溶接継手の疲労き裂伝ば挙動に及ぼす
試験片寸法および予荷重履歴の影響*橘内良雄^{*1}, 小林英男^{*2}, 松本重人^{*3}
吉久悦二^{*1}, 飯田國廣^{*4}Effects of Specimen Size and Preload History on
Fatigue Crack Growth Behavior of Welded JointsYoshio KITSUNAI, Hideo KOBAYASHI, Shigeto MATSUMOTO,
Etsuji YOSHIHISA, and Kunihiro IIDA

The effects of specimen size and preload history on the fatigue crack growth behavior of welded joints were examined in connection with residual stresses. As a crack propagates from a tensile residual stress field, the crack growth rate is insensitive to specimen size, because the crack tip always opens due to residual stress. As a crack propagates from a compressive residual stress field, however, the crack growth rate decreases with increasing specimen size. Preload history is found to have a reduction effect on residual stresses. The crack growth rate of the welded specimens which were preloaded above 70 % of their yield stress shows a tendency to approach the crack growth rate of the base metal. The crack growth rate in the welded joints is correlated with ΔK_{eff} which takes into account the residual stresses and stress ratio effect of the base metal.

Key Words: Fatigue, Crack Growth, Welded Joint, Residual Stress, Superposition Method, Specimen Size, Preload History

1. 緒 言

溶接継手の疲労き裂伝ば速度 da/dN は、継手の強度や組織よりも残留応力に強く影響されると言われている。しかるに、これまでに得られている多くのデータは小形試験片を用いている場合が多く、試験片の残留応力もかなり小さいと推察される。したがって、試験片のデータを降伏応力程度の残留応力を有する溶接構造物に適用して、寿命の評価や保守検査期間の設定を行うためには、あらかじめ da/dN に及ぼす残留応力の影響を試験片の寸法との関連で検討しておくことが必要と考えられる。さらに、溶接構造物では施工上の制約から、何らかの角変形や目ちがいが生じることが少なくなく、しばしば塑性変形による矯正が実施されている。このような場合には初期残留応力分布が変化すると予想され、矯正後の残留応力が da/dN に及ぼす影響についても検討する必要がある。

残留応力場における da/dN は、残留応力によって誘起される応力拡大係数 K と、外荷重によるそれとを線形加算した K を用いて評価されている^{(1)~(12)}。しかし、疲労き裂が成長して小規模降伏から逸脱するようなときには、 K 値の重ね合わせは有効性を失うと考えられる。したがって、 K 値の線形加算則の成立限界について把握する必要がある。

本研究では試験片で得られたデータを溶接構造物に適用する際の基礎的知見を得ることを目的として、溶接継手の da/dN に及ぼす試験片寸法および予荷重履歴の影響を残留応力との関連で検討した。また、残留応力場の da/dN の評価に際して、残留応力と外荷重の K 値の線形加算則が成立する上限界とリガメントとの関係について若干の考察を試みた。

2. 試験片および実験方法

供試材は外径が 508 mm、肉厚が 32.5 mm、長さが 2880 mm の STS 42 鋼のパイプであって、その機械的性質と化学成分を表 1 および表 2 に示す。このパイプから板幅 100 mm、長さ 600 mm あるいは 700 mm、厚さ 27 mm の板 22 枚と、板幅 180 mm、長さ 900 mm あるいは 1300 mm、厚さ 14 mm の板 10 枚を切り出した後 X 開先加工を行い、その後それらの板を

* 昭和 62 年 11 月 20 日 第 949 回講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 4 月 28 日。

^{*1} 正員、労働省産業安全研究所清瀬実験場 (〒204 清瀬市梅園 1-4-6)。

^{*2} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*3} 川崎製鉄(株)技術研究所 (〒260 千葉市川崎町 1)。

