

高張力鋼HT50のカソード防食下の
疲労微小表面き裂の進展特性*石原 外美*¹, 塩沢 和章*¹
宮尾 嘉寿*¹, 福地 博直*²Effects of Cathodic Protection on the Small Corrosion Fatigue Crack
Growth Behavior of High-Tensile-Strength Steel HT50Sotomi ISHIHARA, Kazuaki SHIOZAWA,
Kazyu MIYAO, and Hironao FUKUCHI

In order to investigate the effects of cathodic protection on small corrosion fatigue crack growth behaviors, we conducted high-cycle reversed plane bending fatigue tests in sodium chloride solution using high-tensile-strength steel HT50 smooth plate specimens. The small corrosion fatigue crack growth rates under conditions of free corrosion potential and -1.1 V (saturated calomel electrode SCE) showed a stress amplitude dependence at a constant stress intensity factor range, while those under the condition of -0.8 V (SCE) did not show the stress amplitude dependence at a constant stress intensity factor range. The crack growth rates of small surface cracks were reduced remarkably by the cathodic protection compared to those of the through thickness cracks. In the crack growth behaviors of the surface cracks, crack size dependence was observed in the effect of cathodic protection; that is, the degree of suppression of the crack growth rate by the cathodic protection became high with decreasing crack size.

Key Words: Corrosion Fatigue, Cathodic Protection, Crack Growth, Small Crack, High-Strength-Steel, Plane Bending Fatigue Test

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では高張力鋼HT50の自然腐食電位下における酸素消費形腐食および水素発生形腐食条件下の疲労微小表面き裂の進展特性を調査し、微小表面き裂の進展挙動に及ぼす化学的因子の影響について検討した。その結果によれば、両環境における疲労微小表面き裂の進展挙動は、溶存酸素濃度および水素イオン濃度の影響を受け、き裂進展速度と応力拡大係数の関係に、応力拡大係数一定のもとで応力振幅依存性を示すこと、また、き裂進展速度は一定の応力拡大係数のもとでもき裂長さの短い範囲で加速し、この加速は環境の腐食性が強くなるほど顕著となることが明らかとなった。

本報では、上述の微小表面き裂の進展特性に及ぼす腐食環境の影響を明らかにする研究⁽¹⁾⁽²⁾の一環として、カソード防食下の微小表面き裂の進展特性を調査した結果を述べる。すなわち、腐食速度に影響する試験片の電極電位をカソード側に制御した条件下の疲労微小表面き裂の進展特性を調査し、これらの結果を既報⁽¹⁾

の自然腐食電位下の疲労微小表面き裂の進展特性と比較することによって疲労微小表面き裂の進展挙動に及ぼすカソード防食の影響を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 試験片 本実験に用いた金属材料は高張力鋼HT50(板厚2mm)であり、その化学成分および機械的性質は既報⁽¹⁾で述べたので記述を省略する。試験片は納入材を図1の試験片形状まで機械加工後エメリー紙1500番まで表面研磨し、さらに電解研磨を施し実験に供した。また、アノード面積がカソード面積に比べて小さいときには、アノード部の電流密度が大きくなり、アノード部の腐食が特に進む危険があるので、白金製の対極と面積の同じ試験部面積になるように、シリコンゴムで試験片表面をコーティング(図1の斜

