

腐食した鋼切欠き部材の疲労亀裂発生挙動

FATIGUE CRACK INITIATION BEHAVIOR OF CORRODED STEEL NOTCHED MEMBERS

坂野昌弘*・西村俊夫**

By Masahiro SAKANO and Toshio NISHIMURA

Fatigue crack initiation behavior of corroded steel notched members was studied. Fatigue tests were carried out using corroded center-holed plate-type specimens made of SM41, SM58 and SMA50. Fatigue cracks were initiated from corrosion pits at stress-concentrated portions. Fatigue limit of corroded specimens in air was about 150 MPa, irrespectively of corrosion periods and materials. Fatigue life of corroded specimens could be estimated by regarding the corrosion pit as an initial crack and applying the fracture mechanics concept.

1. はじめに

橋梁は、数十年から場合によっては1世紀以上もの長い間、自然環境中で使用される構造物である。さらに、近年、海浜部や海上を横断して架設される橋梁も増加しており、それらの厳しい腐食環境を考慮すれば、腐食による疲労寿命の低下は橋梁の耐久性に関する最も重要な問題の一つと考えられる。著者らは、前報¹⁾で、腐食疲労による鋼切欠き部材の寿命低下について検討した。しかし、橋梁では、列車やトラックが通過する間の無載荷状態に置かれる時間が載荷時間に比べて非常に長いことから、これら無載荷時の腐食の影響を評価することも必要と考えられる。

従来、腐食した橋梁部材や大気中である年数曝露した試験体の空气中疲労試験はいくつか行われている^{2)~9)}。それらによれば、数年間大気曝露した場合、もともと応力集中の大きい溶接継手では疲労強度の低下はほとんどみられないが平滑材では新材に比べて20~40%低下し、数十年間使用された実橋部材で腐食の著しい場合にはさらに大きく低下することが報告されている。しかし、腐食の程度と疲労強度の関係について、定量的な評価は未だになされていない。腐食した部材の疲労強度の低下要因については全体的な侵食による断面の減少と表面の局部的な凹凸による切欠き効果とに分けられるが、比較的短期間の大気曝露によっても疲労強度が低下するという実験例から¹⁾、腐食初期に生じる局部的な切欠きが重要な役割をはたしていると考えられる。

* 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

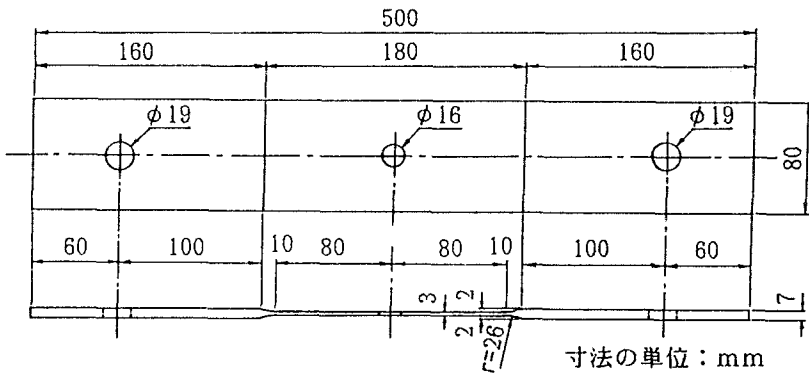
** 工博 足利工業大学教授 工学部土木工学科 (〒326 栃木県足利市大前町268)

本研究では、乾湿繰返しによって促進的に腐食させた円孔切欠き試験体を用いて疲労試験を行い、特に表面の局所的な凹凸に注目して、腐食部材の疲労亀裂発生挙動について検討した。また、それらの検討結果に基づいて腐食した鋼部材の疲労寿命を初期欠陥からの疲労亀裂の発生および進展過程として捉え、破壊力学の手法を用いて疲労寿命予測を行った。

2. 実験方法

(1) 供試鋼材と試験体

実構造物における疲労亀裂の発生位置が部材接合部などの応力集中部であることを考慮し、そのような箇所での基本的な疲労亀裂の発生および進展挙動の把握を目的として、試験体は前報¹⁾と同様な中央部に円孔をもつ平板試験体を用いた。図－1にその形状と寸法を示す。疲労亀裂の発生する円孔付近は、1000番の研磨紙で仕上げた（JIS十点平均粗さ：Rz＝1～2μm）。試験体両側の円孔は試験機への取付け用のものである。供試鋼材はSM41B、SM58QおよびSMA50AWの3種類である。それらの機械的性質と化学成分を表－1に示す。



図－1 試験体の形状と寸法

表－1 供試鋼材の機械的性質および化学成分（ミルシート値）

供試鋼材 (板厚 9mm)	機械的性質			化 学 成 分 (%)								
	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	Cu ×100	Ni ×100	Cr ×100	V ×100
SM41B	304	451	32	12	23	160	20	6				
SM58Q	608	706	25	13	26	141	21	4				
SMA50AW	480	568	23	12	47	90	23	12	33	10	47	4