^{*4} 正員、芝浦工業大学工学部 (〒108 東京都港区芝浦 3-4-14)。

2枚ずつ長手方向に沿って突合せ溶接を行った。この場合、1層めを被覆アーク溶接、残りをサブマージアーク溶接を行った。また、表側を溶接後裏はつりを行い、裏面の溶接を実施した。突合せ溶接条件を表3に示す。また、パイプから板幅180 mm、長さ700 mm、板厚14 mmの板6枚を採取して、板の表面に溶接金属を盛っていくビードオンプレートを作製した。その製作条件を表4に示す。

試験片は突合せ溶接板から幅 W を50, 100, 200 mmとしたCT試験片を作製した。この場合、き裂が引張あるいは圧縮残留応力場から伝ばするように、試験片中の溶接線位置を0.25 W および0.6 W (一部は0.5 W) とした。さらに、ビードオンプレートからはCCT試験片を作製し、それらのいく枚かは切欠加工を行う以前にアムスラー試験機を用いて0.5 σ_y , 0.7 σ_y および0.97 σ_y (σ_y は母材の降伏応力) の予荷重を負荷した後試験に供した。図1に試験片の形状と寸法を示す。

試験片の初期残留応力分布は、切欠を有しないCTあるいはCCT試験片の表裏の同一箇所に長さ1 mmの三軸ひずみゲージをはり付け後、その周囲をのこぎりおよびグラインダで切断して解放されたひずみから弾性計算により求めた。疲労き裂伝ば試験は、主とし

て電気油圧式サーボ疲労試験機を使用して、 ΔK 一定と荷重振幅一定の試験を実施した。なお、一部のCCT試験片に対しては、電磁共振形疲労試験機を用いて荷重振幅一定の試験を行った。疲労き裂伝ば速度 da/dN は、ASTM-E 647で推奨するSecant法⁽¹³⁾を用いて求めた。 ΔK の算定はCT試験片ではSrawley⁽¹⁴⁾の、CCT試験片ではき裂の板幅方向への偏心を考慮したIsida⁽¹⁵⁾の式を用いた。疲労き裂の開閉口は、除荷弾性コンプライアンス法により計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 試験片の初期残留応力分布 図2と図3にCT試験片の残留応力分布の測定結果の代表例を示す。いずれの試験片も溶接線では引張りの、溶接線の両側の母材で圧縮となっている。なお、両試験片を比較すると、寸法の大きい $W=200$ の試験片のほうが高い残留応力を有していることがわかる。図4は予荷重を負荷したときと、負荷しない場合のCCT試験片の残留応力分布を示したもので、繁雑を避けるためにき裂伝ば方向の残留応力および0.5 σ_y のデータは割愛した。図に見られるように、予荷重レベルが増加すると残留応力も次第に減少し、特に母材の降伏応力にほぼ等しい0.97 σ_y の予荷重を負荷した試験片では、残留応力の大部分が解放されている。0.5 σ_y の予荷重を負荷した試験片では、予荷重時の応力と残留応力との和が母材の降伏応力に達しなかったために再分布は起こらず、予荷重を与えない試験片の残留応力分布とほぼ一致し

表1 供試材の機械的性質

Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
401	556	38

表2 供試材の化学成分 (wt %)

C	Si	Mn	P	S
0.21	0.28	1.14	0.026	0.012

表3 突合せ溶接継手の溶接条件

Method	Shield arc weld.	Submerged arc weld.
Position	Flat	Flat
Electrode	LB-52	MF-38xUS36
Current	170~180 A	600~650 A
Voltage	22~23 V	34~35 V
Speed	—	350~360 mm/min.

表4 ビードオンプレートの溶接条件

Method	Submerged arc weld.
Position	Flat
Electrode	MF-38xUS36
Current	550~560 A
Voltage	32~33 V
Speed	350~360 mm/min.

