高張力鋼の腐食疲労き裂発生寿命の定量的評価[†]

誉 田 登* 外 山 和 男*

Quantitative Evaluation of Corrosion Fatigue Crack Initiation Process
for High Tensile Strength Steel

by

Noboru KONDA* and Kazuo TOYAMA*

Materials for construction tend to be used in more harsh environments nowadays. Much effort has been spent already in order to understand the effect of environment on fatigue strength. Especially, the environmental effect on fatigue crack propagation behavior has been clarified in many combinations of materials and environmental conditions. However, each step of the corrosion fatigue process has not been evaluated in detail. In this study, each period from initiation and growth of corrosion pits to initiation and propagation of corrosion fatigue cracks is estimated. Material used was a carbon steel HT60 of 630 MPa class tensile strength. A micro-drilled notch was introduced at the surface of test specimen by machining. The notch of 80 μm diameter, which imitated corrosion pits was expected to fill the role of concentrated stress sites. Test environments were 3.5 weight percent NaCl solution and 1.33×10^{-4} Pa air in a chamber of scanning electron microscope (SEM). Fatigue tests were conducted under a load ratio of 0.1 at a frequency of 1.5 Hz in NaCl solution and at 20Hz in a vacuum. While under continuous observation by SEM, a crack which reached 20 to 30 μm in length was defined as fatigue crack initiation. A regression equation, with an accuracy within a factor of 5, for fatigue crack initiation life was derived for both environments. It became clear that the effect of stress and notch shape on initiation life was smaller in NaCl solution than that in a vacuum. In addition a relationship between stress intensity factor, calculated from shadow figure of notch, and crack initiation life was deduced. In NaCl solution, the initiation life of corrosion pits was estimated to be quite short, and a ratio of fatigue crack initiation life to total failure life was about 35% regardless of stress intensity factors.

Key words : Corrosion fatigue, Crack initiation, High tensile strength steel, NaCl solution, Rare air, Notch, Corrosion pit

1 緒 言

機械、構造物の稼働環境は、苛酷化の一途をたどっている。そのため、環境による金属材料の強度低下と破損過程の定量的評価は、機械、構造物の強度設計と保全に対する中心的課題になりつつある。

近年、使用が盛んになりつつある高張力鋼を対象とした腐食環境中疲労強度評価において、疲労き裂進展挙動については、比較的多く検討されているように思われる²⁾。しかしながら、疲労き裂発生に関しては、寿命および余寿命評価の精度向上において極めて重要であるにもかかわらず、いまだ明らかにされているとは言いがたい状況にある。

腐食環境中の疲労き裂発生特性に関する従来の研究として、駒井らは、高張力鋼の人工海水中疲労き裂発生挙動を、腐食ピットの発生・成長について詳細に観察した結果、き裂発生条件は、腐食ピットを鋭いき裂と見なした応力拡大係数範囲 ΔK で整理できること

を明らかにした³⁾。

また、R. Novak は、引張強度 519~1150 MPa の 4 種類の高強度鋼を用いて、切欠き底を起点とした 3.5% NaCl 水溶液中腐食疲労き裂発生を観察している。その結果、き裂発生の力学条件は、切欠き半径を ρ とすれば $\Delta K/\sqrt{\rho} = 207 \pm 21 \text{ MPa}$ であること、更に、き裂発生に対する下限限界値が認められないことを明らかにしている。

本研究では、腐食ピットを模擬した微小切欠きに繰返し応力を負荷し、主に NaCl 水溶液中の疲労き裂発生を電子顕微鏡で観察した。切欠き材の疲労き裂発生繰返し数を、平滑材の腐食疲労破断繰返し数と比較することによって、腐食疲労破断寿命を 4 過程に分割し、各過程の寿命を推定した。

2 実 験 方 法

2・1 供試材

供試材は、80 mm に圧延された 590 MPa 級高張力

[†] 原稿受理 平成 3 年 2 月 1 日 Received Feb. 1, 1991

* 正 会 員 住友金属工業(株)研究開発本部 尼崎市扶桑町, Sumitomo Metal Industries Ltd., Fuso-cho, Amagasaki

Table I. Chemical composition (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Sol. Al	N
0.13	0.27	1.26	0.003	0.002	0.26	0.96	0.02	0.17	0.030	0.046	0.0045

Table II. Mechanical properties.

