

斜め溶接割れからの疲労亀裂の発生と進展

FATIGUE CRACK INITIATION AND PROPAGATION FROM ANGLED WELD CRACKS

三木千寿*、森 猛**、時田英夫***

By Chitoshi MIKI, Takeshi MORI and Hideo TOKIDA

In order to examine the properties of fatigue crack initiation and propagation of weld cracks (hot cracks), and also the influence of weld crack angle on these properties, fatigue tests were performed on the specimens containing the weld cracks of various orientations. The material used was JIS SM50A steel. Weldings were done by submerged arc processes or metal-inert-gas arc processes. The specimens were bending-type which contained cracks on the edge, and tension-type which possessed cracks on the center. The angles between crack orientations and applied stress direction were 90, 60, 30-degree in the bending-type specimens, and were 90, 60, 45-degree in the tension-type specimens.

1. はじめに

溶接割れやアンダーカットなどの平面的な欠陥をそのままとするかあるいは除去し補修するかは、破壊力学の手法を用いて検討されることが多い¹⁻³⁾。例えば、英国の欠陥評価指針 BSI PD6493 では、構造用鋼材、溶接金属、熱影響部に対して行われた疲労亀裂進展試験の結果に基づき定めた疲労亀裂進展速度 (da/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) の関係や亀裂進展に対する ΔK の下限界値 (ΔK_{th}) を用いて疲労寿命を計算することにより判断することとしている。その際、欠陥は亀裂に置き換えられており、したがって欠陥からの疲労亀裂の発生限界は ΔK_{th} と同じとされている。

溶接割れは組織的に弱い位置および方向に生じると考えられ、溶接割れから疲労亀裂が進展する場合の $da/dN-\Delta K$ 関係および ΔK_{th} は通常の溶接部を進展する場合と異なる可能性がある。したがって、溶接割れの許容寸法を合理的に判断するには、溶接割れからの疲労亀裂の発生限界および進展速度を明らかにする必要がある。特に溶接割れからの疲労亀裂発生限界と進展に対する ΔK_{th} の関係を明らかにすることは重要である。また、溶接割れは応力の作用方向に対して傾いた角度で生じることも多く、その場合の疲労亀裂の進展経路、発生限界、 $da/dN-\Delta K$ 関係も明らかにしなければならない重要な課題である。

本研究では、溶接金属内に生じる溶接割れを対象とし、割れからの疲労亀裂の進展経路、発生限界、溶接部での進展速度およびそれらに及ぼす溶接割れ角度の影響について検討する。

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

** 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 工修 石川島播磨重工業(研究当時、東京工業大学大学院)

2. 試験方法

供試鋼材は板厚45mmのSM50Aである。その化学成分および機械的性質を表1に示す。溶接割れは開先の形状および溶接条件を工夫することにより発生させた。溶接法および溶接条件を表2に示す。本研究で対象とした溶接割れは、溶接金属中央の柱状晶の境界に沿って生じた高温割れであり、先端に若干の丸みを有しているのが特徴である（図3，4参照）。溶接割れの長さは1～4mm、割れ先端の曲率半径は0.04～0.15mm程度である。

試験体は、下端に割れを有する曲げ試験体と中央に割れを有する引張試験体である。開先形状を工夫することにより、試験体長手方向に対する割れの角度を曲げ試験体で90, 60, 30度、引張試験体で90, 60, 45度としている。これらの試験体をここではB90, B60, B30試験体およびT90, T60, T45試験体と呼ぶ。図1に試験体の形状および寸法を示す。

図2は曲げ試験体と引張試験体での残留応力分布を示している。測定は疲労亀裂が進展すると予想される断面の表裏面に5mm間隔でひずみゲージ（ゲージ長1mm）を貼付し、切断法により行なった。溶接割れの位置は図中に示す通りである。割れ先端近傍の残留応力は曲げ試験体で引張、引張試験体で圧縮となっている。一部の試験体については、残留応力を除去する目的で後熱処理（580℃で2時間保持、温度の昇降速度は100℃/hr）を行なった。

