

腐食環境下での鋼切欠部材の疲労強度 ——マイナー則の適用性について——

CORROSION FATIGUE STRENGTH OF NOTCHED STEEL PLATE: APPLICABILITY OF MINER'S LAW

阿部英彦*・西村俊夫**・黒田充紀***・菅谷晃久****

Hidehiko ABE, Toshio NISHIMURA, Mitsutoshi KURODA and Akihisa SUGAYA

*足利工業大学教授 工学部土木工学科 (〒326 足利市大前町268-1)

**元足利工業大学教授

***足利工業大学講師 工学部土木工学科

**** (株) 増淵組 (研究当時 足利工業大学大学院修士課程)

In Japan many bridges are constructed near the sea shore or across the straits. Because they are constantly exposed to salt splash or salty atmosphere, the paint films are apt to be injured and the bare steel elements are exposed in such an unfavorable circumstance. The authors conducted series of fatigue tests in salt water, and found how the fatigue strength reduced in such a case, compared with the fatigue strength in ordinary dry air. Also as a simple case of variable loadings, two different amplitudes of loading were applied in different combinations. It was revealed that in spite of considerable scattering of test results, the Miner's law could be applied in general in the fatigue strength in corrosive atmosphere, too.

Key Words: fatigue tests, corrosion, Miner's law

1. 序 文

鋼構造の疲労寿命は、通常、実験室内における各種構造試験体の大気中での疲労実験結果をもとに評価される。しかし、海水などの腐食環境下においては、その疲労強度は大幅に低下する可能性がある。わが国では地形上、鉄道や道路などの交通路は海浜に隣接して建設されたものが多く、また最近では海上を横断して計画されるものも増加した。これらの路線に架設された鋼橋は波しぶきや潮風を受ける過酷な自然環境に曝されることになる。実際の鋼構造物では、もちろん防錆塗装が施されているが、多湿な条件下では塗装の劣化も早く、部材の鋼材が直接的に腐食疲労環境下に置かれる可能性は高い¹⁾。そこで、腐食環境下に曝される鋼橋に対しては、設計・維持管理などにおいて腐食疲労に対する配慮が重要である。しかし、わが国の橋梁においては、腐食疲労に対する配慮は十分になされていない。

近年、腐食環境に関連する疲労の試験データは着実に積み重ねられてきている。大気中である年数曝露した試験体の疲労試験²⁾、腐食した橋梁部材の疲労試験³⁾などが行われたが、これらは劣化した部材

の大気中疲労強度を調べたものである。塩水滴下などの腐食環境下における鋼部材の疲労強度の研究としては、切欠部材の亀裂発生挙動⁴⁾、隅肉溶接部の亀裂発生・進展挙動⁵⁾などが調べられている。

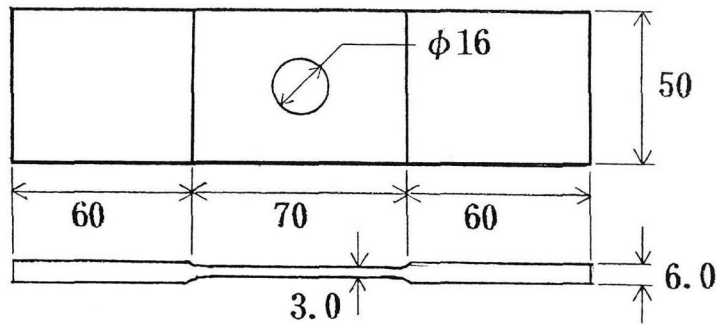
実際の構造物の疲労寿命評価を行うためには、さらに大きさと頻度が異なる荷重の組み合わせによる疲労効果を定量的に評価することが必要であると考えられる。種々の大きさと頻度の荷重による疲労効果を評価するのに古くからマイナー則⁶⁾(直線被害則)がしばしば利用されている。しかしながら、腐食環境下においても大気中と同様にマイナー則が適用できるかどうかについては、未だ不明な点が多い。

本研究では、円孔を持つ試験体を使用し、腐食環境下における寿命予測法としてのマイナー則の有効性の検証を試みた。腐食環境としては、試験体に止水処理を施した水槽を取り付けて、円孔の周縁に塩水を滴下した。まず、各種一定応力振幅による疲労試験を実施して、基本 SN 線を決定した。続いて、大小数種類の応力範囲を組み合わせる 2 段疲労試験を行い、試験結果とマイナー則による疲労寿命予測結果を比較検討した。