(2) 促進腐食試験

切欠き試験体の腐食に先立って、腐食条件を定めるために、長さ80mm×幅9mm×厚さ1mmの短冊型試験片を用いて腐食試験を実施した。腐食試験は、25℃、3%食塩水の浸漬状態で、ある時間ごとにポンプで排水と注水を繰返すことにより乾湿繰返し状態となるようにした。乾湿繰返し条件は、乾湿時間比（浸漬時間と繰返し周期の比＝Wet/（Wet+Dry））については0.2、0.4、0.8、1（連続浸漬）の4ケー

ス、繰返し周期については1/6, 1, 6, 24時間の4ケースとした。図-2に繰返し周期一定(1時間)のときの乾湿時間比と腐食量の関係を、また図-3には乾湿時間比一定(0.4)のときの繰返し周期と腐食量の関係を示す。腐食量は9週間経過後の平均板厚減少量(試験片重量の減少量から換算)で表わしている。3鋼種とも乾湿時間比0.4で繰返し周期1時間の場合に腐食量が最大となる。図-4にその条件の乾湿繰返しと連続浸漬による腐食量と腐食期間との関係を示す。乾湿繰返し環境下では、腐食期間が15週間で試験片に部分的に断面の欠損箇所ができるため腐食量の増加傾向がやや鈍くなっているが、9週間で比較すると連続浸漬の6~8倍の腐食量を示している。また、鋼種で比較するとSM41, SMA50, SM58の順に10%程度ずつ少なくなっている。

円孔切欠き試験体は、上述の最大腐食量を示す乾湿繰返し環境下で腐食させた後に疲労試験に供された。腐食程度の影響を検討するために、腐食期間は1週間、4週間および12週間の3段階とした。図-4によれば、12週間後の平均板厚減少量は0.4mm程度であり、比較的厳しい大気中での曝露試験結果の板厚減

