

構造用接着剤の船体防振カーリング接合への適用に関する基礎研究

松田, 吉平
九州大学大学院工学府

鬼塚, 博之
名村造船所株式会社

村上, 幸治
九州大学工学部技術室

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院

他

<https://hdl.handle.net/2324/7325944>

出版情報：溶接学会九州支部講演論文集．21，pp.5-8，2024-11-01．溶接学会九州支部
バージョン：
権利関係：



構造用接着剤の船体防振カーリング接合への適用に関する基礎研究

○松田吉平*1, 鬼塚博之*2, 村上幸治*3, 松田和貴*4, 後藤浩二*4

Key Words: 防振カーリング, 構造用接着剤, 静的三点曲げ試験, 有限要素法 (FEM), Cohesive Zone Method

1. 緒言

現在の船体建造工程において、建造後の海上試運転の結果次第では、主機によって発生するパネルの振動を抑えるために防振カーリングを設置し、追加の防振対策が必要となる場合がある。しかし、従来のアーク溶接による防振カーリングの取り付け方法では、塗装焼けが発生し、補修工事による追加のコストと労力が必要となる。

そこで、溶接に代わる新たな接合方法として、構造用接着剤による接合が期待されている。構造用接着剤は施工が容易であることや構造体の軽量化などの利点があるため、自動車業界や航空業界などで多くの用途に使用されている。しかし、その接合強度は一般に溶接継手よりも弱いため、現在は船殻構造製作への適用には至っておらず、防振カーリングの施工においても要求される接合強度を十分に満足できるかどうかは不明である。

そこで本研究では、防振カーリング部材の取り付けに構造用接着剤を使用するための第一歩として、構造用接着剤により接合した継手とアーク溶接継手の静的強度を三点曲げ試験により比較した。また、実施した静的三点曲げ試験をFE解析で再現し、構造用接着剤継手の破壊挙動のシミュレーションを実施した。

2. 静的三点曲げ試験

2.1 供試材と試験片寸法

静的三点曲げ試験により構造用接着剤接合継手とアーク溶接継手の静的強度を比較し、接着剤継手が防振カーリングとして十分な静的強度を持つかどうかを検証した。供試材は軟鋼 SS400 (JIS G 3101:2017) であり、構造用接着剤として CRESTABOND M7-15¹⁾ を用いた。供試材、および接着剤の機械的性質を Table 1, Table 2 にそれぞれ示す。また、試験片の形状寸法を Fig. 1 に示す。試験片は Fig. 2 に示すように主板と補強材を構造用接着剤またはアーク溶接で接合し作製した。接着剤継手は接着剤層の厚さが異なる試験片を 3 種 (0.5 mm, 3 mm, 6 mm) 作製した。さらに、試験片長手方向のひずみを測定するため、各箇所にはひずみゲージを取り付けた (Fig. 1: I, II, III 参照)。なお、各試験片はそれぞれアーク溶接継手 1 種×3 体 + 接着剤継手 3 種×3 体の計 12 体の試験片を準備した。

Table 1. Mechanical properties of mild steel SS400.

Yield stress: σ_Y	Tensile strength: σ_B	Elongation
309 MPa	442 MPa	32 %

Table 2. Mechanical properties of adhesives CRESTBOND M7-15¹⁾

Young's modulus	Tensile strength: σ_B	Elongation
1200 to 1700 MPa	22 to 24 MPa	29 to 37 %

原稿受付 2024 年 10 月 18 日

*1 九州大学大学院工学府 Graduate School of Engineering, Kyushu University

*2 名村造船所株式会社 Namura Shipbuilding Co. Ltd

*3 九州大学工学部技術部 Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

*4 正員 九州大学大学院工学研究院 Faculty of Engineering, Kyushu University

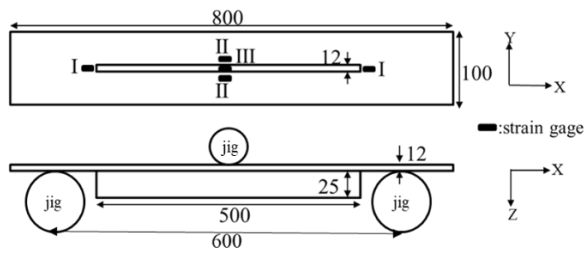
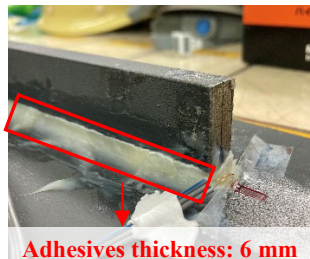


Fig. 1 Geometries of the specimen (unit: mm).



