

# 鋼-木接着接合の力学的性能に関する実験

## Experiments on the Mechanical Performance of Steel-to-Timber Adhesively-Bonded Joints

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 林 順平

### Abstract

In recent years, the use of timber in buildings has been promoted as a national policy. Adhesive bonding is expected to be a new method for steel-timber connections. This study conducted experiments using full-scale and small-scale specimens to evaluate the mechanical performance of steel-timber adhesive bonding under different stress conditions. The results showed that timber failure occurred before adhesive failure in all tests. When combined stresses acted on the adhesive interface, joint strength decreased under tensile stress and increased under compressive stress.

**Keywords:** Adhesive Bonding, Steel-Timber Hybrid, Cross-Laminated-Timber, Composite Beam

### 1. 背景と目的

近年、建築分野における木材利用の拡大が国策として進められている<sup>1)</sup>。中大規模建築においては、鋼構造等と木材を組み合わせたハイブリッド構造が現実的な選択肢であり、異種材料間の接合が重要な課題となる。鋼材と木材の接合には、ビス、ボルト、ドリフトピン等を用いた機械的接合が主に用いられているが<sup>2)</sup>、新たな接合方法として接着接合に期待できる。接着接合は面接合であるため、木材が不利となりやすい応力集中を緩和できるほか、設計の自由度が高まるという利点を有する<sup>3)</sup>。そこで本研究では、鋼-木接着接合の実用化に向けた基礎資料を提示する目的で、実大規模試験体および小試験体を用いた実験を行い、応力状態の違いが力学的性能に及ぼす影響を評価した。

### 2. 二面せん断試験

鋼-木接着接合のせん断強度を評価するため、小試験体による二面せん断試験を実施した。接着面に純せん断に近い応力を作用させるため、二枚の木継手板を介して荷重偏心を防ぐ試験体を構成した。

図1(a)に試験体の模式図を示す。母材には厚さ9mmのSS400鋼材を、接着剤にはコニシ株式会社製 鋼構造物用耐熱型エポキシ樹脂系接着剤ボンド E258R を使用した。木継手板には、後述の合成梁曲げ試験で使用した CLT の端材から切り出した厚さ30mmの木片を用いた。接着幅は50mm、接着長さは80, 160, 240mmの3種類をパラメータとし、それぞれ2体ずつ合計6体の試験体を単調引張载荷した。

図1(b)に荷重-変位関係を示す。すべての試験

体で、最大荷重に近づくにつれて徐々に木材が壊れる音が聞こえ、やがて大きな破壊音とともに急激に荷重がゼロまで低下する脆性的な破壊挙動を示した。接着面積あたりの最大荷重は、接着長さが長いほど小さくなる傾向を示した。

図2に破壊後の母材と木継手板の表面を示す。すべての試験体で木継手板の破壊が先行した。接着剤のせん断強度よりも木材のせん断強度が低いためと考えられる。図2(c)に示すように、鋼材に薄い木材層が付着していることから、破壊は接着面近傍の極めて薄い層で生じており、このような破壊モードは、鋼-木接着接合にせん断応力が作用した場合の典型的な破壊であると考えられる。