図1 試験片の形状と寸法

ていた。

3.2 疲労き裂の伝ばに及ぼす試験片寸法の影響

CT 試験片を用いて ΔK 一定試験を行い、 da/dN と試験片寸法との関連について検討した。図 5 は引張残留応力場の溶接線からき裂が伝ばする場合の結果を示したもので、試験片の板厚はいずれも 7 mm である。図 5 に見られるように、負荷した ΔK のレベルが高い場合には、き裂が溶接線を通過後の da/dN は点線で示す母材のそれを若干上回るかあるいは大略一致しており、 da/dN に及ぼす試験片の幅の影響は認められない。一方、低 ΔK レベルの試験では、溶接線近傍およ

び a/W が 0.6 以上の領域において da/dN が母材よりも若干低下する傾向が認められるが、これは後述するように、試験片の残留応力分布を反映してき裂先端に誘起される K 値が減少するためである。なお、 $R=0.05$ における母材の da/dN は ΔK と式(1)で示す関係にある。

$$da/dN = 1.74 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.30} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 da/dN は m/cycle, ΔK は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

図 6 は圧縮残留応力場の母材から溶接線に向かってき裂が伝ばする場合の da/dN と a/W の関係を示し

図 2 $W=50$ CT 試験片の初期残留応力分布

図 3 $W=200$ CT 試験片の初期残留応力分布

図 4 CCT 試験片の初期残留応力分布と予荷重後の再分布残留応力

図 5 引張残留応力場からき裂が伝ばする場合の da/dN に及ぼす試験片の幅の影響

図 6 圧縮残留応力場からき裂が伝ばする場合の da/dN に及ぼす試験片の幅の影響

たもので、板幅が増加するほど da/dN に強い遅延が生じている。これは試験片の幅に依存して残留応力の大きさが異なり、板幅が広いほど大きな残留応力が存在しているためである。き裂開口比 U を測定した結果、図7に見られるように、引張残留応力場からき裂が伝ばするように $L=0.25W$ に溶接線を置いた試験片では、板幅によらず U は1あるいはそれに近い値となっている。このためき裂先端はほぼ開口状態に置かれるために、 da/dN は試験片の幅に対して不敏感となることがわかる。一方、圧縮残留応力場からき裂が伝ばする $L=0.6W$ の試験片では、板幅が増大するほど U が減少しており、 da/dN に対応した挙動を示している。

板幅 100 mm の CT 試験片を用いて da/dN に及ぼす板厚 B の影響について検討した結果、引張残留応

図7 U - a/W の関係

図8 圧縮残留応力場からき裂が伝ばする場合の da/dN に及ぼす試験片板厚の影響

力場からき裂が伝ばする場合には da/dN は板厚によらずほぼ同様な伝ば挙動を示しており、それらは母材の da/dN を若干上回る値となっていた。一方、圧縮残留応力場からき裂が伝ばする際には、 $B=7$ mm の試験片の da/dN が遅延の程度が最も小さく、 $B=15$ mm と 25 mm の da/dN はほぼ一致していた (図8)。

以上の結果から、引張残留応力場からき裂が伝ばする場合には、 da/dN は板幅や板厚に不敏感であるのに対して、圧縮残留応力場からき裂が伝ばするときには、試験片の寸法の影響を強く受けると結論される。なお、溶接構造物では引張残留応力場からのき裂の伝ばが問題となるので、き裂開口比が1となるような試験片のデータを用いれば、試験片と構造物の寸法 (残留応力) の差異を考慮することなくき裂伝ば寿命の評価を行うことができる。

3.3 疲労き裂の伝ばに及ぼす予荷重履歴の影響

図9は予荷重を負荷しない場合と、負荷した場合の CCT 試験片を用いて荷重振幅一定試験を行った際の da/dN と ΔK の関係を示したもので、予荷重履歴の影響は $\Delta K < 40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ において強く現れている。すなわち、 da/dN は予荷重を負荷しない場合が最も遅く、予荷重レベルの増加につれて増大する傾向が認められる。特に、 $0.97\sigma_y$ 予荷重負荷試験片の da/dN は、母材のそれと大略一致していた。これは降伏応力レベルの予荷重を負荷したことにより、かなりの残留応力が解放されたためと考えられる。なお、 $0.5\sigma_y$ 予荷重負荷試験片では、残留応力の再分布が起こらなかったに