疲労試験には、動的能力50kNの電気油圧サーボ式疲労試験機を用いた。荷重波形は正弦波、繰返し速度は10～30Hzである。曲げ試験体については、支点間距離160mmの3点曲げて疲労試験を行なった。応力比は、

表1 供試鋼材の化学成分および機械的性質

C	Si x 100	Mn (%)	P	S	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
0.15	0.41	1.33	0.024	0.003	360	560	34

表2 溶接方法および溶接条件

試験体	溶接方法	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/cm)
B90, T90	サブマージアーク溶接 ワイヤ：US-36(4.8φ) フラックス：G6A	750	28	48	26.3
B60, T60	MIG溶接 ワイヤ：MG-50T(1.2φ) シールドガス：Ar(80%) CO ₂ (20%)	360	34	35	21.0
B30, T45	MIG溶接 ワイヤ：MG-50T(1.2φ) シールドガス：Ar(80%) CO ₂ (20%)	360	32	53	13.0

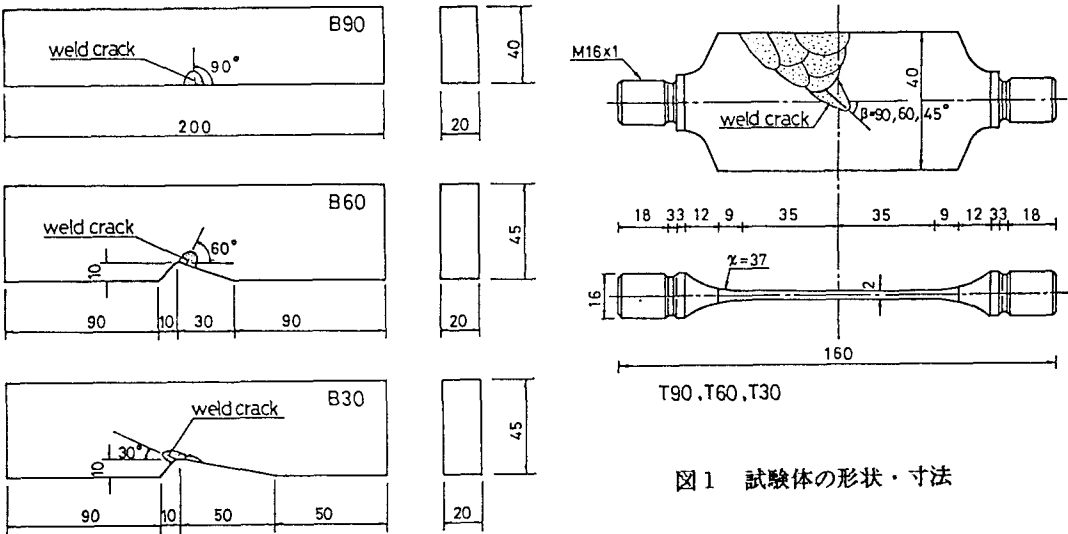


図1 試験体の形状・寸法

曲げ試験、引張試験ともほぼ0.1とした。10⁶もしくは2×10⁶回の応力繰返しによっても疲労亀裂の発生が認められなかった場合には荷重範囲を5～10%程度増加させ、試験を続行した。

疲労亀裂の長さの測定は、試験片表裏面での亀裂をレプリカに印し、それを50倍の拡大投影器で観察することにより行なった。この方法により、0.01mm程度の精度で亀裂長さを測定することができる。

