

構造用接着剤を用いた鋼梁継手の耐力

Strength of Adhesively Bonded Steel Beam Splices

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 中田考哉

Abstract

Steel-to-steel adhesive joints were examined through: (a) tensile tests of adhesives; (b) shear, tensile, and cleavage tests of bonded joints; and (c) steel beam splice tests. Elastic, finite-element-method (FEM) analyses were conducted to understand the stress distribution produced by each test in (b). Based on the results and observations, a prediction equation for the strength of beam splices was developed. The shear joints were not dictated by the maximum stress obtained from FEM analysis, which indicate that some plasticity and stress redistribution occur in the adhesive. The prediction based on idealization was able to capture the effect of controlling factors in beam splices but proved to be unconservative particularly for splices at the beam flanges.

Keywords: Adhesive, Adhesive joint, Shear, Tensile, Cleavage, Beam splices, FEM

1. はじめに

鋼構造の接着接合の実現に向けて、接着剤の引張試験、接着接合のせん断強度試験・引張強度試験・割裂強度試験と、H形鋼梁の接着継手実験を行った。接着剤に生じる応力分布を把握する目的で有限要素解析を行い、一連の実験と解析に基づいて、接着接合の耐力予測式を導出したので、ここに報告する。

2. 材料・要素試験

図1に示す4種の試験体を用いて、接着剤バルク試験（試験体種A）、引張せん断接着強さ試験（同B）、引張接着強さ試験（同C）、割裂接着強さ試験（同D）を行った。表1に、実験計画を示す。鋼材にSS400を、接着剤にエポキシ系接着剤（コニシ製E258R、以下エポキシ）とアクリル系接着剤2種（3M社製メタルグリップおよび同メタルボンダー、以下アクリル①と②）を用いた。

試験体種Aは、弾性係数と引張強度を測定する目的で、2種の接着剤種について3体ずつ、計6体用意した。対応する規格はJIS-K6878で、試験体はシリコン型に流し込んだ接着剤を、硬化後、研磨により形状を整えて製作した。载荷前に、図2に例示するように、X線CTスキャンで断面を0.2mm間隔で撮影し、気泡分布を確認した。試験体種Bは、せん断強度を検証する目的で行った。対応する規格JIS K6850は1面せん断試験だが、接着面の剥離応力を極力排除するために、二面せん断試験を選択した。被着体表面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HRC40-50）を施し、接着剤種と継手長さを

パラメータに、計20体用意した。試験体種Cは、引張強度を検証する目的で、3種の接着剤種について5または10体ずつ、計20体用意した。対応する規格JIS K 6849は被着体を小型で四角形とするが、引張応力が均一となるよう被着体を円筒形

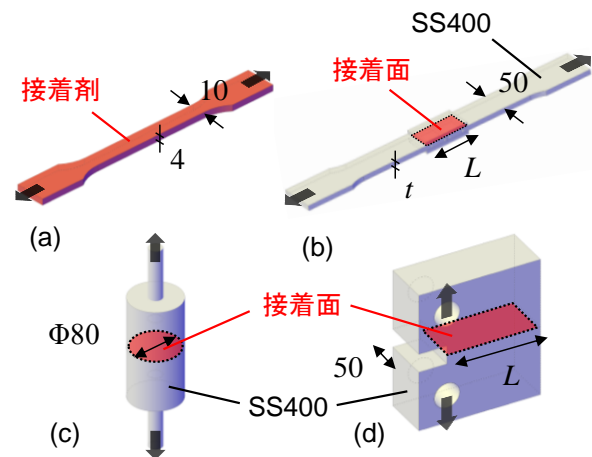


図1 試験体一覧：(a) 試験体種A, (b) B, (c) C, (d) D

表1 主要パラメータ

種	鋼材	接着剤	表面状態	接着長 L	n
A	—	エポキシ アクリル②	—	—	6
B	SS400	エポキシ アクリル②	ショット ブラスト	80/120/ 160	20
C	SS400	エポキシ アクリル① アクリル②	機械研磨	—	20
D	SS400	エポキシ	—	50/100	15