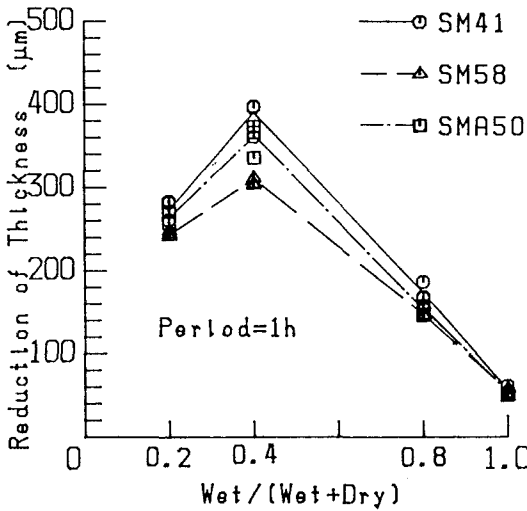


図-2 乾湿時間比と腐食量の関係

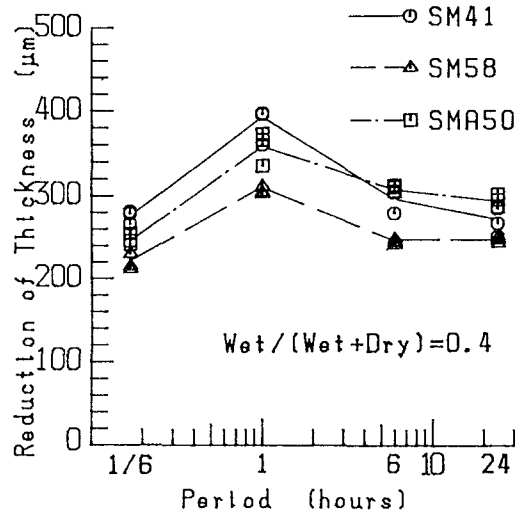


図-3 乾湿繰返し周期と腐食量の関係

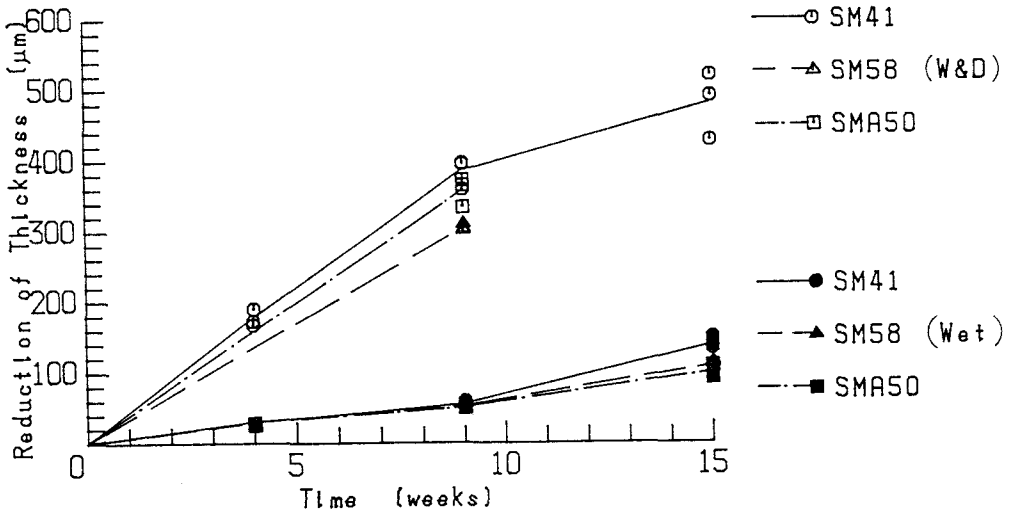
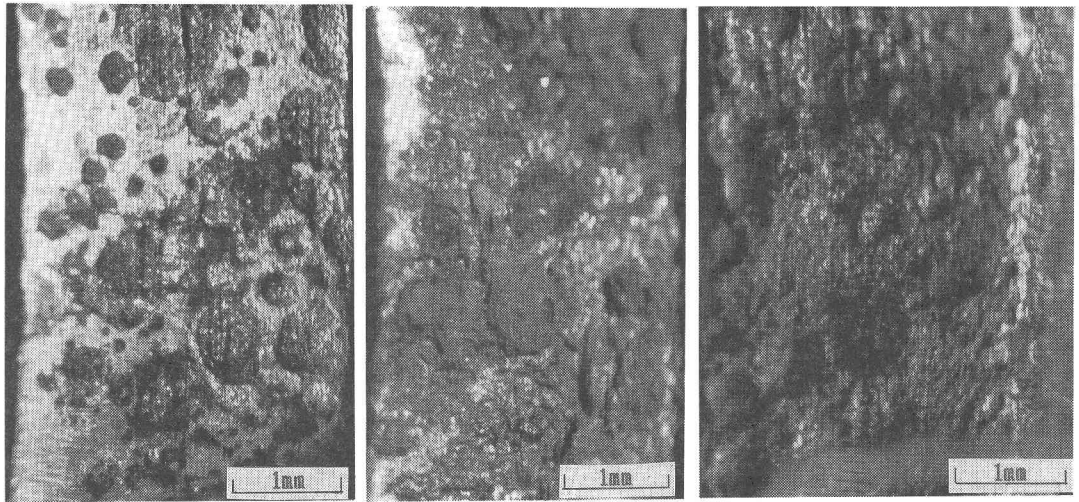


図-4 乾湿繰返しによる鋼材の腐食



(a) 1週間腐食

(b) 4週間腐食

(c) 12週間腐食

写真-1 疲労試験体円孔内面の腐食状況 (SM41)

少量0.15mm/4年³⁾の約10年分に相当する。写真-1にSM41試験体について円孔内面の腐食状況の例を示す。1週間腐食試験体では、部分的に光沢がみられほとんど腐食されていない所も残っているが、直径が1mm近い腐食ピットが既に形成されている。腐食期間が4週間のものでは全面的に腐食が進行し、比較的凹凸が少ない均一的な腐食部分と腐食ピットとが混在した状態がみられる。12週間腐食された試験体ではさらに腐食が進み板厚が減少するが、表面の凹凸の程度に大きな変化はみられない。他の鋼種の場合もこれらと同様であり、腐食状態に関して供試鋼材による違いはみられない。なお、実橋部材の腐食部においても、写真-1と同様な微小な凹みが観察されている⁴⁾。図-5に各試験体について測定した表面粗さ(Rz)の平均値と腐食期間の関係を示す。試験体によりばらつきがあるが、腐食期間および鋼材の種類による表面粗さの違いはみられなかった。

以上の腐食試験の結果から、腐食期間が長くなるにつれ、全体的な腐食量は増加するものの表面の凹凸の程度はほとんど変わらないことがわかる。

(3) 疲労試験

疲労試験は、空気中および腐食環境下で電気油圧式98kN疲労試験機を用い、片振り引張り荷重(最小応力9.8MPa)により実施した。腐食疲労試験は、前報⁴⁾と同様に25℃、3%の食塩水を連続的に注ぎかけた状態で、荷重繰返し速度100cpmで行った。腐食疲労の場合には、前述した無応力下の腐食と異なり、乾湿繰返しよりも連続浸漬状態の方が厳しい環境条件となる⁵⁾。腐食疲労試験には3鋼種とも腐食期間が4週間の試験体を用いた。空気中疲労試験には、SM41材については腐食期間が1、4、12週間の試験体を用い、SM58材およびSMA50材については1および12週間のものを使用した。

