

研 究 報 告

令和 7 年 3 月 14 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京科学大学 環境・社会理工学
院

氏 名 : 三井 和也

研究課題名：接着剤を活用した鋼構造接合部の体系的評価方法の確立と破壊メカニズ
ム解明

助成金額： 100 万円

研究実施期間：自 令和6年4月1日 ～ 至 令和7年3月31日

接着剤を活用した鋼構造接合部の体系的評価方法の確立と破壊メカニズム解明

Establishment of Systematic Design Method for Steel Structural Connections Utilizing Adhesives and Clarification of Fracture Mechanisms

東京科学大学 環境・社会理工学院 准教授 三井 和也

（研究計画ないし研究手法の概略）

1.1 研究計画

接着剤の使用は多岐に渡り、建築分野においては、近年、当て板接着工法により、既設鋼構造物の性能を回復・向上させる技術に関する研究が行われている^{1),2)}。しかし、未だ研究事例は十分とは言えず、接着剤の主要構造部材への適用は行われていない。現在、鋼構造の接合部は高力ボルト接合部、溶接接合部およびこれらの併用が採用されることが一般的であるが、ボルト穴の加工、溶接量のような鉄骨加工量を削減することによって、建設コストを削減することが望ましい。接着剤を鋼構造接合部に適用した場合、例えば、高力ボルト接合と併用することで高力ボルトの施工数を削減できる可能性がある。また、接着剤の施行は簡便で特殊な技能が不要であるため、現場の職人不足の解消にも貢献することができる。また、重量鉄骨だけでなく、スチールハウスのようなドリルねじで接合する構造形式にも適用することが可能である。ドリルねじ接合では、ドリルねじの破断により接合部が脆性的に崩壊することが問題となっているが、近年開発された靱性の高い接着剤を接合部に適用することで、接合部の脆性的な破壊の予防に貢献すると考えられる。

1.2 研究手法

接着剤の引張せん断接着強さは JIS K 6850³⁾に基づいた、接着接合部の 1 面せん断試験によって規定されている。この 1 面せん断試験で使用される接着面積 A_a は 3.125 cm^2 であり、鋼構造建築物の接合を想定すると小さな接着面積である。また、被着鋼材の板厚 t も 1.6 mm と、接合部材で使用される鋼板の中では薄い板厚である。鋼構造建築物の接合部への接着剤の適用を考慮すると、被着鋼材の板厚と接着面積は、より大きな範囲を対象とする必要がある。以上を踏まえて本報は、鋼材を被着材として、接着接合部の接着面積 A_a （接着幅 b_a × 接着長さ l_a ）、板厚 t 、表面状態および接着剤の種類を変数として 1 面せん断試験を実施し、これらの変数が接着接合部の接着強さに及ぼす影響を検討することを目的とする。

（実験調査によって得られた新しい知見）

2. 接着接合部の 1 面せん断試験概要

図 1 に示す長方形の接着領域を有する試験片を一面せん断試験片の基本形状とし、図 2 に示す試験機で接着面にせん断力が作用するように計画している。このとき、試験片の掴み部に被着鋼材と同一厚さのスペーサーを設けることで載荷軸と接着面を一致させ、接着面に偏心引張力による付加的な応力が作用しない機構としている。

実験変数である接着面積は、JIS K 6850³⁾と同一の 3.125 cm^2 から 100 cm^2 までを対象とし、接着領域の形状比は図 3 に示すように面積が一定のまま形状比が $b_a:l_a = 3:1, 2:1, 1.5:1, 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:3$ と変化するように設定している。板厚 t は $1.6, 2.3, 4.5, 6.0, 16.0 \text{ mm}$ であり、 2.3 mm 以下の鋼種は SGC400、 4.5 mm 以上は SS400 である。表 1 に鋼材の機械的性質を示す。接着剤はアクリル樹脂系の 2 種類(S, T)であり、接着剤 T は接着剤 S より、変形追従性