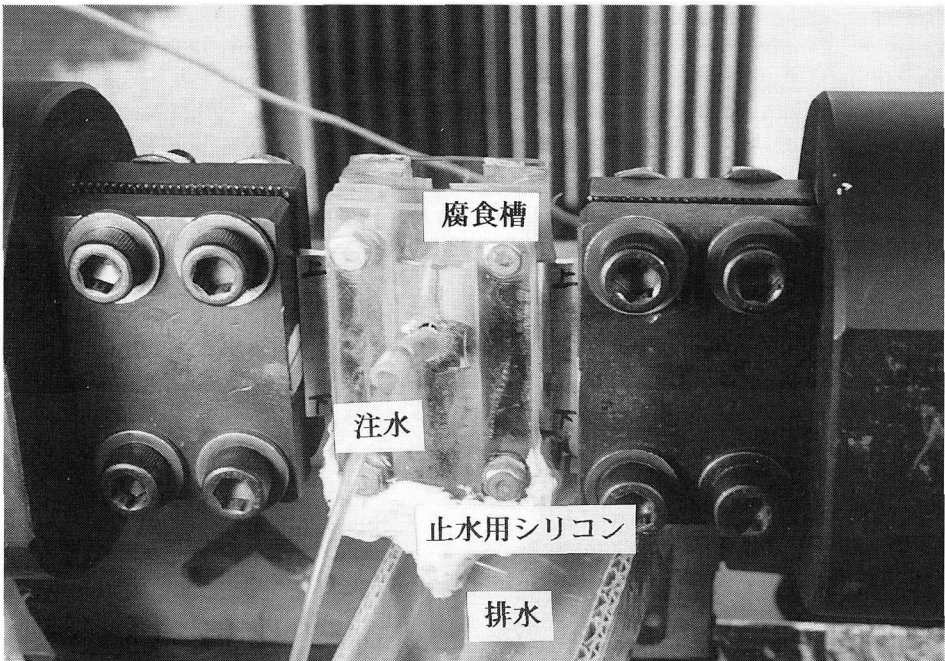
表－１ 材料の機械的性質と化学成分

機 械 的 性 質	降伏点(kgf/mm ²)	38
	引張強さ(kgf/mm ²)	48
	伸び(%)	25*
化 学 成 分 %	C	0.13
	Si	0.21
	Mn	0.72
	P	0.01
	S	0.002

* 標点距離=200mm



図－１ 試験体の形状と寸法



写真－１ 腐食環境 （左右のボルト４本は金属チャック固定用．試験片は腐食水槽とチャックの間に僅かに見えている．）

2. 実験方法

実験に使用した鋼材は溶接構造用のSM400Bで、厚さ6mmの鋼板から図－１に示す形状・寸法に試験体を削り出し、中央部に円孔をあけた。材料の機械的性質と化学成分は表－１に示すとおりである。円孔の周縁は、エメリー紙1000番で十分に磨いて仕

上げた。
腐食環境としては、写真－１に示すとおり、試験体を挟み込む形でアクリル樹脂製の水槽を取り付け、円孔部の下側だけに塩水（3%NaCl）を25℃、流量10ml/minで滴下させた。孔の下部は時間経過と共に錆びて行く。腐食水槽には止水処理を施しており、塩水は排水ホースを通して完全に排除される。
疲労試験機は電気油圧式サーボ型（容量5ton、島

