高張力鋼の海洋波浪応力下の腐食疲労き裂進展特性*

駒井 謙治郎^{*1}, 箕 島 弘 二^{*1}, 金 貴 植^{*2}

Corrosion Fatigue Crack Growth Characteristics of High-Tensile Strength Steel under Simulated Sea-Wave Loadings

Kenjiro KOMAI, Kohji MINOSHIMA, and Guisik KIM

The corrosion fatigue (CF) crack growth behavior of 3.5 % Ni-Cr-Mo-V steel for offshore structures, which was heat-treated to two strength levels (846 MPa, 1150 MPa), was investigated under simulated sea-wave loadings and sinusoidal waves of constant amplitude. The sea-wave loadings were obtained from field tests in a seawater environment. The tests were performed at a free corrosion and a cathodic potential of -1050 mV vs. Ag/AgCl in synthetic seawater. The CF crack growth rates of the higher-strength-level steel were highly accelerated compared to those of the lower-strength steel under simulated sea-wave loadings as well as under constant amplitude sinusoidal waves. At the free corrosion potential, the CF crack growth rates under the simulated sea-wave loadings were lower than those of the constant amplitude waves. At the cathodic potential, the crack growth rates of both tests were almost the same. The difference in crack growth rate between the simulated sea-wave and the constant amplitude waves was explained in terms of their fractographic features. The growth rates of the simulated sea-wave were nearly equal to the rates of the field tests; the CF behavior in the seawater field environment could be analyzed from the data obtained through simulated sea-wave loading tests in the laboratory.

Key Words: Fatigue, Corrosion Fatigue, Simulated Sea-Wave Loading, Crack Propagation, Synthetic Seawater, Fractography

1. 緒 言

実環境で稼働中の機械、構造物が受ける荷重履歴は時間とともに振幅や平均値が変動する不規則波である場合が多い。したがって、機械、構造物に長期間にわたって必要十分な信頼性をもたせるために、実働条件下の腐食疲労機構解明と設計基準の確立が急がれている。

実働条件下の疲労に関する研究は実働荷重が不規則なランダム性を持つため、疑似ランダム荷重あるいはプログラム荷重を用いて行われてきた⁽¹⁾⁽²⁾。実環境応力下の疲労寿命は、疲労損傷の線形加算則(Miner 則)を仮定して、定常応力波形下の試験結果より推定する方法が基本である。このため、大半の研究は不規則ランダム応力下の試験結果を、定常応力波形下の結果より推定するパラメータの選定に注目しており^{(3)~(5)}、不規則ランダム応力下の腐食疲労機構と定常応力波形下の腐食疲労機構との相違、あるいは実験室試験が実環境条件を忠実に再現しているのか否かについては不明である。

本研究では、海洋実環境波浪応力をシミュレートした条件下の腐食疲労き裂進展試験(以下シミュレート試験という)を行い、その結果を定常応力波形下の試験結果および海洋フィールド試験結果⁽⁶⁾と比較・検討するとともに、シミュレート試験における実環境状態の再現性、定常応力波形試験結果とシミュレート試験結果との関連性を明らかにした。

2. 実 験 方 法

供試材は 3.5 % Ni-Cr-Mo-V 鋼である。材料強度レベルの影響を調べるため、受入れのままのもの(AR 材)と熱処理を施したもの(HT 材)を用いた。それぞれの化学成分および機械的性質を表 1 と表 2 に、また HT 材の熱処理条件を表 3 に示す。試験片形状は図 1 に示す CT 型である。試験環境は溶媒として比抵抗 $R > 1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ のイオン交換水を用いた人工海水(ASTM D 1141-52)であり、0.1 N NaOH 水溶液により pH 8.2 に調整した。腐食液は、実環境の温度である $288 \text{ K} \pm 1 \text{ K}$ に保って恒温槽と腐食槽の間を循環させた。カソード防食は、ポテンショスタットによる電位規制であり、防食電位を Al 犠牲陽極(ALAP, 中川防蝕工業(株)製)使用時の電位である、 -1050 mV vs. Ag/AgCl とした。用いた試験機は、容量 49 kN の横

