

腐食環境下における鋼切欠き部材の疲れき裂発生寿命

FATIGUE CRACK INITIATION LIFE OF NOTCHED STEEL MEMBERS IN CORROSIVE ENVIRONMENTS

坂野昌弘*・横尾正幸**・新井 弘***・西村俊夫****

By Masahiro SAKANO, Masayuki YOKOH, Hiroshi ARAI and Toshio NISHIMURA

Fatigue crack initiation and propagation behavior of notched steel members in corrosive environments is studied. Fatigue tests are carried out for center holed plate-type specimens made of SM41, SM58, SMA41 and SMA50 at a frequency of 100 cpm. Corrosives are distilled water, pH 4 H₂SO₄ solution and 3 % NaCl solution. Fatigue cracks initiate from several corrosion pits formed at the stress-concentrated portion of the hole inner face. Defining crack initiation life (N_c) as the number of cycles when crack surface length reaches 0.5 mm, S_r~N_c curves for 4 tested steels coincide well with each other. Corrosion pit depth when crack starts to propagate for each stress range can be evaluated by using stress intensity factor range, which is irrespective of steel kind.

1. はじめに

橋梁など動的荷重を繰返すける鋼構造物の疲れ寿命は各種構造試験体の大気中での疲れ実験結果をもとに評価されているが、湿潤な腐食環境下においては鋼材表面に生ずる腐食孔などの影響により、その腐食疲れ寿命は大幅に低下することが知られている¹⁾。実際の鋼橋は勿論、野外に雨ざらしであり防錆塗装を行っているものの多湿な我国では構造の各部は常時乾湿状態を繰返し、塗膜の老化とともに厳しい腐食作用を受けることになる^{2),3)}。また狭隘、急峻な国土の地形から鉄道、道路などの交通路は古くより海浜に近接して建設されるものが多く、さらに近年は海上を横断して計画されるものが増加しており、これら路線に架設される鋼橋は絶えず波しぶきや潮風をうけ、その腐食環境は極めて苛酷なものとなっている。

現在、我国の鋼橋設計に適用される疲れ条項には、腐食疲れに対する配慮がほとんどなされていない⁴⁾。防錆対策との関連で考える必要があるが腐食環境下における鋼橋の耐久性については腐食による断面減少にもとづく応力増もさることながら、腐食疲れ寿命の低下についても充分な認識をもって対処する必要がある。従来、鋼橋の分野では、腐食を受けた実橋部材あるいは大気中に暴露した試験体の大気中疲れ強さを検討した例はあるが^{5),6),7)}、腐食疲れを扱った研究はほとんどみられない^{8),9)}。一方、機械、材料、船舶、海洋構造物などの分野ではこの問題についてさかんに研究が行われてきたが^{10),11),12),13)}、それらの大半は試験体の

* 工修 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)

** 工修 横河橋梁製作所 (〒108 東京都港区芝浦4-4-44)

*** 群馬大学大学院 (〒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)

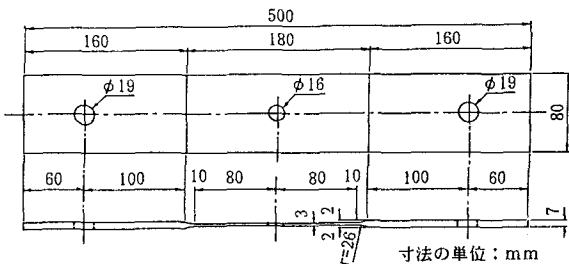
破断寿命を疲れ強さの基準としたものや巨視貫通き裂の進展挙動を対象としたものであり、微小なき裂の発生、進展に関する諸問題は最近注目され始めてはいるが^{27)~29)}、対象材料や腐食環境条件の多様性などからなおその研究は不足していると考えられる。

鋼部材の疲れ寿命は疲れき裂が発生するまでの寿命と以後のき裂進展の寿命とよりなるが、本研究では主として前者の問題を取り上げ、腐食環境がこれらに及ぼす影響を実験的に検討した。すなわち、4種類の構造用鋼材で製作した円孔切欠き試験体について、雨水と塩分の影響を考慮した環境条件の下で疲れ試験を実施し、疲れき裂の発生、進展挙動を究明した。この場合、応力の繰返し速度は鉄道橋を想定し鉄道車両の載荷条件を考慮したものとした。さらに、塗装による寿命低下の防止効果についても検討した。これらの実験結果を大気中での疲れ性状とも比較して腐食疲れ特性を明らかにし、鋼橋の腐食環境下における疲れ安全性の向上に寄与しようとするものである。

2. 実験方法

(1) 供試鋼材および試験体

供試鋼材は溶接構造用40キロ鋼（SM41B）、60キロ鋼（SM58Q）および耐候性40キロ鋼（SMA41AP）、50キロ鋼（SMA50AW）の4種類で、これらの機械的性質および化学成分を表－1に示す。SM41B材は溶接構造用に最も一般的に使用されていることから、これについて腐食環境の違い、応力繰返し速度の影響などを検討し、さらにそれを基準としてSM58QおよびSMA41AP材の腐食疲れ特性を評価した。SMA50AW材は無塗装使用が可能な鋼材として、SMA41APの場合と比較した。試験体は、図－1に示す円孔切欠き付短冊状（切欠き底の応力集中係数2.6）のもので、実構造物の疲れき裂発生位置が接合部など切欠きによる応力集中部であることを考慮し、切欠き部における基本的な腐食疲れき裂の発生、進展挙動の把握をめざしたものである。



注) 1. 試験部表面は研摩紙（1000番）仕上げ
2. フック部円孔は試験機へ取付け用のもの

図－1 円孔切欠き付疲れ試験体

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				
SMA41AP	353	441	27	9	23	65	14	5	29		32	
SMA50AW	480	568	23	12	47	90	23	12	33	10	47	4

注) 引張試験片の標点距離はSM58Qのみ50mm、他は200mm

(2) 腐食環境

本研究では、鋼橋部材の腐食を想定し鉄道橋および道路橋において腐食原因の上位にある多湿・潮風の影響を考慮して²⁾³⁾以下のような腐食環境下で疲れ試験を行った。

まず、試験体の円孔部およびその付近を腐食環境下におくため、図-2に示すアクリル樹脂製腐食槽を製作し、試験体をはさみこむ形で装着した。腐食液は、雨水を模して蒸留水 (pH6.6~7.1, 電気伝導率 $1\sim2\mu\text{S}/\text{cm}$) と弱酸性水 (pH4.0~4.5) を、また海浜部における塩分の影響をみるために 3%食塩水 (pH7.1~7.2) を使用した。弱酸性水については、我が国の各地で観測された雨水の年平均pHが4~5であり、その主原因が SO_4^{2-} であることを考慮したもので³³⁾、蒸留水に希硫酸を加えて調製した。また、疲れ寿命は腐食液の温度により影響されることが報告されており¹⁹⁾²³⁾²⁶⁾、本研究では、気温を考慮し、恒温装置により $25^\circ\text{C}\pm0.5^\circ\text{C}$ に保持した腐食液を流量 $0.5\sim1.5\text{ l}/\text{min}$ で試験体円孔壁の片側に注ぎかけた。疲れ試験中は腐食液の汚れに注意し、真水では電気伝導率が $5\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度になったとき、塩水では一週間経過毎に液を交換したが、その間、両液ともpHはほぼ一定であり、腐食生成物による濁りもほとんど認められなかった。なお恒温槽内へはエアープンプにより通気しており、腐食液中の溶存酸素量は飽和値に達していた。

