

在来軸組工法用耐力壁へのCLTの適用

中原 亨* , 福留重人*

Application of Cross-Laminated Timber to the Bearing Wall Used for Conventional Wooden Framework Construction Method

Toru NAKAHARA and Shigeto FUKUDOME

CLT（直交集成板）の特徴の一つである高耐力・高剛性を活かし、在来軸組工法用耐力壁の面材に利用することで、高耐力壁（壁倍率5倍相当）を開発することを目的とした。まず、二面せん断試験および簡易試験体による面内せん断試験を行い、CLTの方向、接合具、接合間隔および真壁・大壁の違いによる接合性能を比較し、各仕様で実大サイズでの耐力推定を行った。その結果、CLTは強軸を高さ方向とし、接合具はCN90釘で120mm間隔打ち大壁とすることで目標とする耐力を達成できることが予測された。この仕様で作製した実大サイズの試験体で面内せん断試験を行い、短期基準せん断耐力を求め、目標とする耐力を有することを実証した。

Keyword : CLT, 耐力壁, 在来軸組工法, 二面せん断試験, 面内せん断試験

1. 緒言

CLT（Cross-Laminated Timber）は、挽き板（ラミナ）を幅方向に並べた層を、繊維方向を直交させながら積層した木質材料で、寸法安定性が高く、高耐力・高剛性かつ多機能性を持つ部材である。1995年頃からオーストリアを中心に建築構造材として発展し、ヨーロッパのみならず、アメリカやカナダ、オーストラリアでもCLTを使用した建築物が建てられている。日本では、2013年12月にCLTの製造規格である日本農林規格が制定され、2016年4月には、建築基準法の告示（基準強度）が公布・施行され、CLTが一般利用できるようになった¹⁾。CLTは主に中・大規模建築に利用されているが、中・大規模建築は安定的な需要とは言えず、広く普及を図るためには、一般木造住宅の中でシェアの高い在来軸組工法での利用促進が効果的である。CLTを用いた高耐力壁を開発することで、在来軸組工法の設計法として一般的である壁量計算で使用できるようになり、一般住宅でのCLT利用の増加が期待できる。さらに、高耐力な壁であることから、近傍の壁量を減らすことも可能で、広い空間の実現など、設計の自由度が向上することも大きなメリットである。

本研究では、CLTの高耐力・高剛性を活かし、在来軸組工法用耐力壁にCLTを適用し、壁倍率5倍相当の耐力を実現できる仕様を検討した。

2. 実験方法

二面せん断試験により接合具による接合性能の比較およびCLTの方向が接合性能に及ぼす影響について検討した。次に、接合具の間隔による影響やより実際の動きに近い形のせん断性能を確認するために、簡易試験体による面内せん断試験を行った。この結果をもとに実大試験体を作製した場合の耐力を推定することで実大試験体の仕様を決定した。最後に、実大壁試験体で面内せん断試験を行い、短期基準せん断耐力を求めた。

2.1 二面せん断試験

2.1.1 試験体

二面せん断試験体を図1に示す。供試材は、柱材にスギ製材（断面寸法120×120mm、長さ300mm）、面材にCLT（3層3プライ、幅120mm、厚さ36mm、長さ300mm）、接合具に釘2種類（CN90、CN75）とビス（コーススレッド半ネジ75mm）を用いた（図2）。柱材の両側面の木口面から材長方向に50mmずらした位置に面材をあて、片面は面材の材長方向50mmおよび150mm、もう片面は100mmおよび200mmの位置で釘打ちおよびビス留めを行い作製した。試験条件は表1のとおりで、試験体数は各条件6体とした。なお、本報告におけるCLT方向については、すべて試験時の鉛直方向を基準として表記している。