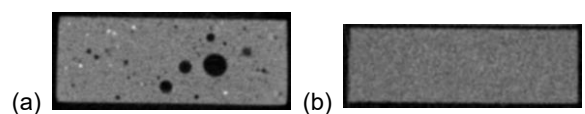


図2 断面写真：(a) エポキシ、(b) アクリル②

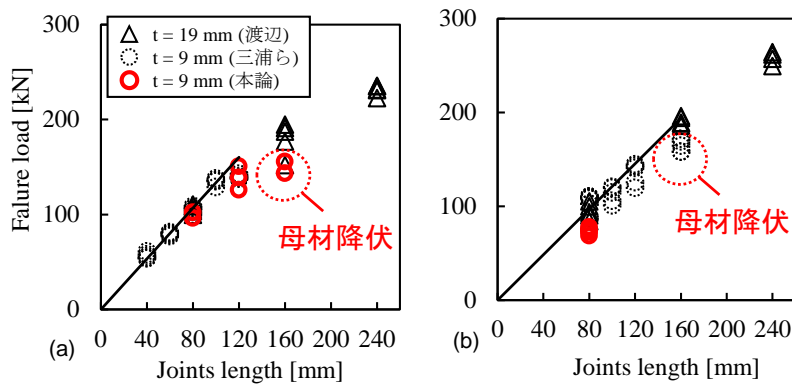


図3 試験体種 B : (a) エポキシ、(b) アクリル

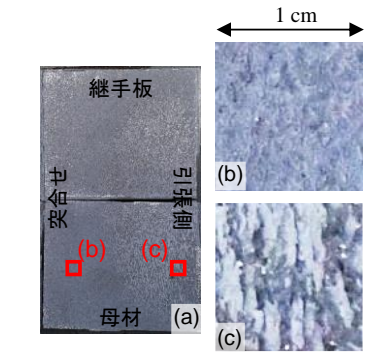


図4 試験体種 B 接着破壊面 : (a) 全体、(b) 中央部、(c) 端部

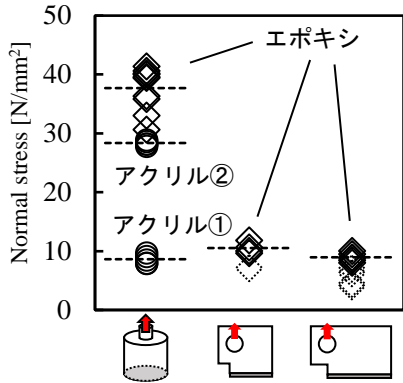


図5 試験体種 C、D 接着強度

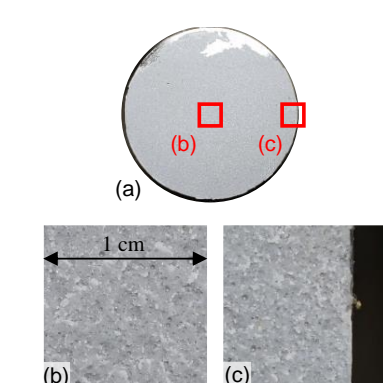


図6 試験体種 C 接着破壊面 : (a) 全体、(b) 中央部、(c) 端部

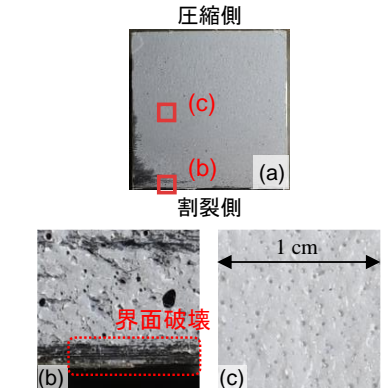


図7 試験体種 D 接着破壊面 : (a) 全体、(b) 端部、(c) 中央部

状とした。試験体種 D は、応力に勾配がある場合の引張強度を検証する目的で、JIS-K6853 を参考に、より大寸法の被着体を考案した。接着剤はエポキシだけを使用し、接着長さ (2 種) をパラメータとして、計 15 体用意した。