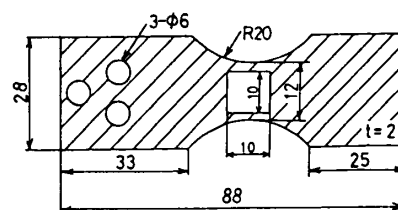


図1 試験片形状および寸法

* 平成元年11月9日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年4月21日。

*¹ 正員、富山大学工学部(〒930 富山市五福3190)。

*² 学生員、富山大学大学院〔現在 本田技研工業(株)〕。

線部分)した。

2・2 実験方法 用いた疲労試験機は定たわみ式小形平面曲げ試験機であり、応力繰返し速度は10 Hzである。なお、実験はすべて応力比-1の完全両振りで行った。腐食液は水道水を溶媒とする3%食塩水を使用した。合成樹脂ポンプにより空気を十分含んだ6Lの食塩水をタンクと試験部の間を循環させ、液温を 298 ± 0.5 K一定に保った。北斗電工製のポテンショスタット/ガルバノスタット(HA-305)を使用し、試験片の電位を飽和カロメル電極基準(SCE)で -0.8 V〔以後 -0.8 V(SCE)と略〕および -1.1 V(以後 -1.1 V(SCE)と略)の2種類の電位に制御した。なお、自然腐食電位は -0.53 V(SCE)であった。

表面き裂および貫通き裂長さの測定は、任意の繰返し数ごとに試験片表面のき裂を顕微鏡を用いて、約50倍で直接観察する方法により行った。その他の実験方法の詳細は既報⁽¹⁾に述べたので記述を省略する。

3. 実験結果

3・1 き裂形状比 図2(a)および(b)は、ポテンショスタットによってそれぞれ電位を -0.8 V(SCE)および -1.1 V(SCE)に制御した実験において、試験片表面に現れた疲労微小表面き裂の試験片内部方向へのき裂形状の一例を示したものである。これよりわかるように、図(a)の -0.8 V(SCE)における表面き裂は半だ円形のき裂形状を呈する。一方、 -1.1 V(SCE)における表面き裂は、船底型の様相を呈する。既報⁽¹⁾で述べたように、腐食性環境の影響を強く受けて進展した自然腐食下の表面き裂の形状は半だ円形状というよりは船底形状を呈する。本報の -1.1 V(SCE)の結果も自然腐食下の結果と同一の傾向を呈するが、き裂の試験片内部方向への進展の度合いが既報の

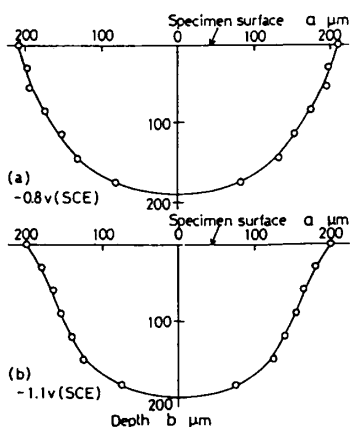


図2 表面き裂の深さ方向へのき裂形状

自然腐食下のそれ⁽¹⁾と比較して小さい。

図3は、図2の測定結果を用いて微小表面き裂の形状比 A_s ($A_s = b/2a$)とき裂長さ $2a$ の関係を示したものである。図よりわかるように、両環境とも A_s はき裂長さの短いところで0.5以上の高い値をとり、き裂長さの増加とともに徐々に低下し、ほぼ一定値をとることがわかる。また、 A_s-2a 関係には明確な応力振幅依存性が認められない。

-0.8 V(SCE)と -1.1 V(SCE)との微小表面き裂の形状比の差異についてみると、 -0.8 V(SCE)ではき裂長さが1.0 mm以上で A_s はほぼ一定値0.32になるが、 -1.1 V(SCE)ではき裂長さが1.0 mm以上ではほぼ一定値0.34となり、 -1.1 V(SCE)のき裂形状比 A_s は、 -0.8 V(SCE)におけるそれと比較していくぶん大きいことがわかる。

3・2 き裂進展挙動

3・2・1 貫通き裂の進展挙動 -0.8 V(SCE)および -1.1 V(SCE)において切欠材を用い、複数の応力振幅のもとでの貫通き裂の進展特性を調査した。

図4はき裂の進展速度 da/dN と応力拡大係数 ΔK の関係を両対数グラフ上に整理したものである。なお、応力拡大係数の計算はRobertsとRichの計算結果⁽³⁾を用いた。図中には自然腐食電位下の貫通き裂のき裂進展挙動⁽¹⁾もハッチングで示してある。

