液中で鋼の腐食疲労き裂進展に及ぼす荷重繰返し速度の影響[†]

——き裂先端で発生するキャビテーションの影響について——

岡 田 庸 敬* 服 部 修 次* 鈴 木 良 英**

Influence of Cyclic Frequency on the Corrosion Fatigue Crack Growth of Steels in Liquid Environments

——Considering Cavitation Bubbles Gushing in a Fatigue Crack——

by

Tsunenori OKADA*, Shuji HATTORI* and Yoshihide SUZUKI**

It was already reported that many bubbles were observed gushing from the tip of cracks in fatigue tests in liquid environments. These bubbles occur due to the cavitation accompanying with the opening and closing action of the crack. In this study, the influence of cavitation bubbles on the crack growth behavior was investigated at various load frequencies in synthetic seawater and in ion exchanged water. The following conclusions were drawn.

(1) The ratio of crack growth rate in a liquid environment to that in laboratory air at a constant ΔK_{eff} was obtained as a function of load frequency. This curve showed a constant in low frequency range (<0.2 Hz) and in high frequency range (>5 Hz), respectively, and a transition range was observed between these constant ranges.

(2) It may be considered that the corrosion fatigue crack growth at high frequencies in liquid environments was reduced to the almost same value as in the laboratory air, because the cavitation bubbles were gushing at the tip of the crack.

キー・ワード：腐食疲労き裂進展，構造用鋼，速度効果，人工海水，キャビテーション

1 緒 言

腐食疲労き裂進展に及ぼす荷重繰返し速度の影響に^{1)~13)}ついては、すでに多くの研究がある。例えば遠藤らは、1%食塩水中で炭素鋼 S15C 切欠き材の回転曲げ疲労試験を行い、繰返し速度の高速度域では腐食生成物の流体圧によるくさび効果、中速度域ではき裂幅の拡大、低速度域ではき裂先端の溶解によって、き裂進展速度に差が現れると報告している。Vosikovsky²⁾³⁾は3.5%食塩水中と蒸留水中で X-65 Line-Pipe 鋼のき裂進展挙動を 0.01 Hz から 10 Hz までの種々の繰返し速度で調べ、低繰返し速度でのき裂進展の加速は、カソード防食下では水素ぜい性、自然腐食下では水素ぜい性とアノード溶解の組合せのためであると報告しているが、HY 130 鋼（高降伏点鋼， $\sigma_y=993$ MPa）⁴⁾の加速原因については何もふれていない。Salivar⁵⁾らは蒸留水中と3.5%食塩水中で SA533B-1 鋼のき裂進展試験を行い、低繰返し速度での加速原因を水素ぜい性に求めている。また、遠藤ら、駒井らは1%食塩水中の HT55、HT80 の繰返し速度の影響について、くさび効果、腐食溶解、水素ぜい性に分離して説明を加えている⁶⁾¹⁴⁾。しかしこのような試験を行った場合、油中だけ

でなく、水中でも繰返し速度を速くするときき裂先端近傍から盛んに気泡の噴出が観察されるが、いずれの報告もこの影響については一言もふれていない。

本研究では、人工海水中、イオン交換水中での HT 50、HT80、S35C 炭素鋼の疲労き裂進展に及ぼす繰返し速度の影響について、とくにき裂先端付近の気泡の噴出がき裂進展にどのように関係しているか明らかにするために、CT 試験片を用いて疲労き裂進展試験を行った。

2 供試材料および試験方法

供試材料は最近海洋構造物などに使用されている高張力鋼 HT50、HT80 と機械構造用炭素鋼 S35C（HT 50 と強度レベルがほぼ等しい）で、高張力鋼は日本鉄鋼協会環境強度部会の共通試験材料として提供を受けたものである。これらの材料の化学成分を Table I に示す。HT50 と HT80 の試験片は厚さ 20 mm の板材から圧延方向とき裂進展が直交する方向（L-T 方向）に、S35C は直径 90 mm の丸棒から輪切り状に切出し、Fig. 1 に示す試験片形状に機械加工した。試験片の両面はエメリー紙 600 番まで研磨後パフ仕上げしたが、受入材のままで熱処理は一切行っていない。

† 原稿受理 昭和62年1月21日 Received Jan. 21, 1987

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

** 富士通テン(株) 神戸市兵庫区御所通, Fujitsu-Ten Co., Goshō Dori, Hyogo-ku, Kobe

Table I. Chemical composition of the materials (%).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
HT50	0.15	0.44	1.42	0.009	0.001	0.27	0.19			
HT80	0.11	0.19	1.01	0.003	0.002	0.24	0.77	0.68	0.44	0.045
S35C	0.37	0.24	0.77	0.019	0.023	0.01	0.02	0.04

Fig. 1. Shape and dimension of the specimen.

