

JAERI-M
82-049

SUS 304鋼溶接部の疲労き裂伝播に
関する研究
(溶接残留応力下でのき裂伝播挙動の予測)

1982年5月

柴田 勝之・川村 隆一

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究
(溶接残留応力下でのき裂伝播挙動の予測)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柴田 勝之・川村 隆一

(1982年4月28日受理)

構造物の溶接部ではしばしば高い溶接残留応力が発生し、これに基因したき裂発生および伝播による破損が多く生じている。溶接残留応力がき裂発生や伝播に多くの影響を持つことは従来から指摘されているが、残留応力を定量的に把握することやき裂伝播との相互作用の解析が困難であることから、き裂伝播に及ぼす残留応力の影響に関してはあまり明らかにされていない。

最近、破壊力学に基づいたき裂伝播解析法が脆性破壊防止の観点から各種の非破壊検査基準に採用されるようになってきている。しかし、き裂伝播解析を精度良く行うためには欠陥寸法を正確に把握するとともに、残留応力の影響も適確に予測できることが重要なことの一つである。

残留応力中を疲労き裂が伝播するとき、き裂伝播にともなって残留応力の解放、再分配が起り、また残留応力と疲労荷重の重畳効果も発生する。

本報では以上のような残留応力中のき裂伝播挙動予測に関して簡易解析法を提案するとともに、予測結果と実験結果との比較を行った。予測は実験結果と一致するか、または幾分安全側となることが分った。

Studies on Fatigue Crack Growth Around
Weldment in SUS304 Stainless Steel

(Prediction of Crack Growth Behavior)
in Residual Stress Field

Division of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 28, 1982)

Many failures in welded structures are caused due to the initiation and propagation of cracks which are induced by the high welding residual stress. Up to now, it has been known that the welding residual stress has many influences on the crack initiation and propagation, but the problems of the influence of welding residual stress on the structural integrity are not so clear to date because of the difficulty of its quantitative evaluation and of the analysis on the interaction between the residual stress and crack growth.

Recently, an analytical procedure to predict the fatigue crack growth based on fracture mechanics has been introduced in some inspection standards and criteria for the purpose of preventing the brittle fracture. It seems important to perform the accurate crack growth predictions as regards the valid application of the above standards, as well as the practice of reliable defect sizing.

Therefore it is one of the important subjects to evaluate the influence of welding residual stress on the fatigue crack growth.

Relaxation and redistribution of the residual stress will be caused when crack extends in the residual stress field. Besides, an interaction effect between the fatigue stress and residual stress will be caused at the same time.

In this report is described a simple prediction on the fatigue crack growth behavior in the residual stress field firstly, and then the predictions are compared with the results of fatigue tests on center cracked panel specimen of SUS304 stainless steel.

Key words ; Fatigue Crack , Stainless Steel , Residual Stress ,
Crack Growth Rate , Base Metal , Weld Metal ,
Heat Affected Zone

目 次

1. まえがき	1
2. 残留応力下でのき裂伝播挙動の予測方法	2
3. 溶接試験片の残留応力測定結果	5
4. き裂伝播挙動の予測結果と実験結果との比較	5
5. 溶接部近傍におけるき裂伝播評価法について	8
6. 結 論	8
謝 辞	9
参 考 文 献	9

contents

1. Introduction	1
2. Prediction of crack growth in the residual stress field	2
3. Results of residual stress measurement in welded specimens	5
4. Comparison of crack growth behavior between prediction and test results	5
5. Evaluation of crack growth behavior around weldment	8
6. Conclusions	8
Acknowledgement	9
References	9

1. ま え が き

各種プラントの圧力容器あるいは配管の製造・施工における溶接施工をはじめその他多くの構造物において溶接が行われ、構造物の製作において溶接技術は不可欠な技術の一つとなっている。一方、構造物の溶接部ではしばしば欠陥からき裂が伝播したり、これに基因する破損が見られ、構造物に生ずる損傷のうちかなりの割合が溶接部に集中していることが知られている。

溶接部における破損を防止するには、適切な溶接設計および品質の良い溶接施工を行うことにより、溶接欠陥や残留応力をできる限り低減するとともに、熱影響による材質劣下も防止する必要がある。

しかし構造物の溶接部では多くの場合高い残留応力が発生し、これが疲労き裂伝播や破壊に影響を及ぼすと考えられる。とくに溶接後熱処理が困難な場合や、ステンレス配管溶接部のように溶接後熱処理による材質鋭敏化を避けたい場合には溶接後熱処理による残留応力の低減はできないので高い残留応力が生じていると考えられる。

最近、破壊力学に基づいたき裂伝播解析法や脆性破壊防止法が非破壊検査基準に採用されてきている。破壊力学に基づいたき裂伝播解析を精度良く行うためには、欠陥寸法を正確に把握するとともに、溶接残留応力の影響についても適確に予測する必要がある。

しかし、き裂伝播に及ぼす溶接残留応力の影響についてはこれまであまり明らかにされておらず、き裂伝播解析にあたってはほとんどの場合無視されている。その理由は残留応力およびその影響を正確に把握することが困難なことや実験データが少ないことによるものである。

従って、残留応力の影響を明らかにすることは信頼性の高いき裂伝播予測を行ううえで重要な課題である。

このような観点から著者らは溶接により残留応力が生じている中央切欠き型試験片を使用し、き裂伝播に及ぼす溶接残留応力の影響を明らかにする研究をこれまでに進めてきた。^{1) 2) 3)}

この研究結果から、構造物の溶接部に残留応力が発生している場合、き裂伝播速度は最大2~3倍程度高くなると推定されること、この伝播速度の加速現象はき裂伝播にともない引張残留応力がき裂先端部へと再分配されてゆく結果、初期残留応力が負の領域においても生じていること、さらにき裂伝播にともなって残留応力が著しく再分配される結果、き裂前方では塑性変形が生じていること等を明らかにした。また、以上のような溶接残留応力の再分配の挙動について有限要素法による解析でかなりシミュレーションできることも明らかにした。

残留応力中におけるき裂伝播挙動は平均応力の効果として予測することが可能と考えられる。しかし、き裂伝播にともなって刻々、残留応力が変化するので、この効果を平均応力の項に反映させなければならない。

平均応力の効果として予測する方法として残留応力の解放によって生ずる応力拡大係数 (k_{resid}) を用いる方法はすでに報告した通りである。¹⁾

しかし、すでに述べたように、き裂伝播にともなって残留応力が再分配され塑性変形が生じ

るので、 K_{resid} を単純に弾性論的に求めたのではかなり過大評価となる。

残留応力の解放によって生ずる応力拡大係数、 K_{resid} をより正確に求めるには塑性変形による緩和効果を適切に K_{resid} の評価に含める必要がある。

そこで本論では単純な弾塑性解析に基づいて得られる K_{resid} を用いた残留応力中におけるき裂伝播予測法を提案するとともに、新たに得られた残留応力測定結果を用いて伝播挙動を予測した結果と実験結果を比較する。

2. 残留応力下でのき裂伝播挙動の予測方法

残留応力中を疲労荷重の繰返しによってき裂が伝播する場合を考える。解析する対象は y 軸に対称で、中央で引張の残留応力分布を持つ中央切欠き試験片とする。この場合、試験片に負荷される荷重は、繰返し外荷重およびき裂伝播にともなう残留応力の再分配である。

そこで、き裂が a の寸法から微小量、 Δa 伝播する場合のこれらの荷重の影響をつぎの3ステップに分けて解析する。

- (1) 疲労荷重の負荷および除荷による残留応力の緩和の解析

疲労荷重は $S = 0 \rightleftharpoons S_{max}$ とする。

Fig. 1 に示すようにき裂寸法が a に達したときの残留応力分布を $\sigma_r(x)$ とし、試験片の断面が履歴した最大応力の分布を $\sigma_{r,max}(x)$ とする。

試験片に徐々に応力を負荷してゆく場合、き裂断面での変形を一様と仮定すると、微小量の応力負荷、 ΔS とそれに対応する変形、 $\Delta \varepsilon$ との関係はつぎの通りである。

$$\Delta \varepsilon = \Delta S \cdot b / \int_a^b E'(x) dx \quad (1)$$

(1)式において、 $E'(x)$ はき裂断面 ($y=0$) の x の位置における応力-歪線図の接線係数であり、ある点の応力 $\sigma(x)$ が $\sigma(x) < \sigma_{r,max}(x)$ 又は $\sigma(x) < \sigma_{ys}$ のときは E (ヤング率) である。また $\int_a^b E'(x) dx$ はき裂断面の剛性を示している。

このとき、き裂断面の応力増分は次のようになる。

$$\Delta \sigma(x) = E'(x) \Delta \varepsilon \quad (2)$$

従って ΔS の応力負荷によってき裂断面の応力はつぎのように変化する。

$$\sigma(x) = E'(x) \Delta \varepsilon + \sigma(x) \quad (3)$$

このようにして ΔS を微小量ずつ増加させ $S = S_{max}$ に達すると疲労荷重の最大応力位置でのき裂断面での応力分布が分る。

つぎに、疲労荷重の最大応力位置から除荷する場合は一様に弾性変形すると考える。すなわち、ゼロ荷重まで下げた場合の残留応力分布は上記から得られた最大点の応力分布、 $\sigma(x)$ から $b S_{max} / (b-a)$ を引けばよい。

$$\sigma_r(x) = \sigma(x) - b S_{max} / (b-a) \quad (4)$$

るので、 K_{resid} を単純に弾性論的に求めたのではかなり過大評価となる。

残留応力の解放によって生ずる応力拡大係数、 K_{resid} をより正確に求めるには塑性変形による緩和効果を適切に K_{resid} の評価に含める必要がある。

