

(48) 鋼構造オフィスビル床・壁の木質化へ 向けた接合部開発に関する研究

倉富 洋¹・堺 純一²・稲田 達夫³

1正会員 福岡大学助教 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)
E-mail : ykuratomi@fukuoka-u.ac.jp

2正会員 福岡大学教授 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)
E-mail : sakaij@fukuoka-u.ac.jp

3正会員 山佐木材株式会社顧問 (〒893-1206 鹿児島県肝属郡肝付町前田2090)
E-mail : inada@woodist.co.jp

現在のわが国では、戦後植林された人工林が木質材料として使用可能となり、国産木材の需要拡大が求められている。本研究では、非住宅を対象とした柱梁鉄骨造の床・壁を木質化するにあたり、鉄骨部材と木質部材間の汎用性の高い接合部開発を意図して、ラグスクリーボルト（以下、LSBと略記）を使用した新しい接合方法を開発する。本接合方法におけるせん断性状の把握および合理的な設計手法の構築のため、LSBと六角ボルトを用いて接合した鋼と木の押抜きせん断実験を実施した。実験より得られた荷重－変形関係と本接合部の降伏せん断耐力の評価手法を提案し、本接合部の評価式の妥当性について述べる。

Key Words : Cross laminated timber, Lag screw bolt, Shear strength, European yield theory

1. 序

著者らは、鋼構造オフィスビルなどの柱梁鉄骨造の床に、直交集成板（クロス・ラミネイティド・ティンバー、CLTと略記）を使用する構法を提案し、主に鉄骨梁とCLT床の接合方法について検討を重ねている¹⁾。既往の研究では、図-1に示すような頭無しスタッドとエポキシ樹脂にて鉄骨梁とCLT床を接合する方法を提案するとともに、本接合方法における施工性確認試験を実施し、実物件への適用もなされている。

本接合方法の施工手順を説明すると以下の通りとなる。まず、鉄骨梁の上フランジに頭無しスタッドを溶接し、CLTには工場にて所定の位置に頭無しスタッド軸径の二倍の貫通孔を設けておく。なお、CLTに設ける貫通孔径を頭無しスタッド軸径の二倍としたのは、施工性を考慮してのことである。その後、現場にてCLT床を鉄骨梁に落とし込み、頭無しスタッドと貫通孔の隙間をエポキシ樹脂にて充填することで一体化を図るものである。通常、コンクリートスラブでは頭つきスタッドが使用されるが、本接合方法ではCLT床を設置する際にスタッド頭部が干渉することを避けるため、頭無しスタッドを使用することを意図している。文献2)では、H形鋼とCLT

からなる試験体による押抜きせん断実験を実施し、本接合方法でせん断応力を伝達することができることを明らかにした。

一方、本接合方法では、エポキシ樹脂を使用することによるコスト高や使用温度の上下限など接着剤の施工環境に制限があるなど、改良の余地が残されている。そこで著者らは、図-2に示すようなラグスクリーボルト（以下、LSBを略記）と六角ボルトを用いることで鉄骨梁とCLT床を接合できる機械式接合を提案した³⁾。メネジ加工されたLSBは、従来は引抜き力に対して抵抗させるものであり、せん断力に対して抵抗させた例は少ない。加えて、従来のLSBでは、CLTに打ち込む際に座掘りが生じ、LSBにせん断抵抗を期待させると、LSB頭部に局部的に曲げ変形が集中し、早期に剛性および耐力が低下する傾向にあった。そこで著者らは、座掘りが生じないLSBを開発することで、上述した課題を解決できるものと考えた⁴⁾。LSBを使用する利点は、貫通孔を設けられずにエポキシ樹脂の充填が困難となる鉄骨梁とCLT壁などの接合部にも適用できるものと考えられる。本研究では、LSBと六角ボルトによって接合した鋼材とCLTの押抜きせん断実験を実施し、LSBをせん断抵抗させた際の挙動を調べることを目的とする。本論文は文献

