐力 P_u と読み替える。そのときの変形角を完全弾塑性モデルの降伏点変形角 γ_v とする。
- (11) (γ_u / γ_v) を塑性率 μ とする。

表3.3.3.2 特定変形角時の荷重, 最大荷重, 破壊状況等

試験体名	$\gamma = 1/120\text{rad}$ 時	$2/3P_{\text{max}}$ 時		P_{max} 時		破壊状況
	荷重 P (kN)	荷重 P (kN)	変形角 γ ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	荷重 P (kN)	変形角 γ ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	
フレーム	0.8	2.6	35.03	3.9	66.67	フレームの変形 一部梁材仕口部での割れ ※耐力低下せず, 1/15radで終了
接着剤無	43.5	58.1	14.29	87.1	46.76	梁材 (下部) の割裂を伴う 面材のはがれ
接着剤有	61.9	50.2	6.13	75.3	12.91	HD金物位置での梁材 (縦) の 割れ

表3.3.3.3 降伏耐力, 終局耐力, 初期剛性等

試験体名	降伏耐力 P_y (kN)	降伏変形角 γ_y ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	終局耐力 P_u (kN)	降伏点変形角 γ_v ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	終局変形角 γ_u ($\times 10^{-3}\text{rad}$)	初期剛性 K ($\times 10^3\text{kN/rad}$)	塑性率 μ
フレーム	1.9	22.28	3.3	37.86	66.67	0.085	1.76
接着剤無	46.2	9.15	79.3	15.71	49.45	5.049	3.15
接着剤有	38.6	4.34	67.2	7.58	13.08	8.894	1.73

