

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06629

研究課題名(和文)造船用ミリオーダー接着層厚の鋼/CFRP構造接着継手の長期信頼性評価法の構築

研究課題名(英文)Development of the long-term reliability evaluation technique of Steel/CFRP structural adhesive joint consisting of millimeters order thickness of adhesive layer for shipbuilding

研究代表者

岩田 知明 (IWATA, TOSHIAKI)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所 構造基盤技術系・基盤技術研究グループ長

研究者番号：50358397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：造船では、溶接継手を構造接着継手で置き換えることにより、CFRPから構成される補強部材の適用による強度改善などの利点がある。しかしながら、現行の溶接部材と同等の寸法精度管理が許容される数ミリの隙間への充填可能性が要求され、このような極厚接着層厚における長期信頼性に対する知見の欠如が実用化の妨げとなっている。

本研究では、造船での設計接着強度に関する劣化推定曲線を用いた評価のため、高温高湿劣化促進試験、吸水後乾燥回復試験、Xe暴露耐候性試験、塩水噴霧試験を行った。その結果、ばらつき係数0.4以上、強度保持率0.5以上とする設計強度は妥当であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In shipbuilding, there are advantages such as the strength improvement by the adopting of the reinforcement members made of the CFRP by replacing the welded joint with the structural adhesive joint. However, it is demanded that the dimensional accuracy management of the members is at the same level as current welding, namely structural adhesive can fill the gap of the millimeter order. The lack of the knowledge for the long-term reliability of thick adhesive layer is obstacles to the practical use.

In this study, accelerated deterioration test by high temperature high humidity, recovering test by the drying after water absorption, xenon exposure weatherability test, and salt water mist resistant test were carried out for evaluation using the deterioration estimate curve about the design adhesive strength in shipbuilding. As a result, it was revealed that the design strength where coefficient of dispersion is more than 0.4 and strength retention rate is more than 0.5 is appropriate.

研究分野：溶接・接着等の接合部の疲労・環境耐久性・静的に関する強度評価

キーワード：構造用接着剤 異種材接合 造船 ミリオーダー接着層厚 耐久性評価 引張せん断強度 CFRP 鋼

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車・航空機では省エネルギー化の軽量化材料に、建築土木では耐久性向上用の補強材・鉄骨代替材に、CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の用途が拡大している⁽¹⁾。現行価格の 1/2 以下の 1,000 円/kg を目指して研究開発も行われており⁽²⁾、将来は更に構造部材への用途が拡大すると見込まれる。

(2) 近年大型化しているコンテナ船では、板厚効果 (溶接構造物の疲労強度が板厚の増加と共に低下する) が顕著で、部材厚を厚くする以外の対策が必要となっている。高比強度の CFRP は補強部材に適している。中強手造船所から構成される研究開発団体においても複合材の活用は注目されているが、複合材の金属船の強度部材への適用については、構造接着の長期信頼性に対する知見の欠如や、難燃性等の規則による制約など解決すべき課題が多い。

(3) 造船の艤装工事において、構造接着には、歪取り・火気付帯工事の工数削減や樹脂系支持部材の適用による軽量化など、溶接に対する利点があり、鋼船や軽合金船の艤装工事でも注目され始めている。しかしながら、現行の溶接部材と同等の寸法精度管理が許容される数ミリの隙間への充填可能性が要求され、このような極厚接着層厚における長期信頼性に対する知見の欠如が実用化の妨げとなっている。

2. 研究の目的

(1) 航空機・自動車・建築土木産業において CFRP の利用が促進しつつあることも鑑み、造船部材要件として極厚接着層厚で使用される場合の鋼 - CFRP の構造接着継手の安全率の裕度を劣化因子毎に定量化し、設計許容強度予測方法を明らかにして造船での実用化に資する。

(2) 設計時に利用可能な接着強度評価法を確立することにより、造船での構造接着の適用技術を確立し、溶接できない CFRP など高機能材料の造船での実用化を促進させ、振動軽減や重量軽減・高強度化など具体的に発生している課題の解決を図る。

3. 研究の方法

(1) 異種材料継手被着材として JIS G 3106 SM490A 及び CFRP を用いた。JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材 SM490A は、船体構造用高張力鋼板：船級協会規格 AH36(KA36) の類似材料であり、市場で入手可能である。CFRP は PAN (ポリアクリロニトリル) 系炭素繊維とエポキシ樹脂とした。造船では、サイズとコストの面から CFRP はハンドレイアップまたは VaRTM (真空含浸) 工法による成形となるため常温硬化が求められる。PAN 系炭素繊維と相溶性が良く常温硬化するエポキシ樹脂と