Table II. Mechanical properties of the materials.

	σ_y MPa	σ_B MPa	δ %	H_V
HT50	392	539	27	181
HT80	813	853	32	306
S35C	403	566	32	213

Table II に材料の機械的性質を示す。HT80 の降伏点は HT50 の約 2 倍で、S35C の降伏点は HT50 に近い値となっている。

試験環境は実験室大気中、ASTM に規定されている人工海水中、およびイオン交換水中である。液中の試験では試験片の周囲に環境槽を設け、電子恒温装置との間を循環させて、液温を 25℃ 一定に保った。

用いた試験機は、容量 49 kN の島津サーボペットで、応力比 $R = K_{\min}/K_{\max} = 0.05$ の正弦波荷重を負荷した。液中の試験は、最初室内大気中の疲労 ($\Delta K = 15 \sim 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $f = 10 \text{ Hz}$) で切欠き先端より約 2 mm の予き裂を発生させ、ASTM E 647 8.3 規格に従って実験開始時の K 値まで漸減させた。さらに第二段予き裂操作として、液中で本試験と同一条件下で 1 mm 以上進展させるか、あるいは 48 時間以上同一条件下で繰返し荷重を負荷した。本試験はき裂進展速度が約 10^{-5} mm/cycle になるような荷重を設定し、以後は荷重一定の K 値漸増試験を行った。き裂長さは Fig. 1 に示す箇所に透明セロハンテープを貼付し、30 倍の光学顕微鏡で測定すると共に、試験片背面にゲージ長さ 1 mm のひずみゲージを貼付し、ゲージの出力とロードセルの出力との関係からコンプライアンスを求めて評価した。また、き裂開口比率 U 値の測定には除荷弾性コンプライアンス法を用いた。

3 試験結果および考察

3.1 da/dN と ΔK , ΔK_{eff} の関係

Fig. 2~4 に HT50, HT80 および S35C の応力拡大係数幅 ΔK とき裂進展速度 da/dN の関係を示す。いずれの材料でも繰返し速度が 10 Hz では液体環境中も大気中もほとんど差異は認められない。しかし、液体環境中で 0.17 Hz になると、HT80 と S35C の $\Delta K \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の領域で約 4~5 倍加速している。

Fig. 5 は一例として、 $\Delta K = 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ における繰返し速度と da/dN の関係を示したものである。図

Fig. 2. da/dN vs. ΔK (HT50). Fig. 3. da/dN vs. ΔK (HT80).

Fig. 4. da/dN vs. ΔK (S35C).

中の実線は本試験の結果で、破線は他の研究者によって行われた ΔK - da/dN 線図から読み取ったステンレス鋼を除く種々の鋼の結果である。挙動は材料、実験者によって大きく異なるが、全体的に 10 Hz 以上では大気中のき裂進展速度とほぼ同じことになり、Jaske の高繰返し速度で大気中と変らなくなると指摘している点と一致している。繰返し速度が低下すると、き裂進展速度は増加するが、その割合は材料の強度と液の腐食性だけで説明できないほどさまざまである。0.1 Hz 程度以下になると飽和値に達するものもあれば、まだ増加の傾向を示すものもある。

Fig. 5. Frequency effect on the crack growth rate at a constant ΔK .

Fig. 6 は Fig. 1~3 のイオン交換水中、 $f=0.17$ Hz であまり加速しなかった HT50 の破面と、加速の生じた HT80、S35C の破面を比較したものである。HT50 は破面全面にわたって腐食生成物が付着しているが、HT80、S35C ではあまり腐食していない。腐食環境中ではき裂内の腐食生成物により有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} が小さくなることが報告されているので、き裂の開口比率 $U = \Delta K_{eff} / \Delta K$ と ΔK の関係を求めると、Fig. 7 に示すように、人工海水中、イオン交換水

In ion exchanged water 0.167 Hz, $R=0.05$
Fig. 6. Corrosion of the fracture surface. Fig. 7. Variation of $U = \Delta K_{eff} / \Delta K$.

