

鋼材の接着接合部のせん断・引張と剥離に関する実験

An Experimental Study on the Shear, Tension, and Peeling Strength of Adhesively Bonded Steel-to-Steel 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 高野春菜

Abstract

A series of shear, tension, and peeling tests were conducted to examine the strength of adhesively bonded steel-to-steel joints. The effects of loading condition, adhesive type (epoxy or acrylic), surface finish of steel (blast cleaned, galvanized, cold rolled), adhesive thickness, adhesion length, test temperature, etc. were examined from the test results. Joints with epoxy adhesive exhibited brittle failure while those with acrylic exhibited some ductility. Joints with epoxy adhesive were sensitive to galvanization. In comparison, joints with acrylic adhesive were insensitive to surface finish or loading condition.

Keywords: adhesive joint, structural adhesive, tensile, shear

1. はじめに

建築鋼構造への適用に耐えうる強度の高い構造用接着剤が、すでに商品化されている。鋼構造分野における接着剤の適用として、耐震補強ブレースの端部接合¹⁾や橋桁の腐食部への当て板補修²⁾、梁が降伏しない部位の梁継手³⁾などが検討されている。いずれも、高力ボルト摩擦接合や溶接を接着接合に代えた例であり、接着接合にせん断応力の伝達を期待した適用例である。しかし、現段階では、主要構造部への適用例はほぼ皆無である。接着接合の実用を阻む原因として、破壊性状が極めて脆性的であること、力学的特性が十分に解明できていないことなどが挙げられる。

そこで本研究では、普通鋼材やめっき鋼材を接着接合して形成した部材を建築構造物に用いることを想定して、接着剤種や被着材の表面状態、被着材の寸法等をパラメータに、接着剤のせん断強度、引張強度、剥離強度を検証するための試験を行った。接着剤には、構造用接着剤を代表するエポキシ樹脂系とアクリル樹脂系を使用した。

2. 実験計画

図1に示す6種類の試験体を用いて、引張せん断接着強さ試験(試験体種I)、ビス併用一面せん断試験(同II)、引張接着強さ試験(同III)、剥離接着強さ試験(同IV)を行った。表1に主要パラメータを示す。

試験体種Iは、純せん断強度を検証することを目的とした。対応する規格試験JIS K6850は一面せん断試験だが、剥離応力をなるべく排除するために二面せん断試験を選択した。試験体種Iaは、ショットブラスト処理を施したSS400の厚板を被着材とし、接着剤種と接着長さ、温度をパラメータとし

て計63体用意した。試験体種Ibは、板厚3.2mmのめっき鋼板SGH400-Z12(以下Z12と略記)を使用し、目標接着厚をパラメータとして計3体用意した。試験体種Icは、ショットブラスト処理を施したSPHC、SS400のミガキ材、めっき鋼板

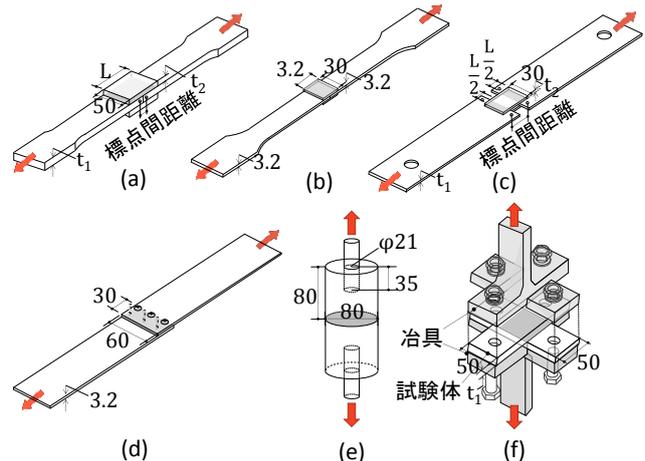


図1 試験体寸法 [寸法 : mm] :