して日本ユピカ(株)の CBZ®500 を選定した。構造用接着剤は、第二世代アクリル樹脂系接着剤 (SGA) のうちから、比較試験により界面破壊率が低く最大引張剪断強度と伸びが最も大きい接着剤を選定した。表 1 に本研究で評価対象として選定した構造用接着剤の機械的特性を示す。接着層厚を考慮した接着剤の引張せん断試験規格がないため、試験片形状は JIS-K-6851 (ISO6237) 「接着剤の木材引張剪断強さ試験方法」に基づく形状とし (図 1 参照) 形状以外は JIS-K-6850 (ISO4587) 「接着剤 - 剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法」に基づいて試験を実施した。接着層厚は 3mm および 1mm とした。接着面の前処理としてサンドブラストを行った。Xe 暴露耐候性試験片は紫外線保護塗膜コーティングを、塩水噴霧試験片及び吸水後乾燥回復試験片は防食塗膜コーティングを行った。高温高湿劣化促進試験は保護塗膜コーティングを行わなかった。同一条件の各暴露時間の試験片本数は 4 本ずつ (塩水噴霧試験のみ 5 本ずつ) とした。

表 1 評価対象構造用接着剤の機械的特性⁽³⁾

Viscosity	20,000	mPa·s
Tensile Shear Strength (SPCC; CR1)	22.3	MPa
Tensile Shear Strength (A5025)	19.7	MPa
Tensile Shear Strength (Epoxy FRP)	6.1	MPa
Peel Strength (SPCC; CR1)	5.4	kN/m
Impact Strength (SPCC; CR1)	22.7	kJ/m ²
Hardness	Shore D58	

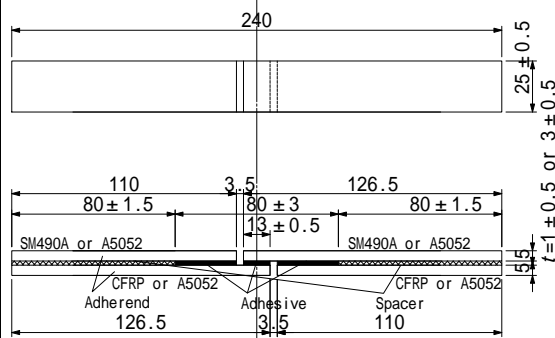


図 1 引張せん断試験片形状⁽³⁾

(2) 高温高湿劣化促進試験、塩水噴霧試験、吸水後乾燥回復試験、Xe 暴露耐候性試験における、暴露時間と強度保持率 ρ 及び変動係数 CV を用いて、設計接着強度に関する統計的な評価を行った。高温高湿劣化促進試験は、50 90%RH (相対湿度)、85 90%RH、95 95%RH の 3 温湿度条件にて 90 日間 (2,160 時間) 行った。高温高湿槽から試験片を取り出し後、23 の実験室で 2 時間の調節を行った。塩水噴霧試験は、JIS-Z-2371 (ISO9227) 「塩水噴霧試験方法」に一部準じ、塩溶液の塩濃度 50g/L ± 5g/L、塩溶液の pH 6.5 ~ 7.2 とし、噴霧室内温度 35 ± 2 にて 84 日間 (2,000 時間) 行った。噴霧室から試験片を取り出し後、試験片表面に付着した塩化ナトリウムを

除くために、試験片を水道水で洗い流し、ペーパータオルで水分を拭き取り、23 50%RHにて24時間の状態調節を行った。吸水後乾燥回復試験は、50 90%RHにて90日間(2,160時間)の吸水後、23 50%RHにて90日間(2,160時間)の乾燥回復を行った。高温高湿槽から試験片を取り出し後、23の実験室で2時間の調節を行った。Xe 暴露耐候性試験は、JIS-K-7350-2(ISO4892-2)「プラスチック - 実験室光源による暴露試験方法 - 第2部: キセノンアークランプ」に一部準じ、石英管封止のキセノンアークランプ光源を用い、赤外線除去コーティングされたデライトフィルタを通して、放射照度 $500\text{W}/\text{m}^2$ (300nm ~ 800nm 帯域) $\pm 10\text{W}/\text{m}^2$ 、ブラックスタンダード温度 30 ± 3 にて、90日間(2,160時間)の暴露を行った。試験片側面の接着部を上向きにして、片面ずつ1,000時間及び2,160時間の暴露を行った。