表1 試験条件

接合具	CN90		CN75		ビス	
CLT方向	強	弱	強	弱	強	弱

*地域資源部

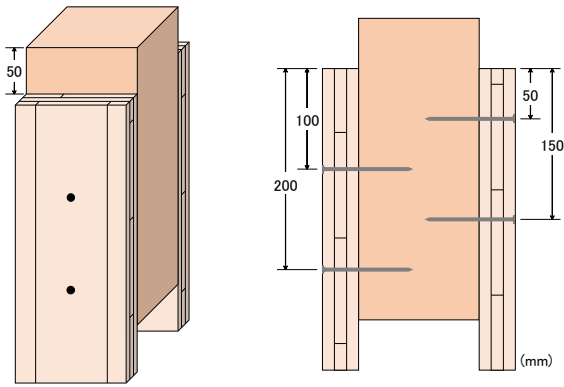


図1 二面せん断試験体 (左:正面図, 右:側面図)



図2 使用した接合具
(上から CN90, CN75, コーススレッド)

2. 1. 2 試験方法

試験は精密万能試験機 ((株)島津製作所製, 最大能力100kN) を用いて, 単調加力を実施し (図3), 得られた荷重-変位曲線をもとに完全弾塑性モデル解析を行い, 短期基準接合耐力を算出した。



図3 二面せん断試験

2. 2 簡易試験体による面内せん断試験

2. 2. 1 試験体

供試材は, 柱材にスギ製材 (断面寸法120×120mm, 長さ1,460mm), 面材にCLT (3層3プライ, 幅500mm, 厚さ36mm, 長さ1,000mm), 接合具に釘2種類 (CN90, CN75) とビス (コーススレッド半ネジ75mm) を用いた。まず2本の柱材両端

150mmの位置に, 固定用の穴あけ加工 (直径22mm) を施し, 表2に示す条件で面材を釘打ちおよびビス留めして作製した (図4)。試験体数は各条件3体とした。

表2 試験条件

納まり	真壁		大壁			
	接合具	CN90		CN75	ビス	
接合間隔 (mm)	100	150	120	100		
CLT方向	強		弱	強	弱	

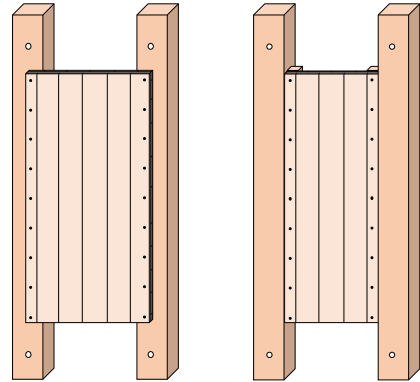


図4 簡易試験体 (左:大壁, 右:真壁)

2. 2. 2 試験方法

試験は面内せん断装置 ((株)島津製作所製油圧シリンダ, 最大能力50kN) を用いて, 見かけのせん断変形角1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50radを目標に正負交番繰り返し加力を実施し (図5), 得られた荷重-変位曲線をもとに完全弾塑性モデル解析を行い, 短期基準せん断耐力を算出した。なお, 加力部および柱脚は, 穴あけ部にボルトを通して固定しているため, ピン固定となっている。



図5 面内せん断試験

2. 3 実証試験

2. 3. 1 試験体

木造軸組工法住宅の許容応力度設計-第4章試験方法と評価方法²⁾に基づいて長さ1m×高さ3mおよび長さ2m×

高さ3mの軸組を作製し、この軸組にCLT（強軸）をCN90を用いて120mmピッチで釘打ちし、耐力壁を作製した。なお、軸組は、柱、土台および胴つなぎ（胴つなぎは2m試験体のみ）にスギ製材（断面寸法105×105mm）、梁にベイマツ製材（断面寸法105×180mm）を使用し、CLTは3層3プライ、厚さ36mmで、1m試験体は幅1,000mm、長さ3,000mmの1枚張り、2m試験体は幅2,000mm、長さ1,000mmの高さ方向3枚張りとした（図6）。試験体数はそれぞれ3体とした。

