

# 鋼と木の接着接合に関する実験

## An Experimental Study on Adhesively Bonded Steel-to-Timber 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 永井 佑佳

### Abstract

Monotonic loading tests were conducted to study how the strength of adhesively bonded steel-to-timber joints are affected by adhesive type (epoxy, bond or urethane), timber type (pine, larch or cedar), surface finish of steel (blast cleaned, milled or untreated), adhesion length and curing pressure. Composite beam made by bonding an I-section steel beam with a cross-laminated timber (CLT) slab was tested to examine real-scale application of the adhesives. Failure modes and strength of the joints were examined to understand the potential benefits and limitations of such use.

**Keywords:** Structural adhesive; Steel; Timber; Shear; Composite beam.

### 1. はじめに

近年、異種材料や異なる構造を組み合わせたハイブリッド構造が注目を集めている。特に、環境保全や低炭素化社会への関心から、鋼と木のハイブリッド部材を用いて構造体を作り上げる木質ハイブリッド構造の研究が進められている<sup>1)</sup>。この構造では、鋼材と木材を確実に一体化し、合成効果を確保する接合方法が課題である<sup>2)</sup>。現在は、摩擦または支圧に依存する方法が主流だが、力学的な効率や、施工性、経済性の観点から、接着接合に期待がもたれている。そこで本研究は、鋼と木の接着接合に影響を及ぼす要因を検証する目的で、二面せん断引張試験を実施し、実際の寸法での接着接合を検証する目的で、鋼・木合成梁試験を実施した。

### 2. 二面せん断引張試験

図1に示す試験体を用いて、二面せん断引張試験を行なった。表1に試験体一覧を示す。母材にSS400の普通鋼板を用いた。接着剤種と木材種、鋼材表面状態、接着長さ、圧縮圧力をパラメータとして、合計89体を試験した。接着剤には、ユニシ(株)製ビニル共重合樹脂系エマルジョン形接着剤ボンド木工用多用途(以下ボンド)、と同社製二液混合室温硬化型エポキシ系接着剤E258R(以下エポキシ)、3M Scotch-Weld™ 一液湿気硬化型ポリウレタンシール剤560(以下ウレタン)の3種類を検討した。木材種には、マツ材(無等級)、

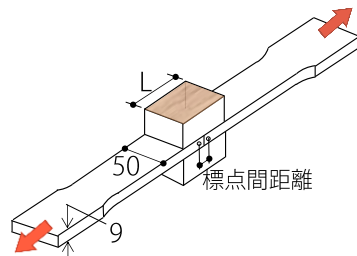


図1 試験体概要 [寸法: mm]

CLT(カラマツ、直交集成板3層3プライ同一等級構成、強度等級S90-3-3)、スギ材(甲種構造材1等級)の3種類を検討した。CLTは、後述の合成梁試験で使用したCLTから1プライ厚を切り出した。試験時の木材の含水率は11から14%であった。鋼材の表面状態は、ショットブラスト処理、機械研磨処理(表面粗さ $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ )、黒皮を残したままの3種類、接着長さは40、80、160、240 mmの4種類、圧縮圧力は面圧力 $1.25 \times 10^{-5}$ (継手板の自重)、 $1.3 \times 10^{-3}$ 、 $6.5 \times 10^{-3}$ 、 $0.25 \text{ N/mm}^2$ (万力締めつけから測定)の4種類とした。

接着剤の塗布に先立って、鋼材の接着面をアセトンで脱脂した。エポキシは主剤と硬化剤を重量比2:1で混合し、ボンドとウレタンは容器からそのまま取り出して、それぞれの接着剤の可使用時間(硬化するまでの作業可能な時間)内に接着剤を