4. 研究成果

(1) 3種類の候補接着剤(C: 金属への接着力が高い、N: 金属及び樹脂への接着性が良い、S: 厚膜でも樹脂への接着性が良い)に対して、強度評価試験により選別するため、引張せん断強度試験を、JIS規格に従い5本ずつ実施し、最大引張せん断強度、凝集破壊率など界面の破壊形態、伸びについて評価した。その結果、NとSがCFRP被着面側でほとんど界面破壊となったのに対して、Cの界面破壊率は40%~5%で、その結果として、最大引張せん断強度と伸びはCが最も大きくなったため、本研究での評価対象となる鋼 - CFRP異種材接合に対応した造船向けミリオーダー接着層用に適した接着剤としてCが選定された。

(2) 高温高湿劣化促進前では、接着剤Nと接着剤SがCFRP被着面側でほとんど界面破壊となったのに対して、接着剤Cの界面破壊率は5~40%となり、CがNとSより優れている。しかしながら、Cにおいても50 90%RHでの100時間後ではCFRP被着面側ですべて界面破壊となった。一方、高温高湿劣化促進前の初期の引張せん断強度は、Al-Alの同種接合部に対して鋼 - CFRP異種材接合部は、1mm厚と3mm厚のどちらも約60%程度である(NとSは更に低い)。しかしながら、50 90%RHでの2160時間後では、鋼 - CFRP異種材接合部の強度はAl-Al接合部の強度に対して、1mm厚ではほぼ等しく、3mm厚では約85%であり、また、1000時間を超えると鋼被着面側でCFRP被着面側より先に界面破壊となる場合も生じた。よって、金属向けの接着剤Cではあるが、高温高湿環境下で使用する場合、CFRP被着面側の方が劣化しにくく、CFRP用としても適していることを確認した。

(3) 高温高湿劣化促進試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図2に、変動係数と暴露時間の関係を図3に示す。塩水

噴霧試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図4に、変動係数と暴露時間の関係を図5に示す。吸水後乾燥回復試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図6に、変動係数と暴露時間の関係を図7に示す。Xe 暴露耐候性試験における、引張せん断強度保持率と暴露時間の関係を図8に、変動係数と暴露時間の関係を図9に示す。