中ではいずれの材料も $f=10$ Hz に比べて $f=0.17$ Hz の方が U 値の低下が著しい。とくに、HT50 は同一条件下の HT80 や S35C に比べ U 値が小さくなっていて Fig. 7 に示す破面観察の結果と一致している。

Fig. 8 は腐食生成物の影響を除去した有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} とき裂進展速度 da/dN の関係を示す。10 Hz では液体環境中のき裂進展速度は ΔK_{eff} で整理しても大気中とあまり差は認められない。しかし、0.17 Hz では人工海水中、イオン交換水中であまり加速しなかった HT50 までも加速効果が現れて、HT80 や S35C と同じ傾向を示している。

3・2 繰返し速度の影響

荷重繰返し速度の低下に伴う da/dN の加速効果をさらに検討するために、 $\Delta K_{eff} = 21 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (一部 $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 一定にして繰返し速度を段階的に変えてき裂進展速度を測定すると共に、き裂長さの影響についても調べた。Fig. 9 は HT50 の結果で、図中のき

Fig. 8. da/dN vs. ΔK_{eff} . Fig. 9. Frequency effect on da/dN at a constant ΔK_{eff} (HT50).

裂長さ a は荷重点 (Fig. 1 A 点) からの距離で, $a = 20, 26, 30$ mm は切欠き底からそれぞれ 5, 11, 15 mm のき裂長さに対応する. 実験点はこれらのき裂長さから各繰返し速度でき裂長さを 0.25~0.5 mm 進めるのに要した繰返し数から求めた. なお, 高繰返し速度から低繰返し速度に段階的に変えた場合と低繰返し速度から高繰返し速度に段階的に変えた場合とではほとんど差異は認められなかった. 高繰返し速度から低繰返し速度になるとき裂速度は 3~4 倍加速し, 0.2 Hz 程度以下で飽和する傾向が認められる. 一方, 5 Hz 以上の高繰返し速度では大気中のき裂進展速度とほとんど差がない. また, こうしたき裂進展速度の変化は ΔK_{eff} を一定にすればき裂長さにはほとんど関係しない. 同様な傾向は Fig. 10, 11 に示す HT80, S35C でも認められる.

Fig. 10. Frequency effect on da/dN at a constant ΔK_{eff} (HT80). Fig. 11. Frequency effect on da/dN at a constant ΔK_{eff} (S35C).

Fig. 12 は Fig. 9~11 の結果をそれぞれの ΔK_{eff} に対応した大気中の速度との比で整理したものである. 図から明らかなように, 材料の種類はもちろんのことイオン交換水中, 人工海水中の差, き裂長さの差を問わずほとんど一本の幅広い曲線で示することができる.

Fig. 12. Relation between $(da/dN)_{corr.}/(da/dN)_{air}$ and frequency.

すなわち、5 Hz から 0.5 Hz ぐらいの繰返し速度の範囲で、大気中のき裂進展速度から腐食環境中のき裂進展速度に移行する過渡現象のようなものがみられる。図には遠藤らの HT55 の結果 (○*) もプロットしてみたが、やはり本実験と同じような結果を示している。

Fig. 13 はイオン交換水中、 $f=10$ Hz で試験した試験片表面のき裂に沿って多数の気泡が噴出する状態を示したものである。き裂の開閉口挙動のために壁面内に発生するキャビテーション気泡である。こうした気泡の発生は大気中のき裂進展速度にほぼ等しくなる 3 Hz 以上のイオン交換水中や人工海水中で、材料の種

$$\Delta K_{\text{eff}} = 21 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

Fig. 13. Cavitation bubbles gushing from the fatigue crack.

類の如何にかかわらず観察される。そこで、このようなキャビテーション気泡の発生状態を観察するために、アクリル板を Fig. 1 とほぼ同様な形状に機械加工した試験片でき裂内の液の挙動を観察した。Fig. 14 はその一例でき裂面を斜め前方から写真撮影したものである。なお、き裂先端領域が白く見えるのは、アクリル板にき裂を発生させた際、き裂先端に細かい割れが入ったためである。3 Hz 程度の低速からき裂面内のき裂先端付近に白い領域が観察できキャビテーション気泡の発生が認められる。また、高繰返し速度になるにつれて気泡の集団が大きくなるのがわかる。このことは高繰返し速度になると、き裂先端まで環境液が到達しているのではなく、真空あるいは溶存空気などの気相状態になっていると考えた方がよいことになる。

Fig. 15 に一例として HT80 の破面写真を示す。図 (a) は大気中 10 Hz の破面で、粒界割れと粒内破壊の混在した様相を呈している。同様な破面は人工海水中 10 Hz の場合にも観察される (図(b))。一方、Fig. 15 (c) は人工海水中低繰返し速度の 0.17 Hz の場合で、粒界割れのない粒内ぜい性破面は、明らかに前二者とは異なった状態である。これらの破面から低繰返し速度の加速が腐食溶解、あるいは水素ぜい化によるかは明らかでないが、高繰返し速度で試験すると、キャビテーション気泡が発生し、き裂先端が気相状態になっ

Fig. 14. Cavitation bubbles observed in the crack of the acrylic resin specimen.