表1 試験体一覧

| 接着剤種 | 木材種 | 鋼材表面 | 接着長さ L [mm]   | 圧縮圧力 [N/mm <sup>2</sup> ]  | n  |
|------|-----|------|---------------|--|----|
| ボンド  | マツ  | SBSH | 40/80         | 0.25   | 6  |
|      |     | 黒皮   | 80            | $1.25 \times 10^{-5} / 1.3 \times 10^{-3} / 6.5 \times 10^{-3} / 0.25$ | 8  |
|      |     |      | 40/80/160/240 | 0.25   | 12 |
|      | CLT | 黒皮   | 80            | 0.25   | 3  |
|      | スギ  | 黒皮   | 80/160/240    | 0.25   | 9  |
| エポキシ | マツ  | 黒皮   | 80            | $1.3 \times 10^{-3} / 6.5 \times 10^{-3} / 0.25$                       | 6  |
|      |     |      | 80/160/240    | 0.25   | 9  |
|      |     | 研磨   | 80/160/240    | 0.25   | 9  |
|      | CLT | 黒皮   | 80            | 0.25   | 3  |
|      | スギ  | 黒皮   | 80/160/240    | 0.25   | 9  |
| ウレタン | マツ  | 黒皮   | 80            | $1.25 \times 10^{-5} / 1.3 \times 10^{-3} / 6.5 \times 10^{-3}$        | 6  |
|      |     |      | 80/160/240    | 0.25   | 9  |

塗布し、組み合わせたあと、室温下で最低 1 週間養生した。

試験は、容量 1,000 kN の万能試験機を用いて、室温下で単調引張载荷した。最大荷重の近傍では、载荷速度を 0.03 から 0.01 kN/s に制御した。载荷中、クロスヘッド変位と母材突合せ部の標点間変位をそれぞれ 2 基の変位計で計測した。

図 2 に、荷重と標点間変位の関係を、黒皮を残したままの試験体について示す。エポキシを用いた試験体は、破壊に至るまでほぼ線形挙動を示した。エポキシが最も高い強度を示したが、ボンドとウレタンのほうが、変形能力が大きかった。ボンドは破壊時点の変位量が、最大でエポキシの 10 倍以上だった。

写真 1 に、破壊面を見開きにみせる。エポキシは、全ての試験体が木材で壊れる被着体破壊を示したので、破壊強度が木材で決定したと考えられる。ボンドやウレタンは、界面破壊と凝集破壊の両方がみられたので、破壊強度は接着剤で決定したと考えられる。

図 3 に、最大荷重を接着面積で除したせん断強度を、接着長さや圧縮圧力との関係で、平均値と併せて示す。エポキシを用いた試験体は、接着長さが長いほど強度が低かった。接着長さ 80 mm の試験体で強度のばらつきが目立ったが、継手板の気乾状態での比重が軽いほど強度が小さかった傾向を確認した。ボンドとウレタンを用いた試験体では、接着長さが長いほど若干強くなる寸法効果が表れた。継手板の自重から万力による圧縮の範囲では、圧縮圧力は、せん断強度に影響を及ぼさなかったが、ウレタンでは目視で接着不良を確認した。図 4 に、せん断強度を鋼材の表面状態との関連で示す。エポキシは、黒皮と機械研磨、ボンドは、黒皮とショットブラスト処理を施した試験体をそれぞれ比較する。ボンドでは、黒皮の試験体は、ショットブラスト処理の平均せん断強度の 1.1 倍程度であり、両者に大きな差は見られなかった。エポキシは、黒皮も機械研磨も被着体破壊を起こしており、鋼材

