

© 1987 ISIJ

各種高張力鋼とステンレス鋼の 3%NaCl 水溶液中, 低 ΔK 領域における疲労き裂伝ば特性

論文

松岡 三郎*・下平 益夫*²・升田 博之*³
竹内 悦男*²・西島 敏*⁴

Low-rate Fatigue Crack Propagation Properties in 3% Sodium Chloride Aqueous Solution for Various High-strength and Stainless Steels

Saburo MATSUOKA, Masuo SHIMODAIRA, Hiroyuki MASUDA,
Etsuo TAKEUCHI and Satoshi NISHIJIMA

Synopsis:

Low-rate fatigue crack propagation properties in sodium chloride solution were investigated for carbon steel S45C, high-strength steels SM 50B and HT 80 and stainless steels SUS 403 and SUS 304. Tests were conducted under the condition of decreasing ΔK where maximum load was kept constant and minimum load was increased with the increase of crack length. This constant P_{max} test was confirmed to be a method free from crack closure, although the load ratio increased from 0.5 to 0.97. Low-rate fatigue crack propagation properties, obtained under closure-free condition, are summarized as follows.

1) In air, fatigue crack propagation properties including the threshold, $\Delta K_{th, air}$, were independent of the kind of materials. The $\Delta K_{th, air}$ values for the five steels were around $2.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

2) In 3% sodium chloride solution under freely corroding condition at a frequency of 30 Hz, fatigue crack propagation rates were also independent of the kind of materials and coincided with those in air when $\Delta K > \Delta K_{th, air}$. When $\Delta K < \Delta K_{th, air}$, the crack propagated at such low region of $\Delta K < 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ that the threshold, $\Delta K_{th, corr}$, did not exist in practical sense for carbon and high-strength steels. $\Delta K_{th, corr}$, which was 70% of $\Delta K_{th, air}$, existed for stainless steels under the experimental conditions.

3) Fatigue crack propagation properties including the threshold values for all the steels coupled with zinc anode in sodium chloride solution were coincident with those in air.

4) Decreasing in frequency from 30 to 0.03 Hz resulted in a sixfold acceleration of crack propagation rate regardless of materials and ΔK levels under freely corroding condition.

Key words: fatigue crack propagation; high strength steels; stainless steels; corrosion; 3% NaCl solution; threshold; crack closure.

1. 結 言

海洋のような腐食環境下にある構造物の寿命や余寿命を評価する際に構造材料の腐食疲労き裂伝ば特性は重要である。しかし、試験の困難さや影響因子の多さのため、腐食疲労機構の解明やデータの集積は十分に行われているとは言えない。前報¹⁾において工学的に重要な低応力拡大係数領域の腐食疲労き裂伝ば特性を求める試験法として、Fig. 1 のように最大荷重 P_{max} を一定に保ちつつ、き裂長さ a の増加と共に最小荷重 P_{min} を上昇させるこ

とにより応力拡大係数幅 ΔK を減少させる、 P_{max} 一定・ ΔK 減少法を提案した。この方法は次のような利点を有する。

1) 一般に腐食環境中ではき裂内の腐食生成物がくさびとして働くので、き裂閉口レベルを押し上げる²⁾³⁾。しかし、腐食生成物は粘弾性を示すため、き裂閉口に対する寄与の評価がむずかしく、結果としてき裂伝ばに有効な応力拡大係数幅 ΔK_{eff} の決定が困難である¹⁾³⁾。この点、Fig. 1 の方法ではき裂長さの増加につれて荷重比 $R = P_{min}/P_{max}$ が上昇し、き裂閉口を避けることがで

昭和 60 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 5 月 2 日受付 (Received May 2, 1986)

* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

*² 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

*³ 金属材料技術研究所 Ph. D. (National Research Institute for Metals)

*⁴ 金属材料技術研究所 理博 (National Research Institute for Metals)

きる¹⁾。その結果、作用させる ΔK がそのまま ΔK_{eff} となる。

2) 腐食疲労き裂伝ばは力学的因子と電気化学的因子の両方の影響を受ける。このような現象の機構解明の第一歩としては、一方の影響を小さく抑えたもとで他方の影響をまず把握することが重要である。 P_{max} 一定・ ΔK 減少法においては力学的因子の中で最も影響の大きいき裂閉口を取り除けるので、電気化学的因子すなわち腐食の影響を際立たせて調べることができる。

3) 機械や構造物の寿命・余寿命予測を行う立場からは、 P_{max} 一定・ ΔK 減少法で求めたき裂閉口を伴わない疲労き裂伝ば特性を用いることは最安全側である。

前報¹⁾では、炭素鋼 S45C と高張力鋼 HT80 の調質材を用い、3%NaCl 水溶液中の自然腐食状態、荷重繰返し速度 $f=30\text{Hz}$ のもとで P_{max} 一定・ ΔK 減少試験を行うと、き裂閉口が起らないことを明らかにした。本報では高張力鋼 SM50B、ステンレス鋼 SUS 403 と SUS 304 を追加し、3%NaCl 水溶液中の自然腐食とカソード防食下、 $f=0.3$ と 30 Hz のように材料、環境、荷重の諸条件を広げて試験を行い、 P_{max} 一定・ ΔK 減少試験においてはき裂閉口が起らないことを確認するとともに、この試験法は腐食疲労き裂伝ば特性を電氣化