Yield strength	Tensile strength	Elongation
533 MPa	630 MPa	23.5%

Fig. 1. Configurations of specimen.

鋼板 (HT60) で, その化学成分および機械的性質を, おおの Table I, Table II に示す. なお, 供試材は, すべて, 900°C から焼入れし, 650°C で焼もどした.

2・2 試験片

圧延方向と試験片長手方向とが一致するように Fig. 1 に示す形状・寸法の試験片を採取した. 試験片中央

Fig. 2. Schematic illustration of testing apparatus.

には, 腐食ピットを模擬した直径 80 μm の切欠きを, #1000 までの研磨後ドリルで穿孔した.

2・3 実験条件

疲労試験は, 容量 4900 N の電気油圧式閉ループ型試験機を用いて行った. この試験機には, 走査型電子顕微鏡 (SEM) が組み込まれており, 試験片に負荷を与えた状態で, 疲労き裂発生状況をその場観察することができる. 試験装置の構成を模式的に Fig. 2 に示す.

試験環境は, 3.5 重量% の NaCl 水溶液環境 (以後 NaCl 環境とよぶ) と, SEM 鏡筒内の真空度 1.33×10^{-4} Pa の環境 (真空環境) の 2 条件である. NaCl 環境の試験では, 容量 $7.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ のタンク中に NaCl 溶液を満たし, $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ の流速で, 容量が $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ の試験チャンバーに NaCl 水溶液を循環させている. NaCl 環境に用いる試験片では, 穿孔後, 孔を中心に一辺の長さ 3 mm の正方形領域を残し, 他の部分をシリコンゴムでコーティングしている. なお, NaCl 溶液の pH は 6.9, 溶存酸素量は 6.0 ppm である.

微小切欠きを起点とする疲労き裂発生の有無は繰返し数 1.0×10^4 回ごとに観察した. 観察は, 真空環境試験では試験片を SEM 鏡筒内に保持したまま, また, NaCl 環境試験

Fig. 3. Fatigue crack initiation in vacuum.

Fig. 4. Fatigue crack initiation in NaCl solution.

では試験片をチャンバーから取り出し乾燥させた後、鏡筒内に挿入し、平均荷重を静的に負荷した状態でおこなわれた。き裂発生後、き裂長さが、数十 μm に達した時、それまでの延べ繰返し数を、疲労き裂発生繰

Fig. 5. Number of cycles to fatigue crack initiation in vacuum.

返し数 N_2 と定義した。また、その後、疲労き裂が、打ち切りき裂長さ (約 2 mm) に成長するまでの繰返し数 N_3 も測定した。

3 実験結果

3・1 疲労き裂発生状況

Fig. 3 および Fig. 4 に、真空環境、NaCl 環境の疲労き裂発生状況の一例をおの示す。これらの図から、本試験方法により、微小切欠きを起点とする疲労き裂の発生を、数十 μm の長さから高分解能で観察できることがわかる。

3・2 疲労き裂発生繰返し数

Fig. 5 に、真空環境での疲労き裂発生繰返し数を示す。図中、各プロットの添字は、微小切欠きの深さを表す。図より、同じ負荷応力では、切欠きの浅い方が疲労き裂発生寿命の長いことがわかる。なお、平滑材の疲労限度は、応力範囲で約 450 MPa と推定される。

一方、Fig. 6 には、NaCl 環境での疲労き裂発生繰返し数を、Fig. 5 と同じ様式で示す。NaCl 環境にお

いても同一の負荷応力では、疲労き裂発生寿命は、切欠きの浅い方が長くなっている。しかしながら、発生寿命に及ばず切欠き深さの影響は、NaCl 環境の方が、真空環境に比べ小さくなっている。また、発生寿命に

Fig. 6. Number of cycles to fatigue crack initiation in NaCl solution.