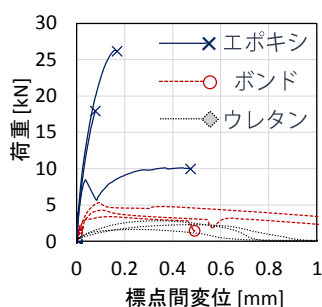


図 2 荷重-変形曲線

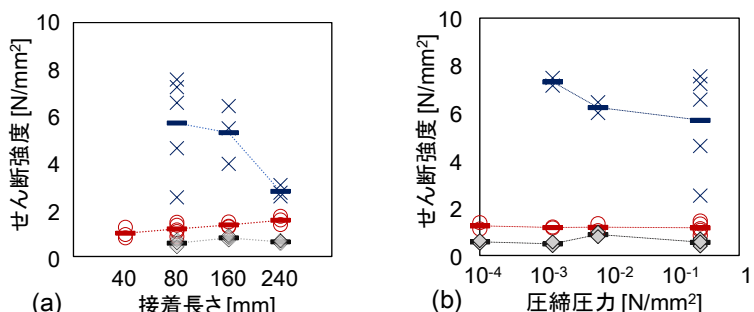


図 3 (a) せん断強度と接着長さ、(b) せん断強度と圧縮圧力の関係

表面処理による影響は見られなかった。西村ら<sup>3)</sup>が指摘したように、黒皮、ショットブラスト処理、機械研磨といった鋼材の表面状態の違いは、鋼と木のせん断接着強度に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

図 5 に、ボンドとエポキシの 2 種類の接着剤について、せん断強度と木材種との関係を示す。いずれの接着剤でも、平均値を見ればせん断強度は木材種に依存しなかった。しかし、CLT では、ばらつきが小さく安定した強度を示したものの、マツ（無等級）とスギ（甲種構造材 1 等級）ではばらつきが大きかった。エポキシは、全ての試験体が被着体破壊であり、木材の破壊強度でせん断強度が決定されたと考えられる。日本建築学会「木質構造設計基準・同解説」<sup>4)</sup>による製材の基準特性値では、マツは基準せん断強度が 2.1 から 2.4 N/mm<sup>2</sup>、スギは 1.8 N/mm<sup>2</sup>であり、図 5 にもこの違いと同程度にせん断強度に差があったと言えなくもない。

### 3. 鋼・木合成梁試験

図 6 に示す試験体を用いて、鋼・木合成梁の三点曲げ試験を行なった。SS400 の鋼梁 H-300×150×6.5×9 とカラマツを用いた CLT (直交集成材 3 層 3 プライ同一等級構成、強度等級 S90-3-3) を接着接合した。CLT の含水率は 11% であった。試験体は 2 体製作し、一方にボンドを、他方にエポキシを用いた。

接着面をアセトンで脱脂したあと、可使用時間以内に接着剤を塗布した。エポキシを使用した試験体では、CLT の自重のみでは接着剤が全面にいきわたらなかつたため、その部位に CLT の上に合

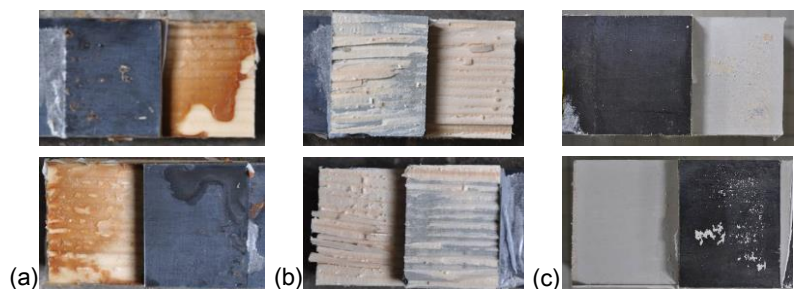


写真 1 破壊後の試験体：(a) ボンド、(b) エポキシ、(c) ウレタン

計 95.3 kg の錘を載せたが、それでも西梁端近くで接着剤の押し出しが確認できない部位があり、その接着不良が疑われた。その後、室温下で 1 週間以上養生して試験に備えた。

図 6 の×印で示す位置で鋼梁の下フランジを横補剛しながら、容量 2,000 kN の万能試験機を用いて、単調載荷した。中央断面の相対変位のほか、等 8 分割点のうち 3 断面で鋼梁と CLT のずれを計測し、同じ位置で鋼梁のひずみ分布を計測した。