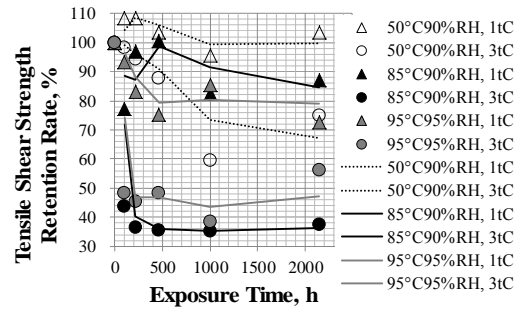


図2 高温高湿劣化促進試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係⁽³⁾

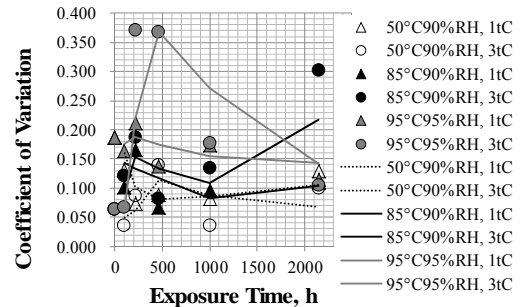


図3 高温高湿劣化促進試験における変動係数と暴露時間の関係⁽³⁾

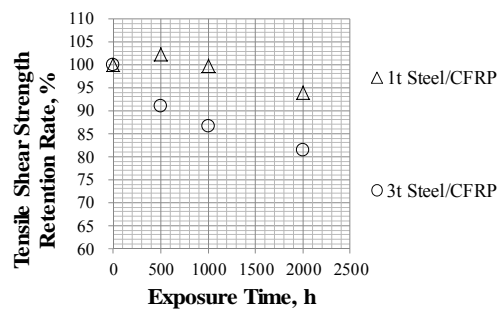


図4 塩水噴霧試験における引張せん断強度保持率と暴露時間の関係⁽³⁾

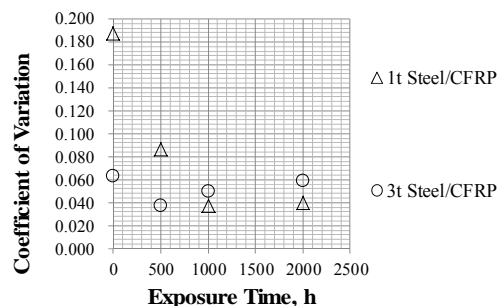


図5 塩水噴霧試験における変動係数と暴露時間の関係⁽³⁾

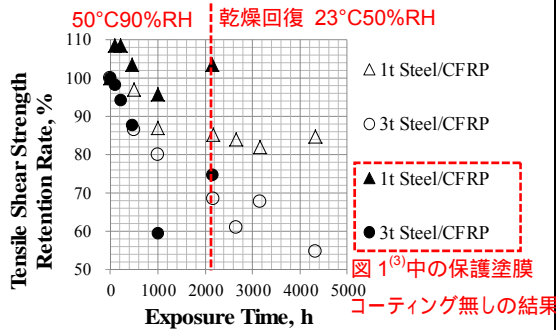


図6 吸水後乾燥回復試験における引張剪断強度保持率と暴露時間の関係

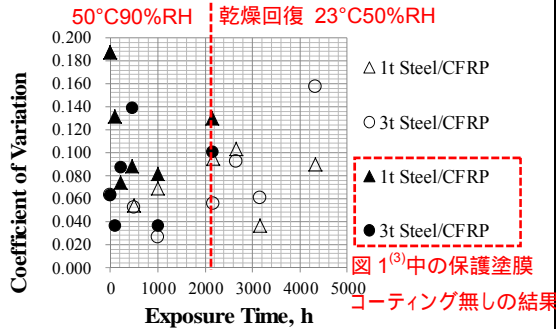


図7 吸水後乾燥回復試験における変動係数と暴露時間の関係

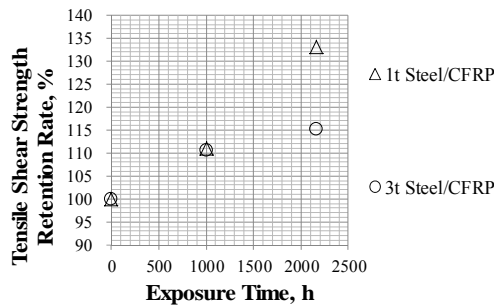


図8 Xe 暴露耐候性試験における引張剪断強度保持率と暴露時間の関係

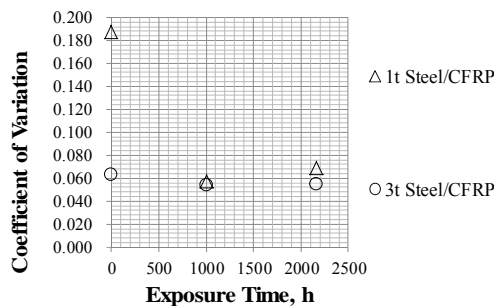


図9 Xe 暴露耐候性試験における変動係数と暴露時間の関係

(4) 本研究の初年度となる平成 27 年度に、一般財団法人日本海事協会に設置された申請者が座長を務める検討会において「構造用接着剤使用のためのガイドライン」⁽⁴⁾を作成する必要が生じたため、申請時に提案書中でも引用した参考文献⁽⁵⁾を参照して AI 合金被着材を想定した設計基準強度を設定した。設

計基準強度の数式中における劣化後のばらつき係数 D_y と劣化後の強度保持率 d は、実験的に求める必要があるが、造船用ミリオーダー接着層厚における実験データが無かったため、前述の文献を参照して D_y 0.4、 d 0.5 とし、本研究においてこれらの数値の妥当性の評価を行うこととした。ただし、実験結果から、ばらつき係数 D_y を直接評価できないため、許容不良率 PDA=1/10000 とする場合の変動係数 CV 0.16 が D_y 0.41 に相当することから、CV 0.16 として評価を行った。その結果、接着層厚 3mm の鋼 - CFRP 異種材料継手における 85 90%RH 並びに 95 95%RH の高温高湿劣化促進試験を除いて、接着層厚 3mm であっても d 0.5、CV 0.16 を満足することが確認された。ただし、「構造用接着剤使用のためのガイドライン」⁽⁴⁾ で設定されている追加の安全率 0.5 を考慮した d 0.25 は全ての試験結果において満たすことを確認し、上記ガイドラインの設定値 D_y 0.4、 d 0.5 が鋼 - CFRP 異種材料継手でも成り立つことを本研究で裏付け、実用に役立つ重要な成果が得られた。