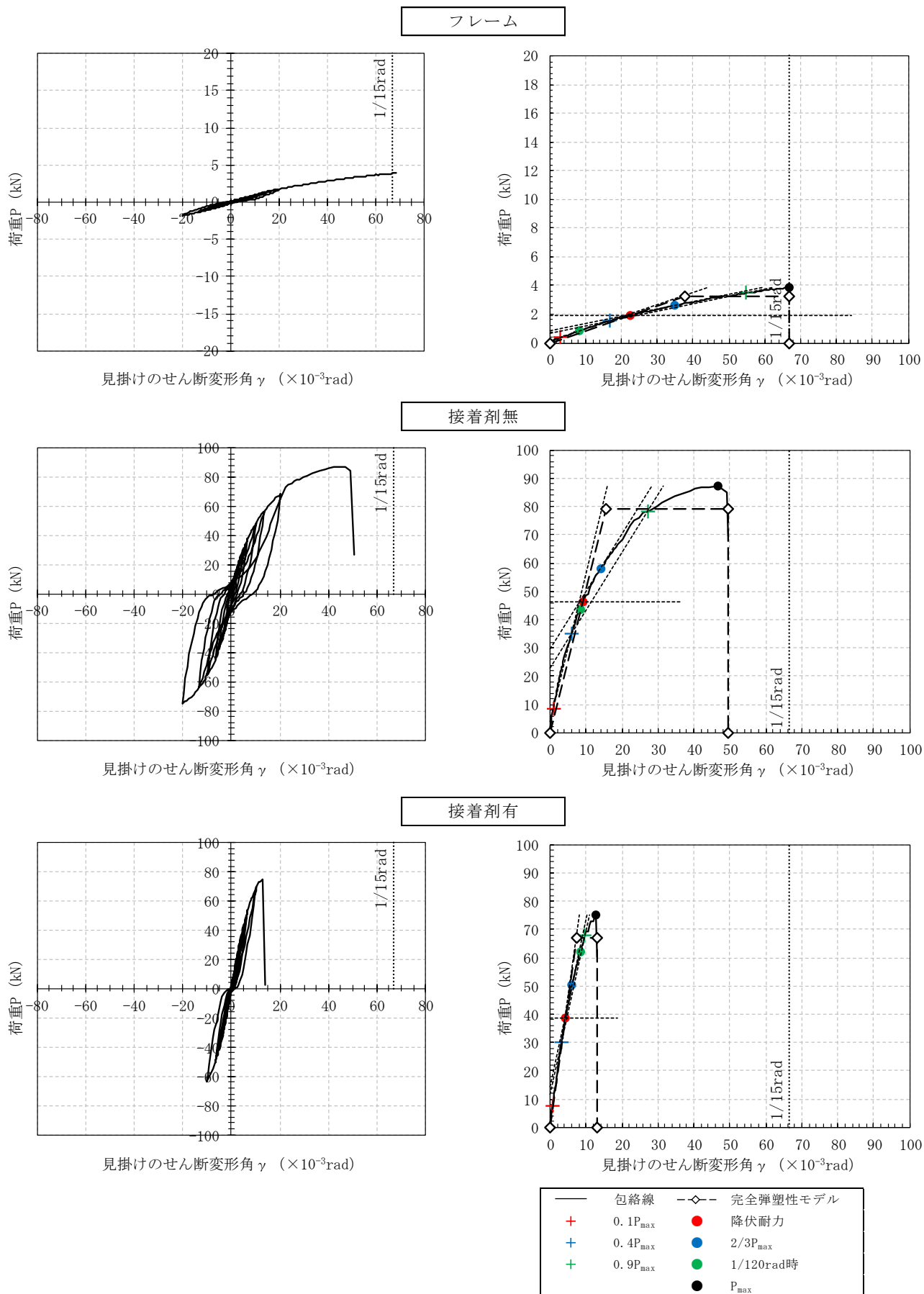
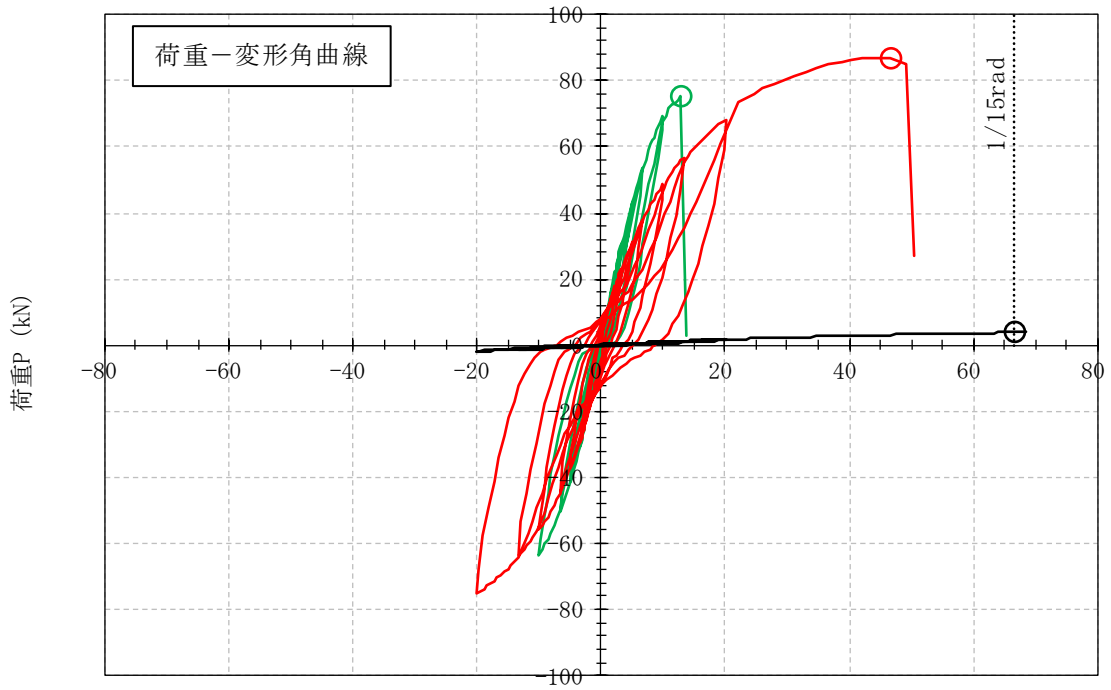