接着作業と養生を室温 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ で行った。いずれの試験体も予め、接着しない面をテープで養生し、接着する面をアセトンで脱脂した。エポキシは主剤と硬化剤を 2:1 の割合で混合し、アクリルは専用のアプリケータを介して、可使時間内に塗布し、対となる鋼材を組み合わせ、万力または自重で圧縮した状態で 1 週間以上養生した。

容量 1,000 kN の万能試験機を用い、室温下で試験体を単調载荷した。試験体種 D のみ、ユニバーサルジョイントを介した。試験体種 A は中央部に 1 基、試験体種 B は突合せ部の標点間に 2 基、試験体種 D は接着面が割裂する側と圧縮する側に 2 基ずつの変位計を設置した。

表 2 に、試験体種 A で得た、CT スキャンと引張試験の結果を示す。エポキシとアクリルの両方もも気泡量は 5% 未満で、弾性係数の測定値にも

たらした影響は小さかったと考えられるが、破壊断面に大きな気泡があり、エポキシでは破壊面以外でも大小の気泡が多数確認された。(図 2(a)参照)

図 3 に、渡辺¹⁾、三浦²⁾の結果とあわせて、試験体種 B で得た最大荷重と継手長さの関係を示す。アクリルは $L = 160 \text{ mm}$ まで継手長さに比例して耐力が上昇したが、エポキシは $L = 100 \text{ mm}$ を超えると単位面積当たりの接着強度が低下した。試験終了後に破壊面を観察すると、図 4 に示すように、いずれも凝集破壊が卓越し、端部で接着剤が十分に塑性化したとみられる白化を生じていた。また $L = 160 \text{ mm}$ の一部は、母材降伏ののちに接着破壊面が破壊した。母材の塑性伸びに端部の接着剤が耐えられず破壊した可能性があり、母材が降伏しなかったならば、もっと大きな強度を発現した可能性がある³⁾。

図 5 に、高野⁴⁾の結果とあわせて、試験体種 C と D の引張接着強度を示す。エポキシの試験体種 C の耐力は試験体種 D の 1/4 で、理論に基づく予想と一致した。試験終了後に破壊面を観察すると (図 6 と 7)、いずれも凝集破壊が卓越したが、試験体種 B で見られた白化は見られなかった。試験体種 D では、端部に界面破壊を生じた部分もあり、接着剤に勾配のある引張力がかかるとき、全体で凝集破壊が卓越しても、き裂の開始点に界面破壊を生じるとの指摘⁵⁾と整合した。

表 2 試験体種 A 実験結果

接着剤種	E [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	平均断面 充填率 [%]	最小断面 充填率 [%]
エポキシ	3,820	22.5	95.3	87.6
アクリル②	1,590	16.6	98.2	95.3