* 昭和 63 年 6 月 27 日 第 26 回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和 63 年 10 月 25 日。

^{*1} 正員、京都大学工学部(〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 正員、京都大学大学院。

表 1 供試材の化学成分 (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al
AR	0.25	0.05	0.24	0.006	0.004	3.72	1.72	0.06	0.41	0.13	<0.005
HT	0.25	0.04	0.26	0.007	0.004	3.82	1.72	0.10	0.40	0.13	<0.005

表 2 供試材の機械的性質

	σ_y (MPa)	σ_B (MPa)	K_{ISCC} (MPa $\cdot m^{1/2}$) ⁷⁾
AR	846	948	>150
HT	1150	1310	≒15

 K_{ISCC} : In synthetic seawater, Free corrosion

表 3 HT 材の熱処理条件

Quenching : 900° C x 1 hour - Oil Quench
Tempering : 500° C x 2 hour - Air Cool

図 1 試験片形状 (単位: mm)

図 2 シミュレート腐食疲労試験システム

形電気油圧式サーボ疲労試験機である。予き裂は実験室空中で正弦波応力を用いて入れた。腐食疲労き裂進展試験としては応力比 $R=0.7$, 繰返し速度 $f=0.17$ Hz, 3 Hz の正弦波応力を用いた定常応力波形試験とシミュレート試験を行った。き裂長さは最小目盛 0.01 mm のダイヤルゲージ付移動式顕微鏡により測定した。また、破面観察には電界放射形高分解能走査電子顕微鏡 (日立 HFS-2) を用いた。

3. シミュレート腐食疲労試験システム

図 2 にシミュレート腐食疲労試験システムの概略を示す。(株)日本製鋼所室蘭研究所においてデータレコーダに記録した海洋波浪応力を試験機制御用コンピュータ (HP-9000 シリーズ, モデル 310) に入力して, 電

(a) Season I

(b) Season II

図 3 シミュレート試験波形の一例

(a) Season I

(b) Season II

図 4 シミュレート試験波形のパワースペクトル密度分布の一例 (49 秒, 8 192 点)

気油圧式サーボ疲労試験機を制御した。この場合, 60 分 (6 ms $\times$ 600 000 点) を 1 ブロックとしたプログラム波形に加工してシミュレート試験を行った。また, 背面ひずみゲージを用いた除荷弾性コンプライアンス法によりき裂開口点をミニコンピュータシステム (MELCOM 70/10) を用いて測定した。

波浪応力としては, 波が穏やかな Season I と波の

高い嵐の時の Season II の 2 種類を用いた。図 3 に、Season I, II の波浪応力の波形の一例を、また図 4 にパワースペクトル密度分布の一例を示す。ここで、図 3 の縦軸は 1 ブロック中の最大荷重 P_{max} を用いて正規化した値 P/P_{max} である。また、レインフロー法により計数した荷重幅と平均値の分布を図 5 に、最大荷重幅 (ΔP_{max}) の 5 % 以下の荷重変動幅を無効荷重変動幅とみなして求めた波形計数結果を表 4 に示す。 P_{max} の 5 % 以下の荷重幅を無効荷重幅とみなしたのは、日本製鋼所研究所で行われた海洋フィールド試験において、 P_{max} の 2 % 以下を無効振幅とみなしたこと⁽⁶⁾と対応する。これより、Season II の波浪応力のほうが荷重変動が大きく、高周波成分が多いことがわかる。表 4 において、 R_i は計数された各サイクルの応力比である。なお、シミュレート試験に用いた波形はデータレコーダ記録、再生時に生じる高域ノイズを除去するため、折点周波数 3 Hz、-20 dB/dC のデジタルフィルタ（一次遅れ）をかけた。また、Season I の原波形では振幅が小さかったため ($0.83 \leq R_i$)、振幅成分を大きくしたものをを用いた。