3)に加筆修正を行なったものである。

2 実験計画

試験体詳細を図-3に示す。試験体は梁材を想定したH形鋼を中央に、床材を想定したCLTを両側に配置した。CLTには、予め谷径25mm（山径30mm）、長さ150mmのLSB（SNR490B）を打ち込んでおき、H形鋼フランジには所定の位置に直径20mmの孔を設けた。なお、LSBには首下長さ45mmの六角ボルトM16（強度区分6.8）が接続できるようにメネジ加工が施されている。試験体の組み立

ては、寝かせた状態で片側ずつCLTを取り付け、その後に直立させて水平面を確保した。H形鋼とCLTを六角ボルトで接合する際にはトルクレンチを用い、一次締め付けはトルク値100N・mで、本締めはトルク値230N・mで締め付けた。H形鋼にはH-200×200×8×12(SS400鋼材)を、CLTにはスギMx60-5-7を、それぞれ使用した。同図中のCLTには、荷重に対して繊維直交方向となるラミナに斜線を記入している。試験体一覧を表-1に示す。実験変数にはLSBの打ち込む方向を選定し、外力の作用する方向に対して繊維方向が主となる試験体（図-3(a)参照）と、繊維直交方向が主となる試験体（図-3(b)参照）の二種類とした。各条件において試験体は6体ずつ製作し、うち3体