(a) 試験体種 Ia; (b) 試験体種 Ib; (c) 試験体種 Ic;
(d) 試験体種 II; (e) 試験体種 III; (f) 試験体種 IVと治具

表1 主要パラメータ

種	鋼材	接着剤	板厚 (mm)		接着長さ L (mm)	その他	n
			t ₁	t ₂			
I _a	SS400*	エポキシ アクリル	9	6	80,	温度(°C) (20, 60, 90)	5体または 3体ずつ 合計63体
			19	12	160, 240		
I _b	SGH400-Z12	エポキシ	3.2	3.2	30	接着厚 (mm) (0.2, 0.5, 1.0)	1体ずつ 合計3体
I _c	SPHC*	エポキシ アクリル	3.2	3.2	30,	接着厚 (mm) (0.2, 0.5, 1.0)	3体ずつ 合計66体
	ミガキ材		2.3	2.3	50,		
	SGH400-K18 SGH400-Z27		2.3	1.6	80		
II	SGH400-K27	エポキシ アクリル	3.2	—	30	ビス本数(本) (0, 2, 4, 6, 8)	3体ずつ 合計42体
III	SS400*	エポキシ アクリル	—	—	—	—	5体ずつ 合計10体
IV	SS400*	エポキシ アクリル	12	—	—	接着厚 (mm) (0.2, 0.5, 1.0)	3体ずつ 合計72体
	SGH400-K18 SGH400-K27		6 3.2	—			

*ショットブラスト処理を施した鋼材

SGH400-K18 と Z27（以下 K18、Z27 と略記）を使用し、接着剤種と鋼材種、接着長さ、継手厚、母材厚、目標接着厚をパラメータとして、3 体ずつ計 66 体用意した。接着厚は、目標厚さに応じた径のガラスビーズを接着剤にはさむことで調整した。

試験体種Ⅱは、接着剤が凝固した後にビスを打ち、接着剤とビスを併用した接合部の強度を検証した。被着材にめっき鋼板 SGH400-K27 を、ビスは薄板軽量形鋼の接合に使用される径 4.8 mm のドリリングタッピンねじを使用し、接着剤種とビスの本数をパラメータとして 3 体ずつ計 42 体用意した。

試験体種Ⅲは、純引張強度を検証することを目的に、接着層になるべく様な垂直応力を負荷させる形状を考案した。SS400 丸鋼の対で構成され、荷重の作用方向に直交する面を接着接合した。接着面の反対側にネジ孔を設け、PC 鋼棒を介して丸鋼を中心引張した。接着剤種をパラメータとして 5 体ずつ計 10 体用意した。

試験体種Ⅳは、母材の面外変形により接着層に剥離応力を生じる形状とした。規格試験 JIS K6854 と比較して、鋼構造接合部に生じる剥離応力をより正確に表現するべく、スポット溶接の強度試験（JIS Z3137）を参考に考案した。十字に重ね合わせて接着した鋼板をボルトで専用治具に固定し、引張荷重を加えた。被着材に SS400 と K18 を使用し、接着剤種と鋼材種、板厚、目標接着厚をパラメータとして、3 体ずつ計 54 体用意した。

すべての試験体において、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。エポキシ系接着剤は主剤と硬化剤を重量比 1:1 ないし 2:1 で混合し、アクリル系接着剤は専用のアプリケーションを用い、それぞれの可使時間（混合開始から使用可能な時間）内に接着剤を塗布し、鋼材を組み合わせた。万力で圧縮した状態で、室温 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ で 1 週間以上養生した。

試験には容量 1,000 kN の万能試験機を用い、室温下で単調引張載荷した。試験体種 Ic とⅣは、ユニバーサルジョイントを介して載荷した。試験体種 Ib、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳはクロスヘッド変位を 2 基の変位計で計測し、試験体種 Ia と Ic はクロスヘッド変位に

加え、図 1 に示す母材突き合わせ部の標点間距離を 2 基の変位計で計測した。

3. 実験結果

図 2 に、試験体種 Ia で測定した、荷重と標点間変位の関係を示す。エポキシ系接着剤では、破壊に至るまではほぼ線形挙動を示し、最大荷重をとった瞬間に片側の継手板が勢いよく吹き飛び、母材が分離する極めて脆性的な破壊を示した。アクリル系接着剤では、徐々に剛性が低下する非線形挙動を示した。破壊時に最大荷重をとったが、両側の継手板が片方の母材に接着したままの状態 で分離した。

