

隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動

FATIGUE CRACK INITIATION AND EARLY-STAGE PROPAGATION BEHAVIOR AT FILLET WELD TOES

三木千壽*・坂野昌弘**・豊田幸宏***

By Chitoshi MIKI, Masahiro SAKANO and Yukihiro TOYODA

Fatigue crack initiation and early-stage propagation behavior at fillet weld toes were studied. Six types of electrodes were used for welding of specimens. Fatigue tests were carried out under out-of-plane bending. Fatigue cracks initiated from small facets formed in the earlier stage of fatigue loading. Fatigue life of fillet welded joints could be estimated with adequate accuracy by regarding the facet as an initial crack.

1. はじめに

鋼橋の疲労損傷は、補剛材やガセットなどの取付に用いられる隅肉溶接端部に、それら付加板からの荷重伝達や部材の振動による主板の面外の繰返し曲げを原因として発生することが多い^{1,2)}。隅肉溶接継手では止端部の応力集中により応力繰返しの比較的早い時期に疲労亀裂が発生し、疲労寿命の大部分は深さが数mm程度までの微小な疲労亀裂の進展過程で占められる^{3,4)}。したがって、隅肉溶接部の疲労を考える上でそのような溶接止端からの微小な亀裂の発生および進展挙動が極めて重要である。

寿命の大半を疲労亀裂進展過程が占める溶接部の寿命推定には、亀裂の存在を前提とした破壊力学の手法が有効である。その場合に、仮定される初期亀裂寸法 a_i は寿命推定結果に大きな影響を及ぼす。従来の研究では、 a_i はアンダーカットなどを想定して0.2 mm程度^{5,6)}、あるいは実験値との対応を考慮して0.02~0.05mmの値が仮定されているが^{7,8)}、ブローホールのような明らかな初期欠陥が存在する場合と異なり、 a_i の設定にあいまいさが残されることは否めない。また、微小な疲労亀裂の進展は、隅肉溶接止端部の局所的な現象であることから溶接材料の影響を受けることが予想される。

本研究では、6種類の溶接材料で製作した隅肉溶接継手試験体を用いて面外曲げ疲労試験を実施して交流ポテンシャル法による疲労亀裂の検出と破面の電子顕微鏡観察から隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生およ

* 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

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

*** 工修 電力中央研究所 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

びその初期の進展挙動を検討し、破壊力学の手法を適用して疲労寿命解析を行う場合の初期亀裂寸法を設定した。

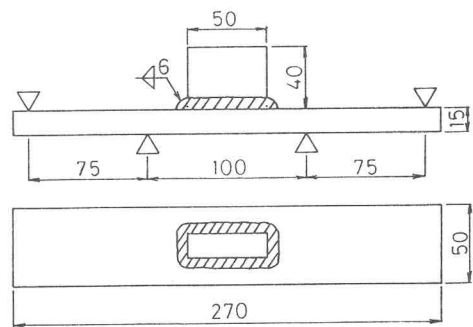
2. 実験方法

供試鋼材はSM50YAである。表－1にその機械的性質と化学成分を示す。鋼橋に生じた疲労損傷事例

表－1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

Mechanical Properties			Chemical Composition (%)					
Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	Cu x1000
390	560	25	17	45	147	21	7	10

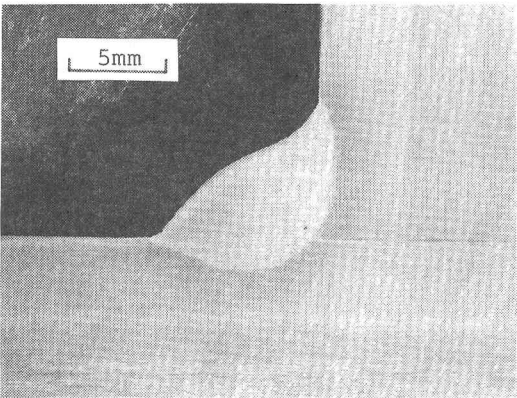
の分析結果によれば隅肉溶接部の特に回し溶接部止端から亀裂を生じることが多いことから、図－1に示すようなウェブガセットタイプの隅肉溶接継手試験体を用いた。溶接止端部近傍での疲労亀裂の挙動に対しては溶接材料が影響すると予想されるため、ここでは表－2に示す6種類の溶接材料を用いて試験体を製作した。写真－1に溶接部のマクロ写真の一例を示す。溶接部のビッカース硬さ（荷重49N）は、母材で190～220、熱影響部で320～380、溶接金属で260～320であり、溶接材料による違いはほとんど認められなかった。