図 7 に荷重と梁中央の相対変位の関係を示す。図中に、合成効果がない重ね梁の理論剛性を  $K_N$ 、完全合成梁の理論剛性を  $K_F$  として示す。エポキシは、380 kN の時点で、木材のめり込みにより荷重が頭打ちとなったため、一旦除荷し、めり込み耐力を向上するために、支圧長さを当初の 10 cm から 50 cm に広げたあと、再載荷した。図 7 では、当初の支圧長さをを用いた載荷を実線で、支圧長さを広げた後の再載荷を点線で示す。ボンドでは、荷重が小さい範囲から  $K_N$  を少し超える剛性があったが、エポキシでは、 $K_F$  に近かった。

ボンドでは、鋼梁が載荷点で降伏しても、接着剤は破壊せず、鋼梁と CLT に最大で材長方向に 2.9 mm のずれを生じた。このずれ変位は、図 2 の二面せん断引張試験で、耐力を保持したまま、2.5 mm の変形に追従した結果と照合する。計測装置の限界で試験を終了した後、計測装置をはずして載荷を行なったところ、荷重 370 kN を超え、鋼材の上フランジが局部座屈を生じ、鋼材が全長の 1/100 のたわみを生じてはじめて、鋼材と CLT との間隙が確認された。載荷中は破壊には至らず、除荷中に支圧板による押さえつけがなくなったことで、CLT が鉛直上方向に跳ね上がり、鋼梁と分離した。せん断応力でなく、離間応力の作用に

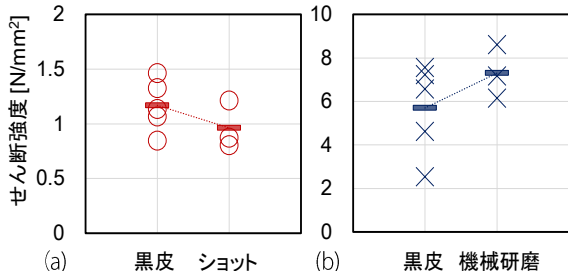


図 4 せん断強度と鋼材表面の関係 (a) ボンド, (b) エポキシ

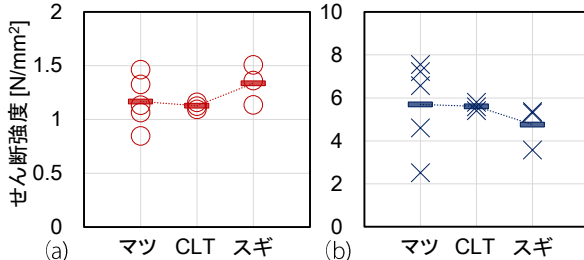


図 5 せん断強度と木材種の関係 (a) ボンド, (b) エポキシ

よって破壊したものと考えられる。エポキシでは、鋼梁と CLT の材長方向のずれが最大で 0.3 mm にとどまった。再載荷中に、荷重 430 kN を超えたところで、大きな破壊音と共に鋼梁の西端近くの接着剤が破壊し、勢いよく鋼材と CLT が離れた。

写真 2 に、CLT を取り外したあとの、鋼材と CLT の表面を示す。ボンドでは、木材側に鋼材の黒皮と接着剤の両方が付着していた。ボンドでは、全体的に接着剤が凝集破壊していた。写真 2(a) に示すように、端部近くで接着面が粗く、載荷点近くで滑らかだったのは、破壊が載荷点近くを起点とし、端部に向かって進行した痕跡だと考えられる。エポキシでは、接着不良を疑われた近辺に限って接着剤が界面破壊したが、その他の部位では木材が破壊していた。接着不良の位置が、後述するように、せん断応力が高い位置に一致したことが、界面破壊の要因となったと考えられる。

図 8 に、荷重 100 kN の時点で、CLT と鋼梁の界面に作用したせん断力の材軸方向分布を示す。点線は、荷重 100 kN 時点で 3 断面で測定した鋼梁の歪分布と、平面保持の仮定に基づいて算定した測定値、実線は CLT と鋼梁の相対ずれ変位に

