

© 1987 ISIJ

切欠付 80 kgf/mm² 級高張力鋼の人工海水中電気防食下の疲れ強さ

論文

角 田 方 衛*・丸 山 典 夫*²Fatigue Strength of 80 kgf/mm² Grade High Yield Strength Steel with Notch in Synthetic Sea Water at Zinc Potential

Masae SUMITA and Norio MARUYAMA

Synopsis:

Effect of zinc potential in sea water on fatigue life of notched specimen was examined using 80 kgf/mm² grade high yield strength steel. Stress amplitude, stress ratio, and stress concentration factor of the notch were selected as factors affecting the above effect. Testing frequency was 0.5 Hz in sea water. The main results obtained are as follows:

- 1) The effect of zinc potential on fatigue life of notched specimen is less beneficial than that of smooth specimen.
- 2) The effect of zinc potential on fatigue life of notched specimen depends on stress amplitude, when $R = 0.1$.
 - (a) At a higher stress amplitude, fatigue life is shorter at zinc potential than at free potential.
 - (b) At a lower stress amplitude, fatigue life at zinc potential is comparable with that in air.
 - (c) At zinc potential, notched specimen fails at a stress amplitude lower than fatigue endurance limit in air.
- 3) Effect of zinc potential on fatigue life of notched specimen decreases with increase of stress ratio.
- 4) 1), 2), and 3) are explained by;
 - (a) decrease of crack initiation cycles at notch tip due to hydrogen evolution at zinc potential and
 - (b) increase of crack propagation cycles due to wedge effect at zinc potential in the early crack propagation stage.

1. は じ め に

海水は鉄鋼材料にとっては苛酷な環境である。したがって海洋環境下に置かれる構造物には電気防食や塗装が施されるのが普通である。海洋構造物には波浪、台風、潮流の変化などに対応する繰返し荷重が加わるので、電気防食下の疲れ特性を把握しておくことは重要である。

海水中電気防食下の平滑試験片の疲れ寿命は、通常、自然腐食下のそれに比べて高く、大気中の寿命に近い値を示す¹⁾。一方、実際の海洋構造物にとって重要である切欠付試験片の電気防食下の疲れ寿命に関する報告は少ない。W. H. HARTTら²⁾は AISI 1018 鋼を用いてカソード防食下の耐久限はカルシウム付着物によるくさび効果およびすべり阻止のために大気中のそれに比べて高くな

ると報告している。一方、Von. R. PÖPPERLING ら³⁾は API-X60 鋼を用いて塩水中電気防食下の疲れ寿命は水素脆化のため大気中のそれに比べて短くなると報告しているが、塩水を用いているのでくさび効果に対する検討はなされていない。さらにこの両報告は実海洋環境における繰返し速度より二桁高い繰返し速度を用いているけれども、時間に依存するくさび効果や水素脆化が問題となる場合にはこれらの繰返し速度は適切ではないと思われる。

上記の両報告²⁾³⁾で用いられている鋼の引張強さは約 50 kgf/mm² である。海水中電気防食下の切欠付試験片の疲れ寿命を低減させる原因として水素脆性が考えられるが、この水素の疲れ寿命への影響は鋼の強度水準の増大とともに著しくなることが予想される⁴⁾。

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 2 月 18 日受付 (Received Feb. 18, 1986)

* 金属材料技術研究所筑波支所 工博 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Sakura-mura Niihari-gun Ibaraki pref. 305)

*² 金属材料技術研究所筑波支所 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals)

本報告は以上のことを考慮して 80 kgf/mm² 級鋼を用いて、海水中電気防食下の切欠付試験片の疲れ寿命を海水中自然腐食下および大気中の疲れ寿命と比較検討した。その際、海水中電気防食下での疲れ寿命に影響を及ぼすと考えられる因子として応力振幅 $\Delta\sigma_a$ 、応力比 R 、それに切欠きの応力集中係数 K_t をとりあげた。

2. 実験方法

2.1 鋼 種

市販の HT 80 鋼を使用した。化学成分および力学的性質は次のとおりである。0.10 %C, 0.23 %Si, 0.76 %Mn, 0.27 %Cu, 0.02 %Ni, 0.79 %Cr, 0.45 %Mo, 0.051 %Al, 0.004 %S, 0.008 %P。引張強さ 86.2 kgf/mm², 降伏強さ 81.5 kgf/mm², 伸び 23%。