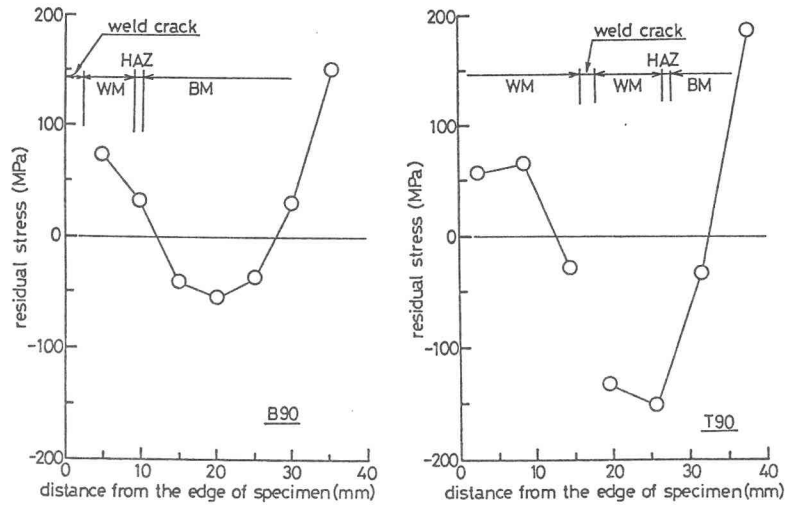


図2 溶接残留応力の分布

3. 疲労亀裂の発生・進展性状

図3に割れ角度90、60、30度の曲げ試験体(B90, B60, B30)での疲労亀裂の発生位置および進展経路を示す。図4は亀裂発生点近傍のミクロ写真を示したものである(本図に示すB90試験体は後熱処理を行なっているため、B60, B30試験体に比べ疲労亀裂の幅が狭くなっている)。B90試験体では溶接割れの延長線上にある溶接金属中央の柱状晶の境界に沿って疲労亀裂が発生し、進展している。B60およびB30試験体では、柱状晶を横切って真っ直ぐに疲労亀裂が進展している。しかし、ミクロ的にみると、疲労亀裂は作用応力直角方向で割れが最も深くなる位置で生じ、また亀裂長さが0.2～0.4mm程度で向きを若干変えている。以上のように、溶接割れ角度により亀裂進展の方向と柱状晶の方向との関係は様々であるが、いずれの場合もマクロ的にみて疲労亀裂は作用応力方向に対して直角に進展している。

図5に本疲労試験より得られた溶接割れ角(β 、割れが作用応力方向となす角、図6参照)と亀裂発生角(θ_0 、 θ の定義は図6参照)との関係を示す。溶接割れ角が大きくなるにしたがって疲労亀裂の発生角は小さくなっている。また、中央に割れを有する引張試験体での θ_0 は縁に割れを有する曲げ試験体での θ_0 よりも大きくなっている。傾いた亀裂からの亀裂進展方向を予測する方法としては最大主応力説⁴⁾や最小ひずみエネルギー密度説⁵⁾などの亀裂進展前の亀裂先端の応力場に基づくものと最大K_I説などの亀裂が微小長さ進展あとの状態に基づくものがあるが、最大主応力説と亀裂進展後の状態に基づく方法では予想される亀裂発生角に大きな違いはないと言われている⁶⁾。最大主応力説では、以下のように亀裂の発生角が定義される。図6のような座標系と