そこで本論では単純な弾塑性解析に基づいて得られる K_{resid} を用いた残留応力中におけるき裂伝播予測法を提案するとともに、新たに得られた残留応力測定結果を用いて伝播挙動を予測した結果と実験結果を比較する。

2. 残留応力下でのき裂伝播挙動の予測方法

残留応力中を疲労荷重の繰返しによってき裂が伝播する場合を考える。解析する対象は y 軸に対称で、中央で引張の残留応力分布を持つ中央切欠き試験片とする。この場合、試験片に負荷される荷重は、繰返し外荷重およびき裂伝播にともなう残留応力の再分配である。

そこで、き裂が a の寸法から微小量、 Δa 伝播する場合のこれらの荷重の影響をつぎの3ステップに分けて解析する。

- (1) 疲労荷重の負荷および除荷による残留応力の緩和の解析

疲労荷重は $S = 0 \Rightarrow S_{max}$ とする。

Fig. 1 に示すようにき裂寸法が a に達したときの残留応力分布を $\sigma_r(x)$ とし、試験片の断面が履歴した最大応力の分布を $\sigma_{r,max}(x)$ とする。

試験片に徐々に応力を負荷してゆく場合、き裂断面での変形を一樣と仮定すると、微小量の応力負荷、 ΔS とそれに対応する変形、 $\Delta \epsilon$ との関係はつぎの通りである。

$$\Delta \epsilon = \Delta S \cdot b / \int_a^b E'(x) dx \quad (1)$$

(1)式において、 $E'(x)$ はき裂断面 ($y=0$) の x の位置における応力-歪線図の接線係数であり、ある点の応力 $\sigma(x)$ が $\sigma(x) < \sigma_{r,max}(x)$ 又は $\sigma(x) < \sigma_{ys}$ のときは E (ヤング率) である。また $\int_a^b E'(x) dx$ はき裂断面の剛性を示している。

このとき、き裂断面の応力増分は次のようになる。

$$\Delta \sigma(x) = E'(x) \Delta \epsilon \quad (2)$$

従って ΔS の応力負荷によってき裂断面の応力はつぎのように変化する。

$$\sigma(x) = E'(x) \Delta \epsilon + \sigma(x) \quad (3)$$

このようにして ΔS を微小量ずつ増加させ $S = S_{max}$ に達すると疲労荷重の最大応力位置でのき裂断面での応力分布が分る。

つぎに、疲労荷重の最大応力位置から除荷する場合は一樣に弾性変形すると考える。すなわち、ゼロ荷重まで下げた場合の残留応力分布は上記から得られた最大点の応力分布、 $\sigma(x)$ から $b S_{max} / (b-a)$ を引けばよい。

$$\sigma_r(x) = \sigma(x) - b S_{max} / (b-a) \quad (4)$$

以上のようにして疲労荷重の負荷による塑性変形から生ずる残留応力の緩和を概算することができる。

(2) Δa のき裂伝播による残留応力の再分布計算

(1)によって求められた残留応力分布, $\sigma_r(x)$ 中をき裂が Δa 伝播するとすればこのときき裂が伝播した部分では残留応力が解放される。この解放された残留応力は残りの断面に再分配され新たな残留応力分布が生ずる。

Fig. 2 に示すように Δa のき裂伝播によって解放される荷重, ΔP_r は単位厚さ当り,

$$\Delta P_r = \int_a^{a+\Delta a} \sigma_r(x) dx \quad (5)$$

上式の荷重が残りのリガメントに一樣に分配されるとすると, 新たに生ずる残留応力分布はつぎの通りである。

$$\begin{aligned} \sigma_r(x) &= 0, \quad 0 \leq x < a \\ &= \sigma_r(x) + \frac{1}{b-a-\Delta a} \int_a^{a+\Delta a} \sigma_r(x) dx, \quad a \leq x \end{aligned} \quad (6)$$

(5)式および(6)式を適用する条件として, 新たに生ずる残留応力分布 $\sigma_r(x)$ は, リガメントが履歴した最大応力 $\sigma_{r, \max}(x)$ を超えないように Δa を選ぶ必要がある。

(1)および(2)のステップを交互に繰返すことにより疲労荷重およびき裂伝播による残留応力の再分布状態を簡易解析することができる。

(3) 応力拡大係数, K_{resid} の評価

残留応力の解放によって生ずる応力拡大係数, K_{resid} はき裂がないときの初期残留応力がき裂伝播によって弾性的に再分布することによって生ずるものである。あるき裂寸法における残留応力分布, $\sigma_r(x)$ は(1)および(2)の計算により求めることができる。ある初期残留応力, $\sigma_{r0}(x)$ がき裂伝播により $\sigma_r(x)$ に弾性的に再分布したとすれば, この $\sigma_{r0}(x)$ が分ればあるき裂寸法における K_{resid} を次式により評価できる⁴⁾。

$$K_{\text{resid}} = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_{r0}(x) dx}{\sqrt{a^2-x^2}} \quad (7)$$

上記の $\sigma_{r0}(x)$ を評価するため $\sigma_{r0}(x)$ は $x=a$ までは一樣の分布だと仮定し, また再分布も一樣に生ずると仮定する。そうすると, Fig. 3 に示すように $\sigma_{r0}(x)$ は次式から求めることができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{r0}(x) &= \frac{b-a}{b} \sigma_r(x)_{x=a}, \quad 0 \leq x \leq a \\ &= \sigma_r(x) - \frac{a}{b} \sigma_r(x)_{x=a}, \quad a \leq x \end{aligned} \quad (8)$$

このようにしてある残留応力分布 $\sigma_{r0}(x)$ がき裂, a の伝播により弾性的に再分布し, $\sigma_r(x)$ の残留応力分布になるかを推定することができる。さらにこの $\sigma_{r0}(x)$ の残留応力分布を使用し(7)式の積分を行うと次式の通りである。

$$K_{\text{resid}} = \frac{b-a}{b} \sigma_r(x)_{x=a} \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

(4) K_{resid} に基づくき裂伝播挙動の評価

疲労き裂伝播速度は応力拡大係数範囲および応力比により決定されることが知られている。すなわち、応力拡大係数範囲、 ΔK と応力比、 R の関数として表現される。

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (10)$$

応力比、 R は応力拡大係数の最大と最小の比であり一定振幅および一定平均応力下では一定である。しかし、残留応力中をき裂が伝播する場合 K_{resid} の分が加わるので最大および最小応力拡大係数はつぎのようになり、き裂伝播にもなって変化する。

$$K_{min} = \frac{R}{1-R} \Delta K + K_{resid} \quad (11)$$

$$K_{max} = \frac{1}{1-R} \Delta K + K_{resid} \quad (12)$$

すなわち、(11)式および(12)式から残留応力がある場合の応力比（応力拡大係数比）を求めることができる。

この応力比を R_{resid} とすると残留応力がある場合の伝播速度はつぎのようになる。

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R_{resid}) \quad (13)$$

従って、 $K_{resid} = 0$ すなわち残留応力なしの場合のき裂伝播速度、(10)式の形が分れば(13)式より残留応力がある場合のき裂伝播速度を求めることができる。

き裂伝播速度におよぼす応力比の影響については各種の式が提案されているが、Elberの Crack closure の測定結果に基づく方法⁵⁾をここでは採用する。Elberは Crack closure の測定結果から応力比効果を含めた有効応力拡大係数幅を求めた。

$$\Delta K_{eff} = (0.5 + 0.4R) \Delta K \quad (14)$$

(14)式を使えば(10)式および(13)式はつぎのようになる。

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{eff}) \quad (15)$$

(15)式より残留応力がない場合の $da/dN - \Delta K_{eff}$ を求めておき、この関係から残留応力がある場合のき裂伝播速度を予測することができる。さらに、き裂伝播速度の式からき裂伝播曲線、 $a - N$ 曲線を求めることができる。

$$N = \int_{a=a_{min}}^{a=a_{max}} \frac{da}{f(\Delta K_{eff})} \quad (16)$$

以上のようにして残留応力がない場合の da/dN vs. ΔK_{eff} 曲線を材料試験により求めておけば残留応力中を疲労き裂が伝播する場合について(15)式および(16)式により伝播挙動を推定できる。

3. 溶接試験片の残留応力測定結果

残留応力中のき裂伝播は以上に述べたように平均応力の効果に基づいて予測できる。この平均応力効果を求めるには試験片に生じている初期の残留応力分布を求めておく必要がある。そのため2本の溶接試験片(W-7 および W-12 試験片)において歪ゲージを用いて切断法により残留応力分布を求めた。

切断は放電加工により行った。切断に際し、切断によって残留応力の再分配が生じ塑性変形が生じないようにするため、できるだけ正負の応力がバランス良く解放されるよう切断作業を行った。残留応力測定に使用した2本の試験片のゲージ貼付位置および切断位置をFig. 4に示す。Table 1 および Table 2 に各試験片の歪ゲージによる解放歪測定結果を示す。

Fig. 5 に $y=0, 15, 35, 55, 75$ mm の各断面における y 方向残留応力分布を示す。この残留応力分布図は2本の試験片による測定結果を平均したものである。

同図から分るように、いずれの断面においても試験片の中央において残留応力は最大である。中央から離れるに従って残留応力は減少し、 $x=30$ mm 付近において圧縮残留応力に転じている。この残留応力の正負が逆転する位置は溶接境界から約 8 mm 離れた位置である。また、各断面における正負の残留応力のバランスは良く取れており良好な測定結果であると判断される。 $y=0$ mm 断面における引張残留応力は約 35 Kg/mm^2 前後であり非常に大きな値である。この部分では溶接変形による引張降伏が生じていると考えられる。