2.2 疲れ試験

1) 試験片形状

3 本の試験片を異なった応力振幅下で同時に試験するために 3 種類の最小断面直径を用いた。

(i) 平滑試験片: 砂時計型, $K_t=1.04$, 最小断面直径 8, 9 および 10mm。

(ii) 切欠付試験片: 環状切欠き, $K_t=3.5$ および 4.8。

2) 疲れ試験

(i) 試験機: 疲れ試験は ± 10 t 電気油圧サーボ型疲れ試験機を用いた。

(ii) 応力比: $R=0.10$ および 0.50 (引張-引張)。

(iii) 繰返し速度: 大気中では 20 Hz, 海水中では 0.5 Hz。

(iv) 波型: 正弦波。

(v) 環境: (a) 人工海水 (ASTM-D 1141-52)⁵⁾; 自然腐食下 (-685mV) および Zn 犠牲陽極 (-1070 mV), 水温 30 °C, 空気飽和, 流量 1 l/min (b) 大気。

3) 破面観察

錆を除去後走査型電子顕微鏡により観察した。

3. 結果および考察

3.1 平滑試験片に対する電気防食の効果

平滑試験片の応力振幅 $\Delta\sigma_a$ と破断寿命 N_f との関係を Fig. 1 に示す。平滑試験片の大気中の耐久限は 35 kgf/mm² である。電気防食下の N_f は大気中の N_f と同じ水準にあり、これまでに報告されている比較的強度の低い鋼種に関する電気防食の結果¹⁾ と一致する。

海水中自然腐食下では、き裂は別報⁹⁾ に示すように腐食ピットから発生し、その後活性経路腐食あるいは水素脆性を伴って繰返し荷重により伝播するので大気中に比

べて寿命は短く、 10^7 回の繰返し数でも耐久限は存在しない。 10^7 回時間強度 (約10か月) は大気中のその約 1/5 である。

3.2 $K_t=3.5$ の切欠付試験片に対する電気防食の効果

$K_t=3.5$ の切欠付試験片の $\Delta\sigma_a$ と N_f との関係を Fig. 2 に示す。同図中△印は自然腐食下で海水が試験槽の中に 1 min 周期で入出を繰り返す条件下の試験結果であり、そして▲印は海水中自然腐食下での試験結果である。両者間で寿命の相違はみられない。

大気中では耐久限が存在し、それは 13 kgf/mm² である。自然腐食下の N_f は大気中の N_f の 4 割程度であるが、平滑試験片の場合と同様に 10^7 回までには耐久限

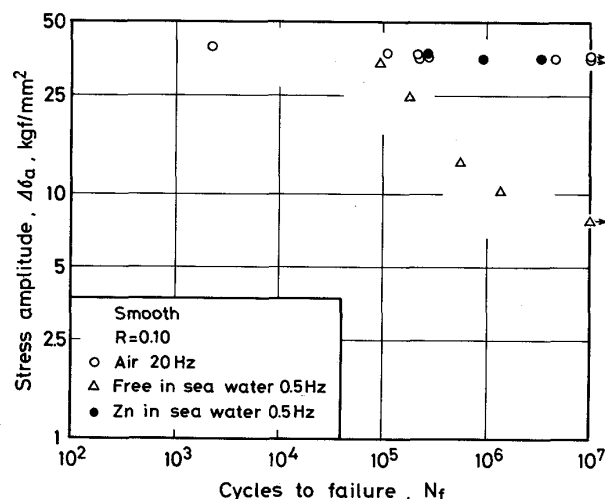


Fig. 1. Relationship between stress amplitude and cycles to failure for smooth specimens at $R=0.1$.

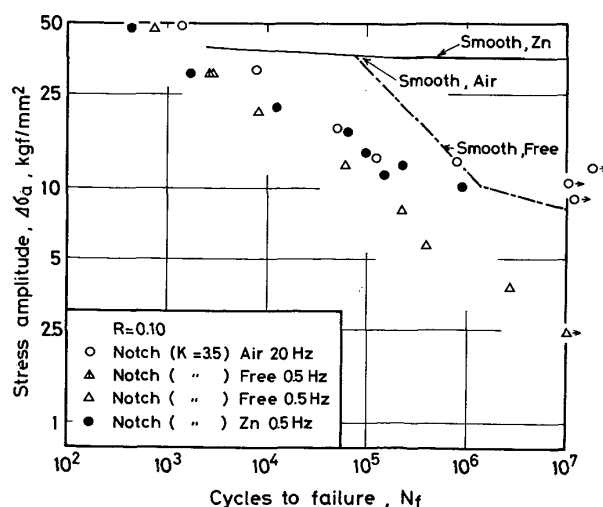


Fig. 2. Relationship between stress amplitude and cycles to failure for specimens with notch of $K_t=3.5$ at $R=0.1$ (△: Sea water or air for every 1 min)