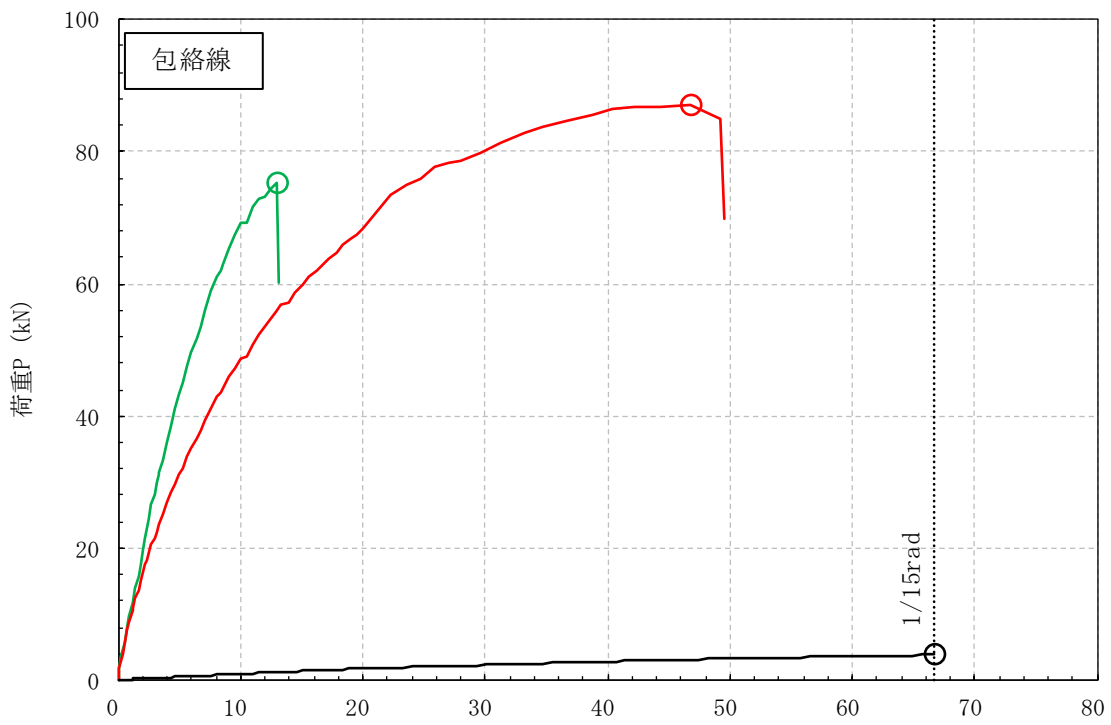