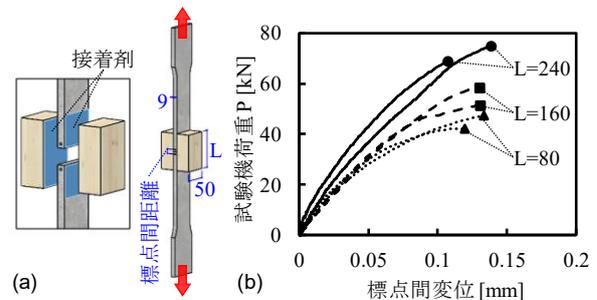


図1 二面せん断試験：  
(a) 試験体； (b) 荷重-変位関係

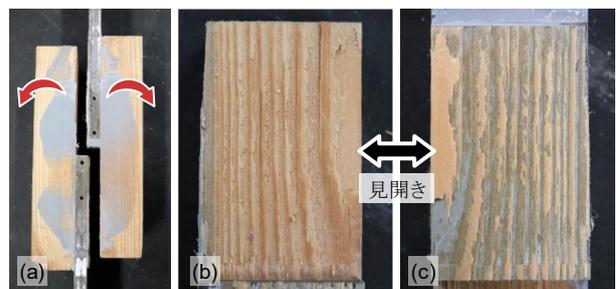


図2 破壊後の表面状態：  
(a) 破壊モード； (b) 木材側； (c) 鋼材側

### 3. 複合応力試験

接着面に作用する法線応力とせん断応力の連成が鋼-木接着接合の破壊に及ぼす影響を検証するため、小試験体による複合応力試験を実施した。荷重の作用線に対して接着面を傾斜させることで、接着面に法線応力とせん断応力が一定の割合で作用する試験体を構成した。

図3に試験体の模式図を示す。鋼材にはSS400鋼材を、接着剤には前述のエポキシ樹脂系接着剤E258Rを使用した。木材は、後述の合成梁曲げ試験で使用したCLTを再加工したものを用了。接着幅は50mm、接着長さは80mmで接着面積を一定とした上で、接着面の傾斜角度をパラメータとした。引張試験では0度、30度、45度、60度、90度、圧縮試験では30度、45度、60度、90度を対象とし、全9条件について各2体、計18体の試験体を単調荷重した。

図4に荷重装置を示す。圧縮試験では、試験体を支圧板で挟み、支圧板に対する水平変位を拘束した状態で荷重した。引張試験では、鋼材側は試験体に設けたφ=27mmの孔にボルトを通し、木材側は、試験面よりも広い面積で接着した治具を介して荷重した。

図5に法線応力-せん断応力平面上の破壊点を示す。60度の圧縮では、破壊時のせん断応力成分が、90度の圧縮よりも高く、圧縮応力とせん断応力の連成により耐力が上昇した。一方、60度の引張では、破壊時のせん断応力成分が90度の引張よりも低く、引張破壊が先行した。

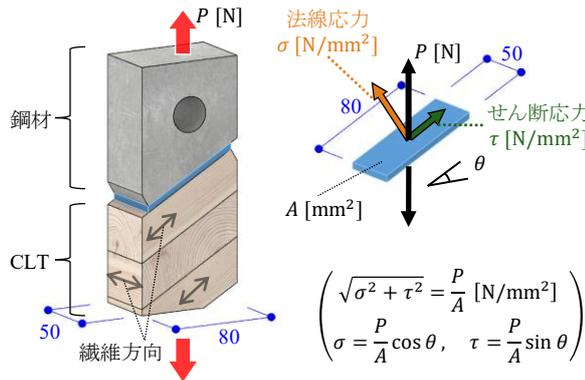


図3 複合応力試験 試験体

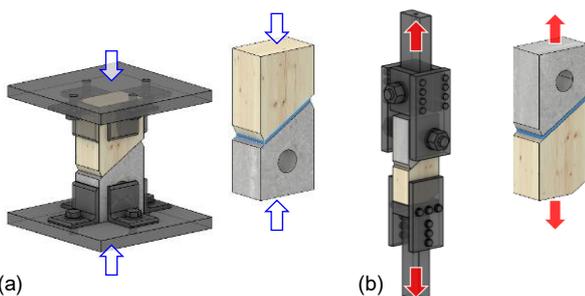


図4 荷重装置：(a) 圧縮試験；(b) 引張試験

図6に破壊モードを写真で示す。CLTのラミナ内部の木部破壊と、接着面に沿った接着近傍破壊に分類した。理論的にせん断応力のみが作用する90度の圧縮と引張では、二面せん断試験と同様の破壊モードを示した。0度の引張や30度の引張など引張応力の割合が高い条件では木部破壊が先行した。

