

2. 2 鹿児島大学 鷹野 敦

1. 建築物の仕様一覧

事業名		大牟田の整骨院併用住宅新築工事		
実施者 (担当者)		個人 (担当者: 鹿児島大学 鷹野敦)		
建築物の概要	用途	一戸建て住戸付診療所		
	建設地	福岡県大牟田市		
	構造・工法	CLT工法		
	階数	1		
	高さ (m)	5.8		
	軒高 (m)	5.5		
	敷地面積 (㎡)	374		
	建築面積 (㎡)	109		
	延べ面積 (㎡)	109		
	階別面積	1階	109	
	2階			
	3階			
CLTの仕様	CLT採用部位		屋根	
	CLT使用量 (m ³)		23.35 (建物使用量)	
	壁パネル	寸法		
		ラミナ構成		
		強度区分		
		樹種		
	床パネル	寸法		
		ラミナ構成		
		強度区分		
		樹種		
屋根パネル	寸法	90mm厚		
	ラミナ構成	3層3プライ		
	強度区分	Mx60A相当		
	樹種	スギ		
仕上	主な外部仕上	屋根	アスファルトシングル葺き	
		外壁	左官仕上げ t18	
		開口部	アルミサッシ (ペアガラス)	
	主な内部仕上	界壁		
		間仕切り壁	PB t12.5 左官仕上げ 木下地	
		床	ヒノキ無垢フローリング t15	
	天井	CLT現し		
構造	構造計算ルート		CLT告示に基づくルート2	
	接合方法		ビス接合 + プレート金物	
	最大スパン		5m	
	問題点・課題とその解決策		<ul style="list-style-type: none"> ・気密性を確保するためCLTパネル同士の接合部を本実としたが、建方の際にパネルのたわみや変形等により、実の合わせに手間取った。 ・CLT現しの仕上げであるが、建方の際に少し傷がついた。 ・CLTを極力マザーボードのまま使えるよう、加工を最小限とした 	
防火	防火上の地域区分		法22条地域	
	耐火建築物等の要件		無	
	本建築物の防火仕様		外壁の準防火性能のみ	
	問題点・課題とその解決策		CLT現しのシンプルな構成とするため、CLTを使う平側は屋根扱いとした	
施工	遮音性確保に関する課題と解決策		特に無し	
	建て方における課題と解決策		CLTパネル同士の接合の合理化	
工程	劣化対策		CLTは屋内使用に限定。外部側の透湿防水及び通気層の確保を徹底	
	設計期間		H28.5月～10月 (6か月)	
	施工期間		H28.11月～H29.3月 (4.5か月)	
	CLT躯体施工期間		H29.1月11日-1月12日 (1.5日間)	
	竣工 (予定) 年月日		H29.3月15日	
体制	発注者		個人	
	設計者 (複数の場合はそれぞれ役割を記載)		鹿児島大学 鷹野敦	
	構造設計者		福山弘構造デザイン 福山弘	
	施工者		株式会社MANIXリィラボ	
	CLT供給者		銘建工業株式会社	
ラミナ供給者				

2 実証事業の概要

2.1 実証した建築物の概要

用途	一戸建て住戸付診療所			
建設地	福岡県大牟田市			
構造・工法	CLT 工法			
階数	1			
高さ (m)	5.80	軒高 (m)	5.50	
敷地面積 (㎡)	374.00	建築面積 (㎡)	109.00	
階別面積	1階	109.00	延べ面積 (㎡)	109.00
	2階			
	3階			
CLT 採用部位	屋根			
CLT 使用量 (m ³)	23.35			
CLT の仕様	(部位)	(寸法 / ラミナ構成 / 強度区分 / 樹種)		
	壁			
	床			
	屋根	90mm 厚, 3層3プライ, Mx60A 相当, スギ		
設計期間	H28.5月～10月 (6か月)			
施工期間	H28.11月～H29.3月 (4.5か月)			
CLT 躯体施工期間	H29.1月11日-1月12日 (1.5日間)			
竣工 (予定) 年月日	H29.3月15日			

2.2 当該建築物における実証内容

平屋の併用住宅を CLT 告示に基づくルート 2 で設計した。

構法計画として梁間方向を三角形とするため軸力系のための伝達で良く、桁行方向は無開口の壁とする。形状がもたらす構造的安定性により、接合部に求められる性能はさほど大きくないため、既に報告されている接合ではオーバースペックとなる。従って、実験によって得られる簡便な接合仕様に置き換える作業を行う。今回実証した内容は以下である。

- ・平易な接合仕様による、中程度の接合部スペックの性能データの取得

・合掌組の CLT パネル構法によるコストの縮減、施工記録及び空間効果

合掌組の独立したユニットとして成立する仕様で設計を行い、そのユニットを平面的に繋げたりずらしたりできるという意匠的にも構造的にも自由度の高いシステムを実証した。

2.3 実施体制

(設計・監理) 鹿児島大学工学部建築学科：鷹野敦 (統括)

(構造設計) 福山弘構造デザイン：福山 弘

(施工) 株式会社 MANIX リィラボ

(材料) 銘建工業株式会社

(試験) 株式会社東日本パワーファスニング

2.4 実証方法と実施工程

鷹野が設計および全体の統括を行った。福山が中心となり、接合設計仕様、試験条件をとりまとめた。接合部の性能確認は、株式会社東日本パワーファスニングに試験を依頼した。施工は株式会社 MANIX リィラボが中心に行った。実施工程は以下の通りである。

<設計>

H28.10 月末 実施設計完了・建築確認済証発行

H28.2 月初旬 計画変更及び軽微な変更申請

H29.3 月中旬 完了検査 (予定)

<施工>

H28.11 月初旬 工事契約

H28.11 月初旬 着工

H29.2 月下旬 当該工事完了

H29.3 月中旬 外構工事 (予定)

<部材性能>

H28.9 月 28-29 日 (株)東日本パワーファスニングにて接合部強度試験を実施

2.5 得られた実証データ等の詳細

本建築物は構造ルート 1 として解くことが可能な規模と用途であるが、現行の規定によるルート 1 ではシステムに対して過大な接合部の仕様が求められる。そのため、ここで

は随意のルート 2 として $C_0=0.5$ (設計震度 0.5) を短期応力として接合部の設計を行い、その構造計画の考え方と、モデル解析による構造計算の結果をまとめた。(ロフト部分は将来増設スペースとして現段階では未施工であるが、構造計算には含めている) 構造の検討に必要となる CLT パネル脚部と土台とのせん断および引張りの接合部について、各 6 体の試験体を用いて試験を行い、結果をまとめた。