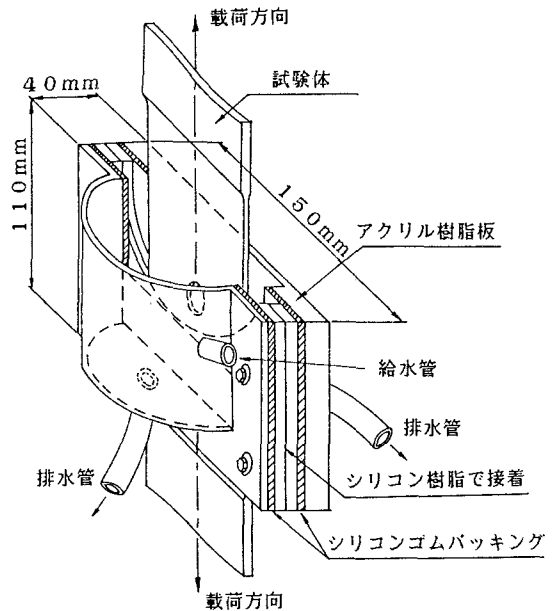
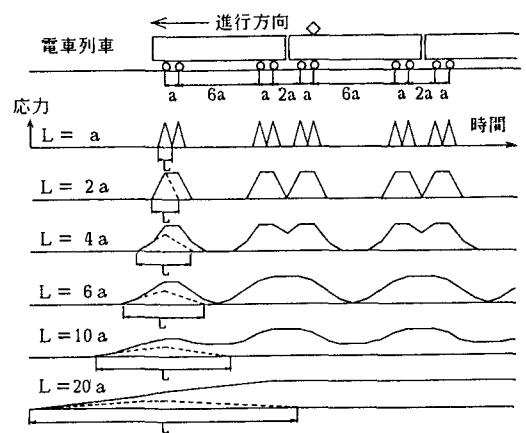


図-2 腐食槽

(3) 疲れ試験方法

疲れ試験は電気油圧式98kN疲れ試験機により片振り引張り正弦波応力（最小応力9.8MPa）下で行い、き裂発生確認後は破面にビーチマークを印すため最小応力を上昇させて振幅を半減する二段多重応力に切替えた。

腐食環境下の疲れ寿命は、応力繰返し速度の影響を強く受けることが知られている¹⁾。海洋構造物を対象とした研究では波浪周期を考慮して6~10cpmに設定しているが^{22)~26)}、2cpm以下まで疲れ寿命の低下傾向は飽和しないとする報告もあり¹⁵⁾。この種の疲れ試験を行う場合は、対象構造物に作用する応力の繰返し速度を十分に考慮する必要がある。疲れに対し厳しい条件下にある鉄道橋床組など比較的短スパン部材の、電車列車走行にともなう計算曲げ応力の変化は図-3のようになり、短スパン部材では多数の応力繰返しを受けることになる²⁴⁾。在来線101系電車および新幹線旅客電車が最高速度で



(L: 桁のスパン、各軸重は同一)

図-3 電車列車により単純桁中央に生ずる曲げ応力の変化

走行する場合、桁に生ずる応力繰返し速度は表-2に示すとおり110～660cpm（但しスパン12m以下）となり、本試験では安全側をとり応力繰返し速度を100cpmとした。実際の橋梁では列車はダイヤに従って運行され、橋梁部材は載荷と無載荷を繰返しているがここでは載荷が連続されるものとして疲れ挙動を検討し、断続載荷の影響は別途取扱うものとする。なお、応力繰返し速度の影響をみるためSM41試験体について900cpmの試験も実施した。また、大気中試験および塗装試験体の腐食疲れ試験では、実験能率をあげるために900cpmで行った。

表-2 電車列車により桁に生ずる応力の繰返し速度

列車形式	在来線101系電車				新幹線旅客電車		
軸距(m) (1車両)	2.05	2.1	11.7	2.1	2.05	2.5	2.5
軸距の比	ほぼ 1 : 1 : 6 : 1 : 1						
車両長(m)	20				25		
走行速度(km/h)	120				250		
列車通過時間(s)	6.0				5.8		
桁のスパン(m)	2	4	12	2.5	5	15	
応力繰返し数(回)	40	20	11	64	32	17	
応力繰返し速度(cpm)	400	200	110	660	330	180	

(4) 疲れき裂の検出方法

腐食ピットのようなき裂状の欠陥を含む部材の疲れ寿命は、そのような欠陥からのき裂発生・進展挙動に大きく影響され、とりわけ、巨視的なき裂が発生するまで、すなわち微小なき裂が安定成長を開始するまでの寿命を把握することがこうした“き裂材”の疲れ強さを評価する上で重要と考えられる。

本研究では、円孔切欠き部に発生、進展する疲れき裂を極力早期に捕捉するため、所定繰返し数ごとに試験機を一時停止し円孔壁のき裂発生予想範囲を実体顕微鏡で詳しく観察する他、交流ポテンシャル法を併用した。図-4に、この場合のセンシングリードおよび電流供給リードの試験体への取付け状況を示す。センシングリードはき裂発生位置をはさみできるだけ接近して取付けることが精度上望ましいが、疲れき裂発生点になるのを避ける必要がある。図-5は、試験体円孔壁に生じた疲れき裂寸法と電位差出力Lとの関係を示す校正直線で、円孔壁に表面長さ 0.5mm程度のき裂が発生すれば、L値に約 0.05Vの変化が生じ、き裂発生 の徴候を検知することができる。腐食環境下の試験では、き裂の顕微鏡検測の際に腐食槽をそのつど取りはずす必要があり、また塗装試験体では塗膜下に発生する微小き裂を表面から検測することは不可能なので交流ポテンシャル法はき裂の早期発見に有効な手段である。

