

# パイプ LSB を使用した地震エネルギー吸収可能で斜材長さ可変な 木造座屈拘束プレース接合の実現

辻 千佳 西塔 純人  
Chika Tsuji, Sumito Saito

## 概要

本研究では、木造軸組工法において、芯材に丸鋼を用いて、地震エネルギーを吸収できる紡錘型履歴特性を持つ、座屈拘束プレースのラグスクリューボルト型接合を実現した。近年の木造耐力壁はスリップが顕著な履歴特性であり、地震エネルギーの吸収を期待できない。一方、芯材に丸鋼を用いて、地震エネルギーを吸収できる座屈拘束プレースの研究があるが、鋼材を斜材全長に用いており、斜材長さの調節は容易ではない。本接合を用いた斜材は木材で斜材長さを容易に調整できる。実現した接合部を用いて検証試験を行い、地震エネルギーを吸収できることを確認した。

## Development of a Variable-Length Wooden Buckling-Restrained Brace Connection Using Pipe-LSB for Seismic Energy Absorption

### Abstract

This study developed a lag-screw-bolt-type connection for buckling-restrained braces (BRBs) in wooden frame construction, using round steel bars as core members to achieve spindle-shaped hysteretic behavior capable of absorbing seismic energy.

Recent wooden shear wall systems often exhibit pronounced slip-type hysteresis and therefore cannot be expected to effectively absorb seismic energy. While previous research has explored BRBs using round steel bars as core members, these typically employ steel along the entire brace length, making it difficult to adjust the diagonal member length. The developed connection enables easy adjustment of brace length using wooden members. Verification tests conducted with this connection confirmed its ability to absorb seismic energy effectively.

キーワード：座屈拘束プレース、木造軸組工法、パイプ LSB、丸鋼

## 1. はじめに

国産木材の利用が促進され、2024年に壁倍率7倍を超える耐力壁を対象とする木造軸組工法中大規模木造建築物の許容応力度設計<sup>1)</sup>の発刊など、高耐力壁の整備も進められている。しかし、木造軸組工法住宅の許容応力度設計<sup>2)</sup>や（一社）日本木造住宅産業協会が近年提示した中低層規模向け耐力壁<sup>3)</sup>、ボルト内蔵型ラグスクリューボルト（以下 LSB）を用いた CLT 耐力壁<sup>4),5)</sup>では、スリップ形状が顕著な履歴特性であり地震エネルギーの吸収を期待できない。一方既往の研究では、中村らは、芯材に丸鋼を用いた木造向け座屈拘束プレース（以下 BRB）の地震エネルギー吸収性能を報告<sup>6)</sup>している。

また木造軸組工法ではプレース造とする場合、梁せいの種類が多いため、斜材長さが変化する。中村らに加えて、藤井らの芯材に丸鋼を用いた BRB 研究<sup>7),8)</sup>があるが、いずれも鋼材を斜材全長に用いる。したがって建物を設計し、斜材必要長さが決まった後に、斜材の部材設計が可能となるため、実物の用意に時間がかかる。斜材必要長さを変更する、または複数種類あるとなると部材設計の手間も増える。

本研究は木造軸組工法において、芯材に丸鋼を用いて、地震エネルギーを吸収できる紡錘型履歴特性を持つ、BRB の LSB 型接合を検討する。本接合を用いた斜材は木材カットで斜材長さを容易に調整できる。斜材長さに関係なく接合金物は事前準備ができる、部材準備の時間が短くなる。開発した接合の引張圧縮試験を行い、接合部の性能を確認し、考案した接合の設計手法の有効性を検証する。

## 2. 接合方法

### 2.1 パイプラグスクリューボルト

座屈拘束機構として、片側端部に六角頭加工、胴部に切削ねじ加工された鋼管（直径 25.4mm、厚み 5.5mm、STKM13A 材、以降「パイプラグスクリュー（パイプ LS）」）の片側に、両端を転造ねじ加工した丸鋼の芯材（M14 ねじ、軸直径 12.56mm、SNR490B 材）を圧着し固定したラグスクリューボルト（以降「パイプラグスクリューボルト（パイプ LSB）」）を用いた。図 1 にパイプ LSB の製品までの流れを、図 2 にパイプ LSB の座屈拘束機構概略図を示す。

