80キロ級高張力鋼の腐食疲労き裂進展挙動*

駒井謙治郎**, 喜多禎人***, 遠藤吉郎****
Kenjiro KOMAI, Sadato KITA, Kichiro ENDO

Key Words: Fatigue, Corrosion Fatigue, Crack Growth Rate, Hydrogen Embrittlement, High-Tension Steel

1. 結 言

近年、高張力鋼の構造物への使用が増えているが、海洋などの腐食性環境中では腐食疲労き裂の発生と進展が問題となっている⁽¹⁾。著者らは、腐食溶解と水素ぜい化による腐食疲労き裂進展の加速が重要であることを指摘しているが⁽²⁾⁽³⁾、腐食性環境中でのき裂進展の加速機構については不明瞭な点が多い。

一方、高張力鋼が腐食性環境中で使用される場合にはカソード防食が施されるが⁽⁴⁾、カソード防食により腐食溶解によるき裂進展の加速が小さくなる反面、水素が発生し水素ぜい化によるき裂進展の加速が大きくなることもある⁽⁵⁾。したがって、カソード防食を施す際にはその防食電位をうまく選定し、合わせてカソード防食下におけるき裂進展挙動を解明しておく必要がある。

本研究は、80キロ級高張力鋼の腐食疲労き裂進展に及ぼす板厚効果、速度効果およびカソード防食効果について検討したものである。これによって高張力鋼の腐食疲労き裂進展の機構を解明し、合わせて設計基準を得ようとするものである。

2. 実 験 方 法

供試材は80キロ級高張力鋼で、その化学成分を表1に、調質後の機械的性質を表2に示す。試験片は図1に示すようなWOL形試験片で板厚は $t=5$ mm、25 mmの2種類である。試験片はき裂の進展方向と板材の圧延方向が一致する方向(T-L方向)に切り出した。実験に際しては室内空气中疲労により、 $\Delta K=8\sim 17$ MPa $\cdot$ m^{1/2}で切欠き先端より約5 mmの予き裂を発生させた。自然腐食下の試験においては、き裂進展面の腐食を防ぐために、透明セロテープによりコー

ティングを施した。したがって、腐食液はき裂進展方向にのみ作用する。腐食性環境中では腐食生成物によりき裂先端が見えにくくなり、き裂長さが表面から測定できないため、き裂長さはコンプライアンス λ より評価した。また、き裂開口比率 U の測定には除荷弾性コンプライアンス法⁽⁶⁾を用いた。コンプライアンス測定は、図1に示す位置にゲージ長1 mmのひずみゲージをはりつけ、ひずみゲージ出力とロードセル出力の関係を求めて行った。ひずみゲージにはコーティング材により十分な防水処理を施した。これらの測定はすべてミニコンピュータ(MELCOM 70/10)自動計測システムによっているが、この際測定精度向上のため10~20サイクル(下限界近傍では100サイクル)についての平均化処理を行った。

試験環境は乾燥空気(露点 -52°C 、水分19 ppm)を基準環境とし、溶媒として比抵抗 $R>1$ M $\Omega\cdot$ cmのイオン交換水を使用した1% NaCl水溶液である。

表1 化学成分 (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	B	Al
0.12	0.29	0.92	0.016	0.05	0.24	0.50	1.21	0.42	0.30	0.0013	0.06

表2 機械的性質

$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_B MPa	δ %
750	815	24

図1 試験片形状

* 昭和57年6月18日 北陸信越支部北陸地方講演会において講演、原稿受付 昭和57年7月20日。

** 正員、京都大学工学部(〒606 京都市左京区吉田本町)。

*** 准員、トヨタ自動車(株)(〒471 豊田市トヨタ町1)。

**** 正員、摂南大学工学部(〒572 寝屋川市池田中町 17-8)。

腐食液は 25°C 一定に保たれた恒温そうと腐食そうを 3 μm の PE フィルタでろ過しながら循環させた。

用いた疲労試験機は、容量 49 kN の横形電気油圧式サーボ疲労試験機である。応力波形は三角波を用い、応力比 $R=K_{\min}/K_{\max}=0.1$ で繰返し速度 f を 5 Hz, 1 Hz, 0.1 Hz の 3 段階に変化させてき裂進展