学的立場より研究するのに優れた方法になる可能性についても検討する。

2. 供試材と実験方法

2.1 供試材

本実験に用いた材料の化学成分を Table 1、熱処理条件、微視組織及び機械的性質を Table 2 に示す。SM50B 鋼はフェライト/パーライト組織、S45C 鋼と HT80 鋼は焼もどしマルテンサイト組織である。ステンレス鋼としてはマルテンサイト系の SUS 403 鋼、オーステナイト系の SUS 304 鋼を採用した。

2.2 実験方法

疲労き裂伝ば試験は Fig. 2 に示す幅 $W=25\text{mm}$ 、厚さ $B=5\text{mm}$ の CT 試験片を用い、3%NaCl 水溶液中、正弦波の繰返し荷重下で次の 3 種類の試験を実施した。

1) Fig. 1 に示す P_{max} 一定・ ΔK 減少試験をサーボ油圧式試験機を用いて行つた。 ΔK 減少率は $d(\Delta K)/da$ で定義し、その値を $-2.3\text{GPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ とした。荷重繰返し速度 f は 0.3 と 30 Hz を用いた。試験を実施した全 ΔK 領域でき裂閉口が起らないようにするため、試験開始条件を $R \geq 0.5$ 、 $\Delta K \geq 7\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ とした¹⁾。試験は主に 3%NaCl 水溶液中の自然腐食条件下で行つ

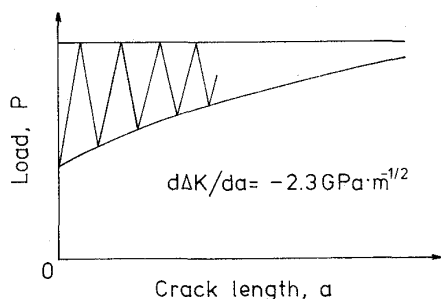


Fig. 1. Schematic illustration of loading sequences for P_{max} constant ΔK decreasing test.

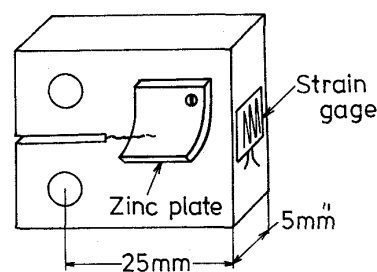


Fig. 2. CT specimen used with zinc anode when necessary.

Table 1. Chemical composition in wt%.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SM50B	0.15	0.37	1.36	0.020	0.005	0.01	0.03	0.02	0.001
HT80	0.12	0.26	0.96	0.010	0.004	0.19	1.05	0.45	0.310
S45C	0.43	0.22	0.83	0.017	0.016	0.01	0.01	0.12	—
SUS403	0.14	0.31	0.66	0.025	0.008	0.03	0.16	11.79	0.150
SUS304	0.06	0.53	1.11	0.039	0.010	—	9.04	18.29	—

Table 2. Mechanical properties.

	Heat-treatment	Microstructure	σ_y (MPa)	σ_B (MPa)	δ (%)
SM50B	Hot rolled	Ferrite/Pearlite	372	530	25
HT80	570°C T	Tempered martensite	784	843	12
S45C	845°C Q and 600°C T	Tempered martensite	623	774	22
SUS403	975°C Q and 600°C T	Tempered martensite	629	743	22
SUS304	1050°C ST	Austenite	336	633	60

T : Tempered, Q : Quenched, ST : Solution treated.

たが、一部は亜鉛板を犠牲陽極とするカソード防食下で行った。亜鉛板は厚さ 1mm、幅と長さ 10 mm の正方形で、Fig. 2 に示すように一つの隅を試験片にあげたドリル穴に軟鋼製の直径 1mm のボルトで固定したのち、亜鉛板を曲げて試験片表面との間に約 1mm のすきまを設けるようにした。亜鉛板は角田ら⁴⁾が用いたものと同じで、3% NaCl 水溶液中で空気吹込み状態、液温 25°C のときの亜鉛単独の自然電位は飽和銀-塩化銀電極に対して -990 mV であった。

2) $R=0.1$ と荷重比を一定に保った ΔK 減少試験をサーボ油圧式試験機を用い、 $f=30$ Hz、自然腐食条件下で行った。 $d(\Delta K)/da$ 値は P_{max} 一定試験と同じにした。この試験は R 一定・ ΔK 減少試験と呼ぶ。

3) $R=0.1$ と 0.8 の定荷重振幅試験を機械共振式試験機を用い、 $f=33$ Hz、自然腐食条件下で行った。この試験では ΔK は a とともに増加する。