### 2.2 パイプ LSB と木軸との接合

パイプ LSB は木軸プレース端部に全長 525mm の木ねじとして設置し、芯材の座屈拘束はパイプ LS

と木軸に期待する。階高が同一でも梁せいが異なると、梁間の内法寸法とプレース角度は変化する。パイプ LSB と木軸（柱や横架材）との接合部の端部は角度の変化に対応するため、ピン接合となるフォークエンド（クレビス）形式とする。木材端部にパイプ LSB を木ねじとして設置するため、プレース長さは木材カット長さで容易に変更できる。

また参考文献 9)より、木材を覆うと割裂進行の抑制効果があることから、プレース端部の木材の割裂破壊防止のために鋼管を短く切断し作製した「短輪」をプレース内に設置する。なお、短輪の割裂破壊防止に対する有効性は 3 章で確認する。

フォークエンド（SS400 材 φ 50mm）は、内部にパイプ LS の六角頭加工が格納できる座彫り部分と、めねじ部分を有する（図 3）。フォークエンドと芯材は、フォークエンド内のめねじ部分と、パイプ LS に覆われていない芯材の転造ねじ部分で接続する。また、芯材の座屈拘束のため、木材にフォークエンドは十分に埋めこむ。

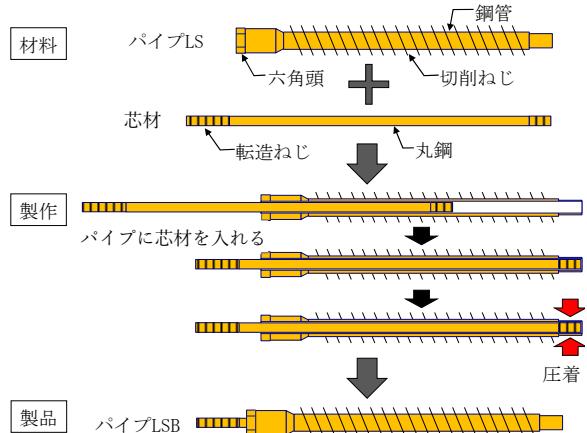


図 1 パイプ LSB の製品までの流れ

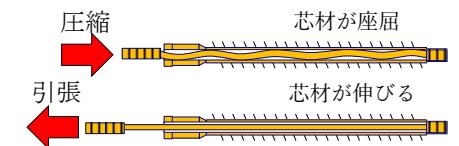


図 2 パイプ LSB の座屈拘束機構概略図

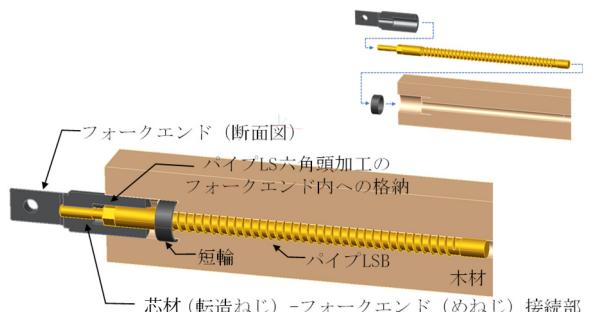


図 3 パイプ LSB と木軸の接合概略図

## 2.3 接合の剛性

接合の剛性  $K$  はパイプ LSB のすべり係数  $K_{ls}$  と芯材の剛性  $K_s$  の直列合成ばねとし式(1)で算定する。参考文献10)よりすべり係数  $K_{ls}$  を式(2), 最大引抜耐力  $P_{Lmax}$  を式(3)で算定する。ただし文献10)と LSB・樹種などが異なり、参考値とする。接合システム係数  $K_{js}$  と含水率影響係数  $K_{jm}$  は1.0とし、3章を参考に木質部材の引張ヤング率  $E_w=9500\text{ N/mm}^2$ , LSB ヤング率  $E_s=20,500\text{ N/mm}^2$ , 有効埋込深さ  $L_a=375\text{ mm}$ , LSB 外径  $d=25.4\text{ mm}$ , LSB 谷径  $d_{lb}=20.4\text{ mm}$ , パイプ LS 空洞径  $d_{lin}=14.4\text{ mm}$  とし、その他の数値は文献10)より MK 仕様の φ25 を参考とし、係数  $c=1.5$ , せん断弾性係数  $I=7.18\text{ N/mm}^3$  (カラマツ E95-F270),  $9.74\text{ N/mm}^3$  (欧洲アカマツ E105-F300), せん断強さ  $f_v=4.97\text{ kN/mm}^2$  (カラマツ E95-F270),  $4.02\text{ N/mm}^2$  (欧洲アカマツ E105-F300)とした。