速度を測定した。また、カソード防食はポテンショスタットにより電位規制で、飽和甘こう(汞)電極基準に対して -0.8V と -1.0V で行った。破面観察は電界放射形高分解能走査電子顕微鏡(日立 HFS-2)によった。

3. 実験結果と考察

3.1 da/dN と ΔK の関係 乾燥空气中, 1% NaCl 水溶液中におけるき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を図 2 (自然腐食下), 図 3 (カソード防食下) に示す。なお, 図 3 において矢印を付したデータはデータ点の重なりを示す。いずれの図においても, くさび効果⁽⁷⁾のため ΔK が実際の力学量を表しておらず, 環境効果は明瞭には現れない。しかし, 板厚効果については, $t=25\text{ mm}$ の方が若干き裂進展速度が大きく, また, 速度効果については, 繰返し速度が小さいほどき裂進展の加速が大きく高 ΔK 域まで続くことがわかる。また, カソード防食効果は $f=0.1\text{ Hz}$ で加速しているのを除いて全く見られない。

3.2 き裂の開閉挙動 き裂の開閉比率 $U=\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ と $K_{\max}$ の関係を図 4 (自然腐食下), 図 5 (カソード防食下) に示す。

板厚効果について見ると, $t=25\text{ mm}$ の方が全体的

図 2 き裂進展速度と ΔK の関係 (自然腐食下)

図 3 き裂進展速度と ΔK の関係 (カソード防食下)

図 4 開口比率と $\Delta K_{\max}$ の関係 (自然腐食下)

図 5 開口比率と $K_{\max}$ の関係 (カソード防食下)

に U が小さいが、乾燥空気中에서도差があり、くさび効果の差よりもむしろ力学的因子による板厚効果と考えられる。そこでこの差を除くため、腐食環境中の U 値 U_{CF} を同じ K_{max} における乾燥空気中の U 値 U_{air} で除し、これをくさび効果係数 C_w とする。 C_w と K_{max} の関係を図6に示す。 C_w は K_{max} が大きい範囲ではほとんど同じで板厚効果は見られないが、 $f=5\text{ Hz}$ の K_{max} が小さい範囲では、 $t=25\text{ mm}$ の C_w が $t=5\text{ mm}$ のそれより小さく、くさび効果が有効となっている。また、繰返し速度の小さい $f=1\text{ Hz}$, 0.1 Hz の方が $f=5\text{ Hz}$ よりも C_w が大きい。くさび効果はき裂先端近傍の腐食生成物の量とき裂幅によって決定されるが、 $f=1\text{ Hz}$, 0.1 Hz では腐食溶解が激

図6 くさび効果係数と K_{max} の関係 (自然腐食下)

図7 き裂進展速度と ΔK_{eff} の関係 (自然腐食下)

しくき裂先端の拡幅化によりくさび効果が小さくなったものと考えられる。

一方、カソード防食効果について見ると、図5に示したように、いずれの繰返し速度でも K_{max} が大きくなるとカソード防食下の U 値が自然腐食下の U 値よりも大きくなる。 $f=0.1\text{ Hz}$ ではとくに K_{max} が小さい範囲でもそのことがいえる。一般にカソード防食下でもき裂先端近傍では局所的に酸性状態になるため⁽⁵⁾防食効果が十分でなく腐食溶解が起こる。しかし、き裂進展後のき裂壁面の腐食は抑えられる。したがって、カソード防食下の U 値は乾燥空気中の U 値よりは小さくなるが、自然腐食下の U 値よりは若干大きくなる。なお、自然腐食下の $f=5\text{ Hz}$ で $K_{max} < 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ で極端に U 値が減少しているが、カソード防食下ではそのような U 値の減少は起こらず腐食溶解が抑えられていることがわかる。

3.3 da/dN と ΔK_{eff} の関係 き裂進展速度と開口比率 U より得られる有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} と da/dN の関係を図7 (自然腐食下)、図8 (カソード防食下) に示す。