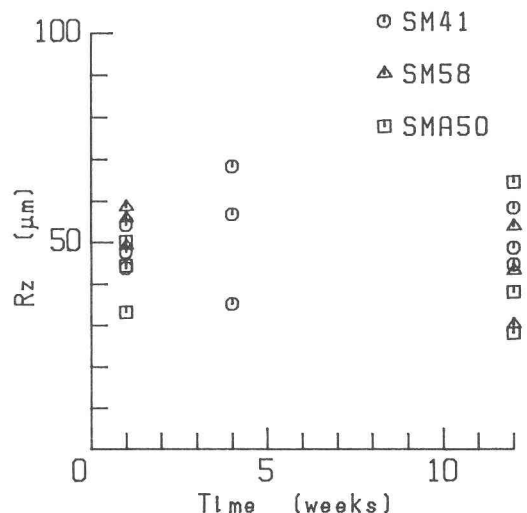


図-5 腐食期間と表面粗さの関係

腐食ビットのような初期欠陥を有する部材の疲労寿命を評価する上で、そのような欠陥からの亀裂の発生と初期の進展挙動が非常に重要である。本研究では、円孔切欠き部に発生する疲労亀裂をできるだけ早く捕捉するために、交流ポテンシャル法を用いた。ここで使用した装置では、表面長さが0.5mm程度の亀裂発生を検出できる¹⁾。したがって、そのときの応力繰返し数を亀裂発生寿命 N_c と定義した。

3. 腐食試験体の疲労寿命

図-6に各鋼材ごとに、空気中および腐食疲労試験で得られた応力範囲 S_r と亀裂発生寿命 N_c の関係を示す。 S_r は円孔切欠き部の純断面を基準とした公称応力範囲である。図-6中には著者ら¹⁾が新材について求めた空気中疲労(OW AIR)および腐食疲労(OW SALT)の $S_r \sim N_c$ 関係もあわせて示してある。腐食材の空気中疲労強度は、各鋼種とも新材の空気中疲労強度に比べて大きく低下するが、腐食疲