4. 実験結果および考察

4.1 定常応力波形下の腐食疲労き裂進展特性

正弦波応力下で行った人工海水中の腐食疲労き裂進展

表 4 波形計数結果 (レインフロー法)

	Season I	Season II
Maximum Load (P_{max})	1000 : F.S.	1000 : F.S.
Maximum Load Range (ΔP_{max})	442.6	500.2
Stress Ratio (R_i)	>0.56	>0.50
Number of Cycles	3422.5	10886
Average Frequency ($\bar{f}$, Hz)	0.95	3.02
Equivalent Load Range (ΔP_{eq})	124.1	123.9

図 5 シミュレート試験波形の荷重幅と平均値の分布 ($P_{max}=1000$ F.S.)

展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を図 6 に、 da/dN と有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} の関係を図 7 に示す。図 6 と図 7 には比較のため、空中疲労と $E=-1050$ mV vs. Ag/AgCl でのカソード防食下の結果⁽⁶⁾を併せて示す。き裂閉口は、カソード防食下の下限値近傍と AR 材の自然腐食 ($E=E_c$) 下、 $f=0.17$ Hz の低 ΔK 域においてのみ観察されたが (図 6 において、き裂閉口が観察された点には * 印を付けてある)、図 6 と図 7 の本質的な差異はほとんどない。

図より明らかなように、強度が高い HT 材のき裂進展速度は同じ条件下の AR 材のものより大きく加速した。AR 材の場合、自然腐食下の $f=0.17$ Hz (▲) と 3 Hz (△) は空中より加速したが、 $f=0.17$ Hz のほうが 3 Hz より速い。また、 $E=-957$ mV (△) のカソー

図 6 定常応力波形試験結果 (da/dN と ΔK の関係)

図 7 定常応力波形試験結果 (da/dN と ΔK_{eff} の関係)

ド防食下の結果は、防食電位が異なる $E = -1050$ mV(---) のき裂進展速度とほぼ一致した。また、カソード防食下の下限界値は空中と自然腐食下の曲線から予想される下限界値より上昇したが、下限界値を越えると da/dN はそれより大きく加速した。HT 材においては、自然腐食下の $f = 0.17$ Hz(●) の da/dN は $f = 3$ Hz(○) のものより加速した。また、カソード防食下(○) の da/dN は自然腐食下(●, ○) よりさらに大きく加速した。この時、図8に示すように、あるき裂長さからは表面近傍が優先的に進展し、き裂進展方向に対して凹形のき裂先端形状を呈した。このような場合のき裂長さの算定について、必ずしも実状を反映しているとは言えないが、ここでは第一近似として、試験片表面で測定したき裂長さを厚さ方向12箇所の平均値を用いて補正し、その値を用いて整理した(+印)。この時の表面近傍の破面は粒界割れであり、HT 材のカソード防食下においては、表面近傍において外部電流による水素吸蔵が容易に生じてき裂進展が著しく加速されたものである。図8に示すき裂先端形状は、HT 材のカソード防食下のシミュレート試験、および海洋フィールド試験⁽⁶⁾においても見られた。

4.2 シミュレート試験下の腐食疲労き裂進展特性

シミュレート試験における等価応力拡大係数幅 (ΔK_{eq}) は次式で定義される等価荷重幅 (ΔP_{eq}) を用いて求めた。

$$\Delta P_{eq} = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\Delta P_i)^m \right]^{1/m}$$

ここで、指数 m は、 $m=2$ と 3、あるいは定常応力波形試験から求められるパリス則の指数 m を用いることが報告されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁸⁾。本研究におけるパリス則の指数は、定常応力波形試験において、HT 材のカソード防食下と自然腐食下でのプラトー領域を除いた各条件下で 3.11~3.17 であったので、その平均値 3.15 を

図8 HT 材のカソード防食下の破面(正弦波, $R=0.7$, $f=0.17$ Hz, $E=-957$ mV vs. Ag/AgCl)
(矢印はき裂進展方向を示す)