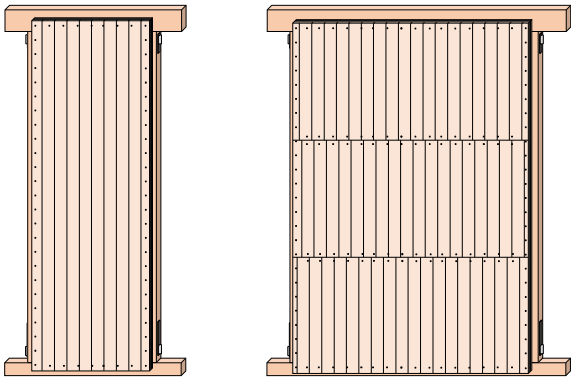


図6 実大試験体（左：1m試験体、右：2m試験体）

2.3.2 試験方法

試験は面内せん断装置（理研機器（株）製油圧シリンダ、最大能力100kN）を用いて2.2.2と同様の方法で加力した後、1/15radに達するまで加力を行い（図7）、得られた荷重-変形角曲線をもとに完全弾塑性モデルによる評価を行い、短期基準せん断耐力を算出した。

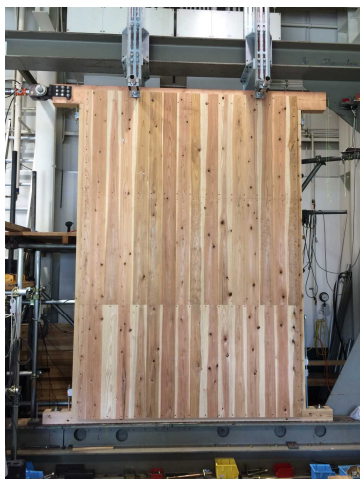


図7 実大面内せん断試験

2.4 倍率の算定

試験体の壁倍率の算出方法を以下に示す。

$$\text{壁倍率} = P_a / (1.96L)$$

P_a ：短期許容せん断耐力 (kN)

1.96：壁倍率=1を算定するための数値 (kN/m)

L：壁の長さ (m)

$$P_a = P_0 \times \alpha$$

P_0 ：実験にて決定された短期基準せん断耐力 (kN)
 で、以下の(a)~(d)うち最も低い値を用いる

(a)降伏耐力 P_y

(b)終局耐力 $P_u \times (0.2D_s)$ (D_s ：構造特性係数)

(c)最大荷重 P_{max} の2/3

(d)特定変形時の耐力 (本試験では1/120rad)

α ：低減係数

3. 試験結果

3.1 二面せん断試験

二面せん断試験により得られた荷重-変位曲線を図8に示す。どの試験体においても、接合具の頭部のCLTへのめり込みと胴部分の曲がりが生じており、ビスのみ胴が破断を起こしている試験体があった。