図9 da/dN に及ぼす予荷重履歴の影響

もかわらず、 da/dN は予荷重負荷をしない試験片のそれよりも若干増加していた。この原因は不明であるが、疲労試験の初期にチャック部にき裂が進入したので試験片の両端を切断して長さを 200 mm としたために、残留応力が若干解放されたことも一因と推察される。これらの結果から、予荷重は初期残留応力を軽減する効果を有しており、そのことを反映して da/dN は母材のそれに近づくようになると結論される。なお、本研究ではき裂が圧縮残留応力場から伝ばする場合について扱ったが、引張残留応力場から伝ばする場合においても同様な効果が報告されている⁽¹⁶⁾。

3.4 残留応力を考慮した有効応力拡大係数範囲

疲労き裂が残留応力場を伝ばする際には残留応力が解放され、それに伴い新たに応力拡大係数が誘起される。この残留応力による応力拡大係数 K_R は、き裂面に残留応力と等価逆符号の分布荷重が作用したときの K 値として算出できる。本実験に用いた CCT 試験片の場合、き裂面に集中荷重が作用する場合の解が Tada ら⁽¹⁷⁾によって与えられているので、この集中荷重をき裂面の微小部分に作用する分布荷重に置き換え、分布荷重をき裂面に沿って積分すれば K_R が算出できる。

$$K_R = \frac{1}{\sqrt{2W}} \int_{-a}^a \sigma_R(x) f\left(\frac{a}{W}, \frac{x}{a}\right) dx \quad (2)$$

$a/W = \alpha$, $x/a = \beta$ とおくと

$$f(\alpha, \beta) = \{1 + 0.297\sqrt{1 - \beta^2}(1 - \cos u)\} g(\alpha, \beta)$$

$$g(\alpha, \beta) = \sqrt{\tan u} \frac{1 \pm (\sin v / \sin u)}{\sqrt{1 - (\cos u / \cos v)^2}}$$

ここで、 $u = \pi\alpha/2$, $v = \pi\alpha\beta/2$, a はき裂長さ、 W は試験片の幅の 1/2 である。 $\sigma_R(x)$ は、試験片の残留応力分布に最小二乗法を適用して、多項式近似によって与えた。

残留応力場における応力比 R_r は、この K_R によって変化する。この場合、 R_r は繰返し荷重による最大と最小の応力拡大係数 $K_{\max}$, $K_{\min}$ に K_R を加算することにより、式(3)のように表される。

$$R_r = \frac{K_{\min} + K_R}{K_{\max} + K_R} \quad (3)$$

残留応力が da/dN に及ぼす影響は、母材に対する応力比 R の効果と等価に扱い得ることが、著者らの一人によって実験的に明らかにされている⁽⁷⁾。本実験に用いた母材の da/dN に及ぼす R の影響をき裂開口比 U との関係で示せば、式(4)のように記述される⁽¹²⁾。

$$\left. \begin{array}{ll} 0.05 \leq R \leq 0.6 & U = 0.82 + 0.3R \\ 0.6 < R & U = 1 \end{array} \right\} \quad (4)$$

da/dN に対する残留応力と R を等価とすると、式(4)の R に式(3)の R_r を代入することにより、残留応力を考慮したき裂開口比 U_r が算出される。さらに、この U_r から残留応力を考慮した有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{\text{eff}R}$ は、式(5)のように表される。

$$\Delta K_{\text{eff}R} = U_r \Delta K = (\gamma + \delta R_r) \Delta K \quad (5)$$