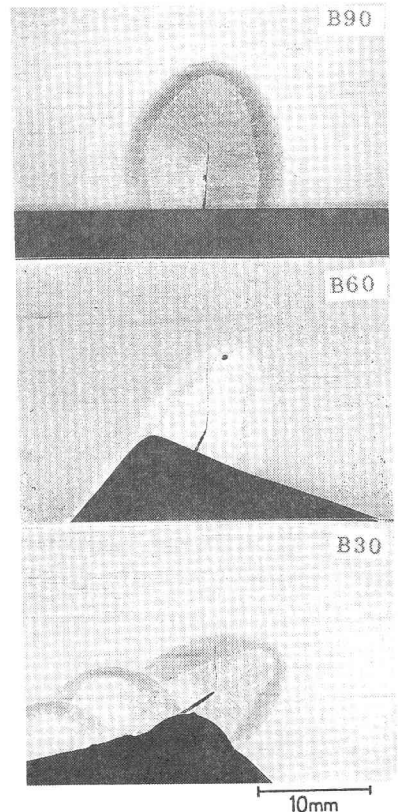


図3 疲労亀裂の進展経路

した場合、亀裂先端近傍での応力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 1 / \sqrt{2 \pi r} \times [K_I (3 - \cos \theta) \cos (\theta / 2) + K_{II} (3 \sin \theta - 1) \sin (\theta / 2)] + \cdots \cdots \\ \sigma_\theta &= 1 / \sqrt{2 \pi r} \times \cos (\theta / 2) [K_I (1 + \cos \theta) - 3 K_{II} \sin \theta] + \cdots \cdots \\ \tau_{r\theta} &= 1 / \sqrt{2 \pi r} \times \cos (\theta / 2) [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] + \cdots \cdots\end{aligned}\tag{1}$$

K_I 、 K_{II} ：モード I，IIでの応力拡大係数

この説では、接線方向応力 σ_θ が最大となる方向、すなわちせん断応力 $\tau_{r\theta}$ が0となる方向に亀裂は進展する
と考える。最小ひずみエネルギー密度説はひずみエネルギー密度が最小となる方向に亀裂が発生するという
ものである。

$$\partial (dW/dA) / \partial \theta = 1 / r (a_{11} K_I^2 + a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2) = 0\tag{2}$$

dW/dA ：ひずみエネルギー密度、 a_{11}, a_{12}, a_{22} ：材料定数および θ の関数

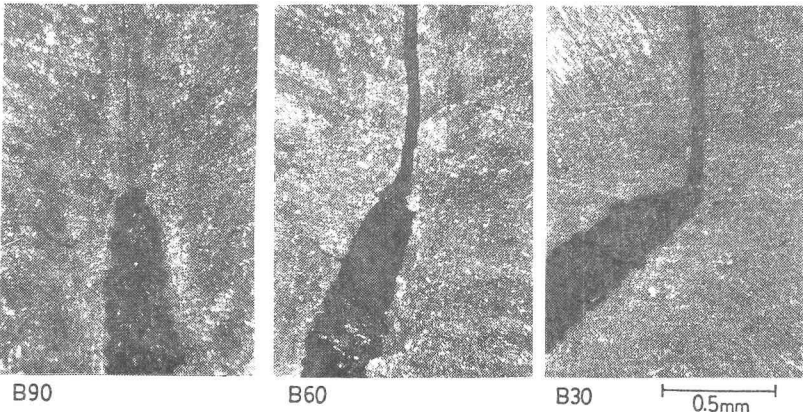


図4 亀裂発生部のミクロ写真

図5中の実線は、無限板中の傾いた亀裂に対する応力拡大係数 K_I 、 K_{II} ⁷⁾を用いて最大応力説およびひずみエネルギー説から亀裂発生角を予測したものである。同様に、破線は半無限板内の傾いた縁亀裂に対する K_I 、 K_{II} ⁸⁾を用いて求めた予測線である。いずれの説による予測結果とも実験結果の傾向をよく表わしており、したがって亀裂の発生

方向は亀裂先端近傍の力学条件により決り、溶接金属の柱状晶の向きの影響を受けないと言える。

図7は B90，B60，B30試験体の疲労亀裂発生部近傍の状況を示しており、それぞれ写真の右側が溶接割れ、左側が疲労破面である。いずれの場合も溶接割れ面では、結晶の影響を強く受け、結晶粒界が観察される。しかし、疲労破面に粒界は認められない。このことから疲労亀裂の発生方向は溶接金属の柱状晶の向きの影響を受けていないと言える。