用いた。図7に、Season IIの波浪応力を用いて行ったAR 材の空中疲労き裂進展速度 da/dN を、 $m=2$ と $m=3.15$ を用いて求めた ΔK_{eq} により整理した結果を示す。なお、この実験においてはき裂閉口は観察されず、き裂開口点 K_{op} 以上の応力変動幅を用いて求めた等価有効応力拡大係数幅 (ΔK_{eff})_{eq} と ΔK_{eq} は等しい。図より明かなように、 $m=2$ で整理した場合は正弦波応力下で行った空中疲労(—)より加速するが、 $m=3.15$ を用いて整理した場合はほぼ一致した。そこで、以下では $m=3.15$ を用いて等価(有効)荷重幅を計算することとした。

シミュレート試験における等価応力拡大係数幅 ΔK_{eq} と対時間腐食疲労き裂進展速度 da/dt の関係を図9に示す。図中*印を付けたデータはき裂閉口が観察されたもの、+印はき裂が閉口しているか否かが未確認のものであり、それ以外ではき裂閉口は観察されなかった。図9で、同一環境条件下のものを比較すると、Season IはSeason IIより1ブロック当たりの応力繰返し数が少ない(表4)ため、Season Iの da/dt がSeason IIの da/dt より遅い。AR 材とHT 材を比較すると、AR 材の da/dt はHT 材より減速した。

4.3 シミュレート試験、定常応力波形試験、海洋フィールド試験結果の比較 図9に示した対時間き裂進展速度から平均繰返し速度($\bar{f}$)を用いて求めた da/dN と (ΔK_{eff})_{eq} の関係を図10に示す。図には、定常応力波形試験結果と海洋フィールド試験結果⁽⁶⁾を併

図9 シミュレート試験結果 (da/dt と ΔK_{eq} の関係)

せて示す。図 10 において、 da/dN で整理した図 9 とは逆に、AR 材のカソード防食下を除いて Season I の da/dN が Season II より加速した。これは表 4 に示したように、Season I の $\bar{f}$ が Season II より小さいためである。次に、自然腐食下の AR 材、HT 材の da/dN を正弦波応力下で行った結果と比較すると、Season I ($\bar{f}=0.95$ Hz) と Season II ($\bar{f}=3.02$ Hz) とともに正弦波応力 ($f=0.17$ Hz と 3 Hz) 下の da/dN より減速した。この減速は、SCC に敏感であり、正弦波応力試験下で大きい繰返し速度効果が見られた HT 材においてとくに顕著である。

空中疲労の場合は図 7 に示したように、正弦波応力下と Season II の da/dN は、 $\Delta K_{eq}[(\Delta K_{eff})_{eq}]$ で整

図 10 シミュレート試験結果
[da/dN と $(\Delta K_{eff})_{eq}$ の関係]

図 11 シミュレート試験下の空中疲労破面
[AR 材, Season II, $(\Delta K_{eff})_{eq}=8.3$ MPa·m^{1/2}] (矢印はき裂進展方向を示す)

理するとほぼ等しかった。すなわち、自然腐食下において、シミュレート試験下の da/dN が正弦波応力試験下に比べて減速したのは環境効果が両波形間で異なったためと考えられる。SCC あるいは腐食疲労き裂進展に及ぼす繰返し速度効果、波形効果は以前から多く報告されており⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、とくに、2 段変動応力下で高応力から低応力にした場合、自然腐食下では腐食疲労き裂進展速度は大きく低下するが、カソード防食下ではその低下が小さいと報告⁽¹¹⁾されている。また、著者ら⁽¹²⁾⁽¹³⁾は繰返し SCC に及ぼす応力波形効果を調べ、水素溶解量が少なく、繰返し応力によってき裂先端の塑性域に水素が拡散・集中して初めて水素脆化割れが生じるときは、腐食疲労における波形効果と同様に、応力上昇時間の加速効果が支配的になるが、材料内に水素が十分に吸蔵されているときは最大応力保持時間の加速効果が支配的になることを報告した。後述するように、シミュレート試験下の破面を正弦波応力試験下の破面と比較すると、AR 材、HT 材ともに粒界割れ・粒内脆性割れで代表される脆性破面が減少してい