及ぼす負荷応力の影響も、NaCl 環境の方が小さい。つまり、NaCl 環境の疲労き裂発生特性は、真空環境に比べピット形状、負荷応力に鈍感になっている。

4 考 察

4・1 疲労き裂発生繰返し数の近似

真空環境および NaCl 環境での疲労き裂発生繰返し数を応力範囲 $\Delta\sigma$ と、微小切欠きの直径に対する深さの比 P_{dep}/P_{dia} の二つをパラメータとして、重回帰分析した。この時、未破断の試験結果は、分析から除外している。

真空環境での疲労き裂発生繰返し数の近似式を次式に示す。

$$\log(N_2) = 11.93 - 1.086 \times 10^{-2} \times \Delta\sigma - 0.5091 \times (P_{dep}/P_{dia}) \quad (1)$$

ただし、 $\Delta\sigma$ の単位は MPa、 P_{dep} は切欠き深さ、 P_{dia} は切欠き直径である。

また、NaCl 環境での近似式を式 (2) に示す。

$$\log(N_2) = 7.663 - 5.908 \times 10^{-3} \times \Delta\sigma - 0.2578 \times (P_{dep}/P_{dia}) \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) を比較すると、 $\Delta\sigma$ および P_{dep}/P_{dia} の係数は、NaCl 環境では真空環境のおよそ半分である。

これらの近似式から予測した疲労き裂発生繰返し数と、実験で測定した疲労き裂発生繰返し数とを比較し、真空環境については Fig. 7 に、また NaCl 環境については Fig. 8 におおの示す。両図から、真空環境、NaCl 環境ともに、factor of 5 の精度で実験結果を近似していることがわかる。

なお、Fig. 9 には、NaCl 環境での疲労き裂発生繰返し数を、真空環境から導かれた近似式で予測した結果を示す。図から、予測値は測定値の 10 倍から 100

Fig. 7. Relation between measurement and estimation of fatigue crack initiation life in vacuum.

Fig. 8. Relation between measurement and estimation of fatigue crack initiation life in NaCl solution.

Fig. 9. Estimation of fatigue crack initiation life in NaCl solution by regression line in vacuum.

倍である。

4・2 疲労き裂発生特性の応力拡大係数による表示

駒井らは、腐食ピットを投影面積の等しい半だ円き裂と見なし、腐食疲労き裂発生特性に対し線形破壊力学を適用し、応力拡大係数で解析している³⁾。ここでは、この方法を微小切欠きに応用した。なお、応力拡大係数は Newman & Raju の式⁵⁾で算出している。真空環境および NaCl 環境における、前記の応力拡大係数範囲 ΔK と疲労き裂発生繰返し数との関係を Fig. 10 に示す。

図より、いずれの環境においても、疲労き裂発生繰返し数は、応力拡大係数範囲と密接な関係があり、S-N 曲線に類似したバンドで表示される。ここで、真空環境のバンドは、NaCl 環境のそれに比べ若干傾

Fig. 10. Relation between stress intensity factor ΔK and number of cycles to crack initiation N_2 .

きが小さいことすなわち、真空環境の疲労き裂発生特性が応力拡大係数に敏感であることがわかる。

また、NaCl 環境のバンドを低応力拡大係数側、つまり、長寿命側に外挿すると、繰返し数 10^7 回近傍では応力拡大係数範囲は約 $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ になる。なお、駒井らは HT50, HT50TMCP, HT80 および HT50 溶接材を供試材とした一連の研究で、人工海水中の腐食疲労き裂発生の力学条件として応力拡大係数値 $1.55 \sim 1.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と報告している。本実験での応力拡大係数範囲の外挿値は、駒井らの結果とほぼ一致しているものと考えられる。

4・3 腐食疲労破断寿命の分割、および各過程の寿命推定

腐食疲労破断寿命は、負荷の開始時から試験片が破断するまでの総繰返し数である。ここでは、表面損傷の形態に対応させて、この破断寿命を次の 4 過程に分割することを試みた。

その分割とは、Fig. 11 に模式的に示すように、

- (1) 腐食ピットが発生し、その成長が飽和するまでの過程、
- (2) 腐食ピット成長の飽和後、ピットを起点とする疲労き裂発生までの過程、
- (3) 疲労き裂発生後、き裂が、微小き裂を経て、打ち切りき裂長さまで成長する過程、
- (4) 疲労き裂が、上記打ち切り長さから最終破断長さまで進展する過程、

の 4 過程である。なお、この各過程に要する繰返し数を N_1 , N_2 , N_3 および N_4 とする。

本実験では、過程 (3) の打ち切りき裂長さを約 2 mm と設定している。試験片寸法を考慮すると、この打ち

Fatigue crack length including notch diameter

Fig. 11. Schematic illustration of four stages in corrosion fatigue.