き裂長さ a の測定は Fig. 2 のように試験片の背面に貼付したひずみゲージの出力を利用した弾性コンプライアンス法によった。その際に測定器は上記 1) と 2) の ΔK 減少試験ではパーソナルコンピューターシステム、上記 3) の定荷重振幅試験では X-Y オシロスコープを用いた¹⁾。また、コンピューターシステムは試験の制御にも用い、 ΔK 減少を自動的に行った。

3% NaCl 水溶液は 20 l をタンクに溜め、そこで空気を吹き込み、液温を 25°C に保った。液は循環させ、2 週間に 1 回交換した。自然腐食条件の試験の場合、試験片表面の大部分はポリエステルテープでおい、切欠先端の 2mm 角の試験片側面と切欠底のみで試験片と腐食液が接するようにした。ただし、SM50B と SUS304 鋼においてはテープを貼らない試験片を用いる P_{max} 一定・ ΔK 減少試験も行い、テープの有無の影響について調べた。また、カソード防食下の試験の場合にはテープは使用しなかった。腐食槽は高さ 4mm、幅と長さ 16 mm の内側寸法を有する一組のサンドイッチ型⁵⁾ のものを用い、それへの液供給量は 30ml/min とした。大気中での予き裂導入は行わず、最初から NaCl 水溶液中で切欠底にき裂を発生させた。切欠半径は 0.25 mm である。

3. 実験結果と考察

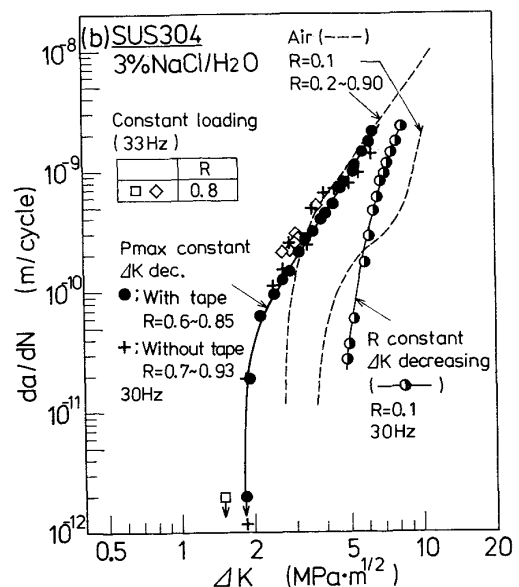
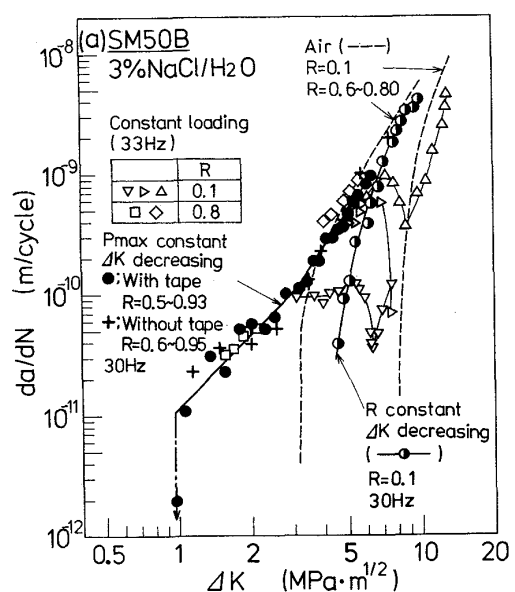
3.1 P_{max} 一定・ ΔK 減少試験

P_{max} 一定・ ΔK 減少試験においては低 ΔK 領域の腐食疲労き裂伝ば特性がき裂開口を避けて求めることができ、また得られた結果は $R=0.1$ のような低荷重比側のき裂開口挙動を解析するときの参照データになることについて述べる。

3.1.1 疲労き裂伝ば特性

Fig. 3 に 3% NaCl 水溶液中の自然腐食条件下で得られたき裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を高張力鋼 SM50B とステンレス鋼 SUS304 について示す。荷重繰返し速度は 30 または 33 Hz と高速である。これらの図には次の試験結果が含まれている。

- 1) P_{max} 一定・ ΔK 減少試験でテープ付き試験片による結果 (●) とテープ無し試験片による結果 (+)。
- 2) R 一定・ ΔK 減少試験でテープ付き試験片による $R=0.1$ の結果 (○)。



(a) SM50B steel (b) SUS304 steel

Fig. 3. Crack growth rate against stress intensity factor range in 3%NaCl solution under freely corroding condition at frequency of 30 Hz.

3) 定荷重振幅試験でテープ付き試験片による $R=0.1$ の結果 (∇ , $\triangleright$, $\triangle$) と $R=0.8$ の結果 ($\diamond$, $\square$). この試験で記号が異なるのは別々の試験片を用い, 試験開始時の ΔK レベルを変えて試験したことによる.

4) 比較のために示した大気中の P_{max} 一定・ ΔK 減少試験と R 一定・ ΔK 減少試験で得た結果 (2 本の破線).

これらの試験結果は材料並びに試験片表面がテープでおおわれている場合とおおわれていない場合を組み合わせで次のようにまとめられる.

