

面内ガセット溶接継手から発生した疲労き裂の CFRP 接着による補修効果と 溶接残留応力によるき裂進展特性の検討

東京都立大学大学院 学生会員 ○俣野厚志, 正会員 中村一史, 宇都宮大学 正会員 タイウィサル
三井海洋開発 坪川毅彦, 東レ 正会員 松井考洋

1. はじめに

本研究は、FPSO (Floating Production Storage and Offloading system) をはじめとする浮体式海洋石油・ガス生産設備で、疲労損傷を受けた鋼構造物を対象に、高強度・高弾性である CFRP を用いた補修工法の開発を目的としたものである。疲労き裂の多くは溶接継手部から発生するため、面内ガセット溶接継手から発生する疲労き裂に着目し、CFRP 接着によるき裂進展寿命の遅延化を実験的に検証するとともに、CFRP 接着により圧縮側の溶接残留応力の解放が抑制されることで、き裂進展が遅延する効果を解析的に検討した。

2. 面内ガセット溶接継手試験体と実験方法

本検討では、面内ガセット溶接継手の止端部から幅中心方向に向かって初期き裂を 20mm 導入し、疲労試験によりき裂が 40mm まで進展する際の繰返し回数 N_{p20-40} の向上を図る。図-1 に、試験体の一般図と CFRP 補修の概念図を示す。CFRP は真空含浸法 (VaRTM) により、CFRP の成形と鋼材への接着を同時に行う。CF シートの積層数は、進展寿命 N_{p20-40} がアメリカ船級協会 (ABS) の規定する海上環境での疲労強度等級 G¹⁾ を満足するように決定した (図-2)。き裂進展寿命の評価には、文献 2) の応力拡大係数の計算方法を用いた。表-2 に、疲労試験の条件を示す。試験方法はビーチマーク法を採用した。

また、溶接残留応力がき裂進展に及ぼす影響を検討するため、切断法による溶接残留応力の計測を行った。ひずみゲージは、表裏合わせて、計 28 枚使用し、溶接ビードに近い端部では間隔を狭くした。鋼材の切断には熱の影響を受けないよう、糸鋸 (刃厚: 0.4mm) を用いて手作業で行った。さらに、鋼材の切断加工で残留応力が生じる可能性があるため、一般部での残留応力計測も同時に行った。

3. 解析モデルと解析条件

面内ガセット継手の荷重分担と応力集中を考慮し、き裂進展上の応力分布を求めるため、FEM 解析を行った。解析には、Marc/Mentat 2019 を用いた。試験体をソリッド要素でモデル化し、一様荷重を与えた際のき裂直上の応力分布を求めた。また、残留応力計測の結果を解析で再現するため、熱弾塑性解析を行った。解析モデルは、前述したのと同じモデルを用い、熱影響のパラメータのみを再設定した。空気中への熱伝達係数は $0.025\text{N/mm}^2/\text{C/s}$ とし、熱膨張係数、比熱、熱伝導率は、解析ソフトで規定されている鋼材の汎用値を用いた。