芯材の剛性  $K_s$  の算定は式(4)で行い、芯材の有効断面積  $A=115\text{ mm}^2$ , 芯材の長さ  $L=455\text{ mm}$  とした。

算定結果は  $K_{ls}=152.9\text{ kN/mm}$  (カラマツ),  $190.1\text{ kN/mm}$  (欧洲アカマツ),  $K_s=51.8\text{ kN/mm}$  より、接合の剛性  $K=38.7\text{ kN/mm}$  (カラマツ),  $40.7\text{ kN/mm}$  (欧洲アカマツ)となり、最大引抜耐力  $P_{Lmax}$  は  $105.8\text{ kN}$  (カラマツ),  $78.5\text{ kN}$  (欧洲アカマツ)となった。

$$K = \frac{K_{ls} \cdot K_s}{K_{ls} + K_s} \quad (1)$$

$$K_{ls} = \frac{\Gamma \pi d_L (E_w A_w + E_s A_s) \sinh k L_a}{k (E_w A_w \cosh k L_a + E_s A_s)} K_{js} K_{jm} \quad (2)$$

$$P_{Lmax} = \frac{f_v \pi d_L (E_w A_w + E_s A_s) \sinh k L_a}{k (E_w A_w \cosh k L_a + E_s A_s)} K_{js} K_{jm} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{E_s A}{L} \quad (4)$$

ただし

$$k = \sqrt{\Gamma \pi d_L \left( \frac{1}{E_w A_w} + \frac{1}{E_s A_s} \right)}$$

$$A_w = \pi \{(c \cdot d_L)^2 - (0.5 d_L)^2\}$$

$$A_s = \pi \{(0.5 d_{lb})^2 - (0.5 d_{lin})^2\}$$

## 2.4 接合の設計案（耐力）

接合部の降伏耐力  $P_y$  は接合部の変形が芯材で発生するとし、式(5)で算定する。芯材の有効断面積  $A=115\text{ mm}^2$  とし、試験で使用した芯材はミルシートより  $\sigma_y=360\text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_u=555\text{ N/mm}^2$  であった。なお、接合部設計を行う場合は  $\sigma_y$  ではなく設計基準強度  $F=325\text{ N/mm}^2$  にて算定する。式(5)より、降伏耐力  $P_y=41.4\text{ kN}$  となった。

$$\text{接合部の降伏耐力 } P_y = \sigma_y A \quad (5)$$

## 3. 検証試験結果

### 3.1 接合部単体での引張圧縮試験（疲労試験）

#### 3.1.1 試験体

考案したパイプLSB接合の構造・変形性能確認のため、木軸に設置したパイプLSBの軸方向に繰返し加力し部分試験を実施した。パイプLSB図面を図4、変位計を含む試験体姿図を図5に示す。1つの試験体にパイプLSBを1つ設置する。木材は120×120mm欧洲アカマツ集成材(E95-F315), 長さ990mmとした。木材比重(孔等欠損考慮なし)は0.539(C.V.=0.023), 含水率は9.15% (C.V.=0.019) であった。

#### 3.1.2 試験方法

試験は、ロの字型の試験架台を用いて、ロードセルを介しオイルジャッキ先端と根元をピンとし、鉛直方向へ加力した。試験体上部を M20 (強度区分 10.9) のボルトで 3 カ所固定し、下部を φ17.8 のピン (SNR490B 材, 基材 φ20.2mm) で固定し、LM ガイド等を振れ止めとした。載荷方法は一定変位の正負繰返し載荷とし、パイプ LSB の変形  $\delta_0$  で制御を行った(引張を正、圧縮を負)。変位は 5, 10, 15, 20mm の 4 種類とし、各種 1 体試験した。最終変形はパイプ LSB の芯材の破断までとした。