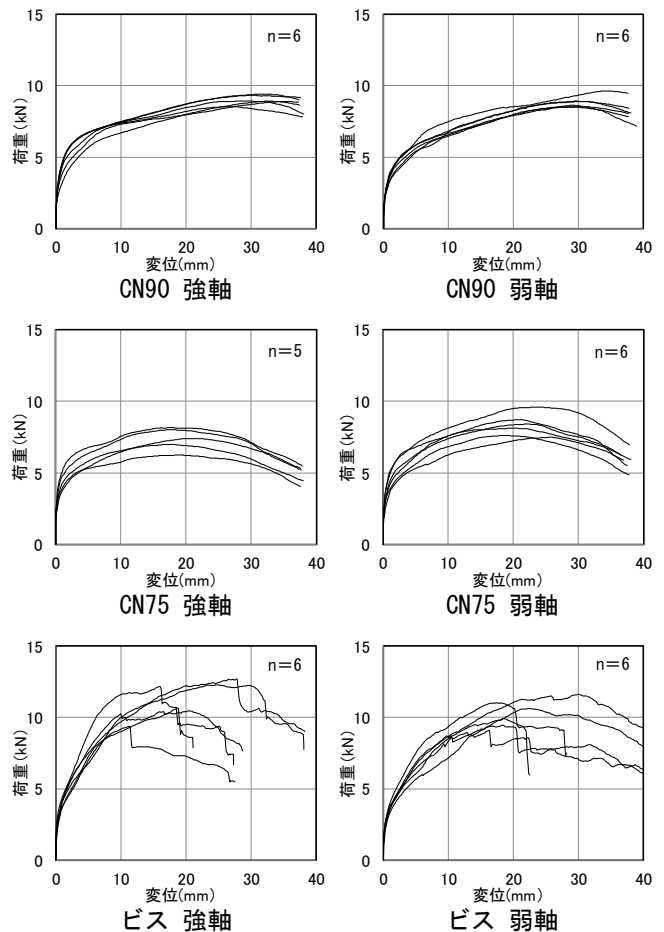


図8 荷重-変位曲線

短期基準接合耐力の算出結果を表3に示す。CN75試験体のうち1体でセッティングに不具合があり異常な数値を示したため、ここではCN75試験体は5体での解析結果を示している。釘では強軸と弱軸との間に有意差はなかったが、ビスでは有意水準5%で弱軸より強軸のほうが高い値となった。これは、釘試験体では材料へのめり込みが生じる

前に釘の引抜けが始まるのに対し、ビスは引抜き抵抗が大きく、それがなかったためと考えられる。

表3 二面せん断試験算定結果

接合具	CLT方向	短期基準接合耐力 (kN)
CN90	強	5.00
	弱	3.92
CN75	強	3.06
	弱	3.42
ビス	強	5.47
	弱	3.38

3.2 簡易試験体による面内せん断試験

試験により得られた荷重-変形角曲線の一例を図9に示す。荷重低下が生じる前に試験が終了しているが、これはシリンダのストロークが足りなかったためである。今回はこの試験終了時点をもとに最大荷重とみなして解析を行った。

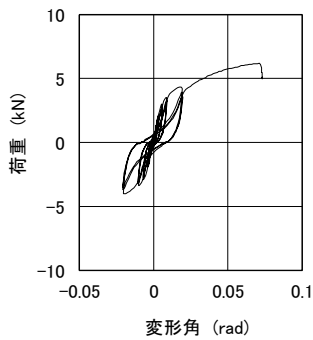


図9 荷重-変形角曲線 (例)

試験終了後の試験体を解体し観察を行ったところ、柱材および面材に破損は全くなく、接合具によるめり込みが生じていた。めり込み跡は、面材の鉛直方向中心部で垂直に拡がっており、上下に移動するにつれて徐々に45度の角度に傾いて拡がっていた (図10)。

試験結果をもとに算定した結果を表4に示す。短期基準せん断耐力を決定する4つの耐力のうち、全ての仕様において、終局耐力による値(靱性の評価)が最も低く、短期基準せん断耐力の決定因子となった。面材へのめり込み跡および二面せん断試験の結果から、強軸試験体のほうが高い耐力になると考えられたが、本試験における強軸と弱軸が比較できる条件(大壁・CN90・100mmピッチおよび大壁・ビス・100mmピッチ)では、わずかではあるが弱軸試験体のほうが高い耐力となっていた。この結果については、2層目ラミナの繊維方向の影響や、二面せん断試験と面内せん断試験とでせん断力の向きが異なることが要因として考えられる。

表4 簡易試験体による面内せん断試験算定結果

納まり	接合具	接合間隔 (mm)	CLT方向	短期基準せん断耐力 (kN)
真壁	CN90	100	強	5.07
		150		3.19
		120		3.20
大壁	CN90	100	弱	3.92
				4.20
	ビス		強	3.13
			弱	2.99
			強	3.04



図10 面材へのめり込み跡

3.3 実大試験体耐力の推定

簡易試験体による面内せん断試験結果から、接合具1本あたりの耐力を算出³⁾し、長さ1mの実大耐力壁を作製した場合の壁倍率を推定⁴⁾した結果を表5、6にそれぞれ示す。

なお、接合具1本あたりの耐力の算出については、2.2.2でも記載したとおり、この試験体の軸組となる柱材は加力部および柱脚部ともにピン固定としているため、ここでは軸組フレームの負担せん断力の低減は考慮していない。壁倍率推定に使用した釘配列諸定数等のパラメータは表7のとおりであり、これは想定していた1m試験体の釘配列を座標化し算出したものである。また、真壁については別途要素試験データが必要なため、大壁のみの算出とし

