海水中における軟鋼の疲労き裂成長抑制に及ぼす応力比の影響*

元田 慎一**, 平塚 勝義***, 鈴木揚之助**, 辻川 茂男****

** 東京商船大学

*** 東京商船大学大学院 (現, 古河電気工業株式会社)

**** 東京大学工学部金属工学科

Influence of Stress Ratio on Crack Growth Retardation During Corrosion Fatigue of Mild Steel in Sea Water*

Shin-ichi Motoda**, Katsuyoshi Hiratsuka***, Yohnosuke Suzuki** and Shigeo Tsujikawa****

** Tokyo University of Mercantile Marine

*** Graduate School, Tokyo University of Mercantile Marine
(Presently, The Furukawa Electric Co., Ltd.)

**** Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

The influence of stress ratio on the retardation of surface fatigue crack growth of mild steel in sea water was investigated by varying the testing frequency from 0.2 Hz to 10 Hz and the temperature from 288K to 298K at two stress ratios of 0.32 and 0.5. For both stress ratios, there appeared to be a frequency at which the rate of crack growth showed maximum. This frequency increased with the increase of the temperature, although the maximum of the crack growth rate decreased with the increase of the temperature. Furthermore, the rate of crack growth increased with the increase of the testing frequency up to a certain frequency, but it started to decrease with the further increase of the testing frequency. At lower testing frequencies and for the two stress ratios employed here, there appeared to be a critical frequency at, or below which the rate of crack growth in sea water was so low that it could be regarded as virtually zero. This critical frequency increased with increase of the sea water temperature. At temperatures in the range between 288K and 298K, the critical frequency was higher at the stress ratio of 0.5 than that of 0.32. These observations can be explained reasonably by crack tip blunting caused by dissolution in sea water.

Key words : surface fatigue crack, stress ratio, crack growth retardation, critical frequency, crack tip blunting

1. ま え が き

天然海水中, 波浪の周期を含む低繰返し速度領域で, 軟鋼丸棒表面から成長する半楕円状表面き裂の成長挙動を調べ, 前報では, 一定温度下で, き裂成長速度は

繰返し速度の低下と共に加速するが, ある繰返し速度で最大の加速率を示した後減速に転じ, より低い繰返し速度下ではき裂成長の抑制・停止が起こること^{1), 2)}, さらに, このき裂成長の抑制・停止を示す限界繰返し速度は強い温度依存性を示し, 海水温度の上昇と共にこの限界繰返し速度は高繰返し速度側へ移ること²⁾を報告した。これらの実験結果から, き裂成長の抑制・停止の原因は繰返し速度の低下や海水温度の上昇により, き裂先端近傍でのき裂壁面の腐食溶解速度がき裂先端の対時間き裂成長速度に相対的に近づく結果, き裂先端が鈍化するため³⁾と考えた。しかし, き裂内の腐食生成物によるくさび作用も, またき裂成長速度を減

* 第39回腐食防食討論会(名古屋, 1992)で一部発表

** 〒135 東京都江東区越中島 2-1-6 (2-1-6, Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135 Japan)

*** 〒140 東京都品川区東品川 4-13-14 (4-13-14, Higashishinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, 140 Japan)

**** 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1 (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan)

Fig.1 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in air at 10 Hz.

速すると考えられ、応力比が小さい場合には特に大きな影響力を持つと言われている⁴⁾。このため本実験についてもくさび作用の関与を全く否定することはできない。

本報では、前報²⁾でき裂成長の抑制・停止現象が認められた温度および繰り返し速度下で、くさび作用がより小さくなると考えられる応力比のみを増加させた条件下で腐食疲労試験を行い、軟鋼材の表面き裂においてき裂成長の抑制・停止現象が起こる原因について、これらの応力比や海水温度、繰り返し速度との関係から、さらに詳しく考察することを目的として実験を行った結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片

供試材は、前報²⁾と同じく、0.09C, 0.01Si, 0.32Mn, 0.016P, 0.018S, 0.001Cuの化学成分(重量%), および引張り強さ 478 MN/m², 0.2%耐力 433 MN/m²の機械的性質を持つ直径 5 mm の市販軟鋼材を長さ 200 mm に切断し、02 番サンドペーパーで表面仕上げを施した後、同じく前報²⁾で示した形状・寸法通り、放電加工によって深さ 130 μm の切欠きを軸方向に垂直に付与したものを試験片とした。切欠きの形状は幅 70 μm の U 字型切欠きであり、切欠き先端の曲率半径は 35 μm である。

