二段環境下の腐食疲労寿命†

岡田 庸敬* 服部 修次* 水島 憲行**

Corrosion Fatigue of Carbon Steel under Torsional Load in Two-Stage Tests

by

Tsunenori OKADA*, Shuji HATTORI* and Noriyuki MIZUSHIMA**

Two-stage corrosion-fatigue life tests in 3% NaCl ⇄ laboratory air, 3% NaCl ⇄ ion exchanged water, and 3% NaCl ⇄ 0.5% NaCl conditions were performed under torsional load, and the results were discussed based on the observation of cracks on the axial section of test pieces. The following conclusions were drawn:

(1) For the test of 3% NaCl → laboratory air, the fatigue life was reduced remarkably and the total number of stress cycles to failure became shorter than that for the continuous 3% NaCl condition. A similar tendency was obtained for the tests of 3% NaCl → ion exchanged water, and 3% NaCl → 0.5% NaCl. However, the reduction of fatigue life was slight because the damage in the first stage was not so severe as that for the test of 3% NaCl → laboratory air.

(2) For the reverse tests, *i. e.* laboratory air → 3% NaCl, ion exchanged water → 3% NaCl, and 0.5% NaCl → 3% NaCl, the fatigue lives followed Miner's law.

(3) After the corrosion environment was changed to less corrosive one, a few cracks among many short cracks having appeared in the first stage grew acceleratedly and led to a shorter life. For the reverse case, most of the cracks propagated in the second stage, and the life was predictable by the Miner's law.

キー・ワード：腐食疲労，炭素鋼，二段環境，ねじり荷重

1 緒 言

海洋構造物，船舶，橋梁，航空機など戶外で使われる機械，構造物は大気環境のほかには海水，雨水など種々の環境の繰返しにさらされている。しかし，構造物材料の腐食疲労の研究は多くの場合一定環境下で行われ，環境の変動に対して，ほとんど考慮されていないのが現状である。

環境の変動に対する従来の研究は主として液中と大気中の二段環境下で行われ，古くは McAdam¹⁾により，第1段階で腐食疲労を与えたのち第2段階で空中の疲労試験を行い，腐食疲労による食孔あるいはき裂が強度に及ぼす影響として種々の応力繰返し速度について第1段階による被害を求めた。Evans と Simnad^{2,3)}は第1段階環境を適当な長さにとると腐食環境中のみの場合よりも寿命が低下することを見出し，腐食環境中では多数のき裂が発生し，破壊に寄与する主き裂の応力集中を緩和するためであるとしている。Rollins⁴⁾も同様に二段環境下で疲労寿命が低下する傾向を報告しており，水溶液中では酸素が供給されにくいのでき裂の進展が大気中よりも遅かったためであると述べている。さらに，北川^{5,6)}，遠藤⁷⁾も同様な傾向を得て，両環境

中のき裂進展速度の相違から説明している。

以上のように二段環境に関する研究といっても腐食環境中と大気中の環境変化についてのものがほとんど^{1)~8)}で，他の環境条件の組合せ，たとえば濃度，温度などを変化させた場合についてはほとんど報告されていない。特に腐食性環境中から大気中へ切換えた場合，ある試験条件下では腐食性環境中の疲労寿命よりも更に低い疲労寿命を示すが，こうした寿命低下は腐食性の異なる環境の組合せにおいても生じることが考えられる。本報では大気中の疲労強度よりも低い応力レベルで，3%食塩水中から大気中や濃度の異なる食塩水中へ切換える場合も含めて広範囲に二段環境のねじり疲労試験を行い，断面のき裂観察などから検討を加えた。

2 供試材料および試験方法

供試材料は機械構造用炭素鋼 S35C で，化学成分を Table I に示す。材料は最初 865℃，30 分間保持後空冷の焼ならし処理を施したのち，Fig. 1 に示す試験片形状に機械加工し，平滑部およびフィレット部を #6/0 エメリー紙で研磨した。その後，600℃，30 分間真空焼なまし処理をし，試験直前にアルコールとアセトンで十分に洗浄したのち試験に供した。熱処理後の機械

† 原稿受理 昭和60年1月10日 Received Jan. 10, 1985

* 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京, Faculty of Engineering, Fukui University, Bunkyo, Fukui

** 福井村田製作所(株) 武生市岡本町, Fukui-Murata Co., Okamoto-cho, Takefu

Table I. Chemical composition of material (%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.37	0.24	0.77	0.019	0.023	0.01	0.02	0.04

Fig. 1. Geometry of test piece.

Table II. Heat treatments and mechanical properties.

