

木質耐震垂れ壁構法

Development of Wooden Hanging Wall Rahmen Structural Method

三宅 朗彦*1、河南 孝典*2、中里 太亮*3、青木 浩幸*4

1. はじめに

近年、低炭素社会の実現、国内の林産資源の有効活用等を背景に、特に中大規模建築物における木材利用への関心が高まっており、国内においても中高層の建築物が木造や一部木造を用いたハイブリッド構造で建てられる事例が増えてきている。一般的に耐震部材は、常時の鉛直荷重を負担させないことで耐火被覆不要の「あらわし」で用いることができる。構造材の木材を「あらわし」で用いることで、耐火被覆の手間やコストを抑えられることに加え、利用者への室内の木質感や建築物での木材利用のアピールにつながるなどから、鉄骨造と木質

耐震部材のハイブリッド構造は国内において木材を利用した中大規模建築物の一つの潮流となっている。

筆者らは、図-1のようにCLT（Cross Laminated Timber：直交集成板）の垂れ壁を、ラーメン構造として鉄骨造に組み込んだ構法を開発し、（一財）日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得した。この木質垂れ壁は、地震時の水平力に対して垂れ壁端部接合部がモーメント抵抗することでラーメン構造の梁としての機能を発揮するという機構を有する。また、木質垂れ壁に常時の鉛直荷重を負担させないことで、木質垂れ壁を「あらわし」で利用することが可能である。

本報告では、構法の概要、本構法の性能証明にあたって実施した垂れ壁接合部面内曲げ試験、単位接合部引張要素試験、有限要素法解析について述べる。

2. 構法の概要

2.1 接合部の概要

接合部の概略図を図-2に示す。木質垂れ壁は幅方向の中央部にコの字状のスリットを設け、コの字形の挿入鋼板を挿入し、ドリフトピンによって接合する。一方、鉄骨柱には溶接接合によりブラケットを取り付け、ブラケットと挿入鋼板を添え板と高力ボルトにより摩擦接合し、木質部材からの地震時の曲げモーメントとせん断力を伝達できるような納まりとする。大地震時にはドリフトピン接合部と挿入鋼板のコの字の元端部が降伏して変形能力を確保することを期待する。



図-1 構造イメージパース

*1 MIYAKE Akihiko : 株式会社熊谷組 技術本部 新技術創造センター 木材利用開発グループ
*2 KANNAN Takanori : 株式会社熊谷組 技術本部 技術研究所 防災技術研究室
*3 NAKAZATO Taisuke : 株式会社熊谷組 建築事業本部 建築技術統括部 建築構造技術部
*4 AOKI Hiroyuki : 株式会社熊谷組 建築事業本部 建築技術統括部 建築構造技術部

木質垂れ壁は地震時や暴風時に水平力を負担するが、スラブや内外装材等の鉛直荷重は近傍に配置した鉄骨小梁（床受け材）が負担するため、長期荷重は負担しない構造とする。

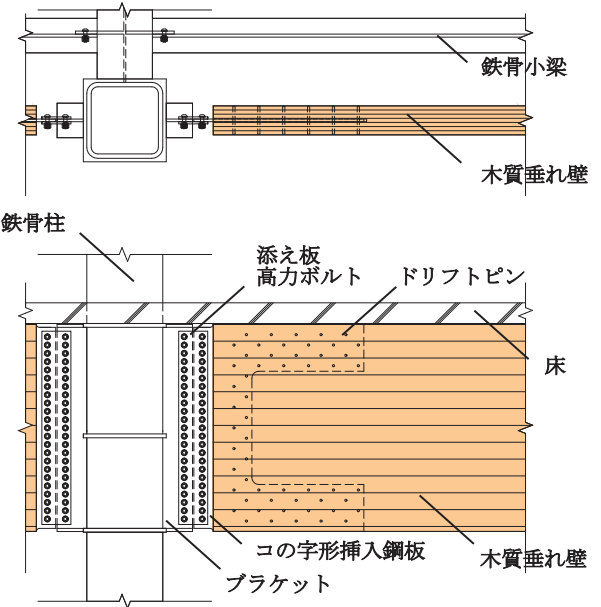


図-2 接合部概略図

2.2 適用範囲

本構法の主な適用範囲を表-1に示す。

表-1 本構法の主な適用範囲	
(1) 適用建築物	法第20条第1項第二号、第三号、第四号の建物高さ60m以下の建築物
(2) 主要構造種別	鉄骨造
(3) 木質垂れ壁が取り付く柱の構造種別	鉄骨造または、コンクリート充填鋼管構造
(4) 柱スパン	6,400~9,200mm
(5) 木質垂れ壁の材料／寸法	スギCLT-5-7／幅（CLT厚）210mm ×せい1,500mm、または1,050mm ×長さ4,800~6,600mm
(6) ドリフトピンの長さ／本数／配置	205mm／せい1,500mmの場合55本、 せい1,050mmの場合39本 ／実験仕様と同じ
(7) 挿入鋼板の板厚	19mm

3. 垂れ壁接合部面内曲げ試験

3.1 試験目的

本構法において、木質垂れ壁端部の接合部が地震時の水平力を受けた際の挙動、荷重変形関係、破壊性状を確認するため、木質垂れ壁端部からスパン中央部分までを取り出し、接合部の面内曲げ試験を正負交番繰り返し載荷方式で行った。

3.2 試験方法

図-3に試験概要図を示す。試験体のセットアップは、

図-3(a.1~2)のように木質垂れ壁接合部を90°回転させ、端部はブラケット治具を介して反力床に固定し、スパンの中央部（地震力による逆対称曲げモーメントの反曲点）を想定した位置を加力した。加力は油圧ジャッキに取り付けられた支圧板によって垂れ壁の側面を押すことにより行った。支圧板の木材へのめり込みを防ぐため、試験体と同幅の鋼板（ $t \times H = 12 \times 225\text{mm}$ ）を試験体の表裏に径8mm、長さ90mmの木ねじで固定した。試験体は木質垂れ壁に設けたスリットにコの字形に加工した鋼板を挿入し、図-3(b.1~2)に示す配置でドリフトピンを打ち込んで製作した。ドリフトピンφ16mmに対するCLT孔のクリアランスは0mm、挿入鋼板孔のクリアランスは+1mm、挿入鋼板 $t19\text{mm}$ に対するCLTスリットのクリアランスは+2mmに設定した。木質垂れ壁と挿入鋼板の相対変位の計測のために8, 9, 10, 11番変位計を設置したほか、挿入鋼板のコの字元端部側面に1, 2番ひずみゲージを貼付した。