(1) SM50B 鋼でテープ付き試験片の場合

Fig. 3 (a) 中で上記の条件を満たす結果は 3 種類の試験法で求められている. NaCl 水溶液中で行った P_{max} 一定・ ΔK 減少試験 (●) では荷重比 R は 0.53 から 0.93 まで上昇したが, そのき裂伝ば挙動は同じ溶液中で得られた $R=0.8$ の定荷重試験結果 ($\diamond$, $\square$) と一致した. これらの結果を同じような高荷重比を持つ大気中の結果 (破線) と比較すると, NaCl 水溶液中ではき裂は著しく低い ΔK 領域においても伝ばでき, き裂伝ばの下限界値 ΔK_{th} は消滅していると言える.

一方, $R=0.1$ の低荷重比側における NaCl 水溶液中のき裂伝ば挙動については R 一定・ ΔK 減少試験結果 (○) と定荷重振幅試験結果 (∇ , $\triangleright$, $\triangle$) とは一致しなかった. その上に定荷重試験結果は試験開始時の ΔK に依存し, ばらついた. ただし, 低荷重比側でも NaCl 水溶液中においては大気中の下限界値 $\Delta K_{th, air}$ よりかなり低い ΔK 領域でもき裂は伝ばした.

上述した SM50B 鋼と同様な腐食疲労き裂伝ば挙動は HT80 と S45C 鋼でも得られており, その結果は前報¹⁾で報告した. なお, フェライト/パーライト組織の SM50B 鋼は焼もどしマルテンサイト組織の HT80 と S45C 鋼に比べて降伏応力が 1/2 以下である.

(2) SUS304 鋼でテープ付き試験片の場合

SUS304 鋼の場合には $6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以下の ΔK 領域においてはき裂が切欠底に発生しなかったため, $R=0.1$ の定荷重振幅試験は実施しなかった. $R=0.8$ の定荷重振幅試験は $R=0.1$ の条件下で ΔK を大きくしてき裂を発生させ, その後に最大荷重を保持して $R=0.8$ の状態を作り, 試験を行った.

SUS304 鋼においてテープ付き試験片を用い, NaCl 水溶液中の自然腐食条件下で P_{max} 一定・ ΔK 減少試験を行うと, Fig. 3 (b) に示すように下限界値 $\Delta K_{th, corr}$ ($\approx 1.8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) が存在し, SM50B 鋼とは異なるき裂伝ば挙動となった. そこで, SUS304 鋼ではこの $\Delta K_{th, corr}$ 以下において NaCl 水溶液中で実施した $R=$

0.8 の定荷重振幅試験ではき裂は進展しなかったが, 高 ΔK 側ではこの試験結果は P_{max} 一定試験結果と一致した. ただし, $\Delta K_{th, corr}$ は $\Delta K_{th, air}$ より小さくなった. 同様に $R=0.1$ の場合にも NaCl 水溶液中で下限界値が存在したが, 高荷重比側の値に比べると大きくなった. このようなオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 で得られた腐食疲労き裂伝ば挙動はマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 においても得られた.

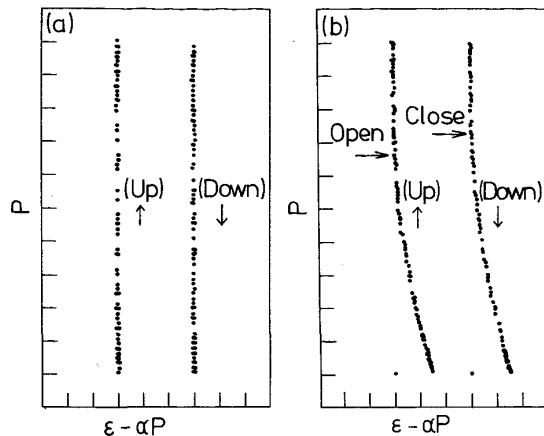
(3) テープ無し試験片の場合

上述の試験片表面をテープでおおった場合には, 試験片と腐食液が接する面積が小さくなり, またき裂内への液の供給が試験片側面からできず, 切欠底からのみに限られる. そこで, テープ付き試験片とテープ無し試験片の間では腐食疲労き裂伝ば挙動が異なる可能性がある. Fig. 3 中の + 記号はテープ無し試験片を用い, NaCl 水溶液中の自然腐食条件下, $f=30\text{Hz}$ のもとで P_{max} 一定・ ΔK 減少試験により求めた da/dN - ΔK 特性である. SM50B と SUS304 鋼ともにこれらのテープ無し試験片による結果は同じ環境, 試験条件下でのテープ付き試験片による結果 (●) と一致した. すなわち, P_{max} 一定・ ΔK 減少試験においては試験片表面でのテープの有無は腐食疲労き裂伝ば特性に対して影響を及ぼさないことになる. この原因の一つとしては, 静的荷重負荷に比べて繰返し荷重負荷では腐食液が負荷時にき裂内に吸い込まれ, 除荷時にき裂外に押し出される, いわゆるポンプ作用があるため, 試験片表面でのテープの有無に関係なく, き裂内の腐食液は比較的良好に交換されることが考えられる. なお, テープ無し試験片による自然腐食下の試験は Fig. 3 に示した 2 例しか行っていないので, 以後の説明では断らないかぎり自然腐食下の試験結果はテープ付き試験片により得たものとする.