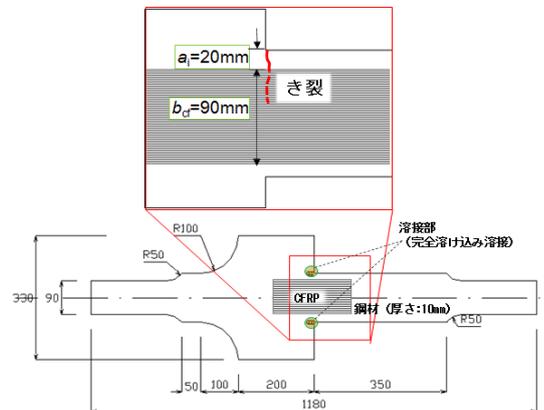


図-1 試験体の一般図と CFRP 補修の概念図

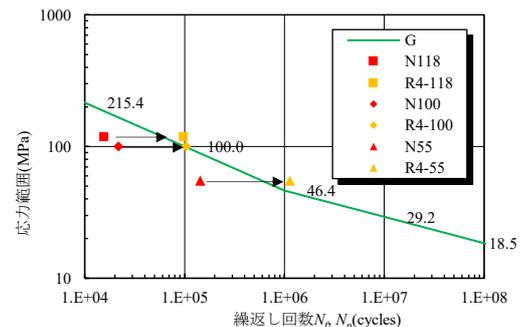


図-2 ABS で規定される疲労強度等級 G と補修効果

表-1 材料特性

材料名	鋼材 (SM400)	CF シート	接着剤 (AUP40T)
弾性率 E_s (N/mm ²)	205,000	440,000	3,430
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	305	-	-
引張強度 (N/mm ²)	-	2,400	12
厚さ t (mm)	10	0.217	-

表-2 疲労試験の条件

試験体名	応力範囲 $\Delta\sigma_{sm}$ (N/mm ²)	CF シートの積層数	き裂進展の予測回数 N_{p20-40}
N118	118.3	0	10,750
R4-118	118.3	4	68,488
N100	100	0	17,978
R4-100	100	4	114,537
N55	54.9	0	112,628
R4-55	54.9	4	717,555

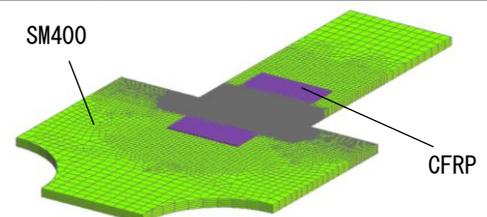


図-3 FEM 解析モデル

キーワード 面内ガセット, き裂進展寿命, CFRP, 溶接残留応力, 補修
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学大学院 TEL.042-677-1111 内線(4564)

4. 検討の結果と考察

図-2 に、疲労試験結果を示す。CFRP 補修により、き裂進展速度を遅延化させることができた。3 ケースとも CF シート 4 層で疲労強度等級 G を満足できることがわかった。

図-4 に、FEM 解析結果による軸方向応力分布を示す。両端部の応力集中と中央付近で若干の応力低減が生じている。これはガセットプレートによる影響と考えられる。これらの補正を行い、実験で計測された応力拡大係数と比較した。実験値は材料定数 $C=2.0 \times 10^{-11}$ 、 $m=3.06$ として $\Delta a/\Delta N=C\Delta K^m$ から求めた。図を略したが、無補修の場合では、き裂進展解析による推定結果は実験値とよい一致を示した。

図-5 に、き裂 20mm を導入した時の溶接残留応力の計測結果と FEM による溶接シミュレーションの結果を示す。切断法による残留応力計測において、一般部では平均 21MPa の圧縮残留応力が生じていた。この圧縮残留応力は鋼材全面に生じると考え、溶接ビード付近の残留応力計測結果から除いた。解析値と実験値は概ね一致しており、実験結果は妥当であるといえた。図-6 に、CFRP 接着後、き裂が進展した際の残留応力分布（FEM 解析結果）を示す。き裂が進展しても、溶接残留応力の再配分は生じておらず、CFRP により溶接残留応力の解放が阻止されていると考えられる。

図-7 に、FEM から求めた残留応力の有無による応力拡大係数の変化を示す。残留応力が、引張側では応力拡大係数が大きくなること、圧縮側では小さくなることがわかる。応力拡大係数範囲の計算では、引張残留応力の場合 $\Delta K_{\max}-\Delta K_{\min}$ とするのが一般的であり、残留応力の影響は無視できるが、圧縮残留応力の場合 $\Delta K_{\min}=0$ となるため応力拡大係数範囲も低減すると考えられる。

表-3 に、FEM から求めた応力拡大係数範囲と実験値の比較を示す。残留応力はき裂長さ 40mm 以降から圧縮側になるが、き裂長さ 60mm での実験値において応力拡大係数範囲の低減効果は明確には見られなかった。特に $\Delta\sigma_{sn}=118.3$ 、100MPa においては、補修体の ΔK_{40} より ΔK_{60} が増加しており、接着樹脂のはく離により CFRP の架橋効果および残留応力による低減効果が小さくなると考えられた。