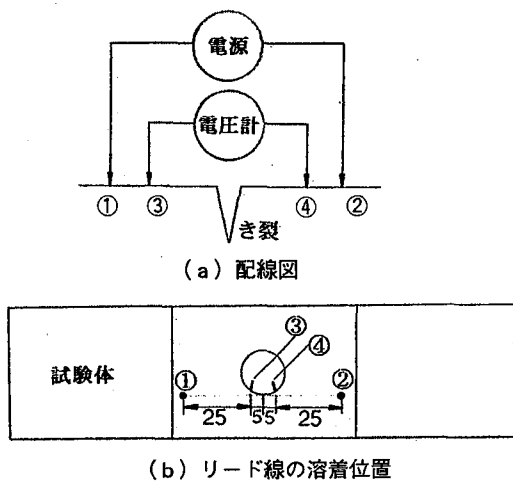


図-2 交流ポテンシャル法によるクラックメーター

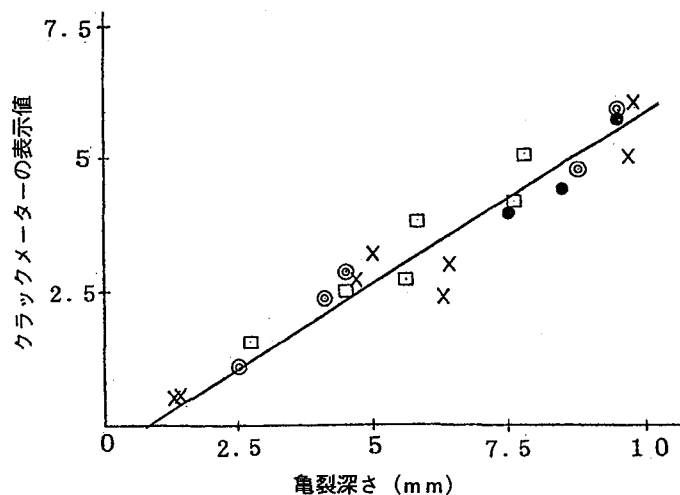


図-3 クラックメーター表示値と亀裂深さとの関係

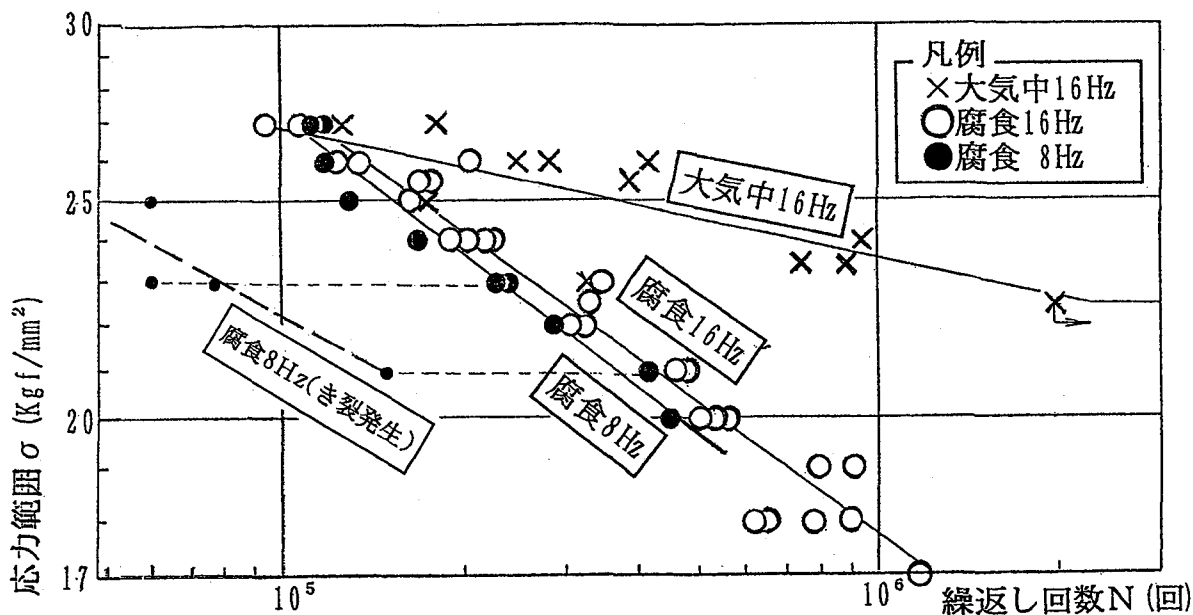


図-4 SN線図

津製作所製)で、写真-1に見られるように、腐食液が漏水した場合にも試験機を傷めないよう、水平載荷方式を採った。

荷重波形は正弦波で16Hzを標準とし、腐食時間の影響を考察するために、半分の8Hzも試みた。これらは既往の研究⁴⁾における繰返し速度よりも速い。しかし、後に示すように16Hzであっても大気中に対して腐食環境下における疲労寿命が著しく低