は存在しない。海水中自然腐食下の 10^7 回時間強度は平滑試験片の場合と同様に大気中のその約 1/5 である。

電気防食下の N_f は $\Delta\sigma_a$ が 30~50 kgf/mm² の場合、自然腐食下の N_f の約 1/2 そして大気中の N_f の約 1/5 であり、電気防食の効果は全く認められない。むしろ、寿命は電気防食により大幅に短くなる。この原因として不十分な電気防食とカソード分極による水素の存在が考えられる。しかしながら、Photo. 1 a) および b) に示すように、き裂発生個所には海水中自然腐食下でみられるようなピットは観察されないし、また通常水素が関与する場合に見られる粒界割れあるいはへき開割れも存在しない。電気防食下の破面は Photo. 1 c) に示す大気中の破面形態とほぼ同じである。

$\Delta\sigma_a$ が 12~13 kgf/mm² になると電気防食下の N_f は大気中の N_f と同じ水準になり電気防食の効果が生じてくる。この場合、Photo. 2 に示すように、き裂発生点付近には粒界割れが観察されるようになる。

電気防食下では切欠付試験片は大気中の耐久限 (13 kgf/mm²) より低い 10 kgf/mm² の $\Delta\sigma_a$ でも破断する。この場合、粒界割れは Photo. 3 に示すように、き裂発生個所付近から約 2 mm 内側に至るまでの広い領域にわたって観察される。

電気防食下ではカソード分極による水素のために切欠感度が上昇するので、本鋼のような高張力鋼においてはき裂発生寿命は大気中に比べて短くなる。さらに電気防食下のき裂発生寿命は、高応力振幅の場合、自然腐食下の発生寿命よりも短くなることが Fig. 2 より予想され

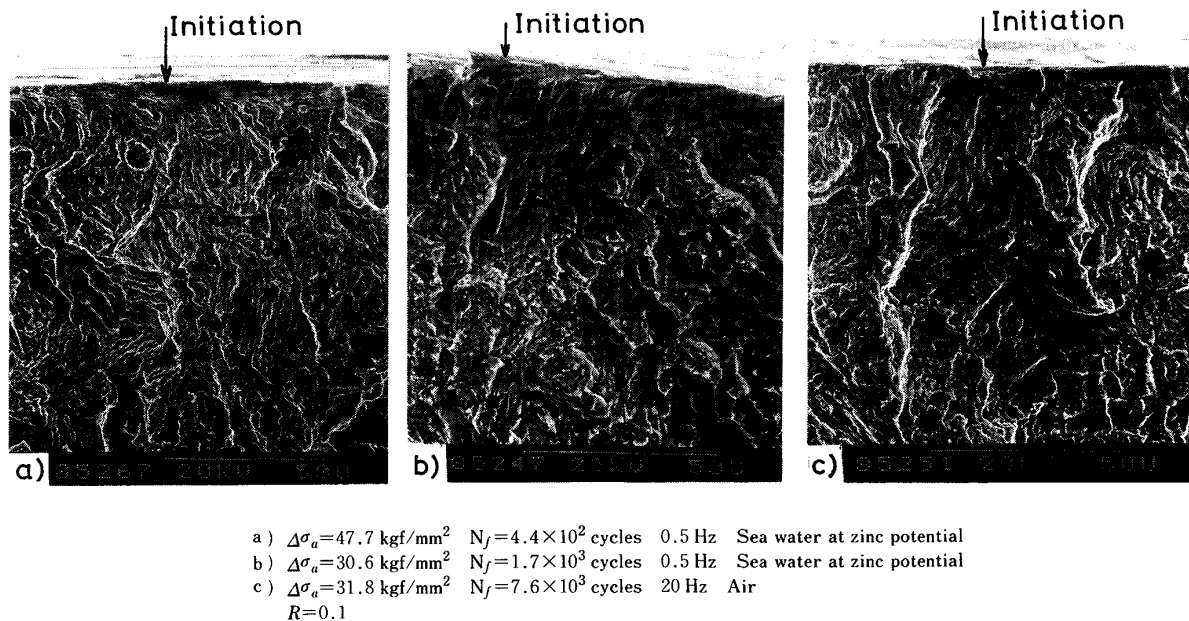


Photo. 1. Fractographs of fatigue crack initiation.

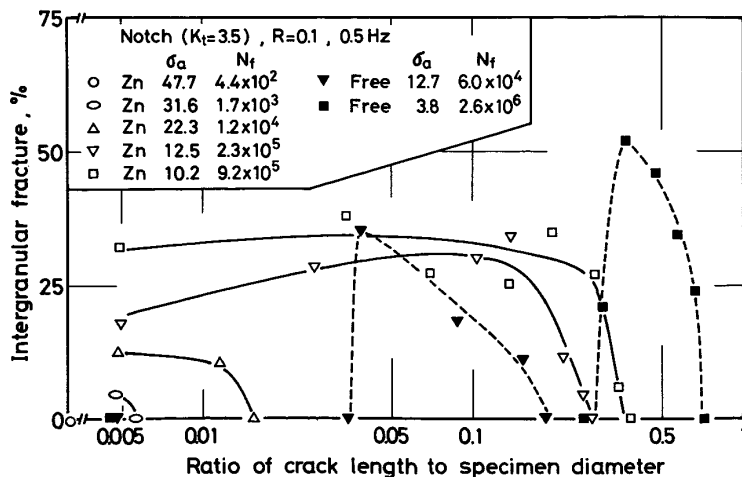


Fig. 3. Relationship between intergranular fracture and ratio of crack length to specimen diameter for specimens with notch of $K_t=3.5$ at $R=0.1$.