図3.3.3.2 包絡線及び完全弾塑性モデル



見掛けのせん断変形角 γ ($\times 10^{-3}\text{rad}$)



見掛けのせん断変形角 γ ($\times 10^{-3}\text{rad}$)

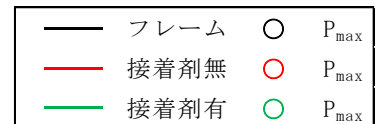


図3.3.3.3 各曲線の比較

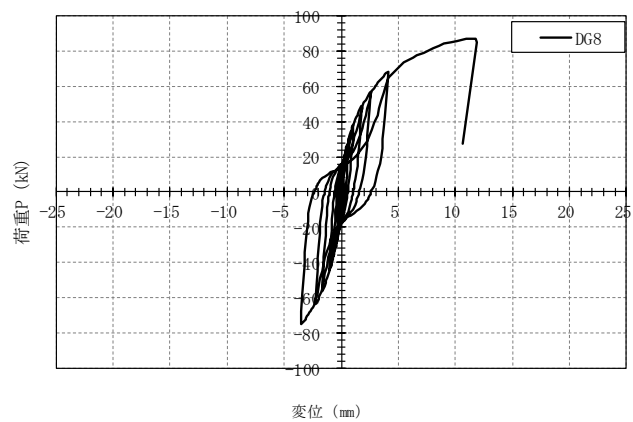
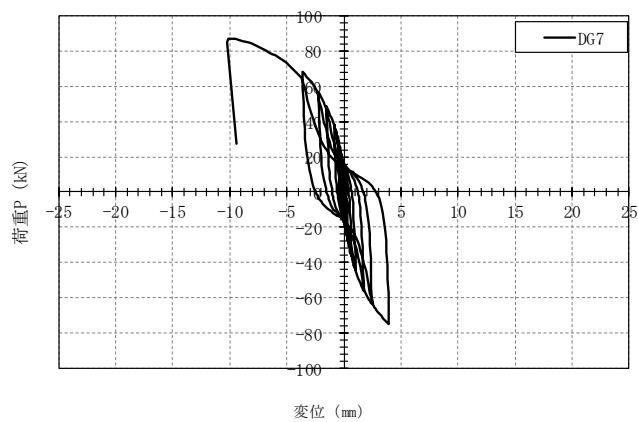