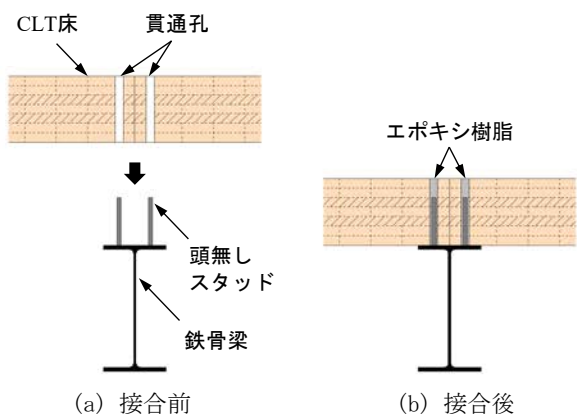


図-1 頭無しスタッドによる接合

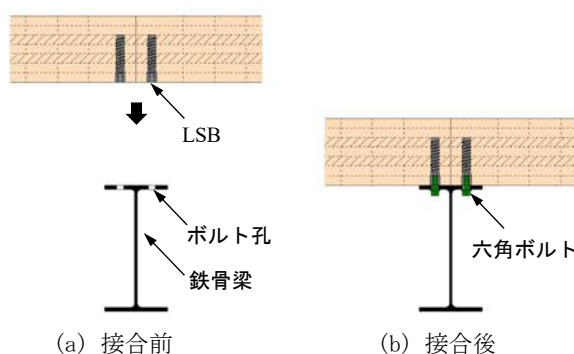


図-2 LSBによる接合

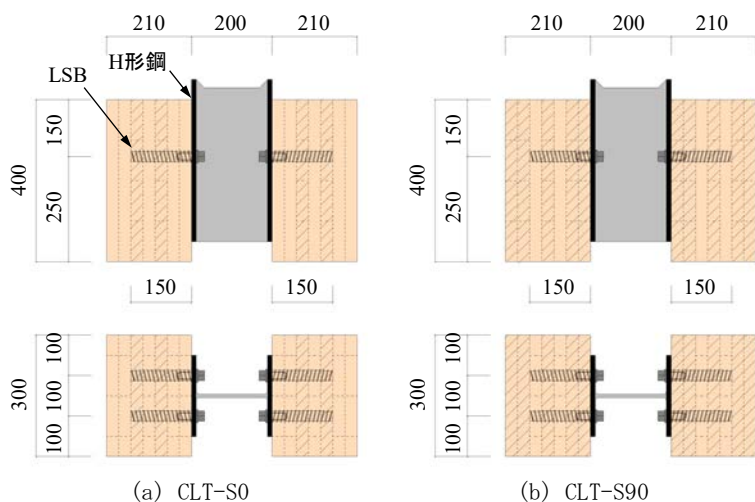


図-3 試験体詳細

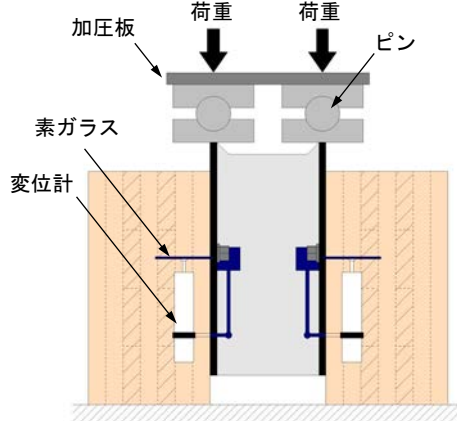


図-4 荷重方法

表-1 試験体一覧

試験体名	CLT	LSB (mm)	六角ボルト (mm)	LSB打ち込み方向	潤滑剤
CLT-S0-1~3	Mx60-5-7	φ25×150	M16×45	繊維方向	無
CLT-S0-4~6					有
CLT-S90-1~3				繊維直交方向	無
CLT-S90-4~6					有

は試験体組み立て時に六角ボルト軸部に潤滑剤を塗布した。

図-4に載荷装置を示す。載荷時は両端フランジにピンを設置し、加圧板を介して一方向に単調に加力した。変位はH形鋼とCLTの相対ずれ変位を、四箇所を設置した変位計により計測した。

3. 実験結果

図-5に実験後の試験体を示す。同図(a), (b)より、LSBがCLTにめり込まれた様子が観察できる。試験体CLT-S90は表層が繊維直交方向であるため、LSB打ち込み位置の水平方向に割れが確認された。CLTから抜き出したLSBの様子を同図(c)に示す。いずれの試験体においても、LSBは曲げ変形が観察された。本研究で使用したLSBは前述した通りCLT側に座掘りが生じないため、加力初期の段階からCLTに密着した状態で支圧抵抗が可能となる。接続用の六角ボルトは頭部付近から大きく曲がり、試験体によっては軸部破断したボルトも見られた。ただし、六角ボルトの破断が見られたのは変形量にして20mm以降であり、破断までは靱性に富んだ挙動を示した。

実験から得られた荷重-変形関係を図-6に示す。横軸

は設置した四本の変位計の平均値である。実線は潤滑剤を塗布した試験体、点線は塗布していない試験体である。潤滑剤の有無による違いは変形5mmまでの領域で顕著に見られ、潤滑剤有りの試験体の方が大きな剛性を発揮している。これは、潤滑剤を六角ボルトに塗布することでトルク係数値のばらつきが小さくなり、安定して所定の張力を与えることができたためだと考えられる。潤滑剤の有無が導入張力に及ぼす影響は、今後詳細に検討する必要があるものと考えられる。

図-6(a), (b)より、試験体CLT-S0とCLT-S90を比較すると、最大耐力は試験体CLT-S0の方が大きく発揮されている。使用するCLTの繊維方向層の多寡によって挙動が異なることはLSBを用いた本接合方法でも同様である。なお、本実験では載荷装置との関係から変形量30mmを目安に実験を終了したが、荷重は実験終了時でも上昇を続けていた。

4. 実験値と耐力評価式の検討

本接合方法における降伏せん断耐力を評価するため、ヨーロッパ型降伏理論（以下、EYT式と略記）により検討を行なった。本実験では木質材料にCLTを使用しているため、ラミナ構成に応じて繊維方向および繊維直交方