2.6 本事業の成果

本建築で採用した構法はやや特殊なものではあるが、上記実証内容を提示することにより、CLT の使い方の裾野を広げることができると考える。設計のプロセスおよび施工の課題と解決法を取りまとめることにより、他の事業者が CLT を用いて建築物を建築する際に活用できる参考例となる。

今後、CLT のみで構成した屋根の屋内環境への影響を調べるため、温度・湿度・放射熱の実測を行ないたいと考えている。また、ラミナ毎の見た目に差が大きく”ムラ”のある CLT の内装現しを、建物の利用者がどのように感じるのかについても今後の CLT の意匠利用に関する重要な視点として調査を行いたいと考えている。

3 設計・建築実証の成果

3.1 建物の考え方

小さな住居スペースを併設する整骨院の計画である。予算がかなり限られていたため、計画当初から超合理的な構法の検討が重要な設計要件であった。

その条件に応えるため、ここでは面による合掌組の架構を考案した。面トラスとなる三角形の断面は、構造的にも明快かつ合理的である。さらに、木のかたまりである CLT によって面を作ることで、構造・断熱・気密・仕上げを兼ねたモノリシックな架構となり、二次部材(断熱材等)の多くを省略することができると考えた。結果、現場での工期短縮も図れるため、建設費と施工品質の最適化が可能となる。また、建物の構成を単純化することでメンテナンスを容易化し、将来建物を解体する際にも部材のリサイクルがしやすいように考えた。

諸室の機能に合わせ架構を分節し、ずらしながら配置することで、隙間から風や光、内外の視線の通りを確保する。三角形の小屋が建ち並ぶ親しみやすい佇まいの建物を目指した。



模型写真: 建物全景

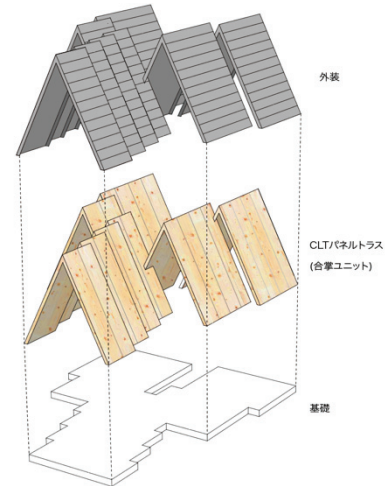


図 1: 建物構成

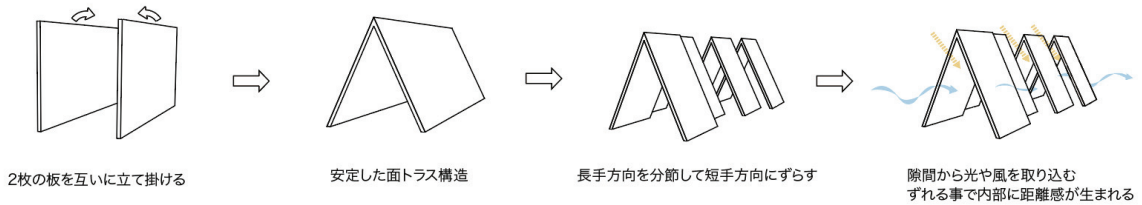
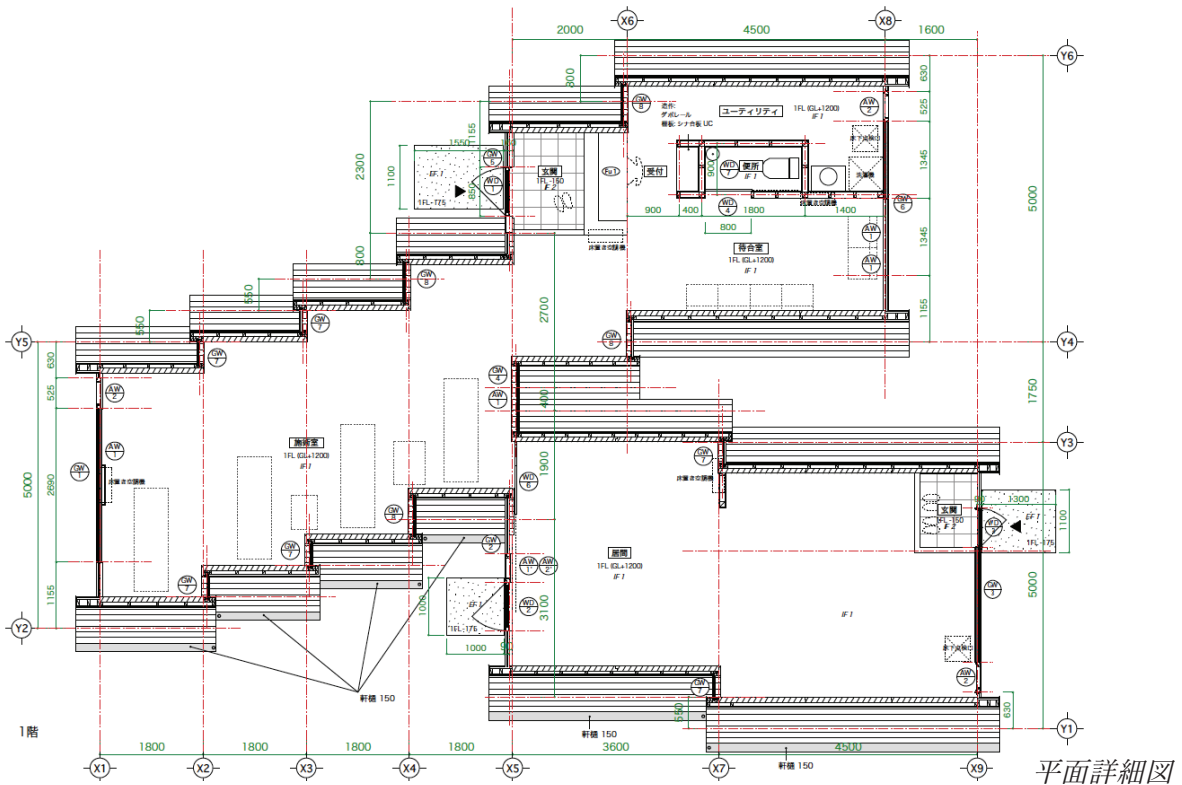
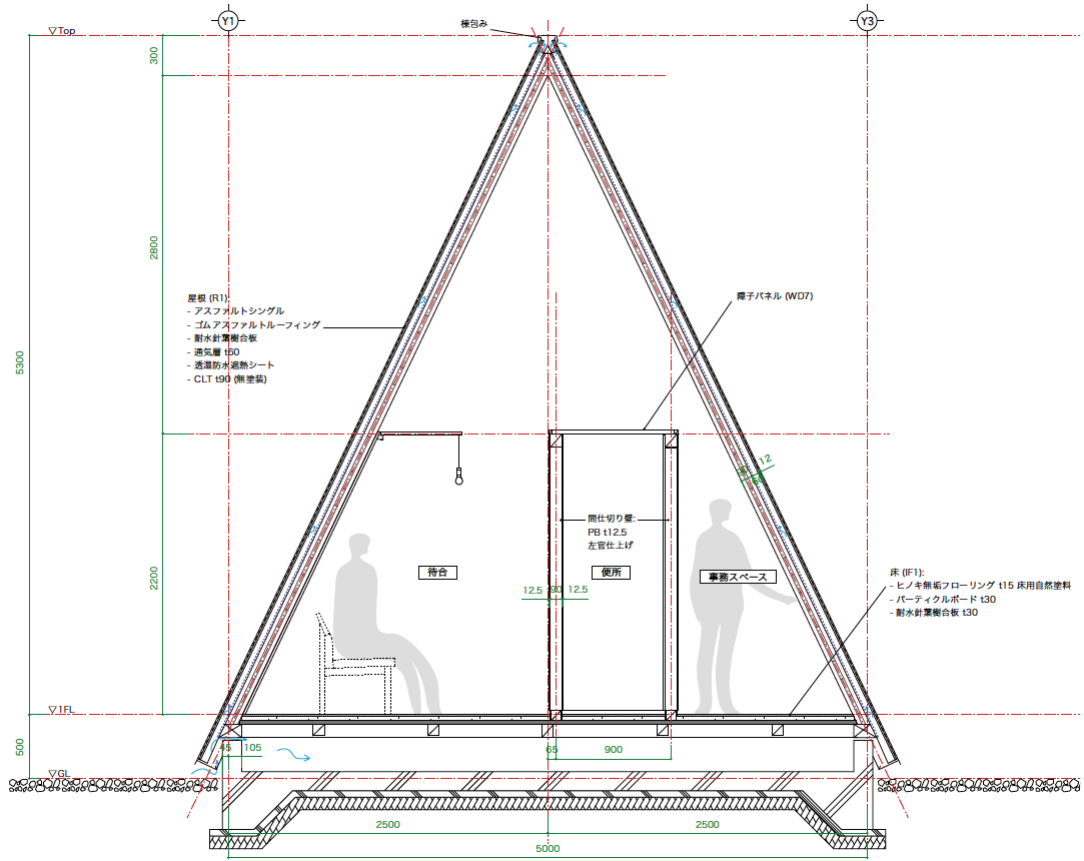