図よりわかるように、カソード防食下の貫通き裂の進展速度は、 ΔK によって一義的に整理され、応力振幅依存性を示さず、 da/dN と ΔK の間には既報⁽¹⁾の大气中、自然腐食電位下の食塩水中および強酸腐食液中における貫通き裂のそれと同様にパリズ則が成立す

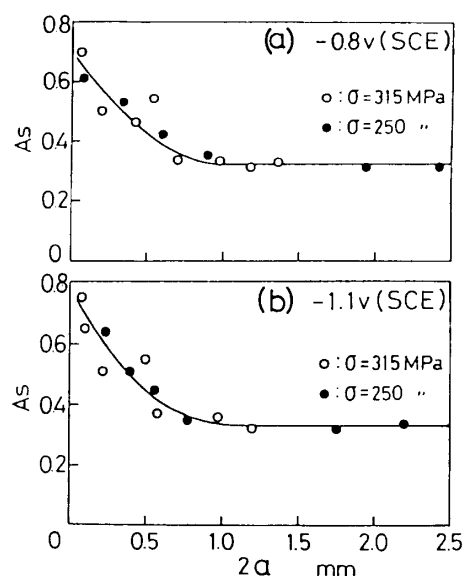


図3 A_s-2a 関係

る。カソード防食下の貫通き裂進展速度と、自然腐食電位下の貫通き裂のき裂進展挙動⁽¹⁾とを比較すると、カソード防食下の -0.8 V (SCE) および -1.1 V (SCE) のき裂進展速度は、一定の ΔK のもとで、自然腐食電位下のき裂進展速度よりも若干低下し、その傾向は低 ΔK 域ほど大きくなる。また、 -1.1 V (SCE) のき裂進展速度は、 -0.8 V (SCE) よりはいくぶん da/dN が高く、しかもその傾向は低 ΔK 域ほど顕著であることがわかる。

3・2・2 微小表面き裂の進展挙動 カソード防食下において、複数の応力振幅条件下で微小表面き裂の進展挙動を調査した。図5は、微小表面き裂の進展速度 da/dN と応力拡大係数 ΔK の関係を両対数グラフ上に示したものである。既報⁽¹⁾の自然腐食電位下の $da/dN-\Delta K$ 関係も(a)図に示した。応力拡大係数の計算はRaju, Newmannの計算結果⁽⁴⁾を用いた。

図より、 ΔK 一定条件において、(b)、(c)図のカソード防食下の微小表面き裂の進展速度は、(a)図の自然腐食電位下のそれに比較して減少していることがわかる。図(b)の -0.8 V (SCE) の疲労微小表面き裂の $da/dN-\Delta K$ 関係には、315 MPa、250 MPaおよび200 MPaの応力振幅範囲において応力振幅依存性が認められず、図中にハッチングで示す既報⁽¹⁾の大気中の疲労における $da/dN-\Delta K$ 関係とほぼ一致することがわかる。ところが、図(c)の -1.1 V (SCE) の疲労微小表面き裂の $da/dN-\Delta K$ 関係を見ると、315 MPa、250 MPaおよび200 MPaの応力振幅範囲での $da/dN-\Delta K$ 関係において応力振幅依存性が認められ、図(a)の自然腐食電位下の傾向と類似している。また、図(b)の -0.8 V (SCE) における実験結果と比較すると、一定の ΔK のもとで -1.1 V (SCE) のき裂進展速度が高くなっており、その傾向はき裂長さの短い範

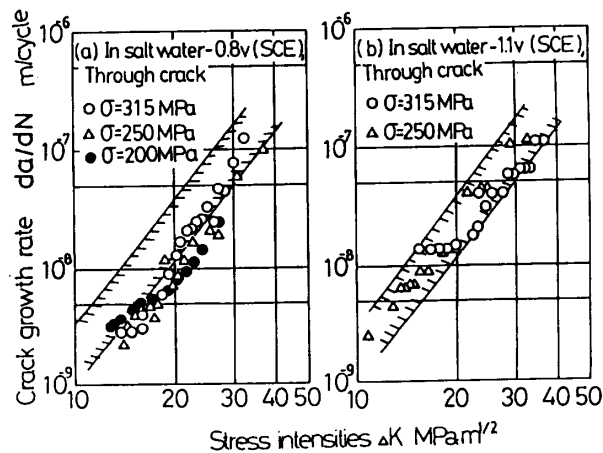


図4 $da/dN-\Delta K$ 線図(貫通き裂)