図 3 に、試験体種Ⅱで得た荷重とクロスヘッド変位の関係を示す。ビスのみの試験体では、最大荷重に達した後ビスが順番にせん断破壊し、段階的に荷重が落ちた。ビスの滑りはなかった。接着剤とビスを併用した場合、接着剤が先に破壊し、一度荷重が低下したあと、ビスのみとほとんど同じ挙動を示した。いずれの接着剤においても、ビスのみで最大荷重が決まった。

図 4 に、試験体種Ⅲで測定した、荷重とクロスヘッド変位の関係を示す。接着剤種によらず、図中に○印で示す時点で接着面が瞬時に分離して破壊するまで線形挙動を示し、破壊した時点で最大荷重をとった。ここに図示しないが、試験体種Ⅳの挙動も、試験体種Ⅲと同様であった。

4. 考察

図 5 に、試験体種 Ia のうち、接着長さをパラメータとした試験体で得た、最大荷重を接着面積で除した引張せん断接着強さと接着長さの関係を示す。図中に、メーカーが提示する鋼板と亜鉛鉄板に対する接着強さの参考値を併せて示す。エポキシ系接着剤を用いた試験体では、接着長さが長くなるほど強度が低下し、接着長さ $L=240 \text{ mm}$ でメーカー参考値をわずかに下まわった。写真表 1 に、接着破壊面の例を接着長さごとに比較する。図 6 に示すように、継手板端部を A、母材端部を B として見開きで示す。エポキシ系接着剤は、 $L=80 \text{ mm}$ では破壊面が比較的滑らかで均一であったが、 $L=160, 240 \text{ mm}$ では荷重の作用方向に不均一で、表面が粗くな

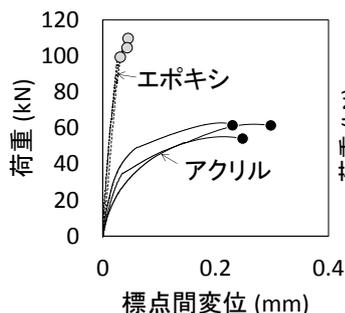


図2 荷重・変形関係 (I_a, L = 80 mm)

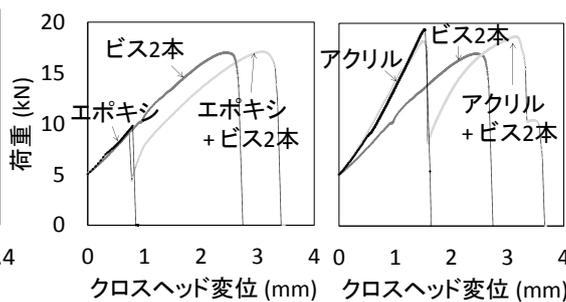


図3 荷重・変形関係 (Ⅱ)

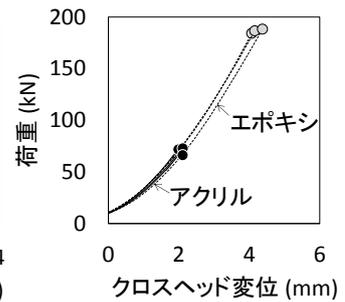


図4 荷重・変形関係 (Ⅲ)

った。Karachalios ら⁴⁾は、破壊面が滑らかに見える部分は延性破壊であり、凸凹になっている部分は脆性破壊の痕だと推察している。つまり、エポキシ系接着剤を用いた $L = 160, 240 \text{ mm}$ の試験体は、接着端部 (A 側) が降伏したあと、一気に破壊が進行したと考えられる。脆性的なエポキシ系接着剤では応力再分配ができないために、若干でも応力が高い接着端が一旦破壊すると瞬間的に全体に進行すると考えられる。アクリル系接着剤を用いた試験体は比較的寸法効果が小さく、破壊面は全体的に均一であった。しかし、写真表 1 に示す $L=240 \text{ mm}$ の継手板端部 (A) と母材端部 (B) を電子顕微鏡で撮影した拡大写真で比較すると、継手板端部に白化が見られた (写真 1)。白く見えるのは、クレーズ発生部と未発生部で屈折率が異なることによる、光の散乱のためであると考えられる⁵⁾。よって、アクリル系接着剤の場合も継手板端部から破壊が始まったと推測できる。