### 4. 合成梁曲げ試験

鋼-木接着接合の性能を実大規模にて検証するため、鋼梁と木質床を接着接合した合成梁の三点曲げ試験を実施した。

図7(a)に試験体の模式図を示す。鋼梁にH-300×150×6.5×9 (SN400B)のH形鋼を、木質床にカラマツのCLT(3層3プライ同一等級構成、強度等級S120-3-3、含水量11%)を、接着剤に前述のエポキシ樹脂系接着剤E258Rを使用した。寸法も仕様も同一の試験体を、2種類の荷重方法により実験した。一つ目の荷重方法は、図7(b)に示すようにCLTの上から支圧して接着面を圧縮

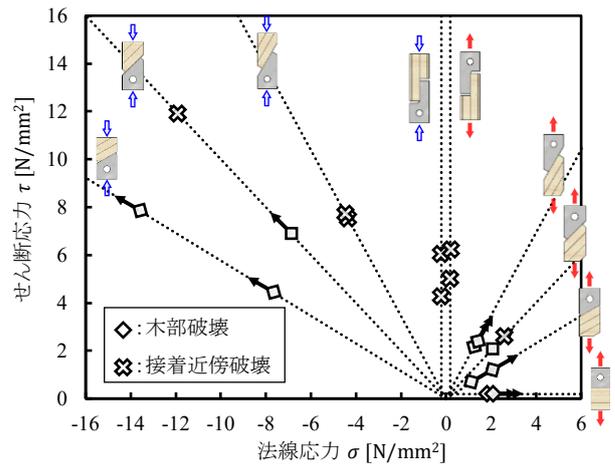
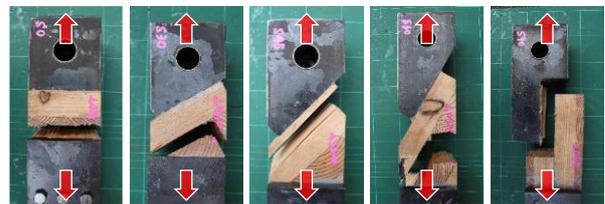
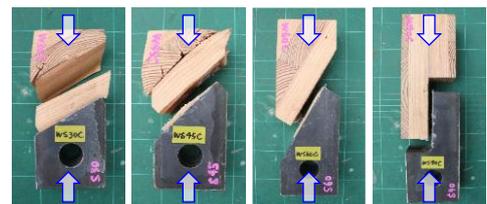


図5 法線応力-せん断応力平面上の破壊点分布



0度引張 木部 1.82  
30度引張 木部 1.32  
45度引張 接着近傍 3.65  
60度引張 木部 2.75  
90度引張 接着近傍 6.25



30度圧縮 木部 15.62  
45度圧縮 接着近傍 16.85  
60度圧縮 接着近傍 8.74  
90度圧縮 接着近傍 4.25

図6 破壊モード

した。二つ目の荷重方法は、図 7(c)に示す治具を用いて、鋼梁の下フランジを押しつけて接着面を引っ張った。北海道大学工学部 D 棟実験室の容量 500 kN アクチュエーターを用いて単調荷重した。

図 8 に、4 体の試験体について得た、試験機荷重  $P$  と荷重点のたわみ  $\Delta$  の関係を示す。参考値として、単純重ね梁と仮定した曲げ剛性  $k_s$ 、完全合成梁と仮定した曲げ剛性  $k_c$ 、純鋼梁の全塑性耐力  $P_s$ 、完全合成梁と仮定した全塑性耐力  $P_c$  を併せて示す。ただし、この計算に引張試験に基づく鋼材の降伏強度と、「CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル 2)」に基づく、機械等級区分 M120 の圧縮強度  $33.6 \text{ N/mm}^2$  と圧縮弾性係数  $1.20 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  を用いた。

初期剛性は、荷重方法によらず 4 体の試験体でほぼ同一で、平均値が  $1.47k_s$  であった。どの試験体も、荷重が  $1.1P_s$  を超えたあと、荷重上昇が徐々に緩やかになった。大きな破壊音とともに荷重が落ちたところで除荷して、実験を終了した。最大荷重は、接着面を圧縮した試験体のほうが、接着面を引っ張った試験体より 15% 大きかった。

