

鋼材の接着接合部の耐力に関する実験

An Experimental Study on the 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 渡邊洋介

Abstract

A series of shear, tension, and peeling tests were conducted to study the strength of adhesively bonded steel-to-steel joints. The effect of loading condition, adhesive type (epoxy or acrylic), surface finish of steel (blast cleaned, galvanized, cold rolled or milled), adhesion length, etc., on the strength of the joints was examined. Application to real connections were studied by two examples: galvanized steel connected by combined use of adhesive and self-tapping screws; and I-section steel beams spliced using adhesive. Failure modes and strength of the joints were examined to understand the potential benefits and limitations of such use.

Keywords: Adhesive joint; Structural adhesive; Shear; Peel; Beam splices.

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例として、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⁾などが検討されているが、主要構造部への適用例は極めて少ない。

本研究では、普通鋼材やめっき鋼板を接着接合して形成した要素を建築構造物に用いることを想定して、接着剤種や鋼材の表面状態、鋼材の寸法等が、接着剤のせん断強度、引張強度、剥離強度に与える影響を検証するための各種荷重実験を行った。また、接着接合の実用化に向けて、接着継手にビスを併用した一面せん断実験、および継手板を高力ボルトでなく接着剤で接合した H 形鋼梁継手の荷重実験を行った。

として計 26 体用意した。機械研磨の平均表面粗さは $0.4 \mu\text{m}$ 程度であった。アクリル②は、接着長さ ($L=80、160、240 \text{ mm}$) をパラメータとして 5 体ずつ計 15 体用意した。試験体種 B は、板厚 3.2 mm のめっき鋼板 SGH400-K27 を使用し、砂紙研

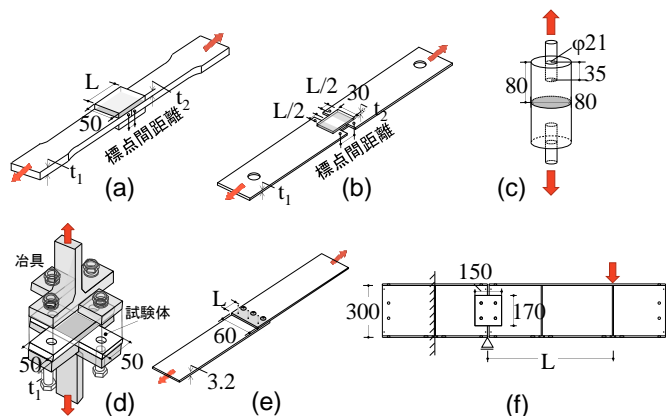


図 1 試験体寸法 (寸法 : mm) :

- (a) 試験体種 A; (b) 試験体種 B; (c) 試験体種 C;
(d) 試験体種 D; (e) 試験体種 E; (f) 試験体種 F

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 A と B)、引張接着強さ試験 (同 C)、剥離接着強さ試験 (同 D)、ビス併用一面せん断試験 (同 E)、鋼梁継手試験 (同 F) を行った。試験体種 A から E は、高野³⁾と同じ試験である。接着剤には、エポキシ樹脂系接着剤 (コニシ(株)製 E258R、以下エポキシ)、アクリル樹脂系接着剤 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) を使用した。表 1 に主要パラメータを示す。

試験体種 A と B は、純せん断強度を検証することを目的に、なるべく剥離応力を生じない二面せん断試験を選択した。試験体種 A は、SS400 の厚板を使用した。表面状態 (ショットブラスト処理と機械研磨) と接着剤種 (3 種) をパラメータ

表 1 主要パラメータ

種	鋼材種	接着剤	板厚 (mm)		L (mm)	表面状態	その他	n
			t ₁	t ₂				
A	SS400		9 19	6 12	80 160 240	ショット/ 機械研磨	—	41
B	SGH400-K27	エポキシ アクリル①	3.2	3.2	30	砂紙研磨 あり・なし	—	18
C	SS400	アクリル②	—	—	—	砂紙研磨 あり・なし	—	20
D	SGH400-K27		3.2	3.2	—	砂紙研磨 あり・なし	—	18
E	SGH400-K27	エポキシ アクリル①	3.2	3.2	30 60	砂紙研磨 あり・なし	ビス 0, 2, 4, 6, 8 本	51
F	SN400B と SS400	エポキシ アクリル①	—	—	300 700	ショット	—	4