Fig. 6 は X 方向残留応力分布を $X=0, 20, 40$ mm の各断面について示したものであり、この場合も中央で最大引張残留応力であり、それから離れるに従って減少してゆき引張から圧縮残留応力へと変化してゆく。

4. き裂伝播挙動の予測結果と実験結果との比較

溶接試験片を用いたき裂伝播試験は中央に 45 mm 長さの溶接線(ビード幅 15 mm)を持つ 130 mm $W \times 390$ mm L の中央切欠き型試験片によりつぎの3条件の疲労試験を行った。

- (1) き裂が母材中を伝播するケース(Case 1, き裂位置は $y=25$ mm)
- (2) き裂が溶接金属から母材へと伝播するケース(Case 2, き裂位置は $y=0$ mm)
- (3) き裂が熱影響部から母材へと伝播するケース(Case 3, き裂位置は $y=10$ mm)

以上のほか同一形状の母材試験片(残留応力なしの場合)についてもき裂伝播試験を実施した。さらに、残留応力中における伝播予測を行うにはき裂伝播試験片の試験断面における応力一歪線図が必要であり、そのため溶接試験片製作用溶接板から切出した引張試験片により溶接試験片における応力一歪線図を詳細に調べた。

以上の実験結果については JAERI-M 8900³⁾ にすでに報告したのでここでは省略する。

き裂伝播挙動の予測には材料(残留応力なしの場合)の $da/dN - \Delta K_{eff}$ 曲線および応力一

3. 溶接試験片の残留応力測定結果

残留応力中のき裂伝播は以上に述べたように平均応力の効果に基づいて予測できる。この平均応力効果を求めるには試験片に生じている初期の残留応力分布を求めておく必要がある。そのため2本の溶接試験片(W-7およびW-12試験片)において歪ゲージを用いて切断法により残留応力分布を求めた。

切断は放電加工により行った。切断に際し、切断によって残留応力の再分配が生じ塑性変形が生じないようにするため、できるだけ正負の応力がバランス良く解放されるよう切断作業を行った。残留応力測定に使用した2本の試験片のゲージ貼付位置および切断位置をFig. 4に示す。Table 1およびTable 2に各試験片の歪ゲージによる解放歪測定結果を示す。

Fig. 5に $y=0, 15, 35, 55, 75$ mmの各断面における y 方向残留応力分布を示す。この残留応力分布図は2本の試験片による測定結果を平均したものである。

同図から分るように、いずれの断面においても試験片の中央において残留応力は最大である。中央から離れるに従って残留応力は減少し、 $x=30$ mm付近において圧縮残留応力に転じている。この残留応力の正負が逆転する位置は溶接境界から約8 mm離れた位置である。また、各断面における正負の残留応力のバランスは良く取れており良好な測定結果であると判断される。 $y=0$ mm断面における引張残留応力は約 35 Kg/mm^2 前後であり非常に大きな値である。この部分では溶接変形による引張降伏が生じていると考えられる。

Fig. 6は X 方向残留応力分布を $X=0, 20, 40$ mmの各断面について示したものであり、この場合も中央で最大引張残留応力であり、それから離れるに従って減少してゆき引張から圧縮残留応力へと変化してゆく。

4. き裂伝播挙動の予測結果と実験結果との比較

溶接試験片を用いたき裂伝播試験は中央に45 mm長さの溶接線(ビード幅15 mm)を持つ130 mm W×390 mm Lの中央切欠き型試験片によりつぎの3条件の疲労試験を行った。

- (1) き裂が母材中を伝播するケース(Case 1, き裂位置は $y=25$ mm)
- (2) き裂が溶接金属から母材へと伝播するケース(Case 2, き裂位置は $y=0$ mm)
- (3) き裂が熱影響部から母材へと伝播するケース(Case 3, き裂位置は $y=10$ mm)

以上のほか同一形状の母材試験片(残留応力なしの場合)についてもき裂伝播試験を実施した。さらに、残留応力中における伝播予測を行うにはき裂伝播試験片の試験断面における応力一歪線図が必要であり、そのため溶接試験片製作用溶接板から切出した引張試験片により溶接試験片における応力一歪線図を詳細に調べた。

以上の実験結果についてはJAERI-M 8900³⁾にすでに報告したのでここでは省略する。

き裂伝播挙動の予測には材料(残留応力なしの場合)の $da/dN-\Delta K_{eff}$ 曲線および応力一

歪線図が必要である。

予測に必要な $da/dN - \Delta K_{eff}$ 曲線は母材試験片の試験結果から得た。この曲線を Fig. 7 に示す。また予測において使用した母材、溶接金属、HAZの応力歪線図を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

き裂伝播予測は前述した方法により、 da/dN vs. a 曲線、 a vs. N 曲線等の数値解析を実行できるプログラムを作成して実施した。このプログラムを使用し、Fig. 7 および Fig. 8 に示した材料データを用い、Case 1, Case 2, Case 3 について各断面の残留応力分布を入力データとして数値解析を行った。なお、応力歪線図は Case 1 の場合はすべて母材、Case 2 の場合は $0 \text{ mm} \leq x < 23.0 \text{ mm}$ では溶接金属、 $23.0 \text{ mm} \leq x < 37.5 \text{ mm}$ では HAZ 2、 $37.5 \text{ mm} \leq x$ では母材とし、さらに、Case 3 の場合は $0 \text{ mm} \leq x < 23 \text{ mm}$ では HAZ 1、 $23 \text{ mm} \leq x < 37.5 \text{ mm}$ では HAZ 2、 $37.5 \text{ mm} < x$ では母材として計算した。

以上のように求めた予測伝播速度と(14)式に示した有効応力拡大係数の関係を各ケースについて示したのが Fig. 10 ~ Fig. 13 である。

これらの図では残留応力なしの場合については実線で示してある。図から分るように ΔK_{eff} でき裂伝播速度を整理すれば大略残留応力なしの場合と一致する。

Fig. 10 における Case 1 の場合、一番良く残留応力なしの場合と一致する。この場合 ΔK_{eff} が小さい範囲で若干低目の da/dN 予測となる。Fig. 11 および Fig. 12 における Case 2 の場合、 $\Delta\sigma = 10.0 \text{ Kg/mm}^2$ の場合にはほぼ残留応力なしの場合と良い一致を示す。しかし $\Delta\sigma = 8.0 \text{ Kg/mm}^2$ の場合には ΔK が高い範囲で幾分高目の da/dN 予測となっている。Case 3 の場合については ΔK の高い範囲で高目の da/dN 予測となるが、ほぼバラツキの範囲内となっている。Case 2 の場合にはき裂は溶接金属→HAZ→母材へと伝播してゆくのでき裂伝播にもなって機械的性質が変化し、また材質の変化も生じている。今回の予測では機械的性質を3種類変化させて入力したが、単純解析であるので、機械的性質の変化については十分考慮し切れないかも知れない。

また材質の変化についても考慮されていない。そのため Case 2 の場合、予測精度が一番低くなったと思われる。

つぎに、予測および実験結果のき裂伝播速度についてき裂寸法との関係を調べたのが Fig. 14 ~ Fig. 17 である。

これらの図から分るようにき裂伝播速度の傾向は Fig. 10 ~ Fig. 13 における da/dN vs. ΔK_{eff} 曲線と全く同じである。Fig. 15 および Fig. 16 における Case 2 の da/dN vs. a 曲線から分るように、この場合、き裂が溶接金属から HAZ へと伝播してゆく付近で、実験で得られた Case 2 の伝播速度が急に大きくなり、この付近で予測伝播速度と傾向が逆転している。このことから溶接金属と HAZ 部との境界および HAZ 部では材質の影響により伝播速度が増大すると考えられる。

さらに、(10)式に基づきき裂伝播曲線 ($a - N$ 曲線)の予測結果と実験結果を比較したのが Fig. 18 ~ Fig. 21 である。Fig. 18 に示す Case 1 の結果では実験結果にバラツキが生じているが、2体の試験片の結果とも予測曲線のバラツキの範囲内であり良好な予測結果といえる。

Fig. 19 および Fig. 20 に示す Case 2 では両方とも実験結果は下限の予測伝播曲線に近いカ

ーブとなっており、やや安全側の予測となっている。

Fig. 21 に示す Case 3 の場合も実験結果は下限の予測伝播曲線に近くなっており Case 2 の場合とほとんど同じ傾向の予測である。

これらの結果から分るように予測伝播曲線は実験結果に比べほぼ一致するか又は若干安全側となっている。

今回の解析のもととなる残留応力なしの場合の da/dN vs. ΔK_{eff} 曲線には母材の中央切欠き型試験片によるき裂伝播試験結果を用いているので、Case 2 および Case 3 では材質的な違いにより予測との差が生じたこともあり得る。しかし予測は両ケースとも安全側であるので本予測法の適用には問題はない。

5. 溶接部近傍におけるき裂伝播評価法について

すでに述べたように、構造物の溶接部では多くの場合高い残留応力が生じていることが予想される。また、残留応力中をき裂が伝播する場合、残留応力の影響によりき裂伝播速度が高くなることは著者らの実験結果¹⁾³⁾から明らかである。従って、残留応力が生じていると予想される部分でのき裂伝播解析を行う場合残留応力の影響を適切に評価する必要がある。