下すること、またその半分の速度である8Hzの結果が16Hzの結果(いずれも腐食環境下)と大きくは変わらないこと、などから、これらの速度で十分に腐食の影響を考慮できるものと考えた。応力変動は部分片振り引張りとし、下限応力として円孔部純断面積における公称応力が1.0kgf/mm²(9.8MPa)となるようにした。試験は荷重制御で行い全断面破壊時の載荷回数をもって破断寿命とした。

本研究では、破断寿命だけではなく、腐食環境における亀裂発生寿命も一部測定した。巨視的な亀裂発生を検出には、交流ポテンシャル法によるクラックメーターを用いた。図-2(a)に示すように、亀裂発生箇所を挟んで電極間に電流を流し、亀裂の両側に生じる電位差を測定するというのが交流ポテンシャル法の原理である。本試験では、図-2(b)に示すように、①と②の位置に電流供給（電源）リード線を、③と④の位置には電位差測定用リード線を抵抗溶接器によって溶着した。亀裂深さとクラックメーターの表示値とのキャリブレーションを行うために、ビーチマーク試験を行った。ビーチマーク試験の方法は、応力範囲 $\sigma=26\text{kgf/mm}^2$ でメーターの値が上昇し始めるまで繰り返し载荷する。この時点で既に亀裂は発生していることになる。続いて、 $\sigma=20\text{kgf/mm}^2$ (200 MPa)と 10kgf/mm^2 (98 MPa)とを10000回ずつ交互に载荷し、破断するまでこれを続ける。このようにして記録されたビーチマークの表面からの距離（亀裂の深さ）とクラックメーターの表示値の関係を図-3のように得た。4つの記号（●，×，○，□）はそれぞれ異なった試験体をであることを示している。これによれば、クラックメーターの値が0から上昇し始めるときには0.7mm程度の亀裂が既に発生していると読みとることができる。本研究では、これをもって亀裂発生とした。クラックメーターによる亀裂発生寿命の測定は8Hzの一部の試験に対してのみ行った。

3. 実験結果と考察

3.1. 一定応力振幅疲労試験

まず、基本となるSN線を求める必要があるので、一連の一定応力振幅の疲労試験を行った。本実験では大気中において16Hzで13本、腐食環境下では16Hzで12本および8Hzで12本の試験を行った。得られた結果を図-4に示す。図中の3本の実線は実験データを直線回帰して得られたもので、それぞれ次のSN線を示している。

$$\text{大気中16Hz} \quad \log \sigma = -0.0591 \log N + 1.72 \quad (1a)$$

$$\text{腐食環境16Hz} \quad \log \sigma = -0.193 \log N + 2.41 \quad (1b)$$

$$\text{腐食環境8Hz} \quad \log \sigma = -0.203 \log N + 2.45 \quad (1c)$$

大気中と腐食環境下の16Hzの2つのSN線図を比較すると、腐食環境下のほうが下側であり、かつ勾配が著しく急である。高応力少繰り返し数の範囲で両者の差が小さいのは、経過時間が短いので腐食の影響が小さいからであると考えられる。これに対し

て低応力多繰り返し数の範囲では、腐食環境下に置かれる時間が長くなるので、腐食の影響が大きくなったものと判断できる。例えば、破断までの時間の短い $\sigma=27\text{kgf/mm}^2$ (260 MPa)付近では、大気中と腐食環境下の破断寿命の差は認められない。一方、 $\sigma=22\text{kgf/mm}^2$ (220 MPa)（大気中における疲労限度）付近で比較すると、腐食の影響によって破断寿命は、1/7に減少している。この様に破断寿命は腐食によって大幅に短くなる。

腐食環境下で繰り返し载荷速度16Hzとその半分の8Hzに対する結果を比較すると、8Hzの結果のほうが16Hzの結果よりも僅かではあるが下側にある。これはより長い時間腐食環境下に置かれた影響と見ることができるが、この傾向は既往の実験研究でも認められている⁴⁾。なお、大気中の場合には、この程度の繰り返し速度の差はほとんど疲労強度に影響しないと言われているので、繰り返し速度を変化させる比較実験は行わなかった。