板厚効果について見ると、 $t=25\text{ mm}$ の方がき裂進展速度は大きい、乾燥空気中のき裂進展速度に対する加速はいずれの板厚でも大差はない。

速度効果について見ると、低 ΔK_{eff} 域では速度効果は見られないが、高 ΔK_{eff} 域では繰返し速度が小

図8 き裂進展速度と ΔK_{eff} の関係 (カソード防食下)

さいほどき裂進展の加速が高い ΔK_{eff} まで続く。このような速度効果の違いが現れるのは、低 ΔK_{eff} 域ではき裂進展速度が小さく、 $f=5\text{ Hz}$ のような高速でも水素の吸蔵、拡散が十分に起こり水素ぜい化が起こることによる。これに対し、高 ΔK_{eff} 域ではき裂進展速度が大きく水素の吸蔵、拡散に速度効果が現れ、後に図14で述べるように限界のき裂速度があり、繰返し速度が小さいほど1サイクル中に環境にさらされる時間が長く水素ぜい化が起こりやすくなるからである。また、乾燥空気中のき裂進展の下限界値、すなわち機械的き裂進展の下限界値は、 $(\Delta K_{eff})_{th} \cong 3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であると考えられるが、自然腐食下ではそれ以下の ΔK_{eff} でもき裂進展が見られる。

しかし、カソード防食下ではそのようなき裂進展が見られず、き裂開口比率 U における両者の差を考えあわせると、自然腐食下のき裂進展は繰返し応力によ

り加速された腐食溶解によるものであることがわかる。したがって、カソード防食下では腐食溶解によるき裂進展の加速は小さく水素ぜい化によるものが支配的であることがわかる。また、カソード防食下のき裂進展の加速が機械的き裂進展の下限界値近傍から生じていることは、機械的き裂進展がき裂先端の酸化被膜を損傷し水素の吸蔵を促進することによって、水素ぜい化が起こることを示している。また、 $\Delta K_{eff} > 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ではカソード防食効果がなく、腐食溶解によるき裂進展の加速が極めて小さいことがわかる。一方、カソード防食下における速度効果は自然腐食下とほとんど同じで繰返し速度が小さいほどき裂進展の加速は高い ΔK_{eff} まで続くが、 $f=0.1\text{ Hz}$ ではさらに加速している。

3.4 破面観察 1% NaCl 中自然腐食下、 $t=25\text{ mm}$ 、 $f=5\text{ Hz}$ における破面写真を図9に示す。図9

(a) $\Delta K_{eff}=2.7\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

(b) $\Delta K_{eff}=10.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

矢印はき裂進展方向を示す

図9 破面写真 (1% NaCl 中、自然腐食下、 $f=5\text{ Hz}$)

$\Delta K=14.1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

矢印はき裂進展方向を示す

図10 破面写真 (1%NaCl 中、自然腐食下、 $f=0.1\text{ Hz}$)

(a) は機械的き裂進展の下限界値より小さい $\Delta K_{eff}=2.7\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ におけるもので、腐食溶解が激しく腐食生成物がかなり付着しており、腐食溶解によってき裂が進展したことを示している。一方、図9(b)は機械的き裂進展の下限界値より大きい $\Delta K_{eff}=10.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ におけるもので、水素ぜい化によって生ずる粒界割れがかなり見られ、腐食溶解は図9(a)ほど受けていない。1% NaCl 中自然腐食下、 $t=25\text{ mm}$ 、 $f=0.1\text{ Hz}$ における破面写真は図10に示すように、はっきりと粒界割れが見られる。

1% NaCl 中カソード防食下、 $t=25\text{ mm}$ 、 $f=1\text{ Hz}$ における破面写真を図11に示す。図11(a)は $\Delta K_{eff}=9.6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ におけるもので、自然腐食下と同様な粒界割れが見られる。図11(b)は $\Delta K_{eff}=17.8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ におけるもので、粒界割れがかなり減少しているが、粒内割れでも白矢印で示すぜい性的な部分が存在し、この粒内ぜい性割れと粒界割れを合わせたぜい性破面率は図11(a)、(b)で大差はない。