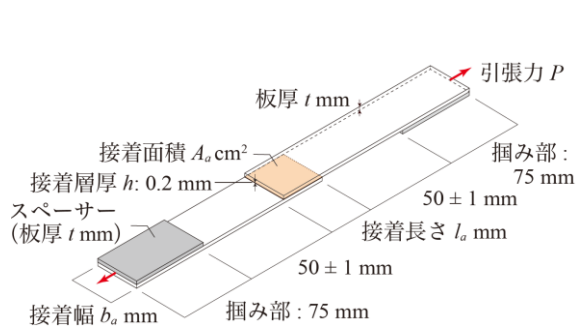


図 1 試験片詳細図

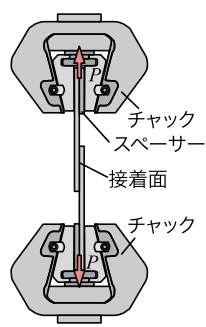


図 2 セットアップ

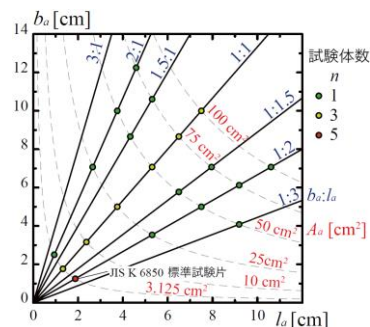


図 3 形状と接着面積

表 1 鋼材の機械的性質

t [mm]	Grade	E [N/mm ²]	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	Y.R. [%]	E_{long} [%]
1.6	SGC400	21600	336	399	84.3	33.6
2.3	SGC400	212000	385	446	86.3	32.1
4.5	SS400	211000	315	443	71.0	40.4
6.0	SS400	207000	274	416	65.9	44.5
16	SS400	209000	288	429	67.2	47.9

が高くなるように設計されている．鋼材の表面状態（サンドブラスト処理，めっき・黒皮残し）も実験変数としている．鋼材の表面処理は図 4 に示すように粒度 60 の溶融アルミナを 0.5 MPa から 0.8 MPa で吹き付けることで実施している．なお，SS400 はグラインダーにより黒皮を除去した後にサンドブラストによる表面処理を行っている．表面処理は表面粗度が試験片ごとにばらつかないように，図 5 および表 2 に示すように粗度計により管理を行っている．接着剤の塗布は接着面の脱脂後，所定の接着面積が確保できるように非接着面にマスキング処理を行い 2)，室温 11.4 °C から 19.2 °C の条件下で接着を行っている．硬化時間は接着剤が最終強度に到達する期間（S：3 時間以上，T：2 日以上）を十分に確保している．接着剤の硬化時は万力により接着面を圧着し，余剰な接着剤を排出している．接着層厚は接着剤に含まれるガラスビーズ（直径 0.2 mm）により，一定値となるように管理している．

表 2 表面粗さのばらつき

表面	t	Mean	S.D.
サンドブラスト処理	1.6	18.5	1.96
	2.3	18.4	1.92
	4.5	14.3	2.21
	6.0	13.8	2.25
	16	14.8	2.56
未処理	1.6	2.25	0.47
	4.5	2.24	0.60
	16	5.15	2.49

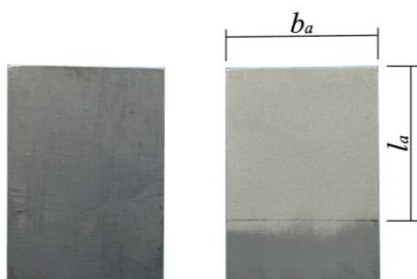


図 4 サンドブラストによる表面処理

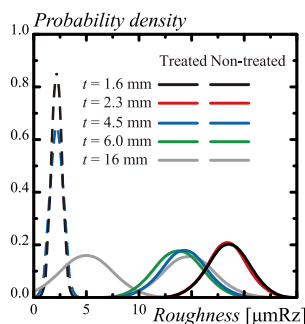
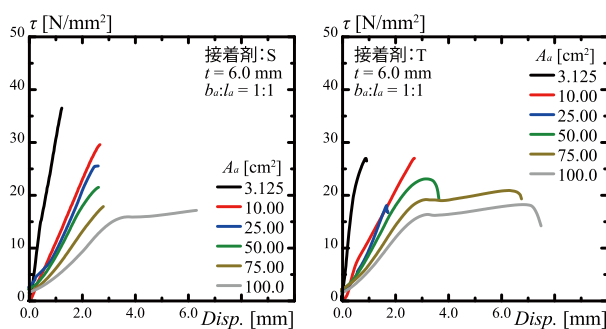