る。

一方、切欠きから発生したき裂は初期の伝播過程では切欠きの影響を免れることはできない。すなわち、切欠きから発生したき裂の応力拡大係数はき裂長さの関数であり⁶⁾、そして初期のき裂伝播速度は切欠きに起因する残留応力の影響を受ける。本疲れ試験の応力比は 0.10 であるので、切欠先端の塑性変形域中には圧縮残留応力が生じる⁷⁾。したがって切欠きから発生直後のき裂の有効応力拡大係数は極めて小さく、その伝播速度は切欠き

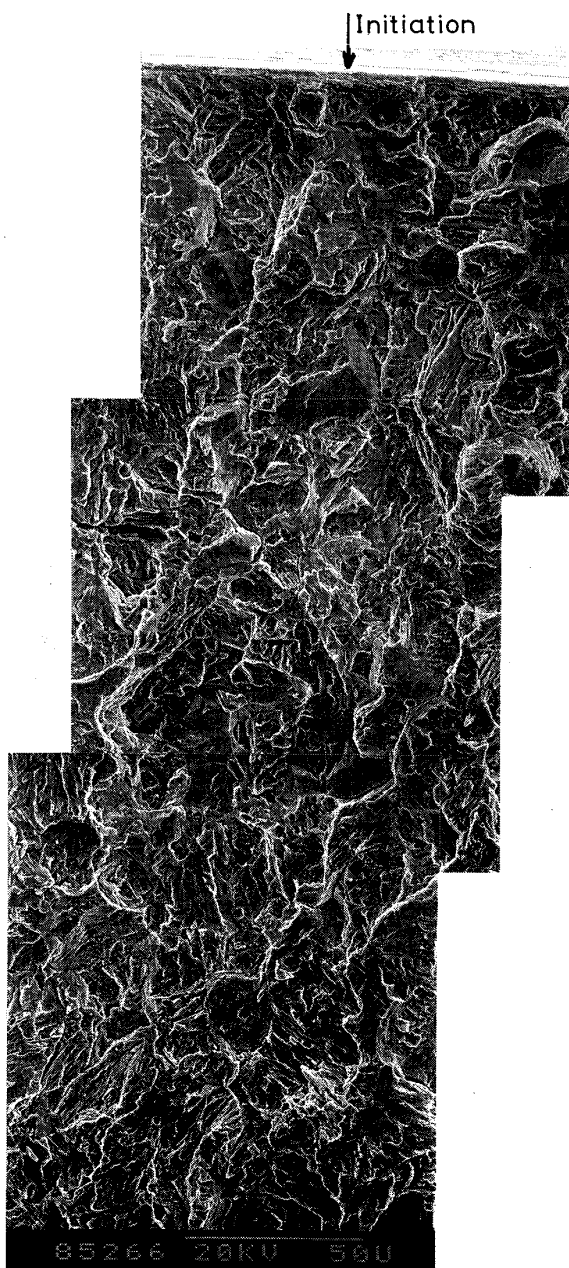
の影響を受けないき裂のそれに比べて著しく遅い。しかし、残留応力はき裂長さの増大とともに減少するので、有効応力拡大係数はき裂長さとともに増大する。これが海水中電気防食下になると、水素によるき裂伝播速度の加速と電解生成物のき裂面への付着に伴うき裂閉口あるいはすべり阻止²⁾によるき裂伝播速度の遅延という相反する因子がき裂伝播の初期に作用する。

水素がき裂伝播速度に影響を及ぼすのは応力拡大係数範囲と関係がある。その影響が最も大きいのは、き裂先端の塑性変形域大きさと前オーステナイト粒大きさが同じ大きさになる応力拡大係数範囲においてであり⁸⁾、その範囲から離れるにしたがって水素のき裂伝播速度への影響は減少する。

電解生成物は、き裂伝播速度が遅いほど破面に付着しやすい。したがって切欠きから発生したき裂長さが短いほど、そして応力振幅が低いほどき裂伝播速度への電解生成物によるき裂閉口の影響は大きい。