図－1 試験体の形状と寸法

表－2 溶接材料の種類

試験体	溶 接 材 料
A	LB－52（低水素系溶接棒）
B	NW－77（低水素系溶接棒）
C	LBF－52A（鉄粉低水素系溶接棒）
D	N TL 52（鉄粉低水素系溶接棒）
E	MG50（CO ₂ 溶接用ワイヤ）
F	DW－100（CO ₂ 溶接用 フラックス入りワイヤ）



写真－1 溶接部のマクロ写真（B試験体）

疲労試験は電気油圧サーボ制御式疲労試験機を用い、実橋での疲労損傷が面外曲げによって生じることが多いことを考慮して図-1に示すような4点曲げ载荷で行った。繰返し速度は10~34Hzである。全ての疲労試験において、最大応力は250MPaに設定している。疲労亀裂発生を検出には交流ポテンシャル法を用いた。図-2に、ビーチマーク試験により求めた各試験体の亀裂深さと電位変化の関係を示す。横軸は、亀裂が板厚の半分まで達したときの電位変化値で無次元化したものである。亀裂発生位置が必ずしもプローブを溶着した試験体の中心線上とは限らないためややばらつきがあるが、ここで用いた装置では深さ0.2~0.5mm程度の疲労亀裂から検出することができる。ここでは、深さ1mmの亀裂が生じるまでの応力繰返し数を亀裂発生寿命 N_c と定義した。