図 2: 建物の考え方

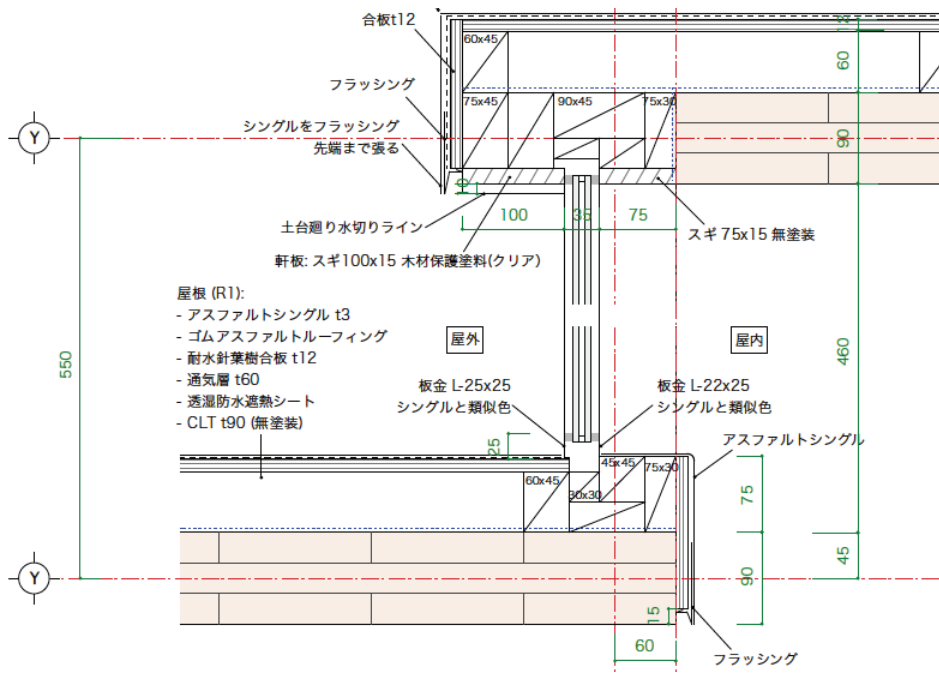
3.2 設計図面

建物の基本的な構成を示すため、ここでは平面図、矩計図、詳細図の一部をまとめる。





断面詳細図



ユニット間スリット部詳細図 (平面)

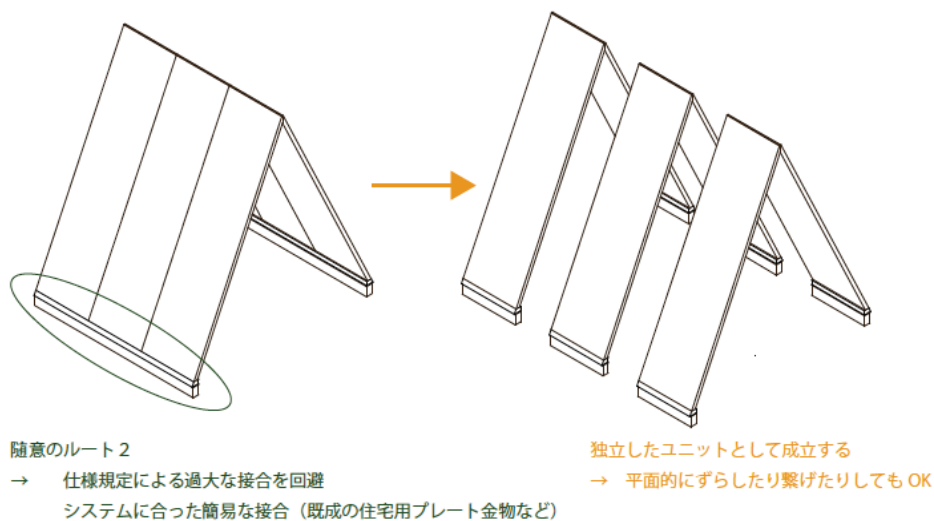
3.3 構造設計の考え方

- 構造検討と接合部試験

以下に構造計算書のうち、CLT に関わる特徴的な部分を抜き出し、検討について必要となった接合部試験について示す。なお構造計算書では高さの中央付近にロフトが載る場合について検討した上で、実際には施工とり止めとなっているが、将来的な増築の可能性も残しているためそのままの検討結果を示す。