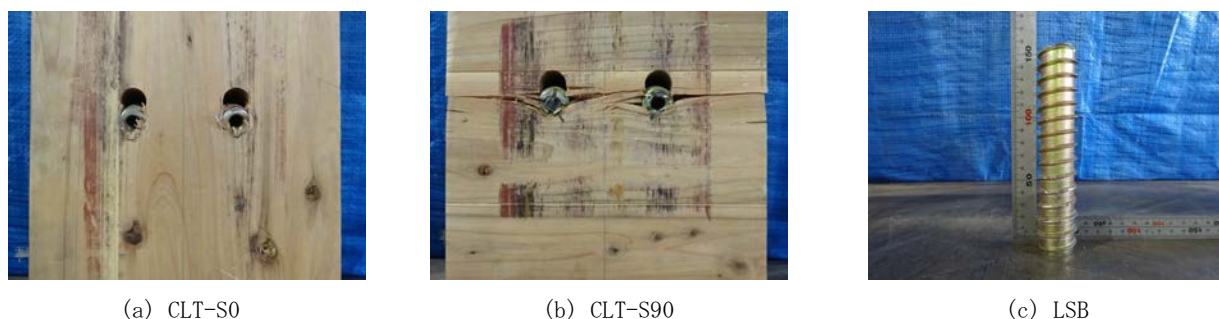


図-5 実験終了後の写真

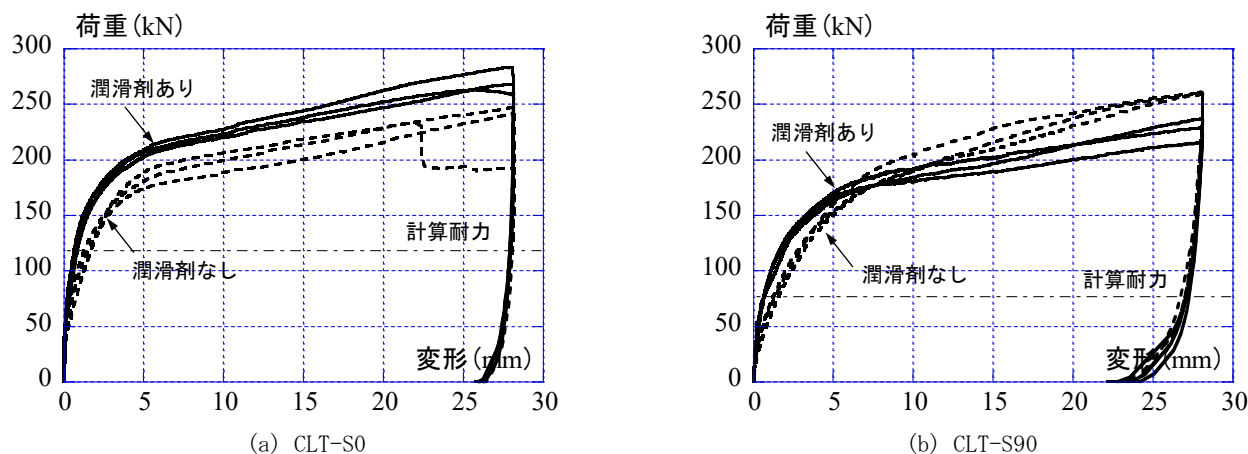


図-6 荷重-変形関係

向の影響を考慮して算定する必要がある。木質構造設計基準・同解説⁵⁾では、木材の主材と鋼板添え板からなる一面せん断接合において降伏モードを三つに分類している。本論におけるCLTは5層7プライを使用しており、その内の5プライ目までLSBが埋め込まれている。本論で想定される降伏モードの模式図を図-7に示す。接合具端部に一箇所の塑性ヒンジが生じる降伏Mode 3では、回転中心の位置によって5種類 (Mode 3a~3e) に場合分けすることができる。同様に、接合具に二箇所の塑性ヒンジが生じる降伏Mode 4では、塑性ヒンジの位置に応じて5種類 (Mode 4a~4e) に場合分けを行なった。