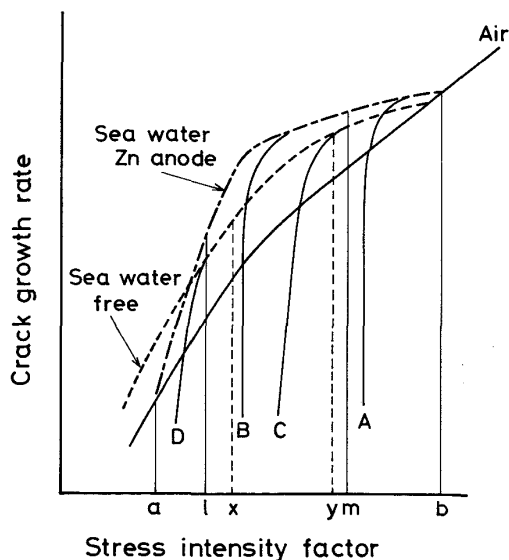
粒界破面率とき裂発生点からの相対き裂長さとの関係を Fig.3 に示す。海水中電気防食下で粒界割れの現れるき裂長さには限界があり、それは $\Delta\sigma_a$ に依存していることが分かる。

自然腐食下においても粒界割れの現れ方は電気防食下の場合と同様に $\Delta\sigma_a$ に依存する。しかし、自然腐食下



$R=0.1$ 0.5 Hz $\Delta\sigma_a=22.3 \text{ kgf/mm}^2$ $N_f=1.2 \times 10^4 \text{ cycles}$

Photo. 2. Fractograph of fatigue crack initiation at zinc potential.

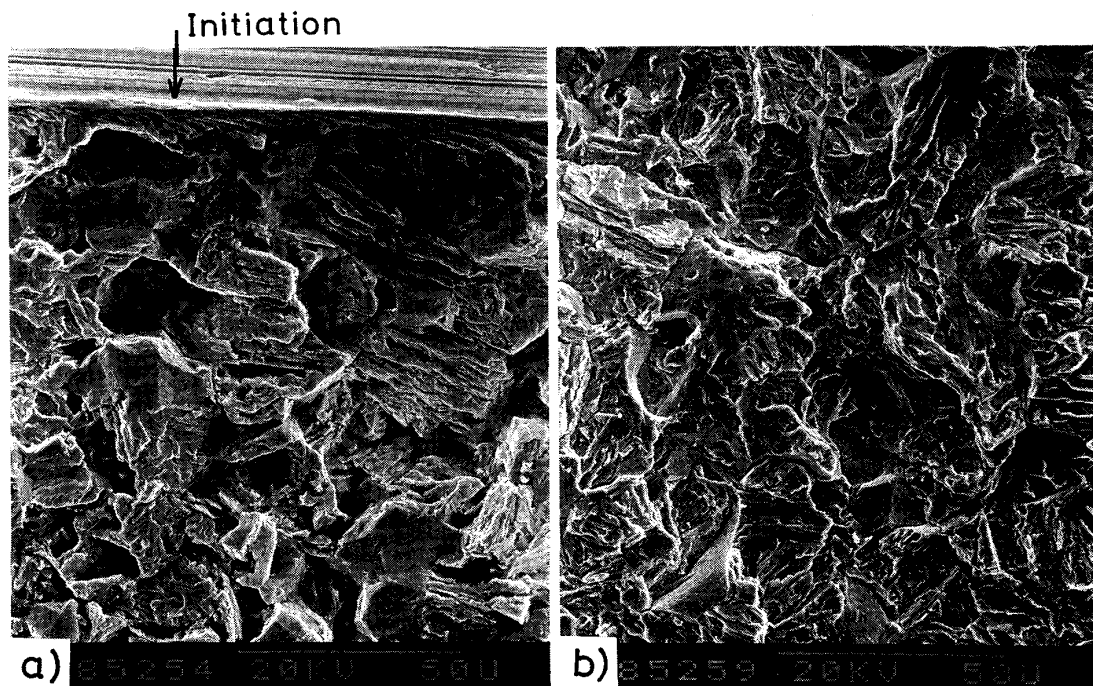


ab: Stress intensity factor range for which crack growth rate at zinc potential becomes higher than that in air

lm: Stress intensity factor range for which intergranular fracture exists at zinc potential