図8は、B90，B60，B30試験体の溶接金属での疲労破面を示している。B90試験体での疲労亀裂はマクロ的にみて柱状晶の境界に沿って進展しているが、図(a)に示すような粒内破面が支配的であり、粒界破面は観察されなかった。一部においては、図(b)に示すような等軸ディンプルも観察された。疲労亀裂が柱状晶を横切って進展する B60，B30試験体での破壊様式は、図(c)に示すような延性ストライエーションなどの粒内破壊が支配的となっている。また、これらの試験体では、図(d)，(e)に示すごとく粒内破面と粒界破面が混在している部分も観察された。このような破壊様式からも、疲労亀裂の進展経路は柱状晶の向きの影響を受けていないと言える。

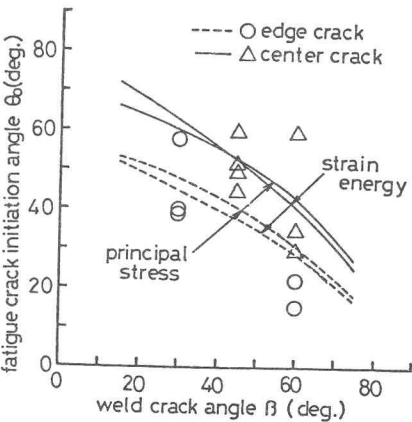


図5 疲労亀裂の発生角

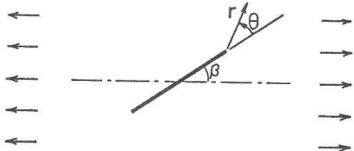
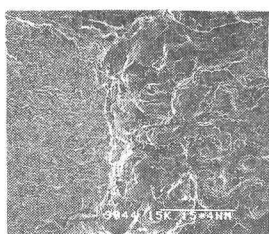
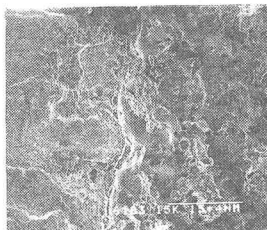