試験体の仕様の一覧を表-2に示す。C1-F~C3-F試験体は本構法の基本仕様とし、性能のばらつきを確認するため3体の試験を行った。C1-F~C3-F試験体の仕様と比べ、C4-F試験体は部材長さを長くするため加力点高さを変更している。C5-F試験体は木質垂れ壁せいを1,050mmにした試験体であり、垂れ壁せいに合わせてドリフトピン本数を減じている。表-3に実験で用いたCLTの諸元、表-4、表-5にそれぞれ別途実施した挿入鋼板とドリフトピンの引張材料試験の結果を示す。

載荷方法は接合部回転角1/600, 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50radの正負3回繰り返し後、1/30radを正負各1回ずつ行い、1/15radに達するか最大荷重の8割以下に低下するまで加力を行った。

接合部モーメント M 、および接合部回転角 θ はそれぞれ式(1)および式(2)により求めた。

$$M = Q \cdot (L_Q - x_{RZ}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\theta = \frac{(\delta_2 - \delta_4) - (\delta_1 - \delta_3)}{l_{DDM}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 M ：接合部モーメント、 Q ：ジャッキに接続されたロードセルで計測したせん断力、 L_Q ：木質垂れ壁端部から加力点までの距離、 x_{RZ} ：FEM解析における木質垂れ壁端部から接合部不動点までの距離（5章参照）、 θ ：接合部回転角、 δ_i ： i 番変位計（図-3(a.1~2)参照）の変位、 l_{DDM} ：1番変位計と2番変位計の距離（せい1,500の場合1,400、せい1,050の場合950、図-3(b.1~2)参照）。

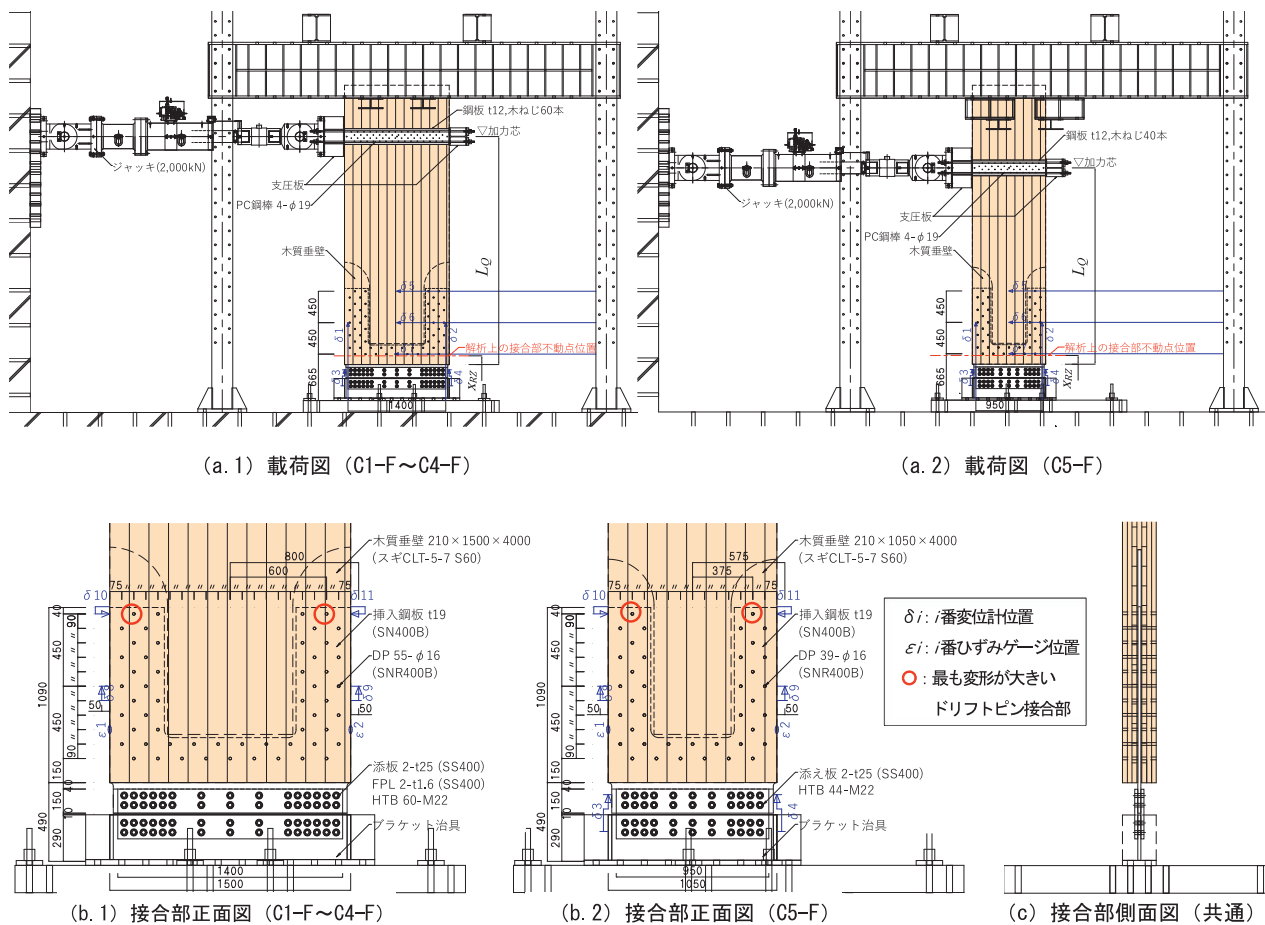


図-3 接合部端部実大面内曲げ試験概要図 (単位: mm)