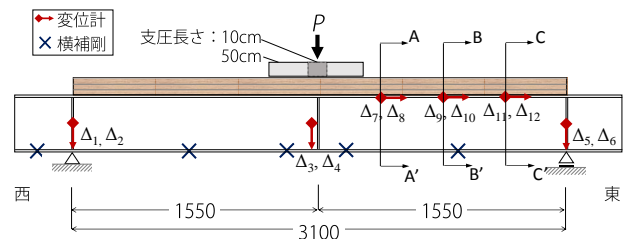


図 6 試験体概要 [寸法: mm]

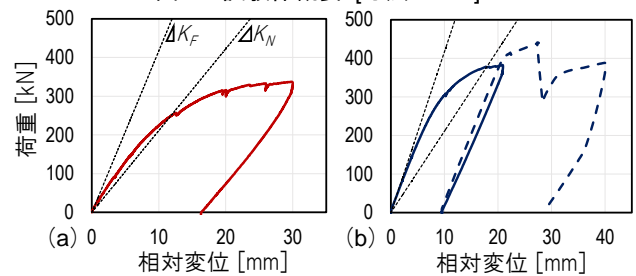


図 7 荷重変形曲線 (a) ボンド, (b) エポキシ

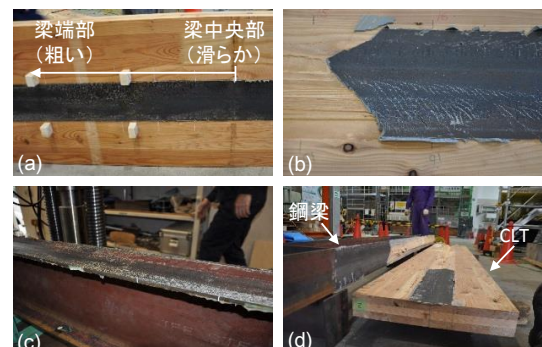


写真 2 CLT 取り外し後の試験体

(a) 梁全体 (CLT/ボンド) (b) 梁端部 (CLT/エポキシ)  
(c) 梁中央部 (鋼/ボンド) (d) 試験体全体 (エポキシ)



対して、接着剤が軸方向にずれ剛性  $\kappa$  で抵抗すると仮定して、力学モデルから算定した理論値である。 $\kappa$  が無限大の場合、完全合成梁である。測定値は、中央ほど大きなせん断応力を与える理論値と整合した。 $\kappa = \infty$  の場合と比較して、全長にわたってボンドで4割、エポキシで8から9割程度のせん断力を計測した。

図7に示す範囲で（破壊には至らなかったが）生じたせん断応力は、二面せん断試験で得た、接着長さ  $L = 80 \text{ mm}$  の場合の平均強度（図5参照）と比較して、ボンドで最大1.46倍、エポキシで0.46倍であった。2章で述べた通り、ボンドは接着長さ240 mm以下の範囲で実施した二面せん断試験で、寸法効果を確認した。接着長さが1550 mmと格段に長い合成梁試験では、二面せん断試験で確認した以上に寸法効果が大きかった可能性がある。エポキシは、二面せん断試験では、接着長さが長いほど平均強度が小さい傾向にあったが、合成梁試験では接着不良が疑われた箇所を除き、接着破壊に至らなかった。

デジタルマイクロスコープ撮影による木材側の破壊表面の元素分析結果によると、ボンドもエポキシも、酸素と鉄の含有率が高かった。写真2の観察と併せると、鋼材の黒皮がはがれ、木材側に付着したものと考えられる。特に、水性のボンドは、黒皮に染み込んで同化した様子が破壊面の観察からうかがえた。

#### 4. 接着剤バルク試験

接着剤の機械的性能を確かめるために、図9に示す試験片を用いて、接着剤バルク試験を行なった。試験体形状は、JIS K7161-1:2014に従った。2章で述べたエポキシ、ボンド、ウレタンのほかに、3M Scotch-Weld™ 二液アクリル室温硬化型接着剤メタルグリップとメタルボンダーの計5種類を使用した。テフロン製の型をアセトンで脱脂したあと、接着剤で充填して、一週間以上養生することで試験体を製作した。容量250 kNの万能試験機を用いて、試験片が破壊に至るまで、又はグ