2.2 試験海水

Izu-ohshima Island で採取した清浄な天然海水を使用した。海水の塩素イオン濃度は 2%, pH は 8.2, また比重は 1.025 である。

2.3 腐食疲労試験

前報²⁾と同様、外周部がジャケット状のガラス製試験槽内に海水約 120 ml を注入し、気液境界部をシリコンゴム管でシールした試験片を液中約 40 mm のみ露出させて浸漬した後、切欠き部に繰り返し引張り-引張り応

力を付与する。試験は、繰り返し速度 (f) を 0.2~10 Hz と目的に応じて変化させ、最大公称引張り応力を前報²⁾と同じ 332 MN/m² (0.2%耐力の 77%)一定とし、応力振幅のみを前報²⁾の 226 MN/m² から 166 MN/m² に変えることにより応力比 (R) を前報²⁾の 0.32 から 0.5 とした。海水の温度は、試験槽外周部に恒温水を循環させることにより、288~298 K の各温度に一定に保持した。また、海水の交換は 6 日に一度の割合とした。空気中での疲労試験は、繰り返し速度を 10 Hz とし、最大公称引張り応力および応力比は腐食疲労試験の場合と同じとした。使用した疲労試験機は容量 5 ton の縦型電気油圧サーボ疲労試験機であり、応力波形はいずれも正弦波を用いた。

2.4 き裂成長速度の測定

測定の手法は前報²⁾と同様である。すなわち、ある繰り返し数 (N) の間に切欠き底から半楕円状に成長するき裂深さ (l) およびき裂幅 ($2c$) をそれぞれ測定し、これらの測定値からき裂成長曲線、およびアスペクト比 (l/c) と l の関係、さらにはこれらの関係の曲線からき裂成長速度 (dl/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) との関係を必要に応じて求めた。 ΔK の計算方法は前報²⁾によった。破面観察は、所定の繰り返し数を経過して取り出した試験片を室温下で曲げによって破断した後、破面をそのまま乾燥して走査型電子顕微鏡で行った。

3. 試験結果および考察

空気中での疲労き裂深さと繰り返し数との関係を Fig. 1 に示す。Fig. 1 より、破線で示した空気中の応力比 0.32 ではき裂は安定成長を示す²⁾が、応力比 0.5 においては繰り返し数 900 kc までにき裂の発生・成長は認められない。これは最大公称引張り応力一定のまま応力比を 0.32 から 0.5 とすることで応力振幅が減少するために繰り返しの初期における ΔK 値が減少し、このためき裂成長の駆動力の大幅な低下となり、空気中におけるき裂成長の下限界値を下回ったためと考えられる。一方、天然海水中では、まず海水温度 298 K の場合のき裂成長曲線を Fig. 2 に示すように、繰り返し速度が $1.5 \leq f \leq 10$ Hz の範囲において繰り返し数の増加と共にき裂は成長しており、空気中とは異なり、海水中では応力比 0.5 においても安定成長を示す。しかし、本図中破線で示した応力比 0.32 の場合と比較すると、特にき裂成長初期においてはき裂成長はゆるやかであり、空気中と同様、応力比を 0.5 に上げたことによるき裂成長の駆動力の低下がこの原因と考えられる。一方、き裂成長におよぼす繰り返し速度の影響は、応力比 0.32 同様 0.5 においても認められ、繰り返し速度を 10 Hz (■) から 5 Hz (□) に低下させるとき裂成長の度合いは増大す

Fig. 2 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in sea water at 298K.

Fig. 4 Fatigue crack aspect ratio vs. fatigue crack depth in sea water at 288K.

Fig. 3 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in sea water at 288K.

Fig. 5 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range in sea water.