磨あり・なしと接着剤種（3種）をパラメータとして、3体ずつ計18体用意した。砂紙研磨とは、溶融亜鉛めっき鋼材の表面を粗度120のサンドペーパーで丁寧に研磨したことを意味する。

試験体種C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生じる形状とした。SS400の丸鋼の対で構成され、荷重の作用方向に直行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（3種）と表面状態をパラメータとして、5体ずつ計20体用意した。

試験体種D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。板厚3.2mmのめっき鋼板SGH400-K27を使用し、砂紙研磨あり・なし、接着剤種をパラメータとして3体ずつ計12体用意した。

試験体種Eは、一面せん断試験を選択し、接着剤塗布の1週間後にビスをうち、接着剤とビスを併用した接合部の強度を検証した。鋼材には3.2mmのめっき鋼板SGH400-K27を使用した。ビスは薄板計量形鋼の接合に使用される径4.8mm、長さ25mmのドリリングタッピングねじを使用した。砂紙研磨あり・なし、ビスの本数、接着剤種（エポキシとアクリル①）、接着長さをパラメータとして3体ずつ計51体用意した。

試験体種Fは、H-300×150×6.5×9のSN400B鋼材を10mmの間隙で突合せ、ウェブに板厚6mmのSS400鋼板を介して、接着接合した梁であった。試験体の一端を高力ボルトで固定し、片持ち梁の形式で載荷した。接着剤種（エポキシとアクリル①）、継手板から載荷点までの距離をパラメータとして、計4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。エポキシは主剤と硬化剤を重量比2:1の割合で混合し、アクリル①と②は専用のアプリケーションターを使用し、それぞれの可使用時間内に接着剤を塗布し、鋼材を組み合わせた。接着剤塗布から試験まで、1週間以上、室温で養生した。

試験体種AからEは容量1,000kN万能試験機、試験体種Fは容量750kNの油圧サーボ試験機を用いて、室温下で載荷した。試験体種BとDは、ユニバーサルジョイントを介して載荷した。試験体種CからEでは、変位を2基の変位計で計測し、試験体種AとBでは、クロスヘッド変位に加え、図1に示す母材突合せ部の標点間距離を2基

の変位計で計測した。試験体種Fでは、母材の変位と、母材に対する継手板の変位を、それぞれ6基、計12基の変位計で計測した。

3. 実験結果

図2に、試験体種Aの $L = 80\text{ mm}$ で測定した、荷重と標点間変位の関係を示す。エポキシを使用した試験体は、破壊に至るまでほぼ線形挙動を示し、最大荷重に至った瞬間（図に示す○印）に破壊した。片側の継手板が勢いよく吹き飛び、瞬時に母材が分離する極めて脆性的な破壊をした。アクリル①を使用した試験体は、徐々に剛性が低下する非線形挙動を示し、やはり最大荷重に至った瞬間に破壊した。表面を機械研磨した場合はショットブラストした場合と比較すると、エポキシでは耐力が同等だが、アクリル①では耐力が約半分だった。試験終了後に破壊面を観察すると、エポキシとショットブラストを施したアクリル①では、凝集破壊（接着層の内部で生じる破壊）が卓越していたが、機械研磨したアクリル①では、界面破壊（接着剤と被着材の界面で生じる破壊）が卓越していた。鋼材の表面を滑らかにすることで、機械的接着（投錨効果）が弱まった結果だと考えられる。

図3に、試験体種Bで測定した、荷重と標点間変位の関係を示す。砂紙研磨あり・なしは、耐力に影響を及ぼさなかった。せん断応力に対しては、めっき鋼板に砂紙研磨を施す効果は小さかった。