破面率と ΔK_{eff} の関係を図12に示す。粒界破面率 (IG) に関するかぎり、速度効果は見られない。 $f=5\text{ Hz}$ については、粒界破面率とき裂進展の加速の大きさがよく対応しているが、 $f=1\text{ Hz}$ 、 0.1 Hz では $\Delta K_{eff} \geq 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ におけるき裂進展の加速と粒界破面率はあまり対応しない。しかし、破面写真で見ら

れた粒内ぜい性割れ (BTG) も含めたぜい性破面率について見ると, $f=1\text{ Hz}$ で示すようによく対応することがわかる. なお, 図 12 において DTG は粒内延性割れ部分を示す.

3.5 き裂進展の加速機構 有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} でき裂進展速度を整理すると, 繰返し速度によらず, 腐食生成物によるくさび作用の力学的効果は取り除くことができる. そこで, $da/dN-\Delta K_{\text{eff}}$ 線図上

(a) $\Delta K_{\text{eff}}=9.6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (b) $\Delta K_{\text{eff}}=17.8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

黒矢印はき裂進展方向を示す, 白矢印は粒内ぜい性割れ部分を示す

図 11 破面写真 (1% NaCl 中, カソード防食下, $f=1\text{ Hz}$)

図 12 破面率と ΔK_{eff} の関係 (IG: 粒界割れ, BTG: 粒内ぜい性割れ, DTG: 粒内延性割れ)

での NaCl 中と乾燥空気中のき裂進展速度の差を環境によるき裂進展の加速量 $(da/dN)_{\text{acc}}$ とし, つぎの線形加算則⁽⁶⁾を仮定する.

$$(da/dN)_{\text{CF}} = (da/dN)_{\text{air}} + (da/dN)_{\text{acc}} \quad (1)$$

ここで, $(da/dN)_{\text{CF}}$, $(da/dN)_{\text{air}}$ はそれぞれ ΔK_{eff} で整理したときの腐食疲労き裂進展速度, 乾燥空気中き裂進展速度である. $(da/dN)_{\text{acc}}$ と ΔK_{eff} の関係を図 13 に示す. 全体的な傾向は ΔK_{eff} で整理したき裂進展速度線図と同じであるが, き裂進展の加速の様子がよくわかる.

$\Delta K_{\text{eff}} < 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ では自然腐食下の方がカソード防食下よりもき裂進展の加速量が多いが, これは, 自然腐食下で腐食溶解によるき裂進展が生じたのに対し, カソード防食下ではそれが極めて小さかったからである. したがって, カソード防食下のき裂進展の加速量を水素ぜい化によるき裂進展の加速量と考えて, 自然腐食下の加速量 (太線) からカソード防食下のそれ (細線) を差し引くと, 腐食溶解によるき裂進展の加速量 (---) を求めることができる.

一方, 純粋な環境効果を検討する

図 13 $(da/dN)_{\text{acc}}$ と ΔK_{eff} の関係

ために、くさび効果を考慮した対時間き裂進展速度、すなわち、有効き裂進展速度 $(da/dt)_{\text{eff}}$ をつぎのように求める。

$$(da/dt)_{\text{eff}} = (f/U) da/dN \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 f は繰返し速度、 U はき裂開口比率である。これは腐食疲労、水素ぜい化を問わず、環境によるき裂進展の加速はき裂の開口時間の間にのみ生じると考え、き裂開口時間に対するき裂進展速度を求めるものである。 $(da/dt)_{\text{eff}}$ を腐食環境中と乾燥空気中のそれぞれについて求め、 $(da/dN)_{\text{acc}}$ と同様にしてき裂進展の加速量をつぎのようにして求める。

$$\begin{aligned} (da/dt)_{\text{eff,acc}} &= (da/dt)_{\text{eff,CF}} \\ &- (da/dt)_{\text{eff,air}} = f[(1/U_{\text{CF}})(da/dN)_{\text{CF}} \\ &- (1/U_{\text{air}})(da/dN)_{\text{air}}] \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$(da/dt)_{\text{eff,acc}}$ と ΔK_{eff} の関係を図 14 に示す。これを見ると、繰返し速度によらず $(da/dt)_{\text{eff,acc}}$ の最大値が、ほぼ 1.5×10^{-7} m/s で頭打ちになることより、水素の影響がこれ以上のき裂進展速度では現れないことがわかる。