図 5 表面粗さ分布

3. 1 面せん断試験結果

3.1 接着剤強さと鋼材の軸降伏の関係性

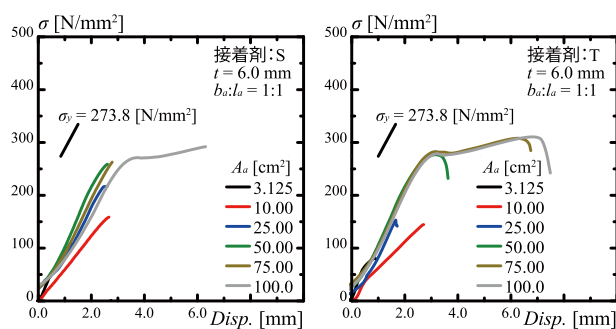
試験機で計測された引張力 P を接着面積 A_a で除した平均せん断応力 τ を縦軸，チャック間の変位を横軸とした結果を図 6 に示す．接着面積の増加に伴い，同一の接着面形状比であっても接着強さ（最大耐力）が低下している．これは接着幅と接着長さが一律で増加していく場合，接着長さが増加したことによって生じる接着面始末端の剥離応力の集中が，接着幅の増加によるせん断応力伝達量を上回るため，接着面積の増加により接着強さが低下することが要因である．また，接着剤 S, T とともに $A_a = 10.0 \text{ cm}^2$ までは脆性的な破断が生じているが， $A_a = 25.0 \text{ cm}^2$ 以上の接着剤 T では接着剤 S より延性的な破壊挙動が確認された．ここで，図 7 は縦軸を試験機で計測された引張力 P を鋼材の断面積で除した直応力 σ とした結果である．接着面積の増加に伴い荷重が大きくなり，両接着剤とも鋼材に伝達される直応力が増加する．直応力が鋼材の降伏応力度 σ_y に到達した試験片では，大きな変形性能を発揮していることが図 6, 7 から確認できる．図 8 は試験終了後の接着面の破壊形式を示している．いずれの試験片においても接着剤の破壊面は，せん断応力と剥離応力が集中する接着面の始末端では接着層の凝集破壊が，中間領域では薄層凝集破壊が生じ，両破壊形式が混同した状態で決定されている．



(a) 接着剤 S

(b) 接着剤 T

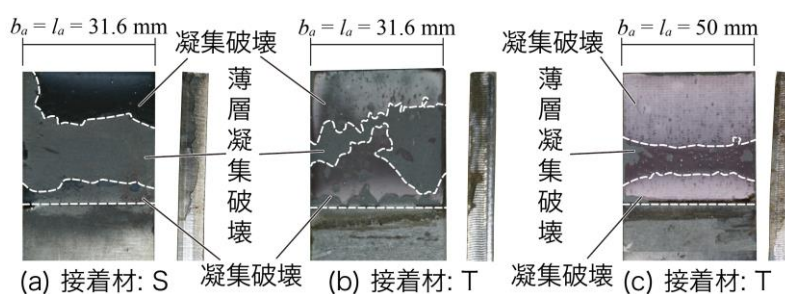
図 6 平均せん断応力度-変位関係



(a) 接着剤 S

(b) 接着剤 T

図 7 平均軸応力度-変位関係



(a) 接着材: S 凝集破壊 (b) 接着材: T 凝集破壊 (c) 接着材: T 凝集破壊

図 8 接着面の崩壊形式 ($t = 6.0 \text{ mm}$)

3.2 接着強さと接着面の破壊形式のばらつき

n 数を 3 以上に設定した試験片の接着強さを図 9(a) に示す．丸印の凡例が各試験片の結果であり，横線がその平均値を，ひし形形の凡例は標準偏差を，色の違いが鋼材の板厚の違いを表している．接着面積の小さい $A_a = 3.125 \text{ cm}^2$, 10.00 cm^2 では，板厚が厚いほど接着強さの標準偏差が大きくなるが，その他の接着面積では板厚による傾向は確認されない．本試験片で使用了鋼材の加工はレーザー切断により実施しているが，この加工工程で接着幅 b_a が変動し，接着面積が変化することが接着強さに影響を及ぼした要因と考えられる．ただし，そ

の標準偏差も 5 N/mm^2 以下と十分に小さいといえる．図 9(b, c)は接着面の破壊状況である．めっき材あるいは黒皮材であっても，サンドブラストにより表面処理を行えば，接着面に生じる破壊現象に違いはない．破壊面が安定した形式であるため，接着強さにばらつきが生じなかったと考えられる．