3.1.2 き裂閉口挙動

Fig. 4 に SM50B 鋼において NaCl 水溶液中で自然腐食条件下, $f=30\text{Hz}$ のもとで得られた 2 例のき裂閉口曲線を示す. 縦, 横軸は任意目盛りで, P は荷重, ϵ は Fig. 2 のひずみゲージ位置で測定した試験片の背面ひずみ, α は P と ϵ 関係の高荷重側の直線部分で決定される弾性コンプライアンスである. また, 閉口曲線は荷重の上昇側と下降側に分けて示してある.

Fig. 4 (a) は P_{max} 一定・ ΔK 減少試験において最小の ΔK ($\approx 1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) のときに得られた閉口曲線であり, それは垂直の直線となった. このことは P_{max} 一定試験では非常に低い ΔK 域までき裂閉口が起こらず, したがって ΔK が直接き裂伝ばに有効な ΔK_{eff} になることを意味する. 同様に $R=0.8$ の定荷重試験でもき裂



(a) P_{max} constant ΔK decreasing, $\Delta K=0.99 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $R=0.93$.

(b) R constant ΔK decreasing, $\Delta K=5.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $R=0.1$.

Fig. 4. Crack closure curves for SM50B steel in 3%NaCl solution under free corrosion condition at frequency of 30 Hz.

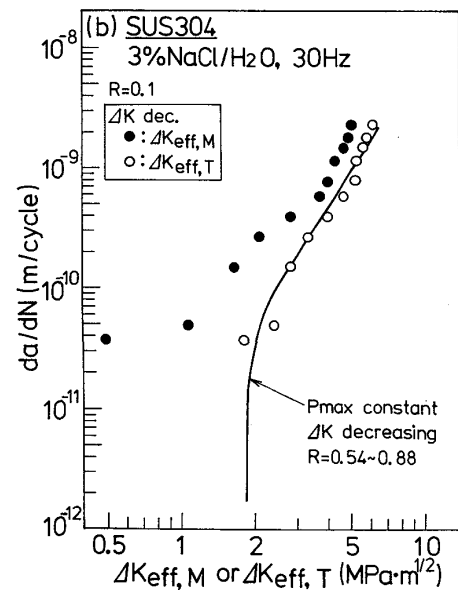
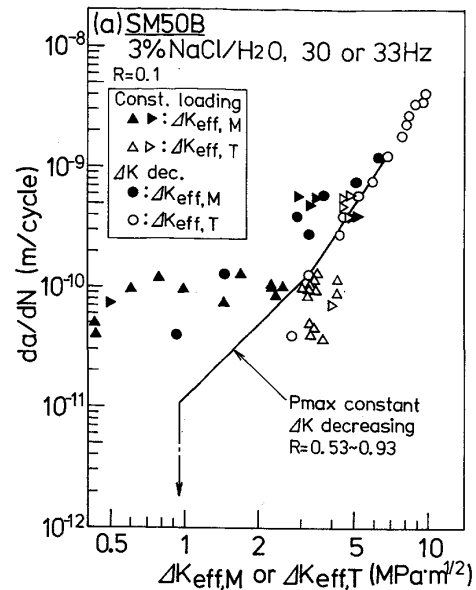
閉口は起こらなかった。両試験で得た高荷重比側の da/dN - ΔK 特性が Fig. 3 に示したように一致したのはこの挙動を反映したものである。

Fig. 4 (b) は $R=0.1$ の R 一定・ ΔK 減少試験において $\Delta K=5.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ のときに得られた閉口曲線である。荷重上昇、下降側の曲線はともに横矢印以下の荷重になると直線からはずれ、き裂閉口が起こっていることがわかる。大気中に比べて食塩水中においてはき裂内の腐食生成物のためにき裂閉口が起こるが、さらに腐食生成物が粘弾性をもつことから、次のような2種類の特有な閉口挙動が存在する。一つは Fig. 4 (b) に示すように横向き矢印の位置で決定される荷重上昇側のき裂開口点と下降側の閉口点が異なり、後者のほうが高くなる挙動である²⁾⁵⁾。他方は上述のようにして実測された開口点または閉口点が共に真のそれらよりも大きくなる挙動である。この点を考慮して、駒井ら³⁾ は真の有効応力拡大係数幅 $\Delta K_{eff, T}$ を次式で表した。

$$\Delta K_{eff, T} = \Delta K_{eff, M} + \gamma (\Delta K - \Delta K_{eff, M}) \quad \cdots (1)$$

ここで、 $\Delta K_{eff, M}$ は Fig. 4 (b) で荷重下降側の閉口点以上の荷重範囲に対応して求まる有効応力拡大係数幅である。 $\gamma (\leq 1)$ は腐食生成物などが実際に閉口レベルを上昇させる寄与率である。

Fig. 3 に示した NaCl 水溶液中の da/dN - ΔK 特性のうちで $R=0.1$ の ΔK 減少試験と定荷重試験で得た結果を $\Delta K_{eff, M}$ または $\Delta K_{eff, T}$ で再整理して Fig. 5 に示す。 $\Delta K_{eff, T}$ の決定に当たっては式 (1) において SM50B 鋼 (Fig. 5 (a)) の場合は $\gamma=0.5$, SUS304



(a) SM50B steel (b) SUS304 steel

Fig. 5. Crack growth rate against effective stress intensity factor range in 3%NaCl solution under freely corroding condition at a frequency of 30 Hz.