(a) 正弦波, $R=0.7$, $f=0.17$ Hz
 $\Delta K_{eff}=13.7$ MPa·m^{1/2}

(b) 正弦波, $R=0.7$, $f=3$ Hz
 $\Delta K_{eff}=10.5$ MPa·m^{1/2}

(c) Season I, $(\Delta K_{eff})_{eq}$
 $=9.2$ MPa·m^{1/2}

(d) Season II, $(\Delta K_{eff})_{eq}$
 $=7.9$ MPa·m^{1/2}

図 12 AR 材の自然腐食下 ($E=E_c$) の破面 (矢印はき裂進展方向を示す)

た。すなわち、シミュレート試験下では正弦波応力試験下に比べてき裂先端の水素溶解量が減少して、 da/dN が低下したものである。この水素溶解量の減少はとくに自然腐食条件下の HT 材で著しい。

カソード防食下においては、AR 材の Season I (■) と Season II (□) の da/dN はほぼ等しく (図 10)、これらの値はまた正弦波応力下での da/dN の外挿値ともほぼ等しかった。この場合、正弦波、Season I、II を通じて、脆性破面率の差がほとんど見られなかった。すなわち、いずれの場合も材料内に十分に水素が吸蔵していたため、 da/dN が一致したものである。

以上より、本シミュレート試験結果は、正弦波を用いた定常応力波形試験結果に対して、自然腐食下では安全側に、カソード防食下ではほぼ一致した。また、シミュレート試験結果と海洋フィールド試験結果を比べると、AR 材の Season I の自然腐食下 (▲) とカソード防食下 (■) の高 $(\Delta K_{eff})_{eq}$ 域での結果は、海洋フィールド試験結果の外挿線上に位置した。一方、カソード防食下の低 $(\Delta K_{eff})_{eq}$ 域では、シミュレート試験結

果は下限界特性を示すようであり、両者には差が見られる。この点については今後の検討課題にしたい。

4.4 破面観察 空中疲労において、AR 材の Season II の破面 (図 11) は粒内延性割れであり、ビーチマークも見られた。HT 材においては、空中で入れた予き裂部において粒界割れがわずかに見られた。自然腐食下においては、AR 材、HT 材いずれも低 ΔK 域での破面は腐食溶解痕跡が認められた。AR 材の正

(a) 正弦波, $R=0.7$, $f=0.17$ Hz
 $\Delta K_{eff}=12.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

(b) 正弦波, $R=0.7$, $f=3$ Hz
 $\Delta K_{eff}=8.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

(c) Season I, $(\Delta K_{eff})_{eq}=10.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

(d) Season II, $(\Delta K_{eff})_{eq}=7.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

図 13 HT 材の自然腐食下 ($E=E_c$) の破面 (矢印はき裂進展方向を示す)

(a) 正弦波, $R=0.7$, $f=0.17$ Hz
 $\Delta K_{eff}=14.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

(b) Season I, $(\Delta K_{eff})_{eq}=8.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

(c) Season II, $(\Delta K_{eff})_{eq}=7.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

図 14 AR 材のカソード防食下の破面 (矢印はき裂進展方向を示す)

弦波, $f=0.17\text{ Hz}$ と 3 Hz , Season I および Season II の破面を図 12 に示す。正弦波, $f=0.17\text{ Hz}$ と 3 Hz では粒界割れと粒内水素脆化割れ, および粒内延性割れの混合破面であるが, 脆性割れが支配的である。また, Season I は脆性割れが観察されるが, Season II ではほとんどが粒内延性割れである。これは, 図 10 に示したように, Season I, Season II の da/dN が正弦波の結果より減速したこと, また, Season I の da/dN が Season II より速く, Season II が空中疲労の結果と等しかったことを裏付けている。