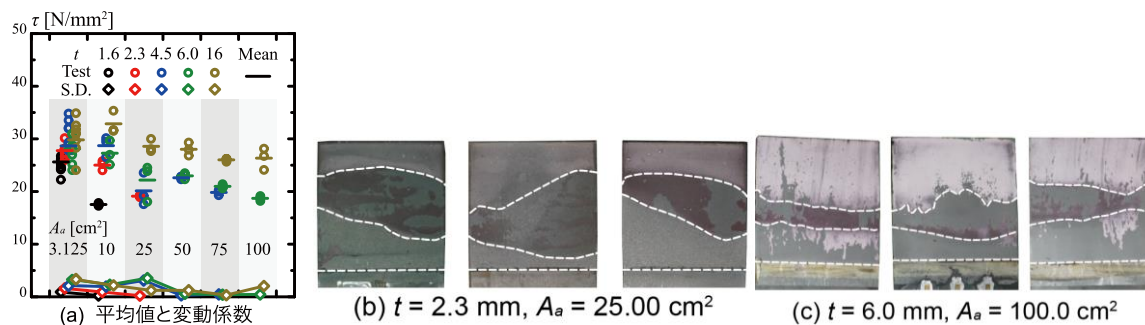


図 9 接着強さと接着面の崩壊形式のばらつき（接着剤 T）

3.3 接着領域の形状比率が接着強さに及ぼす影響

試験機で計測された引張力 P を接着面積 A_a で除した平均せん断応力 τ を縦軸，チャック間の変位を横軸とした結果を図 10 に示す．ここでは同一鋼材板厚・接着面積で接着領域の形状比率を変数としている．接着長さ l_a に対して接着幅 b_a の比率が増加すると，接着強さは上昇する傾向がある．これは接着幅 b_a の増加に伴い，せん断応力の伝達幅が増加することと，接着長さ l_a の減少により，鋼材の面外方向の曲げ変形が減少し，接着面始末端の剥離応力が減少することが要因である．また， $b_a:l_a$ が 1:1.5, 1:2, 1:3 の試験片では，変形の進行に伴い剥離応力が生じる接着面の始末端が徐々に剥離していく様子が確認された．図 11 に示す鋼材の変形状態を確認すると，接着長さ l_a の比率の増加に伴い鋼材の面外方向の曲げ変形が大きくなっていることが確認できる．接着面の破壊状況からも，接着長さ l_a の増加に伴い，剥離応力によって生じた凝集破壊の面積が占める割合が接着面全体に対して大きくなっている．一般に，接着剤はせん断応力に比べて剥離応力に弱いという特性を有するため，接着幅に対する接着長さの比率を小さくすることで，接着強さを上昇させることができる．

図 12 は接着領域の形状比率を横軸として接着強さを整理した結果である．被着材となる

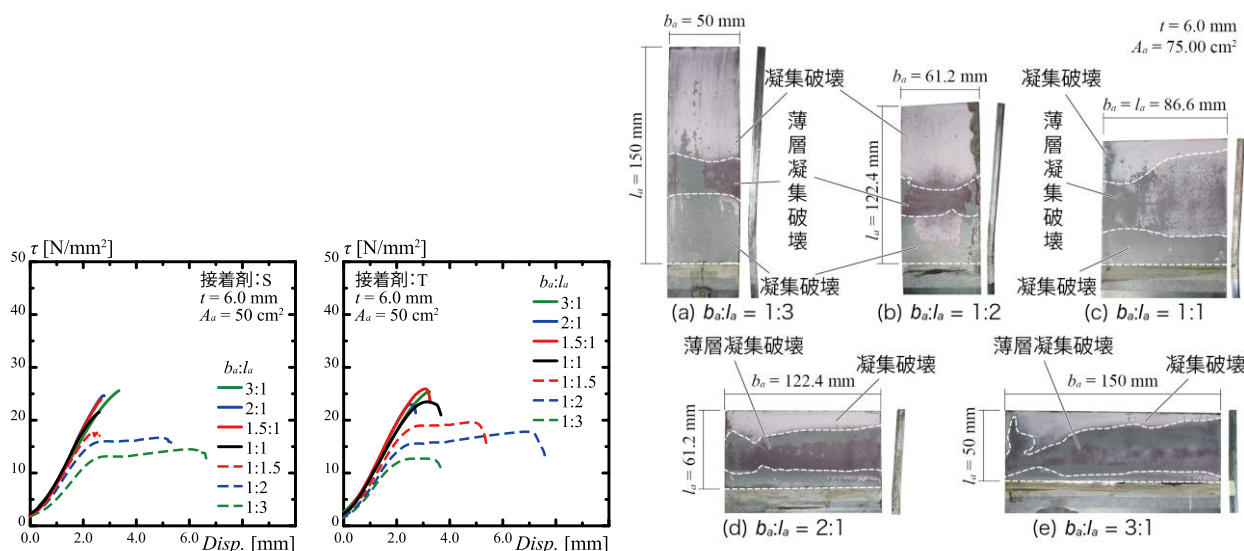


図 10 接着領域の形状比率が接着強さ一変 図 11 接着領域形状と接着面の破壊形式の関
位関係に及ぼす影響 係性 ($t = 6.0 \text{ mm}$)