囲で顕著に現れることがわかる。

3・3 き裂開閉口挙動 カソード防食下の疲労微小表面き裂の、応力1サイクル中のき裂先端近傍にあらかじめ付したマイクロビッカース圧痕間距離の変化を調査し⁽¹⁾⁽²⁾、き裂の開閉口挙動を調査した。

図6は -0.8 V (SCE) および -1.1 V (SCE) における微小表面き裂のき裂開口比 U と応力拡大係数 ΔK の関係を示したものである。図から、カソード防食下の微小表面き裂では、 $\Delta K=2.5\sim 7\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の領域で $U=0.65\sim 1.0$ の値をとり、それ以上の ΔK の領域になると、ほぼ $U=1.0$ の値をとり、 -0.8 V (SCE) および -1.1 V (SCE) の間に顕著な差異は認められない。これらカソード防食下の $U-\Delta K$ 関係と、既報⁽¹⁾の自然腐食電位下のそれ(図中の破線)とを比較すると、自然腐食電位下の微小表面き裂では、 $\Delta K=2.5\sim 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の領域で $U=0.6\sim 1.0$ の値をとり、

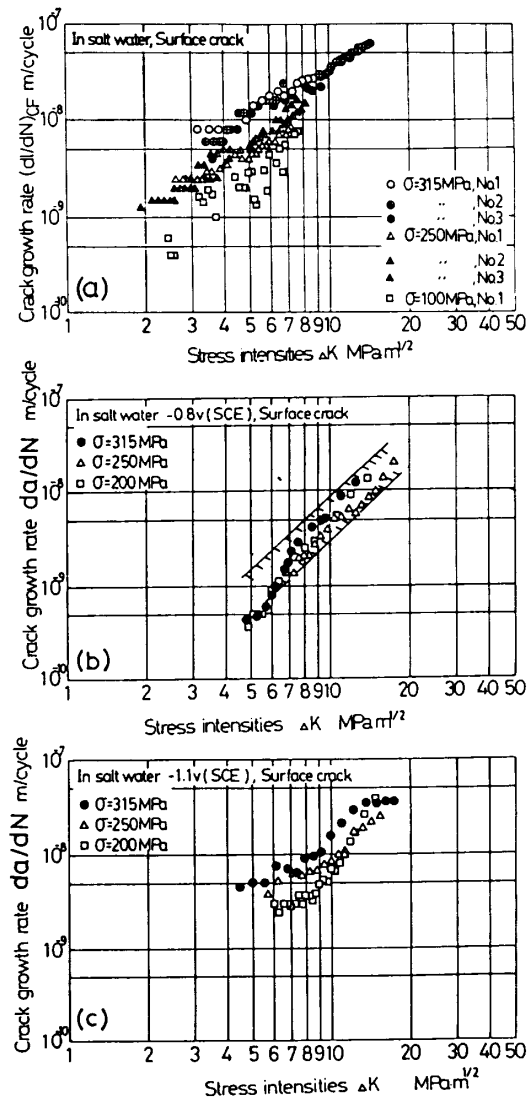


図5 $da/dN-\Delta K$ 線図(微小表面き裂)

それ以上の ΔK の領域になると、ほぼ $U=1.0$ の値をとることから、カソード防食下の微小表面き裂は自然腐食電位下の微小表面き裂よりも高い ΔK 域においてき裂開口が存在する傾向を示す。

