

# 構造用接着剤による鋼梁継手と鋼木合成梁の実験的検証

An Experimental Study on Adhesively Bonded Steel Beams Splices and Steel-Timber Composite Beams

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 天裕

## Abstract

The structural performance of adhesively bonded joints was examined in two applications: steel beam splices and steel-and-timber composite beams. Steel beam splices of different splice dimensions and using either epoxy or acrylic adhesives were subjected to different proportion of shear and bending moment. The measured strength and failure was compared against a previously proposed design formula. The peel resistance in the flange splice was found to be rather significant. Three-point bending tests of composite beams were planned to clarify whether the strength is affected by compression introduced in the adhesive.

**Keywords:** Adhesive joint, Structural adhesive, Beam splices, Composite beam.

## 1. はじめに

金属材料の接着は、さまざまな産業分野で普及しており、建築鋼構造に適用可能な構造用接着剤も商用販売されている。しかし、建築鋼構造の実寸法と実条件を反映した接着接合の設計、施工方法は確立されておらず、実験による検証も限られている。そこで、本研究室では、実寸法に近い梁継手と鋼と木を用いた合成梁を検証する一連の実験を実施してきた。総合的な知見を得るために、鋼梁継手実験について、過去の実験<sup>1)3)</sup>を踏まえて、追加実験を計画・実施し、鋼・木合成梁について、永井<sup>4)</sup>で残された課題を解消するための実験を計画した。

## 2. 実験計画

表1に、鋼梁継手の試験体一覧を、図1に試験体寸法と载荷条件を示す。表には、本実験で実施した11体と、井上<sup>1)</sup>が実施した2体、渡邊<sup>2)</sup>が実施した4体を併せて示す。接着継手に作用する曲げモーメントとせん断力の比を違えるために、3点曲げ、4点曲げ、片持ち<sup>①</sup>と<sup>②</sup>の4種類の条件で、単調载荷試験を実施した。母材にH-300×150×6.5×9のSN400B鋼材、フランジ継手板に厚さ9mm、ウェブ継手板に厚さ6mmのSS400鋼材を用い、全ての鋼材にショットブラスト処理（スチールショット、SB-12、粒形約1mm、硬度HRC-40-50）を施した。接着剤には、エポキシ系接着剤のコニシ(株)製2液混合型接着剤E258とE258R、アクリル系接着剤の3M社製Scotch-Weld<sup>TM</sup>製2液混合型接着剤メタルグリップとメタルボンダーを使用した。なお、E258とE258Rで挙動と耐力の差がみられなかったため、本論では両者を区別しない。

図2に、継手寸法を示す。各フランジとウェブ

を、裏表2枚の継手板を介して接着した。継手型IIIは継手型IVよりも、耐力が大きくなるように設計した。継手型IIIWとIIIFは、継手型IIIのウェブのみまたはフランジのみを接着した。

接着前に、すべての接着面をアセトンで脱脂した。母材の突合せ部と接着面の締付けに使用した高力ボルトF8T-M12を、試験後に取り外せるように、高力ボルトの首とワッシャーにメンディングテープを貼り、ナットのねじ部に剥離剤を塗った。接着完了後、7日間以上養生し、载荷した。

破壊耐力と破壊モードを、二面せん断引張に基づく材料の破壊強度と、藤野<sup>3)</sup>による応力分布で予測と比較した。

## 3. 実験結果

図3に、片持ち<sup>①</sup>载荷した、継手型IIIWについて得た荷重の変形の関係を示す。どの試験体も、一定の剛性に沿って荷重が上がり、

表1 鋼梁継手試験体一覧

接着剤	载荷方法	継手型	養生期間
E258 E258R	片持ち <sup>①</sup>	IIIW	7
	片持ち <sup>②</sup>	IIIW	440
	3点曲げ	III/IIIW/IV	9/27/7
	4点曲げ	III/IV	7
メタルグ リップ	片持ち <sup>①</sup>	IIIW	357
	片持ち <sup>②</sup>	IIIW	441
	3点曲げ	III/IIIF	10/7
	4点曲げ	III/IIIF	10/7
メタルボ ンダー	片持ち <sup>①</sup>	IIIW	7
	片持ち <sup>②</sup>	IIIW	7
	3点曲げ	IV	36
	4点曲げ	IV	21