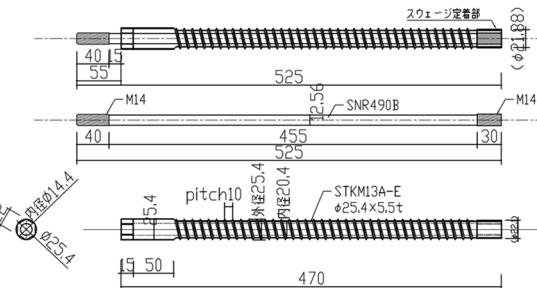


図 4 パイプ LSB 図面

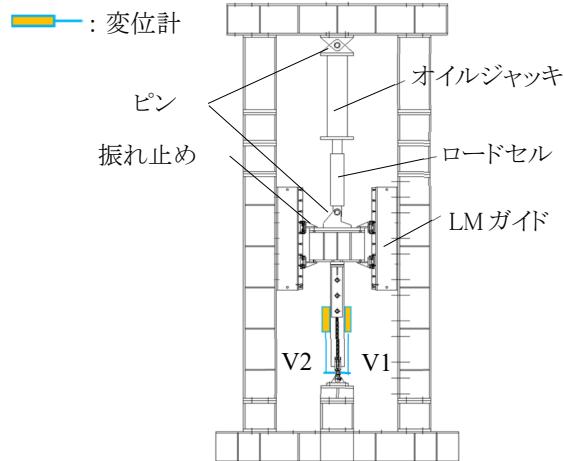


図 5 試験体概要図

パイプ LSB の変形  $\delta_0$  は式(6)で算出する。

$$\delta_0 = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (6)$$

### 3.1.3 試験結果

試験で得られた荷重-変形  $\delta_0$  関係を図 6 に示す。図 6 一点鎖線の傾きは  $K=40.7\text{kN/mm}$  (欧洲アカマツ) を用いた。試験終了までの繰返し回数  $N_f$ 、破壊状況、初期剛性 (試験開始から  $P_y$  までを最小二乗法で算定) を表 1、試験後に解体した試験体芯材を写真 1 に示す。図 6 より紡錘型履歴特性であり、地震エネルギーが吸収可能だと確認した。2.3 節の接合部剛性  $K$  と試験時初期剛性は計算値が大きい。引張は単純鋼材引張試験となるため、 $P_y$  との比較は省く。

変位  $\pm 5, 10, 15\text{mm}$  の荷重-変形履歴は安定し、変位  $\pm 20\text{mm}$  の 2 回目圧縮時に急激な荷重上昇がみられ、これは写真 1(b) のようにパイプ LSB 芯材のフォークエンド側の転造ねじ部がつぶれ、パイプ LS と干渉したためだと考えられる。また引張時より圧縮時の荷重が全体的に高く、芯材とパイプ LS 間の摩擦が関係していると考えられる。

終局時はすべて引張時に芯材が破断し、転造ねじ部 (写真(a)) 又はパイプ LS との圧着部付近の丸鋼 (写真(b)右) で破断した。

### 3.2 ブレース形状での引張圧縮試験



写真 1 破壊状況

表 1 繰返し回数  $N_f$  と破壊形状

変位 [mm]	$N_f$	初期 剛性 [kN/mm]	破壊状況	
			パイプ LSB	木材
5	199	52.4	芯材転造ねじ部 破断	—
10	43	45.0	芯材軸部破断	—
15	9	46.6	芯材軸部破断	—
20	3	42.2	芯材軸部破断	パイプ LS 切削ねじ部 木のせん断