た。

壁倍率推定値を見てみると、150mmピッチ以外の仕様全てで、本研究の目標としている壁倍率5倍を達成できる見込みとなった。なお、本研究では低減係数を考慮していないため、この壁倍率はあくまで目安の数値である。この中から実証試験に採用する仕様を選定するにあたり、壁量計算に用いることができる最大壁倍率が5倍であること、ビスは施工に時間がかかる、この2点を考慮し、最も5倍に近い「強軸・CN90・120mmピッチ」で試験体を作製することに決定した。

表5 接合具1本あたりの耐力

納まり	接合具	接合間隔 (mm)	CLT 方向	1本あたり耐力 (kN)
大壁	CN90	150	強	2.01
		120		2.13
		100	弱	2.64
	2.64			
	CN75		強	2.00
	ビス	弱	2.39	
2.35				

表6 推定壁倍率

納まり	接合具	接合間隔 (mm)	CLT 方向	推定壁倍率 (倍)
大壁	CN90	150	強	3.9
		120		5.5
		100	弱	6.7
	7.4			
	CN75		強	5.9
	ビス	弱	5.4	
6.0				

表7 使用したパラメータ一覧

	100mm	120mm	150mm
I_{xy}	4.24	3.37	2.69
Z_{xy}	0.092	0.073	0.059
C_{xy}	1.07	1.03	1.05

(3条件共通) $G : 70\text{kN/cm}^2$

へり空き 面材：上 60mm，下 30mm 左右 25mm

梁：60mm，土台：30mm，軸材：27.5mm

I_{xy} ：単位面積あたりの釘配列二次モーメント (cm^2/cm^2)

Z_{xy} ：単位面積あたりの釘配列係数 (cm/cm^2)

C_{xy} ：釘配列降伏終局比

G ：CLTのせん断弾性係数 (kN/cm^2)

3.4 実証試験

3.4.1 1m試験体 (その1)

まず、1m実大試験体の面内せん断試験による荷重-変形角曲線を図11に、試験後における試験体の様子を図12にそれぞれ示す。

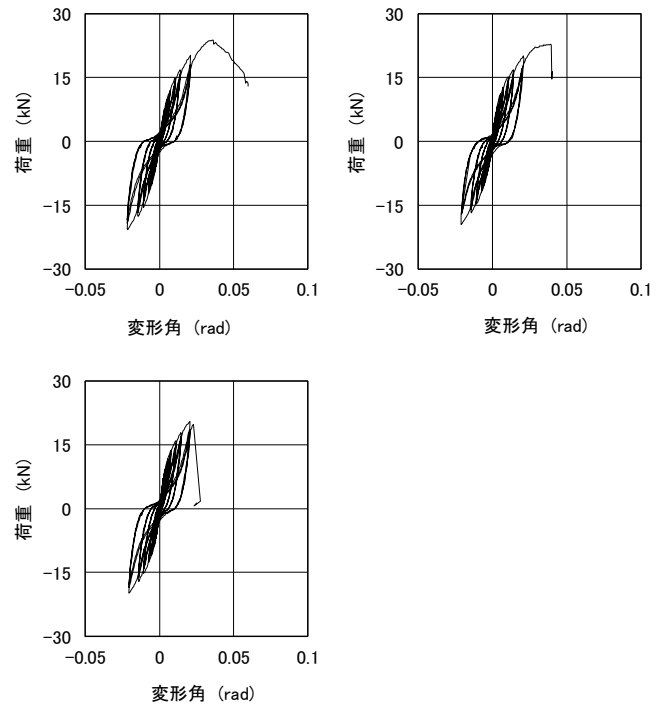


図11 荷重-変形角曲線



図12 試験後における試験体の様子

図12からわかるように、変形角が1/15radに到達する前に柱脚のホールダウン金物固定部から軸材の破壊が生じた。面材のCLTが高耐力であることから、面材と軸材とのバランスが取れなかったことが原因だと考えられ、軸組を強化する必要性が明らかになった。この3体の算定結果を表8に示す。