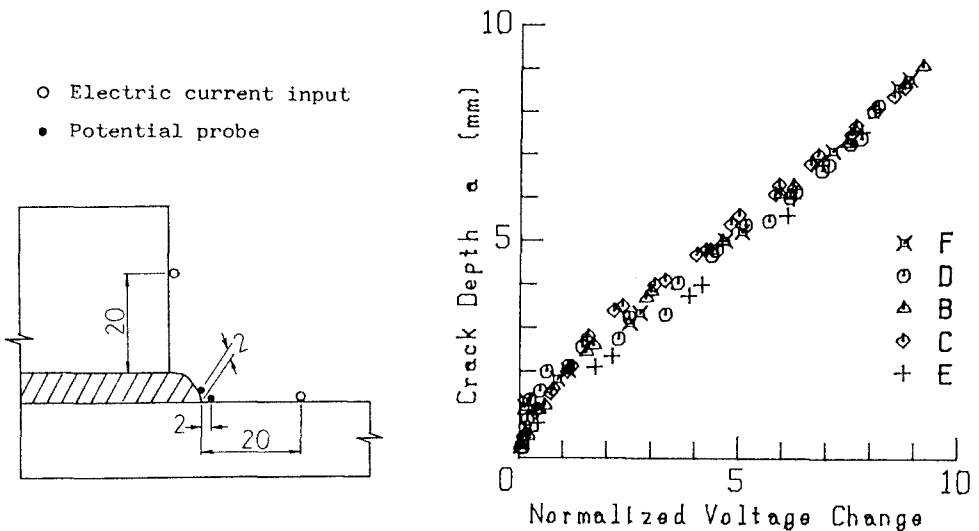


図-2 交流ポテンシャル法による疲労亀裂の検出

3. 疲労試験結果

図-3に各試験体の疲労亀裂発生寿命 N_c と破断寿命 N_f を示す。200万回より短い寿命領域では、 N_f に試験体の種類による違いはほとんど認められない。しかし、疲労限（ここでは2000万回で疲労亀裂が発生しない応力範囲と定義）については溶接材料により大きな差が生じている。最も高いのはF (CO_2 溶接用フラックス入ワイヤ) の120MPa、逆に最も低いものはE (CO_2 溶接用ワイヤ) の30~70MPa、そのほかの低水素系 (A, B) あるいは鉄粉低水素系 (C, D) 溶接棒を用いた4種類の試験体については70~100MPaのほぼ同程度の疲労限が存在している。各試験体の $S_r \sim N_c$ 線の関係は、 $S_r \sim N_f$ 線の関係と比較してややばらつきが大きくなっているもののほぼ同じ傾向を示している。図-4に S_r と亀裂進展寿命 $N_p (=N_f - N_c)$ の関係を示す。 $S_r \sim N_p$ 関係に試験体の種類による違いはほとんどみられないことから、隅肉溶接部の疲労寿命に及ぼす溶接材料の影響は深さ1mm程度までの微小な亀裂の進展過程に対するものであることがわかる。各試験体の N_c/N_f と応力範囲 S_r の関係を図-5に示す。 N_c/N_f は応力範囲および溶接材料によらず0.1~0.4の範囲にある。ここで定義した N_c が本質的にはさらに小さい亀裂の進展過程であることを考慮すれば、疲労亀裂は荷重繰返しの際極めて初期に発生しているものと考えられる。