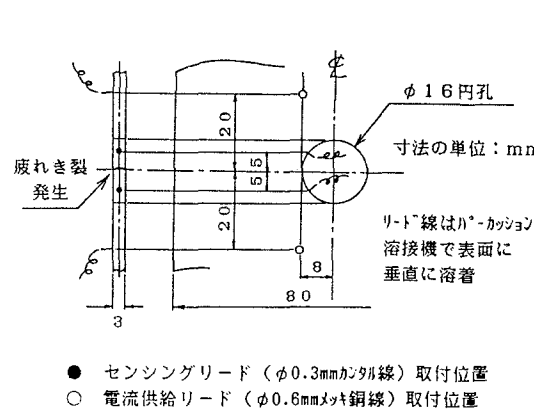


図-4 交流ポテンシャル法による
疲れき裂の検知

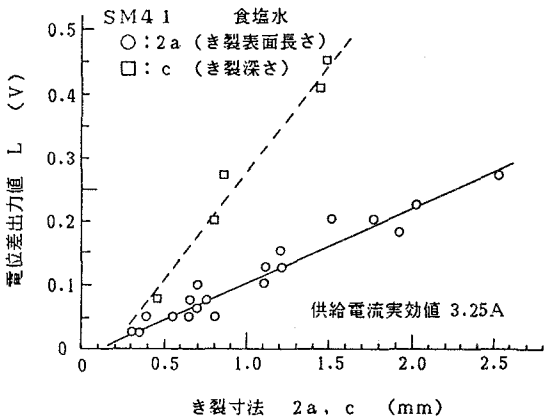


図-5 円孔壁のき裂寸法と電位差出力値
との関係

(5) 塗装試験体

SM41とSM58試験体の一部には、円孔部に防錆塗装を施し、腐食環境下における疲れ寿命の低下防止に及ぼす塗装効果を検討した。塗装系は鋼鉄道橋の防錆塗装に常用される表-3に示す亜酸化鉛系^{3,5)}のものとし、塗装終了後、SM41材で30日、SM58材で15日経って疲れ試験に供された。

3. 腐食環境下の疲れき裂発生寿命

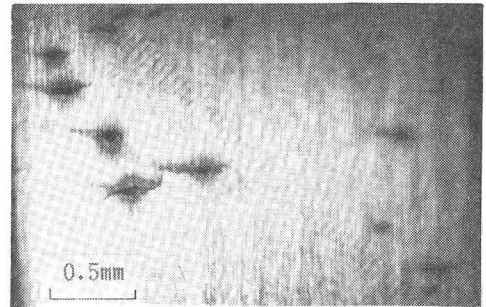
(1) 腐食ピットの生成とき裂の発生

疲れき裂は、各試験体とも円孔切欠き底

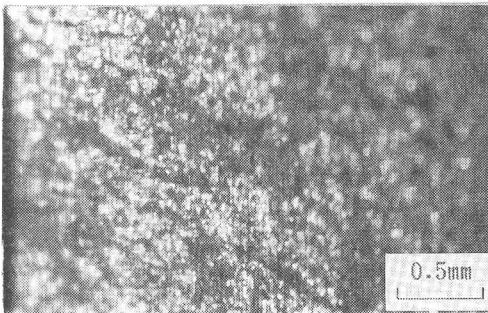
の応力集中部から発生している。大気中疲れでは、試験体表面に発錆は見られず、き裂は円孔壁の一箇所のみから発生したが、腐食疲れでは写真-1に示すように応力集中部に生じた複数の腐食ピットを起点としてき裂が発生し、また、き裂進展の過程でこれらのき裂の合体も認められた。ただし、蒸留水疲れでは薄い錆が点在する程度で、大気中の疲れ限度(SM41試験体で $S_r=205\text{MPa}$ 、切欠き底のひずみ範囲0.33%)以下の応力では腐食ピットはほとんど生成されなかったのに比べ、塩水疲れでは広範囲に発錆して錆の量も多く大気中の疲れ限度以下でも腐食ピットの発生、成長が顕著であり、塩分の影響による強い腐食作用が現れた。また、写真-2に示すようなき裂の起点となりえる深いピット(深さ0.04~0.3 mm)は円孔壁の応力集中部でのみ認められたことから、腐食環境と合わせて大きな繰返し応力が腐食ピットの形成、成長を促進していることがわかる。上述の腐食ピットの生成およびき裂発生性状に関し

表-3 塗装試験体の塗装状況

	塗 装 料		塗 装 時		乾燥時間 (h)	合計乾燥 塗膜厚 (μm)
			温度($^{\circ}\text{C}$)	湿度(%)		
第1層	エッチングプライマ-2種	主剤4,硬化剤1を直前混合	7.8	36.2	23.5	10~20
第2層	亜酸化鉛さび止めペイント	亜酸化鉛粉1, 溶解塗料 4を直前混合	12.1	33.7	47.5	45~55
第3層	〃	〃	9.7	35.1	47.5	85~95
第4層	長油性フタル酸樹脂塗料・中塗用	1. 液 性 (灰白色)	11.9	33.8	46.5	109~130
第5層	長油性フタル酸樹脂塗料・上塗用	〃	9.5	35.7		148~170



(a) 蒸留水 ($S_r=225\text{MPa}$, $N=1.9 \times 10^5$ cycles)



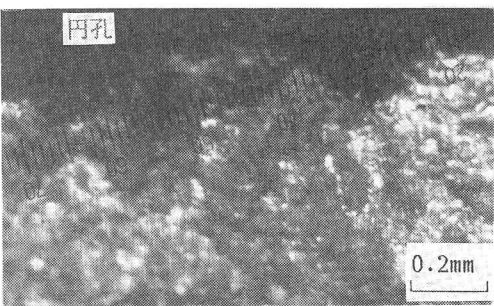
(b) 酸性水 ($S_r=118\text{MPa}$, $N=6.0 \times 10^5$ cycles) (c) 塩水 ($S_r=186\text{MPa}$, $N=1.4 \times 10^5$ cycles)

写真-1 SM41試験体円孔壁に生じた疲れき裂

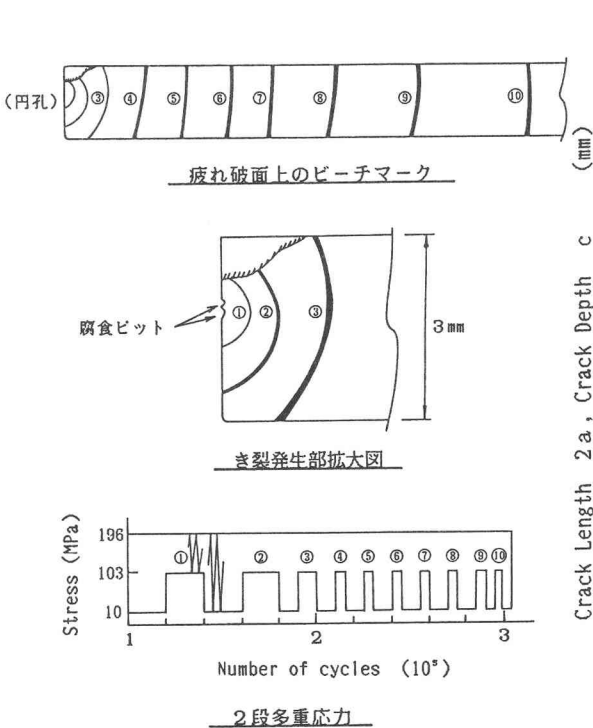
て、鋼種による相違は見られない。なお、腐食環境下では疲れき裂が発生した付近はその周囲に比べて発錆量が目立って多く、このことはき裂発見の有力な手がかりとなった。