鋼材板厚・接着面積に関わらず，接着幅 b_a の比率の増加に伴い接着強さは増加していくが，接着領域の形状比率 $b_a:l_a$ が 1.5:1 以上となると接着強さが一定の値へと収束している．これは接着長さ l_a の減少により，鋼材の面外変形が小さくなり，接着面の始末端に生じる剥離応力が同程度に小さくなったことが要因である．また，接着剤の種類が変化した場合であっても，接着強さの変化傾向は同様の傾向を示す．なお，接着剤 T は接着剤 S より，変形追従性が高くなるように設計されており，図 10(b)に示す接着剤 T の $b_a:l_a$ が 1:3 の試験片を除けば，接着剤 T の方が優れた変形性能を示している．

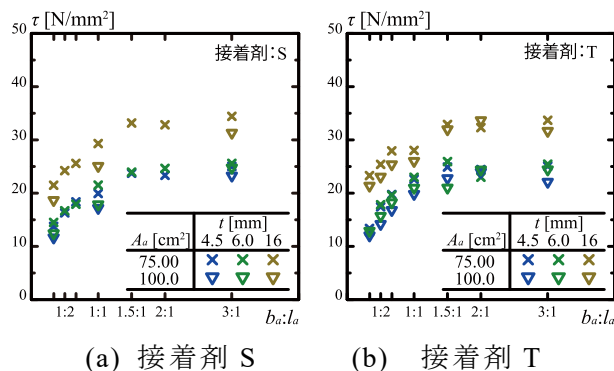


図 12 接着強さと接着領域の形状比率の関係性

3.4 接着領域の形状を考慮した接着強さの評価式

前章において被着材である鋼材の面外方向の曲げ変形の低減により，接着強さが増加することが確認されたため，既報⁴⁾で提案された簡易的に長さに対する曲げ剛性を表す指標 t/l_a を横軸として，接着強さを整理した結果を図 13 に示す．中空の凡例は被着材である鋼材表面をサンドブラストにより処理した試験片である．図中の破線はシングルラップ継手の一面せん断試験で確認された接着剤毎の最大引張強さ $\tau_{\max}$ であり，接着剤 S の最大引張強さ $\tau_{\max}$ は 39.05 N/mm²，接着剤 T の最大引張強さ $\tau_{\max}$ は 37.14 N/mm² である．結果に示すように横軸の増加に伴い鋼材の面外方向の曲げ変形が低減されるため，接着強さは最大接着強さに収斂していく様子が確認できる．この傾向を利用して，本報では接着剤を用いた鋼構造接合部の一面せん断耐力の評価式(1)を提案する．

$$\tau = \tau_{\max} \left(1 - \frac{2}{\tau_{\max} \frac{t}{l_a} + 1} \right) \quad (1)$$

結果に示すように，評価式(1)は概ね前報の実験結果を評価できている．ただし，一面せん断耐力の評価式(1)には接着剤毎の最大引張強さ $\tau_{\max}$ が含まれている．最大引張強さ $\tau_{\max}$ は接

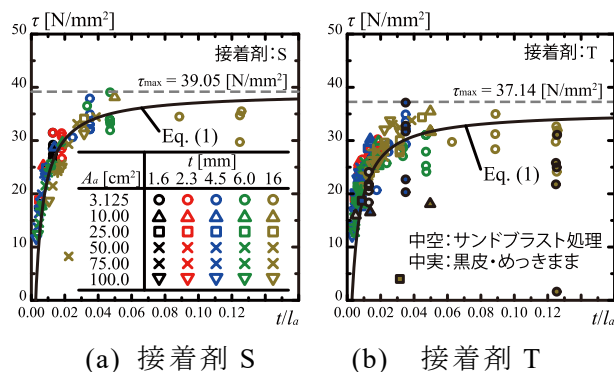


図 13 引張強さと指標 t/l_a の関係性および実験結果と評価式の対応

着剤の種類、接着層の厚さ、鋼材の表面状態に応じて変化することが知られているため、提案した評価式を使用するには、これら変数に応じて変化する最大引張強さ $\tau_{\max}$ を事前に調査する必要がある。この最大引張強さ $\tau_{\max}$ を調査するには、接着領域の形状比率 $b_a:l_a$ が 1.5:1 以上となる試験片を用いて実施する必要がある。