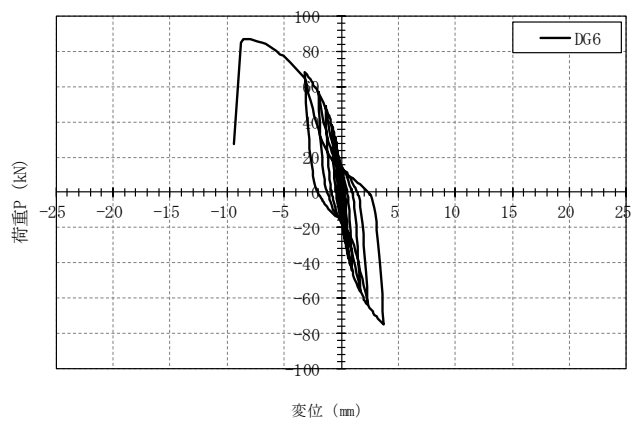
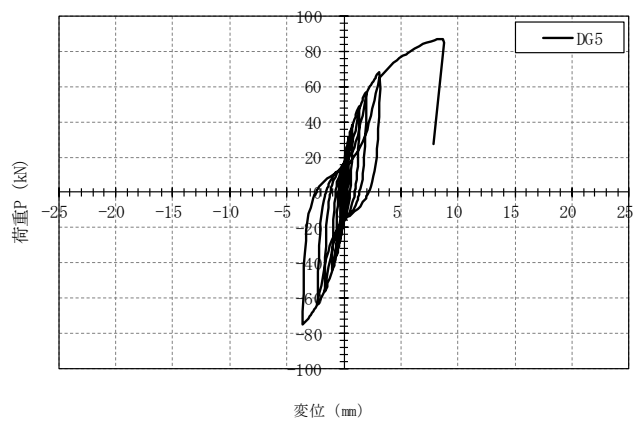


図3.3.3.4 各部の変位 (試験体名：接着剤無)

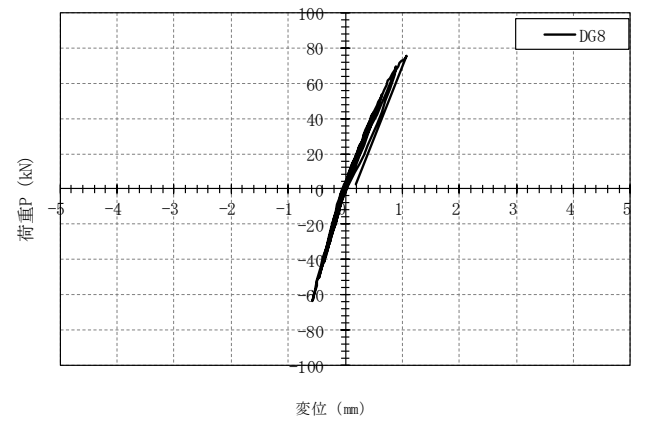
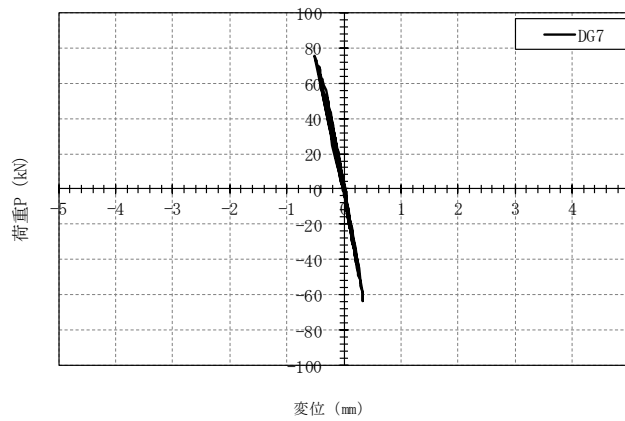
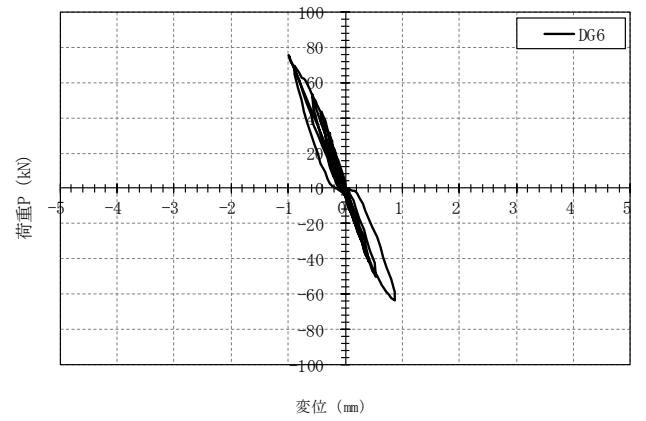
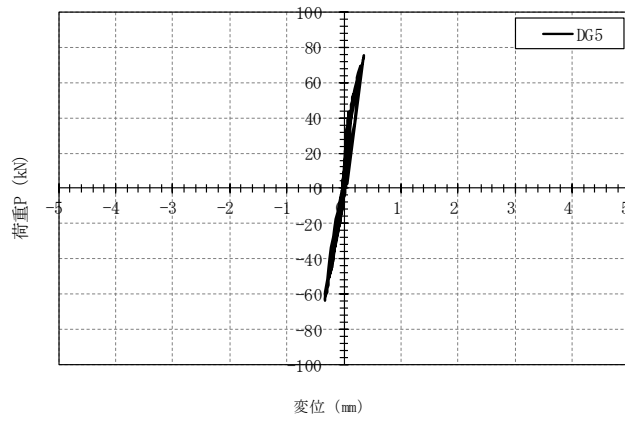