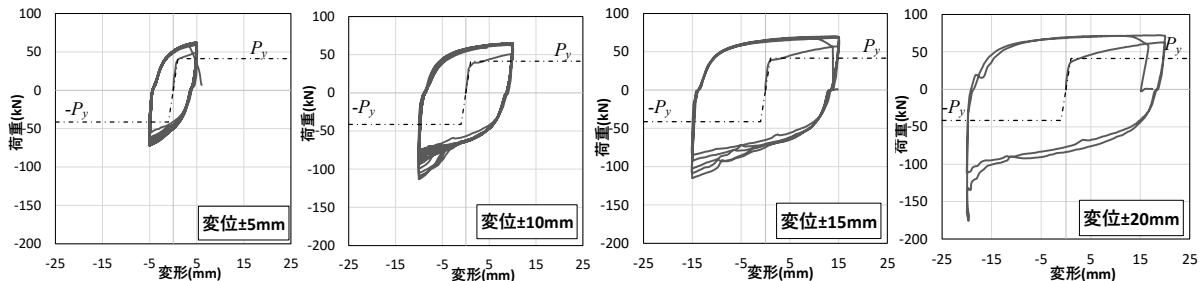


図 6 荷重-変位関係

### 3.2.1 試験体

パイプ LSB の芯材フォークエンド側転造ねじ長さ、短輪の有無と長さをパラメータとして、各仕様 1 体ずつ試験を行った。図 7 に芯材フォークエンド側転造ねじ長さのパラメータ概要図を示す。変位計測位置を加えた試験体姿図を図 8 に示し、相対変位を計測する。ブレース木材は断面寸法  $120\times120\text{mm}$  の欧洲アカマツ集成材 (E95-F315) とし、長さ  $3,500\text{mm}$  とした。木材の比重 (孔等欠損考慮なし) は  $0.499$  ( $c.v.=0.052$ )、含水率は  $9.05\%$  ( $c.v.=0.048$ ) であった。パイプ LSB はブレース両端に 1 つずつ設置した。ブレースのピン間距離は  $3,730\text{mm}$  でとし、パラメータ一覧を表 2 に示す。3.2 節は P2LB を用いた。

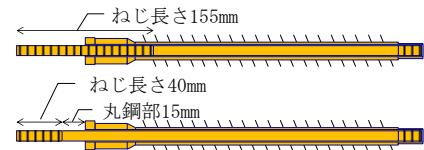


図 7 芯材フォークエンド側転造ねじ長さ概要図

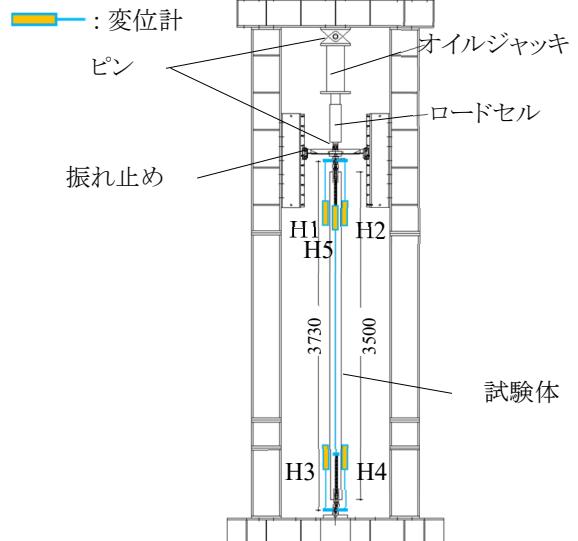
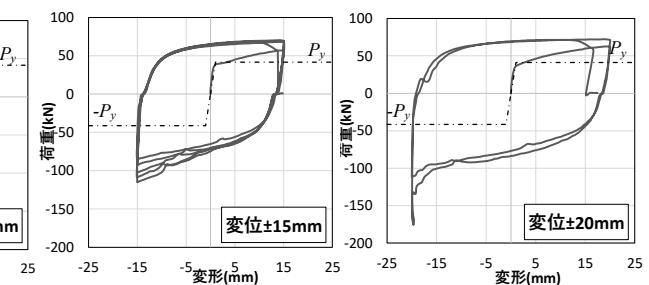


図 8 試験体概要図

表 2 パラメーター一覧

試験体名	芯材フォークエンド側 転造ねじ長さ	短輪
POLA	155mm	なし
P2LA	155mm	あり、長さ $20\text{mm}$
P5LA	155mm	あり、長さ $50\text{mm}$
P2LB	40mm	あり、長さ $20\text{mm}$