（２）き裂発生寿命の定義

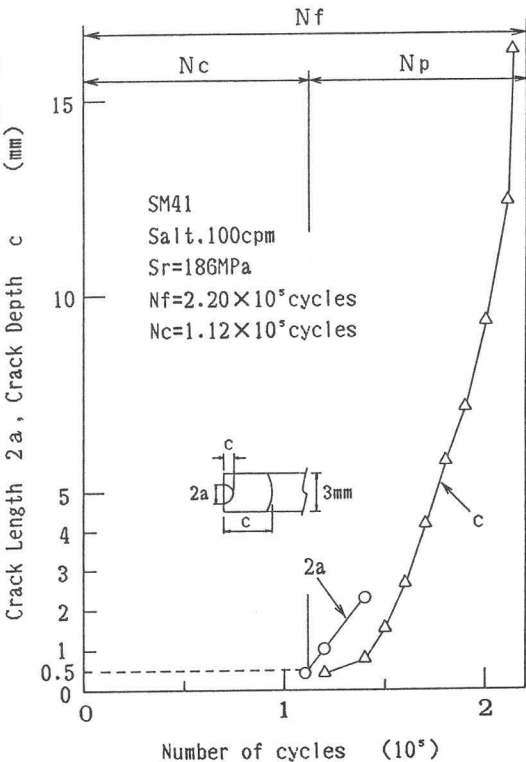
図－６は写真－１（ｃ）に示す試験体の疲れ破面をスケッチしたものである。破面上には２個の腐食ピットと所定繰返し数のときのき裂形状が残されており、腐食ピットを起点としてき裂が生じ、半だ円状に進展して板厚貫通後、二次元き裂として板幅方向に進展する様子がわかる。ビーチマークおよび顕微鏡観察から読み取ったき裂の表面長さ $2a$ 、深さ c と応力繰返し数 N との関係を図－７に示す。試験応力の大きさにより多少の相違はあるが、他の試験体においても板厚を貫通するまでに破断までの応力繰返し数の半分以上を要していた。溶接接合部材の場合には、溶接部から発生する疲れき裂は荷重繰返しの早期から進展するものと考えられる。しかし円孔切欠き試験体などの大気中疲れ試験では、かなりの荷重繰返し後に切欠き底からき裂が発生しいわゆるき裂発生寿命が存在する。本研究では試験体の大気中および腐食環境下における疲れ性状を比較検討する必要から、き



写真－２ 疲れ破面上の腐食ピット
 (SM41, 塩水, 900cpm, $Sr=108\text{MPa}$)



図－６ 疲れ破面上の腐食ピットとビーチマーク
 (SM41, 塩水, 100cpm)



図－７ 塩水疲れ試験体のき裂進展曲線

裂発生寿命なる概念を用いることとした。き裂発生寿命 N_c を定義する場合に基準とするき裂寸法は材料の結晶粒の大きさである $10\mu\text{m}$ 程度のものから²⁷⁾、目視等により検知が可能な 1mm 以上のものまで²⁶⁾、研究者によりかなりの幅がみられる。本研究では、腐食ピットの大きさおよび検出精度を考慮し、円孔壁面での長さ $2a=0.5\text{mm}$ を基準とし、き裂長さがピットを含めてこの値に達するまでに要した応力繰返し数を N_c と定義した。各試験体の破断寿命 N_f に占める N_c の割合を図-8に示す。 N_c/N_f は大気中および蒸留水疲れでは 0.6 以上であるが、塩水および酸性水疲れでは円孔壁に生じた平行き裂の相互干渉により極端にき裂進展寿命 $N_p (=N_f - N_c)$ の長くなったものを除き $0.3 \sim 0.6$ となっており、全寿命のうち比較的早期にき裂が発生することを示している。

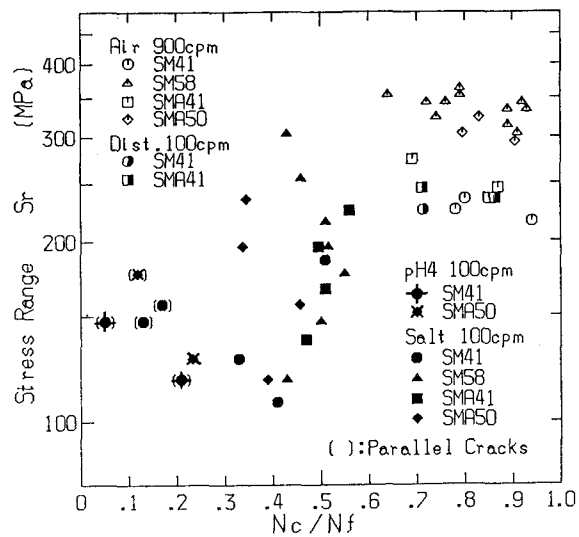


図-8 各試験体の N_c/N_f

(3) 腐食環境下の疲れき裂発生寿命

図-9にSM41およびSM58試験体について大気中、蒸留水(SM41のみ)、酸性水(SM41のみ)および塩水環境下で求めた $S_r \sim N_c$ 線図を示す。 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。図中、蒸留水疲れのうち $N_c < 10^4$ 回で矢印付のものは蒸留水を注ぎかけていない側の円孔壁からき裂が発生したものである。室内大気中の水蒸気により低炭素鋼試験体の疲れ寿命が低下したとの報告¹⁴⁾から、この場合は腐食槽内の湿気の影響(相対湿度90%以上)が蒸留水下より強かったとも考えられるが、いずれにせよ、長寿命側では大気中と比較して蒸留水による疲れ強さの低下はあまり認められない。ただし、実際の雨水は弱酸性をおびた大気中の浮遊物が溶け込んでいるなど²³⁾、蒸留水の場合より疲れ強さに悪影響を与える可能性が考えられる。

一方、塩水疲れでは両鋼種とも大気中に比べて疲れ強さの低下が著しい。特にSM58材では、SM41材に比して大気中の疲れ強さは高いものの、塩水疲れの $S_r \sim N_c$ 線はほぼ重なっており、腐食疲れによる強度低下の割合が大きくなっている。50万回強さについてみると、大気中でSM41材が225MPa、SM58材が330MPaであるのに対し、塩水下では両鋼種ともほぼ120MPaでその低減率は前者で47%、後者では64%に達している。図中には両鋼種の大気中および塩水下の $S_r \sim N_f$ 線をあわせ示したが、両鋼種とも大気中では $S_r \sim N_c$ 線とほぼ重なり、塩水疲れでは両者間に差が生じている。また、SM41材の酸性水下における $S_r \sim N_c$ 関係は塩水下の場合に準じている。