Heat treatments	σ_S (MPa)	σ_B (MPa)	δ (%)	ϕ (%)	H_V
865°C 30 min. A.C. 600°C 30 min. F.C.	397	615	31.6	57.2	181

的性質を Table II に示す。

疲労試験にはシェンク型曲げねじり疲労試験機を用い、繰返し速度 1200 cpm で両振ねじり荷重を負荷した。試験環境としてイオン交換水、イオン交換水に重量パーセントで 0.5% と 3% になるように食塩を溶解させた溶液中および大気中の 4 種類を設定し、3% NaCl 中へ大気中、3% NaCl 中へイオン交換水中、3% NaCl 中へ 0.5% NaCl 中の二段環境疲労試験を行った。なお、液体環境中では試験片を液中に完全に浸漬できるように試験片の周囲に環境槽を設け、約 5 l の試験液を約 1.5 l/min で電子恒温装置との間を循環させ、25°C ± 1°C に保持した。環境の切換えは第一段環境中で所定の繰返し数を与えた後試験機を止めてパイプの中の循環液を完全に抜きとり、フィルターも十分に洗浄して、第一段環境の影響が残らないように十分に注意した。試験片表面の腐食生成物はイオン交換水中で超音波洗浄することにより除去した。

設定応力は Fig. 2 に示す各環境中の S-N 曲線より、比較的都合のよい 145 MPa にしたが、大気中の疲労限以下になるので、大気中でも有限寿命になる 180

Fig. 2. S-N curves.

MPa でも 3% NaCl 中へ大気中の二段環境試験を行った。

3 記 号

N_a : 大気中の破断繰返し数

n_a : 二段環境下の大気中での繰返し数

N_i : イオン交換水中の破断繰返し数

n_i : 二段環境下のイオン交換水中での繰返し数

N_n : 0.5% NaCl 中の破断繰返し数

n_n : 二段環境下の 0.5% NaCl 中での繰返し数

N_s : 3% NaCl 中の破断繰返し数

n_s : 二段環境下の 3% NaCl 中での繰返し数

4 試験結果および考察

4.1 二段環境疲労試験

Fig. 3 ~ 5 にそれぞれの二段環境下の疲労試験結果を示す。図の横軸は 3% NaCl 中の繰返し数比で、縦軸は総破断繰返し数である。

Fig. 3 の 3% NaCl 中へ大気中では応力が 145 MPa の場合大気中の疲労限以下であるため、3% NaCl 中へ大気中では $n_s/N_s = 0.1$ 以下では総寿命が 10^7 以上となるが、それ以上の n_s/N_s では 3% NaCl 中の寿命 N_s よりも低下する。とくに $n_s/N_s = 0.2$ 付近で切換えた場合、寿命は最も低下し、Evans²⁾ら、Rollins⁴⁾ら、北川⁶⁾ら、遠藤⁷⁾らの得た結果と同じ寿命低下の傾向を示す。また、大気中でも有限の疲労寿命になるように設定応力を 180 MPa にした場合も $n_s/N_s = 0.2$ 以上で同様に寿命が N_s よりも低下する。大気中へ 3% NaCl 中の場合応力 145 MPa では大気中の疲労限以下であるため環境を切換えた時点から 3% NaCl 中の寿命だけ加算された時点で破断するはずであるが、実際は 3% NaCl 中よりも 20% 程度寿命の減少をひきおこしている。疲労限以下の応力であっても大気中で受けた疲労のために腐食疲労が促進されたものと考えられる。

Fig. 3. The results of two-stage corrosion-fatigue tests (3% NaCl → In air).

Fig. 4. The results of two-stage corrosion-fatigue tests (3%NaCl $\leftrightarrow$ ion exchanged water).

Fig. 5. The results of two-stage corrosion-fatigue tests (3%NaCl $\leftrightarrow$ 0.5%NaCl).

Fig. 4, 5 は第二段環境としてそれぞれイオン交換水, 0.5%NaClを用いた場合の結果である。Fig. 3 の大気中に切替えた場合と同様, 3%NaCl 中のみの寿命よりも低下する領域が存在する。逆にイオン交換水中あるいは0.5%NaCl 中から3%NaCl 中に切替えた場合の寿命はそれほど低下せず, ほぼマイナー則に従う。

これらの結果を3%NaCl 中の繰返し数比に対する被害率 $D = 1 - n_j/N_j$ ($j = a, i, n$) で整理すると Fig. 6 のようになる。ただし, 応力振幅 145 MPa では大気中の疲労限以下となるが, 10^7 の有限寿命として近似した。図には Evans²⁾ら, Rollins⁴⁾ら, 岡本・北川⁵⁾, 遠藤⁷⁾らの結果も同様に計算して示したが, 本報告の3%NaCl 中 $\rightarrow$ 大気中の結果とはほぼ一致し, いずれの場合も $n_s/N_s = 0.2 \sim 0.3$ で被害率 D が80%以上に達している。さらに, 液中では濃淡いずれの環境が先でもマイナー則で定義される寿命よりも低下するが, 3%NaCl 中から大気中へ切替えた曲線よりも内側になる。すなわち, 種々の二段環境の寿命は常に3%NaCl 中 $\rightarrow$ 大気中の曲線とマイナー則でとりかこまれた範囲内にある。

Fig. 6. Relation between cycle ratio in 3%NaCl and damage.