構造設計上の特徴

- I. 梁間方向 (Y) 水平力に対しては、基礎-土台定着部からトラス材としての CLT が 2 枚合わさる、3 角トラスとしての構造で抵抗する。
- II. 桁行方向 (X) 水平力に対しては面内曲げせん断を受ける独立耐震壁としての CLT 板が並んだ構造として抵抗する。
- III. CLT 同士を立て掛けて一対の状態として成立させたものを連続させる形式としている。構造上は全ての一対のユニットで成立する形式とする。
 - i. ユニット (桁行幅 1.8m が最大) ごとの構造的成立を確認すれば OK
 - ii. 連続する壁長が 1.5m 幅 3 枚を連続させて 4.5m である個所においても、1.5m 幅のユニットごとで成立しており、特に構造上の検討を行わない面のずれ止めによって接合して一体の空間としての利用を可能にすると考える
- IV. 建築物はルート 1 として解くことが許されるサイズと用途であるが、CLT のルート 1 ではシステムに比して過大な接合部が仕様規定上必要となる。意匠を損ねることにもなり、システムのシンプルさを生かせないため随意的ルート 2 として解いた。結果的に $C_0=0.5$ (平屋なので要するに設計震度 0.5) を短期応力として接合部を設計した。



桁行方向荷重に関する検討

桁行方向については、風圧力の受圧面を考慮した場合、0.5G で設計する地震力の場合の方が明らかに厳しい。

屋根壁の単位面積当たり重量を W 、設計震度を a として、地震力による単位長さあたりせん断力

$$\begin{aligned}\Delta Q_D &= W/\sin \theta \cdot \alpha \cdot H \\ &= 0.65 / 0.9025 \cdot 0.5 \cdot 5 = 1.8 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

CLT 単位幅 B の場合の地震力によるモーメント

$$M_D = B \cdot W/\sin \theta \cdot \alpha \cdot H^2/2$$

応力中心間距離を CLT 単位幅 B の 0.8 倍とし、最外引張端以外の CLT 幅の中間にある接合具を無視する。

次ページに示すスタディの結果、既往の試験結果から得られる金物の引張剛性 11.05 kN/mm よりも著しく大きく 25 kN/mm で回帰計算を行った場合でも応力中心間距離は 0.82 B であり、CLT 幅に関わらず金物の引張剛性 11.05 kN/mm で端部から 60mm の位置についている場合 0.86~0.88 B 程度である。

したがって応力中心間距離を 0.8 B とする仮定は十分に安全側である。

方針のとおり、単位 CLT での安全性を確認するとしてこの場合の端部に掛かる力は CLT の幅に関わらず

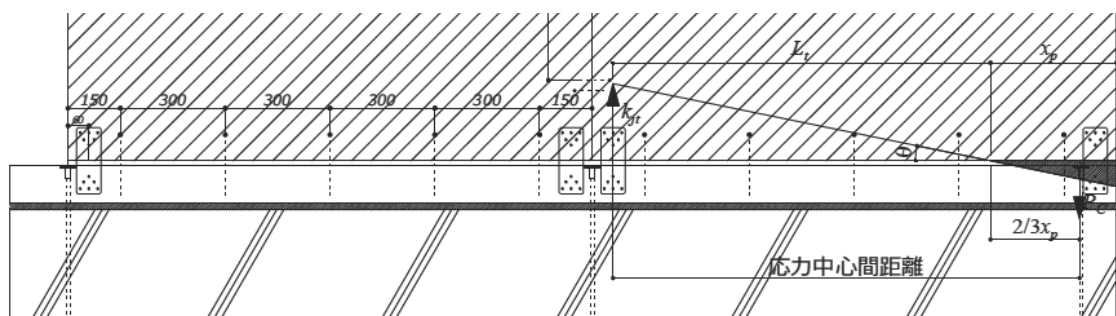
$$\begin{aligned}T_D = C_D = M_D / (0.8B) &= W/\sin \theta \cdot \alpha \cdot H^2/2/0.8 \\ &= 0.65 / 0.9025 \cdot 0.5 \cdot 5^2 / 0.8 = 5.6 \text{ kN}\end{aligned}$$

なお、ロフト部分がある箇所については、先の設計せん断力・設計モーメントに 2 階床位置の重量分の設計荷重分を加える。ロフト下 1 階上部分面積はロフト床と同程度であるので、間仕切り壁単位面積荷重をならし荷重として加える。

$$\Delta Q_D = W/\sin \theta \cdot \alpha \cdot H + W_{2F} \cdot D/2 = 1.8 + (1.2+0.35) \cdot 2.68/2 = 3.9 \text{ kN/m}$$

$$M_D = B \cdot W/\sin \theta \cdot \alpha \cdot H^2/2 + B \cdot W_2 \cdot D/2 \cdot \alpha \cdot H_2$$

$$\begin{aligned}T_D = C_D = M_D / (0.8B) &= 5.6 + (1.2+0.35) \cdot 2.68/2 \cdot 0.5 \cdot 2.2/0.8 \\ &= 8.5 \text{ kN}\end{aligned}$$



● 応力中心間距離に関する計算表

geometry and information

めり込み部長さ	x_p	[mm]	299.8	440.3	621.5	497.7	533.6
めり込み部幅	y_p	[mm]	64.9	64.9	64.9	64.9	64.9
厚さ (深さ)	Z_0	[mm]	105.0	105	105	105	105
樹種係数	n	[t]	5.0	5	5	5	5
めり込み強度	F_{cv}	[N/mm ²]					
縦ヤング率	E_0	[N/mm ²]	7000.0	7000	7000	7000	7000
めり込み降伏応力度	F_E	[N/mm ²]					
	E_{c90}	[N/mm ²]	140.0	140	140	140	140
	x_1	[mm]	∞	∞	∞	∞	∞
	y_1	[mm]	0.0	0	0	0	0
	y_2	[mm]	0.0	0	0	0	0
	C_x	[t]	1.5	1.317998294	1.225278217	1.281272007	1.262391154
	C_y	[t]	1.0	1	1	1	1