本報で示したき裂伝播予測法を適用する場合き裂伝播断面での残留応力分布を知らねばならない。しかし、一般に構造物の溶接部での残留応力分布を正確に把握することはほとんど不可能である。この場合には残留応力分布を適切に仮定して保守的なき裂伝播予測を行う必要がある。溶接近傍では一般にかなり複雑な残留応力分布をしているが、引張残留応力の最大位置では一般に降伏に達していると考えられる。本報で示した残留応力の再分布計算法ではき裂伝播および繰返し荷重にともなう塑性変形によって生ずる応力緩和を考慮しているので、繰返し荷重後は降伏に達している部分に対してはより小さな残留応力分布となる。そのため残留応力分布が分からない場合には引張側の残留応力分布を材料の降伏応力程度に仮定するのが妥当である。圧縮側には引張側と対称な残留応力分布を導入すれば良い。

このように推定した残留応力分布を用い、本報で示した予測法を適用すれば残留応力が生じている溶接近傍におけるき裂伝播を適切に評価可能と考える。

6. 結 論

残留応力中を疲労き裂が伝播するとき、き裂伝播にともなって残留応力が再分配される。残留応力に疲労荷重が重畳して負荷されると降伏応力を越える部分では塑性変形が生じる。さらに疲労荷重が除荷されるときは弾性的な挙動をするので塑性変形した部分では残留応力の緩和が生じる。

本報では、中央切欠き型試験片の場合について、残留応力中を疲労き裂が伝播するときの伝播挙動に関して上記のような残留応力の再分配および塑性変形による残留応力の緩和現象を考慮したき裂伝播予測法を提案した。また予測結果と実験結果の比較を行った。さらに本報における予測法を残留応力分布が未知な場合における溶接近傍でのき裂伝播予測に適用する場合についても提案した。これらの結果からつぎの結論が得られた。

- (1) 残留応力の再分配が弾的に生じ、また塑性変形による残留応力の緩和効果を考慮しないならば残留応力の影響を著るしく過大に評価することになる。逆に、残留応力の効果を無視すると、き裂伝播予測が危険側となることは実験結果から明らかである。
- (2) 予測結果は実験結果に対して ΔK の低い範囲でわずかに高くなっている。 ΔK の高い範囲では逆に幾分低い予測となるケースもある。
- (3) き裂伝播曲線は ΔK の低い範囲での繰返し数が支配的となるので、その予測結果は実験

5. 溶接部近傍におけるき裂伝播評価法について

すでに述べたように、構造物の溶接部では多くの場合高い残留応力が生じていることが予想される。また、残留応力中をき裂が伝播する場合、残留応力の影響によりき裂伝播速度が高くなることは著者らの実験結果¹⁾³⁾から明らかである。従って、残留応力が生じていると予想される部分でのき裂伝播解析を行う場合残留応力の影響を適切に評価する必要がある。

本報で示したき裂伝播予測法を適用する場合き裂伝播断面での残留応力分布を知らねばならない。しかし、一般に構造物の溶接部での残留応力分布を正確に把握することはほとんど不可能である。この場合には残留応力分布を適切に仮定して保守的なき裂伝播予測を行う必要がある。溶接近傍では一般にかなり複雑な残留応力分布をしているが、引張残留応力の最大位置では一般に降伏に達していると考えられる。本報で示した残留応力の再分布計算法ではき裂伝播および繰返し荷重にともなう塑性変形によって生ずる応力緩和を考慮しているため、繰返し荷重後は降伏に達している部分に対してはより小さな残留応力分布となる。そのため残留応力分布が分からない場合には引張側の残留応力分布を材料の降伏応力程度に仮定するのが妥当である。圧縮側には引張側と対称な残留応力分布を導入すれば良い。

このように推定した残留応力分布を用い、本報で示した予測法を適用すれば残留応力が生じている溶接近傍におけるき裂伝播を適切に評価可能と考える。

6. 結 論

残留応力中を疲労き裂が伝播するとき、き裂伝播にともなって残留応力が再分配される。残留応力に疲労荷重が重畳して負荷されると降伏応力を越える部分では塑性変形が生じる。さらに疲労荷重が除荷されるときは弾性的な挙動をするので塑性変形した部分では残留応力の緩和が生じる。

本報では、中央切欠き型試験片の場合について、残留応力中を疲労き裂が伝播するときの伝播挙動に関して上記のような残留応力の再分配および塑性変形による残留応力の緩和現象を考慮したき裂伝播予測法を提案した。また予測結果と実験結果の比較を行った。さらに本報における予測法を残留応力分布が未知な場合における溶接近傍でのき裂伝播予測に適用する場合についても提案した。これらの結果からつぎの結論が得られた。

- (1) 残留応力の再分配が弾的に生じ、また塑性変形による残留応力の緩和効果を考慮しないならば残留応力の影響を著るしく過大に評価することになる。逆に、残留応力の効果を無視すると、き裂伝播予測が危険側となることは実験結果から明らかである。
- (2) 予測結果は実験結果に対して ΔK の低い範囲でわずかに高くなっている。 ΔK の高い範囲では逆に幾分低い予測となるケースもある。
- (3) き裂伝播曲線は ΔK の低い範囲での繰返し数が支配的となるので、その予測結果は実験

結果よりいくぶん短寿命側となり保守的である。

- (4) 残留応力分布が未知な場合、残留応力が生じていると予想される溶接部近傍でのき裂伝播予測にあたっては本報で示した残留応力分布を推定することによりき裂伝播挙動を適切に評価できると考える。

Case 2 および Case 3 の場合にはき裂は溶接金属 → 熱影響部 → 母材、または熱影響部 → 母材へと伝播するのでこれらの材質の影響もあるかも知れない。本報での予測ではこの材質の影響は無視した。一般に言われているように、このような材質の影響は小さいものとする。

また、作成した伝播解析プログラムでは入力できる応力-歪線図を3種類としたが、これをき裂伝播面に沿ってより詳細に応力-歪線図を入力できるようにすれば、予測精度は幾分向上すると考えられる。

本報では中央切欠き型試験片を対象に予測法を提案したがこれを表面欠陥のような3次元問題に拡張することは可能と考える。

残留応力の再分配および塑性変形による残留応力の緩和等を正確に解析し、精度の高い予測を行うには有限要素法によらねばならない。しかし、本報の予測法は簡易解析に基づくものではあるが実用上は十分な精度であるとする。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、安全工学部構造強度研究室長、宮園昭八郎氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 柴田，川村，神野藤：オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究（第1報 残留応力がき裂伝播におよぼす影響について），日本機械学会講演論文集，No. 783-1，P. 4
- (2) 柴田，神野藤，川村：オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究（第2報 き裂伝播にともなう残留応力の再分布に関する実験と解析），日本機械学会講演論文集，No. 783-1，P. 36
- (3) 柴田，川村，神野藤：SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究（溶接部の機械的性質と母材，溶接金属，熱影響部のき裂伝播），JAERI-M 8900，1980年6月
- (4) 岡村弘之：線型破壊力学入門，培風館，昭和51年
- (5) W. Elber，ASTM STP 486，1971，PP. 230-242

結果よりいくぶん短寿命側となり保守的である。

- (4) 残留応力分布が未知な場合、残留応力が生じていると予想される溶接部近傍でのき裂伝播予測にあたっては本報で示した残留応力分布を推定することによりき裂伝播挙動を適切に評価できると考える。

Case 2 および Case 3 の場合にはき裂は溶接金属 → 熱影響部 → 母材、または熱影響部 → 母材へと伝播するのでこれらの材質の影響もあるかも知れない。本報での予測ではこの材質の影響は無視した。一般に言われているように、このような材質の影響は小さいものとする。

また、作成した伝播解析プログラムでは入力できる応力-歪線図を3種類としたが、これをき裂伝播面に沿ってより詳細に応力-歪線図を入力できるようにすれば、予測精度は幾分向上すると考えられる。

本報では中央切欠き型試験片を対象に予測法を提案したがこれを表面欠陥のような3次元問題に拡張することは可能と考える。

残留応力の再分配および塑性変形による残留応力の緩和等を正確に解析し、精度の高い予測を行うには有限要素法によらねばならない。しかし、本報の予測法は簡易解析に基づくものではあるが実用上は十分な精度であるとする。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、安全工学部構造強度研究室長、宮園昭八郎氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 柴田，川村，神野藤：オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究（第1報 残留応力がき裂伝播におよぼす影響について），日本機械学会講演論文集，No 783-1，P. 4
- (2) 柴田，神野藤，川村：オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究（第2報 き裂伝播にともなう残留応力の再分布に関する実験と解析），日本機械学会講演論文集，No 783-1，P. 36
- (3) 柴田，川村，神野藤：SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究（溶接部の機械的性質と母材，溶接金属，熱影響部のき裂伝播），JAERI-M 8900，1980年6月
- (4) 岡村弘之：線型破壊力学入門，培風館，昭和51年
- (5) W. Elber，ASTM STP 486，1971，PP. 230-242

結果よりいくぶん短寿命側となり保守的である。

- (4) 残留応力分布が未知な場合、残留応力が生じていると予想される溶接部近傍でのき裂伝播予測にあたっては本報で示した残留応力分布を推定することによりき裂伝播挙動を適切に評価できると考える。

Case 2 および Case 3 の場合にはき裂は溶接金属 → 熱影響部 → 母材、または熱影響部 → 母材へと伝播するのでこれらの材質の影響もあるかも知れない。本報での予測ではこの材質の影響は無視した。一般に言われているように、このような材質の影響は小さいものとする。

また、作成した伝播解析プログラムでは入力できる応力-歪線図を3種類としたが、これをき裂伝播面に沿ってより詳細に応力-歪線図を入力できるようにすれば、予測精度は幾分向上すると考えられる。