る。しかし、繰返し速度をさらに低下させて 3 Hz (Δ) ならびに 1.5 Hz ($\bullet$) とした場合は、成長の度合いはかえって 5 Hz のそれより低下し、き裂成長は減速側に転じる。この傾向は応力比 0.32 の場合の 1 Hz と 0.2 $\cdot$ 0.5 Hz の間でも認められる。なお、本図において 3 Hz と 1.5 Hz とでは、本実験精度上き裂成長の度合いに差が認められなかったため同一の曲線で示している。

Fig. 3 は海水温度を 10K 低下させて 288K とした場合のき裂成長曲線を示したものである。この温度でも、298K と同様、応力比 0.5 においてき裂の安定成長が認められるが、応力比 0.32 の場合に比べ初期における成長の度合いは低い。さらに、繰返し速度の影響としては、 $0.3 \leq f \leq 10$ Hz の範囲で繰返し速度の低下と共にき裂成長の度合いは大きくなる。

Fig. 4 は 288K 海水中におけるアスペクト比とき裂深さとの関係を示したものである。アスペクト比、すなわちき裂面の形状は応力比 0.32 と同様き裂深さの増大と共に半円形に近づくように変化する。また、本図より繰返し速度の違いによるアスペクト比の増加傾向に差異

は認められず、 $0.2 \leq f \leq 10$ Hz の範囲内でわずかのばらつきはあるもののすべて 1 本の曲線で示される。さらに、海水温度 298K の場合も、ここには示していないが 288K の結果と一致した。このアスペクト比の増加傾向と繰返し速度ならびに海水温度の関係は、前報²⁾で示した応力比 0.32 の場合と同様である。

Fig. 5 は、海水中 288K (a) ならびに 298K (b) における dl/dN と ΔK の関係を示したものである。き裂成長速度に対する繰返し速度の影響をみると、(a) の 288K ではき裂成長速度は繰返し速度の低下と共に加速しており、(b) の 298K についても同様に繰返し速度の低下と共に加速するが 5 Hz で最大のき裂成長速度を示した後、その後減速する。288K においては、後述するように繰返し速度 0.2 Hz においてき裂成長の停止が現れるため、繰返し速度 0.3 Hz で最大のき裂成長速度となる。さらに、両温度下とも、き裂成長速度に対する繰返し速度の影響は低 ΔK 域でより顕著となる。そこで dl/dN と ΔK との間に直線関係が認められ、かつ応力比 0.32 の場合との比較を可能にする最小

Fig. 6 Effect of cyclic frequency on crack growth rate in sea water.

の ΔK 値として $\Delta K = 5 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ におけるき裂成長速度を、各繰返し速度ならびに液温について比較したものを Fig. 6 に示す。

本図より、応力比 0.5 で、両温度下とも、き裂成長速度は繰返し速度の低下とともに加速するが、298K では 5 Hz、288K は 0.3 Hz でそれぞれ最大値を示した後、さらに繰返し速度が低下すると減速に転ずる。これらき裂成長速度の最大値を示す繰返し速度は液温が高い場合ほど高繰返し速度となる。さらに、き裂成長速度の最大値そのものも 298K の $5.2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ に対して、288K の $6.4 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ と液温が低い方が高くなっており、これらの事から液温の上昇はき裂成長速度に対して減速効果として働くことがわかる。これら応力比 0.5 におけるき裂成長速度と繰返し速度および液温の関係は、図中、破線で示した応力比 0.32 の場合²⁾と同様であり、したがって応力比 0.32 と 0.5 の場合におけるき裂成長挙動には相違は認められない。また、同一液温下におけるき裂成長速度を両応力比で比較しても、応力比を 0.32 から 0.5 に増加したことによるき裂成長速度の明確な加速傾向は認められない。

海水環境における鋼材の疲労き裂成長速度に及ぼす応力比の影響を調べた従来の報告では、応力比が 0.1 近辺から増加するに伴い、き裂成長速度は加速する^{5)~12)}、あるいはき裂成長の下限界 ΔK 値が減少する^{6), 13), 14)}とするものが多い。しかし、これらの加速傾向も応力比 0.6¹³⁾、あるいは 0.5~0.7⁵⁾で飽和するとしており、いずれもこの加速の原因として、応力比の上昇により腐食生成物によるくさび作用が効果的に働かなくなることを挙げている。

前述したように、くさび作用が軽減されると考えられる応力比 0.5 という条件下においても、き裂成長速度は応力比 0.32 の場合と同様の繰返し速度効果ならびに液温の変化による効果を示すこと、さらに、同一液温下

Fig. 7 Fatigue crack depth vs. number of fatigue cycles in sea water.