三角形めり込み変位

	$\Sigma Q / \theta$	[kN/rad]	5701.1	11047.2	20463.6	13727.0	15541.1
	<i>nocoef.</i>		3886.2	8381.8	16701.2	10713.5	12310.8
	$K_\theta (\Sigma M / \theta)$	[kNm/rad]	1320.7	3633.5	9257.5	5054.9	6102.5
	<i>nocoef.</i>		776.7	2460.1	6919.4	3555.0	4379.0
圧縮側10kN負担時変形角	θ_c	[rad]	0.0	0.0009	0.0005	0.0007	0.0006
CLT幅 (パラメータ)	B	[mm]	1500.0	1500	1500	1800	2000
引張中心-回転中心距離	L_t	[mm]	1140.2	999.7	818.5	1242.3	1406.4
引張金物剛性 (パラメータ)	k_{jt}	[kN/mm]	5.0	11.05	25	11.05	11.05
引張金物負担応力 (goalseek on 10kN)	$k_{jt} \cdot L_t \cdot \theta_c$	[kN]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
応力中心間距離	$L_t + 2/3 x_p$	[mm]	1340.1	1293.2	1232.8	1574.1	1762.1
		[t]	0.89 B	0.86 B	0.82 B	0.87 B	0.88 B

(1) 転倒に対する金物の検討

特にカウンターウェイトとしての自重は考慮しない。

後述する接合部試験結果に基づく

$$T_{D_max} = 8.5 \text{ kN}$$

$$T_a = 8.74 \text{ kN} \quad \geq 8.5 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

● 梁間方向荷重に関する検討

Y 方向荷重については、下記より明らかに風荷重の方が厳しいため、風荷重のみ検討する。

[風上の風圧力の水平投影] > [風下の風圧力 0.45 kN/m² の水平投影]

> [設計加速度 0.5G とした屋根壁の水平力 0.65 kN/m² × 0.5]

Y 方向荷重については、トラスモデルでの解析による。

(2) CLT の面外曲げ

Y 方向風圧時の設計曲げモーメント

$$W_w = q \cdot (C_{pe} - C_{pi}) = 0.879 \cdot (0.573 + 0.2) = 0.679 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{D_w} = W_w \cdot L_{\text{roof}}^2 / 8 = 0.679 \cdot 5.54^2 = 2.6 \text{ kNm/m}$$

Y 方向地震時の設計曲げモーメント (2 階部ありの場合、 $b = 4.5 \text{ m}$)

$$P_E = W_{2F_sum} / 2$$

$$M_D = P_E \cdot L_1 \cdot L_2 / L_{\text{roof}} = (2.8 / 5.0 \cdot L_{\text{roof}}) \cdot (2.2 / 5.0 \cdot L_{\text{roof}}) / L_{\text{roof}} = 11.3 \text{ kNm}$$

$$M_{D_E} = M_D / b = 11.3 / 4.5 = 2.51 \text{ kNm/m}$$

したがって、風圧時の方が面外曲げについて厳しい。

【CLT 関連告示解説書】より

積層方向の曲げ基準強度(MX60A-3-3, t90) :

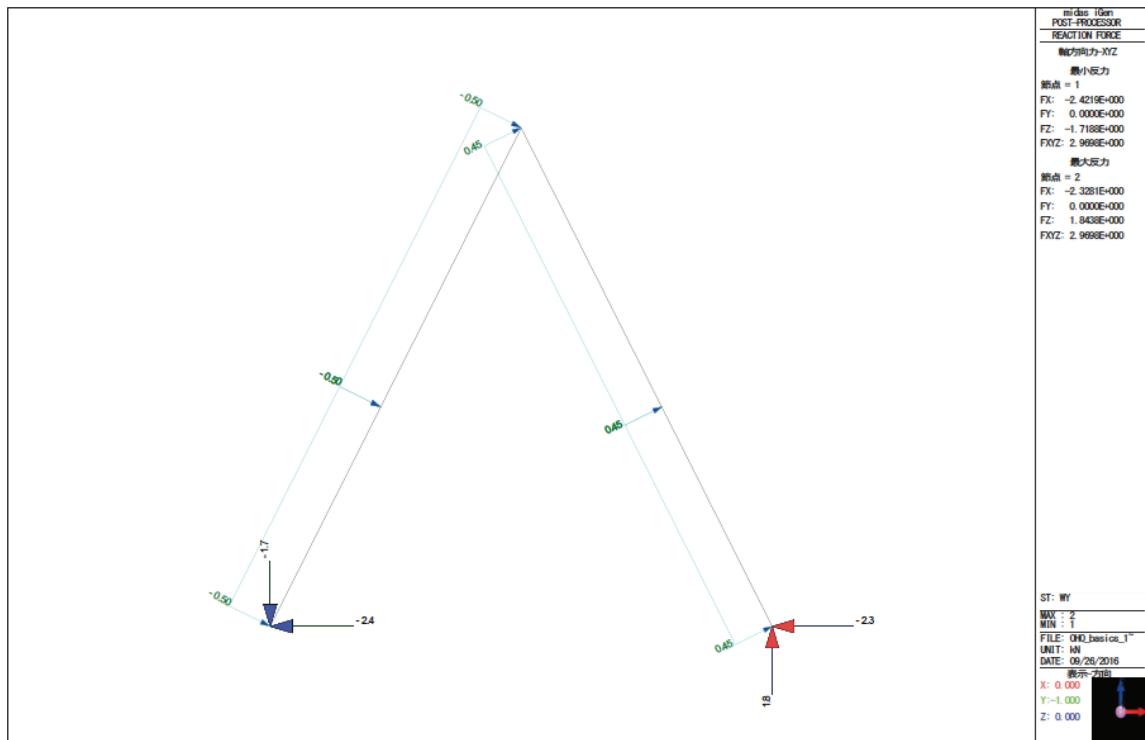
$$I_A = 2 \cdot 30^3 / 12 + 2 \cdot 30 \cdot 30^2 = 54150 \text{ [mm}^4\text{/mm]}$$

$$I_0 = 90^3 / 12 = 60750 \text{ [mm}^4\text{/mm]}$$

$$F_{b_outplane} = \sigma_{b_oml} \cdot I_A / I_0 = 27.0 \cdot 27150 / 60750 \cdot 0.4875 = 11.7325 \text{ N/mm}^2$$

$$M_a = z \cdot s \cdot f_b$$

$$= 90^2 / 6 \cdot 11.7325 \cdot (2/3) \cdot 10^{-3} = 10.6 \text{ kNm/m} \quad \geq 2.51 \text{ kNm/m} \quad \text{OK}$$