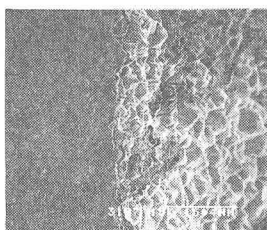
図6 座標の定義



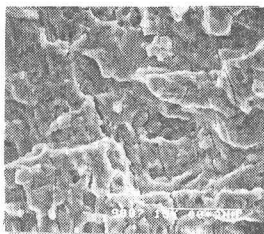
(a) B90 150μm



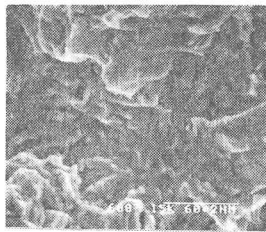
(b) B60 150μm



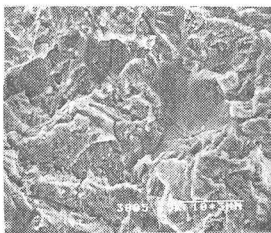
(c) B30 150μm



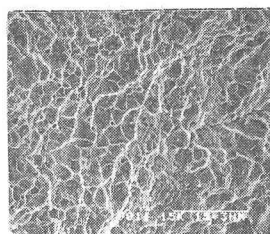
(a) B90 6μm



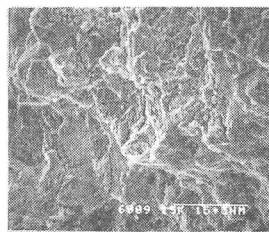
(c) B60 6μm



(e) B30 10μm



(b) B90 15μm



(d) B60 15μm

← crack growth direction

図7 疲労亀裂発生部の疲労破面

図8 疲労破面の顕微鏡写真

4. 疲労亀裂の進展速度

図9は、B90、B60、B30試験体で疲労亀裂が溶接金属を進展する際の速度 (da/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) の関係を示したものである。B60、B30試験体の疲労亀裂に対する ΔK は、亀裂を作用応力方向に投影し、作用応力方向に直角な亀裂として計算した。前章で示したように傾いた割れにおいても疲労亀裂は作用応力直角方向に真っ直ぐに進展する。このような屈折した亀裂に対する応力拡大係数が作用応力方向に投影した亀裂に対する応力拡大係数とほぼ一致することは既に確かめられている⁸⁾。図中の実線はSM50鋼素材材での平均的な $da/dN - \Delta K$ 関係⁹⁾を示している。図3に示すように、B90では柱状晶の境界に沿って、B60、B30試験体では柱状晶を横切って疲労亀裂が進展している。しかし、これらの試験体での $da/dN - \Delta K$ 関係に特に差は認められず、したがって柱状晶の向きと進展方向の関係は $da/dN - \Delta K$ 関係に影響を及ぼさないと言える。また、これらの $da/dN - \Delta K$ 関係はSM50鋼素材材での $da/dN - \Delta K$ 関係とほぼ一致している。

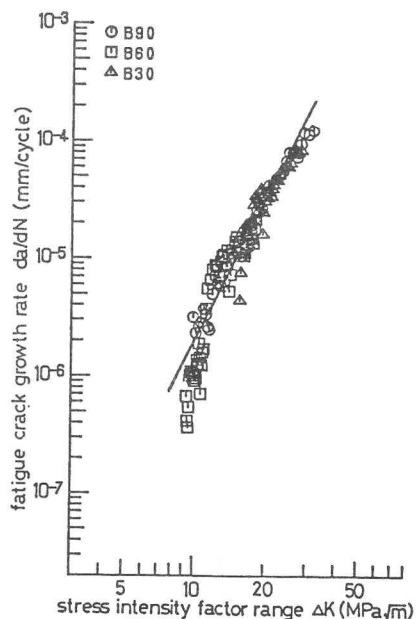


図9 疲労亀裂進展速度に対する溶接割れ角度の影響

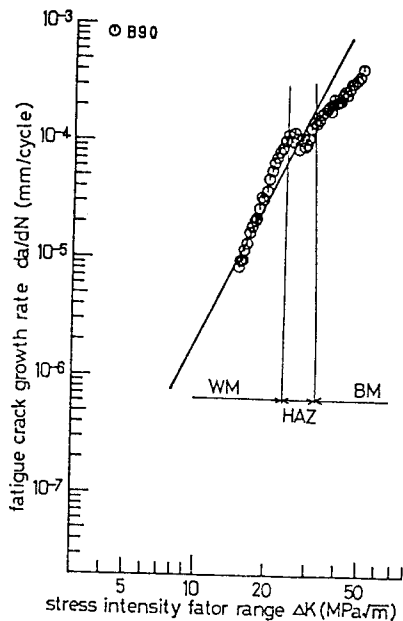


図10 疲労亀裂進展速度に対する組織の影響

図10は、B90試験体で疲労亀裂が溶接金属（WM）、熱影響部（HAZ）、母材（BM）を進展する際の da/dN - ΔK 関係を示している。HAZで da/dN が遅くなっているが、その差は小さく、WM、HAZ、BMを進展する際の da/dN - ΔK 関係はほぼ同じと言える。このことは B60、B30試験体においても同じであった。図11はここで用いた曲げ試験体すべてについて da/dN - ΔK 関係を示したものである。

引張試験体での da/dN - ΔK 関係を図12に示す。T60、T45 試験体での ΔK の算出においては、作用応力方向への投影亀裂長さを用いている。図中の黒く塗り潰した印は後熱処理を行なった試験体での結果を示している。これらの da/dN - ΔK 関係は割れ角度によらずほぼ一本の関係で与えられ、曲げ試験体と同様にSM50鋼素材での平均的な da/dN - ΔK 関係とほぼ一致している。一方、後熱処理を行なわなかった試験体では、亀裂が短く ΔK の小さい領域で da/dN が非常に遅くなっている。これは、割れ先端近傍が圧縮残留応力場となっているためと思われる。