HT 材の自然腐食下の正弦波 $f=0.17\text{ Hz}$ では, ほとんど粒界割れである [図 13(a)]。また, 正弦波 $f=3\text{ Hz}$ では粒界割れが支配的であるが, 粒界破面率は 0.17 Hz より減少する [図 13(b)]。また, Season I, II では正弦波より粒界割れが少ないが, Season I が Season II より水素の影響を受けた脆性割れが多い [図 13(c), (d)]。これは, 図 10 における da/dN の大小関係とよく対応している。

AR 材のカソード防食下の正弦波 $f=0.17\text{ Hz}$ および Season I および Season II の破面を図 14 に示す。いずれの場合も, 擬へき開状の粒内水素脆化割れ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾と粒界割れが認められ, 定常応力波形試験下とシミュレート試験下の破面の差はほとんど見られない。また, カソード防食下のいずれの破面も自然腐食下の破面より脆性割れが多い。HT 材の正弦波 $f=0.17\text{ Hz}$ の破面はさきに述べたようにき裂が表面だけ進展した (図 8)。この場合, 優先的に進展した表面近傍の破面は粒界割れが支配的であった。

5. 結 論

3.5% Ni-Cr-Mo-V 鋼を用いて, 海洋実環境波浪応力をシミュレートした条件下の腐食疲労き裂進展挙動を検討した結果, 以下のことが明らかになった。

(1) 材料強度が大きい HT 材 ($\sigma_y=1150\text{ MPa}$) の腐食疲労き裂進展速度 da/dN は, シミュレート試験下と定常応力波形試験下のいずれの場合でも AR 材 ($\sigma_y=846\text{ MPa}$) より大きく加速した。AR 材の場合,

自然腐食下のき裂進展に及ぼす繰返し速度効果は小さいが, HT 材は正弦波でとくにその速度効果が大きい。

(2) 自然腐食下において, シミュレート応力 Season I ($\bar{f}=0.95\text{ Hz}$) と Season II ($\bar{f}=3.02\text{ Hz}$) のき裂進展速度 da/dN は, 正弦波 $f=0.17\text{ Hz}$ と 3 Hz のいずれの場合よりも減速した。この場合, Season I の da/dN は Season II のそれよりも加速した。シミュレート試験下では正弦波応力試験下と比べてき裂先端の水素溶解量が減少し, da/dN の低下となって現れたものである。

(3) カソード防食下においては, 外部カソード電流により材料内に十分に水素が吸蔵したため, 正弦波応力下とシミュレート応力 Season I, Season II の da/dN はほぼ等しかった。

(4) 海洋波浪応力シミュレート試験結果は海洋フィールド試験結果とほぼ一致しており, シミュレート試験により実環境状態が再現できる。

本研究は昭和 62 年度科学技術庁科学技術振興調整費による「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」の一環をなすものである。

文 献

- (1) 菊川・ほか 3 名, 機論, 35-278 (1969), 2020.
- (2) 薄・岡村, 機論, 44-386 (1978), 3322.
- (3) Barsom, J. M., ASTM STP 536 (1973), 147.
- (4) Cheng, Y. W., Int. J. Fatigue, 7-2 (1985), 95.
- (5) Chaudhury, G. K. and Dover, W. D., Int. J. Fatigue, 7-1 (1985), 13.
- (6) 岩館・ほか 2 名, 日本機械学会第 26 回シンポジウム前刷集, (1988-6), 1.
- (7) Iwadate, T., ほか 4 名, Proc. of Offshore Technology Conference, Paper OTC 4712, (1984).
- (8) 町田・ほか 3 名, 造船学会論文集, 154 (1983), 396.
- (9) 駒井, 機械の研究, 29 (1977), 1247.
- (10) 河合・鯉淵, 材料, 27-301 (1978), 967.
- (11) 中島・ほか 2 名, 材料, 33-370 (1984), 908.
- (12) 遠藤・ほか 3 名, 機論, 45-398, A (1979), 1152.
- (13) 箕島・ほか 2 名, 機論, 54-500, A (1988), 670.
- (14) Barbangleo, A., J. Eng. Mater. Technol., 109 (1987), 119.