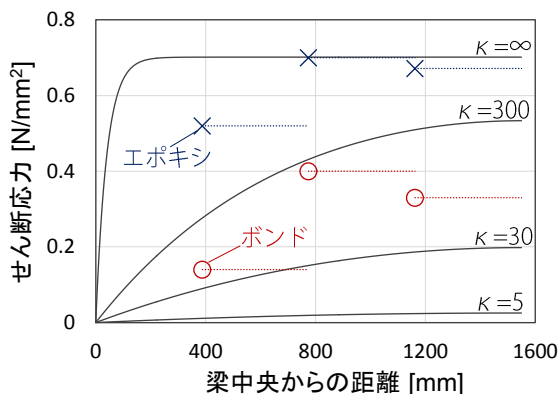


図8 接着面に作用するせん断応力の分布

リップ間変位20 mmまで、載荷速度0.1 mm/sで単調引張載荷した。

図10に、代表試験片で得た荷重とグリップ間変位の関係を示す。引張応力は、荷重を、実測寸法から空隙等を除いた有効断面積で除した値として算出した。エポキシは、最大荷重に達した直後に破壊した。メタルボンダーは、同じアクリル系のメタルグリップよりも最大荷重は大きかったが、変形性能は小さかった。ボンドやウレタンは、変位が図示した範囲を超え、伸び率200%を超えても破壊に至らず、非常に高い変形性能を示した。どの接着剤も、二面せん断引張試験で得た特性と似た結果を示した。

#### 5. まとめ

接着による鋼・木合成構造の性状を把握するために、二面せん断引張試験と合成梁の三点曲げ試験を行い、下記の知見を得た。

- エポキシは木材側の被着体破壊を、ボンドやウレタンは主として鋼材側の界面破壊を示した。
- 圧縮圧力と鋼材の表面状態（黒皮、機械研磨、ショットブラスト）が鋼と木のせん断接着強度に及ぼす影響は限定的であった。
- 鋼・木合成梁試験では、ボンドもエポキシも、鋼材が降伏しても接着剤が破壊に至らず、ボンドでは、二面せん断試験で得た以上のせん断応力にも接着剤が耐えた。

#### 【参考文献】

- 鋼・木質ハイブリッド構造の設計施工技術資料、日本鋼構造協会、2012.3
- 松岡祐一ほか：木・鋼ハイブリッド構造部材の開発と実用化、新日鐵住金エンジニアリング技報、Vol.4, pp.47-48, 2013.1
- 西村航平ほか：接着剤を用いた木・鋼接合部の二面せん断実験、日本建築学会学術講演梗概集、pp.53-54, 2017, 日鐵住金建材㈱
- 木質構造設計基準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—、日本建築学会、2006

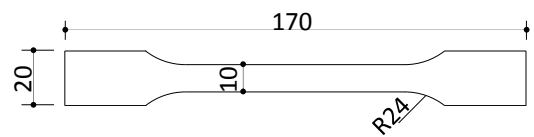


図9 試験体概要 [寸法: mm]

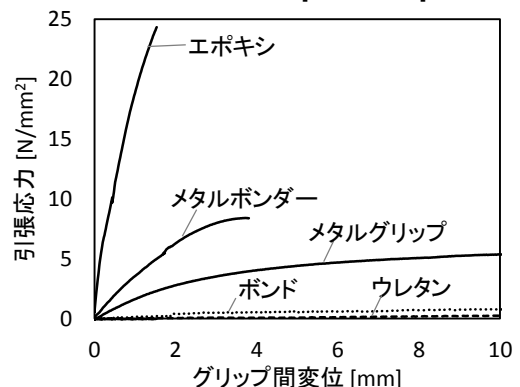


図10 荷重変形関係