腐食環境下における表面き裂の進展挙動評価 **PS-1**

構造安全評価系 *笛木 隆太郎,林原 仁志,安藤 孝弘,村上 睦尚 産業システム系 津村 秀一, 穴井 陽祐, 丹羽 敏男. 岩田 知明 一般財団法人 日本海事協会 山本 規雄,杉本 友宏

1. はじめに

食の影響を考慮した疲労強度評価を実施することは、船舶や 海洋構造物の設計において非常に重要である.

腐食環境下における疲労強度評価では、腐食による疲労強 度の低下を S-N線図により考慮し、腐食衰耗による板厚減少 に伴う負荷応力の上昇を腐食予備厚等により考慮する方法 が一般的である.腐食環境では、腐食ピットを起点に表面開 口型の疲労き裂(表面き裂)が生じることが多いが.腐食環 境下では,応力範囲に依存するき裂進展と応力範囲に依存し ない表面での腐食衰耗が同時に進行する.しかしながら、現 行の規則等で要求される疲労強度評価では、き裂進展挙動と 腐食衰耗は別個に取り扱われており、これらが相互に影響す ることは考慮されていない.

山本ら¹⁾は、表面き裂の進展に腐食衰耗の影響を加味した き裂進展モデルを考案し、作用応力と疲労寿命の関係を数値 解析的に評価したところ,低応力域において,船級規則等に 規定される S-N線図とは異なる挙動を示したことを報告して いる. さらに, 応力が低いもしくはき裂が小さい場合など, き裂進展速度よりも腐食速度の方が大きくなる条件では、き 裂深さが減少し、消失する可能性があると述べている.

この様なき裂進展と腐食衰耗の複合現象について、実験に よる検証を行うべく,表面き裂に対する腐食疲労試験を行っ ている.本報では、これまでの試験結果の一部を報告する.

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は板厚10mmの船体構造用圧延鋼(日本海事協会規 格 KA32) である. KA32 の降伏応力は 404 MPa, 引張強さは 509 MPa (いずれもミルシートの値) である.

2.2 試験片

試験片の形状および寸法を図1に示す.試験片の長手方向 中央部(図1のA-A断面)には、半楕円形状のスリットが放 電加工により導入されている.

2.3 疲労試験方法

荷重容量 98 kN の油圧サーボ式疲労試験機を使用し、荷重 制御にて疲労試験を実施した. 試験手順を以下に示す.

2. 3. 1 予き裂導入

室温大気中において,応力比 R = 0.1,応力範囲 Δ σ = 200 MPa の繰返し荷重を与えることで、スリットから疲労予き裂 を生じさせた. き裂深さを直接計測するのは困難であるた

め、川原ら³⁾が提案したき裂形状の評価式より、き裂先端の 腐食環境では疲労強度が低下することが知られており、腐 応力分布がスリットの影響を受けなくなると考えられるき 裂深さ1.5 mm (元のスリット深さを含む)に相当する表面長 さ (3.34 mm) に達するまでき裂を進展させることで、き裂深 さを間接的に判断した.



図1 試験片およびスリットの形状・寸法

2.3.2 腐食疲労試験

予き裂導入後、試験片の周辺を腐食液で満たすための容器 (腐食セル)を取り付け、表1に示す試験条件で腐食疲労試 験を行った. 試験期間短縮のため、海水よりも腐食衰耗速度 CR(試験片における全面腐食速度)が大きいpH3の希硫酸を 用い、腐食衰耗の加速倍率と同等の倍率で荷重負荷速度を速 めて試験を行った.ここで、pH3の希硫酸中における CRは, 小林らが求めた *CR* と pH の関係の実験式²⁾によると,海水中 (pH8)の約5.6倍に相当する.

また、き裂進展挙動に及ぼす腐食衰耗の影響を検証するた め,連続負荷のほか,一部の応力範囲で,負荷と無負荷を同 じ時間間隔で繰り返す断続負荷条件での試験もあわせて実 施した. 試験中は希硫酸を常に循環させ, pH を 3.0 ± 0.1, 水温を25 ± 0.1℃の範囲に維持した. 試験条件1の試験は 最大 60 日で打ち切った.

表1の試験条件2は、試験条件1において、実際のCRが およそ2 mm/y と小林ら²⁾による実験式の約4倍であったこ とを受けて試験条件の見直しをしたものである. 循環による 流速影響を低減するための腐食セルの構造変更等により, CR=1 mm/y 程度(海水中の CR評価値²⁾の10倍程度)までの 低減が見込まれたため、試験条件2では、繰り返し周波数を 1Hz に変更するとともに、断続負荷の無負荷時間をあわせて 変更している. さらに、より長期間におけるき裂進展挙動を 把握するため、試験の打ち切り日数は最大120日とした.