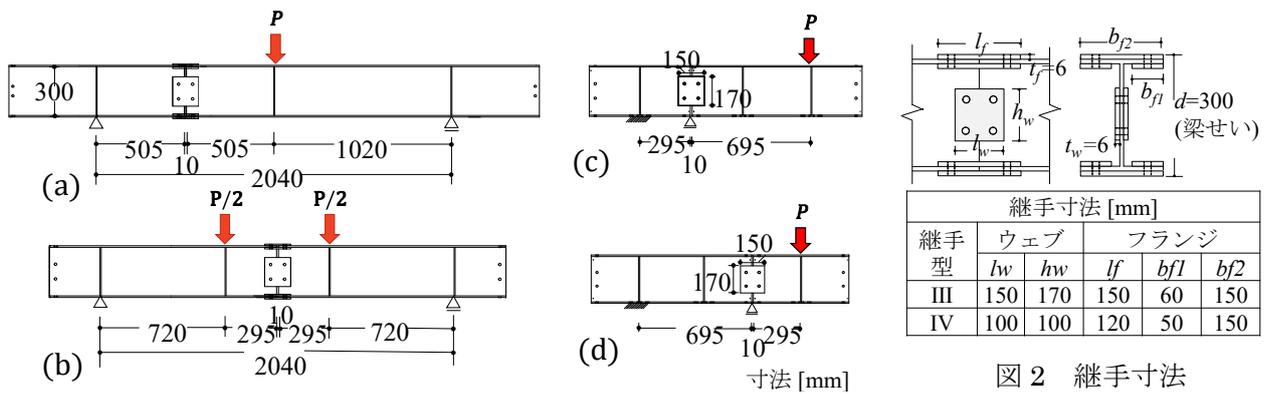


図 1 鋼梁継手実験 試験体寸法：(a) 三点曲げ；(b) 四点曲げ；(c) 片持ち載荷①；(d)；片持ち載荷②

×で示した点で最大荷重を記録したあと、急速に耐力を喪失した。そのあと、ボルトのせん断抵抗によって再び耐力が上昇したことを確認した時点で除荷を開始した。図には、除荷点まで示す。アクリル系接着剤のメタルグリップとメタルボンダーは、エポキシ系接着剤の E258R と比較して、剛性はいずれも 7 割で、耐力は前者が 9 割、後者が 10 割だった。メタルグリップは、予測耐力の 9 割、E258R とメタルボンダーは予測耐力の 7 割で破壊した。

図 4 に、片持ち②載荷した、継手型 IIIW について得た荷重と変形の関係を、接着剤ごとに示す。片持ち①と同様に、E258R はメタルボンダーより高い剛性を示した。E258R は予測耐力の 8 割、メタルボンダーは予測耐力の 6 割で破壊した。

図 5 に、継手型 IV に、E258R を使用した場合について得た荷重と変形の関係を、載荷方法ごとに示す。3 点曲げの剛性は理論剛性をわずかに下回り、4 点曲げの剛性は理論剛性とほぼ一致した。試験体の耐力は、予測耐力の 10 割から 11 割の間に収まっていた。

図 6 に、継手型 IV に、メタルボンダーを使用した場合について得た荷重と変形の関係を、載荷方法ごとに示す。3 点曲げの剛性は、理論剛性をわずかだが上回り、4 点曲げの剛性は、理論剛性とほぼ一致していた。試験体の耐力は、予測耐力の