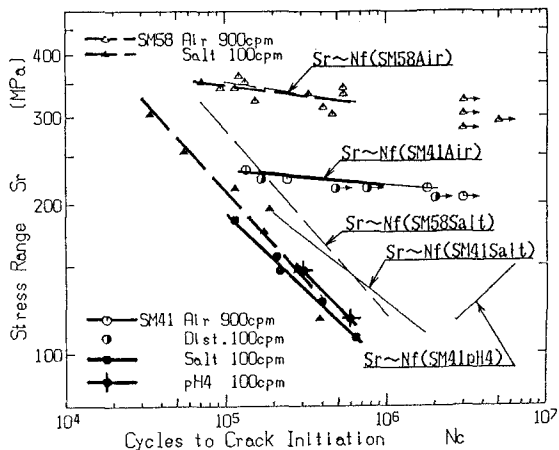


図-9 SM41およびSM58試験体の $S_r \sim N_c$ 線図

図-10, 11は耐候性鋼試験体について求めた各環境下のSr~Nc線図である。SMA41材の蒸留水疲れでは短寿命側で大気中より疲れ強さが低いが、長寿命側ではSM41材と同様に大気中と同程度の疲れ強さを示している。塩水疲れではSr~Nc、Sr~Nf線ともSM41のものと全く一致し、化学成分の違いによる影響は見られない。SMA50材については大気中に比し塩水疲れの低減率が大きく、塩水疲れのSr~Nc線はSMA41、SM41のものとほぼ一致しており、耐候性鋼材を用いても安定錆が形成される前に塩水環境下で繰返し荷重を受ける場合、Ncは普通鋼と同等であることが示された。また、図-9~11より塩水疲れにおけるSr~Nc関係は鋼種によらず両対数紙上でほぼ一本の直線で表わされ、腐食疲れによるピットの生成とそれを起点としたき裂の発生過程は、鋼材の静的強さおよび化学成分に影響されないことが明らかとなった。なお、酸性水疲れでは、Ncの低下は塩水疲れの場合に比しやや軽微であった。

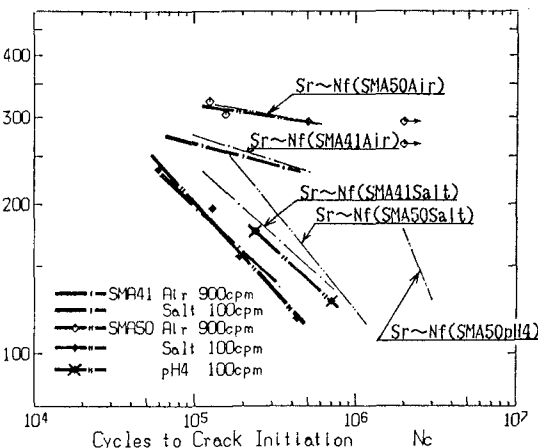
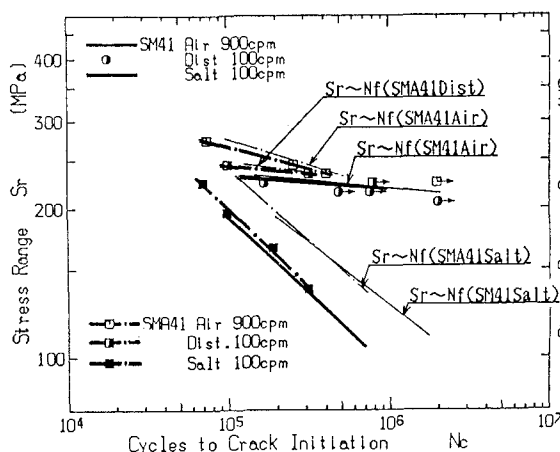


図-10 SMA41試験体のSr~Nc線図 図-11 SMA50試験体のSr~Nc線図

(4) 疲れ寿命に及ぼす応力繰返し速度の影響

蒸留水および塩水腐食を受けるSM41試験体のNcおよびNfに及ぼす応力繰返し速度の影響

を図-12に示す。蒸留水疲れでは応力繰返し速度の影響はほとんど現れていないが、塩水疲れではよく知られているように、応力繰返し速度効果が現われ、900cpmよりも100cpmの場合で応力繰返し回数が短くなる。いまNc、Np およびNfについてその低下割合をみると、例えばSr=120MPaではNc:105万回(900cpm)→50万回(100cpm)で約1/2、Np:305万回→80万回で約1/4、Nf:410万回→130万回と約1/3に低下しており、Nc、NfよりNpに對し応力繰返し速度の影響が強く現れている。なお、このときき裂発生までの経過時間は900cpmの19hに對し、100cpmでは83hと塩水環境下にある時間は約4.5倍に増大している。

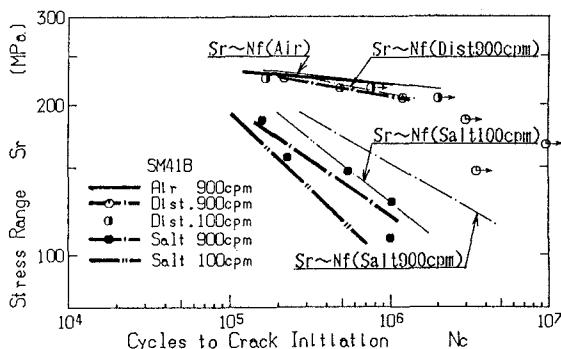


図-12 Sr~Nc, Nf 関係に及ぼす
応力繰返し速度の影響

(5) 塗装による強度低下の防止効果

SM41およびSM58塗装試験体の塩水環境下におけるSr~Nc線図を図-13に示す。同図中にあわせ示した両鋼種の大気中および塩水疲れのSr~Nc線と比較すると、SM41材では大気中と同等以上、SM58材では大気中と同程度の疲れ強さを確保しており、塗装により腐食作用が遮断され、Ncの低下防止効果は充分認められる。なお、き裂発生後破面に残したビーチマークと塗膜に割れが生じた応力繰返し数を照合すると、塗膜に割れが生じたのはき裂が試験体の板厚を貫通した後、すなわちき裂深さが3~4mmに達した時点であることがわかり、このことから割れの原因はき裂の成長に伴う開口量の増大によるものと考えられる。

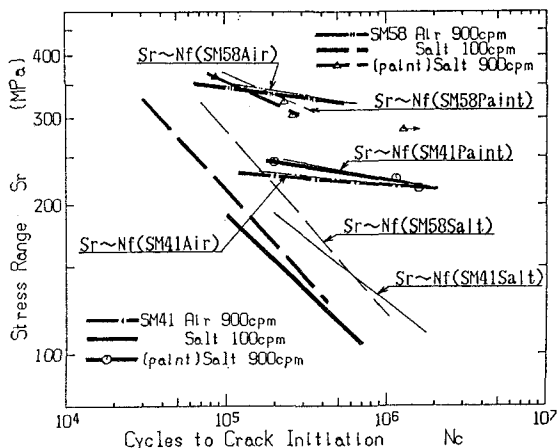


図-13 塗装試験体のSr~Nc線図

4. 腐食ピットの成長とき裂の進展

(1) 腐食ピットからのき裂発生条件

写真-1あるいは図-6に示したように腐食環境下において疲れき裂は全て円孔壁に生じた腐食ピットを起点として発生しており、き裂発生寿命はこれら腐食ピットの成長挙動および、腐食ピットからのき裂発生特性に大きく影響されるものと考えられる。