表-2 試験体仕様の一覧

試験体名	加力点高さ L_Q [mm]	木質垂れ壁			挿入鋼板		ドリフトピン	
		規格・種別	せい[mm]	厚み[mm]	規格・種別	厚み[mm]	規格・種別	本数[本]
C1-F	2,815	スギ S60-5-7	1,500	t210	SN400B	t19	SNR400B	55
C2-F								
C3-F								
C4-F	3,265	スギ S60-5-7	1,500	t210	SN400B	t19	SNR400B	55
C5-F	2,815	スギ S60-5-7	1,050	t210	SN400B	t19	SNR400B	39

表-3 CLTの諸元

試験体名	密度 [kg/m ³]	含水率 [%]
C1-F	414	10.4
C2-F	408	10.8
C3-F	424	10.8
C4-F	473	11.3
C5-F	466	11.3

表-4 挿入鋼板の材料試験結果

試験体名	σ_y [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]	降伏ひずみ [μ]
C1-F, C2-F, C3-F	297 (1.2%)	429 (0.5%)	1434 (0.6%)
C4-F, C5-F	296 (1.1%)	451 (0.3%)	1401 (0.9%)

※括弧内は変動係数

表-5 ドリフトピンの材料試験結果

試験体名	σ_y [N/mm ²]	σ_{max} [N/mm ²]
C1-F, C2-F, C3-F	326 (0.9%)	459 (0.3%)
C4-F, C5-F	325 (1.5%)	465 (1.1%)

※括弧内は変動係数

3.3 特性値算出方法

各特性値の算出方法を以下に示す。

接合部不動点位置 x_{RZ} ：制御回転角 $1/300\text{rad}$ サイクルの正側加力初回ピーク時点での各試験体の水平変位（**図-3(a)**の $\delta_5 \cdot \delta_6 \cdot \delta_7$ ）を結んだ線の切片（水平変位が0）となる点とし、CLT端部からの距離を示す。

回転剛性 K_θ ：制御回転角 $1/300\text{rad}$ の正側加力と負側加力の初回ピーク時の割線剛性の平均値とした（**図-4**）。

ドリフトピン接合部の降伏耐力 DPM_y ：最も変形が大きいドリフトピン接合部の変位量 δ_{FDP} が4章の単位接合部引張要素試験の降伏変位の平均値 2.65mm （**表-8**参照）に到達した時点での接合部モーメントについて、正側加力と負側加力の平均値をドリフトピン接合部の降伏耐力 DPM_y とした。なお、最も変形が大きいドリフトピン接合部は5章の解析から**図-3(b)**の赤い○印で囲んだドリフトピンと判断し、当該ドリフトピン接合部の変位量 δ_{FDP} は式(3)より算出した。

$$\delta_{FDP} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{l_{C-DP}}{l_{C-DM}} \cdot \delta_8 \right)^2 + \delta_{10}^2} + \sqrt{\left(\frac{l_{C-DP}}{l_{C-DM}} \cdot \delta_9 \right)^2 + \delta_{11}^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 l_{C-DP} ：木質垂れ壁の材軸と**図-3(b)**の赤い○印で囲んだドリフトピンの距離、 l_{C-DM} ：材軸と8, 9番変位計（**図-3(b)**参照）の距離、 δ_8, δ_9 ：8, 9番変位計の変位（CLTと挿入鋼板の鉛直方向の相対変位）、 δ_{10}, δ_{11} ：10, 11番変位計（**図-3(b)**参照）の変位（CLTと挿入鋼板の水平方向の相対変位）。ここで、8, 9番変位計は挿入鋼板側に変位計を設置し、CLT側に変位計に測定用のターゲットを設置して相対変位を測定した。10, 11番変位計は挿入鋼板側に変位計を設置し、CLT側に変位計の先を直接当てることで相対変位を測定した。

挿入鋼板の降伏耐力 PLM_y ：挿入鋼板のコの字形の元端部に貼付したひずみゲージ（ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 、**図-3(b)**参照）がそれぞれの挿入鋼板の引張降伏ひずみ値（**表-4**参照）に到達した時点での接合部モーメントについて、正側加力と負側加力の平均値を挿入鋼板の降伏耐力 PLM_y とした。

最大耐力 $M_{\max}$ ：試験終了時までの正側加力における接合部モーメントの最大値を最大耐力 $M_{\max}$ とした。

終局耐力 M_u ：**図-4**に示すように、接合部回転角 $\theta = 1/50\text{rad}$ までの範囲内で、回転剛性 K_θ を第一勾配としモーメントが M_u である完全弾塑性モデルの台形の面積が、実験の接合部モーメント—接合部回転角関係とX軸とで囲む面積と等価となるように定めたモーメント M_u について、正側加力と負側加力の平均値を終局耐力とし