本報では中央切欠き型試験片を対象に予測法を提案したがこれを表面欠陥のような3次元問題に拡張することは可能と考える。

残留応力の再分配および塑性変形による残留応力の緩和等を正確に解析し、精度の高い予測を行うには有限要素法によらねばならない。しかし、本報の予測法は簡易解析に基づくものではあるが実用上は十分な精度であるとする。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、安全工学部構造強度研究室長、宮園昭八郎氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 柴田，川村，神野藤：オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究（第1報 残留応力がき裂伝播におよぼす影響について），日本機械学会講演論文集，No. 783-1，P. 4
- (2) 柴田，神野藤，川村：オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究（第2報 き裂伝播にともなう残留応力の再分布に関する実験と解析），日本機械学会講演論文集，No. 783-1，P. 36
- (3) 柴田，川村，神野藤：SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究（溶接部の機械的性質と母材，溶接金属，熱影響部のき裂伝播），JAERI-M 8900，1980年6月
- (4) 岡村弘之：線型破壊力学入門，培風館，昭和51年
- (5) W. Elber，ASTM STP 486，1971，PP. 230-242

Table 1 Results of relaxed strainmeasurement (W-7, W-13)

Gage No	W-7 Specimen		W-12 Specimen	
	ballance (μ)	output (μ)	ballance (μ)	output (μ)
1	0	- 1037	0	- 1547
2	- 1	- 1260	0	- 1383
3	- 1	- 1338	0	- 1198
4	- 1	364	1	752
5	0	1549	0	1297
6	0	1132	- 1	1414
7	0	1070	0	1346
8	0	- 903	0	- 1235
9	0	- 970	1	- 1091
10	- 1	- 609	0	- 699
11	0	233	0	537
12	- 1	676	0	962
13	- 1	871	0	1063
14	0	883	- 1	1094
15	1	- 796	0	- 1116
16	0	- 711	1	- 907
17	1	- 456	0	- 320
18	0	- 81	0	72
19	0	235	0	398
20	0	407	- 1	517
21	0	534	- 1	574
22	1	- 370	0	- 454
23	1	- 247	1	- 250
24	1	55	1	89
25	0	226	- 1	174
26	0	- 114	0	- 99
27	1	- 60	0	- 94
28	1	75	1	- 10
29	0	106	- 1	1
30	- 1	- 742	0	- 1388
31	- 1	- 572	0	- 726
32	0	- 706	- 1	- 846
33	1	- 293	- 1	- 527
34	0	- 779	- 1	- 797
35	0	- 222	0	- 154
36	- 2	- 486	- 1	- 550
37	2	- 203	0	- 346
38	- 1	497	- 1	561
39	0	313	0	302
40	0	0	0	- 87
41	0	- 134	2	- 152
42	0	620	0	781
43	1	349	- 1	480
44	0	51	1	118
45	0	- 48	0	- 55
46	0	267	- 1	350
47	0	144	- 1	261
48	0	26	0	106
49	0	6	0	- 2

Table 2 Results of relaxed strain measurement (W-12)

Gage No.	A (μ)		B (μ)		C (μ)		D (μ)		E (μ)	
	0	outp	0	outp	0	outp	0	outp	0	outp
1	1	-46	1	-10	0	-1	0	-35	0	-47
2	1	36	2	10	-1	-40	0	15	0	8
3	0	-96	1	63	0	17	0	-28	-1	-14
4	0	134	1	-166	0	-7	0	19	0	58
5	1	12	0	16	0	3	-1	-32	1	-48
6	1	-20	1	41	0	13	0	24	-1	17
7	1	-77	1	6	-1	-11	0	-10	-1	-20
8	1	154	1	-124	-1	11	0	-3	-1	21
9	0	73	1	-80	-1	-15	0	-23	0	-38
10	0	-205	1	202	0	39	-1	22	0	9
11	1	-9	0	-29	0	-15	0	-42	0	-31
12	1	-117	0	79	-1	17	-1	-1	1	23
13	2	55	0	-116	-1	-35	-1	3	0	-9
14	1	40	0	141	0	68	0	7	0	0
15	0	21	1	-50	0	-13	-1	-41	0	-40
16	0	50	1	75	0	28	-1	-6	0	17
17	1	-78	2	-76	1	-29				
18	1	111	1	110	0	70				
19	0	-26	1	-28	0	-26				
20	1	47	0	42	0	45				
21	1	-62	1	-64	0	-26				
22	0	95	1	107	0	58				
23	1	-7	1	-55	1	-20				
24	1	10	1	74	0	40				
25	1	-44	1	-23	0	-7				
26	0	55	1	38	0	21				
27	0	22	1	-43	0	-26				
28	1	4	1	38	0	24				

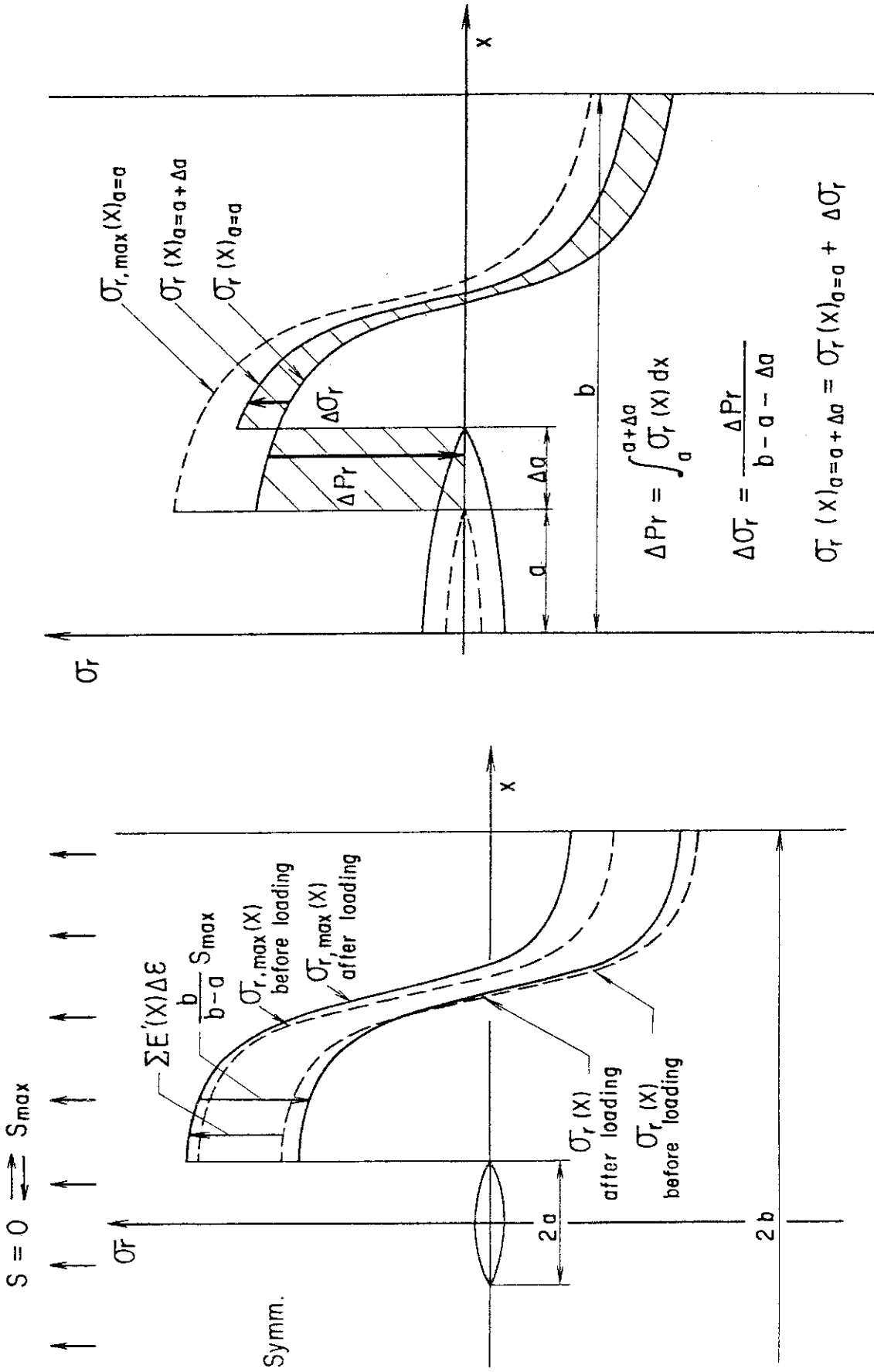


Fig. 1 Relaxation of residual stress due to the plastic deformation of local yield loading