図-14に、塩水および酸性水疲れ試験体の破断面から読み取ったき裂の起点となった腐食ピットの深さDと応力範囲Srとの関係を示す。プロットされたD値は、Srが小さくなるほど増加しており、かつ鋼種による違いはほとんど見られない。SM41材では、応力繰返し速度100cpmのDが900cpmのものに比べて若干大きい傾向があり、き裂発生後も腐食が進んでいることを示しているが、特に低応力域ではその差がわずかであり、無視できる程度であることからこれらのD値は、き裂発生時のものと見なすことができる。

腐食ピットがある程度の深さになるとピット底から疲れき裂が発生することは知られているが²²⁾、腐食ピットと疲れ強さとの関係についてはなお不明の点が多く、ピットをき裂とみなして応力拡大係数Kを導入する試み²²⁾もなされている。ここでは、腐食ピットを半円板状(半径D)の初期き裂と仮定し、(1)式により応力拡大係数範囲ΔKを求めた。

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

ここに、Fgは、円孔から生じたき裂に対する補正係数、Fwは有限板幅およびき裂の偏心の影響を考慮した補正係数で、 $F_w = \{\sec(\pi \lambda / 2) \cdot \sin(2\lambda \varepsilon) / 2\lambda \varepsilon\}^{1/2}$ 、 $\lambda = (2b+D)/(w-D)$ 、 $\varepsilon = D/w$ 、(bは、円孔の半径、wは板幅)である²²⁾。

図-14中に示した曲線は、各試験体について求めたΔKの平均値6.3MPa√mmに対する等ΔK曲線であり、プロットされた点とほぼ一致している。これより、腐食ピットからき裂

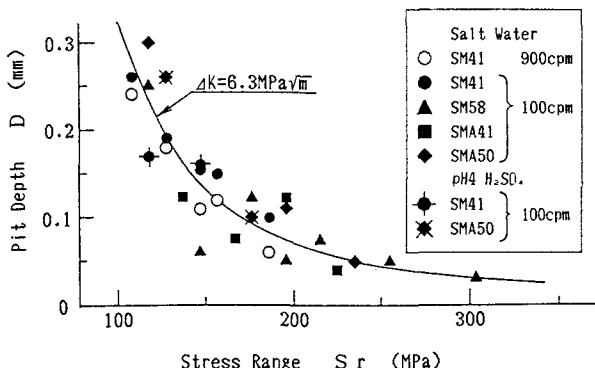


図-14 腐食ピットの深さと応力範囲の関係

が発生する閾値条件は鋼種に拘わらず一本の ΔK 曲線から求めることができる。

(2) き裂進展速度と腐食ピット成長速度

図-15に示すとおり、円孔壁から発生した板厚貫通前のき裂形状は、片側に貫通したもののおよび平行に生じて相互干渉を受けているものを除き、ほぼ半円形に近似できる。したがって、板厚貫通前については半円板き裂(半径 a または c)として、(1)式により、また、板厚貫通後は二次元き裂として(2)式により

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

ΔK を算定し、き裂進展速度 da/dN および dc/dN との関係を求めた。

図-16にSM41試験体について求めた、各環境下のき裂進展速度と ΔK の関係を示す。図中の大気中データは、95%信頼区間を表す。塩水および酸性水環境下において応力繰返し速度が100cpmの場合は、板厚貫通前の微小き裂の進展速度が大気中に比し速くなる傾向^{9,10)}が見られるが、板厚貫通後はほとんど変わらなくなる。また、900cpmの場合は板厚貫通直後の巨視き裂に対し著しい減速領域が認められるが、これは塩水疲れの場合にみられるき裂内の腐食生成物によるくさび効果¹¹⁾によるものと考えられる。

また、図-16中には表面長さ $2a=0.5\text{mm}$ に相当する深さ $D=0.18\sim 0.26\text{mm}$ の腐食ピットについて(図

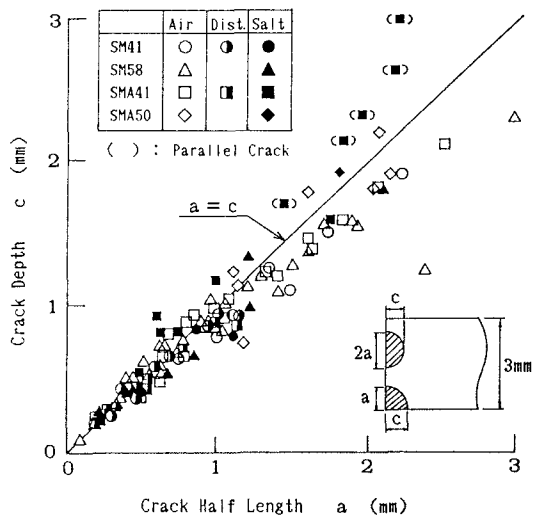


図-15 板厚貫通前のき裂長さとの深さの関係

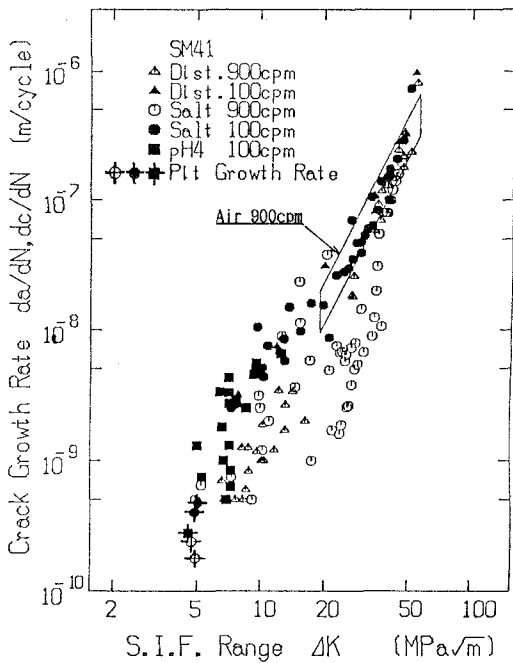


図-16 き裂進展速度と腐食ピット成長速度 (SM41)