図 9 に、破壊状態を写真で示す。接着面を圧縮した試験体 C2 は、梁端近傍で接着面に沿って CLT がせん断破壊し、接着面を引っ張った試験体 T2 は、荷重点付近で接着面に沿って CLT が引張破壊した。どの試験体も、接着剤でなく、CLT が破壊した。

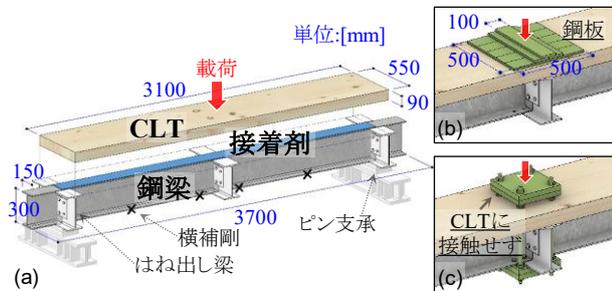


図 7 合成梁曲げ試験：  
(a) 試験体；(b) 圧縮条件；(c) 引張条件

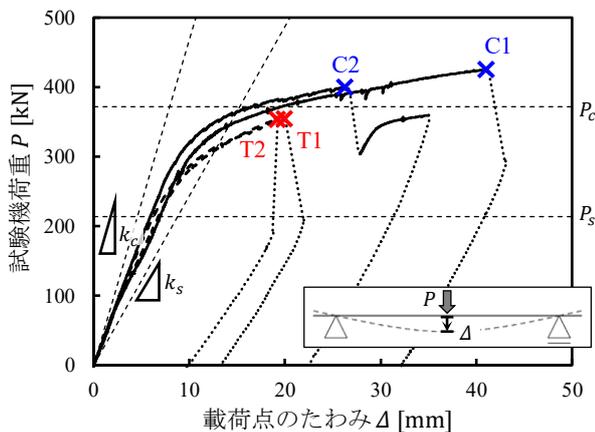


図 8 荷重点のたわみと荷重の関係

図 10 に、解体後の接着面を写真で示す。鋼材に木材が付着していることから、破壊が CLT 側で生じたことが確認された。

図 11 に、鋼梁と CLT の相対水平変位（以下、すべり）の梁長方向の分布を示す。合成梁の古典理論通りに、梁端に近づくほどすべりが大きかった。接着面を圧縮した試験体 C2 では、南端で CLT がせん断破壊したが、破壊直前に南側全体のすべりが大きく進行した。一方、梁中央で引張破壊した試験体 T2 では、破壊まで一定の速度ですべりが進行した。

図 12 に、梁中央から L/8 離れた断面 D で測定した軸ひずみ分布を示す。CLT の軸ひずみ分布は、幅方向にほぼ均一であった。断面高さ方向のひずみ分布から求めた中立軸の位置は、完全合成梁と仮定した場合の理論値と近かった。鋼梁と CLT の境界のひずみ差は、荷重方法の違いによらず荷重の大きさに比例し、鋼梁の上フランジより