Fig. 2 Residual stress distribution following the crack extension of Δa

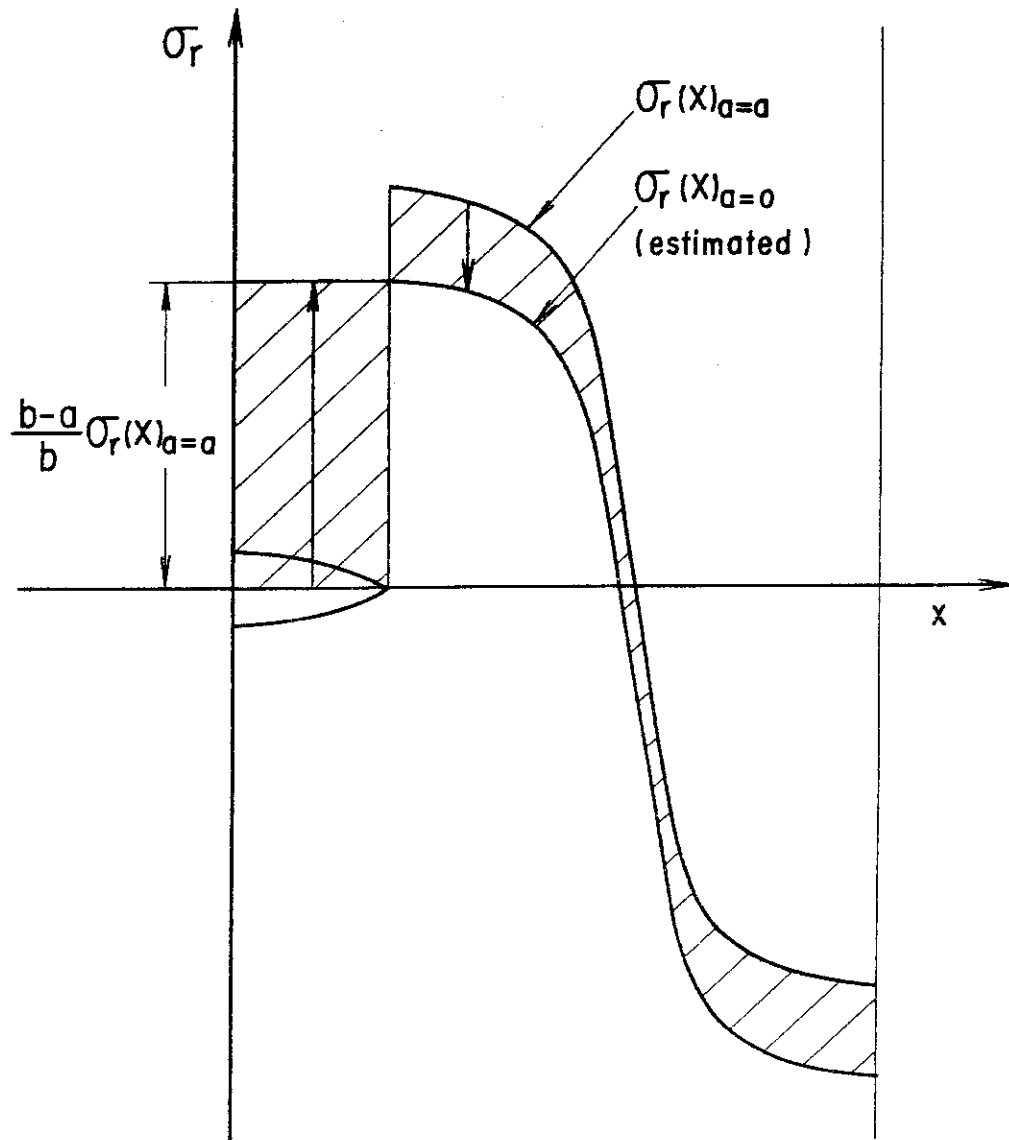


Fig. 3 Estimation of the initial residual stress distribution from the residual stress distribution at crack size, a