Fig. 7. Surface of test piece after fatigue test.

4・2 表面の状態

試験片の表面状態の一例を Fig. 7 に示す。図(a)は3%NaCl 中で破断した後の表面である。腐食された領域と腐食されない領域に大きく分かれている。この傾向は0.5%NaCl 中でも観察され, 既に報告している結果とも一致する。図(b)はイオン交換水中で破断した後の表面である。腐食された領域と腐食されない領域が細かく分かれていて, それが全体に広がっている。図(c)は3%NaCl 中 $\rightarrow$ イオン交換水中, $n_s/N_s = 0.44$ で切替えたときの破断後の状態, また図(d)はイオン交換水中 $\rightarrow$ 3%NaCl 中, $n_s/N_s = 0.50$ の場合である。図(d)では, イオン交換水中の小さな腐食域と共に3%NaCl 中のみの場合にみられた大きな腐食域が観察できるが, 図(c)ではイオン交換水中に切替えてもイオン交換水中特有の小さい腐食域が観察されない。これは3%NaCl 中を第一段環境に用いると, 腐食が生じた

部分ではさびがかなり付着しているので、酸素の供給があまりなく、イオン交換水中に切換え後も引続きアノードとして作用したためと考えられる。同様な状態は3%NaCl中と0.5%NaCl中でも観察された。以上より、弱い腐食性環境中で発生した多数のき裂は強い腐食性環境中でも一様に進展しうが、強い腐食性環境中から弱い腐食性環境中に切換えた場合には大きく分かれている非腐食域に新たに腐食ピットや微小き裂が発生するよりも強い腐食性環境中で生じていたき裂

だけがさらに進展することが予想される。

4.3 試験片の断面で観察されるき裂

すべての疲労試験を試験片の破断直前で中止して(停止装置の作動が悪く破断したものも含む)軸方向に切断し、断面き裂を観察した。Fig. 8, 9 はき裂の分布状態の一例である。図中(A)は液面に近い側面、(B)はその反対側で、いずれも平行部 35 mm の全域にわたって観察した結果である。ただし、破断に関与したと考えられる最長き裂および 15 μm 以下の微小き裂は除外した。Fig. 8 (a)は3%NaCl中の結果で400 μm もの長いき裂が数多く観察されるのに対し、Fig. 8 (c)のイオン交換水中ではほとんどが100 μm 以下の短いき裂である。Fig. 8 (b)の0.5%NaCl中では液面に近い側のき裂個数は3%NaCl中とあまり変わらないが、反対側のき裂個数はイオン交換水中よりも非常に少なく、き裂長さも短い。表面観察からも明らかなように0.5%NaCl中では腐食域と非腐食域が大きく分かれていたためと考える。大気中では破断面を形成する一本のき裂だけが検出される。

二段環境下でのき裂分布をFig. 9 (a)~(c)に示す。図(a)で、3%NaCl中から大気中へ切換えると、3%NaCl中で発生、進展していたき裂は切換え後も短いき裂のままである。特定の1本のき裂だけが大気中で進展して破断に導いたものと考えられる。図(b)の3%NaCl中からイオン交換水中に切換えると、Fig. 8 (c)のように多数のき裂が発生するが、イオン交換水中ではあまり進展しないので無視される程度の長さである。反面、前段の3%NaCl中で生じていたき裂のうち長いき裂が集中的に進展したことを物語っている。逆に図(c)のイオン交換水中から3%NaCl中に切換えられると、イオン交換水中で発生していた多数のき裂が3%NaCl中で加速されるので、き裂個数も多く、しかも長いき裂が観察されたものと考えられる。

Fig. 10~12 は二段環境下で行われたすべての疲労試験片の破断後のき裂分布図から単位長さ当たりのき裂個数とき裂長さの上限値、下限値(15 μm 以下無視)および平均値を求め対数目盛で示したものである。図中の破線は3%NaCl中のそれぞれの n_s/N_s で試験を停止してき裂分布を調べた

Fig. 8. Axial crack distribution after fatigue test, (a) in 3%NaCl, (b) in 0.5%NaCl and (c) in ion exchanged water.

Fig. 9. Axial crack distribution after two-stage corrosion-fatigue test, (a) 3%NaCl $\rightarrow$ in air, (b) 3%NaCl $\rightarrow$ ion exchanged water and (c) ion exchanged water $\rightarrow$ 3%NaCl.

