

## 論文の内容の要旨

論文題目 構造用金属材料の腐食疲労き裂進展挙動に関する研究  
( 関与因子が進展速度に及ぼす影響 )

氏 名 高野 太刀雄

本論文は、実在する環境下での構造物の疲労破壊を破壊力学手法で予測するため、また材料-環境系の疲労破壊機構が明らかでない現状から、腐食疲労き裂進展に影響を及ぼす環境因子・材料因子・力学因子を組み合わせた疲労試験を行い、腐食疲労き裂進展を調べたものである。金属腐食環境・材料特性・非定常な力学環境・き裂形状などの関与因子が腐食疲労き裂進展速度にどのような影響を及ぼすかを調べ、不明確な構造用金属材料の腐食疲労き裂進展の諸特性を明らかにしている。

第1章「緒論」では、構造物の破壊と疲労き裂進展の研究の背景として、従来の "S-N 曲線基準の設計" と "き裂進展基準の設計" の考え方を示す。次に破壊力学の基本事項、室温大気中のき裂進展特性、腐食環境中のき裂進展特性を示し、腐食疲労き裂進展の各種影響因子の組み合わせから、解明を要する問題点を列挙する。そして、本論文の腐食疲労き裂進展に関与する項目に沿って論文を構成した。ここでは各章の概要を示している。

第2章「疲労試験システムの開発と試験機の機能・性能評価」では、腐食疲労き裂進展の実験において研究目的に合致させた疲労試験機を開発し、試験機構造、試験機の動特性、試験機性能を示し、各章で使用した疲労試験機としての性能を保証している。開発試験機

と試験システムは, [1] 広幅中央き裂試験片用の容量 100 kN 電気-油圧サーボ疲労試験機, [2] 大容量 400 kN 平行二軸式の電気-油圧サーボ疲労試験機, [3] 小型の容量 20 kN 電気-油圧サーボ疲労試験機, [4] 腐食疲労き裂進展用の直列多段の容量 40 kN 電気-油圧サーボ疲労試験機, [5] コンプライアンス法によるき裂長さの自動計測システムの5つであり, それぞれの試験機特性と本研究で行う腐食疲労実験との関係を示した。

第3章「腐食疲労き裂進展挙動と金属腐食環境との対応」では, 複雑な環境強度問題が腐食疲労き裂進展速度に及ぼす影響を解明するために, 水素イオン濃度(pH)及び化学成分を変えた水溶液中での疲労き裂進展実験を系統的に実施し, き裂進展の応答を調べている。供試材としてステンレス鋼, 炭素鋼, アルミニウム合金の広幅中央き裂試験片を用いて, 一定振幅荷重下の疲労き裂進展特性について多種の水溶液環境と大気中の結果とを比較することで, 金属腐食環境と腐食疲労き裂進展挙動との対応を調べる。具体的には, 材料・水溶液環境・力学因子の相互作用としての疲労き裂進展速度を腐食 (pH, 腐食電位) と関連させて調べ, (1) 炭素鋼の場合には腐食反応の水素発生領域 (pH < 4) での腐食き裂進展速度が大気中に比べて数倍以上の加速が見られ, 腐食反応とよく対応する。(2) 不動態皮膜をつくるステンレス鋼の場合には中性液から酸性液までに加速効果が認められ, 酸性液に Cl イオンを含むと影響が大きく局部腐食と対応すること, の2点を明らかにしている。

疲労き裂進展と腐食反応速度の観点から, 各種水溶液中の疲労き裂進展速度  $[da/dN]_{CF}$  を繰返し速度  $f$ , 応力拡大係数変動幅  $\Delta K$  の関数として整理し, 加速係数の評価式を示し, 腐食疲労き裂進展の加速機構の評価に有効な指針を与えた。

第4章「腐食疲労き裂進展に及ぼす材料特性の影響」では, 厚板の試験片を用いて, 各種の中性水溶液中での腐食疲労き裂進展に加速を及ぼす材料因子を調査する。熱処理温度と降伏応力, 鋼種と組織, 試験片寸法と板厚などについて, 応力腐食割れの時間依存と疲労き裂の繰返し数依存とが重複する領域のき裂進展特性を調べている。

主な研究内容は, (1) 高強度鋼の静的応力腐食割れき裂成長特性と下限界  $K_{ISCC}$  の測定, 腐食疲労き裂進展の加速開始  $K_{FSCC}$  と下限界  $K_{ISCC}$  との関係, (2) 高強度の熱処理鋼における加速特性と降伏応力の関係, (3) 厚板の低強度鋼の高  $\Delta K$  領域の加速, (4) ステンレス鋼の加速と規制電位効果, の4点であり, 中性水溶液環境と材料特性の影響を明らかにしている。