3.4 破面観察 図7はカソード腐食下の応力拡大係数幅 $\Delta K=4.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に対応する領域の表面き裂の破面を示したものである。(a)図は -0.8 V (SCE) 、(b)図は -1.1 V (SCE) に対するものである。図中の矢印はき裂進展方向を示している。(a)図の、 $\sigma=250 \text{ MPa}$ 、 -0.8 V (SCE) における破面はいくぶん脆性的であるが、ストライエーション状模様の混在する粒内き裂進展形態を示し、この傾向は大気中疲労下のそれ⁽¹⁾と類似の傾向を示す。

一方、(b)図の $\sigma=315 \text{ MPa}$ の -1.1 V (SCE) の破面は、(a)図の -0.8 V (SCE) の破面形態とは異なり、一部へき開面が混在し、かつ腐食溶解痕跡の残る破面形態を示し、腐食性環境の影響が明確に認められる。また、 -1.1 V (SCE) 下の $\sigma=200 \text{ MPa}$ の破面についても観察したところ、(b)図の 315 MPa の結果とほぼ同一の破面形態を示すが、ところどころ(a)図で認められたストライエーション状模様が観察された。

4. 考 察

4.1 微小表面き裂の進展速度のき裂寸法依存性に及ぼすカソード防食の影響 図5(b)、(c)のカソード防食下における微小表面き裂の $da/dN-\Delta K$ 関係を、 da/dN とき裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大

係数 ΔK_{eff} の関係で整理した結果、 $-1, 1 \text{ V (SCE)}$ の微小表面き裂の $da/dN-\Delta K_{\text{eff}}$ 関係には、 ΔK_{eff} で整理しても依然として応力振幅依存性が存在することがわかった。

図8(a)および(b)は、有効応力拡大係数 ΔK_{eff} をパラメータとして、微小表面き裂の進展速度 da/dN とき裂長さ $2a$ の関係を -0.8 V (SCE) の場合と -1.1 V (SCE) の場合とに分けてそれぞれ示したものである。

これらの図からわかるように、微小表面き裂の進展挙動は、(a)図の -0.8 V (SCE) の場合、 ΔK_{eff} 一定の条件で、 $da/dN-2a$ 関係にはき裂長さ依存性が認められないのに対し、(b)図の -1.1 V (SCE) の場合は明確なき裂長さ依存性を示し、き裂長さの短い領域でのき裂進展速度の増加が認められる。

以上述べたように、微小表面き裂の場合、 ΔK_{eff} 一定の条件で、 $da/dN-2a$ 関係にカソード電位によってき裂長さ依存性が現れる場合 ($-1, 1 \text{ V}$) と現れない

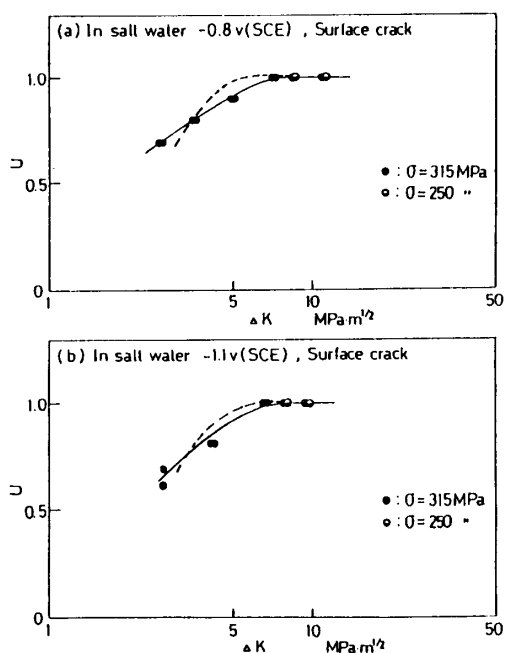
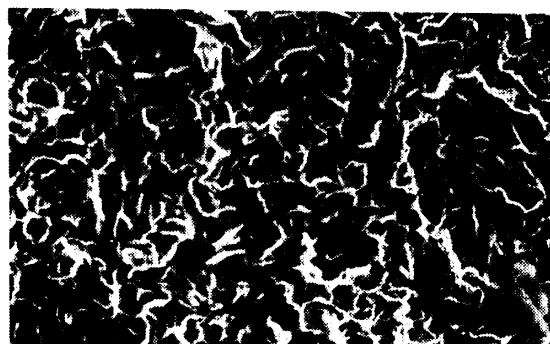