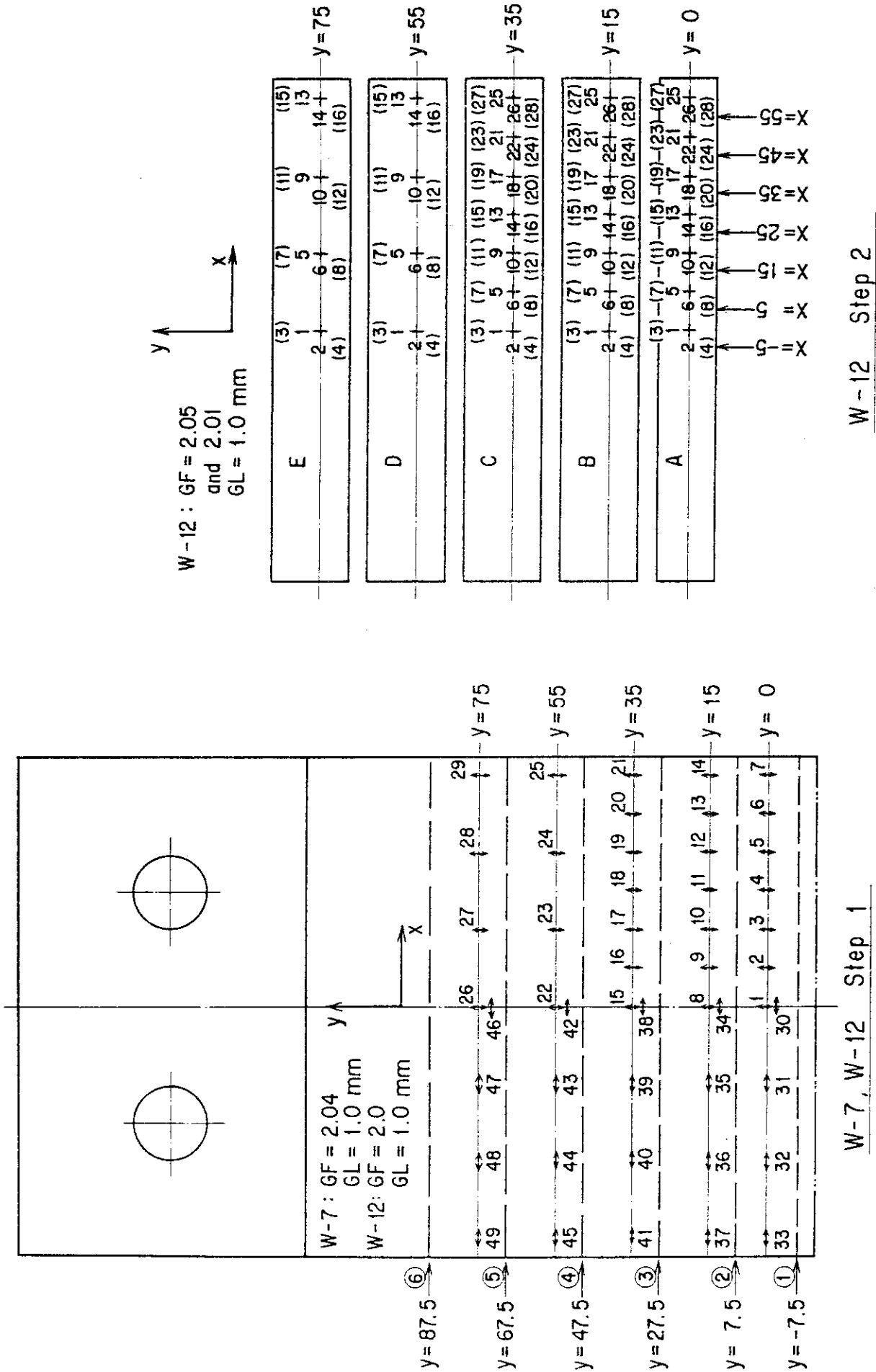


Fig. 4 Location of sectioning and strain gages

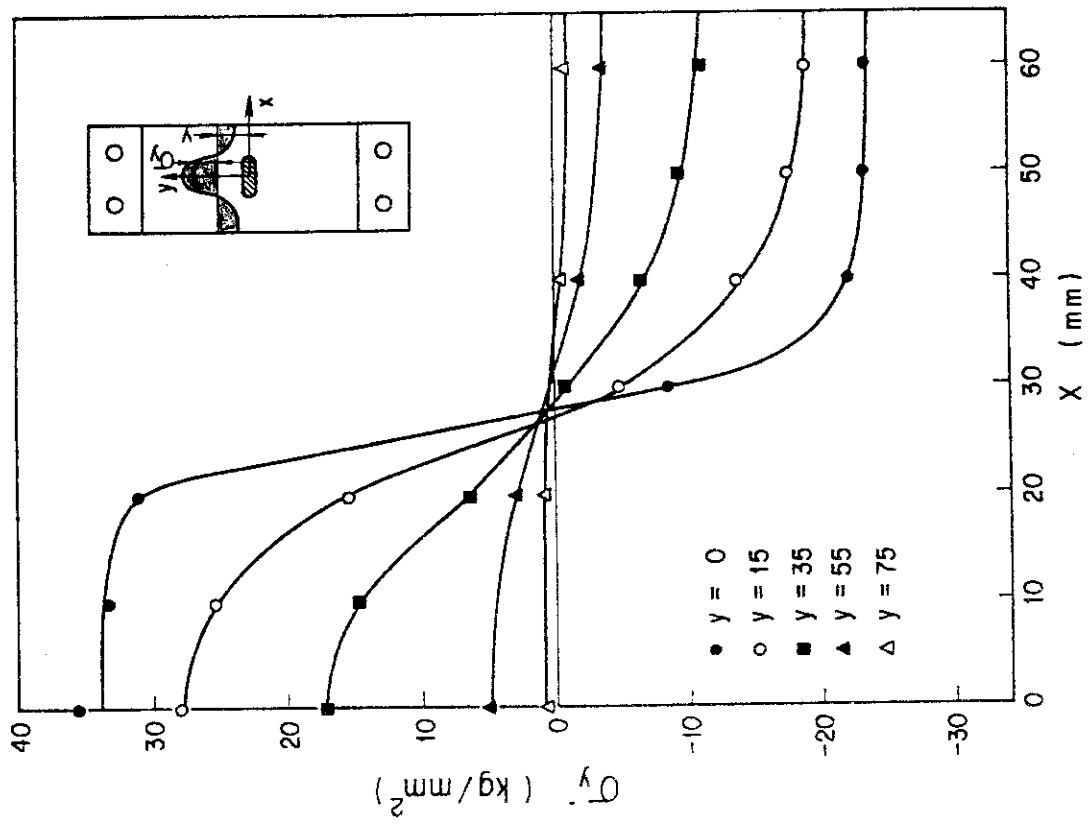


Fig. 5 y-direction residual stress distribution

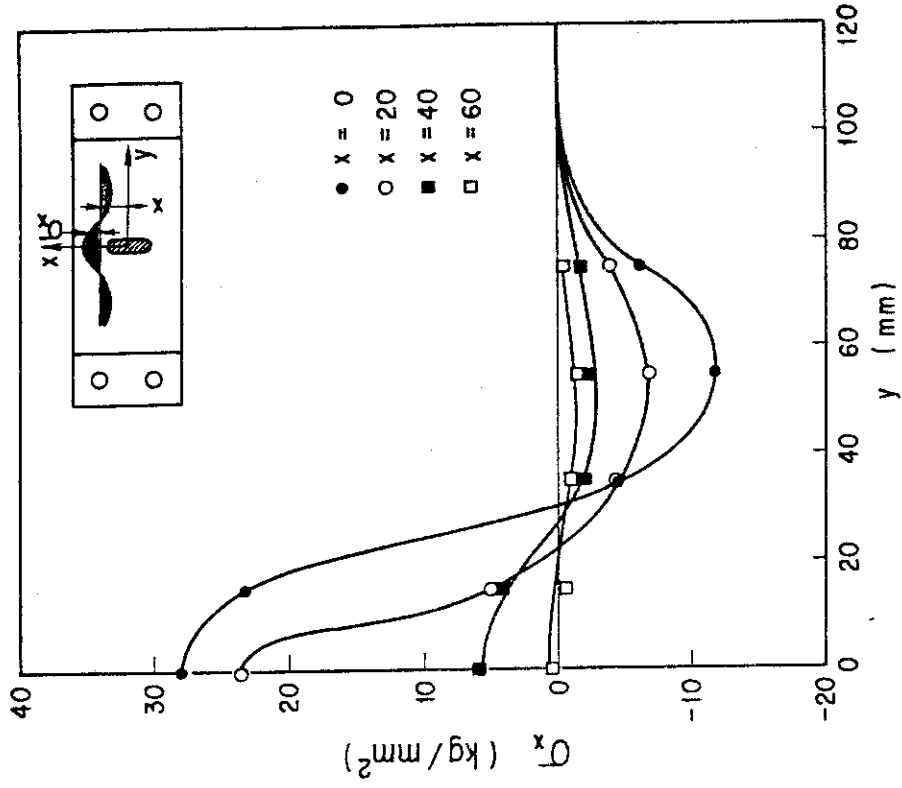


Fig. 6 x-direction residual stress distribution

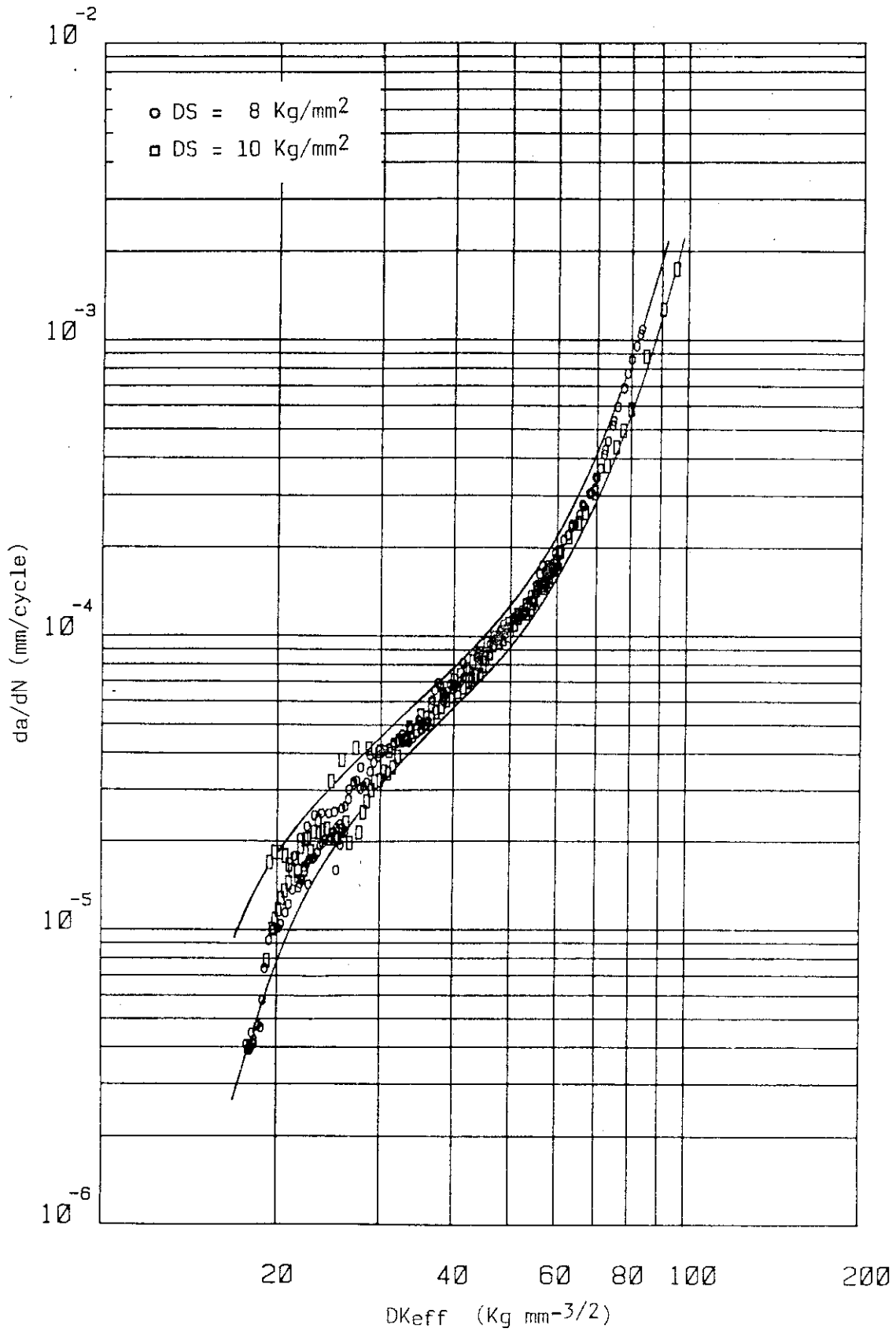


Fig.7 da/dN vs. DK_{eff} curve of base metal specimen

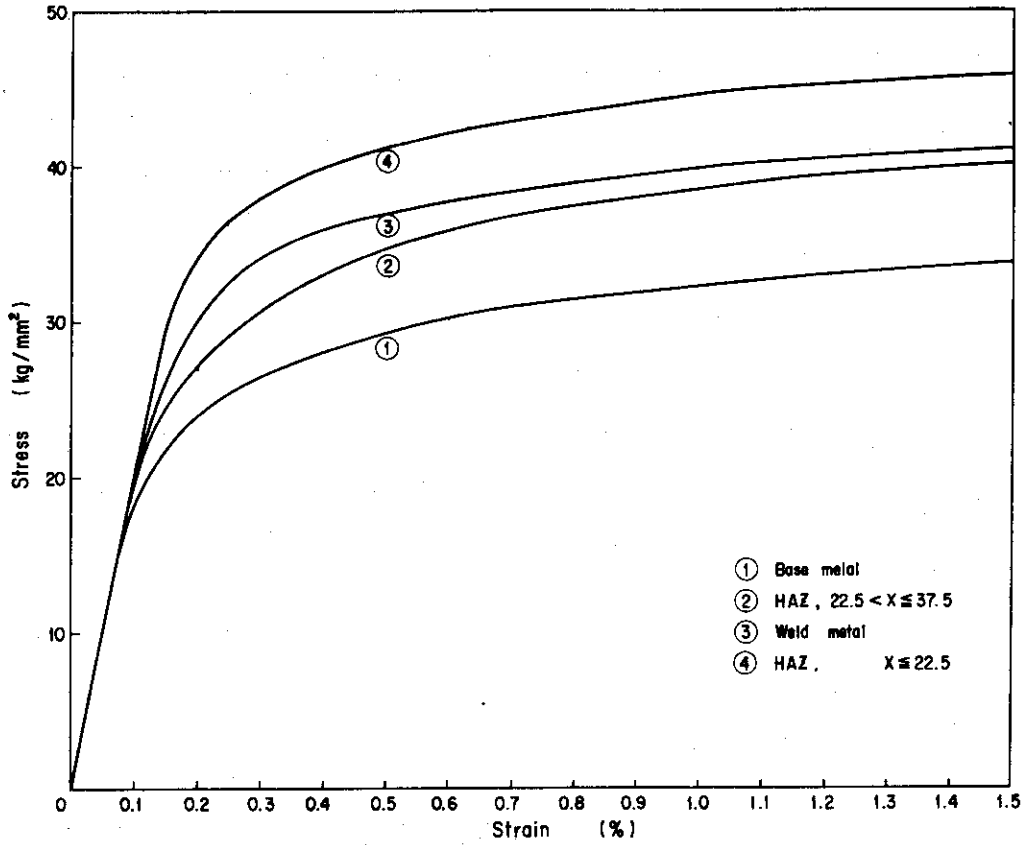


Fig. 8 Stress - strain curves along the X - coordinate of specimen ($\epsilon < 1.5\%$)