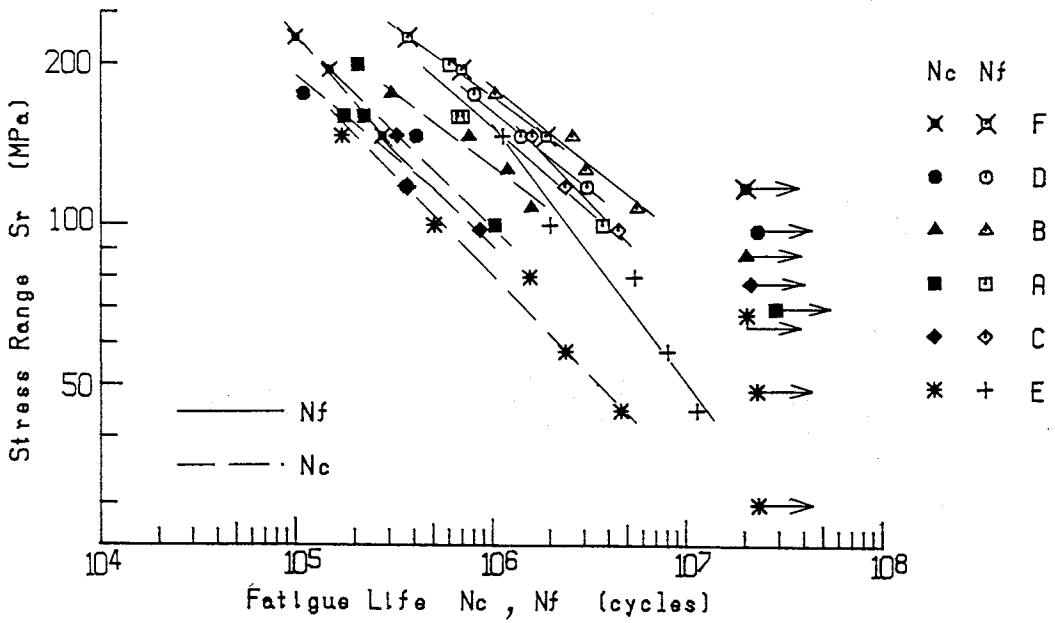


図-3 各試験体の $S_r \sim N_c, S_r \sim N_f$ 関係

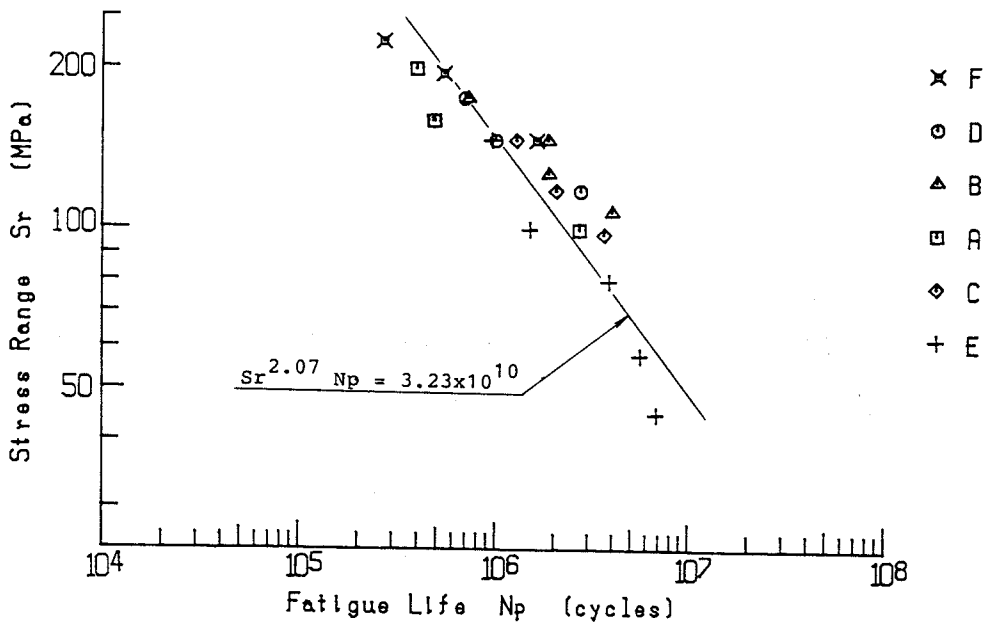


図-4 各試験体の $S_r \sim N_p$ 関係

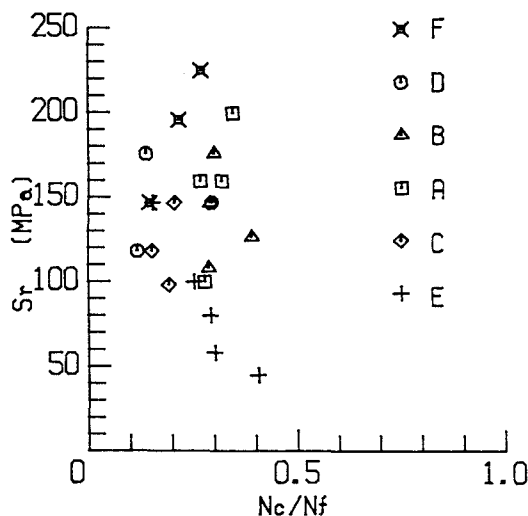


図-5 各試験体の $Sr \sim Nc/Nf$ 関係

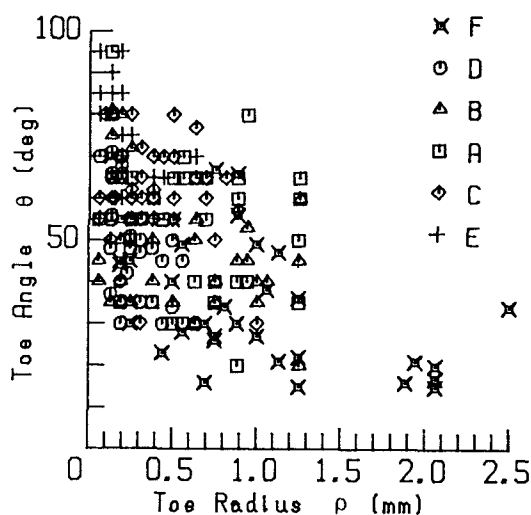


図-6 各試験体の溶接止端半径 ρ と止端角 θ

図-6に、各試験体について測定した亀裂発生位置での止端半径 ρ と止端角 θ の分布を示す。溶接材料によって ρ と θ の分布に違いがみられ、 θ が大きいものは ρ が小さい傾向がある。試験体の種類ごとの平均値は以下のとおりである。

試験体	F	D	B	A	C	E
ρ (mm)	0.93	0.26	0.51	0.62	0.38	0.20
θ (deg)	37	50	52	54	61	79

これらと図-3を比較すると、 θ が大きく ρ が小さい止端形状のきつい試験体ほど疲労限が低くなっており、試験体の疲労強度に及ぼす溶接止端形状の影響の大きいことがうかがえる。