本接合部を木材の主材と鋼板添え板からなる一面せん断接合とし、式(1)で降伏せん断耐力 p_y を算定する。なお、計算の簡易化のために、LSBは直径25mmの棒鋼に置換した。

$$p_y = C \cdot F_e \cdot d \cdot l \quad (1)$$

ここで、 C : 接合係数、 F_e : 主材の基準支圧強度、 d :

頭無しスタッドの軸径、 l : LSBの長さである。なお、LSBの降伏応力度は基準強度である 325N/mm^2 とした。

鋼板側から、ラミナの番号を L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 とおき、それぞれのラミナの板厚および支圧強度を、 $t_1, f_1, t_2, f_2, t_3, f_3, t_4, f_4, t_5, f_5$ とする。ここで、本研究で使用しているLSBの長さは $l=150\text{mm}$ であることから、式(2)の条件を用いる。

$$t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = \frac{1}{5} l \quad (2)$$

また、図-7中、斜線が入っているラミナは加力方向に対して繊維直交方向となる層を示している。繊維平行層および繊維直交層の支圧強度を代入できるようにするため、図-7(a)の条件では式(3)を、図-7(b)の条件では式(4)をおく。

$$f_1 = f_2 = f_4 = F_e, \quad f_3 = f_5 = \alpha \cdot F_e \quad (3)$$

$$f_3 = f_5 = F_e, \quad f_1 = f_2 = f_4 = \alpha \cdot F_e \quad (4)$$

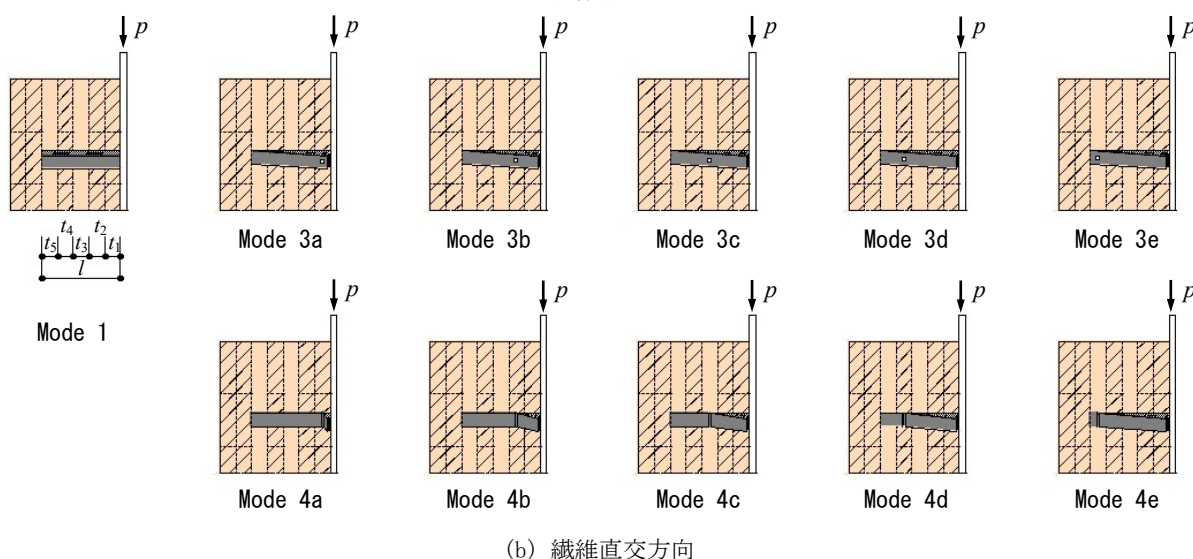
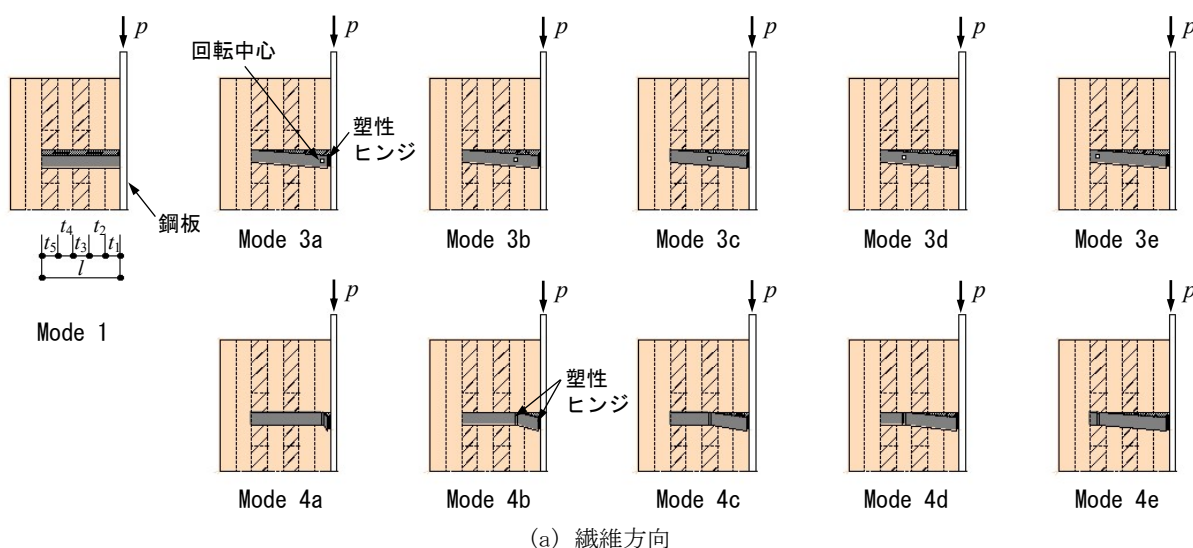