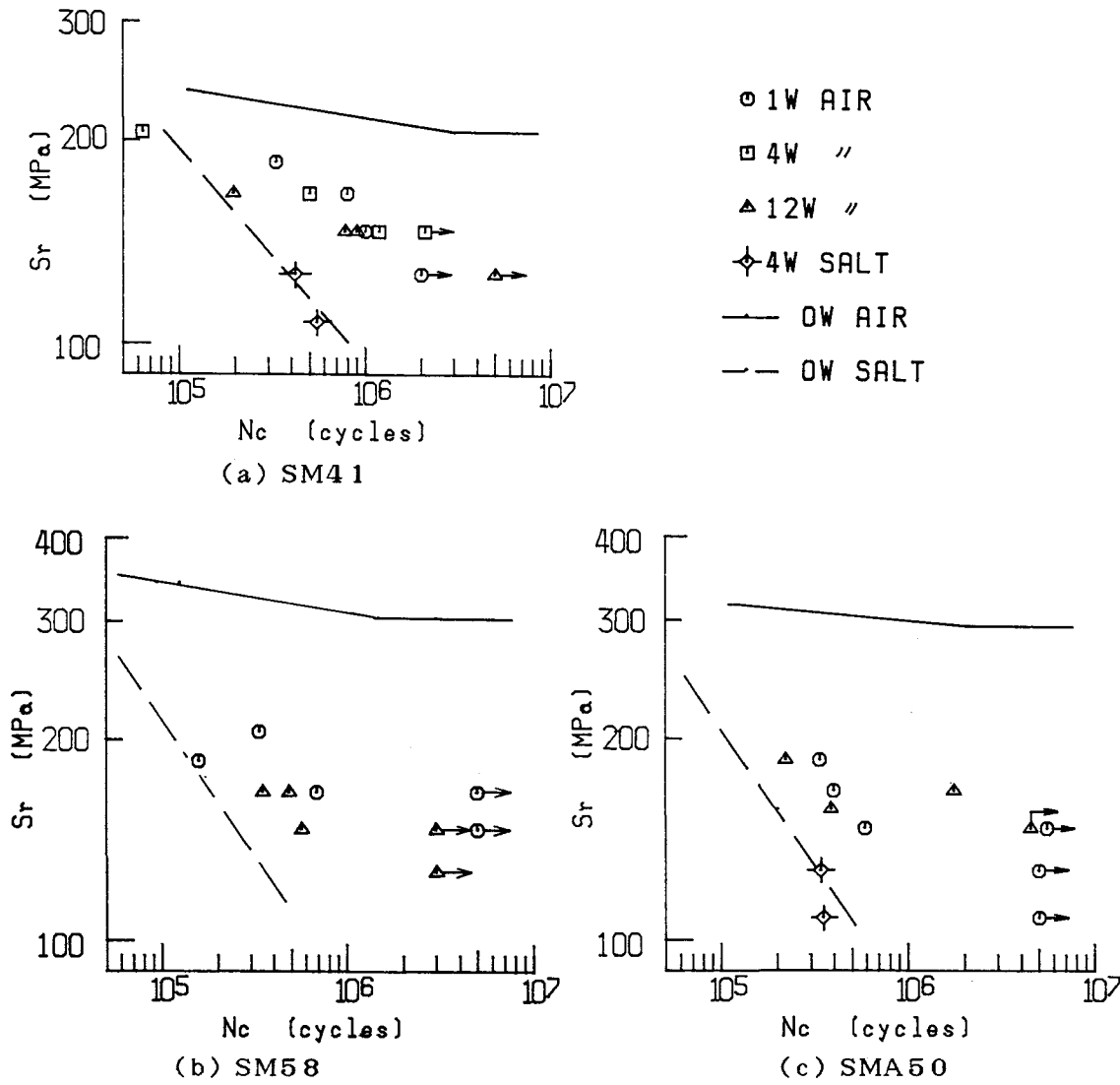


図-6 各試験体の $S_r \sim N_c$ 関係

疲労強度よりは高く、また、疲労限が存在する。それらの疲労限は腐食期間および鋼種によらずおおよそ 150 MPa 前後ではほぼ同程度とみなすことができる。これは 2. (2) で述べたように、3 鋼種含めて、腐食期間が長くなり全体的な腐食量が増加しても表面の凹凸の程度がほとんど変わらないことに対応している。したがって、腐食材の疲労強度低下に関しては、腐食初期から生じる腐食ピットの影響が重要であることがわかる。

一方、腐食疲労試験結果 (4W SALT) は、空気中の疲労限以下の低応力域でも腐食疲労を受ける場合には早期に疲労亀裂が発生することを示している。しかし、これらは空気中疲労の場合と異なり、新材の腐食疲労寿命と比べてほとんど変わりがない。その理由として、応力範囲が腐食材の空気中疲労限以下であるため腐食材であっても亀裂発生までにさらに腐食ピットの成長が必要なこと (図-9 参照)、また円孔による応力集中と強い腐食環境のために新材の場合でももともと N_c が短いことなどが考えられる。

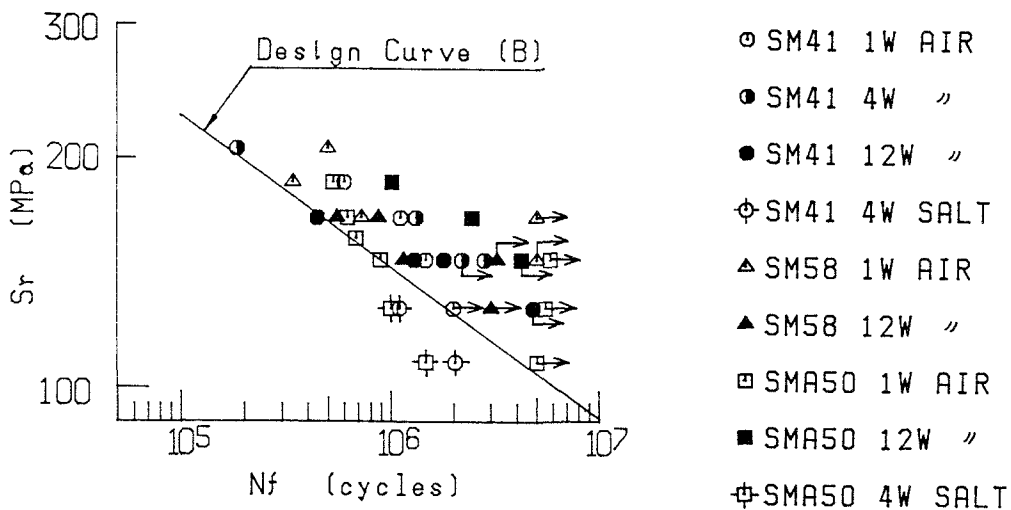


図-7 各試験体の $S_r \sim N_f$ 関係

全ての試験体の S_r と破断寿命 N_f の関係を図-7 に示す。図中の直線は鋼鉄道橋設計標準¹⁾ の B 等級の非溶接継手に対する設計寿命曲線を表わす。B 等級の設計寿命曲線に対し、空気中疲労試験体 (1W, 4W, 12W AIR) の破断寿命はほとんどが長寿命側にあるが、腐食疲労を受ける場合 (4W SALT) にはかなり短寿命となる。図-8 には各試験体について N_f に占める N_c の割合を示す。腐食疲労試験体の場合には N_f の 0.2~0.4 と早期に亀裂が生じているが、空気中疲労では 0.2~0.8 とかなりばらつきが多く、腐食期間や鋼種による違いはみられない。このばらつきの原因として、亀裂発生源となる腐食ピットの大きさのばらつき (図-9 参照) による N_c の変動、および複数の腐食ピットから生じた亀裂の干渉による亀裂進展の遅延あるいは加速が考えられる。