軸組を強化する方法については、試験材調達の都合により軸組寸法の変更はできなかったため、ホールダウン金物を高強度(約1.2倍)のタイプのものに変更し(図13)、再度同じ仕様で試験体を作製した。

表8 1m試験体算定結果

		P_y	$P_u \cdot (0.2/D_s)$	$2/3 \cdot P_{max}$	$P_{1/120}$
CN90 120mm	1	12.53	10.64	15.87	13.13
	2	12.35	10.07	15.20	13.53
	3	11.25	7.58	13.60	13.99
平均		12.04	9.43	14.89	13.55
変動係数		0.047	0.141	0.064	0.026
ばらつき係数		0.978	0.934	0.970	0.988
平均× ばらつき係数		11.78	8.81	14.44	13.39
短期基準 せん断耐力		8.81			

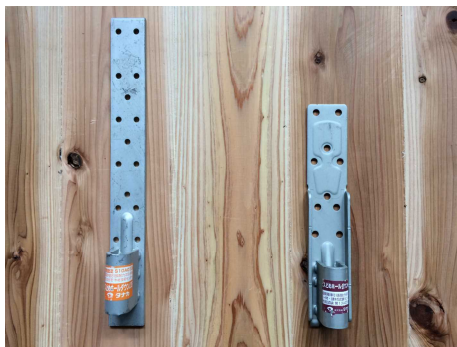


図13 ホールダウン金物 (左: 変更前, 右: 変更後)

3. 4. 2 1m試験体 (その2)

1m実大試験体 (ホールダウン強化後) の面内せん断試験による荷重-変形角曲線を図14に, 試験後における試験体の様子を図15にそれぞれ示す。

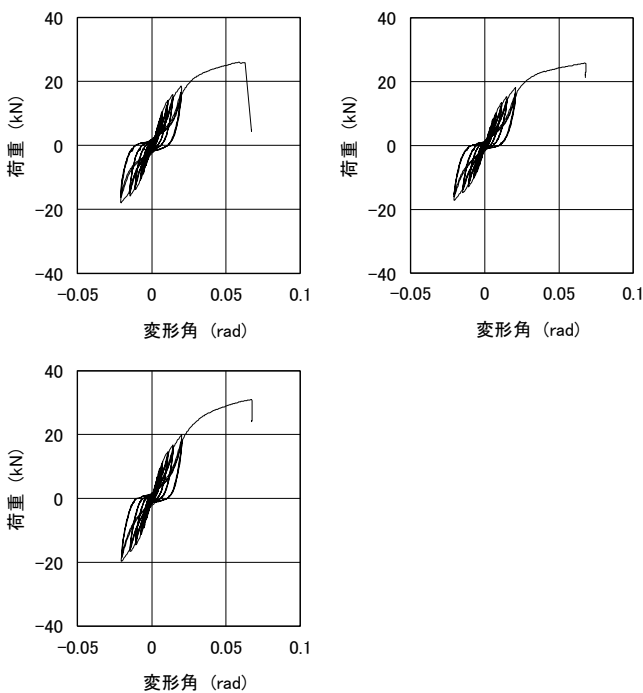


図14 荷重-変形角曲線



図15 試験後における試験体の様子

ホールダウン金物の強化によって, 供試した3体とも変形角が1/15radに到達するまで破壊することなく試験が完了できた。この算定結果を表9に示す。

ホールダウン金物強化後の解析結果も短期基準せん断耐力の決定因子は, 終局耐力による値 (靱性の評価) となった。このことから, CLTを面材に用いた耐力壁にはねばりが無いと読みとることもできるが, これはむしろCLTの高耐力・高剛性が十分に発揮された結果であると考えられる。なお, この結果から計算した壁倍率は5.6倍であり (低減係数は1で計算), 本研究の目標を上回ることができた。