4. 疲労寿命の予測

破壊力学の手法を用いた寿命予測方法について述べる。応力拡大係数範囲 ΔK は式(1)により求めた。

$$\Delta K = Fe \cdot Fs \cdot Ft \cdot Fg \cdot Sr \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここに、 Sr は止端位置に曲げにより生じる公称応力範囲、 Fe , Fs , Ft および Fg はそれぞれ亀裂形状、表面亀裂、有限板厚、および試験体形状による応力集中に対する補正係数である。ここでは、後述する初期亀裂の形状として半円亀裂を仮定しているため、 $Fe=2/\pi$, $Fs=1$ である。 Ft については、式(2)を用いた⁹⁾。

$$Ft = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad (2)$$

ここに、 $\lambda=a/T$ (T は板厚)。

破壊力学の手法を用いて疲労寿命を予測する場合、初期亀裂寸法 a_i とともに Fg も予測結果に大きく影響する。ここでは、重ね合わせの原理を用い、亀裂のない場合に亀裂のあるべき位置に生じる応力分布が亀裂面に作用したときの応力拡大係数から Fg を求めた。亀裂のないときの応力分布は、山田らはひずみゲージによる応力測定と二次元FEMにより⁹⁾、また竹名らは三次元FEMと局所的な二次元FEMの組合せによ

り求めている⁹⁾。ここでは、亀裂のない状態で面外曲げにより生じる応力分布を3次元FEM¹⁰⁾により計算した。止端部の最小要素寸法は、後述する初期亀裂寸法を考慮して板厚方向に0.01mmとした。そのときに仮定した止端半径 ρ と止端角 θ は以下の3ケースであり、それぞれ、F、A、E試験体に相当するものである。

ケース	①	②	③
ρ (mm)	1.0	0.5	0.2
θ (deg)	35	55	80

各ケースのFgと亀裂深さとの関係を図-7に示す。亀裂の小さい内は、止端形状の最も厳しいケース③と最も穏やかなケース①では、Fgに2倍以上の違いがある。亀裂がNcを定義した1mm程度より深くなると、 ρ 、 θ によるFgの違いはほとんどみられなくなる。したがって、溶接止端部の局所的な形状が影響するのは、深さ1mm程度までの亀裂に対してであるということができる。

写真-2は疲労亀裂の起点と考えられる位置（ビーチマークあるいは破面の模様から判断できる）で観察された特徴的な破面である。このような、試験体の表面に接し比較的平坦なファセット状の部分は疲労亀裂の起点と考えられる位置にはほとんど観察される。小林ら^{11,12)}は、このようなファセット状破面をすべり面分離による第一段階の亀裂面であるとし、その大きさは応力範囲に依存するものの材料の結晶粒の平均直径程度に飽和すると述べている。また、TanakaとAkiniwa¹³⁾は、SM41B製の切欠き材についてそのような破面の深さは切欠き形状や応力範囲に影響されず0.06mm程度であったと報告している。図-8に、各試験体で観察されたそのようなファセットの深さと真応力範囲の関係を示す。図の縦軸は公称応力範囲に止端部の