図 7 に、接着長さ 30 mm、板厚 3.2 mm の試験体種 Ib と Ic で得た引張せん断接着強さを示す。エポキシ系接着剤を用いた試験体の強度は、被着材がショットブラスト処理、ミガキ材、Z12 の場合は参考値を超えたが、K18 と Z27 では参考値を大きく下まわり、鋼材の表面状態の影響を明瞭に受けた。接着剤の破壊形態は、接着剤と被着材の界面に生ずる界面破壊と、接着剤の内部で破壊する凝集破壊とに大別される。界面破壊は被着材の表面状態や界面

での結合力の不足に起因し、凝集破壊は界面での結合力が高かった場合に、接着剤の性能が十分に発揮された結果だとされる⁶⁾。エポキシ系接着剤は、母材がショットブラスト処理、ミガキ材、Z12 の場合は、界面破壊と凝集破壊の両方を含む混合破壊を示し、K18 または Z27 の場合は、ほぼ完全に界面破壊を示した。エポキシ系接着剤の破壊形態は、鋼材種による接着強さの大小 (図 7 参照) と符合した。既往の研究⁷⁾では、めっきの表面に付着する微量の不純物や汚染金属 (Zn、C、Al、Pb、Mg などの酸化物) が、接着接合に悪影響をおよぼすことが知られている。めっき鋼板表面の化学組成が接着強さに影響を与えた可能性がある。

図 8 に、試験体種 Ia のうち試験温度をパラメータとした試験体で得た引張せん断接着強さと試験温度の関係を、既往の実験結果^{8), 9), 10)}と併せて示す。いずれの接着剤でも、試験温度と接着強さに明瞭な負の相関関係があることを確認した。

図 9 に、試験体種 Ic で得た引張せん断接着強さと接着厚の関係を示す。接着剤種によらず、接着厚が薄いほど接着強さが高い傾向があった。エポキシ系接着剤を用いた試験体に強度のばらつきが大きかったことは、ほぼ完全に界面破壊したことと対応する。

図 10 に、試験体種 III と IV で得た最大荷重を接着面積で除した強度の平均値を比較する。前者は引張強さ、後者は剥離強さの指標である。図中に、引張強さの参考値 (JIS K7161 による) を示す。エポキ

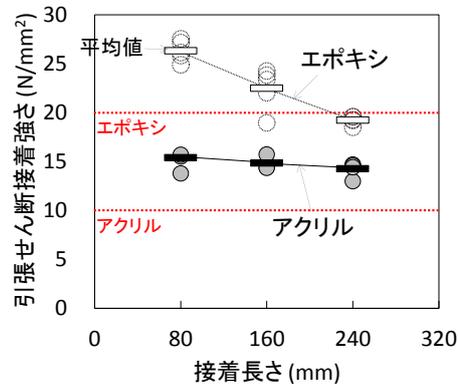


図5 引張せん断接着強さ (I_a)

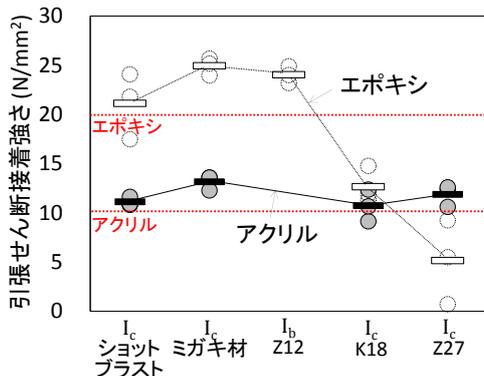


図7 引張せん断接着強さ (I_b, I_c)

写真表 1 接着破壊面 (試験体種 Ia)