た。ここで、完全弾塑性モデルの第一折れ点の接合部回転角を θ_v 、終点の接合部回転角を θ_u とした。

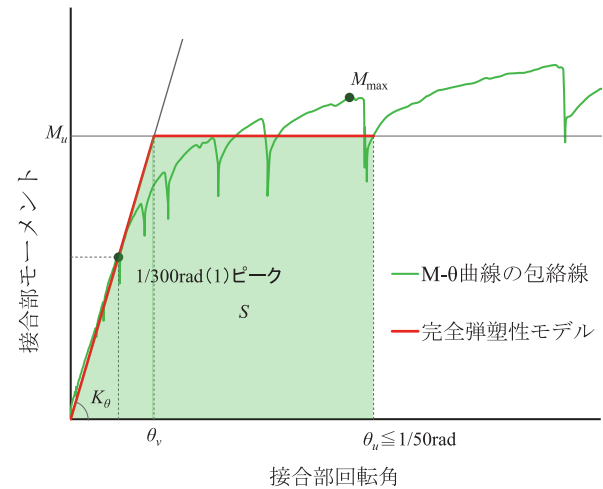


図-4 K_θ と M_u の算出方法の概念図

3.4 試験結果

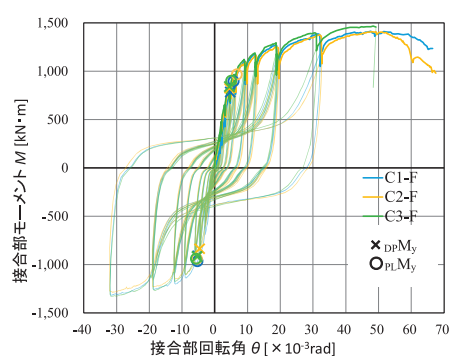
図-5(a)にC1-F～C3-F試験体、**図-5(b)**にC4-F試験体、**図-5(c)**にC5-F試験体の試験より得られた接合部モーメント M —接合部回転角 θ 関係を示す。図中の×印は最も応力の大きいドリフトピン接合部が降伏した時点 DPM_y 、○印は挿入鋼板のコの字形の元端部が降伏した時点 PLM_y を示す。また、**表-6**に試験から得られた特性値の一覧を示す。

$1/50\text{rad}$ までの範囲では、各試験体で耐力の差異はあるものの、接合部モーメント—回転角関係は概ね同様の傾向を示した。**表-6**に示すように、全試験体に共通して接合部が終局耐力に達する以前に、ドリフトピン接合部および、挿入鋼板のコの字の元端部分がともに降伏していることがわかる。

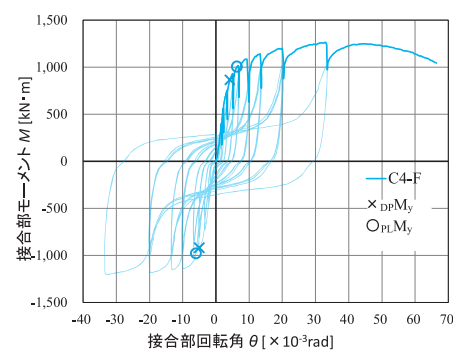
写真-1にC1-F試験体の解体後の状況を示す。ドリフトピンは「へ」の字、または「ひ」の字に変形し、ヒンジを1ヶ所または3ヶ所に形成していることがわかった。また、ドリフトピンの変形状態は、**写真-1(a.1)**の赤枠あたりのものが大きく、青枠あたりのものが小さく、位置による変形の大小が明瞭に見られた。これは、接合部不動点からドリフトピンまでの距離の差に伴う各ドリフトピンに生じる応力の大小によるものだと考えられる。挿入鋼板は**写真-1(b.1～2)**に示すようにドリフトピン接合部の応力作用方向に変形していた。また、コ字形の元端部の黒皮が剥げ、元端部を起点に残留変形が生じていることを確認した。これらのことから、ドリフトピン接合部とコ字形の元端部付近で挿入鋼板が降伏していることが試験体の状況からも確認できた。

表-6 試験より得られた特性値

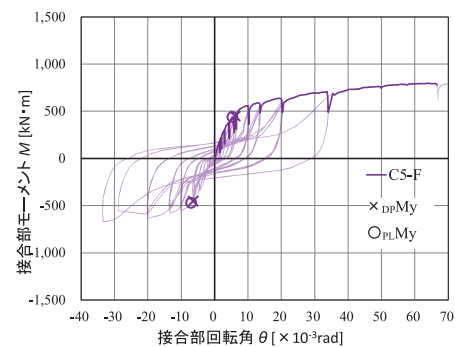
	回転剛性 K_θ [kN・m/rad]	接合部 不動点 x_{RZ} [mm]	降伏耐力		最大耐力	終局耐力	
			$_{DP}M_y$ [kN・m]	$_{PL}M_y$ [kN・m]	M_{max} [kN・m]	M_u [kN・m]	
			$_{DP}\theta_y$ [$\times 10^{-3}$ rad]	$_{PL}\theta_y$ [$\times 10^{-3}$ rad]	θ_{max} [$\times 10^{-3}$ rad]	θ_v [$\times 10^{-3}$ rad]	θ_u [$\times 10^{-3}$ rad]
C1-F	201,620	107	847	930	1,411	1,127	
			4.7	5.5	47.7	5.7	20.0
C2-F	204,578	136	829	953	1,407	1,103	
			4.5	6.1	49.3	5.3	20.0
C3-F	204,529	130	880	932	1,463	1,125	
			5.0	5.5	48.4	5.5	20.0
C4-F	221,300	213	892	993	1,265	1,070	
			4.6	6.2	33.0	4.8	20.0
C5-F	88,825	182	451	455	798	552	
			6.3	6.2	63.7	6.5	20.0



(a) C1-F, C2-F, C3-F

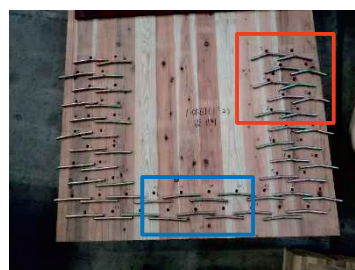


(b) C4-F

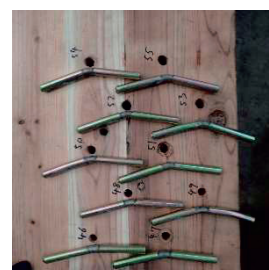


(c) C5-F

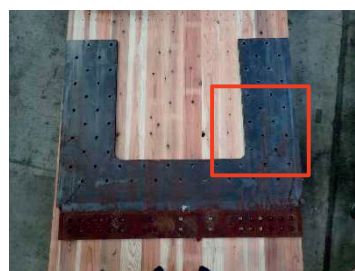
図-5 接合部モーメント—接合部回転角関係



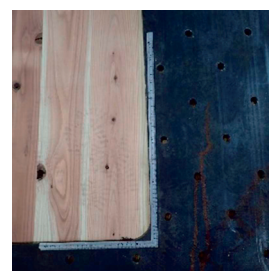
(a.1) 解体後のドリフトピン



(a.2) 赤枠拡大



(b.1) 解体後の挿入鋼板



(b.2) 赤枠拡大

写真-1 垂れ壁端部接合部実大面内曲げ試験解体後の状況 (C1-F)