(a) In air, 10Hz

(b) In synthetic seawater, 10Hz

(c) In synthetic seawater, 0.17Hz

Fig. 15. Scanning electron micrographs of fracture surface of HT80 at $\Delta K=20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

The arrows indicate the direction of the crack growth.

て大気中の破面に近づいたことは容易に推察できる。

また, Fig. 12 に示すキャビテーション発生時の過渡期間 (3~10 Hz) の個々のデータを連ねた場合複雑な傾向を示しているが, これは破面の凹凸が材料, 環境, き裂長さなどによって異なり, キャビテーション気泡の発生がまちまちになることを考えるとこのような挙動も理解できる。結局, 高繰返し速度での腐食疲労き裂進展にはキャビテーション気泡の発生を考慮する必要があることを示している。

4 結 言

液中の疲労き裂先端に発生するキャビテーション気泡の影響を明らかにするために, 人工海水中, イオン交換水中で HT50, HT80, S35C の疲労き裂進展速度に及ぼす荷重繰返し速度の影響について考察し, 以下の諸点が明らかになった。

(1) ΔK - da/dN 曲線では繰返し速度の影響があまり明りょうでない HT50 のような腐食性の強い材料は, き裂内の腐食生成物の影響を除いた ΔK_{eff} - da/dN 曲線で整理すると繰返し速度の影響が明りょうに現れる。

(2) ΔK_{eff} を一定にして繰返し速度を段階的に変えた試験結果を, ΔK_{eff} に対応した大気中の速度との比で整理すると, 材料, 試験液, き裂長さによらず, 低速度域 (0.2 Hz 以下) と高速度域 (5 Hz 以上) で一定値を示し, その間に過渡現象が認められる一本の幅広い曲線で示すことができる。

(3) 液体環境中の高繰返し速度の試験では, 疲労き裂先端部にキャビテーション気泡が発生し, き裂先端は真空あるいは溶存空気などで気相状態になり, その結果 5 Hz 以上では大気中のき裂進展速度とほとんど変らなくなる。このことは破面観察の結果とも一致する。

(昭和59年5月28日 日本材料学会第33期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 鈴木幸雄, 日本機械学会論文集, **40**, 1262 (1974).
- 2) O. Vosikovsky, Trans. ASME, Jour. of Eng. Mat. and Tech., **97**, 298 (1975).
- 3) O. Vosikovsky, Jour. of Testing and Evaluation, **6**, 175 (1978).
- 4) G.C. Salivar and D.L. Creighton, Engineering Fracture Mechanics, **14**, 337 (1981).
- 5) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 松田喜彦, 日本機械学会論文集, A-**46**, 1337 (1980).
- 6) 駒井謙治郎, 喜多慎人, 遠藤吉郎, 日本機械学会論文集, A-**49**, 1029 (1983).
- 7) 河合末男, 鯉淵興二, 日本機械学会論文集, **44**, 1789 (1978).
- 8) T.L. Gerber, J.D. Head and E. Kiss, Trans. ASME, Jour of Eng. Mat. and Tech., 225 (1974).
- 9) J.P. Gallagher and G.M. Sinclair, Trans. ASME Jour. of Basic Engineering, 598 (1969).
- 10) M. Clavel and A. Pineau, Metal. Trans. A, **9A**, 471 (1978).
- 11) C. Amzallag, P. Rabbe and A. Desestret, ASTM, STP 642, 117 (1978).
- 12) J.T. Ryder, W.E. Krupp, D.E. Pettit and D.W. Hoepfner, ASTM STP 642, 202 (1978).
- 13) 西島 敏, 阿部孝行, 増田千利, 蛭川 寿, 日本機械学会論文集, A-**51**, 156 (1985).
- 14) 遠藤吉郎, 岡田庸敬, 日本機械学会論文集, **31**, 52 (1965).
- 15) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, **25**, 899 (1976).
- 16) C.E. Jaske, D. Broek, J.E. Slater and W.E. Anderson, ASTM STP 642, 19 (1978).