表9 1m試験体 (その2) 算定結果

		P_y	$P_u \cdot (0.2/D_s)$	$2/3 \cdot P_{max}$	$P_{1/120}$
CN90 120mm	1	14.16	10.91	17.40	11.89
	2	14.27	10.68	17.20	10.77
	3	15.85	12.30	20.67	12.59
平均		14.76	11.29	18.42	11.75
変動係数		0.052	0.063	0.086	0.064
ばらつき係数		0.975	0.970	0.959	0.970
平均× ばらつき係数		14.40	10.96	17.67	11.40
短期基準 せん断耐力		10.96			

3. 4. 3 2m試験体

2m実大試験体の面内せん断試験による荷重-変形角曲線を図16に, 試験後の試験体の様子を図17にそれぞれ示す。

2m試験体では1m試験体でも生じた柱脚の破壊と同時に, 1体では土台の割裂が生じ (図17左下), また別の1体では面材からの釘の端抜けが生じた (図17右下)。これもやはり面材に対する軸材の強度不足が原因であると考えられるため, CLTのような耐力・剛性の高い材料を面材に用いる場合には, 120mm角柱材の利用が望ましい。なお, この3体の算定結果は表10のとおりで, 壁倍率は2.8であった。

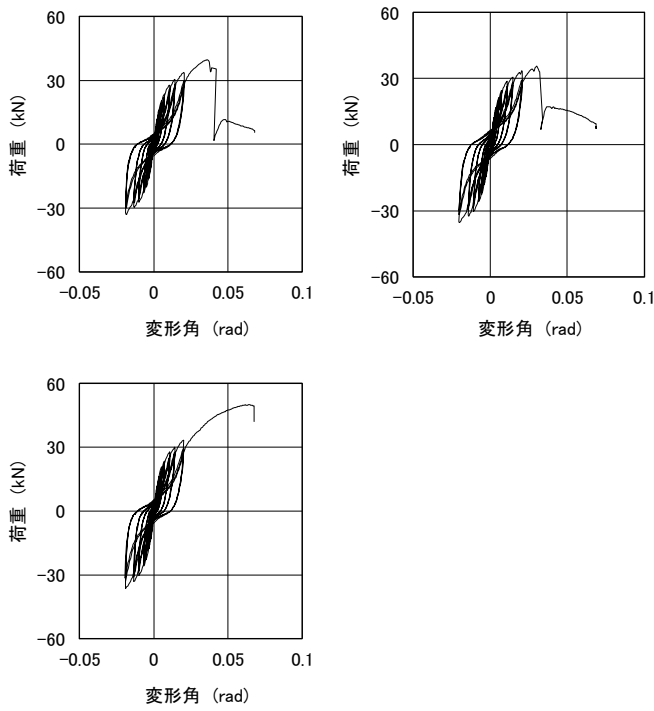


図16 荷重－変形角曲線

表10 2 m試験体算定結果

		P_y	$P_u \cdot (0.2/D_s)$	$2/3 \cdot P_{max}$	$P_{1/120}$
CN90 120mm	1	23.33	18.54	26.40	25.18
	2	20.90	16.78	23.73	25.29
	3	24.77	24.61	33.27	24.82
平均		23.00	19.98	27.80	25.10
変動係数		0.070	0.168	0.144	0.008
ばらつき係数		0.967	0.921	0.932	0.996
平均× ばらつき係数		22.25	18.40	25.91	25.00
短期基準 せん断耐力		18.40			

4. 結 言

二面せん断試験、簡易試験体による面内せん断試験および実証試験を行い、CLTの方向、接合具、接合間隔および真壁・大壁の違いによる接合性能について検討した。その結果、CLTを面材とした接合具ごとの接合性能データが得られ、壁倍率5倍相当の耐力壁仕様を明らかにすることができた。このことで、在来軸組工法用耐力壁へのCLTの適用が図られ、一般住宅等へのCLTの利用促進が期待できる。

参 考 文 献

- 1) (一社)日本CLT協会ホームページ : clta.jp/clt/
- 2) (公財)日本住宅・木材技術センター：“木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017年版）①”（2017）p. 292
- 3) 同上 p. 182-183, 316-317
- 4) 同上 p. 198-199



土台の割裂

柱脚部の破壊

面材からの釘の端抜け

図17 試験後における試験体の様子