試験条件1		
荷重条件	連続負荷	断続負荷
応力範囲 / 応力比 ^{※1}	50 MPa / R = 0.77 100 MPa / R = 0.55	50 MPa / $R = 0.77$
荷重負荷方法	周波数 0.588 Hz ³⁸² にて連続負荷	周波数 0.588 Hz ^{**2} にて 63700 回負荷後, 30 時間無負荷の繰返し
試験条件2		
荷重条件	連続負荷	断続負荷
応力範囲 / 応力比**1	50 MPa / R = 0.77 80 MPa / R = 0.64	80 MPa / $R = 0.64$
荷重負荷方法	周波数 1 Hz ^{※2} にて連続負荷	周波数1 Hz にて 63700 回負荷後, 17 7 時間無負荷の繰返1

表1 腐食疲労試験条件

※1 最大荷重を予き裂導入時の荷重に一致させたため、応力比は一定でない
※2 0.588Hz は、海水中での船体波浪荷重の平均周波数(1/9.5 Hz¹⁾)の5.6
倍、1 Hz は 10 倍に相当

3. き裂進展挙動の解析的評価

腐食疲労試験には長い期間を要するため,試験で得られる データ数には限りがあり,試験結果のみでき裂進展の連続的 な挙動を明らかにすることは困難である.そこで,試験結果 を補完する目的で,き裂進展挙動の解析的評価を行った.

本研究では、山本ら¹⁾が提案した方法を参考に、繰返し数 iサイクル目のき裂深さ a_i を(1)式より評価した.

$$a_{i} = a_{i-1} + \Delta a_{i} - CR \times \frac{1}{f} \tag{1}$$

 a_{i-1} は *i*-1 サイクル目のき裂深さ, Δa_i は *i* サイクル目のき 裂進展量, *CR* は腐食衰耗速度, *f*は繰返し周波数である. *CR* は試験前後の試験片の板厚計測結果より,き裂導入部の板厚 減少量を評価して用いた(各条件の*CR*, *f*は図2を参照). また, Δa は(2)式の通り, *i*-1 サイクル目のき裂進展速度*da/dN* にサイクル間隔1を乗じて算出した.

$$\Delta a = \frac{da}{dN} \cdot 1 = C' \left\{ \left(\alpha_{i-1,\phi=90^{\circ}} \Delta \sigma_{i-1} \sqrt{\pi a_{i-1}} \right)^{m'} - \Delta K_{\text{th}}^{m'} \right\}$$
(2)

C'およびm'はパリス則の定数で、材料や平均応力等に依存 する定数であるが、本解析では、き裂進展挙動が試験結果に 沿うような数値を試行的に検討し、C' = 4.00×10⁻¹²、m' = 3.25とした.ただし、この数値の妥当性は検証中である. $a_{i-1,\phi=90}$ 'は表面き裂底部の応力拡大係数を求める形状補正係 数であり、Newman-Rajuの式⁴⁾から求めた. $\Delta \sigma_{i-1}$ は、i-1サイ クル目に試験片に作用する腐食衰耗を考慮した応力、 ΔK_{th} は 下限界応力拡大係数範囲である.小林ら²⁾の実験によると、 pH3 および pH4 の希硫酸環境では、 $\Delta K_{th} < 0.98$ MPa·m^{1/2} と 報告されており、da/dNに及ぼす ΔK_{th} の影響は非常に小さい ため、本解析では、 $\Delta K_{th} = 0$ MPa·m^{1/2}とした.

断続負荷の条件におけるき裂進展挙動は、荷重負荷中のき 裂寸法を(1)式により評価し、負荷停止時のき裂深さに対し て(3)式で評価される無負荷時間hのき裂進展量 Δa_c を足し合 わせることにより評価した.

$$\Delta a_c = CR'_{\phi=90} \times h - CR \times h \tag{3}$$

ただし、*CR'*_{φ=90}はき裂底の腐食速度であり、別途実施した 半楕円スリット入り試験片の144日間静置浸漬試験より得た $CR'_{\phi=90} = 0.13 \text{ mm/y}を用いた.$

4. 結果および考察

試験結果および解析結果を図2に示す.図2のプロット点 は試験結果,実線および点線は,対応する試験条件における き裂進展挙動の評価曲線である.

試験結果および解析結果が示すき裂進展挙動をみると, $\Delta \sigma = 80$ MPa では,連続負荷と断続負荷のき裂進展挙動に 差がみられないが, $\Delta \sigma = 50$ MPa では,断続負荷において, き裂深さがほぼ一定もしくは減少している.また, $\Delta \sigma = 50$ MPa の連続負荷での試験結果について,試験条件1と試験条 件2で解析結果が示すき裂進展挙動に違いがみられるが,こ れは *CR* の差によるものであり, $\Delta \sigma = 50$ MPa のき裂進展挙 動が *CR* の大きさに影響を受けることを意味している.以上 の結果は,1章で述べた山本ら¹⁰の仮説と一致している.



5. まとめ

腐食疲労試験結果およびき裂進展解析結果が示す傾向よ り、応力範囲が低く、き裂進展速度が小さくなるような条件 では、腐食衰耗が表面き裂の進展挙動に及ぼす影響が大きく なることが明らかになりつつある.

今後は、腐食疲労試験のデータを追加しつつ、き裂内部で の腐食挙動等についても調査を進め、解析を高精度化するこ とで、より正確なき裂進展挙動を把握することを目指す.

参考文献

 Yamamoto Norio et al. Fatigue Strength Assessment of a Structure Considering Corrosion Wastage and Corrosion Fatigue. Proc. of the ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2018, OMAE2018-78188.

小林 佑規 他3名. ばら積石炭船倉内の腐食を模擬した希硫酸環境における造船用鋼の腐食および腐食疲労. 日本造船学会論文集. 1999, Vol. 1999, No. 185, p. 221-232.

 川原 正言,栗原 正好. 表面き裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的 考察. 日本造船学会論文集. 1975, Vol. 1975, No. 137, p. 297-306.

 Newman J. C., Raju I. S. Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads. NASA Technical Paper. 1979, No. 1578.