で応力比の上昇によるき裂成長速度の顕著な加速がみられないことから、いずれの応力比においても、繰返し速度の低下および液温の上昇によるき裂成長速度の減速原因については、繰返し速度の低下や液温の上昇によりき裂壁面の腐食溶解速度がき裂先端における対時間のき裂成長速度に相対的に近づく結果、き裂先端が鈍化することによる³⁾、との考え方で統一的に説明できるものと考えられる。

Fig. 7 は、海水温度 288, 293 および 298K について、Fig. 6 に示した繰返し速度をさらに低下させた時のき裂成長挙動を示したものである。本図より、いずれの温度の場合もき裂成長は繰返し数の増加と共に抑制され最終的には停止する。この繰返し速度より低い繰返し速度においては、その抑制傾向がさらに強まることを確認¹⁾しており、したがって、図中の黒マークで示した各繰返し速度が、各温度におけるき裂成長の抑制・停止を示す限界繰返し速度となる。繰返しの初期においては、図中、実線で示した安定成長する場合のき裂と同様の成長挙動を示すものの、繰返し数 700~800 kc から成長の抑制が始まり、最終的に停止する。成長停止時のき裂深さは海水温度が低い場合ほど大きく、このことはき裂成長抑制の度合いは液温の高い場合の方が大きいことを示しており、この結果は Fig. 6 におけるき裂成長速度の最大値が液温の高い場合の方が低くなったことと同一原因によるものと考えられる。

Fig. 8 は、Fig. 7 で示したき裂成長停止を示す限界繰返し速度とその時の海水温度との関係を、応力比 0.32 と 0.5 の両者の場合について示したものである。本図から、0.32, 0.5 の両応力比とも、き裂成長の停止を示す限界繰返し速度は海水温度に強く依存し、液温が高いほど高繰返し速度側でき裂成長の停止が生じ、これらの限界繰返し速度とそのときの液温との間にはアレニウスプロットによる直線関係が認められ、しかも

Fig.8 Arrhenius plot of critical cyclic frequency in sea water.

両直線はほぼ平行となる。これらの実験事実から、このき裂成長停止の原因は、応力比の大小に関わらず、いずれも前述したようにき裂先端の鈍化によるものであり、さらにこの鈍化の原因として、き裂先端の対時間成長速度とき裂壁面の腐食溶解速度が相対的に同じ程度に近づき、このため鋭いき裂を維持できなくなるため³⁾と考えられる。したがって、き裂成長の抑制・停止が起こるための限界繰返し速度^{15), 16)}またはき裂成長速度¹⁷⁾が存在することになり、この考え方は応力比 0.32 の場合のみならず応力比 0.5 における本実験結果にも適合する。さらに、応力比 0.32 の場合に比べ高応力比の 0.5 の場合の方が限界繰返し速度が高くなるという実験結果についても、次のように説明できる。すなわち、前述したように、最大公称引張り応力一定の下で応力比を 0.32 から 0.5 にしたことが、試験初期の ΔK 値の減少によるき裂成長の駆動力を低下させ、従ってき裂先端の対時間き裂成長速度は小さくなる。この事は、比較的高繰返し速度域においても、き裂先端の対時間き裂成長速度がき裂先端の鈍化が起こるための条件¹⁾であるき裂先端近傍の腐食溶解速度と相対的に近い値になることを意味しており、したがって、き裂成長停止の起こる限界繰返し速度が大きくなる²⁾と考えられる。さらに、応力比が増大するとき裂の開口量が増大し、き裂内の液の侵入がより容易になるためにき裂先端近傍のき裂壁の腐食溶解が激しくなる¹²⁾とする考え方もあり、これらのことから応力比の増大によってかえってき裂先端の鈍化が容易になることも考えられる。いずれにしても、以上の実験事実から、本実験条件下におけるき裂成長の抑制・停止

Fig.9 Appearance of fatigue fracture surface in specimen.