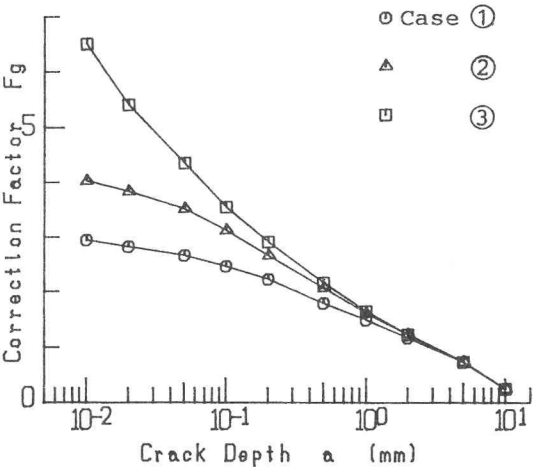


図-7 試験体形状の補正係数Fgの分布

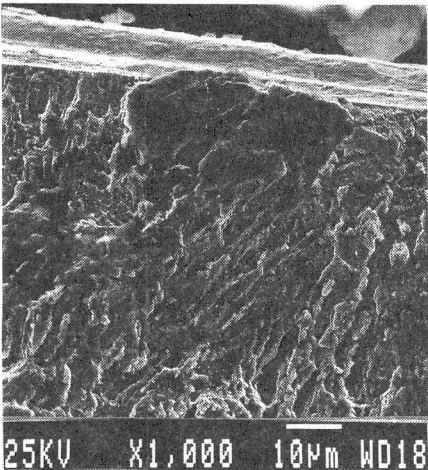


写真-2 亀裂発生点近傍の破面（D試験体）

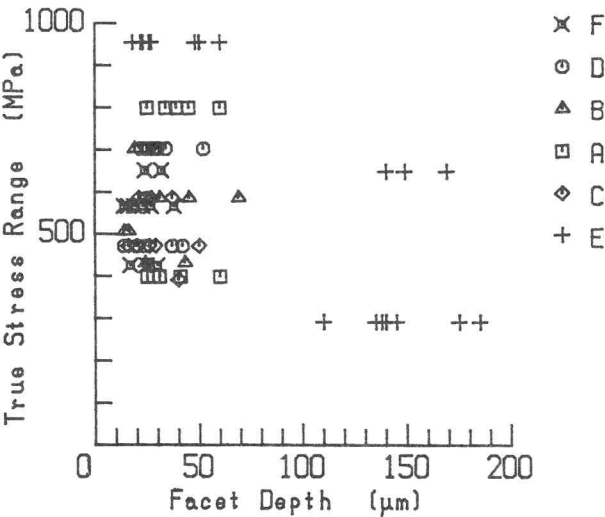


図-8 止端部の応力範囲とファセット深さの関係

応力集中係数を乗じたものである。ファセットの深さは、E試験体を除いて溶接材料および応力範囲に依らずば一定とみなすことができる（平均：0.03mm）。E試験体についても、中、低応力域ではほぼ一定（0.15mm）とみなすことができる。

これらのファセット状破面が疲労試験のごく初期に生じたと考えられることから初期亀裂とみなし、上述の平均深さを初期亀裂寸法と仮定してNcおよびNfを計算した。最終亀裂深さはNcについて1mm、Nfについては破面の観察から板厚の60%とした。疲労亀裂進展速度 da/dN と ΔK の関係は、溶接部について得られている式（3）¹⁴⁾、

$$da/dN = 2.30 \times 10^{-8} (\Delta K^{2.73} - 2.06^{2.73}) \quad (3)$$

を用いた。寿命予測曲線と実験値を図-9に示す。推定 $S_r - N_c$ および $S_r - N_f$ 線は実験結果と良く一致している。以上により、亀裂発生位置に残されたファセット状破面を初期亀裂とみなし、その深さを初期亀裂寸法と仮定することにより隅肉溶接継手の疲労寿命を精度よく予測できることが示された。

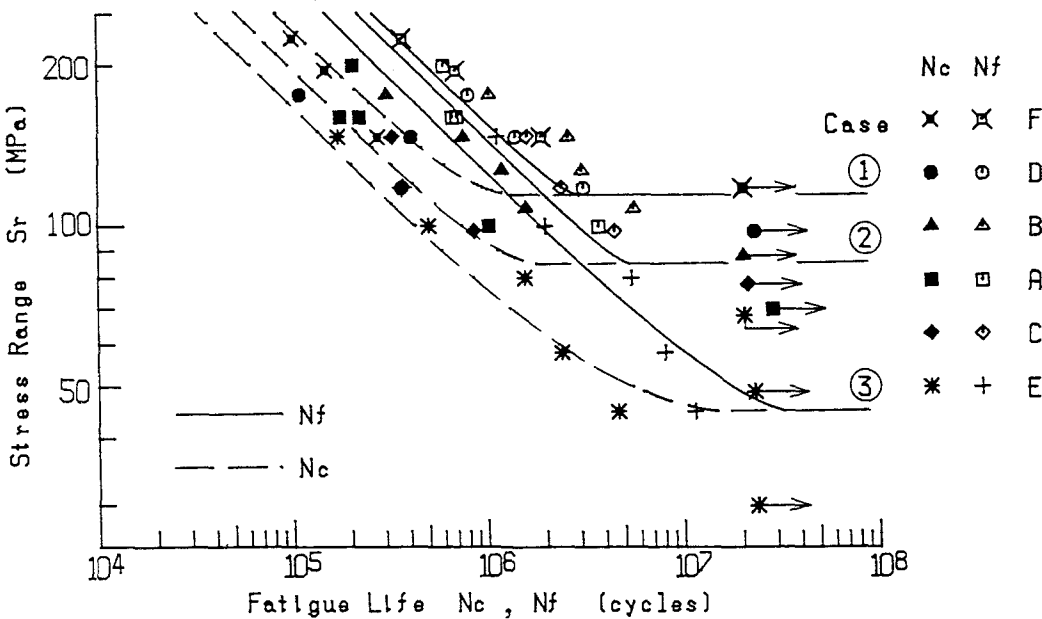


図-9 NcおよびNfの予測

5. おわりに

溶接材料の異なる6種類の隅肉溶接継手を用いて面外曲げによる疲労試験を行い、溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期の進展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）短寿命域での時間強度については溶接材料による違いはほとんど認められないが、疲労限には大きく差が生じる。各試験体の疲労限は、止端形状が厳しいものほど低くなっている。