5. まとめ

面内ガセット溶接継手部に CFRP を VaRTM により接着接合することで、き裂長さ 20~40mm のき裂進展を遅延させることができた。また、熱弾塑性解析から CFRP 接着により圧縮残留応力が解放されないため、き裂進展を遅らせる効果があると考えられた。今後、はく離を考慮したき裂進展解析や、き裂長さをパラメータとしたき裂進展寿命について検討する予定である。

参考文献

- 1) American Bureau of Shipping, Guide for Fatigue assessment of offshore structures, 2020.6
- 2) 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆: 当て板接着補修されたき裂を有する鋼板の応力拡大係数, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.798-807, 2013.

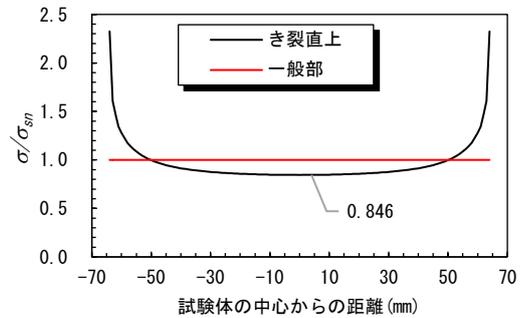


図-4 き裂進展上の軸方向応力分布 (σ/σ_{sn})

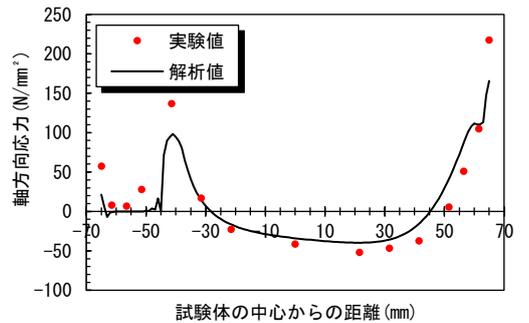


図-5 初期き裂 20mm における溶接残留応力分布

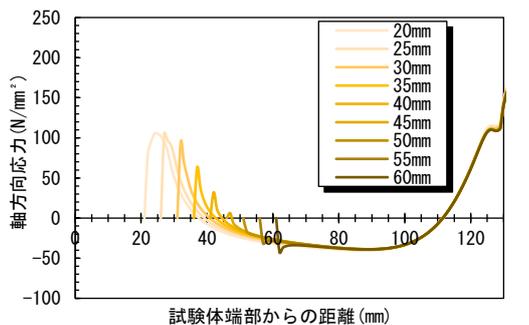


図-6 CFRP 補修後の溶接残留応力変化

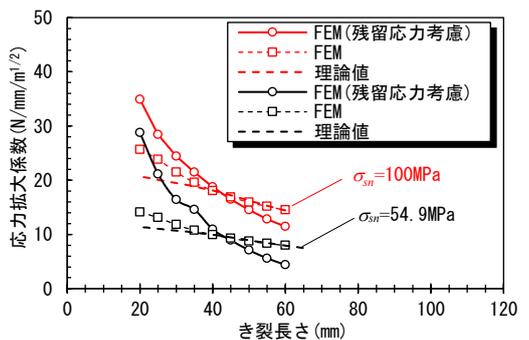


図-7 き裂長さと応力拡大係数範囲の関係

表-3 応力拡大係数範囲 ($N/mm^3/2$) の比較

試験体名	ΔK_{40} ($a=40\text{mm}$)	FEM と の比	ΔK_{60} ($a=60\text{mm}$)	FEM と の比
N118	45.36	0.94	65.84	1.25
R4-118	22.50	1.05	24.82	1.75
N100	39.75	0.90	-	-
R4-100	21.10	1.12	23.50	2.05
N55	22.54	0.72	31.28	0.97
R4-55	8.70	1.26	7.63	1.74