鋼 (Fig. 5 (b)) の場合は $\gamma=0.3$ と仮定した。また、 P_{max} 一定・ ΔK 減少試験結果も実線で示したが、この場合はき裂閉口が起こっていないので、 $\Delta K_{eff, T} = \Delta K$ となる。したがって、 P_{max} 一定・ ΔK 減少試験結果は低荷重比側で生じるき裂閉口挙動を解析する際に参照データとして用いることができる。

Fig. 5 (a) と (b) の黒印は $R=0.1$ の結果を $\Delta K_{eff, M}$ で整理したものであるが、それらを実線の P_{max} 一定試験結果と比較すると、上述したように SM50B と

SUS304 鋼ともに $\Delta K_{eff, M}$ が小さすぎるのがわかる。白印は $\Delta K_{eff, T}$ で整理した結果であるが、それらは実線と一致した。同様な結果が残りの 3 種類の鋼においても得られたが、S45C と HT80 鋼では $\gamma = 0.5^{1)}$ 、SUS403 鋼では $\gamma = 0.3$ と仮定するのが適当であり、 γ 値は炭素鋼または高張力鋼とステンレス鋼で異なるを考えるのがよいようである。 γ 値を実験的または理論的に決定しようとする試みは一部に行われているが³⁾、いまだに確立していない。

したがって、3% NaCl 水溶液のような腐食環境下ではき裂閉口を避けて疲労き裂伝ば試験を行うことは重要である。き裂閉口を避けるためにはまず荷重比を高くする必要がある。本実験では行っていないが、 R 一定・ ΔK 減少試験においても高荷重比条件を得ることができる。しかし、KONDO と ENDO⁶⁾ は 3.5% NiCrMoV 鋼を用い、5% NaCl + FeCl₃ 水溶液中で R 一定試験を行った結果、 $R = 0.8$ のもとでも腐食生成物のためにき裂閉口が起ると報告している。この試験においては荷重及び応力拡大係数の最大値と最小値はともにき裂進展につれて低下する。一方、き裂閉口を避けることのできた P_{max} 一定・ ΔK 減少試験と $R = 0.8$ の定荷重振幅試験においてはこれらの値は一定に保持されるか、上昇する。したがって、腐食環境中でき裂閉口を避けるためには荷重比を高くするのみならず、荷重または応力拡大係数の最大値と最小値をともに低下させないことが必要であり、この点からすると P_{max} 一定・ ΔK 減少試験は優れた方法であると言える。

3.2 腐食疲労き裂伝ば特性におよぼす材料、カソード防食、荷重繰返し速度の影響

腐食疲労き裂伝ばは力学的因子と電気化学的因子が相互に絡み合った複雑な挙動である。 P_{max} 一定・ ΔK 減少試験においては前述したように力学的因子のうちで影響の最も大きいき裂閉口を避けることができるので、電気化学的因子である腐食の作用を際立させて調べることができる可能性がある。ここでは、この可能性について述べる。

3.2.1 材料の影響

Fig. 6 に 3% NaCl 水溶液中の自然腐食条件下、 $f = 30$ Hz のもとで得られた 5 種類の鋼の da/dN - ΔK 特性を示す。比較のため、大気中の特性を最も低速側となつた SM50B 鋼と最も高速側となつた HT80 鋼の場合について破線で示し、残り 3 鋼種については $\Delta K_{th, air}$ 値のみを矢印で示した。Table 2 に示したように、これらの鋼の微視組織は 3 種類に異なっており、強度レベルは降伏応力で 2 倍以上異なっている。

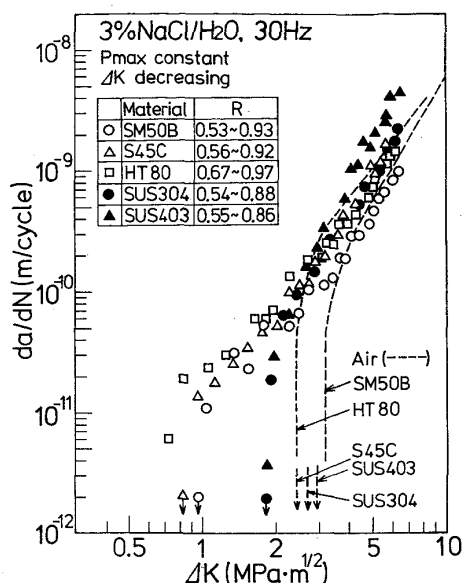


Fig. 6. Effect of material on fatigue crack growth behavior in 3% NaCl solution under freely corroding condition at frequency of 30 Hz.