(a) Adhesives joint

(b) Welded joint

Fig. 2 Specimen appearances

2.2 試験方法

静的三点曲げ試験は、まず、Fig. 1 に示したような一対の支持治具（支持治具間の距離：600 mm）に試験片を設置し、中央の治具に強制変位を与え、試験片に曲げ荷重を载荷した（変位速度：1 cm/min）。試験は接着剤の接合部が破断するか、強制変位が 8 mm 辺りに達するまで続行した。これらの試験を計 12 体の試験片に対して実施した。本試験では中央の治具からの反力、試験片の中央変位（z 方向）、各点の x 方向ひずみ（Fig. 1：I，II，III）をそれぞれ計測し、各種 3 体の平均値を 3 章以降に示す実験結果として扱う。

2.3 実験結果

中央変位（z 方向）と中央治具からの反力（z 方向）の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 に示すように、溶接継手の曲げ剛性はどの接着剤継手よりも大きい、基板のみの場合の理論値に比べると接着剤継手の曲げ剛性も十分に優位であることが分かる。また、接着剤継手は中央変位(z)が 5.0 mm から 6.5 mm の範囲ですべて破断した。その中で接着剤厚さ 0.5 mm の接着剤継手の最大強度が 11.8 kN で最大であった。この結果から、接着剤厚さ 0.5 mm の場合の接着強度が、他の厚さ条件よりも高いことが示唆された。また、各測定点でのひずみ値 I ～ III（x 方向）と中央治具からの反力（z 方向）の関係を Fig. 4 に示す。荷重位置から離れた箇所にあるひずみ I の測定値においては溶接継手と接着剤継手で大きな差異は見られない。一方で、荷重位置に近い中央部分の箇所にあるひずみ II，III の測定値においては反力が大きくなるに伴って、溶接継手と接着剤継手の差が大きくなっている。これは接着剤のヤング率が鋼材に比べて極端に小さいことで、接着剤継手の基板と補剛材が独立に変形したことが要因だと考えられる。これはせん断遅れという現象で、佐藤²⁾らによると、接着剤継手の曲げ剛性はせん断遅れによって低下し、その影響は接着剤の厚さによって増加することを提示しており、Fig. 3 の接着剤継手グラフの傾きが減少している結果を支持するものである。

これらの結果から、静的強度においてはアーク溶接継手に比べると、構造用接着剤継手は劣っているが、基板のみの場合と比べると優位であり、接着剤継手でも十分な補剛効果を有することが期待できる。

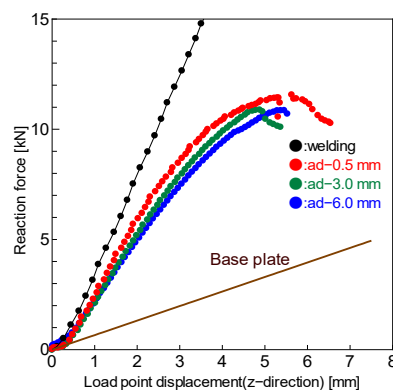


Fig. 3 Relation between central displacement (z) and reaction force (z).

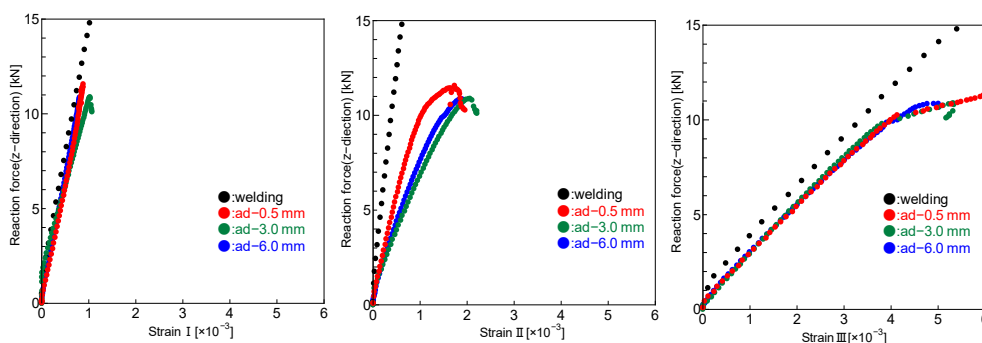


Fig. 4 Relationship between each strain and reaction force (z).