図3.3.3.5 各部の変位 (試験体名：接着剤有)



写真3.3.3.1 試験体の状況 (試験後)
試験体名：フレーム

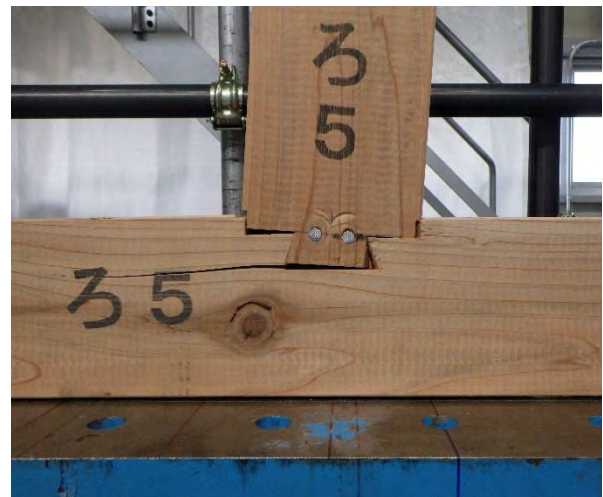


写真3.3.3.2 試験体の状況 (試験後)
試験体名：フレーム

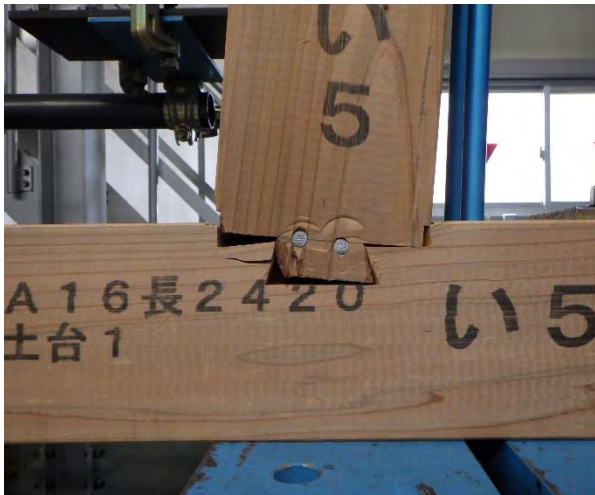


写真3.3.3.3 試験体の状況（試験後）
試験体名：フレーム



写真3.3.3.4 試験体の状況（試験後）
試験体名：フレーム



写真3.3.3.5 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤無



写真3.3.3.6 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤無



写真3.3.3.7 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤無



写真3.3.3.8 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤無



写真3.3.3.9 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤有



写真3.3.3.10 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤有



写真3.3.3.11 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤有



写真3.3.3.12 試験体の状況（試験後）
試験体名：接着剤有

以上

3. 4 まとめ

本事業では中大規模木造建築における高剛性かつ施工性のよい、長尺の LVL を面材とした床板水平構面を検討した。面内試験を実施し、厚板の厚さ、ビス間隔、面材の接着有無等の様々の仕様検討を行った。

●詳細計算法による接合部性能の検討

LVL 面材とビスを併用した面内せん断試験を実施し、詳細計算法によるくぎ 1 本あたりの面内せん断データを算出した。実大サイズの水平構面に適用した結果、床倍率で 1.2 倍相当の結果を得た。次年度以降はさまざまな躯体・LVL 面材・ビスの種類を検討し、コストと施工性のよい仕様を探ることが課題である。接着材を併用した仕様では剛性や最大耐力が向上した。ただし靱性を確保することは難しく、靱性を確保するために接着剤の量・塗布方法が今後の課題である。

●ロケット型接合部一面せん断性能の検討

LVL 厚版を用いた水平構面の設計において B 種 LVL と集成材とを接着・ビス留め併用接合とした場合の接合性能について、実大試験の評価に即した要素試験の方法を考案し、考案した手法によって得られる評価値の妥当性についての検討を行った。

今回の試験からは、ロケット型一面せん断試験に対して繰り返し交番加力を行ったところ単調加力と比較して最大荷重や剛性が低下したが、これは逆方向加力時のエネルギー吸収が原因として考えられる。また、単板の方向を 90 度変えた LVL を用いたロケット型一面せん断試験の結果から、LVL と集成材の接合性能は LVL の表層単板の方向によって若干異なることも明らかとなった。接着剤を用いない試験体については、今回考案した試験方法は面材釘試験とも近い値が得られる試験方法といえる。

●実大面内せん断性能の検討

長尺 LVL 面材と接着剤を併用した実大サイズの床構面の面内せん断試験を実施し、床倍率の算出を行った。結果、接着剤の有無によらず、床倍率は約 10 倍となり、中小規模木造での使用を想定した数値を概ね満足する結果となった。ただし、接着剤の効果については、初期剛性の増加は見込めるものの、靱性に乏しい結果となったため、接着剤の塗布方法及びビスの仕様の選定等、次年度への検討課題となった。

4. まとめと今後の課題

●国産スギ利用ハイブリッド LVL 開発

カラマツおよびスギ LVL を水平積層したハイブリッド LVL を試作し、種々の強度性能や接合性能が明らかとなった。それらのデータや知見は今後の JAS 改正に向けた検証や提案に活用することが可能である。ただし、従来 JAS とは異なる製法と使い方のハイブリッド LVL を実用化するためには、他樹種の組み合わせやクリーブ等の他の材料性能も把握する必要があり、さらなる検証に取り組む必要がある。

広葉樹（道産シラカンバとダケカンバ）を用いた LVL ラミナの試作と性能評価を行った。両樹種ともに LVL-JAS の 140E-525F（旧 特級）を満たし、水平せん断は 14 N/mm² 以上と 65V-55H を大幅に上回り、国産広葉樹の構造的利用の可能性が示された。針葉樹と同様、他樹種や他材料性能の検証が今後の課題である。

●厚板床版開発

中大規模建築に必要な、高剛性かつ長尺の LVL を面材とした水平構面の検証試験を行った。高剛性を実現するため面材接合にビスを用い、剛性アップと靱性確保を狙って接着剤併用も検討した。詳細計算法で必要なくぎ 1 本あたりのせん断特性値を求め、実大サイズの水平構面の実験による面内せん断性能を程よく予測できた。ロケット型の接合部試験も実施し、1 本あたりのせん断特性値を概ね予測する可能性を示すことができた。接着剤併用型については、実大サイズ面内試験とロケット型においても剛性と最大耐力を増加させることができたが、靱性の確保については今後の課題となった。