（2）深さ1mm程度の亀裂を検出したときを亀裂発生寿命Ncと定義し、亀裂進展寿命を $N_p = N_f - N_c$ ととれば、 $S_r - N_p$ 関係に試験体の種類による違いはほとんどみられない。したがって、溶接材料が疲労寿命に及ぼす影響は、深さが1mm程度以下の疲労亀裂に対して現れるものであることがわかる。

（3）疲労破面の亀裂発生位置には、表面に接し比較的平坦なファセット状の部分が観察される。それらの深さは応力範囲の大きさに拘わらず溶接材料に固有の値となる。

(4) 溶接材料の種類による溶接止端形状 ρ 、 θ の違いにより、微小な亀裂に対しては F_g の値に2倍以上の差が生じる。亀裂深さが1mm以上では、 ρ 、 θ による F_g の違いはほとんどみられなくなる。

(5) 亀裂発生位置に残されたファセット状破面を初期亀裂とみなし、その深さを初期亀裂寸法とすることにより隅肉溶接継手の疲労寿命を精度よく予測することができる。

謝辞：本研究を進める上で、東京工業大学森猛助手、河野雅技官、群馬大学池田正志技官、大学院生の新井弘、吉沢努、古沢政夫、藤川智仁各氏の御協力を得た。各位に対し感謝の意を表する。また、応力解析には群馬大学計算センターを利用した。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査，土木学会論文集，第368号／I-5，pp.1-12，1986.4.
- 2) 三木千寿・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，第392号／I-9，pp.403-410，1988.4.
- 3) 三木千寿・森猛・阪本謙二・柏木洋之：前面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響，構造工学論文集，Vol.33A，pp.393-402，1987.3.
- 4) 山田健太郎・牧野時則・馬場千尋・菊池洋一：疲労亀裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析，土木学会論文報告集，第303号，pp.31-41，1980.11.
- 5) 山田健太郎・Hirt,M.A.:破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析，土木学会論文報告集，第319号，pp.55-64，1982.3.
- 6) 田垣徳幸・近藤明雅・山田健太郎・菊池洋一：溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響，土木学会論文報告集，第324号，pp.151-159，1982.8.
- 7) Miki,C., Mori,T., Tuda,S. and Sakamoto,K.: Retrofitting Fatigue-cracked Joints by TIG Arc Remelting, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.4, No.1, pp.85s-93s, April 1987.
- 8) 竹名興英・川上博道・伊藤文夫・三木千寿：ウェブガセット溶接継手の応力解析と疲労寿命予測，土木学会論文集，第392号／I-9，pp.345-350，1988.4.
- 9) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館，1976.
- 10) Wilson,E.L.: A Static Analysis Program for Three Dimensional Solid Structures, Denver Mining Research Center Report, U.S. Department of the Interior Bureau of Mines, September 1971.
- 11) 小林英男・中沢一・小峰厚友：第1段階の疲れき裂進展過程のフラクトグラフィ的検討，日本機械学会論文集（第1部），41巻，341号，pp.9-21，1975.1.
- 12) 小林英男・川田幸男・中沢一：耐久限度に関連した第1段階き裂のフラクトグラフィ的研究，材料，第25巻，第276号，pp.881-887，1976.9.
- 13) Tanaka,K. and Akiniwa,Y.: Resistance-Curve Method for Predicting Propagation Threshold of Short Fatigue Cracks at Notches, Engineering Fracture Mechanics, Vol.30, No.6, pp.863-876, 1988.
- 14) 征矢勇夫他：疲労特性データベースシステムの開発，製鉄研究，322号，1986.

(1988年10月12日受付)