図-7 想定される降伏モード

ここで、 α ：繊維直交方向に対する繊維方向の基準支圧強度の比である。

軸方向力と曲げモーメントの力のつり合いにより、各モードにおける接合係数 C を算定する。なお、文献(6)では5層5プライのCLTに対してモードごとにおける応力分布およびつり合い式が示されており、本論では同文献を参考として図-7に示す各モードの応力分布を仮定した。接合係数 C の算定式を表-2に示す。なお、接合係数 C は、各モードのうち最も小さい数値を降伏モードとして式(1)に代入する。

ここでは、基準支圧強度を要素試験用として切り出したラミナの5%下限値の比重から算出した(表-3参照)。繊維方向および繊維直交方向の基準支圧強度は、式(5)と式(6)で評価する⁹⁾。

$$F_e = 82 (1 - 0.01d) r \quad (5)$$

$$F_{e90} = 0.5 F_e \quad (6)$$

ここで、 F_{e90} ：繊維直交方向の基準支圧強度、 r ：5%下限値によるラミナの比重である。

CLTとしての基準支圧強度は、式(5)と式(6)より、 $F_0=19.0\text{N/mm}^2$ 、 $F_{90}=9.5\text{N/mm}^2$ の値が得られたため、これを試験体条件に応じて式(1)で算定すると、試験体CLT-S0で29.5kN、試験体CLT-S90で19.1kNの値を得る。上記の数値を用いて求めた計算耐力を表-3に示すとともに、図-6中にも破線で記載した。なお、同表中の $calp_y$ は式(1)で算出した p_y をLSB本数分として四倍した値である。計算耐力の算出より、降伏モードはいずれの試験体もMode 3と判別された。図-5(c)に示した実験後のLSBと比較すると、概ね計算値による評価に沿った降伏モード (Mode 3) の変形を示している。