ただし $R_r > 0$

ここで、 γ と δ はそれぞれ式(4)に示した定数である。

式(5)は R_r が正の範囲を対象にしたもので、負の場合の扱いが問題となる。そこで、母材のき裂開口荷重 P_{op} を $R = 0.05, -1, -1.5, -2$ の場合について実測し、それらの比較を試みた。その結果、 $R < 0$ における P_{op} は R の値によらずいずれも等しく、それらは $R = 0.05$ の P_{op} とほぼ一致していた。疲労き裂の伝ばには P_{op} 以上の応力拡大係数範囲が寄与するので、 $R_r < 0$ となるときには $R_r = 0$ として、以下のように $\Delta K_{\text{eff}R}$ を定義する。

$$\Delta K_{\text{eff}R} = \gamma(K_{\max} + K_R) \quad (6)$$

ただし $R_r \leq 0$

以上の方法により算出した $\Delta K_{\text{eff}R}$ を用いて、図9の結果を再プロットした。その結果、図10に見られるように、 U に ΔK 依存がそれほど出現しない $da/dN > 5 \times 10^{-9}$ m/cycle のデータは、予荷重レベルによらず母材を中心とした比較的狭い散布帯中に表示される。なお、図10中の $0.5\sigma_y$ 予荷重試験片の K_R の算出に際して、 $\sigma_R(x)$ は da/dN を測定した試験片と同じく長さ 200 mm のものを用いて求めた。以上の結果から、溶接継手に外荷重を与えて角変形などを矯正した

図 10 予荷重試験片の da/dN と $\Delta K_{\text{eff}R}$ の関係

図 11 CT 試験片に対する $\Delta K_{\text{eff}R}$ の有効範囲

場合においても、矯正後に再分布した残留応力分布を用いて K_R を算出すれば、溶接継手の疲労き裂伝ば挙動を評価できると結論される。

3.5 K の重ね合わせ法の適用限界 前記したように、予荷重負荷した試験片においても K の重ね合わせは有効であった。しかし、疲労き裂が成長して小規模降伏から逸脱した場合には、繰返しの過程で残留応力が緩和するようになるために、 K の重ね合わせは成立しなくなると考えられる。このため、重ね合わせの成立限界について検討しておく必要がある。

CT 試験片の da/dN を ΔK で評価する際の有効な範囲として、ASTM から式(7)で示す平面寸法に関する基準が提案されている⁽¹³⁾。

$$W-a > (4/\pi)(K_{\text{max}}/\sigma_y)^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 W は試験片の幅、 a はき裂長さ、 σ_y は材料の降伏応力である。

溶接試験片では残留応力が存在するために式(7)の基準では不十分であって、場合によってはかなり低い K_{max} レベルで小規模降伏から逸脱する可能性も予想される。そこで、この残留応力の影響を考慮すると、式(7)は式(8)のように記述できると考えられる。

$$W-a > (4/\pi)\{(K_{\text{max}}+K_R)/\sigma_y\}^2 \dots\dots\dots (8)$$

式(8)の有効性について検証するために、寸法の異なる CT 試験片 (図 1) を用いて ΔK を一定とした試験を行い、 da/dN を $\Delta K_{\text{eff}R}$ に対してプロットした。なお、CT 試験片の K_R は、片側き裂を有する板のき裂面に集中荷重が作用する場合の解⁽¹⁸⁾を式(9)のように変形することにより算出した。

$$K_R = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \int_0^a \frac{\sigma_R(x) G(x/a, a/W)}{(1-a/W)^{3/2} \sqrt{1-(x/a)^2}} dx \dots (9)$$

$x/a = \zeta$, $a/W = \eta$ とすると

$$G(\zeta, \eta) = g_1(\eta) + g_2(\eta)\zeta + g_3(\eta)\zeta^2 + g_4(\eta)\zeta^3$$

$$g_1(\eta) = 0.46 + 3.06\eta + 0.84(1-\eta)^5 + 0.66\eta^2(1-\eta)^2$$

$$g_2(\eta) = -3.52\eta^2$$

$$g_3(\eta) = 6.17 - 28.22\eta + 34.54\eta^2 - 14.39\eta^3 - (1-\eta)^{3/2} - 5.88(1-\eta)^5 - 2.64\eta^2(1-\eta)^2$$

$$g_4(\eta) = -6.33 + 25.16\eta - 31.04\eta^2 + 14.41\eta^3 + 2(1-\eta)^{3/2} + 5.04(1-\eta)^5 + 1.98\eta^2(1-\eta)^2$$