(3) CLT - 土台間接合

X 方向地震時

P6 パネリードのせん断性能、後述の【試験結果】より

$P_a = 1.37 \text{ kN}$ (1 本あたり)

ピッチ：@300

$$\Delta P_a = 1.37/0.3 = 4.57 \text{ kN/m} \geq 3.9 \text{ kN/m} (= Q_{D_max}) \text{ (地震時単位長させん断力)}$$

OK

Y 方向常時スラスト

$$3.6 \text{ kN/m} / \tan q = 1.7 \text{ kN/m}$$

Y 方向風圧時

風上側：平面トラスモデル解析結果よりスラストと逆向きに 2.3 kN/m

P6 パネリードのせん断性能、「H26 年度補助事業 くりばやし整骨院」の試験結果 (P6-x0) より

$$P_a = 1.8 \text{ kN}$$

ピッチを@300 とすると

$$\Delta P_a = 1.8/0.3 = 6.0 \text{ kN/m} \geq 2.4 \text{ kN/m} (= Q_{D_max}) \quad \text{OK}$$

常時スラストによるキャンセル分を無視しても十分安全。

風下側：トラス解析結果よりスラストと同じ向きに 2.3 kN/m

$$\Delta P_D = 2.3+1.7 = 4.0 \text{ kN/m}$$

(4) 屋根壁頂部 CLT-CLT 間の接合

Y 方向風圧時平面トラスモデル解析結果より、

CLT に生じる軸力： $\Delta N = 2.7 \text{ kN/m}$

設計せん断力： $\Delta Q_D = \Delta N \cdot \sin \theta = 2.44 \text{ kN/m}$

P6 パネリードのせん断性能、「H26 年度補助事業 くりばやし整骨院」の試験結果 (P6-x0) より

$P_a = 1.8 \text{ kN}$ (1 本あたり)

ピッチを 2@500 とすると

$$\Delta P_a = 1.8 \cdot 2/0.5 = 7.2 \text{ kN/m} \geq 2.44 \text{ kN/m} (= Q_D) \quad \text{OK}$$

3.4 施工の記録

建物の構成を簡素化し二次部材を減らすことで、計画通り材料費を削減することができた反面、施工者にとって経験のない形や工法ということもあり、施工費の見積もりが割高となった。しかし、実際に施工に入ると、特に CLT パネルの建て方は慣れるとスピードも効率も上がり、当初予定した 3 日間の半分の期間で全てのパネルを組み上げることができた。このように、経験がなくとも、ビス接合など簡易な接合方式でシンプルに組み立てができることは CLT パネルの大きなメリットであり、施工方法が一般化するための技術的な障害は少ないと感じた。

現状での CLT パネルの大きな弱点の一つはその材料単価であるが、工法の一般化が進み、需要が増えればその課題も克服される。その上で、軸組工法との比較で考えると、CLT 工法の施工をどれだけ簡易かつ単純にできるかが将来的な普及の大きな要素になると考える。”線”では無く“面”としての作り方を示す事例の広報が重要ではないだろうか。ここからは、主に CLT パネルの建て方及び各ユニットの取り付け部分の施工写真とコメントをまとめる。



写真 1 CLT パネルは、敷地に搬入後しばらく野積みになってしまったが、シートでの養生により特に問題は起こらなかった



写真 2 CLT が乗る土台周辺を残し、床組の上に床下地の合板を先に貼り、作業用のプラットフォームを作った。土台の際には CLT パネルの引っかかりとなる帯状の合板を接着剤とビスの併用で固定



写真 3 建て方はクレーンから一番遠いユニットから開始。片側をトンボ状の支えで仮固定し、もう一枚をそれに立てかけるように建て込む。慣れると 3 人でスムーズに建て方が進んだ



写真 4 CLT パネルの小口に実加工をし、パネル同士を嵌め込む。クレーンやトンボで調整しながら、小口からハンマーで叩き実を嵌め込んでいった。相欠き等のより簡易な方法への改善余地がある。土台には銅・第四アンモニウム化合物系木材保存剤を加圧注入しているため、亜鉛めっき製品であるアンカーボルトや長ビスの腐食が懸念される。接合部の耐力には余裕があり、余程の腐食が発生しない限り問題とはならないと考えることもできるが、定期的にビス等の状況を確認していくつもりである。