4. 単位接合部引張要素試験

4.1 試験目的

本構法は、CLTに鋼板挿入式で接合したドリフトピンが曲げ抵抗することで、所定の耐力、剛性、変形能力等が確保されるため、実際の接合部の剛性、耐力を予測する際に、ドリフトピン接合部の性能をよく把握することが重要である。一方、CLTは繊維方向と繊維直交方向が混在するラミナ構成となるため、ドリフトピン接合部の剛性や耐力算出における「木質構造設計基準・同解

説」に記載されている既存式¹⁾を適用することができない。さらに、ドリフトピンからの荷重作用方向とCLTの強軸方向のなす角度 θ は、ドリフトピンの配置された位置により異なるため、荷重作用角度による影響も把握する必要がある。

そこで、ドリフトピン単位接合部の性能および荷重作用角度による影響の確認を目的とし、ドリフトピン単位接合部の引張試験を行った。

4.2 試験体概要

試験体は図-6に示すようにCLTを4つの荷重作用角度に対して幅300mmに切り出して作製した。試験体はCn-E θ ($n=1, 2, 3$:マザーボードの番号、 $\theta=0, 30, 60, 90$:CLTの強軸方向に対する荷重作用角度)と呼称する。挿入鋼板はSN400B、ドリフトピンはSNR400Bとし、各2本配置とした。ドリフトピンと挿入鋼板の機械的性質は表-7に示す。試験体数は4つの角度ごとに各3体とし、各マザーボードから1体ずつ切り出した。3章と同様に、ドリフトピンに対するCLT孔のクリアランスは0mm、挿入鋼板孔のクリアランスは+1mm、挿入鋼板に対するCLTスリットのクリアランスは+2mmに設定した。

4.3 試験方法

図-7に載荷図を示す。載荷は引張用と圧縮用の1,000kNセンターホールジャッキにより加力した。軸方向力は各ジャッキに接続された圧力交換器で計測した。変位は挿入鋼板と木材の相対変位を表裏2ヶ所で計測し、その平均値で評価とした。載荷は引張側を正とし、正負3回繰り返した。 $\theta=0^\circ$ で実施した予備試験の降伏変位 $\delta_{pt}=1.55\text{mm}$ を基準に、 $\delta_{pt} \times 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16$ の繰り返し変位を与えたのち、荷重が最大荷重の0.8倍まで低下するか、変位が30mmに達するまで行った。

降伏耐力 P_y は、文献2)の方法に基づき算出した。また、第一折れ点を点(δ_y, P_y)、第二折れ点を点($P_{\max}, \delta_{\max}$)とするトリリニアモデルを作成し、初期剛性 K_1 と二次剛性 K_2 を下式により求めた。

$$K_1 = P_y / \delta_y \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K_2 = (P_{\max} - P_y) / (\delta_{\max} - \delta_y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 K_1 : 単位接合部の初期剛性 [kN/mm]、 K_2 : 単位接合部の二次剛性 [kN/mm]。

4.4 試験結果

図-8に角度ごとのドリフトピン1本あたりの荷重-変形関係を、表-8に試験によって得られた特性値の平均値 ($\theta=0, 30, 60, 90$ は3体分の平均値、ALLは全12体分の平均値)を示す。

図-8の赤線は各仕様3体のトリリニアモデルの平均を示している。

写真-2に試験体の解体後の写真を示す。試験後のドリフトピンを取り出し、曲げヒンジの箇所数が0ヶ所のものを降伏モードⅠ、1ヶ所のもの(「へ」の字状の変形)を降伏モードⅢ、3ヶ所のもの(「ひ」の字状の変形)を降伏モードⅣと分類した。

接合部剛性、接合部耐力ともに荷重作用角度 θ による明瞭な差異が見られなかった。

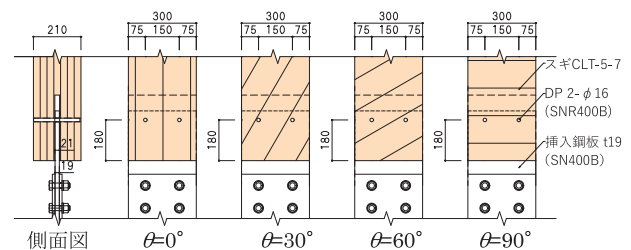


図-6 単位接合部引張要素試験体概要図

表-7 試験に用いた鋼材の機械的性質

材料	σ_y [N/mm ²]	$\sigma_{\max}$ [N/mm ²]
ドリフトピン	326 (0.9%)	459 (0.3%)
挿入鋼板	312 (2.0%)	431 (0.4%)

※括弧内は変動係数

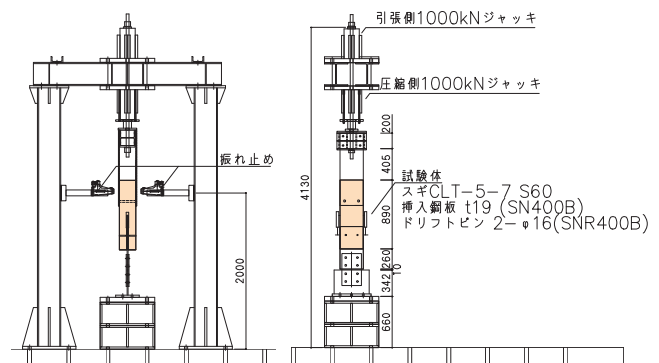


図-7 単位接合部引張要素試験載荷図 (単位: mm)