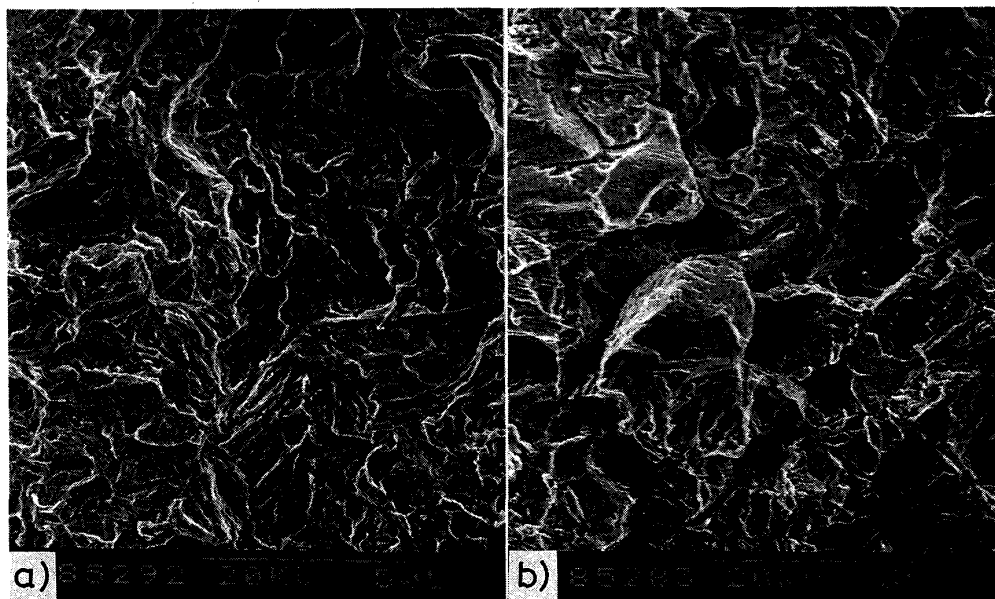
xy: Stress intensity factor range for which intergranular fracture exists at free potential

Fig. 4. Schematic explanation of growth of fatigue crack initiated at notch root in sea water.



a) Crack initiation b) 2.0 mm inside from crack initiation spot
 $R=0.1$ 0.5Hz $\Delta\sigma_a=10.2\text{ kgf/mm}^2$ $N_f=9.2\times 10^5\text{ cycles}$

Photo. 3. Fractographs of fatigue crack at zinc potential.



a) 1.59 mm inside from crack initiation spot b) 2.29 mm inside from crack initiation spot
 $R=0.1$ 0.5Hz $\Delta\sigma_a=3.8\text{ kgf/mm}^2$ $N_f=2.6\times 10^6\text{ cycles}$

Photo. 4. Fractographs of fatigue crack at free potential.

では電気防食下の場合と異なり、 $\Delta\sigma_a$ の高低に関係なく、き裂伝播初期では粒界割れは観察されない。例えば、 $\Delta\sigma_a$ が 12.7 kgf/mm^2 の場合粒界割れはき裂発生点より 0.2 mm 内側から存在するが、 $\Delta\sigma_a$ が 3.8 kgf/mm^2 の場合粒界割れは Photo.4 に示すようにき裂長さが約 2 mm

以上になるまで観察されない。自然腐食下の場合き裂は腐食ピットから発生した後、腐食疲れにより伝播し、き裂先端の塑性域大きさが前オーステナイト粒大きさと同じオーダーになると水素脆性により粒界に沿った伝播をするようになる。ただし自然腐食下の場合電気防食下の

場合に比べて粒界割れの現れる領域は狭く (Fig. 3 参照), き裂伝播に対する水素の影響は比較的少ない。なお, 大気中の破面には粒界割れはほとんど観察されなかった。

電気防食下および自然腐食下において切欠きから発生したき裂の伝播挙動は破断寿命, 破面観察および上記考察より模式的に Fig. 4 により表すことができる。同図中区間 $\overline{ab}$ は電気防食下のき裂伝播速度が水素のために大気中のそれに比べて加速される領域であり, 区間 $\overline{lm}$ は電気防食下で粒界割れが現れる領域である。そして区間 $\overline{xy}$ は自然腐食下で粒界割れが現れる領域である。電気防食下で粒界割れが現れない高 $\Delta\sigma_a$ (Photo. 1 参照) の場合のき裂伝播挙動は Fig. 4 の曲線 A に相当し, そして粒界割れが現れる低 $\Delta\sigma_a$ (Photo. 2 参照) の場合は曲線 B に相当する。自然腐食下で $\Delta\sigma_a$ が 12.7 kgf/mm^2 の場合は曲線 C に, そして $\Delta\sigma_a$ が 3.8 kgf/mm^2 の場合は曲線 D に相当する (Fig. 3 参照)。

3.3 応力比あるいは応力集中係数の電気防食下の疲れ寿命への影響

3.2 において, $K_t=3.5$ の切欠付試験片の海水中電気防食下の疲れ寿命の大気中あるいは海水中自然腐食下のそれとの相違は水素による切欠きからのき裂発生寿命の短縮およびき裂伝播初期における水素による加速と電解生成物のき裂面への附着によるくさび効果あるいはすべり阻止によるき裂伝播速度の遅延により合理的に説明できた。これを再確認するために応力比 0.5 の試験あるいは $K_t=4.8$ の試験片による試験を行った。