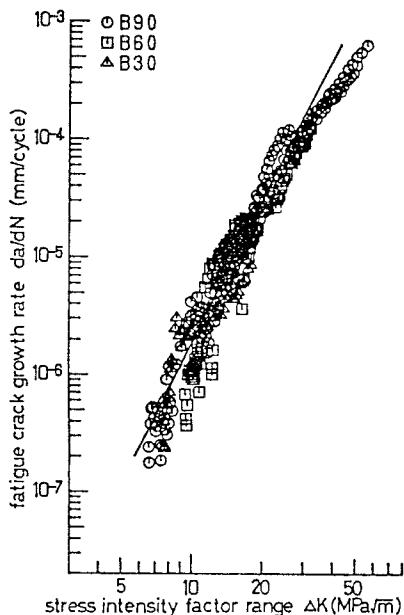


図11 曲げ試験体の da/dN - ΔK 関係

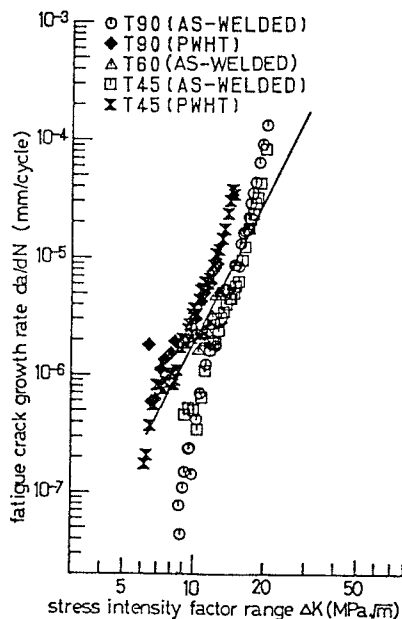


図12 引張試験体の da/dN - ΔK 関係

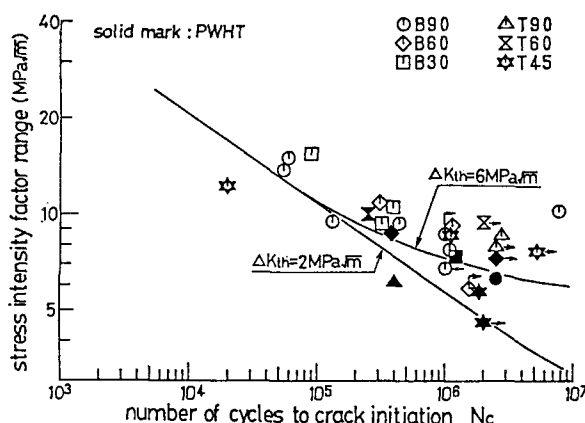


図13 疲労亀裂発生寿命
(疲労亀裂の長さが 0.5mm となるまでの寿命)

5. 疲労亀裂の発生限界

図13は、曲げおよび引張試験体について、割れを亀裂とみなし計算した応力拡大係数範囲 (ΔK) と亀裂発生寿命 (N_c) との関係を示したものである。傾いた割れを有する試験体についての ΔK は、割れを作用応力方向に投影した長さの作用応力方向に直角な亀裂として計算した。亀裂発生寿命は、亀裂の長さが 0.5mm に達したときの寿命と定義した。図中の $\rightarrow$ 印は、その応力繰返し数で亀裂の発生が認められなかったデータを示している。本試験で用いた亀裂長さ測定法では、割れ先端からの亀裂長さが 0.05mm 程度になれば確実に疲労亀裂を確認できるので、ここで $\rightarrow$ を付した印は割れ先端からの亀裂進展速度が $5 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 以下であることを示していると考えることができる。