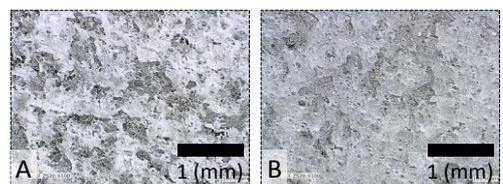
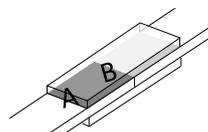
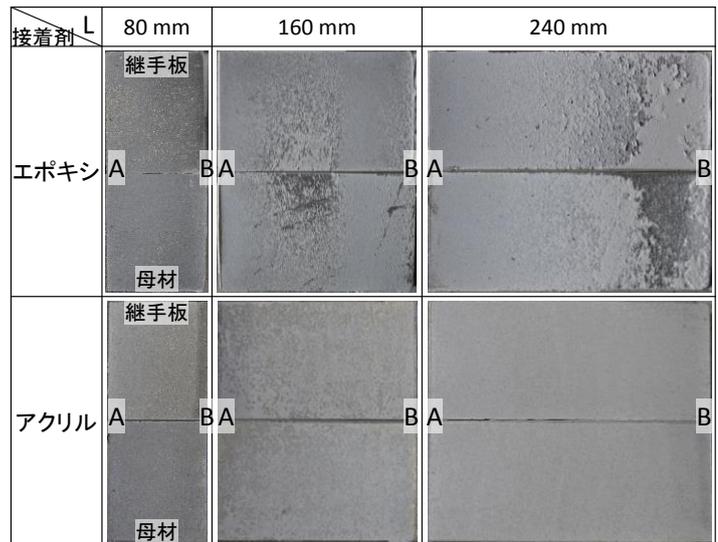


図6 接着破壊面の表し方

写真 1 拡大写真 (アクリル, $L=240 \text{ mm}$)

シ系接着剤では、一様垂直応力を受けた試験体種Ⅲでは大きな強度を得たが、母材の面外変形により、接着面の角部に剥離応力を生じた試験体種Ⅳでは、試験体種Ⅲと比較して板厚 12 mm の場合で強度が 4 分の 1、6 mm の場合で 8 分の 1 であった。同じ板厚 6 mm で被着材に SS400 と K18 を用いた試験体を比較すると、後者の方が著しく小さい強度を示した。K18 を用いた試験体では界面破壊が卓越しており、剥離応力に対しても、エポキシ系接着剤と亜鉛めっきの相性が悪いと考えられる。アクリル系接着剤では、すべての試験体で凝集破壊が卓越しており、エポキシ系接着剤と比べて、試験体種や板厚、被着材表面の影響が小さかった。写真 2 に、板厚 6 mm の SS400 を用いた試験体種Ⅳの接着破壊面の例と、電子顕微鏡で撮影した拡大写真を示す。エポキシ系接着剤では、角部は細かく、中央部は粗くなっていた。引張せん断接着強さ試験と同様に、粗い部分は脆性破壊であると考えられる。アクリル系接着剤では、角部に白化した空洞を観察した。この空洞がつながり、クラックとなり、破壊に至ったと考えられる。このことから、いずれの接着剤も、角部が破壊の起点となったと推測できる。

5. まとめ

実用的な鋼材の接着接合部における応力状態を表現した様々な試験方法を考案し、合計 256 体の試

験を行い、接着剤種や被着材の表面状態等が接着強さに及ぼす影響を検証した。エポキシ系接着剤とアクリル系接着剤を比較すると、エポキシ系接着剤は引張せん断接着強さの寸法効果が大きく、純引張強度に比べ剥離接着強さが著しく小さかった。応力状態によらず被着材のめっきの影響を受けやすく、界面破壊が卓越した。いずれの接着剤種も、せん断に対しては、温度が高いほど、また接着厚が厚いほど、接着強さが小さい傾向があった。