図6 き裂開閉口挙動



(a) $E = -0.8 \text{ V}$, $\sigma = 250 \text{ MPa}$,
 $\Delta K = 4.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b) $E = -1.1 \text{ V}$, $\sigma = 315 \text{ MPa}$,
 $\Delta K = 4.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

50 μm

図7 破面観察

場合(-0.8 V)があるということがわかった。この原因を以下では考察する。

自然腐食電位の状態からカソード側に電極電位を制御することによって試験片を不動態域におくことができ、防食を行うことができる⁽⁵⁾。したがって、最大限(最適電位)にカソード防食の効果が現れるならば、腐食性環境の影響は現れず、ほぼ大気中と似た環境にあると期待される。また、最適電位を越えてカソード側に電極電位を下げ過ぎると過剰カソード防食⁽⁶⁾によって再び腐食性環境の影響が現れる。

本実験と類似した実験条件下(食塩水中-鋼)で疲労寿命に及ぼすカソード防食の影響を調査した研究によれば、塩水中でほぼ-0.75~-0.8 V (SCE)のカソード防食を行うことによって、腐食疲労寿命が大気中疲労寿命に回復することを報告している⁽⁶⁾。したがって、本実験で採用した-0.8 V (SCE)の電位は、上に述べた従来の研究結果や、微小表面き裂の進展速度が大気中疲労のそれと一致することを考慮すれば、最適のカソード防食の期待される電位であり、一方、-1.1 V (SCE)は過剰カソード防食域の電位と考えられる。図2において、図(a)の-0.8 V (SCE)のき裂形状が、大気中疲労⁽¹⁾と同様に半だ円に近い形状であるのに対し、図(b)の-1.1 V (SCE)のき裂形状が船底型を呈しているのも、上の推論を支持している。また、図7の破面形態も上記推論と符合する。

既報⁽¹⁾で、環境の腐食性が強くなるほど疲労微小表面き裂の進展特性に及ぼすき裂長さ依存性は顕著に現れることを述べた。したがって、ほぼ完全防食にあり、環境の腐食性の弱い-0.8 Vの設定電位条件では、 $da/dN-2a$ 関係にき裂寸法依存性は現れず、一方、過剰カソード域で環境の腐食性の影響が現れる領域にある-1.1 Vの設定電位条件では、 $da/dN-2a$ 関係にき裂寸法依存性が現れることになる。

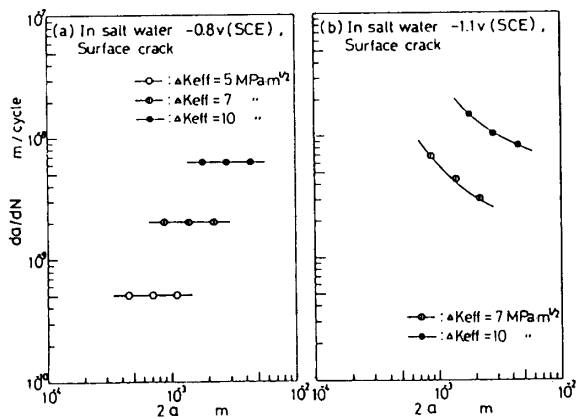


図8 $da/dN-2a$ 関係(表面き裂)

4.2 カソード防食による疲労微小表面き裂の減速とその場合のき裂寸法の影響

図9は、 ΔK_{eff} をパラメータにとり、上述のカソード防食下における貫通き裂および微小表面き裂の $(da/dN)_E-2a$ 関係と自然腐食電位下におけるそれらとの比から求めた $(da/dN)_E/(da/dN)_{E,cor}-2a$ 線図である。