### 3.2.2 試験方法

試験はロの字型の試験架台を用いて、ロードセルを介しオイルジャッキ先端と根元をピンとし、鉛直方向に加力した。試験体上下部を  $\phi 17.8$  のピン

(SNR490B 材、基材  $\phi 20.2\text{mm}$ ) で固定した。LM ガイド等を振れ止めとした。オイルジャッキに近い方から「上パイプ LSB」「下パイプ LSB」と呼ぶ。

載荷方法は 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20mm の正負繰返し載荷(引張を正、圧縮を負)の圧縮からとし、変形制御は上パイプ LSB 変形  $\delta_{\text{上LSB}}$  で行い、試験中に  $\delta_{\text{上LSB}}$  と下パイプ LSB 変形  $\delta_{\text{下LSB}}$  の差が大きくなれば、上下パイプ LSB 変形平均  $\delta_{\text{LSB平均}}$  で制御を行った。最終変形は 20mm 又は木材・パイプ LSB の破損までとした。パイプ LSB の変形  $\delta_{\text{上LSB}}$  を式(7),  $\delta_{\text{下LSB}}$  を式(8),  $\delta_{\text{LSB平均}}$  を式(9)で算出する。

$$\delta_{\text{上LSB}} = (H_1 + H_2)/2 \quad (7)$$

$$\delta_{\text{下LSB}} = (H_3 + H_4)/2 \quad (8)$$

$$\delta_{\text{LSB平均}} = (\delta_{\text{上LSB}} + \delta_{\text{下LSB}})/2 \quad (9)$$

### 3.2.3 想定最大荷重

想定最大荷重は①圧縮側はプレース全体が座屈する荷重、②引張側はパイプ LSB の芯材が破断する荷重である。①は、座屈長さをプレースのピン間距離 3,730mm とし(細長比  $\lambda=107$ )、木材ヤング係数  $E=9,500\text{N/mm}^2$  とオイラー座屈公式より、想定荷重は 116.5kN となる。②は芯材断面  $115\text{mm}^2$  と 2.4 節  $\sigma_u=555\text{ N/mm}^2$  より破断荷重 63.8kN となる。

### 3.2.4 試験結果

試験時の荷重-変形関係と 3.2.3 項各荷重を図 9 に示す。一点鎖線傾きは  $K=40.7\text{kN/mm}$ (欧州アカマツ)を用いた。表 3 に各試験体の最大荷重、破壊状況、剛性(試験開始から  $\pm 1\text{mm}$  変形までを最小二乗法で算定)、P2LB 時の降伏耐力(初期剛性に対し接合径  $\phi 12.56\text{mm}$  の 5% 平行移動した直線と荷重変形曲線の交点<sup>11)</sup>)を示す。試験後の試験体を写真 2 に示す。

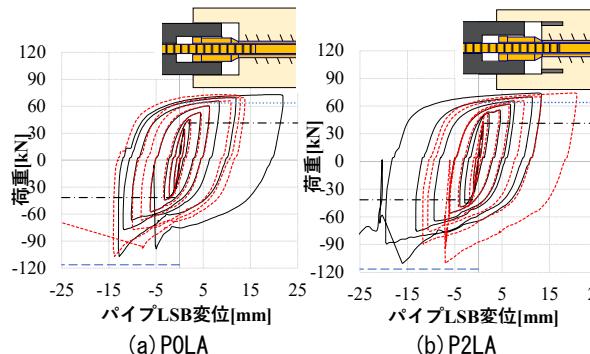


図 9 荷重-変位関係

表 3 より、短輪無しで木材端部が割裂し、短輪ありの P2LA, P5LA, P2LB は割裂しなかった。また P2LA と P5LA の破壊状況は類似しており、短輪は 20mm 以上あれば、木材端部の割裂防止になる。

POLA は木材端部で割裂したが、図 9(a) より最大荷重がオイラー座屈荷重より低く、プレース全体の座屈ではなく、パイプ LSB 曲がり(写真 2(a))と、木材端部割裂が先行したと考えられる。

図 9(a), (b), (c) では、圧縮時 15mm 付近で荷重が急激に上昇した。これは図 10 のように芯材のフォークエンド側の転造ねじ部が圧縮されて膨らみ、パイプ LS と膨らみが干渉したためだと考えられる。