参考文献

- 1) 曾田五月也ほか:日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1003, 2012.9
- 2) 丹波寛夫ほか:構造工学論文集, Vol.60A, pp.703-714, 2014.6
- 3) 渡邊洋介ほか:鋼構造年次論文報告集, pp. 602-609, 2017.11
- 4) E.F. Karachalios et al. :International Journal of Adhesion and Adhesives, 43 pp. 81-95, 2013
- 5) 本間精一:プラスチック材料大全, 日刊工業新聞社, pp.282-283, 2015
- 6) 柳澤誠一:接着・解体技術総覧—資源・環境・エネルギー, エヌジーティー, pp. 248-253, 2011
- 7) 中尾一宗:高分子刊行会 35 巻 4 号 pp.149-153, 1991
- 8) Y.Hu et al. :Use of Adhesives to Retrofit Out-of-Plane Distortion Induced Fatigue Cracks, Final Report, pp.1-186, 2006.2
- 9) 若生祐介ほか:日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1369-1370, 2013.8
- 10) 寺田博昌ほか:鋼構造への接着接合の適用, 接着接合小委員会報告, pp. 15-26, 1993.11

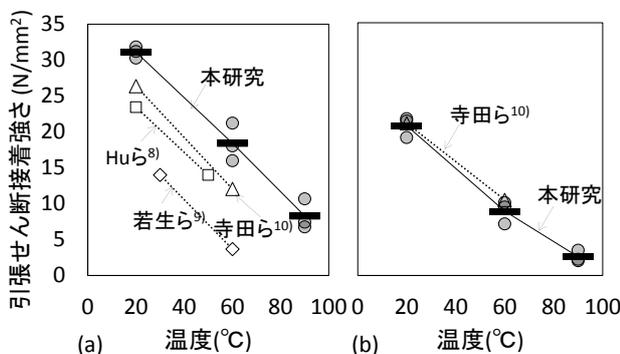


図8 温度と引張せん断接着強さの関係:
(a) エポキシ; (b) アクリル

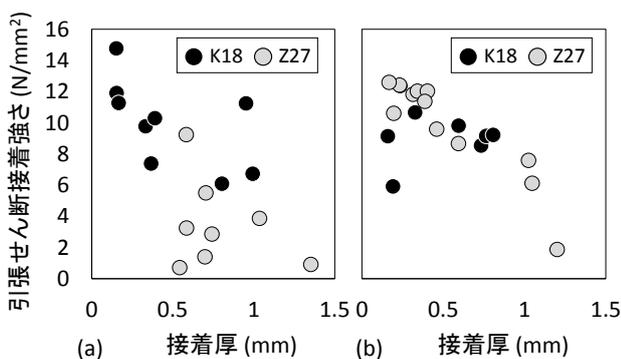
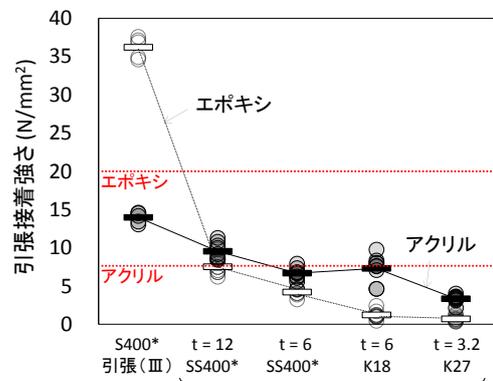


図9 接着厚と引張せん断接着強さの関係:
(a) エポキシ; (b) アクリル



*ショットブラスト処理を施した鋼板

図10 引張接着強さの比較

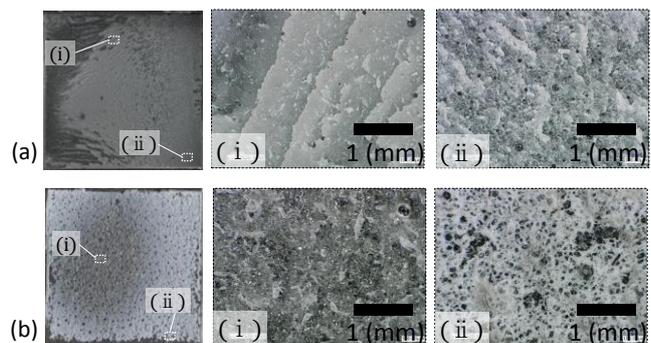


写真 2 接着破壊面と 100 倍拡大写真:
(a) エポキシ; (b) アクリル