図-4には、8Hzに対応する亀裂発生寿命も併せて示した。この場合、亀裂発生寿命は破断寿命のおおむね1/3程度であり、かなり早期に亀裂が発生したことがわかる。坂野ら⁴⁾の同様の円孔を持つ試験片を用いた基礎的研究でも、腐食環境下においては亀裂発生寿命が大幅に減少することが確認されている。

3.2. 2段疲労試験

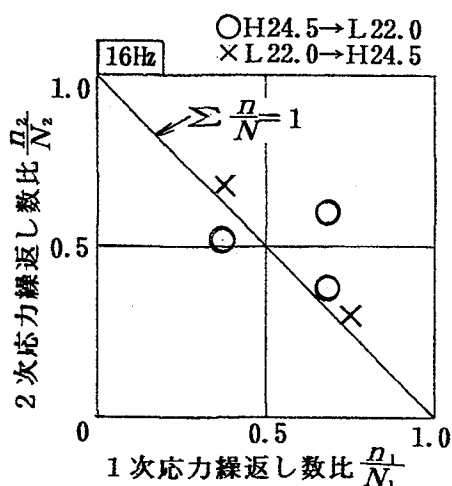
周知のようにマイナー（Miner）則⁶⁾は大きさが異なる荷重による疲労被害を次式で評価する。

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2)$$

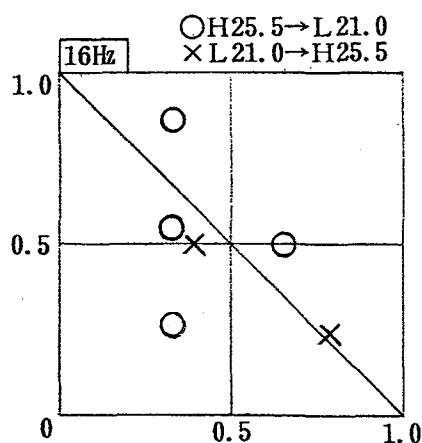
ここに、 N_i は応力範囲 σ_i を繰り返したときの破断寿命（回数）、 n_i/N_i は応力範囲が σ_i でその回数が n_i である応力ブロックによる疲労被害の増分を表す。マ

表-2 各種応力範囲に対する破断回数

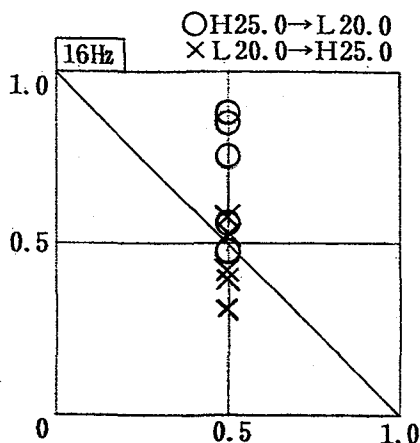
応力範囲 σ (kgf/mm ²)	破断回数
24.5	189951
22.0	331579
25.5	154424
21.0	421851
25.0	171092
20.0	543043



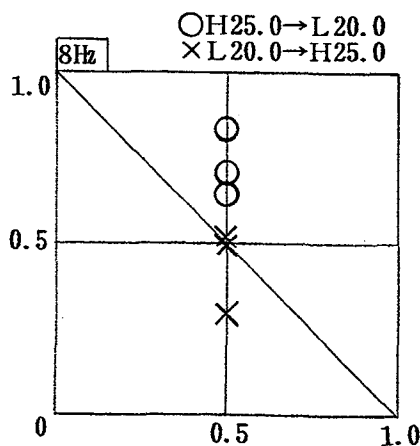
(a) 応力振幅差 $\Delta = 2.5 \text{ kgf/mm}^2$



(b) $\Delta = 4.5$



(c) $\Delta = 5.0$



(d) $\Delta = 5.0$

図-5 2段疲労試験結果とマイナー則による寿命予測結果の比較 (横軸=第1段階の応力範囲の繰返し数比, 縦軸=第2段階の応力範囲について破断に至るまでの繰返し数比。)