3. FE 解析

3.1 接着剤継手モデル

三点曲げ試験における接着剤継手の破壊挙動を FEM による弾塑性解析で再現することを試みた。使用した解析コードは MSC Marc. 2024 である。Fig. 3 の結果とメーカー推奨¹⁾から接着剤層の厚さが 0.5 mm の継手が最も優位と考えられたため、0.5 mm 厚継手を解析対象とした。対称性を考慮し Fig. 5 (a) に示すように試験片の 1/4 をモデリングした。Fig. 5 (b)より、治具 (青)、鋼材 (赤)、接着剤 (黄)、インターフェイス (緑) の 4 種の要素でモデリングし、治具と鋼材間に接触条件、鋼材とインターフェイス間、およびインターフェイスと接着剤間に接着条件をそれぞれ与えた。

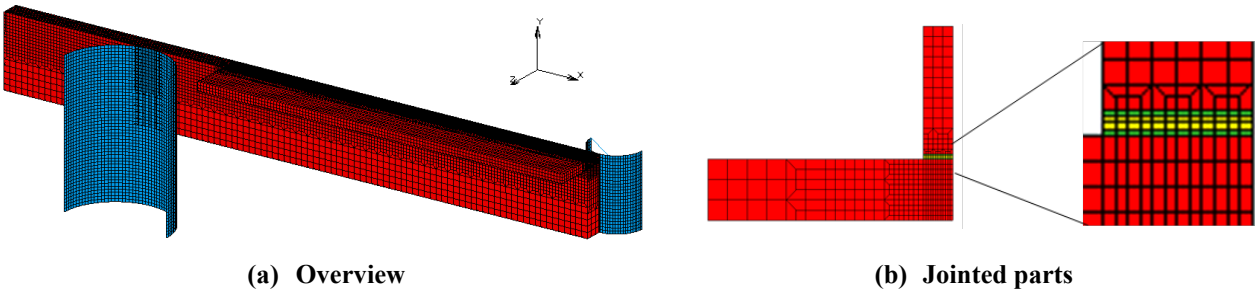


Fig. 5 FE model used

3.2 材料特性と CZM (Cohesive Zone Method)

Table 1, Table 2 に示した数値を参考に、FE モデルに材料特性を設定した。治具は疑似的に剛体とするためにヤング率 1×10^{15} MPa, 降伏応力 1×10^{10} MPa とした。また、インターフェイス要素は CZM (Cohesive Zone Method) によって接着剤の剥離を疑似的に再現するための厚さ (z 方向) を持たない要素³⁾であり、Table 3 に示す特性を与えた。ここでインターフェイス要素³⁾と CZM は Table 3 に示すように、破壊モード I・II でのエネルギー解放率や臨界開口変位、最大応力比を用いて、条件を指定して要素に荷重が伝達しなくなることで接着剤など、高分子材料の破壊を再現する手法⁴⁾である。

Table 3. Properties of interface elements⁵⁾

Cohesive energy	Critical opening displacement	Maximum stress ratio (Mode I/ Mode II)	Cohesive energy ratio (Mode I/ Mode II)
23 N/mm	0.03 mm	0.46	5.0

3.3 FE 解析結果

試験片中央の z 方向変位と中央治具からの反力の関係の実験結果と解析結果比較を Fig. 6 に示す。CZM を用いた FE 解析の結果、荷重の中盤までは曲げ剛性を正確に推定することができた。しかし、変位が約 2 mm の時点から曲げ剛性が低下し、それ以降は解析結果の反力が実測値よりも小さくなった。これは CZM のパラメータが適切でなく、破断点の推定が正確にできていなかったことが原因と考えられる。接合部分における中央の z 方向変位が 2 mm の時点における z 方向 (接着剤厚さ方向) の垂直応力コンター図を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、接合部の端部で応力集中が見られる。また、接着剤の破断が始まると想定される接合部端部での z 方向垂直応力と中央部 z 方向変位の関係を Fig. 8 に示す。これらの結果から中央の z 方向変位が約 2.0 mm 時点において、治具からの反力が低下しており、接合部端部周辺に応力集中が発生している一方で、接着部端部では応力の減少が確認できる。よって、実測値よりも早い段階 (中央変位 2 mm あたり) で接着部の破断が起きていると推察される。本研究では、伊原ら⁵⁾の論文を参考に CZM パラメータ (Table 3) を設定したが、これらの結果から

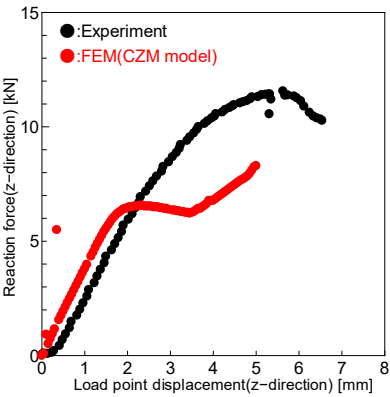


Fig. 6 Comparisons of experimental and FE analysis results

本研究で使用した構造用接着剤に対して最適なパラメータはこれと異なっていると考えられる．そのため，本研究で使用した構造用接着剤の適切な CZM パラメータを探索し，シミュレーションにおける破断挙動を改善する必要がある．