応力比 R が 0.5 の場合の $\Delta\sigma_a$ と N_f との関係を Fig. 5 に示す。 $R=0.5$ の場合 $R=0.1$ の場合に比べて

- 1) 大気中では耐久限は約 3 kgf/mm^2 低くなるが, S-N 曲線の傾斜部の破断寿命はあまり変わらない。
- 2) 海水中自然腐食下では $\Delta\sigma_a=10 \text{ kgf/mm}^2$ の破断寿命はほとんど変わらない。しかし,
- 3) 海水中電気防食下では $\Delta\sigma_a=10 \text{ kgf/mm}^2$ の破断寿命は $1/2 \sim 1/3$ となる。

このように電気防食下では大気中あるいは自然腐食下とは異なり, R が 0.1 から 0.5 になることにより疲れ破断寿命は著しく短くなる。これは R が高くなることにより電解生成物によるき裂閉口が少なくなる結果, き裂伝播初期における伝播速度の遅れが $R=0.1$ の場合に比べて少なくなるためである。この場合カルシウム付着物によるすべり阻止は考えられない。なぜならば, R が 0.1 から 0.5 になることにより初期き裂伝播速度に影響を及ぼす切欠先端の塑性変形域大きさは約 4 倍になるので⁷⁾, 切欠きから発生直後のき裂伝播速度は $R=$

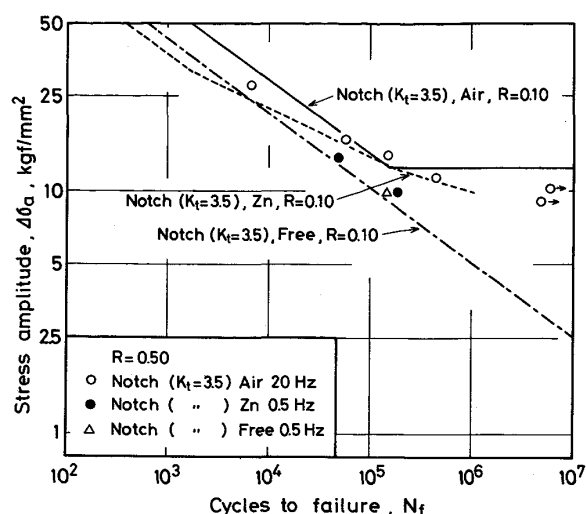


Fig. 5. Relationship between stress amplitude and cycles to failure for specimens with notch of $K_t=3.5$ at $R=0.5$.

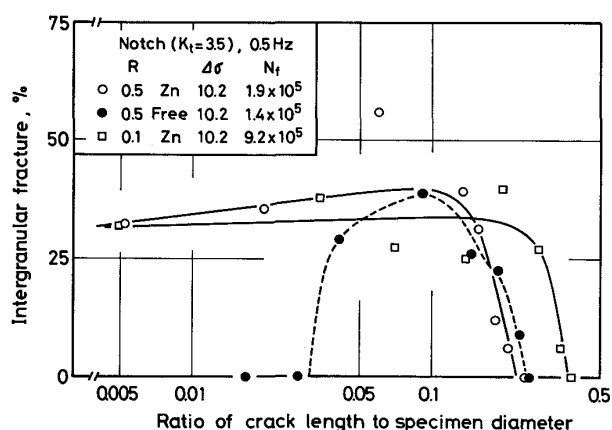


Fig. 6. Relationship between intergranular fracture and ratio of crack length to specimen diameter for specimens with notch of $K_t=3.5$ at $R=0.5$.

0.5 の場合 $R=0.1$ の場合に比べて相対的に長いき裂区間にわたって遅くなっているはずであり, それゆえにカルシウム付着物の量も R が 0.1 より 0.5 の場合に多い。したがって, カルシウム付着によるすべり阻止が疲れ寿命に影響を及ぼすならば, R が 0.5 の疲れ寿命が R が 0.1 のそれより短くなることは考えられない。これより $R=0.1$ の場合もカルシウム付着によるすべり阻止効果は少ないと考えられる。

$R=0.1$ の場合 Fig. 2 に示したように $\Delta\sigma_a < 20 \text{ kgf/mm}^2$ になるときき裂伝播に対する電気防食の効果が認められた。これに対して $R=0.5$ の場合 $\Delta\sigma_a=10 \text{ kgf/mm}^2$ でも電気防食の効果は認められない。これよ