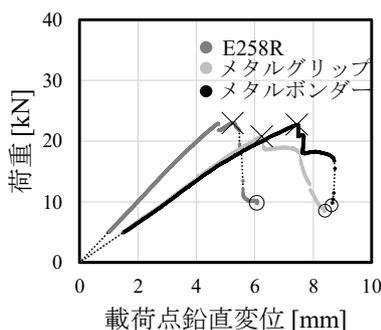


図 3 片持ち載荷①

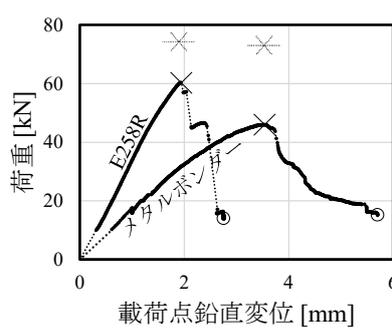


図 4 片持ち載荷②

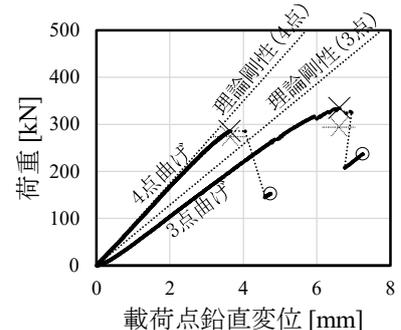


図 5 継手型 IV と E258R

9 割から 11 割の間に収まっていた。

図 7 に、3 点曲げ載荷または 4 点曲げ載荷した、継手型 III F にメタルグリップを用いた場合について、荷重と変形関係を示す。3 点曲げの予測耐力は 0、4 点曲げの予測耐力は 250 kN と大幅に異なったが、いずれも耐力は 150 kN で差がなかった。藤野ら<sup>3)</sup>の予測耐力では、フランジ継手はせん断耐力を伝達しないと仮定したが、この仮定の妥当性を再検討する必要がある。

図 8 に、4 点曲げ載荷した継手型 III と III W に、E258R を用いた場合の荷重と変形の関係を示す。ウェブのみを接着した試験体 III W は、フランジとウェブを接着した試験体 III に比べて、剛性が 3/5 であった。耐力は、継手型 III が予測耐力の 11 割、継手型 III W が 13 割とよく一致した。

図 9 に、せん断力  $Q$  と曲げモーメント  $M$  の相関平面に、継手型 III、III W、III F の予測連成耐力を示す。各載荷線と予測連成耐力が交わった交点が予測耐力となる。設計式では、フランジはせん断力を無視し、ウェブの曲げモーメントの負担率は 1 割程度と予測される。したがって、フランジ継手は、せん断耐力に寄与しないが、曲げモーメントのほとんどを負担し、ウェブ継手は、せん断体力の全てを負担するが、曲げモーメントへの寄与がわずかだと予測される。

図 10 から図 13 に、継手型 III、III W、III F、IV について得た破壊耐力を、上述の  $M$ - $Q$  相関平面に

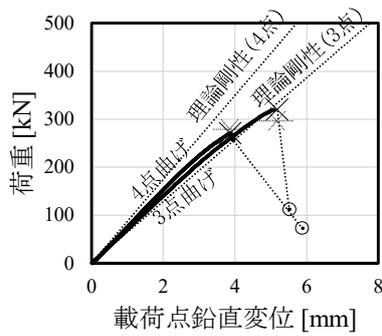


図6 継手型IVとメタルボンダー

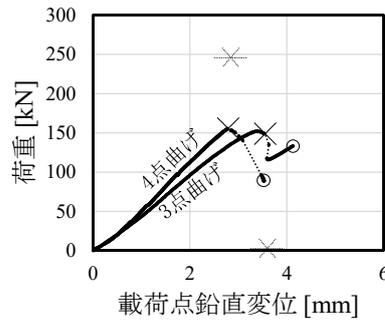


図7 継手型III F

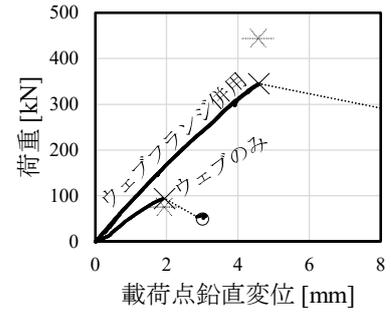


図8 継手型IIIとIII W

整理する。図10に、継手型III Wの耐力とM-Q 相関曲線を示す。測定耐力は、片持ち①载荷のメタルグリップでは、予測耐力の9割、その他では、予測耐力の7割程度であった。

図11に、継手型IIIとIII Fにメタルグリップを用いた場合について、耐力とM-Q相関曲線を示す。継手型III Fの測定耐力は、予測耐力が0の3点载荷で、継手型IIIの半分、4点曲げ载荷では、予測耐力の6割、継手型IIIの半分だった。せん断を負担した分だけ、3点曲げの方が4点曲げより曲げ耐力が小さかったと考えられる。未実施だが、継手型III Wも計画しており、継手型IIIの耐力が、継手型III FとIII Wの加算となるかを検証する。