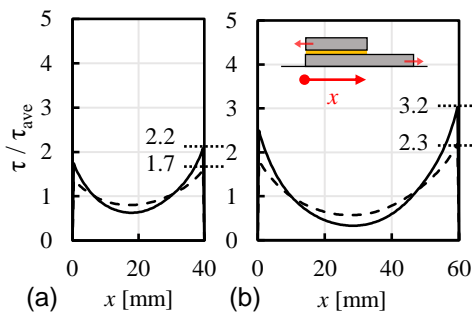


図 8 試験体種 B のせん断応力分布 : (a) $L = 80$ mm、(b) $L = 120$ mm

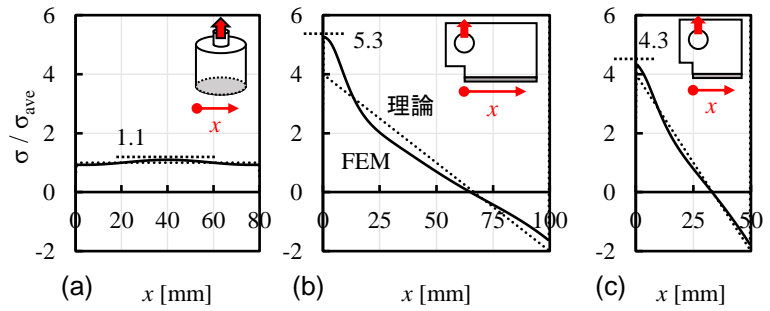


図 9 試験体種 C と D の垂直応力分布 : (a) C (b) D の $L = 100$ mm、(c) D の $L = 50$ mm

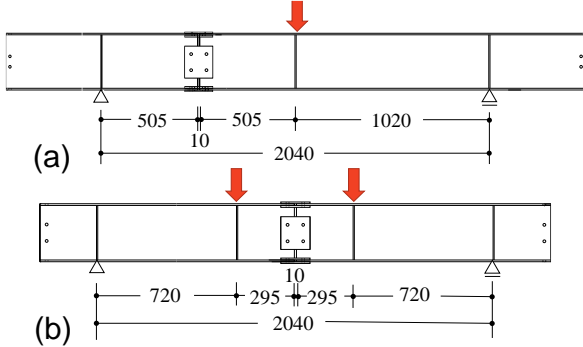


図 10 梁継手試験体 : (a) 3 点曲げ、(b) 4 点曲げ

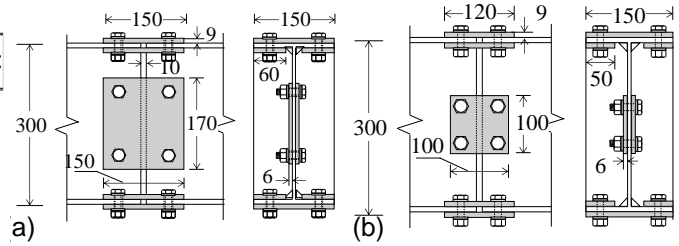


図 11 鋼梁継手試験 継手型 : (a) III、(b) IV

3. 材料・要素試験の有限要素法解析

試験体種 B、C、D における接着面の応力分布を検証するため、汎用プログラム ADINA を用いて有限要素法解析を行った。9 節点四角形要素を用い、試験体種 B と D を平面ひずみ、C を軸対称のモデルで弾性解析した。接着層厚さは 0.2 mm とし、応力が集中する端部の要素を、厚さ方向に最大 8 分割した。接着剤の弾性係数に表 2 の値を用い、ポアソン比 ν は 0.33 とした。各モデルに実験で得た破壊荷重を与え、接着層の中心線上の応力を読み取った。

図 8 に、試験体種 B のせん断応力分布を示す。継手長さが長いほど、端部に応力が集中し、実験で壊面の端部付近で接着剤の白化が確認されたことと符合する。実験では 100 mm まで強度が継手長さに比例したことから、応力は端部に集中したものの、ある程度は全長にわたり分配されていたと推測される。

図 9 に、試験体種 C と D の垂直応力分布を示す。図中に、母材が剛体で接着剤が弾性体だと仮定した場合の垂直応力分布を示す。解析は、理想化とほぼ同じ分布を示した。

4. 鋼梁継手試験

実用性のある接着接合の例として、図 10 に示す鋼梁継手の曲げせん断試験を行った。H-300×150×6.5×9 の

SN400B 鋼梁を 10 mm の間隙で突合せ、ウェブを 6 mm、フランジを 9 mm の鋼板で接着接合し、接着剤種 (エポキシ、アクリル①と②)、継手型 (図 11 に示す III と IV)、荷重方法 (三点曲げ、四点曲げ、長短 2 種類の片持ち)、接着箇所 (フランジとウェブの両方、フランジのみ、ウェブのみ) をパラメータとして、計 35 体の試験体を製作した (うち 18 体は、井上³⁾ と渡邊¹⁾ が実施)。接着面は、高力ボルトをレンチで手締めして圧着した。4 種類の荷重方法で、接合部の曲げモーメントとせん断の比率を変え、容量 500 kN の油圧サーボ試験機を用いて、室温下で静的荷重した。梁のたわみと継手部のずれを変位計で測定した。