りき裂長さでは、過程 (4) の寿命 N_4 は極めて短く無視できるので、ここでは、寿命 N_1 のみを推定した。つまり、 N_2 , N_3 は、実験で測定しているので、 N_1 は、切欠き材と同一応力下での平滑材破断寿命 N_f から N_2 , N_3 を引くことにより求めた。すなわち、 N_1 は式 (3) から算出した。

$$N_1 = N_f - (N_2 + N_3) \quad (3)$$

なお、大型材に対しては、き裂進展特性から、線形破壊力学を用いて N_1 は容易にかつ精度良く推定することが可能なので、同様の方法で N_1 を推定できる。

Table III に、 N_1 から N_3 の推定結果を示す。 N_1 は切欠き深さに依存し、深くなるに従い寿命が長くなっている。なお、HT60 の腐食ピット寸法の分布は、平均値で直径約 $80 \mu\text{m}$ 、深さ約 $40 \mu\text{m}$ と測定されている。そこで、深さ 0.05 mm の微小切欠きの結果から、腐食ピットを起点とする疲労破断挙動を推定すると、平滑材の腐食疲労破断寿命 N_f に占めるピット成長寿命 N_1 は極めて短いことが考えられる。

Table III. Estimated results of each stage.

Notch depth (mm)	N_1	N_2	N_3	Stress range (MPa)	Stress intensity factor ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
0.18	1.0×10^5	6.0×10^4	9.5×10^4	392	4.60
0.18	9.8×10^4	7.0×10^4	3.8×10^5	431	5.08
0.18	4.9×10^4	3.0×10^4	1.4×10^5	353	4.13
0.14	4.8×10^4	1.2×10^5	8.7×10^4	392	4.48
0.08	2.7×10^4	5.0×10^4	1.4×10^5	353	3.68
0.05		1.4×10^5	1.1×10^5	431	3.85

Fig. 12. Relation between stress intensity factor ΔK and ratio of each stage to final failure.

N_1 から N_3 までの破断寿命 N_f に占める割合を、応力拡大係数をパラメータとして、Fig. 12 に示す。図より N_1 は、応力拡大係数の増加に伴い相対的な割合が増すのに対し、 N_3 は逆に低下している。また、 N_2 は本実験の範囲では、応力拡大係数にかかわらず常に約 35% であった。

5 結 言

真空環境 (1.33×10^{-4} Pa の SEM 鏡筒内)、NaCl 環境 (3.5% NaCl 水溶液中) において、微小切欠きを起点とする疲労き裂発生を観察し、以下のことが明らかとなった。

(1) 疲労き裂発生寿命 N_2 は、次式により factor of 5 の精度で近似できる。

真空環境：

$$\log(N_2) = 11.93 - 1.085 \times 10^{-2} \times \Delta \sigma$$

$$-0.5091 \times (P_{\text{dep}}/P_{\text{dia}})$$

NaCl 環境：

$$\log(N_2) = 7.663 - 5.908 \times 10^{-3} \times \Delta \sigma$$

$$-0.2578 \times (P_{\text{dep}}/P_{\text{dia}})$$

近似式の係数に示されるように、NaCl 環境のき裂発生寿命 N_2 は、真空環境のそれに比べ、負荷応力およびピット形状の影響が小さい。

(2) 微小切欠きをき裂とみなして計算した応力拡大係数と、疲労き裂発生寿命 N_2 との関係を示した。NaCl 環境における繰返し数 10^7 回での応力拡大係数の外挿値は、約 $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

(3) NaCl 環境における腐食ピットの成長寿命 N_1 は、極めて小さいと考えられる。また、本実験範囲では疲労き裂発生寿命 N_2 が、疲労破断寿命 N_f に占める割合は、応力拡大係数にかかわらず、常に約 35% であった。

(平成 2 年 11 月 17 日 第 20 回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 金 貴植, 材料, **36**, 141 (1987).
- 2) 例えば, H. Ishii, Y. Sakakibara and R. Ebara, Met. Trans. AIME **13A**, 1521 (1982).
- 3) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 木下 定, 金 貴植, 日本機械学会論文集, A-53, 2267 (1987).
- 4) Stephen R. Novak, Corrosion Fatigue, ASTM STP801, 26 (1983) ASTM
- 5) J. C. Newman and Jr. I. S. Raju, NASA Technical Memorandum 83200 (1981) NASA
- 6) K. Toyama and N. Konda, Proc. Int. Conf. on Evaluation of Material Performance in Severe Environments (1989) 日本鉄鋼協会
- 7) 山田 實, 亀井麻道, 消防研究所報告, **62**, 33 (1986).