表-3に、荷重-変形関係の曲線と計算耐力の交点である変形量を示している。潤滑剤を塗布した試験体CLT-S0の、計算耐力を発揮するときの変形量は0.66mm～0.87mmである。一方、潤滑剤を塗布しないと変形量は1.29mm～1.72mmとなり、およそ二倍ほど大きな変形量で計算耐力を発揮することになる。試験体CLT-S90でも同様な傾向が見られた。加力方向において繊維直交層が主となる試験体CLT-S90では、試験体CLT-S0に対して計算耐力発揮時の変形量が大きくなるため、接合部位に要求される性能と照合して変形量を定めることが重要で

表-2 接合係数 C の算定

Mode	繊維方向	繊維直交方向
Mode 1	$\frac{1}{5} (3 + 2\alpha)$	$\frac{1}{5} (2 + 3\alpha)$
Mode 3a	$\frac{1}{5} \{ -3 - 2\alpha + \sqrt{2(11 + 14\alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ -3\alpha - 2 + \sqrt{2\alpha(11\alpha + 14) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 3b	$\frac{1}{5} \{ -3 - 2\alpha + \sqrt{2(11 + 14\alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ -3\alpha - 2 + \sqrt{2\alpha(11\alpha + 14) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 3c	$\frac{1}{5} \{ -6\alpha + 1 + \sqrt{2\alpha(22\alpha + 3) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ \alpha - 6 + \sqrt{2(22 + 3\alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 3d	$\frac{1}{5} \{ -5 + \sqrt{2(21 + 4\alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ -5\alpha + \sqrt{2\alpha(4 + 21\alpha) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 3e	$\frac{1}{5} \{ -8\alpha + 3 + \sqrt{72\alpha^2 - 22\alpha + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ 3\alpha - 8 + \sqrt{72 - 22\alpha + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 4a	$\frac{d}{l} \sqrt{\frac{2}{3} \gamma}$	$\frac{d}{l} \sqrt{\frac{2}{3} \alpha \gamma}$
Mode 4b	$\frac{d}{l} \sqrt{\frac{2}{3} \gamma}$	$\frac{d}{l} \sqrt{\frac{2}{3} \alpha \gamma}$
Mode 4c	$\frac{1}{5} \{ 2(1 - \alpha) + \sqrt{4\alpha(\alpha - 1) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ 2(\alpha - 1) + \sqrt{4(1 - \alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 4d	$\frac{1}{5} \{ (\alpha - 1) + \sqrt{5(1 - \alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ 1 - \alpha + \sqrt{5\alpha(\alpha - 1) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$
Mode 4e	$\frac{1}{5} \{ 3(1 - \alpha) + \sqrt{11\alpha(\alpha - 1) + \frac{50}{3} \alpha (d/l)^2 \gamma} \}$	$\frac{1}{5} \{ 3(\alpha - 1) + \sqrt{11(1 - \alpha) + \frac{50}{3} (d/l)^2 \gamma} \}$

表-3 主要な実験結果

試験体名	$exp P_{max}$ (kN)	$exp \delta_{max}$ (mm)	$cal P_y$ (kN)	降伏モード	δ_y (mm)	潤滑剤	比重 (変動係数)
CLT-S0-1	232	21.9	118	Mode 3d	1.72	無	0.309 t/m ³ (8.3%)
CLT-S0-2	247	28.1			1.29		
CLT-S0-3	242	28.1			1.51		
CLT-S0-4	283	28.1			0.66	有	
CLT-S0-5	262	25.7			0.87		
CLT-S0-6	268	28.1			0.82		
CLT-S90-1	261	28.0	77	Mode 3a (3b)	1.60	無	
CLT-S90-2	259	28.0			1.27		
CLT-S90-3	260	28.1			1.40		
CLT-S90-4	216	28.1			0.69	有	
CLT-S90-5	228	28.1			0.70		
CLT-S90-6	237	28.1			0.67		