図12に、継手型IVの耐力とM-Q相関曲線を示す。測定耐力は、予測耐力の9割から13割であった。

配置と、15倍に拡大した、最大荷重時(図(a))と破壊直後(図(b))の相対変形を示す。鋼材の変形は無視している。最大荷重時は、载荷点から遠い左側の接着面が動き、载荷点に近い右側の接着面はほとんど動かなかった。脆性後は、左側だけがさらに動いた。载荷点から遠い側で破壊を生じる傾向は、今回実施した試験体11体全てに共通して見られたが、いったん破壊すると、载荷点に近い側の接着面も破壊する試験体もあった。

図14に、片持ち①载荷から得た、荷重と、母材と継手の相対変形角の関係を示す。载荷点から遠い側の変形角を $\theta_1$ とし、近い側の回転角を $\theta_2$ とした。一般的に、エポキシ系接着剤はアクリル系接着剤より剛性が高いことが知られており、同じ試験体の全体応答(図3)でも、その傾向が確認出来たが、局所的な変形には、逆の結果を得た。この原因は考察中である。

図15に、継手型III Fにメタルグリップを使用した場合について、継手に作用した曲げモーメントと、フランジ継手と母材の相対変位の関係を载荷方法ごとに示す。3点曲げでは、上フランジと母材を、4点曲げでは下フランジと母材についての相対変位とした。3点曲げでも、4点曲げでも、剛性が徐々に低下したあと、最大荷重を記録した瞬間に破壊した。剥離が作用した分だけ、継手の剛性と耐力が低かった。

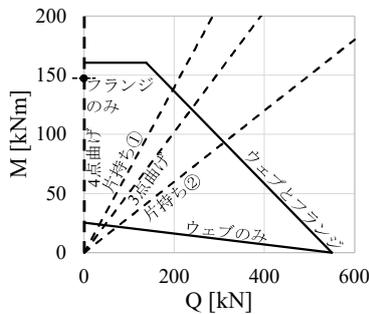


図9 継手型III、III W、III Fの予測連成耐力

#### 4. 考察

図13に、片持ち①载荷で接着剤にE258Rを用いた試験体について、継手と母材の相対変形を計測するための変位計の

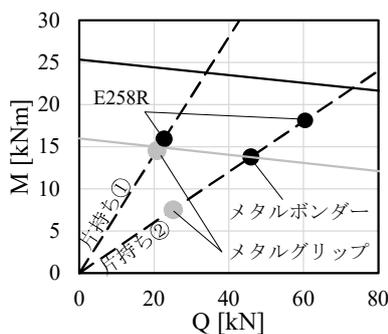


図10 継手型III WのMQ相関曲線

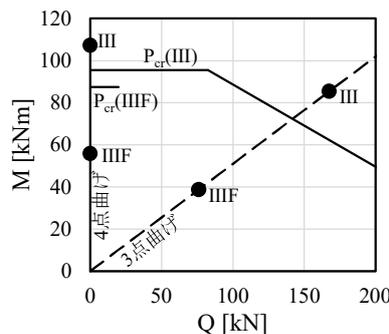


図11 継手型III FのMQ相関曲線

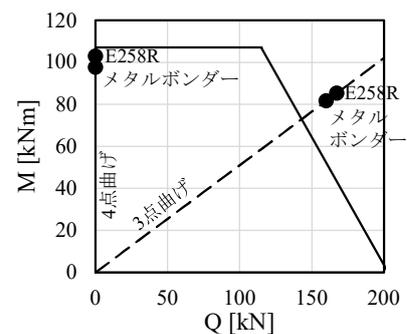


図12 継手型IVのMQ相関曲線

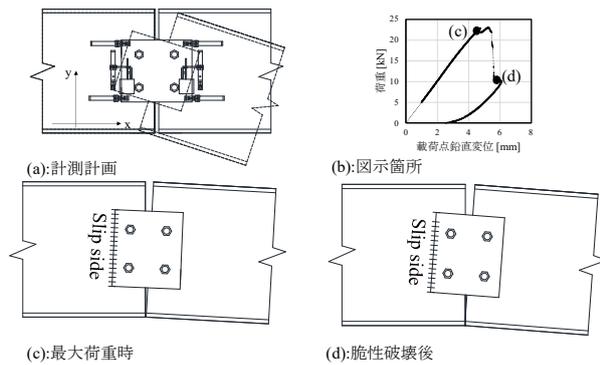


図 13 計測計画と破壊モード

### 5. 鋼木合成梁

表 2 に、鋼木合成梁実験の試験体一覧を、図 16 に試験体寸法と荷重条件を示す。過去、永井<sup>4)</sup>が行った実験では、鋼と木のせん断接着耐力が予想より大幅に高かった。この原因が、合成梁を上から押さえつける荷重方法によって、接着に意図せぬ圧縮力が働いたためであると考え、永井<sup>4)</sup>と同じ荷重方法と、合成梁の下側フランジを押し、接着に圧縮力が作用しない荷重方法を比較する実験を計画した。