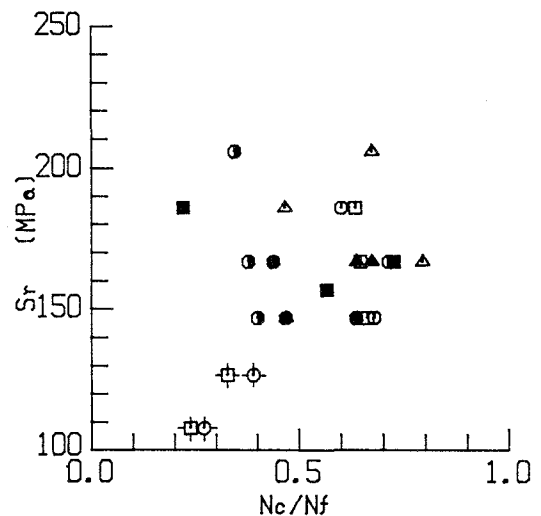


図-8 各試験体の N_c/N_f

4. 腐食部の疲労亀裂発生挙動

腐食試験体の疲労亀裂は、写真-2に示すような円孔内面の応力集中部にある比較的深い腐食ビットを起点として発生する。図-6に示した腐食試験体の疲労寿命の低下はこのような腐食ビットの存在によるものである。写真-3は亀裂発生源となった腐食ビットの疲労破断後の顕微鏡写真である。図-9にこれらから読み取った腐食ビットの深さDとS_rの関係を示す。空气中疲労で破断した試験体に関しては、腐食ビットの深さは各鋼種とも0.08~0.2mmに分布している。SM58とSMA50では腐食期間が1週間のもの(AIR 1W)の中にDの小さい場合があるが、全般的に腐食期間による大きな違いはみられない。このことは、図-6のS_r~N_c関係に対応している。

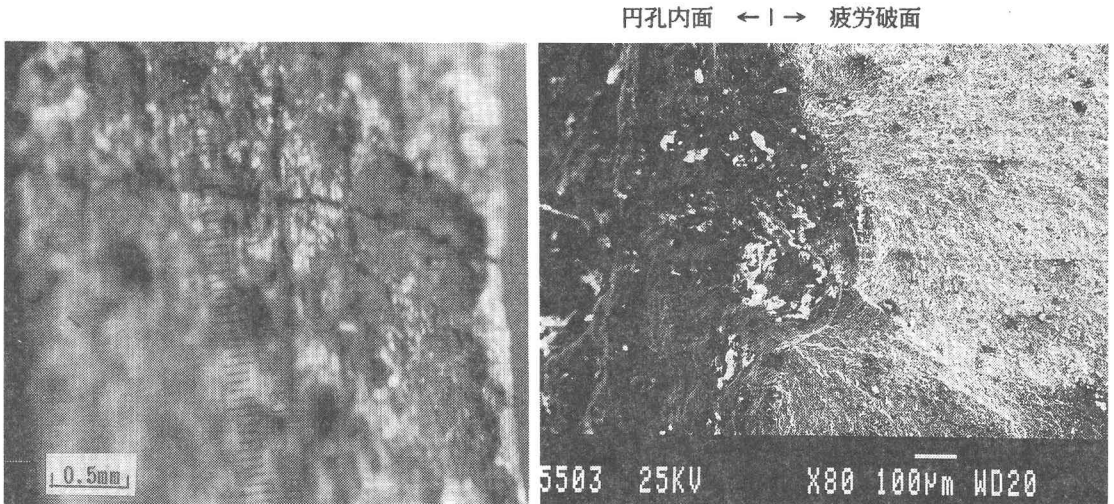


写真-2 疲労亀裂発生状況

写真-3 疲労亀裂の起点となった腐食ビット

図-9中の黒塗りの記号は亀裂の発生しなかったものを表わしている（荷重を上げて再試験し破断させた）。Dが小さい場合、あるいはDが大きくてもS_rが小さい場合には亀裂が発生しない。図-6のS_r~N_c関係のばらつきはこのことから説明できる。図中の実線は腐食ビットを半径Dの半円板亀裂と仮定して、式(1)により計算した応力拡大係数範囲ΔK一定曲線である。

$$\Delta K = (2/\pi) \cdot S_r \cdot \sqrt{\pi D} \cdot F_w \cdot F_g \quad (1)$$

ここに、F_wとF_gはそれぞれ有限板幅と亀裂の偏心の影響、および円孔から生じた亀裂に対する補正係数で、石田¹¹⁾により求められたものを用いた。各鋼種とも、ΔK=6MPa√mをほぼ境にして亀裂の生じたものと生じなかったものとに分かれていることから、この曲線が鋼種によらず腐食ビットからの疲労亀裂の発生条件を表わすものであるということができる。腐食疲労の場合には、空气中の疲労限以下の低応力域であっても腐食ビットが成長することによりこの条件を満たし、亀裂が発生するとして説明できる¹⁾。なお、この6MPa√mという値は応力比R=0の鋼素材での亀裂進展下限界値ΔK_{th}¹²⁾に対応している。

5. 腐食部材の疲労寿命予測

破壊力学の手法を適用した疲労寿命予測を行う場合には、初期亀裂の設定が非常に重要である。ここでは、図-9に示した円孔内面の腐食ビット深さの平均値0.15mmを初期亀裂深さと仮定し、試験体の疲労寿命を予測した。応力拡大係数範囲 ΔK は板厚貫通前については半径aの半円板亀裂として式(1)、板厚貫通後については二次元亀裂として式(2)により求めた。最終亀裂寸法は板幅の80%とした。

$$\Delta K = S r \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F w \cdot F g \tag{2}$$