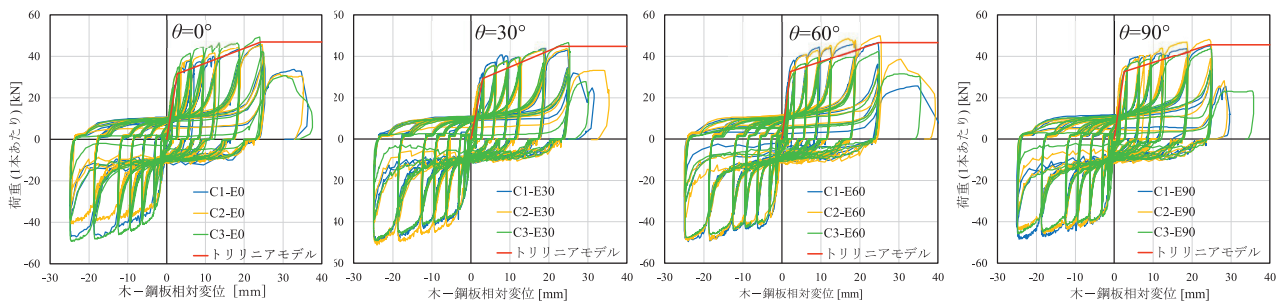


図-8 単位接合部引張要素試験 荷重変位関係

表-8 試験によって得られた特性値の平均値

荷重作用 角度 θ [deg]	初期剛性 K_1 [kN/mm]	二次剛性 K_2 [kN/mm]	降伏耐力 P_y [kN]	最大耐力 P_{max} [kN]	Mode
			降伏変位 δ_y [mm]	P_{max} 時変位 δ_{max} [mm]	
0	11.3	0.717	31.6 2.79	47.0 24.30	IV, IV, IV
30	9.6	0.791	29.4 3.05	44.9 22.66	IV, IV, IV
60	14.2	0.660	31.4 2.21	46.3 24.79	IV, IV, IV
90	12.7	0.596	32.6 2.56	45.7 24.42	III, III, IV
ALL	11.8	0.684	31.3 2.65	46.0 24.04	-

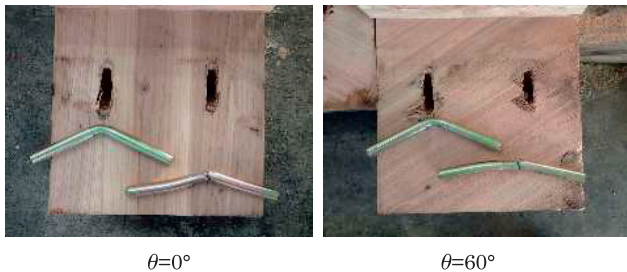


写真-2 単位接合部引張要素試験解体後の状況

5. 有限要素法解析

5.1 解析目的

3章の垂れ壁端部接合部実大曲げ試験を対象に、有限要素法により各特性値の推定を行い、試験結果と比較を行う。ここで、解析に用いたドリフトピン単位接合部の性能については4章の試験、挿入鋼板の材料強度については3章の材料試験により実測した値を採用した。

5.2 解析モデル

解析モデルの諸元を表-9に、モデルの概要を図-9に示す。解析には、MIDAS iGen Ver.900 R2xを用いた。CLTの剛性は文献3)による。鋼板挿入ドリフトピン単位接合部はMSS (Multiple Shear Spring; 分割数 $n=4$)によるトリリニアモデルとした。MSSの各せん断ばねのモデルを図-10に示す。せん断ばねの剛性 K_1 、 K_2 と降伏

荷重 p_1 、 p_2 は、文献4)を参考に下式により求めた。

$$k_1 = K_1 / \sum_{i=1}^n \sin^2 \frac{1}{n} \pi \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$k_2 = K_2 / \sum_{i=1}^n \sin^2 \frac{1}{n} \pi \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$p_1 = P_y / \sum_{i=0}^{n-1} \sin \frac{1}{n} \pi \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$p_2 = P_{max} / \sum_{i=0}^{n-1} \sin \frac{1}{n} \pi \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 K_1 : MSSの各せん断ばねの初期剛性 [kN/mm]、 K_2 : MSSの各せん断ばねの二次剛性 [kN/mm]、 p_1 : MSSの各せん断ばねの第一折れ点の降伏荷重 [kN]、 p_2 : MSSの各せん断ばねの第二折れ点の降伏荷重 [kN]、 K_1 : 単位接合部の初期剛性 [kN/mm]、 K_2 : 単位接合部の二次剛性 [kN/mm]、 P_y : 単位接合部の降伏耐力 [kN]、 P_{max} : 単位接合部の最大耐力 [kN]。

単位接合部の各特性値は、4章の試験結果より、ともに角度による明確な差異は見られなかったことに加え、計算の簡便性を鑑み、角度依存性がないものとして扱うこととし、全12体の試験結果の平均値(表-8の数値を参照)を採用した。

挿入鋼板元端部は図-11のようなトリリニア型の復元力特性を持つ弾塑性回転ばねとした。初期剛性はコの字形プレート弾性解析よりせい1,500mmの場合は $K_0 = 136,000 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 、せい1,050mmの場合は $K_0 = 129,000 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ とした。トリリニアモデルの第一折れ点は降伏モーメント M_y に達する時点、第二折れ点は全塑性モーメント M_p に達する時点とし、挿入鋼板の降伏モーメント M_y と全塑性モーメント M_p を図-11のArea 1とArea 2の面積が等価となるように式(10)から(16)の計算により定めた。ここで、 M_y 、 M_p の算出において、挿入鋼板の降伏応力度は2章に用いた挿入鋼板の降伏応力度を採用した。

表-9 解析モデル諸元

要素	要素種別	諸元
CLT	板要素	$t=210\text{ mm}$, $E_0=4,285\text{ N/mm}^2$, $E_{90}=1,714\text{ N/mm}^2$, $G=500\text{ N/mm}^2$
ドリフトピン 接合部	MSS ($n=4$)	$K_1=11,800\text{ N/mm}$, $K_2=684\text{ N/mm}$, $P_y=31,300\text{ N}$, $P_{\max}=46,000\text{ N}$
挿入鋼板	梁要素	$B \times D=19\text{ mm} \times 340\text{ mm}$ (H1,500) $B \times D=19\text{ mm} \times 265\text{ mm}$ (H1,050) $E=205,000\text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$
	弾塑性 回転バネ	(H1,500) $K_0=136,000\text{ kN} \cdot \text{m/rad}$, $\beta=0.301$ (H1,050) $K_0=129,000\text{ kN} \cdot \text{m/rad}$, $\beta=0.301$