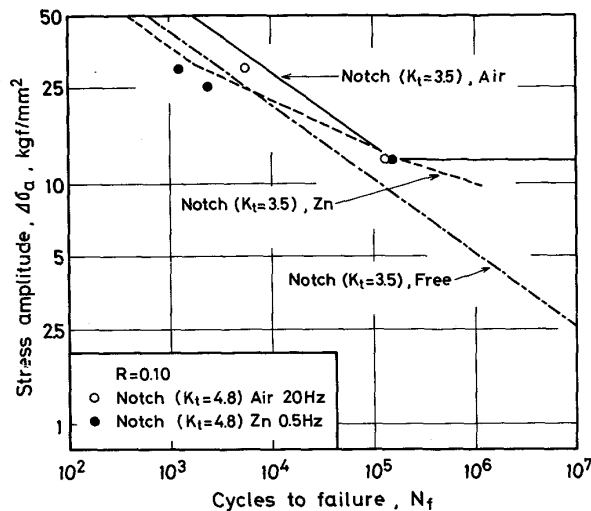


Fig. 7. Relationship between stress amplitude and cycles to failure for specimens with notch of $K_t=4.8$.

り R が高くなるとともに電気防食のき裂伝播に対する効果は減少すると言える。

$R=0.5$ の場合の粒界破面率とき裂発生点からの相対き裂長さとの関係を Fig. 6 に示す。 $R=0.5$ の電気防食下の粒界破面率の出現傾向は $R=0.1$ のそれと類似している。したがって、き裂伝播への水素の影響は R が 0.1 と 0.5 の間で大きな差はないと思われる。

$K_t=4.8$ の試験片に対する $\Delta\sigma_a$ と N_f との関係を Fig. 7 に示す。同図より K_t が 3.5 から 4.8 になると海水中電気防食下および大気中において高 $\Delta\sigma_a$ では疲れ寿命は短くなるのに対して、低 $\Delta\sigma_a$ では寿命はほとんど K_t の影響を受けないことが分かる。これは、高 $\Delta\sigma_a$ では電気防食下および大気中ともに K_t が大きくなることによりき裂発生繰返し数が小さくなり、それが全寿命に影響したためと考えられる。一方、低 $\Delta\sigma_a$ の場合も高 $\Delta\sigma_a$ の場合と同様にき裂は K_t が大きくなることにより早期に発生していると思われる。そしてき裂発生直後の応力拡大係数は K_t に比例する⁶⁾ ので初期き裂伝播速度も K_t が大きいほど速くなっていると思われる。しかし K_t の値が 3.5 あるいは 4.8 ぐらいになると全寿命に対するき裂発生および初期のき裂伝播に要する繰返し数の占める割合は小さく、その結果、低 $\Delta\sigma_a$ 域では両

K_t 間における破断寿命の差はほとんどなかったものと考えられる。

4. 結 論

80 kgf/mm² 級高張力鋼を用いて切欠付試験片の疲れ寿命に対する海水中電気防食の効果を応力振幅、応力比および切欠きの応力集中係数を変えて検討した。その結果は次のとおりである。

1) 切欠付試験片の海水中における疲れ寿命に対する電気防食の効果は平滑試験片に対する電気防食の効果に比べて著しく劣る。

2) 海水中における切欠付試験片の疲れ寿命に対する電気防食の効果は応力振幅に依存する。応力比 0.1 の場合、(i) 高応力振幅域では電気防食下の疲れ寿命は自然腐食下の寿命よりも短くなる。(ii) 低応力振幅域では電気防食下の疲れ寿命は大気中の寿命と同じ水準になる。しかし、(iii) 電気防食下では大気中の耐久限より低い応力振幅下でも破断する。

3) 海水中における切欠付試験片の疲れ寿命に対する電気防食の効果は応力比が高くなるとともに低下する。

4) 1), 2) および 3) は (i) 水素による切欠きからのき裂発生寿命の減少とその度合の応力振幅依存性、および (ii) き裂伝播初期段階における電解生成物のくさび効果によるき裂伝播寿命の増大により説明できる。

文 献

- 1) 例えば C. E. JASKE, D. BROEK, J. E. SLATER and W. E. ANDERSON: ASTM STP 642 (1978), p. 19
- 2) W. H. HARTT, P. E. MARTIN and W. C. HOPPER: Proc. Annu. Offshore Technol. Conf. 11th, 2 (1979), p. 1331
- 3) Von. R. PÖPPERLING, W. SCHWENK, and G. VOGT: Werkstoffe und Korrosion, 29 (1978), p. 445
- 4) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1479
- 5) ASTM D1141-52 (1971), p. 180
- 6) T. R. WILSHOW, C. A. RAU and A. S. TETELMAN: Eng. Fracture Mech., 1 (1968), p. 191
- 7) 角田方衛, 内山 郁: 材料, 26 (1977), p. 518
- 8) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 428
- 9) 丸山典夫, 角田方衛, 堀部 進: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 356