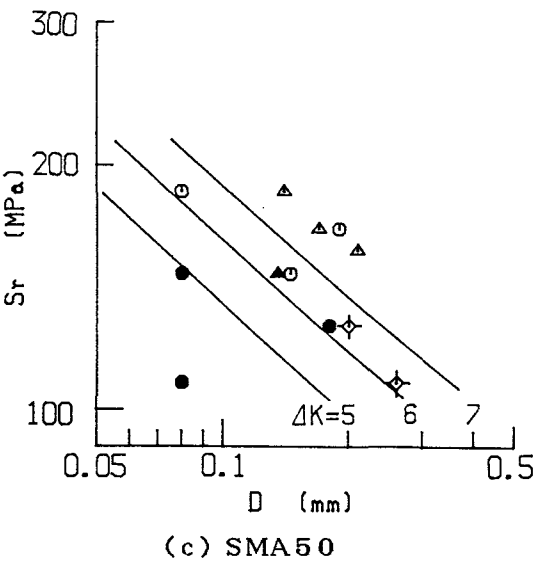
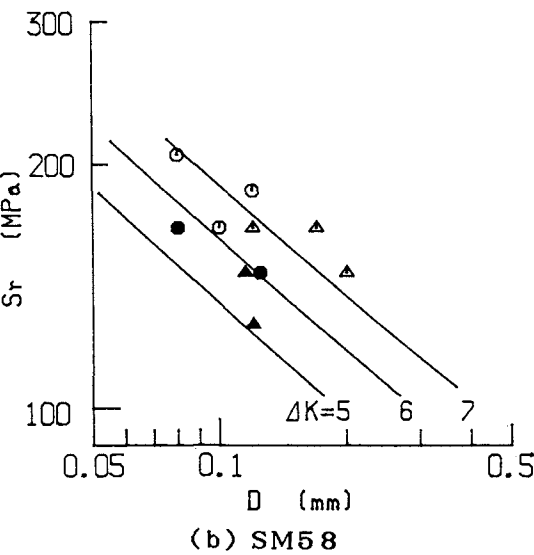
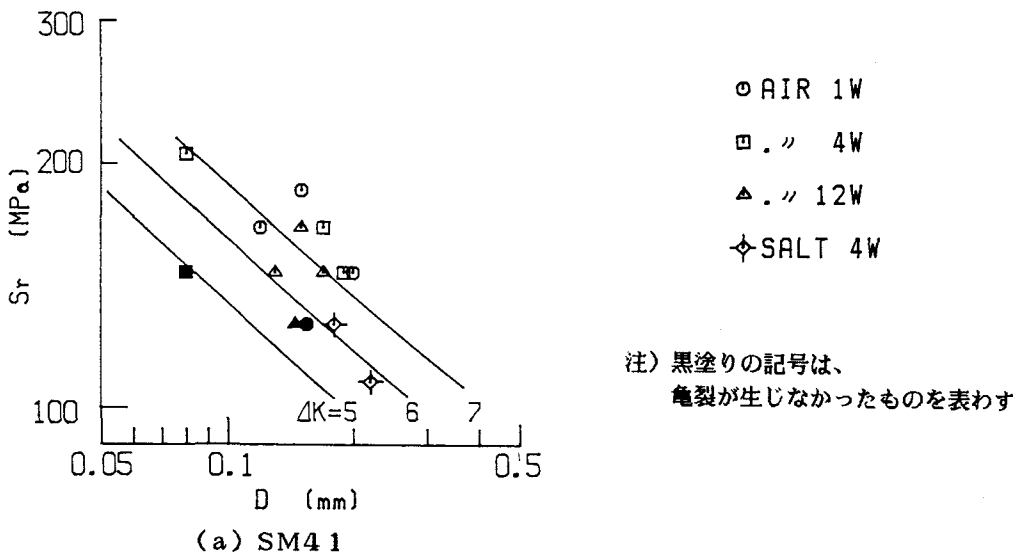


図-9 亀裂発生源となった腐食ビットの深さと応力範囲の関係

疲労亀裂進展速度 da/dN と ΔK の関係は、

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m \quad (\text{ただし、}\Delta K > \Delta K_{th}) \quad (3)$$

を用いた。ここに、 C 、 m は鋼素材に対する平均的な値である 8.18×10^{-12} (mm/cycle, MPa $\sqrt{m}$) および $5^{1/2}$ 、 ΔK_{th} は図-9に示した腐食ビットからの疲労亀裂の発生条件から、6MPa $\sqrt{m}$ とした。

図-10に疲労寿命の予測曲線と実験値を示す。亀裂発生寿命を無視したことによりやや安全側であるが、予測曲線は実験値を良く表わしている。以上により、腐食材の疲労寿命を腐食ビットを初期欠陥とした疲労亀裂の発生および進展過程として捉え、腐食ビット深さを初期亀裂寸法と仮定して破壊力学の手法を用いることにより精度よく予測できることが示された。