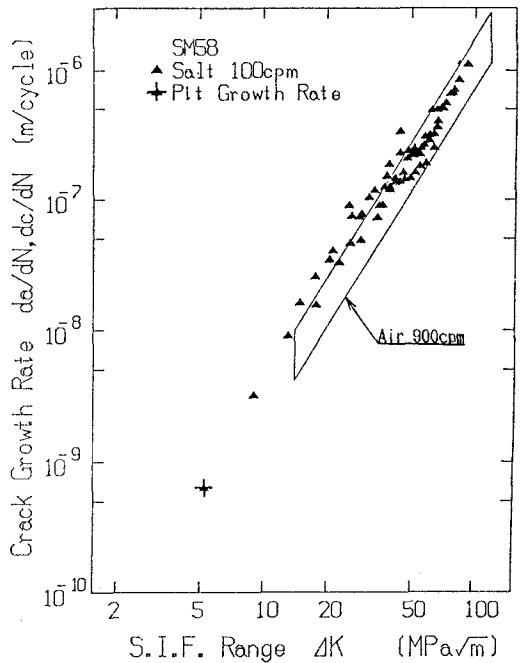
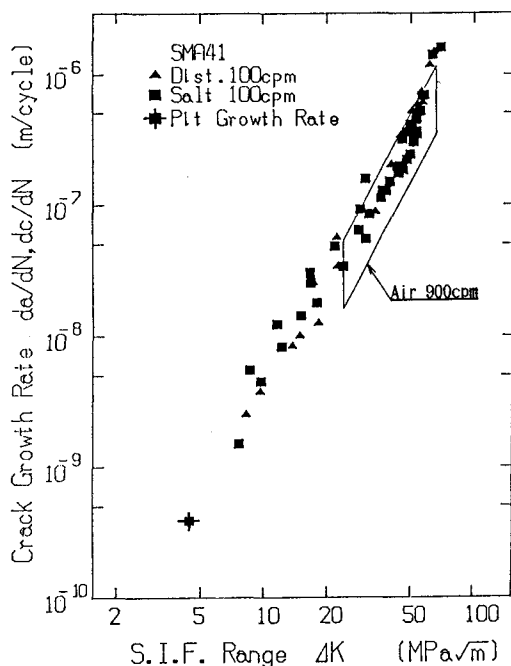


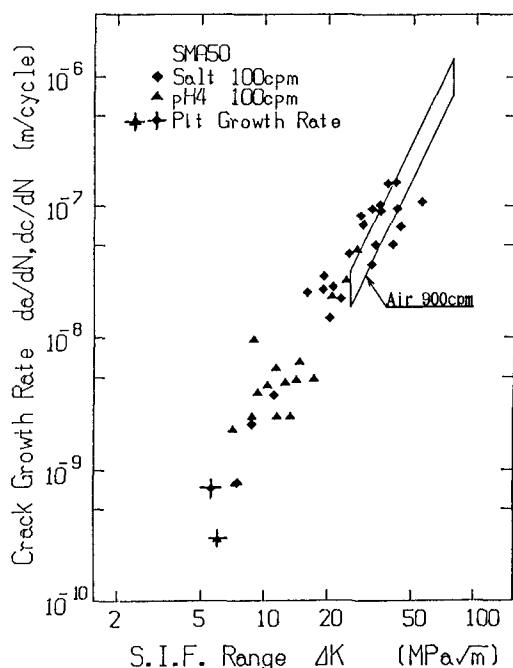
図-17 き裂進展速度と腐食ピット成長速度 (SM58)

－14参照）、その成長速度 $dD/dN(=D/N_c)$ と腐食ピットをき裂と仮定して求めた ΔK の平均値の関係もあわせ示した。 dD/dN にも応力繰返し速度の影響が現れ、100cpmでは900cpmに比べ約2倍に速くなっている。これらの腐食ピット成長速度はき裂進展速度の低速側の延長線上にあり、 5×10^{-10} m/cycle 以下は、繰返し応力の助けをかりた腐食ピットの成長領域であると考えられる。図－17～19は、SM58、SMA41およびSMA50材のき裂進展速度および腐食ピット成長速度をあわせ示したものである。SM41の場合と同様、腐食環境下では板厚貫通前の微小き裂の進展速度は大気中と比べて速い傾向があり、また腐食ピット成長速度はいずれも 5×10^{-10} m/cycle付近に分布している。

以上より、図－9～11に示した塩水疲れにおける $S_r \sim N_c$ 関係が鋼種によらずほぼ一本の直線で表わせるのは、き裂発生の原因となる腐食ピットの成長速度および腐食ピットからのき裂発生条件が、鋼種の違いがなく一定の条件に従うためであると考えられる。



図－18 き裂進展速度と腐食ピット成長速度 (SMA41)



図－19 き裂進展速度と腐食ピット成長速度 (SMA50)

5. おわりに

腐食環境下における円孔切欠き付SM41, SM58, SMA41およびSMA50試験体の疲れき裂発生・進展特性について実験的に検討した結果、以下のような結論が得られた。

(1) 塩水、酸性水疲れおよび作用力の大きい蒸留水疲れを受けた試験体円孔壁の応力集中部には複数の腐食ピットが形成され、それらを起点として疲れき裂が発生した。これは大気中疲れで円孔壁切欠き底の一番所から亀裂が発生進展するのと異なる性状である。腐食ピットの形成・成長は塩分などによる腐食作用および切欠きによる大きな繰返し応力で促進される。このような疲れき裂発生挙動に関して鋼種による違いは見られなかった。

(2) き裂発生起点となった腐食ピットの大きさや、き裂の検出精度を考慮し、円孔壁面に表面長さ0.5 mmのき裂を検出したときの応力繰返し数をき裂発生寿命 N_c と定義した。試験体の破断寿命 N_f に占める N

cの割合は大気中および蒸留水疲れでは0.6以上であったものが、塩水および酸性水疲れでは0.3～0.6に低下し比較的早期にき裂が発生した。

(3) 蒸留水疲れを受けた試験体のN cは大気中に比べ高応力域で低下するが、低応力域では腐食ビットの形成・成長が極めて緩慢であり寿命低下はあまり認められなかった。

(4) 塩水疲れを受けた試験体のN cは大気中に比べて大幅に低下し、鋼種に拘わらずほぼ一本のS r～N c線で表わすことができる。これは、腐食ビットの成長速度および腐食ビットからのき裂発生条件が鋼種によらずほぼ一律であることによるものである。50万回疲れ強さは大気中のそれに比し低減率はSM41材で46%、SM58材で64%に達し、高強度の鋼材ほどその低下は著しい。なお、作用応力範囲に対しき裂を発生するビット深さは応力拡大係数を用いて推定することができる。

(5) 酸性水疲れを受けた試験体のN cは大気中に比し低下するが、その度合は塩水疲れの場合よりやや軽微であった。

(6) 塩水疲れの場合、応力範囲120MPaで繰返し速度100cpmのSM41試験体のN cは900cpmの場合の約1/2に低下したが、き裂の起点となった腐食ビットの深さは両者ほぼ等しくN cの低下は腐食ビットの成長速度の差によるものと考えられる。一方、き裂進展寿命N p (=N f - N c) は約1/4となり低下の割合はN cに比べて大きい。これは100cpmで板厚貫通前の微小き裂の進展が加速されるのに加えて900cpmでは板厚貫通後の巨視き裂の進展が著しく減速されることによるものである。