3.5 鋼材の表面処理を施さない試験片の接着強さ

被着材の鋼材表面のめっき、または黒皮を除去せず接着剤により接合した結果を図 13 中の中実の凡例で、図 14 に接着強さ-変位関係を、図 15 に接着領域の破壊状況を示している。めっきを除去していない場合、接着強さは評価式から僅かに減少しているが、これは図 15(a, b)に示すように、凝集破壊よりも強度の低い、接着剤と被着材表面で破壊が生じる界面破壊が部分的に生じたことが要因である。図 15(c, d, e, f)に示す黒皮に直接接着剤を塗布した試験片では、黒皮を除去しない試験片であっても、サンドブラスト処理を施した試験片と同程度の接着強さを発揮した試験片も存在する。一方、接着面積が大きくなるにつれ、接着強さが大きく低下している。これは接着強さに比較し、黒皮と鋼材間の付着力の方が低いため、黒皮と鋼材の間に破壊が生じ、接着強さが同程度の t/l_a の値の試験片より大きく低下する試験片が存在している。したがって、黒皮を有する鋼材を接着剤により接合し、安定的な接着強さを発揮させる場合、鋼材表面の黒皮除去が必要となる。

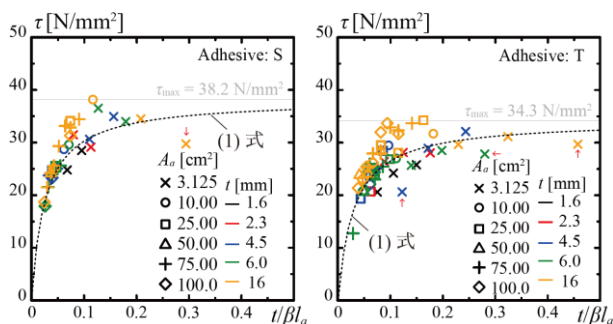


図 10 接着強さの評価式（軸降伏なし）

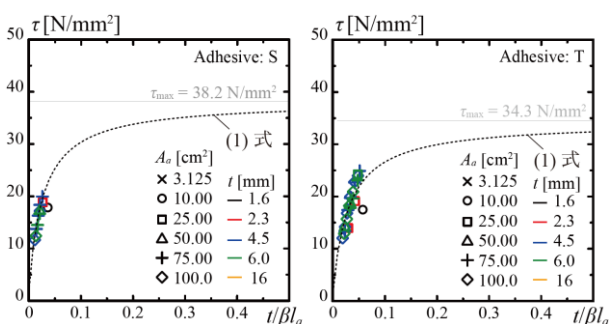


図 11 接着強さの評価式（軸降伏あり）

5. 結

本研究では、鋼材を被着材として、接着面積、板厚、接着面形状比、表面性状、接着剤種類を変数とした 1 面せん断試験を実施し、接着強さに及ぼす影響について明らかにした。

【参考文献】

- 1) 土木学会：FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 70，No. 5，pp.II_120-II_133，2014
- 2) 森下太陽，藤井堅，森田和也，堀井久一，中村秀治：腐食した鋼板の鋼板接着による性能回復，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 747- 755，2011.3
- 3) 日本工業標準調査会：接着剤剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法，JIS K 6850，2019.7
- 4) Goland M., Reissner E.: The Stress in Cemented Joints, J.Appl. Mech., Vol. 11, pp. A17-A27, 1944
- 5) 岩田知明，林原仁志，菅澤忍，安藤孝弘，村上睦尚，秋山繁，山根健次：造船における構造用接着剤の適用に関する研究，海上技術安全研究所報告，Vol. 19，No. 1，pp. 143-147，2019.6

（発表論文）

花井 勉，小林 博一，五十嵐 規矩夫，三井 和也，秋元 雅人，小谷 準，紺野 誠，小川 大輝：接着剤を用いた鋼構造接合部の一面せん断耐力，日本建築学会大会学術講演梗概集，2025（発表予定）