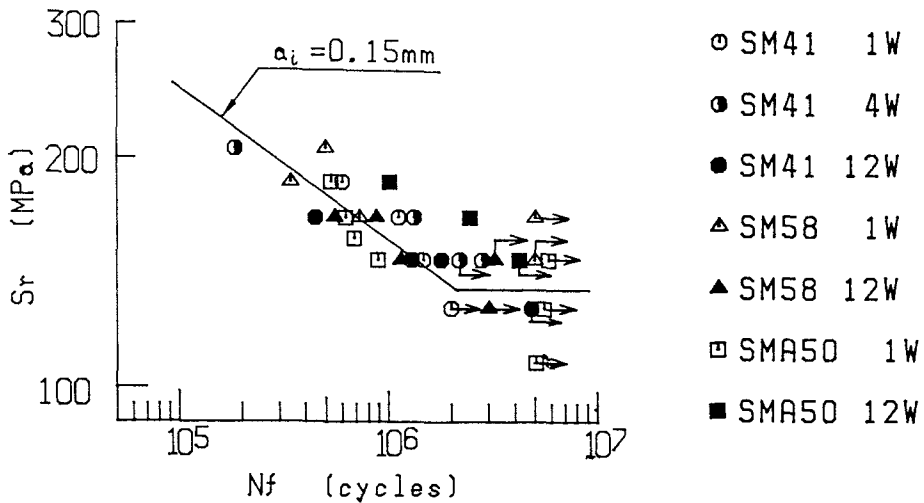


図-10 疲労寿命の予測

6. おわりに

乾湿繰返し環境下で促進腐食させた円孔切欠き試験体の疲労試験を行い、腐食部からの疲労亀裂の発生挙動について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 腐食試験体の空気中疲労強度は新材の空気中疲労に比べて大きく低下するが、腐食疲労強度よりは高く、疲労限が存在する。疲労限の大きさは腐食期間および鋼材の種類によらずおおそ150MPa程度となる。
- (2) 腐食試験体の空気中疲労寿命は鋼鉄道橋設計標準のB等級の設計寿命曲線以上である。腐食疲労寿命はそれを下回る。
- (3) 腐食試験体の疲労亀裂は応力集中部の腐食ビットを起点として発生し、その発生条件は鋼種および腐食期間によらず腐食ビットを亀裂とみなして計算した応力拡大係数により表わすことができる。
- (4) 腐食ビットを初期亀裂と仮定し、破壊力学の手法を用いることにより、腐食材の疲労寿命を精度よく予測することができる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、群馬大学建設工学科辻幸和教授から貴重なご助言をいただき、実験には池田正志技官はじめ当時学生の石田教雄、岸沢隆、中島英樹、岩谷弘二郎、斎藤等、各氏のご協力を得た。こ

こは、各位に対し厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 坂野昌弘・横尾正幸・新井弘・西村俊夫：腐食環境下における鋼切欠き材の疲れき裂発生寿命，構造工学論文集，Vol.34A，pp.469-481，1988.
- 2) 山田健太郎・村山真・近藤明雅・菊池洋一：大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ，土木学会論文報告集，第337号，pp.67-74，1983.
- 3) Albrecht,P. and Cheng,J.G.: Fatigue Tests of 8-yr Weathered A588 Steel Weldment, ASCE Structural Engineering, Vol.109, No.9, pp.2048-2065, 1983.
- 4) 奥田寿夫・浅川和夫：橋りょう用鋼材の腐食疲労強度，鉄道技術研究所速報，No.73-217，1973.
- 5) 国広哲男・井上啓一・福田孝男：耐候性鋼材の大気曝露調査，土木研究所資料，第729号，1972.
- 6) 阿部英彦・稲葉紀昭・江口保平：腐食鋼材の疲労強度，構造物設計資料，No.34，pp.424-426，1973.
- 7) Bruhwiler,E. und Hirt,M.A.: Das Ermüdungsverhalten genieteteter Bruckenbauteile, Stahlbau, Vol.56, s.136-142, 1987.
- 8) 竹名興英・川上博道・谷藤精一・三木千寿：経年劣化リベットプレートガーダーの疲労強度，構造工学論文集，Vol.34A，pp.525-534，1988.
- 9) 西村昭・皆田理：腐食環境下のガセット継手の表面性状と疲労強度，土木学会論文集，第380号/I-7，pp.401-409，1987.
- 10) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983.
- 11) 石田誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館，1976.
- 12) Miki,C., Mori,T. and Tajima,J.: Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on Near Threshold Fatigue Crack Growth, Proc. JSCE, No.368/I-5, pp.175s-182s, 1986.
- 13) Okumura,T., Nishimura,T., Miki,C. and Hasegawa,K.: Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels, Proc. JSCE, No.322, pp.175-178, 1982.
- 14) 三木千寿・森猛・坂野昌弘：70年間使用された鋼鉄道橋縦桁の疲れ強さ，東京工業大学土木工学科研究報告，No.37，pp.17-33，1987.

(1988年10月12日受付)