図 11 は da/dN - $\Delta K_{\text{eff}R}$ の関係を示したもので、図 11 中のソリッドシンボルは式(8)の条件を満足しない場合のデータである。図 11 から明らかなように、式(8)から逸脱してただちに da/dN が急変する状態は認められない。このため、 K の重ね合わせの成立限界を明確に定めることは困難であるが、式(8)を満足するデータは $\Delta K_{\text{eff}R}$ とほぼ良い相関が成立することから、式(8)を便宜的に CT 試験片に対する K の重ね合わせの上限として採用できるものと推定される。

4. 結 論

溶接継手の da/dN に及ぼす試験片寸法および予荷重履歴の影響を、残留応力との関連で検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- (1) 引張残留応力場からき裂が伝ばする場合には、き裂先端が常に開口状態となることが多く、 da/dN は試験片寸法に不敏感である。
- (2) 圧縮残留応力場からき裂が伝ばする場合には、試験片の寸法が増大するほど大きな残留応力が存在するために、 da/dN に強い遅延が生じる。
- (3) 残留応力が da/dN に及ぼす影響は、予荷重を負荷しない場合に最も顕著に現れる。0.7 σ_y 以上の予荷重は残留応力を緩和し、 da/dN は母材のそれに近づくようになる。
- (4) 予荷重によって残留応力が緩和した場合でも、緩和後の残留応力分布を用いて K の重ね合わせを行うと同時に、残留応力を母材の応力比効果と等価に扱うことにより、 da/dN を評価できる。
- (5) 試験片の平面寸法に関する ASTM の基準に残留応力の影響を考慮した範囲に対しては、 K の重ね合わせが成立する。

本研究の一部は、日本溶接協会原子力研究委員会 TFC-85 小委員会が実施した「軽水炉機器疲労強度の実験解析法に関する研究」の一環として行われたもので、関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Terada, H., *Eng. Fract. Mech.*, 8 (1976), 441.
- (2) Glinka, G., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 677 (1979), 198.
- (3) 仁瓶・ほか2名, 造船学会論文集, 152 (昭57), 390.
- (4) Parker, A. P., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 776 (1982), 13.
- (5) Nelson, D. V., 文献(4)の172ページ.
- (6) 本田・ほか2名, 材料, 33 (昭59), 103.
- (7) 小林・轟, 材料, 35 (昭61), 401.
- (8) 向井・ほか2名, 溶接学会論文集, 4 (昭61), 154.
- (9) 荒居・ほか2名, 機論, 53-492, A (昭62), 1574.
- (10) 大路・ほか4名, 文献(9)の1516ページ.
- (11) 橋内・吉久, 文献(9)の1525ページ.
- (12) 橋内・ほか5名, 材料, 36 (昭62), 1077.
- (13) *Annual Book of ASTM Standards*, E-647-81 (1981).
- (14) Srawley, J. E., *Int. J. Fract.*, 12 (1976), 475.
- (15) Isida, M., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 33 (1966), 674.
- (16) 軽水炉機器疲労強度の実験解析法に関する研究成果報告書, JWES-AE-8401 (昭59), 日本溶接協会.
- (17) Tada, H., ほか2名, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, (1985), 2.27, Del Research Corp.
- (18) 文献(17)の2.23.

討 論

〔質問〕 武藤 睦 治〔長岡技術科学大学〕

(1) 板幅の影響を比較的高い伝ば速度域で検討されているが, 図9からもわかるように, そのような領域では残留応力の相違が伝ば速度に顕著には現れない. 実際の寿命評価に重要となる低速度域での比較・検討が望ましいように思うが, いかがか.

(2) 試験片に切欠加工を施すと, 残留応力は一部解放されると同時に再分布し, 初期の分布とは必ずしも一致しない. 図5でき裂長さが短い領域で伝ば速度が低いのは, 著者らの言う「引張残留応力場」が再分布によりき裂先端では圧縮になったためと理解されるが, 他の理由によるものはないのか. また, 式(2)の K_R の推定に際しても, 再分布を考慮せず初期分布を用いることを提案されているが, 問題はないのか.