最後に、図 13 で示したき裂進展の加速量を用いて腐食溶解と水素ぜい化の重畳したき裂進展速度線図を $f=5$ Hz について描くと、図 15 のようになる。ここで、破線は乾燥空気中のき裂進展速度（細線）に腐食溶解による加速量を加えたき裂進展速度、一点鎖線は水素ぜい化による加速量を加えたき裂進展速度を示す。これらの二つの加速量を乾燥空気中のき裂進展速

度（細線）に加えると、太い実線のような自然腐食下のき裂進展速度となる。

4. 結 言

1% NaCl 中において板厚を変えて種々の繰返し速度のもとで、80キロ級高張力鋼の腐食疲労き裂進展速度を測定し、 ΔK_{eff} を用いて板厚効果、速度効果およびカソード防食効果を検討して、き裂進展の加速因子を明らかにした。

(1) 1% NaCl 中におけるき裂進展速度は、 ΔK で整理した場合、腐食生成物によるくさび効果のため、腐食環境効果、カソード防食効果が明瞭には現れない。

(2) き裂の開口比率 U は、 $f=5$ Hz の K_{max} が小さい範囲で、25 mm 厚試験片のほうが 5 mm 厚試験片より低下が著しく、くさび効果が有効となる。カソード防食下では、き裂壁面の腐食が抑えられるため、 U の低下は自然腐食下に比べて小さく、とくに、 $f=5$ Hz の $K_{\text{max}} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ における防食効果が顕著である。

(3) 有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を用いて、腐食生成物によるくさび効果を除くと、き裂進展速度に及ぼす腐食環境効果、速度効果、カソード防食効果が明瞭に現れた。 ΔK_{eff} で整理したき裂進展速度は、25 mm 厚試験片の方が 5 mm 厚試験片より大きいが、

図 14 $(da/dt)_{\text{eff,acc}}$ と ΔK_{eff} の関係

図 15 腐食溶解と水素ぜい化の重畳したき裂進展速度線図

乾燥空気中のそれに対する加速は両者で大差がない。また、速度効果は低 ΔK_{eff} 域では見られないが、高 ΔK_{eff} 域では繰返し速度が小さいほどき裂進展の加速が高い ΔK_{eff} まで続く。

(4) 自然腐食下では $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 以下で腐食溶解によるき裂進展が見られるのに対し、カソード防食下では下限値は $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ とほぼ一致する。カソード防食下の水素ぜい化によるき裂進展の加速は、 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 以上の ΔK_{eff} で生じるが、これは機械的き裂進展によるき裂先端の酸化被膜の損傷が、水素の吸蔵を促進し水素ぜい化を起こすことを示している。

(5) HT 80 の腐食疲労き裂進展の加速因子は、 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 以下では腐食溶解、それ以上では水素ぜい化が支配的であり、カソード防食によるき裂進展の抑

制は $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ 以下で期待できる。

なお、本研究は昭和 56 年度文部省科学研究費試験研究の補助を受けた。また、試験片は住友金属工業(株)の平川賢爾氏より提供を受けた。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Det Norske Veritas, *Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures*, (1977).
- (2) 遠藤・ほか 2 名, 機論, 46-412, A (昭 55), 1337.
- (3) 遠藤・ほか 2 名, 機論, 45-398, A (昭 54), 1152.
- (4) Gooch, T.G. and Broth, G.S., *Met. Sci.*, 13-7 (1979), 402.
- (5) Endo, K., ほか 2 名, *Bull. JSME*, 21-161 (1978), 1565.
- (6) 菊川・ほか 3 名, 材料, 25-276 (昭 51), 899.
- (7) 遠藤・ほか 2 名, 機論, 40-333 (昭 49), 1262.
- (8) 遠藤・ほか 2 名, 機論, 48-436, A (昭 57), 1489.