にくさび作用が関与しているとは考えにくい。
Fig. 9 は 298K における応力比 0.32 および 0.5 の下でのき裂先端近傍の破面観察結果を示したものである。図中、(a)・(c) はき裂成長速度がもっとも加速する繰返し速度下における例で、腐食溶解による平滑な面を呈している。一方、(b)・(d) はき裂成長の停止が認められた繰返し速度下における例で、いずれも過度の腐食溶解のために著しく荒れており、溶解に伴う大きな凹凸が観察される。腐食生成物については、安定成長き裂(a)・(c)と、成長停止き裂(b)・(d)いずれも一部固着が認められるが、両者の間に固着量の差は認められない。これらの破面観察結果からも、本実験におけるき裂成長抑制・停止の原因を腐食生成物によるくさび作用から説明することは困難であると考えられる。

4. ま と め

天然海水中、軟鋼丸棒表面から成長する表面き裂の成長挙動について、応力比 0.32 および 0.5 の場合について、荷重繰返し速度および海水温度を種々変化した条件下で腐食疲労試験を行い、両応力比下での結果を比較することにより、この系において認められるき裂成長の抑制・停止の原因について考察した。その結果は次の通りである。

(1) 応力比 0.32, 0.5 いずれの場合も, 一定温度海水中でき裂成長速度は繰返し速度の低下と共に加速するが, ある繰返し速度でそれぞれ最大の加速を示した後減速に転ずる。このき裂成長速度の最大値は液温が低い方が高く, また最大値を示す繰返し速度は液温が低い方が低い。

(2) 繰返し速度をさらに低下させると, 両応力比とも, いずれの液温においてもき裂成長の抑制・停止現象が現れる。き裂成長停止を示す限界繰返し速度は強い海水温度依存性を示し, 液温が高いほど高繰返し速度側でき裂成長の停止が生じる。また, いずれの液温下でも高応力比の方が限界繰返し速度は高くなる。

(3) これらき裂成長挙動におよぼす繰返し速度効果ならびに液温の効果は, 応力比 0.32 および 0.5 いずれの場合も同様であり, したがって, き裂成長が停止する原因については, 両応力比ともくさび作用の影響は考え難く, 海水温度の上昇および繰返し速度の低下が, き裂成長の加速効果に比べき裂壁の過度な腐食溶解による減速効果を相対的に増大する結果おこるき裂先端の鈍化の機構で, 統一的に説明できると考えられる。

(Manuscript received June 16, 1995 ; in final form August 15, 1995)

文 献

- 1) 鈴木揚之助, 元田慎一: 防食技術, **37**, 432 (1988).
- 2) 鈴木揚之助, 元田慎一: 材料と環境, **40**, 667 (1991).
- 3) F. P. Ford and S. J. Hudak Jr.: Proc. Conf. Small Fatigue Cracks., p.289 (1986).
- 4) 駒井謙治郎, 長野 整: 日本機械学会論文集 (A 編), **52**, 876 (1986).
- 5) T. W. Thorpe, P. M. Scott, A. Rance and D. S. Silvester: *Int. J. Fatigue*, **15**, 123 (1983).
- 6) C. E. Jaske et al.: Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments, Chapter 3, Corrosion Fatigue Data for Carbon and Alloy Steels. Battelle (1981).
- 7) O. Vasicovsky: *J. of Testing and Evaluation*, **82**, 68 (1980).
- 8) E. Bardal: Proc. Fatigue '87, p. 1149 (1987).
- 9) R. Murakami and W. G. Ferguson: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **9**, 477 (1987).
- 10) 駒井謙治郎, 野口昌利: 日本機械学会論文集 (A 編), **52**, 1770 (1986).
- 11) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 金 貴植, 岡本英樹: 日本機械学会論文集 (A 編), **55**, 179 (1989).
- 12) 駒井謙治郎, 岡本英樹: 鉄と鋼, **74**, 358 (1988).
- 13) P. Bristoll and J. A. Roeleveld: Proc. of Off-shore Steels Conf., Welding Institute, England, Nov., pp. VI/P 18-1~VI/P 18-10 (1978).
- 14) H. G. Morgan: P908A UK. At. Energy Auth., 1~61 (1985).
- 15) J. D. Atkinson and T. C. Lindley: The Influence of Environment on Fatigue, IME, London, May, 65 (1977).
- 16) F. P. Ford and P. W. Emigh: Pap. Int. Corrs. Forum, 84-173 (1984).
- 17) J. C. Radon, C. M. Branco and L. E. Culver: *Int. Journ. of Fracture*, **12**, 467 (1976).