〔回答〕 (1) 本実験では da/dN に及ぼす板幅効果をCT試験片を用いて検討した. このうち母材から溶接線に向かってき裂が伝ばするCT試験片では, 溶接線前方に存在する大きな圧縮残留応力のために, 負荷した ΔK のレベルが低い場合にはただちにき裂が停留してしまい, ΔK 一定試験を行うことができなかった. このような停留は板幅の広い $W=200\text{ mm}$ の試験片で顕著に出現した. このため本実験では母材の da/dN が $5.5 \times 10^{-7} \text{ m/cycle}$ の高い ΔK レベルの試験を行った. なお, ご指摘の図9の結果はCCT試験片のデータであって, $2 \times 10^{-7} \leq da/dN < 8 \times 10^{-7} \text{ m/cycle}$ ではいずれの試験片も引張残留応力が存在するために, 残留応力を考慮したき裂開口比 U_r は試験片によらずほぼ1となり, したがって試験片ごとの残留応力の相違が da/dN に明確には現れなかった.

(2) ご指摘のように初期残留応力分布と再分布残留応力とは異なる. 残留応力場をき裂が伝ばする場合, 残留応力の一部が開放され(再分布する), それに伴ってき裂先端に応力拡大係数が誘起される. 本実験は小

規模降伏条件下のき裂を対象としていて, 残留応力の再配分を考慮した場合でも, 本報のように初期残留応力から K_R を算出した場合でも同一の結果が得られる. なお, このことは, 著者らの一人が他の研究者と行った共同研究(付1)で明らかにされている. したがって本報の小規模降伏条件下にあるき裂に対しては, 再分布を考慮することなく K_R を求めることができる.

図5の場合, 試験片の初期残留応力分布から求めた K_R は, 溶接線手前では負で, 溶接線近傍で正となり, 溶接線通過後に最大となることから, 溶接線手前では da/dN が K_R を反映して低下したと考えられる.

〔質問〕 鳥居 太 始之〔岡山大学工学部〕

実用に近い条件での貴論文を興味深く拝見した. 下記の点, 質問させていただきたい.

(1) 圧縮残留応力場からの疲労き裂伝ば速度が板厚の影響を受けること(図8)の理由について, 何かお考えがあればお教え願いたい.

(2) K_R はき裂先端後方の残留応力分布から計算されている. 一方, 重ね合わせが成立するか否かの問題は, き裂前方の塑性変形量に主に関係し, き裂前方の残留応力分布によっても影響されることが考えられる. 貴論文では引張りから圧縮へとかなり急な残留応力変化となっているので, 式(8)から逸脱しても, き裂前方の塑性変形量は一定応力場で計算される式(7)の条件に比べてかなり小さい可能性はないか.

〔回答〕 (1) 板厚効果を調べるために用いたCT試験片は, いずれも27 mmの厚さの母材を突合せ溶接後, 機械加工により板の両表面から均等に減厚することにより, 板厚 B を25, 15および7 mmにした. これらの試験片の残留応力分布を比較すると, $B=25\text{ mm}$ の場合が最も大きく, $B=7\text{ mm}$ では残留応力がかなり小さくなっていることから, 板厚が da/dN に及ぼす影響は残留応力に起因すると考えられる.

(2) 本実験ではき裂前方に存在する再分布残留応力を計測しておらず、またき裂先端の塑性域寸法も測定していないために、小規模降伏から逸脱後の再分布残留応力によって塑性域がどのような影響を受けるかは明らかではない。なお、残留応力の大きさおよび分布形によっては、ご指摘のように式(8)から逸脱しても式(7)をもとに計算される塑性域寸法よりも小さく

なる可能性があると予想され、このことも含めて重ね合わせの成立限界について今後さらに検討したく思っている。なお、小規模降伏にある場合には、討論1-(2)で述べたようにき裂先端に誘起される K によって一義的に塑性域が作られ、再分布残留応力の影響を受けないと考えられる。

(付1) 轟・小林, 機論 54-497, A (昭63), 30.