大気中においては $\Delta K_{th, air}$ 値を含めて疲労き裂伝ば特性はあまり材料に依存しなかつた。

NaCl 水溶液中においても $\Delta K \geq \Delta K_{th, air}$ の領域ではき裂伝ば特性はあまり材料に依存せず、また大気中の特性とほぼ一致した。しかし、 $\Delta K \leq \Delta K_{th, air}$ の領域ではすでに述べたように炭素鋼と高張力鋼の場合著しい低 ΔK 域までき裂は伝ばでき、 $\Delta K_{th, corr}$ はほとんど消滅したと見なせるのに対して、ステンレス鋼の場合には $\Delta K_{th, corr}$ は存在し、 $\Delta K_{th, air}$ より約 30% 小さくなつた。これらの結果はテープ付き試験片において得られたが、Fig. 3 で SM50B と SUS304 鋼を用いて確かめたようにテープ無し試験片においても同じ結果が得られる可能性は大きい。

3.2.2 カソード防食の影響

Fig. 7 に NaCl 水溶液中でカソード防食条件下、 $f = 30$ Hz のもとで得られた HT80 と SUS304 鋼の P_{max} 一定・ ΔK 減少試験結果を示す。カソード防食は亜鉛を犠牲陽極にすることによって行い、また試験片表面はテープでおおわれていない。

Fig. 6 に示したように自然腐食条件下の $\Delta K_{th, corr}$ は大気中の $\Delta K_{th, air}$ よりも低くなつた。しかし、カソード防食を施すと、Fig. 7 に示すように高張力鋼 HT80 とステンレス鋼 SUS304 とともに自然腐食条件下の下限界特性の低下は改善され、大気中のレベルまで回復した。すなわち、カソード防食は下限界特性に対して有効に作用することが明らかになった。

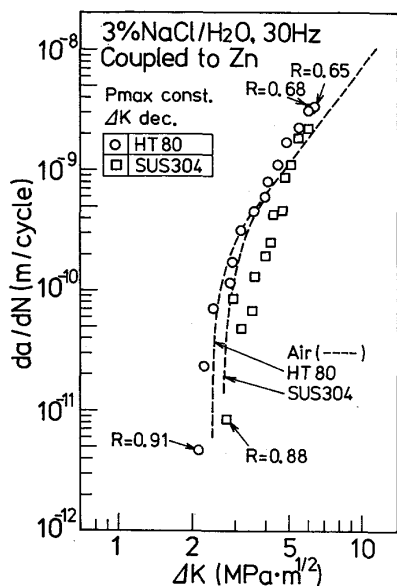


Fig. 7. Crack growth rate against stress intensity factor range for SM50B and SUS304 steels in 3%NaCl solution coupled to zinc anode at frequency of 30 Hz.

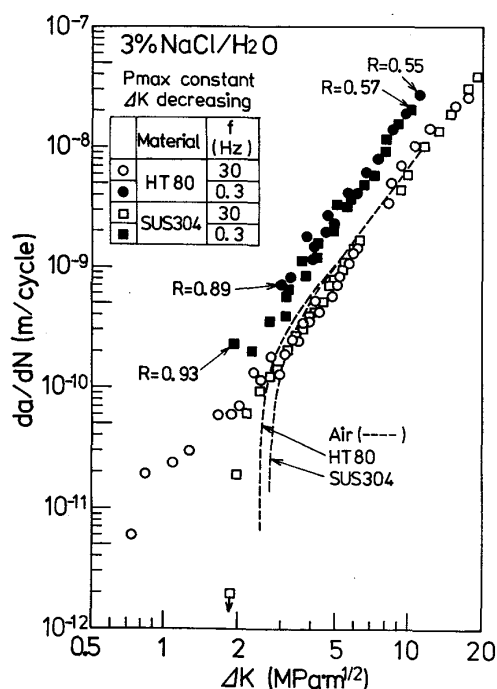


Fig. 8. Crack growth rate against stress intensity factor range for SM50B and SUS304 steels in 3%NaCl solution under freely corroding condition at frequencies of 0.3 and 30 Hz.

3.2.3 荷重繰返し速度の影響

Fig. 8 は NaCl 水溶液中で自然腐食条件下、 $f=0.3$ Hz のときに HT80 と SUS304 鋼で得られた P_{max} 一定・ ΔK 減少試験結果である。比較のために Fig. 6 で

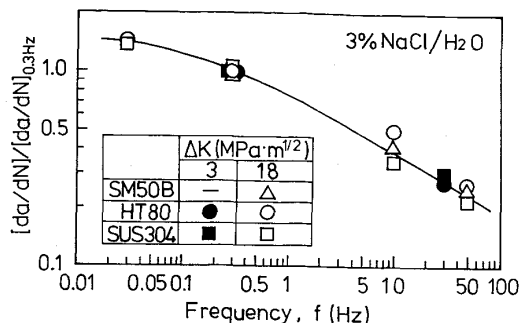


Fig. 9. Dependency of crack growth rate on loading frequency in 3%NaCl solution under freely corroding condition.