図 12 に、荷重と荷重点変位の関係を示す。フランジとウェブの両方を接着した試験体は、いずれの接着剤も梁が先に降伏し、アクリル①はその後継手が破壊した。フランジを接着した試験体は、いずれも線形挙動を示したのちに継手が破壊したが、アクリル①でウェブのみ接着した試験体は、次第に剛性が低下した後に荷重が低下していく非線形挙動を示した。

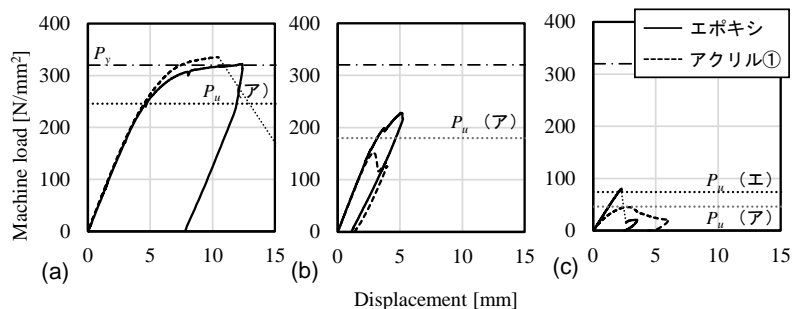


図 12 3 点曲げ・継手 III で得た荷重変形関係 (a) 両方、(b) フランジのみ、(c) ウェブのみ

5. 梁継手の耐力計算式

以下の仮定をおいて、鋼梁継手の耐力予測式を導いた；①変形は微小、②鋼材は剛体、③接着剤は弾性体、④せん断と曲げによる梁の相対回転変位 ϕ と相対鉛直変位 Δ は互いに独立で、図 13 に示す適合条件に従う、⑤曲げモーメント M とせん断力 Q は互いに独立。断面力 M と Q を変形量 ϕ と Δ の一次式として表せる。

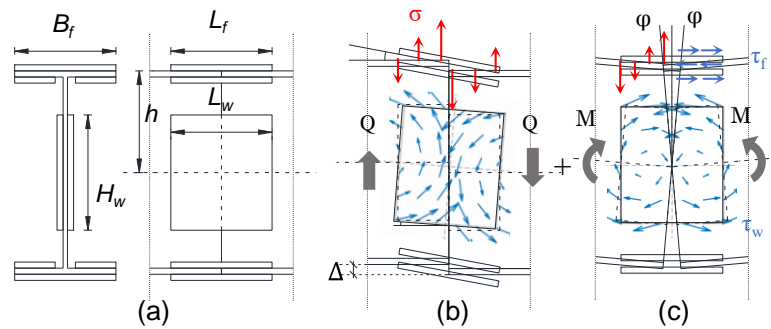


図 13 鋼梁継手試験 継手変形図
(a) 変形前、(b) せん断変形、(c) 曲げ変形

$$M = \left(\frac{1}{12} \left(\frac{1}{4} L_f^3 H_w + L_f H_w^3 \right) k_s \right) \phi + \left(\frac{1}{96} \left(\sum B_f \right) L_f^3 k_t + \frac{L_f}{2} \left(\sum B_f h^2 \right) k_s \right) \phi$$

$$Q = \left\{ \frac{L_w H_w}{8} \left(\frac{L_w^2 + 4H_w^2}{L_w^2 + H_w^2} \right) k_s + \frac{\left(\sum B_f \right) L_f}{16} k_t \right\} \Delta$$