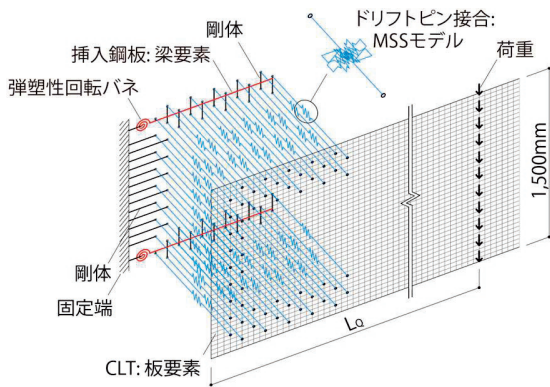


図-9 解析モデル (せい1,500mmのケース)

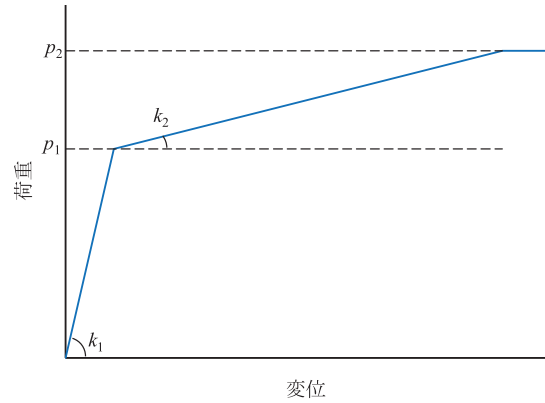


図-10 MSSのせん断ばねのモデル

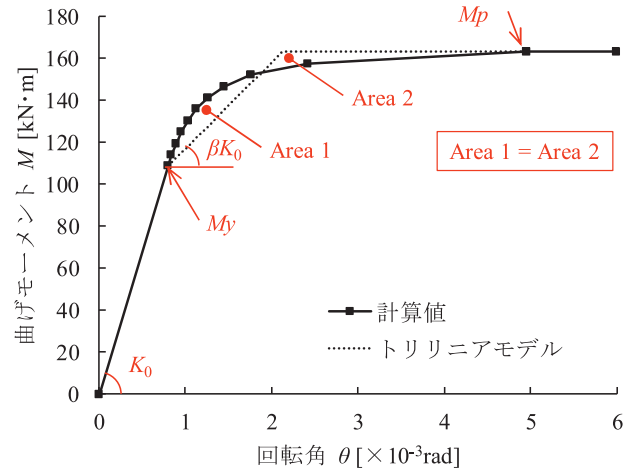


図-11 挿入鋼板元端部の回転ばね (H1,500の場合)

$$M_y = Z \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$M_p = Z_p \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$M_i = M_y + (M_p - M_y)i/m \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$x_i = \sqrt{\frac{3D^2}{4} - \frac{3M_i}{B\sigma_y}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$I_i = \frac{B(2x_i)^3}{12} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$K_i = I_i/I_0 \cdot K_0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(M_p - M_y)/m}{(K_i + K_{i-1})/2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 M_y : 降伏モーメント [kN・m]、 Z : 断面係数 [mm^3]、 σ_y : 挿入鋼板の降伏応力度 (表-4参照) [N/mm^2]、

M_p : 全塑性モーメント [kN・m]、 Z_p : 塑性断面係数 [mm^3]、 i : ステップ数、 m : 分割数 (=10)、 M_i : i ステップの曲げモーメント [kN・m]、 x_i : i ステップの非塑性化部せい [mm]、 D : 鋼板のせい [mm]、 B : 鋼板の幅 [mm]、 I_i : i ステップの断面二次モーメント [mm^4]、 K_i : i ステップの回転剛性 [kN・m/rad]、 θ_i : i ステップの回転角 [rad]。

荷重条件は、図-12に解析条件に示すような条件を与

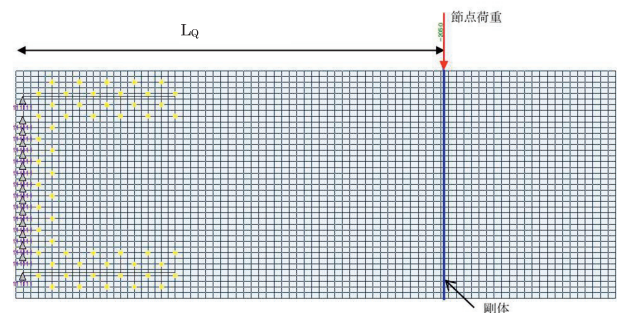


図-12 解析条件

えた。荷重は実大実験と同様に、CLTの端部から加力点高さ L_Q の位置とし、その位置の節点を剛体の梁要素で接続し、最上部の節点に節点荷重を与え、荷重増分解析を行った。

5.3 解析結果

解析によって得られた各仕様の接合部モーメント－接合部回転角関係をそれぞれ図-13に示す。図中の×印は増分解析において最も応力の厳しいドリフトピン接合部の変位量が降伏変位である2.65mmに達した時点を示し、○印は増分解析において挿入鋼板の元端部に設置した回転バネが降伏した時点を示す。また、実験値と解析値の比較をそれぞれ表-10に示す。表中の解析値の終局耐力は、1/50rad時点までの荷重変形関係と面積等価になるようにバイリニア置換した際の耐力とした。

図-13より、有限要素法解析によって得られた接合部モーメント－接合部回転角関係は実験値を良い精度で予測できているといえる。また、表-10より、回転剛性および各耐力値についても概ね良い精度で一致した。