写真 5 ユニットの取り合い部分では、ルーフィングの上に一体的な捨て板金を重ねる。



写真 6 パネル同士の接合がないユニットはスムーズに建て方が進んだ

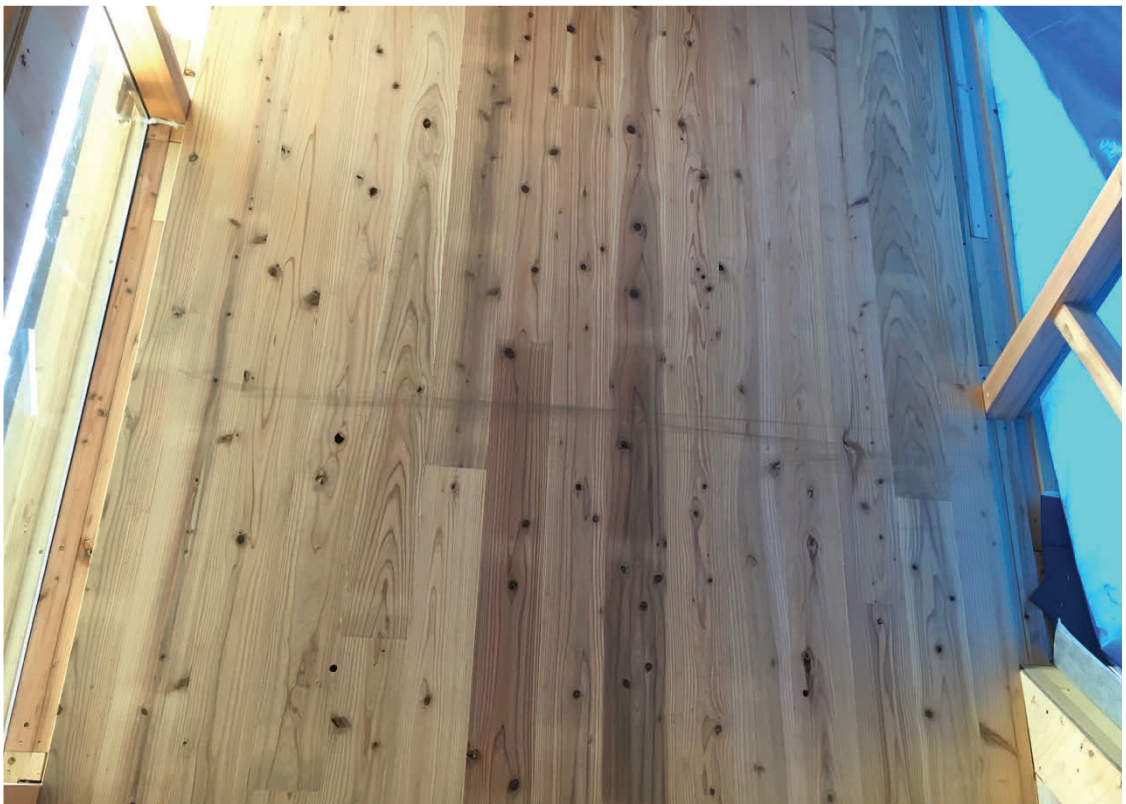


写真 7 建て方の際に、CLT 表面に汚れや傷がついた箇所がある。表面現しの場合の養生には検討の余地が残る。

4 性能実証の成果

4.1 接合部試験

3.3 の構造検討に必要となる CLT 壁脚部、土台とのせん断および引張の接合部について、下図に示す形式で試験を行った。

試験場所： 東日本パワーファスニング（現 Synegeic） 試験室

試験体数： 各 6 体

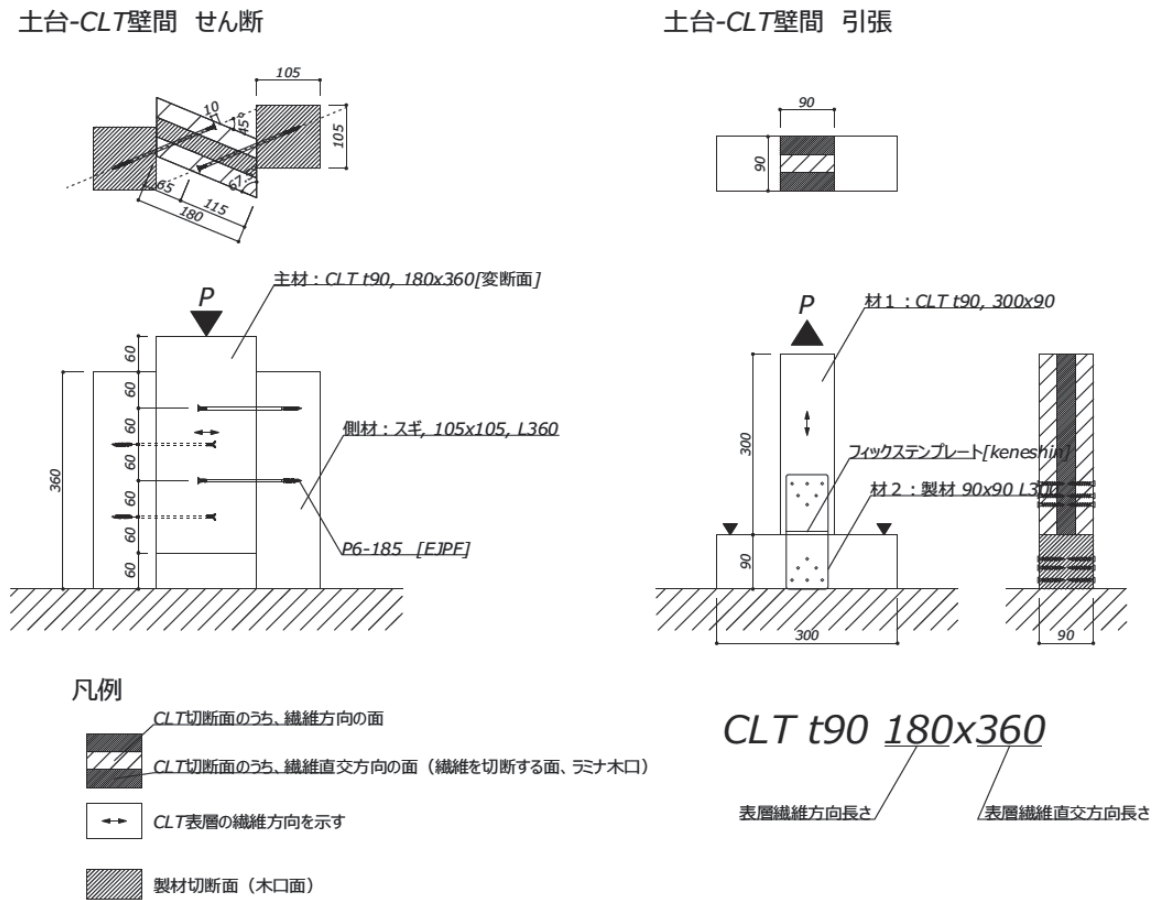


図 3 試験体図

表 1 試験体の比重及び含水率

	SP.	M.C.
CLT	0.43 ± 0.01	10.3 ± 1.7
Sawn	0.41 ± 0.01	8.4 ± 1.1

結果考察

せん断試験については CLT の木口に斜めにスクリューが入ることによる剛性耐力への影響はほとんど見られなかった。スクリューが小径であることもあり、母材が CLT である

この影響もほとんどない。（母材を製材とする東日本パワーファスニング社の試験と比較して）引張試験については、通常継手に用いるものを直交系の箇所用いているので、継手について表示された性能の66%程度の結果となった。小径のスクリーによる接合の場合、繊維方向の影響は一般に小さく、この場合の違いは想定されるより大きい。金物評価に用いられた試験体の比重が絶乾比重で0.42とスギとしては高いものであり、平均比重に10~15%程度の違いがあることが影響している可能性がある。