イナー則では、この被害増分の和が1に達したときに破壊が生じると仮定している。

本実験では最も基礎的な検討として $m=2$ の場合を考えた。まず、幾つかの応力範囲 σ_i を設定し、それに対応する破断寿命 N_i を求めておく必要があるが、これは先に図-4および式(1)で得られているSN線図から求めることができる。そのようにして腐食環境における16Hzと8Hzの各種応力範囲に対する破断寿命 N を求めた結果を表-2に示す。これらの中から高応力範囲(H)と低応力範囲(L)の幾つかの組み合わせを設定したが、その応力範囲差は2.5, 4.5および5.0kgf/mm²(25, 44, 49MPa)とした。

応力範囲差が2.5および4.5 kgf/mm²(25, 44 MPa)の場合に対しては、第1段階の応力範囲の繰返し数比 n_1/N_1 を約1/3の場合と2/3場合の2種類で疲労試験を行ったが、応力範囲差5.0kgf/mm²(49MPa)の場合に対しては比率 $n_1/N_1=1/2$ の場合のみで試験を実施した。

図-5は、横軸に第1段階の応力範囲の繰返し数比 n_1/N_1 を、縦軸に第2段階の応力範囲について破断に至るまでの繰返し数とその応力範囲での破断寿命の比 n_2/N_2 をとって整理したものである。また、グラフ上の実線は $n_2/N_2=1-n_1/N_1$ であり、試験結果がこの直線上に載れば、試験結果とマイナー

則に合致したことになる。この直線よりも上側に実験結果がある場合は、マイナー則で予測される疲労寿命よりも長寿命であったことを示し、逆に下にある場合には短寿命であったことを示す。(a)~(d)図はそれぞれ応力振幅差が2.5, 4.5, 5.0および5.0 kgf/mm²(25, 44, 49および49MPa)の場合であり、(d)のみが8Hzの結果で、残りは16Hzの結果である。それぞれのグラフ内の記号○と×は、それぞれ第1段階の応力範囲が第2段階のそれよりも大きい場合(以下および図中HLと略記)と、小さい場合(同じくLHと略記)の結果を示す。

図-5(a)~(c)より、応力範囲差が小さい場合には実験結果とマイナー則による寿命予測結果が近くなっている。応力範囲差が5.0 kgf/mm²(49MPa)の場合には、HLに対して $\sum n/N > 1$ となる傾向が、逆にLHの場合には、ほぼ、 $\sum n/N \approx 1$ となる傾向が認められる。また、(c)図と(d)図を比較して、本実験の範囲ではマイナー則の適用性に対する繰返し速度の影響は、認められないといえる。

4. まとめ

本論文では、円孔を持つ試験体を用いて、塩水滴下による腐食環境下における疲労寿命予測法としてのマイナー則の適用性に関する基礎的な検討をした。実施した試験結果より得られた結論を以下にまとめる。

(1) 腐食環境下の2段階疲労試験において、第1段階と第2段階の応力範囲差が2.5 kgf/mm²(25MPa)程度の場合には、マイナー則によって寿命予測が可能と判断できる。

(2) 応力範囲差が5.0 kgf/mm²(49MPa)程度のときは、高応力範囲から低応力範囲に変更した場合、マイナー則による予測よりも実験結果は長寿命となる傾向が見られた。また、低応力範囲から高応力範囲に変更した場合には、マイナー則による予測と実験による疲労寿命がやや近づく傾向が見られた。

(3) 本研究の範囲では、腐食環境下におけるマイナー則の適用性に対して、繰返し速度の影響は認められなかった。ただし、これに関してはさらに遅い繰返し速度で確認することが必要であり、今後の課題として残った。

謝 辞：実験の実施にあたり、足利工業大学 土木工学科教務職員 末吉達也氏の協力を得たことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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) 山田健太郎・村山 真・近藤明雄・菊池洋一, 大気曝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) 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.
- 4) 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り欠き部材の疲れ亀裂発生寿命, 構造工学論文集, Vol.34 A, pp.469-481, 1988.
- 5) 坂野昌弘・新井 弘・西村俊夫, すみ肉溶接継手の腐食疲労亀裂発生・進展挙動, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.379-387, 1990.
- 6) Miner, M. A., Cumulative Damage in Fatigue, J. Appl. Mech., Vol. 12, 1945.
- 7) 石原・塩沢・宮尾, 炭素鋼の2段階2重疲労試験における累積損傷に関する研究, 材料, 第33巻, 第370号, 1984.

(1994年9月14日受付)