※ $exp P_{max}$: 実験の最大耐力, $exp \delta_{max}$: 最大耐力発揮時の変形, $cal P_y$: 降伏せん断耐力, δ_y : $cal P_y$ 発揮時の変形

あると考えられる。

4. 結論

鉄骨梁とCLT床の接合として、LSBと六角ボルトによる方法を検討した。CLTの加力方向および六角ボルトへの潤滑剤の有無を実験変数として載荷実験を実施したところ、以下の知見を得た。

- 1) 実験変数の違いに拘らず、いずれの試験体も靱性に富んだ荷重-変形曲線を描いた。破壊性状はLSBのCLTへのめり込みであり、LSBには曲げ変形が生じた。変形が20mmを超えると、六角ボルトが破断した試験体も見られた。
- 2) 本接合部の降伏せん断耐力評価式として既存のEYT式をCLTに適用できる評価式を提案した。降伏モードに応じて軸力と曲げモーメントのつり合いから接合係数を計算できる計算式を得た。
- 3) 評価式から求めた降伏せん断耐力と実験で得られた荷重-変形関係を比較すると、潤滑剤を塗布した際に計算耐力を発揮するときの変形量は、試験体CLT-S0で0.66~0.87、試験体CLT-S90で0.67~0.70であった。
- 4) 潤滑油の有無による影響が荷重-変形関係において観察された。潤滑剤を塗布することで初期剛性が向上し、計算耐力発揮時の変形量も小さく抑えられる。

(課題番号20K14878, 研究代表: 倉富洋) の助成を受けた。本実験の実施に当たり、福岡大学工学部建築学科技術職員の石橋宏一郎氏と大野敦弘氏、ならびに林田和也氏をはじめとする2020年度同学科倉富研究室の卒研究生の協力を得た。また、株式会社トーネジの岡部純氏および岡部昭氏に貴重な助言をいただいた。

参考文献

- 1) 稲田達夫, 藤井秀行, 森宗二郎, 工藤僚恭, 倉富洋: 柱梁S造・床木質 (CLT) 構造システムの開発-その1 開発の主旨及び超高層オフィスへの適用に拘る理由について-, 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号, pp.709-712, 2015.3
- 2) 倉富洋, 堀純一, 稲田達夫: 頭無しスタッドとエポキシ樹脂で接合した鉄骨梁とCLT床の耐力評価に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, pp.453-462, 2021.3
- 3) 倉富洋, 堀純一, 稲田達夫: メネジ加工したLSBで接合した鉄骨梁とCLT床のせん断性能, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.533-536, 第60号, 2021.3
- 4) 岡部純: 木・鋼ハイブリッドの締結, 鉄構技術, Vo.32, No.378, pp.48-49, 2019.11
- 5) 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-, 2006.12
- 6) 中島昌一, 北守顕久, 小松幸平: クロス・ラミネイティド・ティンバーを用いた鋼板挿入型ドリフトピン接合部の引張加力下の耐力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第78号, 第687号, pp.969-975, 2013.5

謝辞: 本研究は2020年度科学研究費助成事業・若手研究

(Received September 10, 2021)

STUDY ON DEVELOPMENT OF THE STRUCTURAL SYSTEM WITH STEEL FRAME AND WOODEN MEMBERS

Yo KURATOMI, Junichi SAKAI and Tatsuo INADA

The authors propose to replace a reinforced concrete slab with a cross-laminated timber (CLT) floor panel as a method to increase the use of timber in moderate- or large-scale buildings. The CLT members and steel beam are joined by lag-screw-bolts without the epoxy adhesive as a new connection method. A push-out shear test was carried out in order to investigate the shear performance of the proposed connection method. The yield shear strength calculated based on European yield theory was in good agreement with the shear strength at the yield point in the shear test.