ここに、 k_t は接着層の引張剛性、 k_s は接着層のせん断剛性で、 $k_s = k_t/2(1 + \nu)$ と関係づけられる。

接着層のせん断応力 τ と引張応力 σ が、材料実験で得たせん断強度（エポキシ 26.3 N/mm²、アクリル① 16.0 N/mm²、アクリル② 25.0 N/mm²）または引張強度（エポキシ 36.2 N/mm²、アクリル① 14.2 N/mm²、アクリル② 26.8 N/mm²）に達したときに接合部が破壊すると仮定すると、継手破壊時の M と Q の連成破壊条件が得られる。図 14 に、 MQ 連成条件に、実験で得た破壊点を重ねる。ウェブのみ接着した試験体は、予測に近い条件で破壊した。フランジのみ、またはフランジとウェブの両方を接着した試験体は、エポキシでは予測より低い荷重で破壊したが、アクリル①と②では、3点曲げ載荷したものは予測値と同等もしくは超える値を示した。3点曲げではフランジ部接着剤に垂直応力とせん断応力の複合応力状態となっているが、このときの材料強度がエポキシとアクリルで異なる可能性がある。

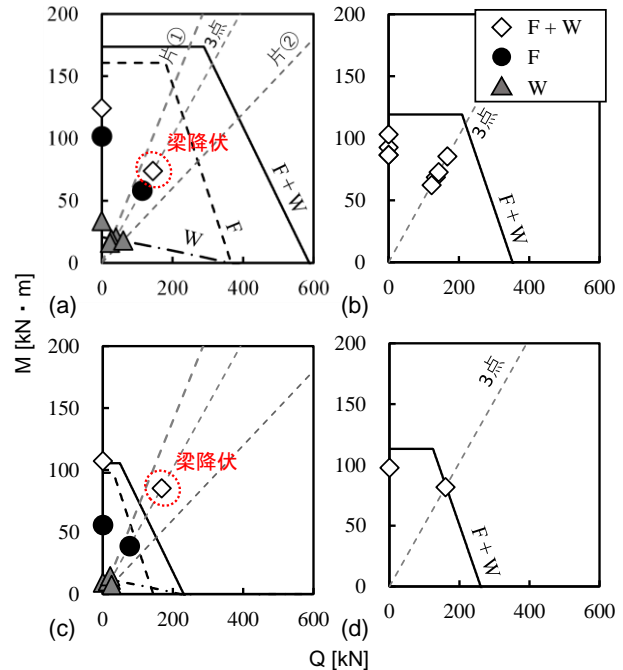


図 14 QM 図
(a) エポキシ/継手Ⅲ、(b) エポキシ/継手Ⅳ
(c) アクリル①/継手Ⅲ、(d) アクリル②/継手Ⅳ、

況下で高い性能を示す可能性がある。

6. 結論

鋼構造の接着接合について、材料・要素の実験・数値解析と鋼梁継手試験を行い、一連の結果から耐力予測式の導出を行った。結論を以下に示す。

- 1) 割裂試験体は、引張試験体に対して面積当たりの強度が 1/4 程度となった。
- 2) 接着剤はせん断に対してはある程度全長にわたり応力が分配されると推測されたが、割裂力に対しては、被着体が十分に剛である場合、ほぼ線形に応力が分布する。
- 3) ウェブ継手の耐力は、接着剤種に関わらず予測値に近い値を示した。フランジ継手は、曲げとせん断が同時にかかる場合に、アクリルは高い性能を示した。アクリルは複合応力状

参考文献

- 1) 渡邊洋介: 鋼材の接着接合部のせん断・引張と剥離に関する実験 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 781-782, 2019.7
- 2) 三浦葉子: 鋼材の二面せん断接着継手の耐力に母材降伏と接着長さが及ぼす影響, 北海道大学, 2022 年度卒業論文, 2023.3
- 3) 井上桂輔: 構造用接着剤を用いた鋼梁継手の曲げせん断実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, pp. 262-269, 2015.11
- 4) 高野春菜: 鋼材の接着接合部の基本特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 25, pp. 594-601, 2017
- 5) M.Shahid: Effect of surface roughness on the strength of cleavage joints, International Journal of Adhesion & Adhesives 22, pp. 235-244, 2002