表 3 最大荷重と破壊形状

試験体	最大荷重 [kN]	圧縮時 降伏荷重 [kN]		初期剛性 [kN/mm]		破壊状況 (載荷方向)	
		上パイプ LSB	下パイプ LSB	パイプ LSB	木材		
POLA	-107.0	-	26.6	27.8	全体曲げ (圧縮)	端部割裂 (圧縮)	
P2LA	-110.0	-	28.8	28.8	-	パイプ LS 切削ねじ部 木のせん断 (圧縮)	
P5LA	-120.9	-	27.7	28.4	-	パイプ LS 切削ねじ部 木のせん断 (圧縮)	
P2LB	-109.8	40.9 41.2	27.7	26.6	芯材軸部 破断 (引張)	-	

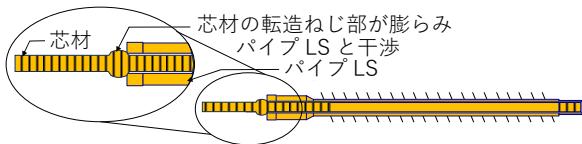
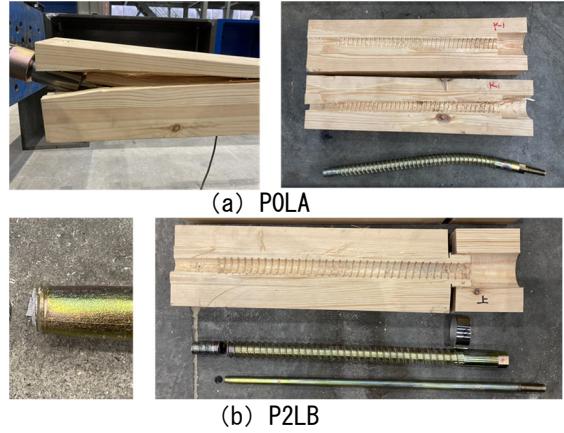


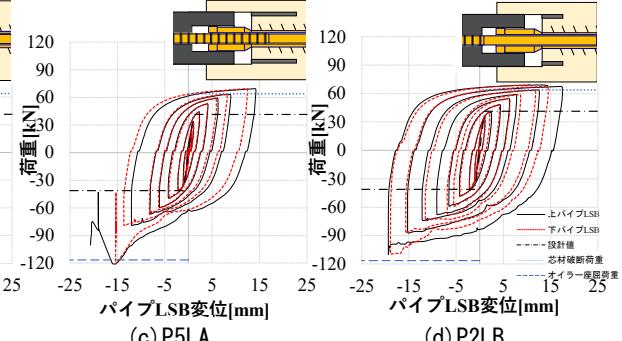
図 10 破壊状況イメージ



(a) POLA

(b) P2LB

写真 2 破壊状況



P2LB は図 9(d) より、他試験体より安定した履歴であり、変位 20mm まで試験が実施できた。P2LB はパイプ LSB ねじ部がパイプ LS に覆われておらず、圧縮側で芯材フォークエンド側の転造ねじ部が圧縮されて膨らむ現象が、パイプ LS の六角頭から離れた位置となり、膨らみとパイプ LS が干渉しにくかったためだと考えている。

P2LB は図 9(d) より最大引張荷重は 70kN 程度と、2.3 節のパイプ LS 最大引張耐力  $P_{Lmax}=78.5kN$  (欧州アカツ) より小さく、芯材破断荷重 63.8kN より大きいことから、芯材で変形し、鋼材破断となった。

引張側の破壊は単純な鋼材引張で決定するため、 $P_y$ との比較は省く。圧縮側の P2LB 試験時降伏耐力は  $P_y=41.4kN$  (表 3) の 99.4% と 98.7% であり、ほぼ同値であった。したがって引張側と圧縮側の両方で  $P_y$  の算定式(5)は有効と考えられる。 $P_y$  は  $\sigma_y$  で算定しており、設計時の降伏耐力は設計基準強度  $F$  を用いれば安全設計が可能である。ただし圧縮側では引張側より荷重が大きく、周辺部材は耐力上昇を考慮した設計が必要である。