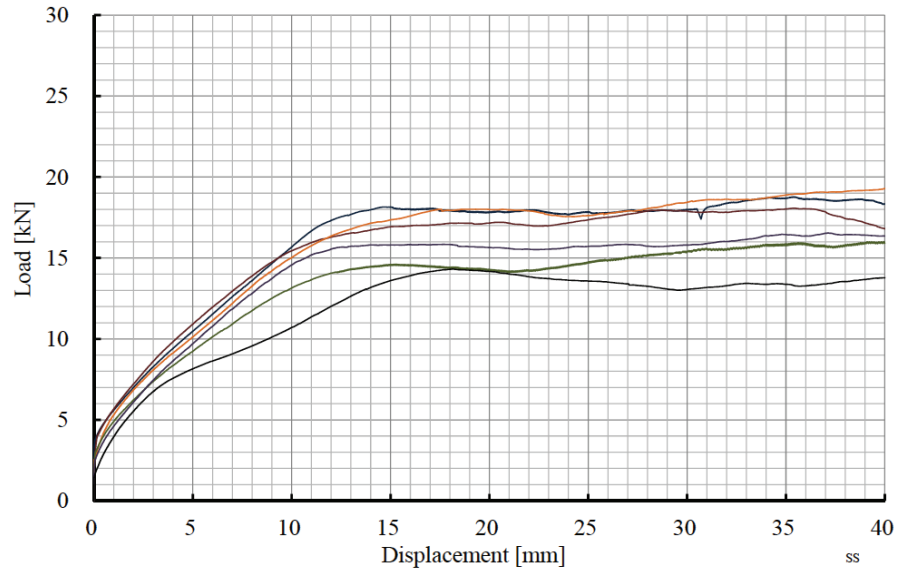


図4 CLT-土台

スクリーせん断試験結果

P_{max} [kN]	P_y [kN]	δP_y [mm]	K [kN/mm]	P_u [kN]	δP_u [mm]
4.29 ± 0.47	2.08 ± 0.31	3.55 ± 0.88	0.60 ± 0.09	3.98 ± 0.47	40.0 ± 0.0

$${}_sP_a = \min(2.13, 1.37) = 1.37 \quad (P_y)$$

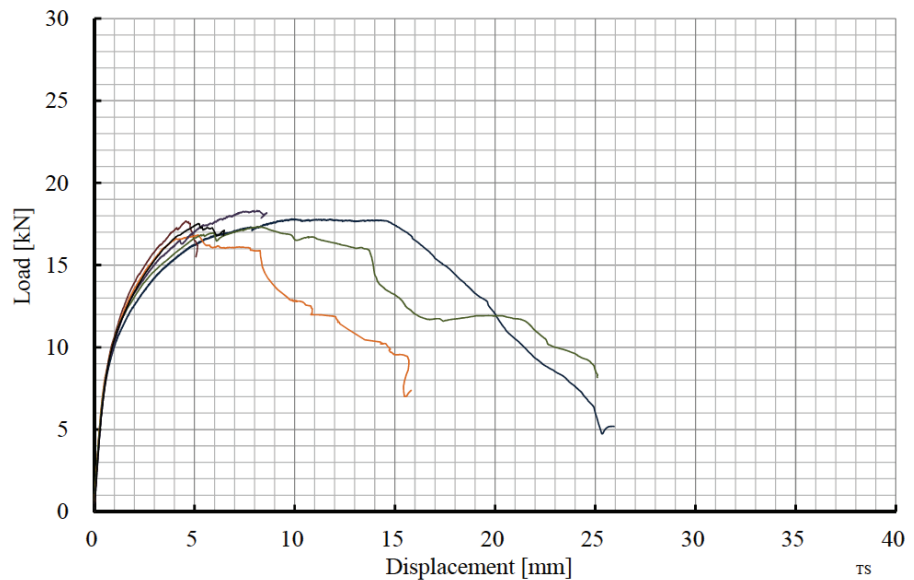


図5 CLT-土台

プレート引張り試験結果

P_{max} [kN]	P_y [kN]	δP_y [mm]	K [kN/mm]	P_u [kN]	δP_u [mm]
17.59 ± 0.50	9.67 ± 0.39	0.84 ± 0.11	11.61 ± 1.12	15.98 ± 0.50	10.3 ± 4.9

$${}_sP_a = \min(10.95, 8.74) = 8.74 \quad (P_y)$$

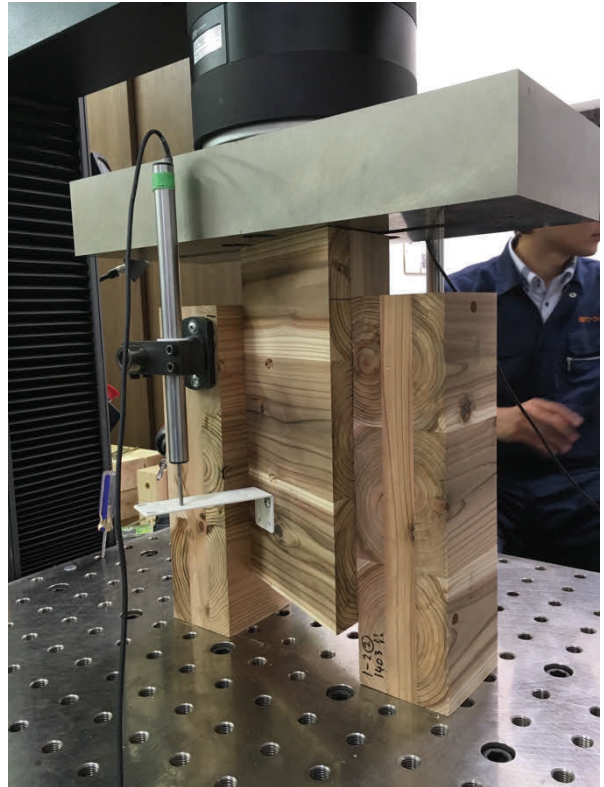
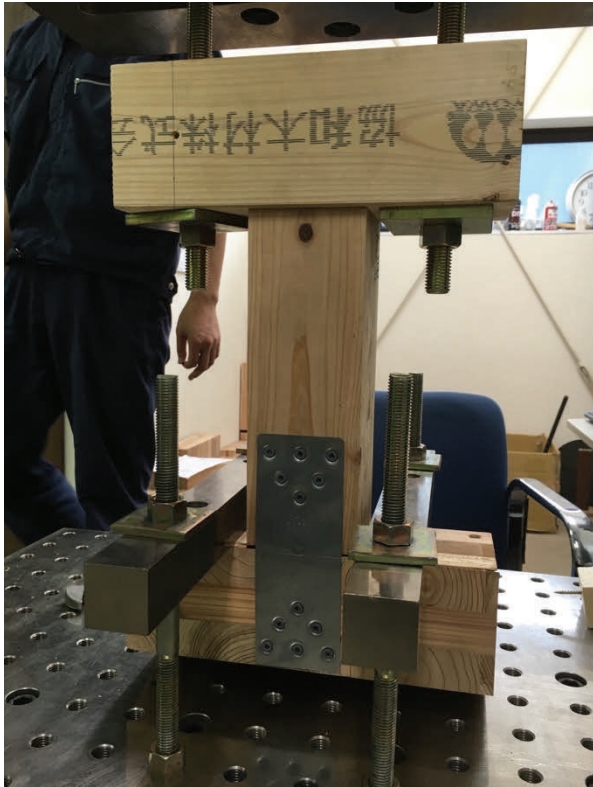


写真 8 プレート引張り試験（左）とスクリーせん断試験（右）の様子



写真 9 プレート引張り試験体