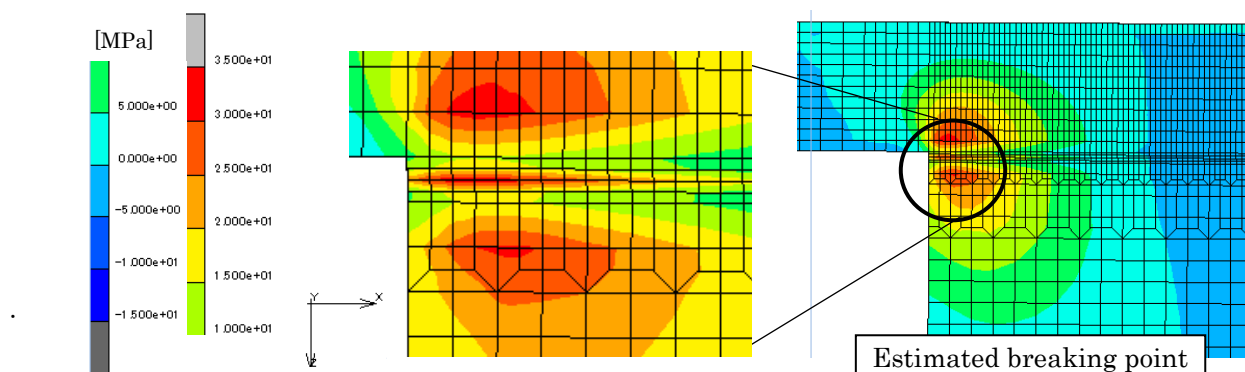


Fig. 7 Contour map of σ_z in joint parts [Load point displacement(z): 2 mm]

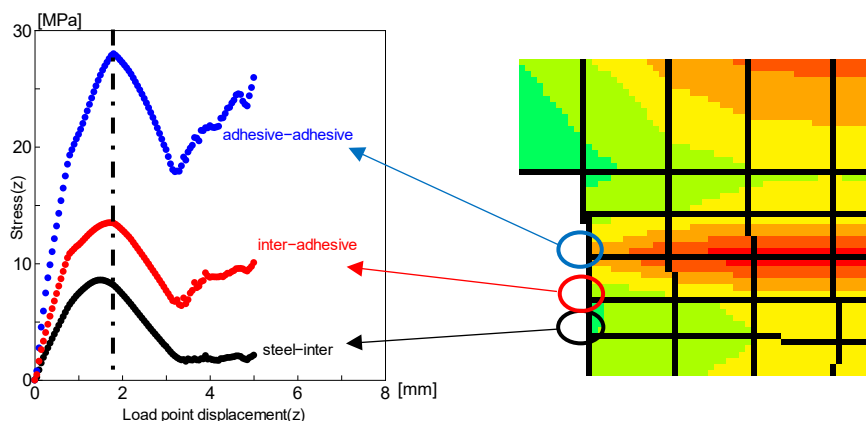


Fig. 8 History of σ_z in joint edge elements

4. 結 言

防振カーリング接合に構造用接着剤を使用するための基礎研究として，静的三点曲げ荷重試験を実施した．その結果，アーク溶接継手の静的強度は構造用接着剤継手よりも大きかった．しかし，主板のみの場合と比べると接着剤継手の曲げ剛性は十分向上しており，防振カーリング部材の取り付けに使用できることが示唆された．今後は疲労強度の評価も検討し，実用化に向けさらに調査を進める．

また，接着剤接合部の変形・破断挙動を CZM という手法で FE 解析により評価した．その結果，解析精度には改良の余地が残された．精度改善のためには最適な CZM のパラメータを探索する必要があると考えられた．

5. 参 考 文 献

- 1) SCOTT BADER, https://jp.scottbader.com/uploads/files/13202_crestabond-m7-15-en-june16.pdf, (accessed on July 16, 2024).
- 2) T. Sato, H. Abe, Y. Sakata, On Flexural Rigidity of Structural Adhesive-aided joint in steel, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 12, (1994), 255-261.
- 3) Hexagon, <https://hexagon.com/products/marc>, (accessed on Jul 16, 2024).
- 4) R. M. Muñoz, J. E. Andrade, Cohesive zone modeling of adhesive joints: Effect of adhesive thickness and layer properties, international Journal of adhesion & adhesives, 44, (2013) 48-56.
- 5) R. Ihara, A. Tatsumi, J. Naito, CAE Modeling of Adhesive Bonding and Accuracy Validation, Research and Development KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, 69(1), (2019), 82-87.