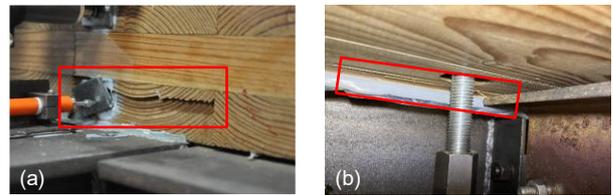


図 9 破壊状態：(a) 圧縮条件；(b) 引張条件

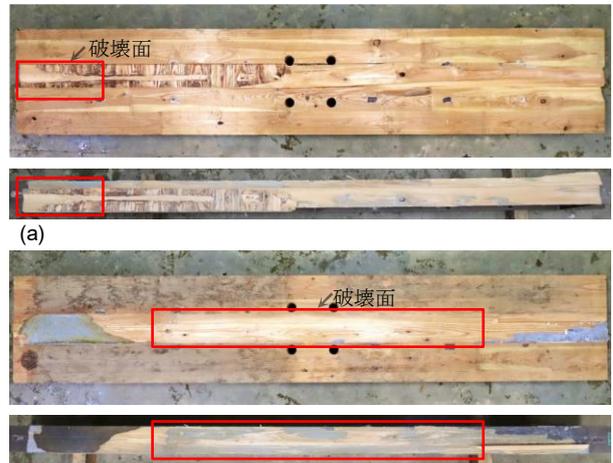


図 10 破壊面：(a) 圧縮条件；(b) 引張条件

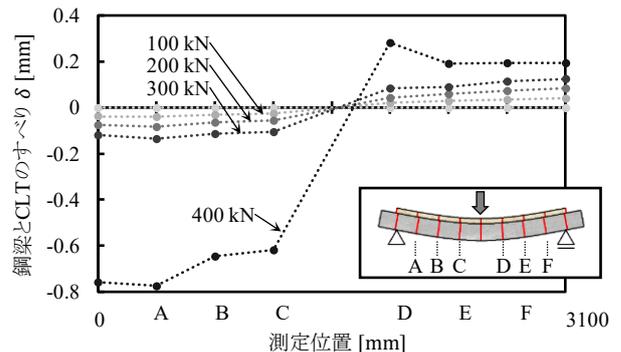


図 11 鋼梁のすべり分布

CLT 下面のひずみが常に約 30 % 小さかった。

図 13 に、断面 A~F で測定した軸ひずみ分布を示す。中央に近い断面ほど傾きが大きく、大きな曲げが生じた。中央を境に対称であり破壊側と非破壊側で有意な差はみられなかった。

図 14 に、軸ひずみの測定値と釣合条件式に基づいて算定した、鋼梁の軸力分布を示す。梁端から中央までおよそ一定の傾きとなったことから、接着面に作用するせん断応力はおおむね一様だったと考えられる。