本報では、木質垂壁接合部が荷重を受けて回転変形する際に材軸からの変位が生じない点を接合部不動点と

表-10 解析結果と試験結果の比較

(a) C1-F～C3-F 仕様

	K_θ [kN・m/rad]	$DP M_y$ [kN・m]	$PL M_y$ [kN・m]	M_u [kN・m]
解析結果	198,400	764	946	1,150
実験値の 平均値	221,300	892	993	1,070
解析/実験	0.90	0.86	0.95	1.07

(b) C4-F 仕様

	K_θ [kN・m/rad]	$DP M_y$ [kN・m]	$PL M_y$ [kN・m]	M_u [kN・m]
解析結果	202,716	785	917	1,169
実験値	203,576	852	934	1,120
解析/実験	1.00	0.92	0.98	1.04

(c) C5-F 仕様

	K_θ [kN・m/rad]	$DP M_y$ [kN・m]	$PL M_y$ [kN・m]	M_u [kN・m]
解析結果	72,435	404	427	569
実験値	88,825	451	455	552
解析/実験	0.82	0.90	0.94	1.03

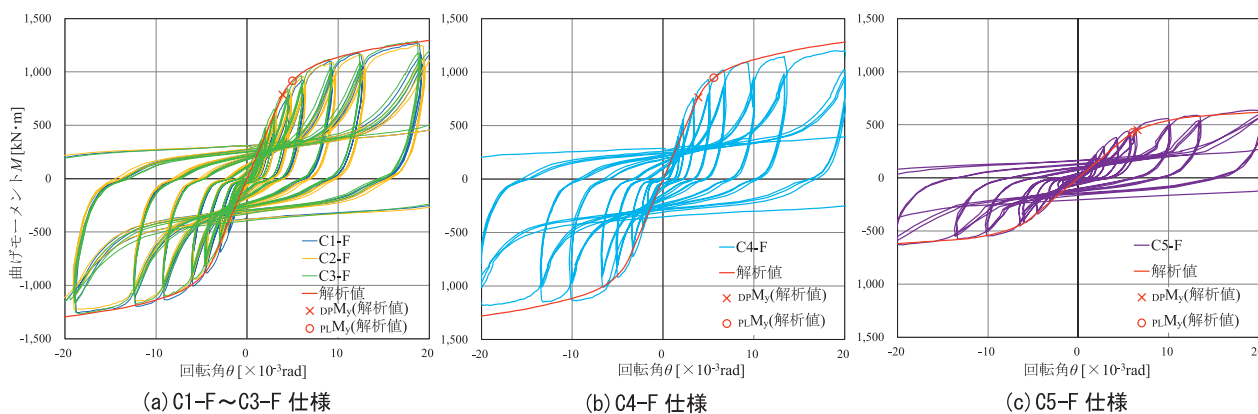


図-13 接合部モーメント－接合部回転角

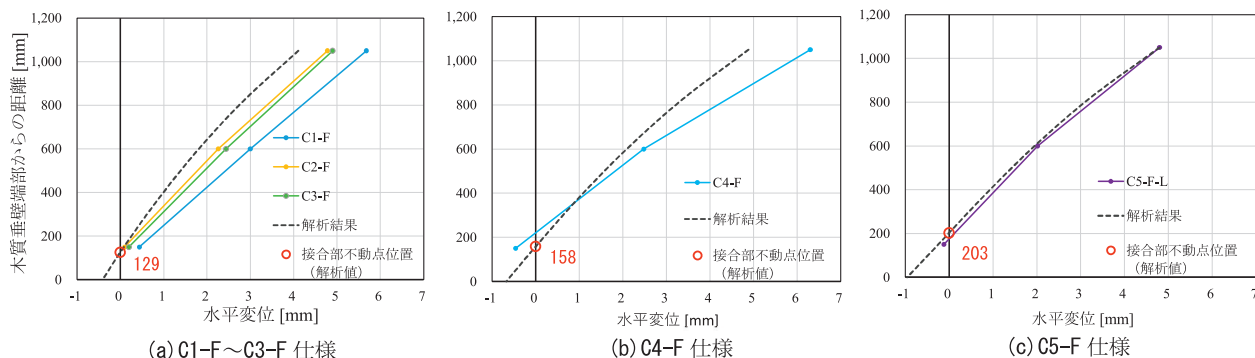


図-14 CLTの水平変位の比較

定義する。加力点から接合部不動点までの距離をモーメントアーム長として、接合部モーメントの計算に用いる。

図-14に1/300radサイクルの正側初回ピーク付近での各試験体の水平変位の実験結果(図-3(a)の $\delta 5 \cdot \delta 6 \cdot \delta 7$)と、同じ荷重条件に対する増分解析結果を示す(この時点で解析は弾性範囲内であった)。図-14より、接合部不動点は試験結果と概ね一致することを確認した。

6. おわりに

本報では、CLTの垂れ壁を、ラーメン構造として鉄骨造に組み込んだ「木質耐震垂れ壁構法」について紹介し、所定の性能を検証するために実施した、垂れ壁接合部面内曲げ試験、単位接合部引張要素試験、有限要素法解析を報告した。

試験により本構法は所定の耐力と変形能力を確保していることを確認した。また、有限要素法解析は、回転剛性、各降伏耐力および、終局耐力を精度よく推定できることを確認した。

謝辞

本構法は、東京大学大学院農学生命科学研究科木質材料学研究室と銘建工業株式会社との共同開発である。各種試験や解析検討にあたり、東京大学大学院の稲山正弘教授、村田龍馬氏、銘建工業株式会社の鳥羽展彰氏、車田慎介氏にご協力を頂いた。関係各位に感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) (一社)日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，2006.
- 2) (一社)日本ツーバイフォー建築協会：枠組壁工法構造計算指針，2018.
- 3) (公財)日本住宅・木材技術センター：CLTを用いた建築物の設計施工マニュアル，2016.
- 4) (一社)日本建築学会：免震構造設計指針，2013.

【執筆者】



*1 三宅 朗彦
(MIYAKE Akihiko)



*2 河南 孝典
(KANNAN Takanori)



*3 中里 太亮
(NAKAZATO Taisuke)



*4 青木 浩幸
(AOKI Hiroyuki)