(5) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト：

構造用接着剤の劣化評価は、電子部品や自動車など用途が拡大している分野で行われているが、汎用的で明確な設計基準は未だ確立されていない^{(5), (6)}。本研究で対象とする極厚接着層と環境劣化を組み合わせた長期寿命予測は、接合部の寸法にばらつきが生じる産業では当然必要となるが、これまで十分な研究が行われていない。

接着剤の組成に関する化学分野の研究や、接着剤の接合プロセスに関する研究は豊富であるが、接合部強度の耐久性評価に関する研究は不十分で、接着接合部の信頼性向上が重要であり、航空や自動車分野において引き続き取り組むべき課題とされている。また、加熱硬化処理と薄い接着層厚が求められる代わりにアクリル樹脂系接着剤より強度が高いエポキシ樹脂系接着剤が、塗装加熱工程を有する自動車業界や、一体成形で加熱工程を有する航空業界では主流である。

よって、本研究で造船用途として評価対象としている接着層厚が厚くても強度が落ちにくい SGA (第二世代アクリル樹脂系接着剤) を、硬化した成形済みの CFRP 被着材の接着に用いる場合の耐久性評価に関する研究は他にに行われていない。鋼 - CFRP 異種材料継手の設計基準強度に必要とされる劣化後のばらつき係数 D_y と劣化後の強度保持率 d に関する実験データを取得し、設計時におけるこれらの設定値 D_y 0.4、 d 0.5 の妥当性を本研究で裏付けたのは初の試みであり、実用化に向けて大きく貢献した。

(6) 今後の展望：
変動係数の精度を上げるためには、同一条件

の各暴露時間の試験片本数を数十本以上に増やす必要がある。今後の実験データの更なる蓄積により、劣化後のばらつき係数 D_1 の精度が向上すれば、設計許容強度の向上（信頼度の改善）が期待される。

また、CFRP の鋼への接合方法は、本研究で対象とした硬化した成形済みの CFRP 被着材を鋼へ構造接着する場合だけでなく、鋼へ VaRTM（真空含浸）工法により成形していく場合もある。溶接とは異なり構造接着と同様に火気を用いない VaRTM 工法は、補修や補強の際に有望と見込まれており、この工法による接合部の耐久性評価に関しても、今後重要と考えられる。

(7)当初予期していなかった新たな知見：本研究を進めていく上で、想定していなかった事例としては、同一接着剤メーカーから 3 種類の候補接着剤（C：金属への接着力が高い、N：金属及び樹脂への接着性が良い、S：厚膜でも樹脂への接着性が良い）が提示される場合であっても、接着層厚、被着材の組合せ、劣化環境により、樹脂被着材向けに必ずしも樹脂用の接着剤が適しているとは限らないので、ユーザー側で強度試験などを行い選定する必要があることを確認した。

<引用文献>

(1) <http://www.torayca.com/>

(2) 林 達彦、早く、安くを現実に CFRP でクルマを造る、日経 Automotive Technology、2012 年 5 月号、2012

(3) Toshiaki IWATA, Durability evaluation of SGA structural adhesive joint consisting of millimeters order thickness of adhesive layer for shipbuilding, Proceedings of the 6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena, 2018

(4) 一般財団法人日本海事協会、構造用接着剤使用のためのガイドライン、2015

(5) 原賀康介、高信頼性を引き出す接着設計技術、日刊工業新聞社、2013

(6) 井口博行、自動車への適用を考慮した接着部の強度調査について、第 19 回構造接着シンポジウム、pp.53-58、2010

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

Toshiaki IWATA, Durability evaluation

of SGA structural adhesive joint consisting of millimeters order thickness of adhesive layer for shipbuilding, The 6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena, 2018

岩田 知明、造船用ミリオーダー接着層厚からなる鋼/CFRP 異種材料構造接着継手の耐久性評価、溶接学会平成 30 年度秋季全国大会、2018

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩田 知明 (IWATA, Toshiaki)
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所 構造基盤技術系・基盤技術研究グループ長
研究者番号：5 0 3 5 8 2 9 7

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()