### 5. まとめ

接着接合された鋼梁継手について、接着剤、継手形状、荷重方法をパラメータに、11 体の実験を行った。過去に実施された実験結果と合わせて、以下の知見を得た。

- ウェブとフランジの両方を接着した場合の耐力は、予測耐力の 0.8 から 1.2 倍であった。しかし、ウェブのみを接着した試験体の耐力は、予測式の 0.6 倍程度と低く出る傾向があり、フランジのみを接着した場合は、予測耐力が 0 に関わらず、ウェブとフランジの両方を接着した場合の半分程度の耐力を得た。フランジ継手に作用する剥離応力を無視できない。
- 母材-継手間の相対変位は、最大荷重を記録するまで、片側に集中して進行し、片持ち荷重ではモーメントが集中する側が大きく変形した。一度、破壊を生じると、継手の両側に破壊が伝播する場合がある。

### 参考文献

- 井上圭輔ほか：構造用接着剤を用いた鋼梁継手の曲げせん断実験，構造年次論文報告集第 23 巻，pp.262-269,2015.11
- 渡邊洋介ほか：構造用接着剤を用いた鋼梁継手の曲げせん断実験 その 2，鋼構造年次論文報告集，pp.602-609, 2017.11
- 藤野大知ほか：構造用接着剤を用いた鋼構造用梁継手の設計，日本建築学会北海道支部研

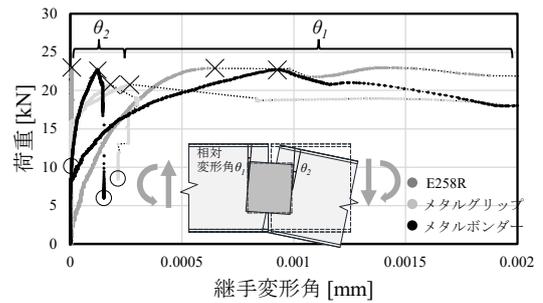


図 14 片持ち荷重①の母材-継手間の変形角

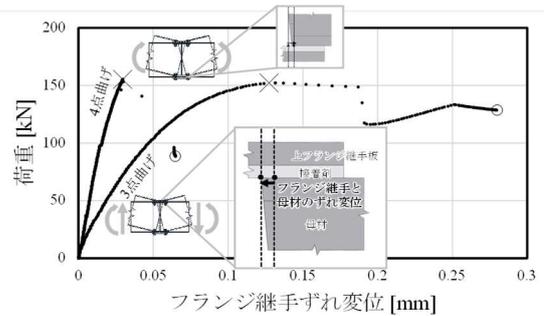


図 15 継手型 III F の継手のずれ変位

究報告集 86 巻，pp.197-200, 2013.3

- 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，pp.783-784, 2019.9

表 2 鋼-木合成梁試験体一覧

接着剤種	荷重方法	養生期間
E258R	上フランジ	1 週間以上
	下フランジ	1 週間以上
ボンド	上フランジ	1 週間以上
	下フランジ	1 週間以上

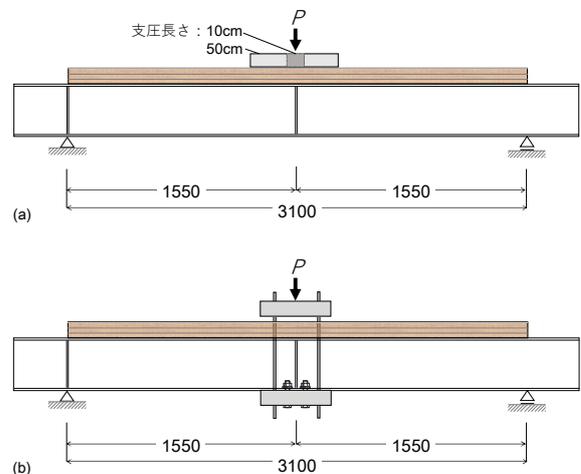


図 16 合成梁実験 試験体寸法 [mm] : (a) 上から支圧、(b) 下から引張