図(a)の-0.8 V (SCE)の場合、カソード防食により貫通き裂の進展速度は自然腐食電位下のそれよりも低 ΔK 領域ほど減速効果が現れ、最大で1/3程度まで減速することがわかる。一方、微小表面き裂の進展速度は、カソード防食により自然腐食電位下の微小表面き裂の進展速度の1/20から1/2に減速され、貫通き裂の場合に比較してカソード防食による減速率が大きいことがわかる。 ΔK_{eff} 一定の曲線における一部のき裂長さの短い領域の実験点を除けば、この減速は低 ΔK_{eff} 領域ほど大きくなる傾向が認められる。また、一定の ΔK_{eff} においてき裂長さの短い領域ほどき裂進展の減速傾向は顕著となり、き裂長さの増加とともに、減速効果は薄れ徐々に自然腐食電位下のき裂進展速度に近づき傾向が認められる。上述の微小表面き裂の進展速度に及ぼすカソード防食効果において認められる

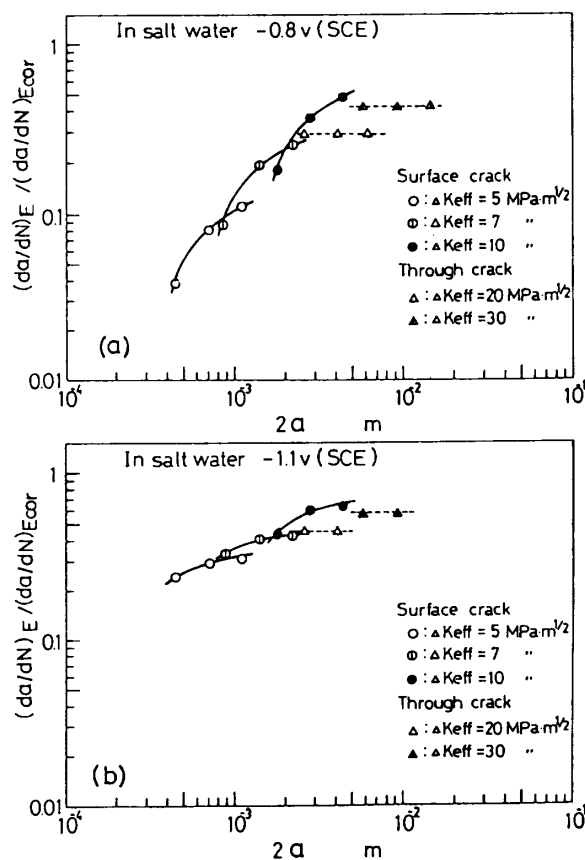


図9 カソード防食によるき裂進展速度の減速効果に及ぼすき裂寸法の影響

き裂寸法依存性は図中の貫通き裂の進展挙動には認められないことから、微小表面き裂の特有の結果であることがわかる。以上述べた傾向は図(b)の -1.1 V (SCE)の実験結果においても同様に認められる。しかし、 -1.1 V の電位下の微小表面き裂の進展速度は、自然腐食電位下の微小表面き裂の進展速度のたかだか $1/5$ から $1/2$ 程度までしか減速されないことから、図(a)の -0.8 V (SCE)の結果に比較して減速率は小さいことがわかる。

したがってこれまで述べた実験結果から、疲労微小表面き裂のカソード防食による進展速度の減速効果は、比較的長い貫通の進展挙動でみられない特有のき裂長さ依存性を示すことが明らかとなった。

本実験でポテンシostatにより制御している電位は、試験片表面上のそれであること、また、実際のき裂進展速度に直接関係するのはき裂先端近傍の電位であり、試験片表面のそれでないことを考慮すれば、図9(a), (b)の実験結果は以下のように解釈できる。