表 3 より接合部剛性  $K$  より試験の剛性は 3 割ほど低い。これは 3.1 節では影響を無視できたが、プレース形状では初期剛性にフォークエンドのピンと孔の隙間が影響したと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、地震エネルギー吸収可能な紡錘型履歴特性を持つ、座屈拘束プレースのラグスクリューボルト型接合（以下 LSB 型接合）とその設計手法を考案した。LSB 型接合に用いるパイプ LSB は芯材に丸鋼を用い、座屈補剛材を鋼管と木材とした。考案した接合部について、試験を行い性能検証した。主要な成果を以下に要約する。

##### (1) パイプ LSB を用いた接合部の提案

パイプラグスクリュー内に丸鋼芯材を挿入し、片側を固定したパイプ LSB は紡錘形履歴特性を有する。長さ 20mm の短輪を設置し、芯材ねじ長さ 40mm としたパイプ LSB は終局が鋼材破断であり、木のばらつきに大きく影響を受けない。ピン接合のため斜材角度は調整できる。パイプ LSB は木ねじとして木材端部に設置するため、斜材長さは木材長さで容易に調整できる。パイプ LSB は事前準備ができ、部材調達の時間短縮が可能である。

##### (2) 短輪の木材割裂防止

長さ 20mm 以上の短輪を設置することで、木材端部の割裂を防止することができる。

(3) パイプ LSB 芯材フォークエンド側転造ねじ長さ  
芯材が降伏時にねじ部が膨らむことにより鋼管内部で摩擦による荷重上昇があるため、ねじ部をパイプ外にする必要がある。

##### (4) パイプ LSB を用いた接合部の設計

水平荷重に対する設計耐力は、芯材  $F$  値を用いた芯材の降伏荷重で設計することで、安全側の設計となる（接合部にとっては危険側）。

#### 参考文献

- 1) 木造軸組工法による中大規模木造建築物の設計指針編集委員会：木造軸組工法中大規模建築物の許容応力度設計（2024 年版），日本住宅・木材技術センター，2024.
- 2) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計改訂委員会：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) (一財) 日本木造住宅産業協会技術開発委員会：木造軸組工法による高耐力耐力壁（木住協仕様）活用マニュアル第 2 版，一般財団法人日本木造住宅産業協会，2020.
- 4) 梅森浩, 相馬智明, 森田仁彦, 坂口裕美, 島村高平, 米本和央, 斎藤泰輝：見えがかり配慮型接合金物を用いた CLT 耐力壁の開発 その 1 各接合部の性能試験，日本建築学会学術講演梗概集(東北), 構造III, pp.453-454, 2018.7
- 5) 相馬智明, 森田仁彦, 坂口裕美, 島村高平, 梅森浩：見えがかり配慮型接合金物を用いた CLT 耐力壁の開発 その 2 面内せん断試験，日本建築学会学術講演梗概集(東北), 構造III, pp.455-456, 2018.7
- 6) 中村卓也, 渋谷洋明, 大木利文：座屈拘束プレースを用いた木造住宅耐震要素の研究（その 1, その 2），日本建築学会学術講演梗概集 C-1, pp.301-304, 2001.9
- 7) 藤井俊二, 田川浩：丸鋼芯材を二重鋼管により座屈拘束したプレースに関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，第 650 号, pp.879-885, 2010.4
- 8) 藤井俊二, 田川浩：丸鋼芯材を二重鋼管により座屈拘束したプレースの挙動特性，日本建築学会技術報告集，第 659 号, pp.167-174, 2011.1
- 9) 門馬寛之, 手塚純一, 蒲池健, 安藤直人：アラミド繊維シートを用いた木質梁の補強方法の提案と検証，日本建築学会学術講演梗概集 C-1, pp.35-36, 2009.7
- 10) ラグスクリューボルト研究会：ラグスクリューボルト接合設計マニュアル(ver.2.0), ラグスクリューボルト研究会, 2015.
- 11) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説・許容応力度・許容耐力設計法-, 丸善, 第 4 版, 2006.

#### 執筆者紹介



辻 千佳  
修士（工学）

##### ひとこと

これまでに積み重ねられた技術を大切にしつつ、時代の流れに取り残されないよう、“この時代”が求める技術を提供するため、至誠を尽くし日々の開発を行っていきます。