示した $f=30$ Hz の結果も示した。

HT80 と SUS304 鋼ともに 0.3 Hz の結果 (●, ■) は 30 Hz の結果 (○, □) と平行になり、約 4 倍のき裂伝ば速度の加速を示した。ただし、0.3 Hz の場合には図中に示す ΔK 以下では試験時間が長くなりすぎるため、下限界特性までは明らかにすることはできなかった。

Fig. 9 は自然腐食条件下におけるき裂伝ば速度の荷重繰返し速度依存性である。この図には Fig. 8 の低 ΔK 側の HT80 と SUS304 鋼の結果に加え、前報⁷⁾で報告した高 ΔK 側の HT80, SUS304, SM50B 鋼の結果も含めてある。各 f 値のき裂伝ば速度は試験した ΔK 範囲の中で低 f 側の結果が存在する最小の $\Delta K=3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ と最大の $\Delta K=18\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ に対応する値を採用し、 $f=0.3$ Hz のき裂伝ば速度で無次元化して図示した。

Fig. 9 の結果は 3%NaCl 水溶液中の自然腐食条件下ではき裂伝ば速度の荷重繰返し速度依存性は ΔK レベルと鋼種に依存せず、荷重繰返し速度の低下とともに増大することを示している。しかし、き裂伝ば速度の増加量は f 値が 50 から 0.03 Hz と 3 桁以上低下しても高々 6 倍で、しかも低 f 側で飽和する傾向となった。

この節の目的は腐食疲労き裂伝ば特性を電気化学的立場から調べる際に P_{max} 一定・ ΔK 減少試験が役立つことを証明することであつた。Fig. 6 と 7 に示したように 3%NaCl 水溶液中の $\Delta K_{th, corr}$ に及ぼす材料、カソード防食の影響のような、現在までき裂開口のため十分に把握できなかった部分がかなり明らかになり、この節の目的は相当達成できたと考える。しかし、得られた結果が腐食疲労き裂伝ばに固有なものか、あるいは他の原因、例えば応力腐食割れの影響⁴⁾⁸⁾⁹⁾が強く反映したものなのかなどのメカニズムの解明に対しては本実験結果のみではまだ不十分であると考えられる。

4. 結 論

高張力鋼 SM50B と HT80, 炭素鋼 S45C, ステンレス鋼 SUS403 と SUS304 を用いて 3% NaCl 水溶液中で疲労き裂伝ば試験を行い, 以下の結論を得た.

1) P_{max} 一定・ ΔK 減少試験, R 一定・ ΔK 減少試験, 定荷重振幅試験を実施した結果, P_{max} 一定試験はき裂閉口を避けて腐食環境中で da/dN - ΔK_{eff} 特性を直接決定するのに優れた方法であることがわかった. き裂閉口を避けることによって, 次のような腐食疲労き裂伝ばの特徴が低 ΔK 領域で確認できた.

2) NaCl 水溶液中の自然腐食条件下, $f=30\text{Hz}$ のもとでの疲労き裂伝ば特性は大気中の下限界値 $\Delta K_{th, air}$ 以上の ΔK 領域においては材料の強度レベルや微視組織に関係なく互いに一致し, また大気中の特性とも一致した. $\Delta K \leq \Delta K_{th, air}$ の領域においては高張力鋼と炭素鋼の場合 $\Delta K \leq 1\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の著しく低い ΔK 域でもき裂は伝ばでき, 下限界値は消滅したと見なせた. 一方, ステンレス鋼の場合には NaCl 水溶液中でも下限界値 $\Delta K_{th, corr}$ が存在し, その値は大気中の値より約 30% 小さくなった.

3) カソード防食を行うと, 高張力鋼 HT80 とステンレス鋼 SUS304 共に ΔK_{th} は大気中の値まで完全に

回復した.

4) 自然腐食条件下では荷重繰返し速度が低下するとき裂伝ば速度は加速したが, その加速量は材料と ΔK レベルに依存せず, 荷重繰返し速度の 50 から 0.03 Hz までの低下に対して約 6 倍であった.

最後に, 本研究は昭和 59 年度科学技術庁科学技術振興調整費によつたことを付記する.

文 献

- 1) 松岡三郎, 西島 敏, 下平益夫, 升田博之, 竹内悦男: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 55
- 2) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎: 金属の腐食疲労と強度設計 (1983) [養賢堂]
- 3) 駒井謙治郎, 敷田卓祐, 遠藤吉郎: 日本機械学会論文集, **50A** (1984), p. 1453
- 4) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 113
- 5) 腐食と破壊 (日本機械学会編) (1985), p. 204 [日本工業出版]
- 6) Y. KONDO and T. ENDO: Current Research on Fatigue Cracks, The Society of Materials Science, Japan, MRS, **1** (1985), p. 225
- 7) 升田博之, 松岡三郎, 下平益夫, 西島 敏: 鉄と鋼 **70** (1984), S1439
- 8) O. VOŠKOVSKÝ: J. Test. and Eval., **6** (1978), p. 328
- 9) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 松田良信: 日本機械学会論文集, **47A** (1981), p. 257