図13において、溶接割れからの疲労亀裂の発生限界応力拡大係数範囲は、5~8MPa√m となっている。試験体の形式ごとにみると、割れ先端近傍が圧縮残留応力場となっている as-weld の引張試験体において限界値が他に比べ若干高くなっている。しかし、溶接割れ角度によって発生限界値が変化する傾向は認められない。本疲労試験では応力比 (R) をほぼ 0.1 としているが、亀裂進展に対する ΔK の下限値 (ΔK_{th}) は、鋼素材 $R=0.1$ で 6MPa√m 程度、高い引張残留応力を有する鋼溶接継手では応力比によらず 2~3MPa√m 程度とされている¹⁰⁾。本試験で得られた発生限界値は鋼素材での ΔK_{th} とほぼ一致しており、鋼溶接継手に比べ高い。したがって、 ΔK_{th} より溶接割れからの発生限界値を予測すれば、特に危険となることはないと言える。

図13中の実線は、前章で得られた $da/dN - \Delta K$ 関係に ΔK_{th} を考慮した (3) 式を用い、割れ先端から疲労亀裂が 0.5mm 進展するのに要する寿命を計算した結果を示している。

$$da/dN = 1.9 \times 10^{-10} (\Delta K^4 - \Delta K_{th}^4) \quad (3)$$

その際、溶接割れの長さは 3mm、 ΔK_{th} は 6 および 2MPa√m とした。寿命の計算結果は実験結果とよく一致している。したがって、微小な亀裂が生じるまでの寿命についても、割れを亀裂とみなし、通常の試験より得られる $da/dN - \Delta K$ 関係および ΔK_{th} を用いることにより予測できると言える。

6. まとめ

本研究では、溶接金属の柱状晶の境界に沿って生じる高温割れを対象とし、そこからの疲労亀裂の発生・進展方向、発生限界、溶接部での亀裂進展速度およびそれらに及ぼす溶接割れ角度の影響について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 疲労亀裂は作用応力直角方向で溶接割れが最も深くなる位置から発生する。その方向は最大主応力説あるいは最小ひずみエネルギー密度説で予測できる。したがって、発生方向は、溶接割れ角度にともなう溶接金属の柱状晶の向きの影響を受けない。このことは疲労亀裂発生部近傍の破面観察からも確認された。
- (2) 疲労亀裂は作用応力方向と直角に進展する。その際の進展経路は溶接金属の柱状晶の向きの影響を受けない。
- (3) 溶接割れからの亀裂発生限界は進展に対する限界値と同程度あるいはそれよりも大きい。
- (4) 溶接割れから発生した疲労亀裂が溶接金属内を進展する際の進展速度と応力拡大係数範囲の関係は、亀裂進展方向と柱状晶の向きとの関係に影響を受けない。また、その際の $da/dN-\Delta K$ 関係は鋼素材での関係とほぼ一致する。

参考文献

- 1) ASME : Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.XI, Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, 1983.
- 2) BSI : Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, PD 6493, 1980.
- 3) JWES : Method of Assessment for Defects in Fusion-Welded Joints with respect to Brittle Fracture, WES 2805, 1980.
- 4) Erdogan, F. and Sih, G.C. : On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Vol.85, pp.519-527, 1963.
- 5) Sih, G.C. : Strain-Energy-Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems, Int. Journal of Fracture, Vol.10, No.3, pp.305-321, 1974.
- 6) Karihaloo, B.L. : On Crack Kinking and Curving, Mechanics of Materials, Vol.1, pp.189-201, 1982.
- 7) 石田誠 : き裂の弾性解析と応力拡大係数、培風館、p.140, 1976.
- 8) 西谷弘信 : 半無限板の直線縁にはいった斜めの亀裂または折れ曲がりき裂の引張りにおける応力拡大係数、機械学会論文集、Vol.41, No.344, pp.1103-1111, 1975.
- 9) Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C. and Hasegawa, K. : Fatigue Crack Growth Rate in Structural Steel, 土木学会論文報告集、No.322, pp.175-178, 1982.
- 10) Miki, C., Mori, T. and Tajima, J. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on Near Threshold Fatigue Crack Growth、土木学会論文報告集、No.368, pp.383-392, 1986.

(1987年10月16日 受付)