ものである。Fig. 10 は 3%NaCl 中 $\rightarrow$ 大気中の結果で、切換え後き裂個数も平均き裂長さもほとんど増加しない。3%NaCl 中で発生していたき裂の中で相当長いき裂の中から唯一的に進展したものと考えられる。Fig. 11 は 3%NaCl 中 $\rightarrow$ イオン交換水中の結果で、 $n_s/N_s=0.45$ 以前に 3%NaCl 中からイオン交換水中に切換えると、切換え後もき裂個数、平均き裂長さは

著しく増加する。イオン交換水中になって短いき裂が数多く発生すると同時に 3%NaCl 中で生じていたき裂も相当進展するためである。しかし、 $n_s/N_s=0.45$ 以降に切換えると、き裂個数も平均き裂長さもほとんど増加しない。そのために 3%NaCl 中 $\rightarrow$ 大気中と同様長いき裂が選択的に進展するようになり破断寿命も 3%NaCl 中のみの場合よりも低下したものと考えられる。Fig. 11 をより詳細に調べると 3%NaCl 中 $\rightarrow$ イオン交換水中では切換え後もき裂長さがやや増加しており、そのため Fig. 6 に示す損傷曲線が 3%NaCl $\rightarrow$ 大気中の曲線の内側に入ったものと考えられる。逆に、イオン交換水中から 3%NaCl 中に切換えた場合には 3%NaCl 中 $\rightarrow$ イオン交換水中に比べ、観察されるき裂個数が多くなり、平均き裂長さも切換え時期によらず増加する。切換え後もき裂が数多く発生すると同時にイオン交換水中で発生していたき裂は 3%NaCl 中でいずれも一様に進展したためと考えられ、このため破断寿命も比較的マイナー則に近い値を示したものと推察される。Fig. 12 の 3%NaCl 中 $\rightarrow$ 0.5%NaCl 中でも同じような傾向が認められる。

5 結 言

本報では、3%NaCl 中 $\rightarrow$ 大気中、3%NaCl 中 $\rightarrow$ イオン交換水中、3%NaCl 中 $\rightarrow$ 0.5%NaCl 中の二段環境下でねじり腐食疲労試験を行い、また試験片軸方向断面のき裂観察を通じて検討を加えた結果、次の諸点が明らかになった。

(1) 3%NaCl 中から大気中に切換えた場合はこれまでの報告と同様 3%NaCl 中のみの寿命よりも低下したが、3%NaCl 中 $\rightarrow$ イオン交換水中、3%NaCl 中 $\rightarrow$ 0.5%NaCl 中の場合でも同様の傾向が認められる。しかし、損傷曲線で比較したとき、これらの結果は 3%NaCl 中 $\rightarrow$ 大気中の内側に存在していて前段の損傷効果はそれほど大きくならない。

(2) 腐食性の弱い環境から腐食性の強い環境に切換えた場合は大きな寿命低下は示さずほぼマイナー則に従う。

(3) 強い腐食性環境中で発生した数多くのき裂は、弱い腐食性環境に切換えると特定の長く進展していたき裂だけが一層進展するようになり、そのために寿命も著しく短くなる。一方、弱い腐食性環境中で発生し

Fig. 10. Depth and number of cracks after two-stage corrosion-fatigue tests (3%NaCl $\rightarrow$ in air).

Fig. 12. Depth and number of cracks after two-stage corrosion-fatigue tests (3%NaCl $\rightarrow$ 0.5% NaCl).

Fig. 11. Depth and number of cracks after two-stage corrosion-fatigue tests (3%NaCl $\rightarrow$ ion ex. water).

た多数のき裂は強い腐食性環境中に切換えても一様に進展するために、寿命もほぼマイナー則に近い値を示す。

(昭和59年11月10日 第17回疲労シンポジウムにて講演)

参考文献

- 1) D. J. McAdam, Jr., Proc. Am. Soc. for Test. Mat., **28**, 117 (1928).
- 2) U. R. Evans and M. T. Simnad, Proc. Roy. Soc. [A], **188**, 372 (1974).
- 3) M. T. Simnad and U. R. Evans, Jour. Iron and St. Inst., 531 (1947).
- 4) V. Rollins, B. Arnold and E. Lardner, Metallurgia, **75**, 149 (1967).
- 5) 岡本舜三, 北川英夫, 日本機械学会誌, **62**, 204 (1959).
- 6) H. Kitagawa, Exp. Mechanics, **7**, 28 (1967).
- 7) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 中室直之, 日本機械学会論文集, **35**, 2154 (1969).
- 8) 石原外美, 塩沢和章, 宮尾嘉寿, 材料, **33**, 901 (1984).
- 9) 岡田庸敬, 服部修次, 日本機械学会論文集, A-49, 685 (1983).