材料特性と加速機構の関係につき, 水素溶解によりトラップされた水素が疲労き裂先端の水素脆化となり, 降伏応力が  $\sigma_y \cong 1,000$  MPa 以上から加速が急激になることを示し, これを裏付ける破面解析からは水素脆化割れにみられる粒界割れが観察された。これらにより, 腐食疲労き裂進展の加速特性に影響を及ぼす材料因子に関する指針を得た。

第5章「腐食疲労き裂進展に及ぼす非定常な力学的環境の影響」では、振幅荷重の変動と切欠きからの疲労き裂進展特性において、き裂先端の塑性変形域の破壊プロセスゾーンである力学的環境が変わることにより、き裂進展の減速や遅延が生じる。この非定常なき裂進展挙動に関する基本的疲労の問題点について腐食環境と防食法を調べている。

(1) 定振幅に過大荷重を受ける場合の疲労き裂進展の遅延を、有効応力拡大係数変動幅  $K_{eff}$  で評価できることを実証した後、腐食環境下の遅延現象も同様に評価した。

(2) 重畳波荷重試験の場合も、き裂開口点応力  $\sigma_{op}$  の上の振幅部分がき裂進展に寄与し、等価有効応力拡大係数  $(\Delta K_{eff})_{eq}$  で、き裂進展速度を評価できることを示した。

熱処理用合金鋼と鋳物材の場合には、高応力比の定振幅の進展特性を基にして重畳波形を  $(\Delta K_{eff})_{eq}$  で整理すると、腐食環境の影響がそのまま強度レベル・繰返し速度に依存することが分かった。また、Zn, Al 犠牲陽極を用いたカソード防食によるき裂進展について、加速や亜硝酸塩インヒビターの有効性も論じた。

(3) 炭素鋼の切欠きからき裂進展では、き裂発生寿命と進展速度に、水溶液の酸性度の高い順に水素イオン濃度 ( $pH \geq 4$ ) が影響する。

(4) 深い切欠きからの低  $\Delta K$  領域の疲労き裂発生初期のき裂進展過程においては、減速と加速の変極点を持つ非定常なき裂進展特性を示す。この進展特性は  $K$  減少法によるき裂進展曲線の上側を通り、腐食によるくさび効果が認められた。

第6章「構造用鋼の海水環境下三次元き裂の腐食疲労き裂進展特性」では、船舶、海洋構造物へ広く利用される4種類の高張力鋼、2種類の高張力鋼の溶接材、及び優れた耐食特性が注目されている二相ステンレス鋼の人工海水中の腐食疲労き裂進展に関して、貫通き裂と表面き裂の進展速度の対応を実験において評価検討している。

この海水環境の疲労き裂進展の影響について、大気中との比較から定量的な評価を行い、実構造物が遭遇する三次元応力場での疲労き裂進展則を、腐食環境下にも適用することが可能かどうかを破壊力学的観点から総合的に調べた。これによって以下の有用な結果が得られている。

(1) 高張力鋼4鋼種の人工海水中の表面き裂の深さ方向  $[da/dN]_{CF}$  と、表面側  $[dc/dN]_{CF}$  の進展速度、及び  $\Delta K$  で環境効果を評価し、海水環境を大気中と比べると2.5～3倍の加速が見られる。(2) 高張力鋼の溶接材も、人工海水中には空気中と比べて2.5～3倍の加速が見られ、一部残留応力と考えられる影響は  $[dc/dN]$  に現れる。(3) 2相ステンレス鋼は、低  $\Delta K$  側で加速が認められないが高  $\Delta K$  側で加速が認められる。(4) 供試材の多くに二次元き裂進展と三次元き裂との対応が良好であった。

総合的には、三次元表面き裂進展と二次元貫通き裂進展との比較、最深部と表面方向の

き裂進展速度の比較，走査型電子顕微鏡による破面解析をし，疲労き裂進展速度に影響を及ぼす海水効果として， $L = ([da/dN]_{CF}/[da/dN]_F)$  で評価している。表面き裂のき裂形状比 ( $a/c$ ) と残留応力の影響を考察し，海水環境下での三次元表面き裂進展速度特性を破壊力学で評価できることを実験から明らかにした。

第7章「結論」では本研究で得られた結果を総括して示している。

付録の「各種表面欠陥からの三次元疲労き裂進展特性に及ぼす各種力学因子の影響」では，各種欠陥から発生する三次元応力場の表面き裂の疲労き裂進展特性を調べている。主な項目としては，負荷形式とき裂形状，傾斜き裂の進展，複数き裂間干渉を挙げている。