これまでに、腐食疲労き裂内部の電位を調べた研究結果によれば、ポテンシostatにより試験片表面上の電極電位を制御しても、き裂深さ方向への電位は表面とは必ずしも同じにはならない⁽⁷⁾⁽⁸⁾。き裂長さの短い範囲、すなわちき裂が比較的浅い場合、き裂端近傍の電位は試験片表面の設定電位と比較的よく似た値を持つと考えられるが、き裂深さの増加に伴い、き裂端の電位は試験片表面の設定電位よりはより貴の方向(すなわちアノード方向)にあると予想される⁽⁷⁾⁽⁸⁾。したがって、き裂が短い場合はカソード防食の効果が顕著に現れ、き裂進展速度は自然腐食下のそれよりも大きく減速するが、き裂長さ(深さ)の増加に伴い、カソード防食効果は十分現れず、カソード防食によるき裂進展速度の減速効果が低減することになる。以上述べたことは -0.8 V (SCE)並びに -1.1 V (SCE)の両場合に共通して言えることであるが、前者が後者に比較してカソード防食によるき裂進展速度の減速効果が顕著に現れるのは、既に述べているように前者が最適なカソード電位域にあるからである。

5. 結 言

50 kg級高張力鋼を用いて、カソード防食下の微小表面き裂並びに貫通き裂の進展挙動を実験的に調査した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) カソード防食下の貫通き裂の進展挙動は、

ΔK_{eff} 一定の条件において自然腐食電位下における貫通き裂挙動と同様に、き裂長さ依存性を示さず一定値を示す。一方、微小表面き裂の進展挙動は、 -0.8 V (SCE)の場合、 ΔK_{eff} 一定の条件で、貫通き裂と同様に $da/dN-2a$ 関係にはき裂長さ依存性が認められないのに対し、 -1.1 V (SCE)の場合は明確なき裂長さ依存性を示す。この理由は -0.8 V (SCE)の設定電位条件はほぼ完全防食にあり、環境の腐食性は弱く、したがって、大気中疲労と同様に $da/dN-2a$ 関係にき裂寸法依存性は現れず、一方、 -1.1 V (SCE)の設定電位は過剰カソード域で環境の腐食性の影響が現れる領域にあるので、 $da/dN-2a$ 関係にき裂寸法依存性が現れることになる。

(2) 疲労微小表面き裂進展速度のカソード防食による減速効果は、比較的長い貫通き裂の進展挙動における減速効果よりは大きい。また、一定の ΔK_{eff} においてき裂長さの短い領域ほどき裂進展の減速傾向は顕著となる特有のき裂長さ依存性を示すことが明らかとなった。き裂長さの短い範囲、すなわちき裂が比較的浅い場合、き裂端近傍の電位は試験片の設定電位と比較的よく似た値をもつと考えられるが、き裂深さの増加に伴い、き裂端の電位は試験片表面の設定電位よりはより貴の方向に向かう。したがって、き裂が短い場合はカソード防食による進展速度の減速効果が顕著に現れるが、き裂長さ(深さ)の増加に伴い、カソード防食効果は十分現れず、カソード防食によるき裂進展速度の減速効果が低減することになる。

終わりに本研究の実施に当たり、電気化学的測定にご助言いただいた本学工業化学科、蓮覚寺教官ならびに中村技官、また実験に協力いただいた当時富山大学生、富永佳隆、小林勝茂、松田一、山田昌人の諸氏に深謝する。

文 献

- (1) 石原・ほか3名, 機論, 56-522, A(1990), 224.
- (2) 石原・宮尾, 機論, 54-508, A (1988), 2075.
- (3) Roberts, R. and Rich, T., *Trans. ASME, Ser. E*, 34-3 (1967), 777.
- (4) Raju, I. S. and Newmann, J. C., *J. Eng. Fract. Mech.*, 11 (1979), 817.
- (5) 岡本・井上, 腐食と防食, (1977), 155, 大日本図書.
- (6) Brown, B. F., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 801 (1983), 508.
- (7) Hartt, W. H., Mao, W. and Rajpathak S. S., *Proc. Int. Symp. "Embrittlement by the Localized Crack Environment"*, AIME, (1983), 89.
- (8) Landles, K., Congleton, J. and Parkins, R. N., 文献(7)の59ページ.