図 15 に、二面せん断試験から得た接着長さとしせん断接着強度の関係に、合成梁の接着面に応力が一様分布すると仮定して算出したせん断接着

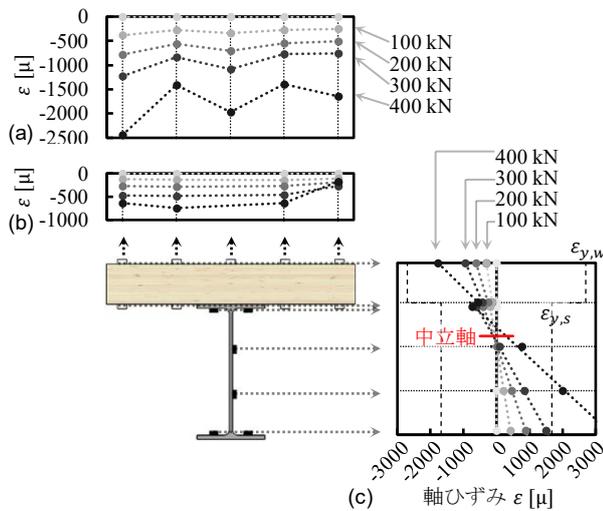


図 12 合成断面の軸ひずみ分布：  
(a) CLT 上面；(b) CLT 下面；(c) 高さ方向

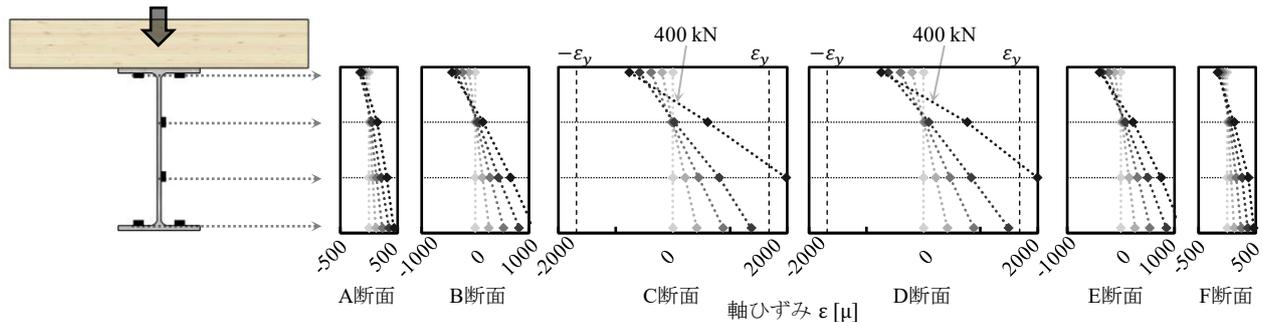


図 13 鋼梁の軸ひずみ分布 A~F 断面

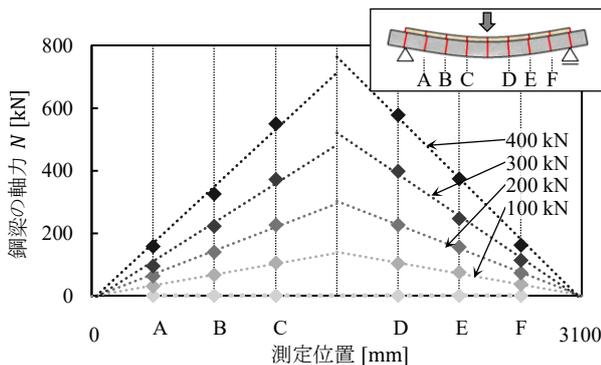


図 14 鋼梁の軸力分布

強度を重ねて示す。永井<sup>4)</sup>が指摘した通り、鋼-木接着接合の強度は、木材の破壊によって決まり、接着長さが長いほど強度が小さいという寸法効果による耐力低下が明確に現れた。

## 5. まとめ

鋼-木接着接合に関する一連の実験結果から以下の知見を得た。

- (1) 鋼梁と木質床を接着接合した実大規模の合成梁曲げ試験では、終局状態においても接着剤は破壊せず、合成効果が発揮された。しかし、接着面を圧縮する載荷方法に比べ、接着面を引っ張る載荷方法では曲げ耐力が小さかった。
- (2) 二面せん断試験では、接着長さが長いほど応力集中による耐力低下の影響が大きかった。
- (3) 複合応力試験では、圧縮応力が同時に作用するとせん断耐力が高く、引張応力が同時に作用するとせん断耐力が低かった。
- (4) 接着面にせん断応力が作用する場合の破壊モードは、接着面近傍の破壊が支配的であった。

## 参考文献

- 1) 国土交通省、農林水産省：脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律，令和3年法律第77号，2021.
- 2) (公財)日本住宅・木材技術センター 発行：2024年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル，2024.
- 3) 原賀康介：接着総論 接着技術の現状と高信頼性接着の基礎 (1)，日本色材協会誌，Vol.87, No.4, pp.139-144, 2014.
- 4) 永井佑佳ほか：接着による鋼・木合成構造に関する基礎実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III, pp.783-784, 2019.7.

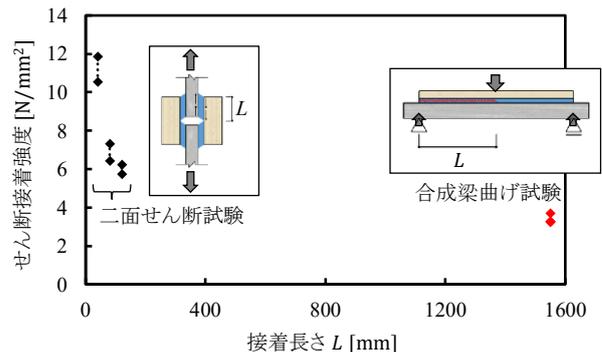


図 15 接着長さと接着強度の関係