図4に、試験体種Dで測定した、荷重とクロスヘッド変位の関係を示す。エポキシでは、砂紙研

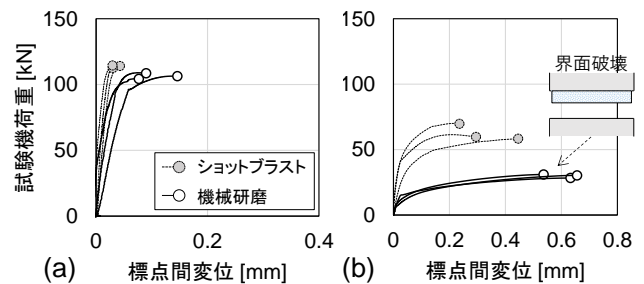


図2 荷重と変位の関係（試験体種A）：
(a) エポキシ; (b) アクリル①

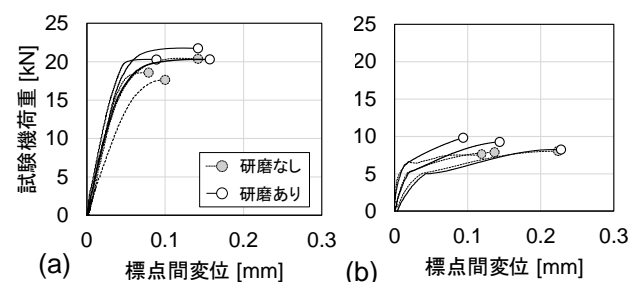


図3 荷重と変位の関係（試験体種B）：
(a) エポキシ; (b) アクリル①

磨あり・なしで、耐力に 2.5 倍の違いがあった。アクリル①では、砂紙研磨あり・なしは耐力に有意な差はなかった。エポキシでは、めっき鋼板に砂紙研磨を施す効果が大きく、接着破壊面を観察すると、砂紙研磨なしの試験体では、界面破壊が卓越し、砂紙研磨ありでは、凝集破壊が卓越した。

図 5 と 6 に、試験体種 E の $L=60\text{ mm}$ で測定した、荷重とクロスヘッド変位の関係を示す。図 5 にエポキシないしアクリル①の、接着剤のみによる試験体を、図 6 に接着剤とビスを併用した例を、ビス 2 本とビス 4 本について示す。接着剤のみによる試験体は、図 2 で見た二面せん断試験の場合と同様に、破壊に至るまで線形挙動を示した。エポキシでは、砂紙研磨で耐力が 2.6 倍となったが、アクリル①では、砂紙研磨の影響がなかった。ビスを 2 本併用した試験体は、接着剤が先行破壊して耐力が低下したあと、ビスのせん断破断で耐力を喪失した。ビス 4 本を併用した場合、エポキシでは、極大値を 3 回記録し、そのうち 2 回目が最大であった。2 回目の極大値で接着剤が完全に破壊し、3 回目の極大値でビスがせん断破断した。エポキシでもアクリル①でも、ビス 6 本および 8 本を併用した試験体は、同様の挙動を示した。

図 7 に、試験体種 F で測定した、荷重と載荷点の相対変位の関係を示す。エポキシを使用した試験体は、どちらも破壊に至るまで線形挙動を示した。アクリル①を使用した試験体は、次第に剛性が低下する非線形挙動を示した。 $L=300\text{ mm}$ の試験体は、変位が 20 mm を超えた時点で载荷を中止した。試験終了後、簡単に継手を解体できたので、载荷中に接着層が破壊していたと思われる。

4. 考察

写真 1 に、エポキシを用いた試験体種 E について、試験終了後の接着破壊面を示す。エポキシについて、砂紙研磨あり・なしのビスなし、砂紙研磨ありのビス 2 本と 4 本の試験体を比較する。砂紙研磨なしでは界面破壊が、砂紙研磨ありでは凝集破壊が卓越した。一面せん断試験では、試験体の変形に伴って剥離応力を生じるので、剥離に弱いエポキシでは、砂紙研磨の効果が高かった。図 8 に、 $L=60\text{ mm}$ でビスを併用した試験体について（ビスなしは 0 とし

て示す）、図 7 で確認された極大値①、②、③を接着剤種ごとに示す。参考として、高野³⁾が、 $L=300\text{ mm}$ の試験体について得たビスのみの耐力も示す。極大値①は、接着剤のみの耐力とほぼ一致した。多くの場合で、極大値②が極大値①より大きかったことに注目したい。写真 1 に示すビス 4 本の試験体で、ビスに囲まれた部分で、接着剤の破壊面