(7) 試験体に塗装を施すことにより、塩水疲れにおけるN cの低下を防止できることを確認した。この際、試験体切欠き部の塗膜に割れが生じるのはき裂が板幅方向に深さ3～4mmにまで成長した時点であった。

(8) 安定錆が形成される前の耐候性鋼材の腐食環境下における疲れ性状は特に普通鋼と異なる点は認められなかった。

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、黒田正和教授および榊原豊助手から貴重な助言を受け、実験には池田正志技官のご協力を得た。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究C）によるものである。ここに、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) たとえば、遠藤吉郎・駒井謙治郎：金属の腐食疲労と強度設計、養賢堂、1982。
- 2) 日本鋼構造協会技術委員会耐用性調査小委員会：鋼構造物の耐用性調査報告・鉄道橋編、JSSC, Vol.5, No.39, pp.13～15, 1969。
- 3) 日本鋼構造協会技術委員会耐用性調査小委員会：鋼構造物の耐用性調査報告・道路橋編、JSSC, Vol.8, No.84, pp.6～8, 1972。
- 4) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説（鋼鉄道橋）、1983。
- 5) 国鉄鉄道技術研究所：建造物の保守並びに健全度診断法に関する研究報告書、1958。
- 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, 1973.6。
- 7) 奥田寿夫・浅川和夫：橋りょう用鋼材の腐食疲労強度、国鉄鉄道技術研究所速報、No.73-217, 1973.11。
- 8) 国広哲男・井上啓一・福田孝男：耐候性鋼材の大気曝露調査、建設省土木研究所資料、第729号, 1972.2。
- 9) 山田健太郎・村山眞・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, 1983.9。
- 10) 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, Sep.1983。
- 11) 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, 1987.4。
- 12) 遠藤吉郎・駒井謙治郎・木下定：長寿命域ならびに乾湿繰返しにおける腐食疲労強度、材料、第25巻、第276号, pp.894～898, 1976.9。

- 13) 岡崎章三・中村宏・垣成利康：高張力鋼の腐食疲労強度について，材料，第28巻，第312号，pp.887～893，1979.9.
- 14) 田中道七・河瀬宗之：低炭素鋼の疲労強度に及ぼす大気湿度の影響，材料，第29巻，第323号，pp.815～821，1980.8.
- 15) 西島敏・阿部孝行・増田千利・蛭川寿：食塩水環境における低合金鋼の回転曲げ腐食疲労特性と繰返し速度効果，日本機械学会論文集（A編），51巻，461号，pp.156～160，1985.1.
- 16) 戸梶恵郎・安藤善司・今井利雄・小島孝博：食塩水中における高張力鋼の疲労き裂進展の遅延挙動と試験片板厚の影響について，日本機械学会論文集（A編），49巻，442号，pp.677～684，1983.6.
- 17) 駒井謙治郎・敷田卓祐・遠藤吉郎：腐食疲労き裂進展における腐食生成物のくさび効果に関する研究，日本機械学会論文集（A編），50巻，456号，pp.1453～1460，1984.8.
- 18) Barsom, J.M. : Effect of Cyclic Stress Form on Corrosion Fatigue Crack Propagation below K_{ISCC} in a High Yield Strength Steel, Proc. Intern. Conf. Corrosion Fatigue, NACE-2, pp.424～436, 1972.
- 19) Atkinson, J.D. and Lindley, T.C. : Effect of Stress Waveform and Hold-time on Environmentally Assisted Fatigue Crack Propagation in C-Mn Structural Steel. Metal Science, pp.444～448, 1979.
- 20) Congleton, J., Craig, J.H., Denton, B.K. and Parkins, R.N. : Crack Growth in HY80 and HY130 Steels by Corrosion Fatigue, Metal Science, pp.436～443, July. 1979.
- 21) Vosikovsky, O. : Fatigue Crack Growth in HY130 Steel Weldments in Air and Water, Welding Research Supplement, pp.255～258, Sep. 1980.
- 22) Jaske, C.E., Broek, D., Slater, J.E. and Anderson, W.E. : Corrosion Fatigue of Structural Steels in Seawater and for Offshore Applications, ASTM STP.642, pp.19～47, 1978.
- 23) Sharp, J.V. : The Use of Steel and Concrete in the Construction of North Sea Oil Production Platforms, J. of Materials Science 14, pp.1773～1799, 1979.
- 24) Gooch, T.G. and Booth, G.S. : Corrosion Fatigue of Offshore Structures, Metal Science, pp.402～410, July. 1979.
- 25) Smart, J.S. : Corrosion Failure of Offshore Steel Platforms, Materials Performance, pp.41～48, May. 1980.
- 26) 永井欣一・竹内信彦・森正浩・矢島浩・山本豊・井上寛：海水中における構造物の疲労強度，三菱重工技報，Vol.13, No.4, pp.583～593, 1976.7.
- 27) 戸梶恵郎・安藤善司・水谷日出雄：各種環境中における高強度鋼の疲労微小き裂の発生と成長挙動，材料，第33巻，第366号，pp.331～337，1984.3.
- 28) 石原外美・塩沢和章・宮尾嘉寿：炭素鋼の腐食疲労におけるき裂長さ分布，日本機械学会論文集（A編），49巻，454号，pp.1123～1142，1984.6.
- 29) 北川英夫・中曽根祐司・下平益夫：高張力鋼平滑材の腐食疲労における微小表面き裂の成長，日本機械学会論文集（A編），51巻，463号，pp.587～595，1985.3.
- 30) Nakai, Y., Tanaka, K. and Wei, R.P. : Short-Crack Growth in Corrosion Fatigue for a High Strength Steel, Engineering Fracture Mechanics, Vol.24, No.3, pp.433～444, 1986.
- 31) Hirose, Y. and Mura, T. : Crack Nucleation and Propagation of Corrosion Fatigue in High-Strength Steel, Engineering Fracture Mechanics, Vol.22, No.5, pp.859～870, 1985.
- 32) 河合末男・笠井憲一：腐食疲労の許容応力に関する考察日本機械学会論文集（A編），51巻，461号，pp.23～30，1985.1.
- 33) 玉置元則・平木隆年・渡辺弘：大気中の窒素酸化物による雨水の質的变化，大気汚染学会誌，第20巻，第2号，pp.71～81. 1985.
- 34) 伊藤文人：実働荷重による鉄道橋の疲労被害推定，鉄道技術研究報告，No.796, 1969.4.
- 35) 国鉄：鉄けた塗装工事設計施工指針（案），1981.
- 36) 石田誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館，1976.

（1987年10月16日受付）