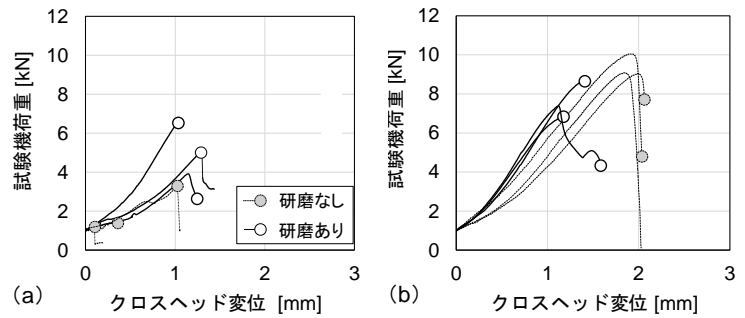


図 4 荷重と変位の関係（試験体種 D）：
(a) エポキシ; (b) アクリル①

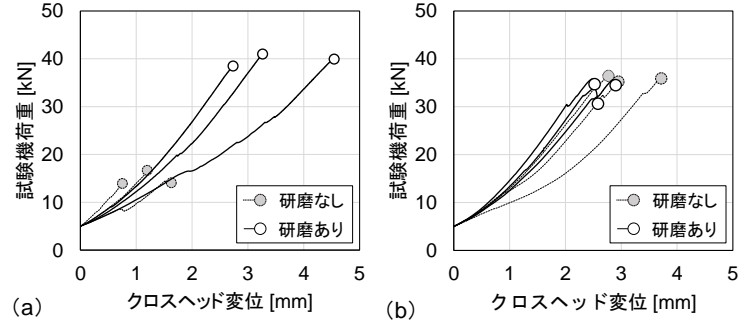


図 5 荷重と変位の関係（試験体種 E）：
(a) エポキシのみ; (b) アクリル①のみ

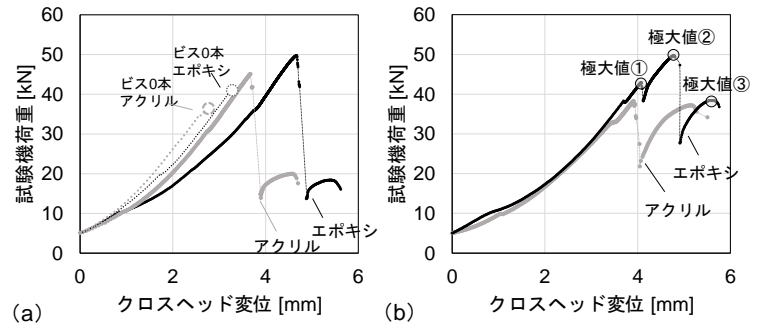


図 6 荷重と変位の関係（試験体種 E）：
(a) ビス 2 本; (b) ビス 4 本

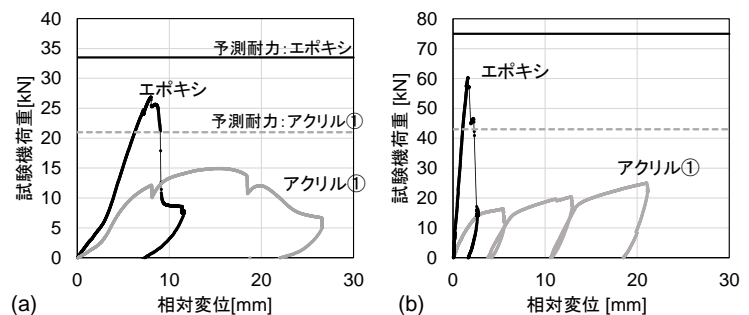


図 7 荷重と変位の関係（試験体種 F）：
(a) $L=700\text{ mm}$; (b) $L=300\text{ mm}$

がその外側より粗くなっていたことは、極大値①で外側の接着剤が破壊したあと、ビスで囲まれた部分が極大値②まで抵抗した結果だと考えられる。つまり、破壊段階は、三段階で進行し、まず、接着剤が先行破壊したが(極大値①)、ビスによって接着剤の破壊が止められ、ビスと接着剤がともに荷重に抵抗した。ビスで囲まれた部分の接着剤が破壊した(極大値②)あと、ビスのみで荷重に抵抗し、最後にビスがせん断破壊した(極大値③)。しかし、極大値②の値は、ビスの本数に比例しなかった。極大値②が、接着剤のみで決定された極大値①とビスのみで決定された極大値③を超えたのは、エポキシとビス4本を併用したときに限られた。

図9に、高野³⁾が $L = 30 \text{ mm}$ 、砂紙研磨なしでエポキシを用いた試験体について得た、同試験の結果を示す。接着剤のみの耐力は10 kNで、ビス2本の耐力より低かった。どの試験体も、極大値①で接着剤が破壊したあと、ビスのみで抵抗し、極大値②でビスが破壊した。ビスで囲まれた面積が小さすぎたために、ビスによって接着剤の破壊が止められなかった。原賀ら⁴⁾は、接着剤とリベットを併用した一面せん断実験で、接着剤に比べてリベットの耐力が著しく低い場合に、耐力への相乗効果を確認できなかった。以上から、接着剤がビスの耐力を上まわり、かつ、ビスに囲まれた接着面積を十分に確保した場合、ある程度、耐力の相乗効果を期待できる。

5. まとめ

鋼材の接着接合部について、代表的な応力状態を表現した試験を実施し、接着剤種や鋼材の表面状態等が接着強さにおよぼす影響を確認し、以下の知見を得た。

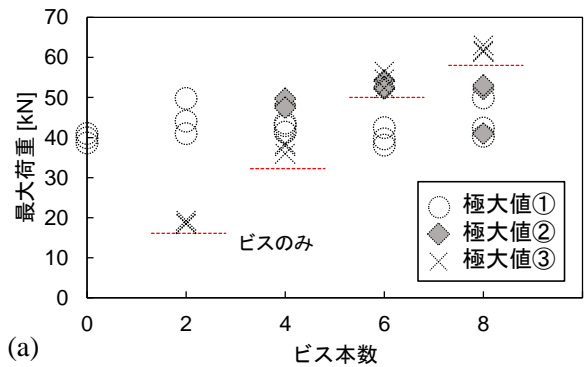
- 1) アクリル①は、鋼材表面を機械研磨した場合に強度が約半分になったため、機械的接着(投錨効果)への依存度が高いと考えられる。
- 2) エポキシは、表面をサンドペーパーで研磨することで、熔融亜鉛めっき鋼材に対する剥離強度と一面せん断強度が約2.5倍になった。
- 3) 接着剤の耐力がビスの耐力を上まわり、ビスに囲まれた接着面積を十分に確保した場合、接着剤とビスの併用による耐力の相乗効果を期待できる。ただし、さらなる検証が必要である。

参考文献

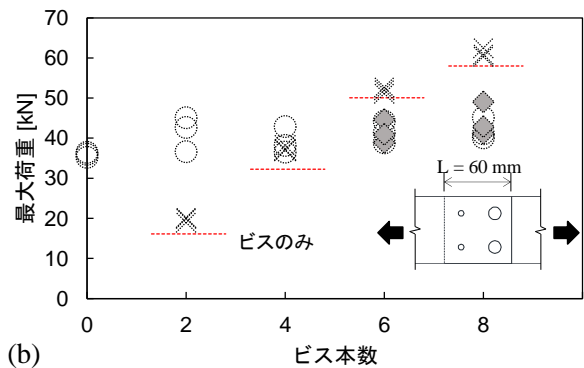
- 1) 曾田五月ほか：日本建築学会大会学術梗概集, pp.1003, 2012.9
- 2) 丹波寛夫ほか：構造工学論文集, Vol.60A, pp.703-



写真1 接着破壊面 (エポキシ)



(a)



(b)

図8 ビス本数と最大耐力の関係 ($L = 60 \text{ mm}$): (a) エポキシ; (b) アクリル①

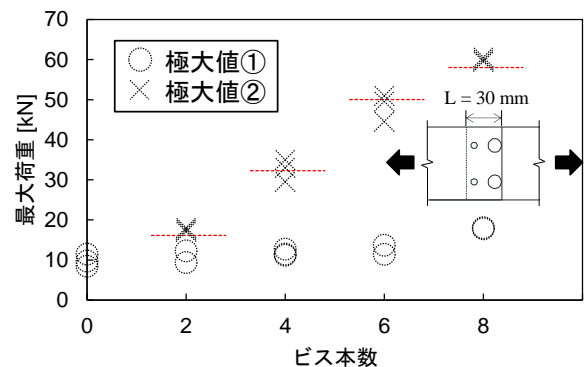


図9 ビス本数と耐力の関係 ($L = 30 \text{ mm}$ / エポキシ)

714, 2014.6

- 3) 高野春菜：北海道大学大学院工学院, 2017年度修士論文, 2018.3
- 4) 原賀康介ほか：International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol.23, pp.371-376. 2003