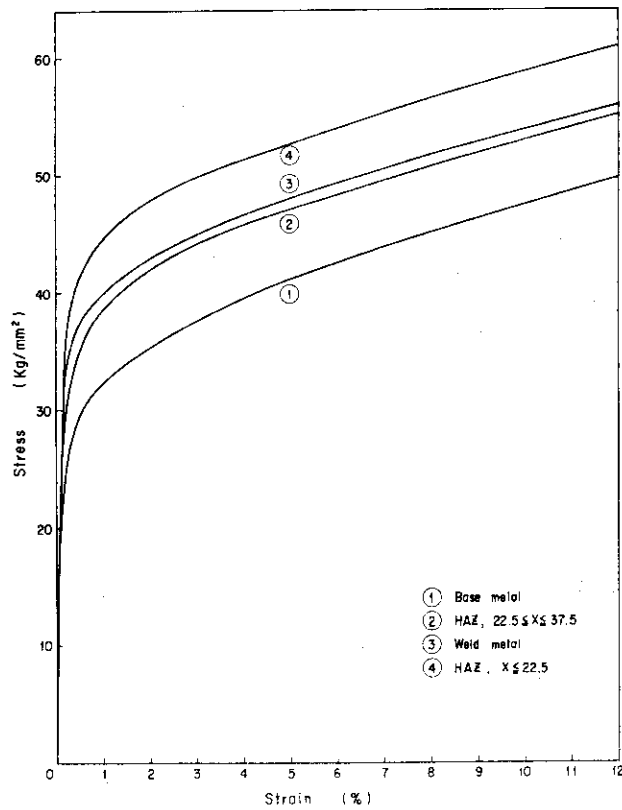


Fig. 9 Stress - strain curves along the X - coordinate of specimen ($\epsilon < 12\%$)

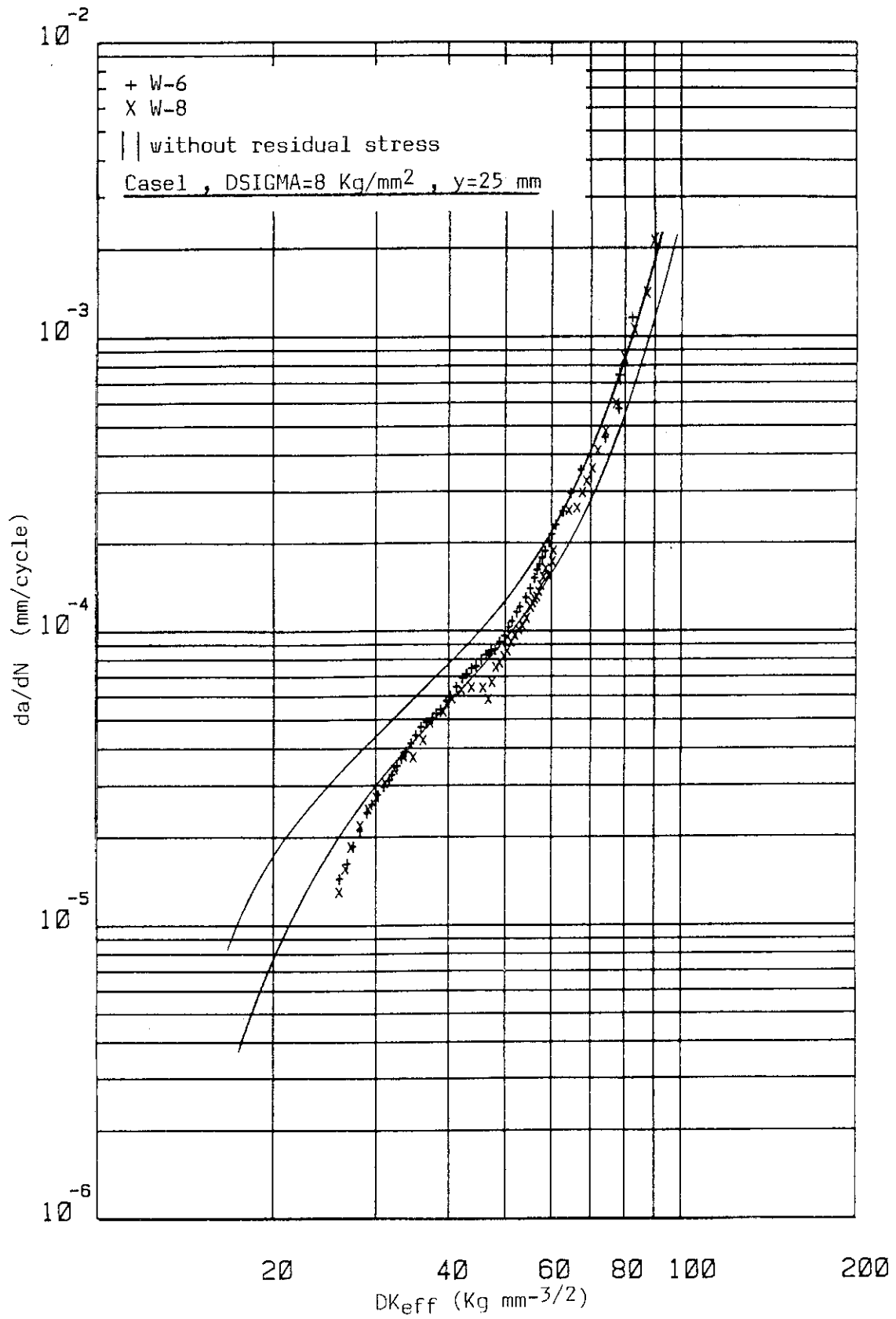


Fig.10 Comparison of da/dN vs. DK_{eff} curves

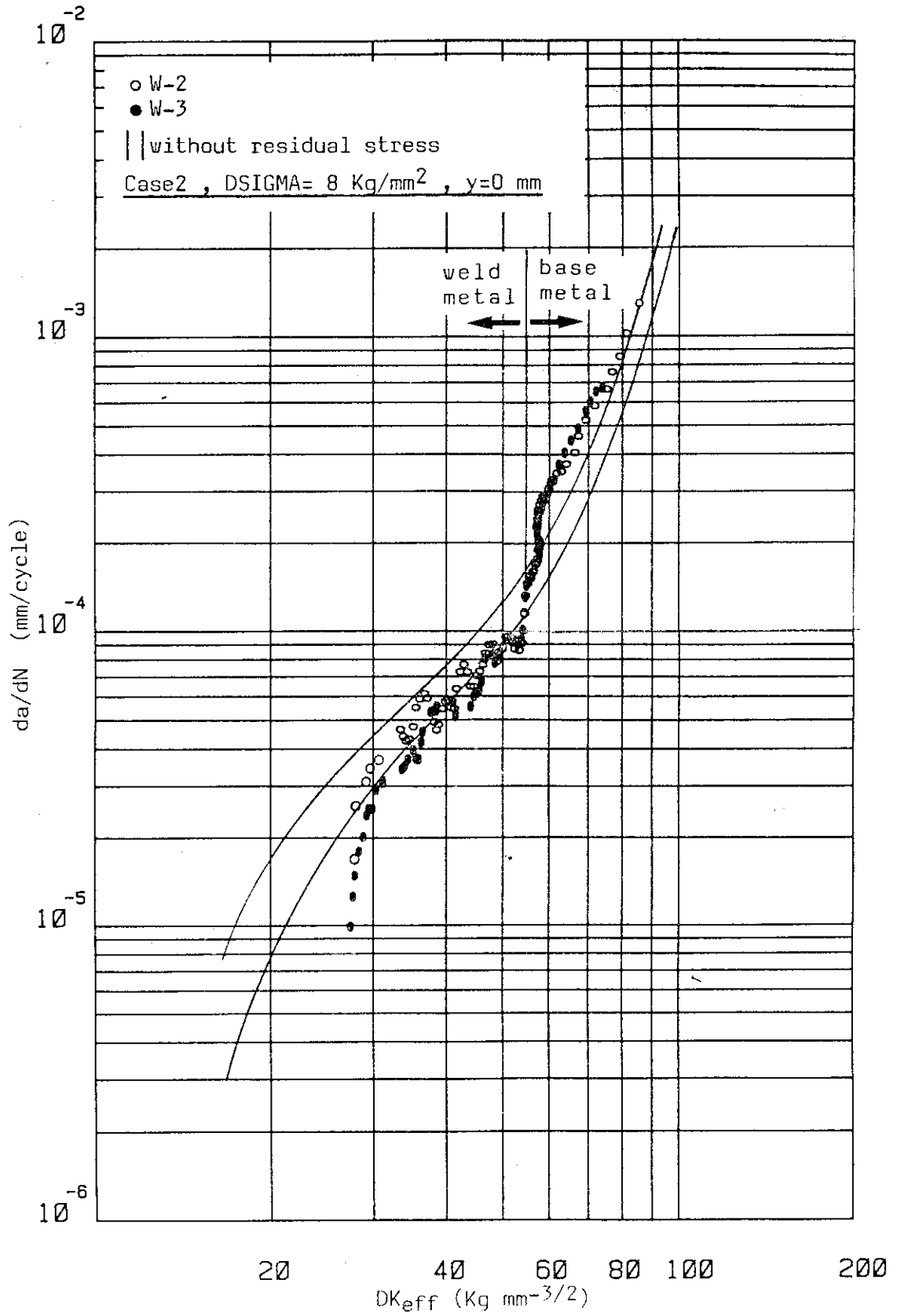


Fig.11 Comparison of da/dN vs. DK_{eff} curves

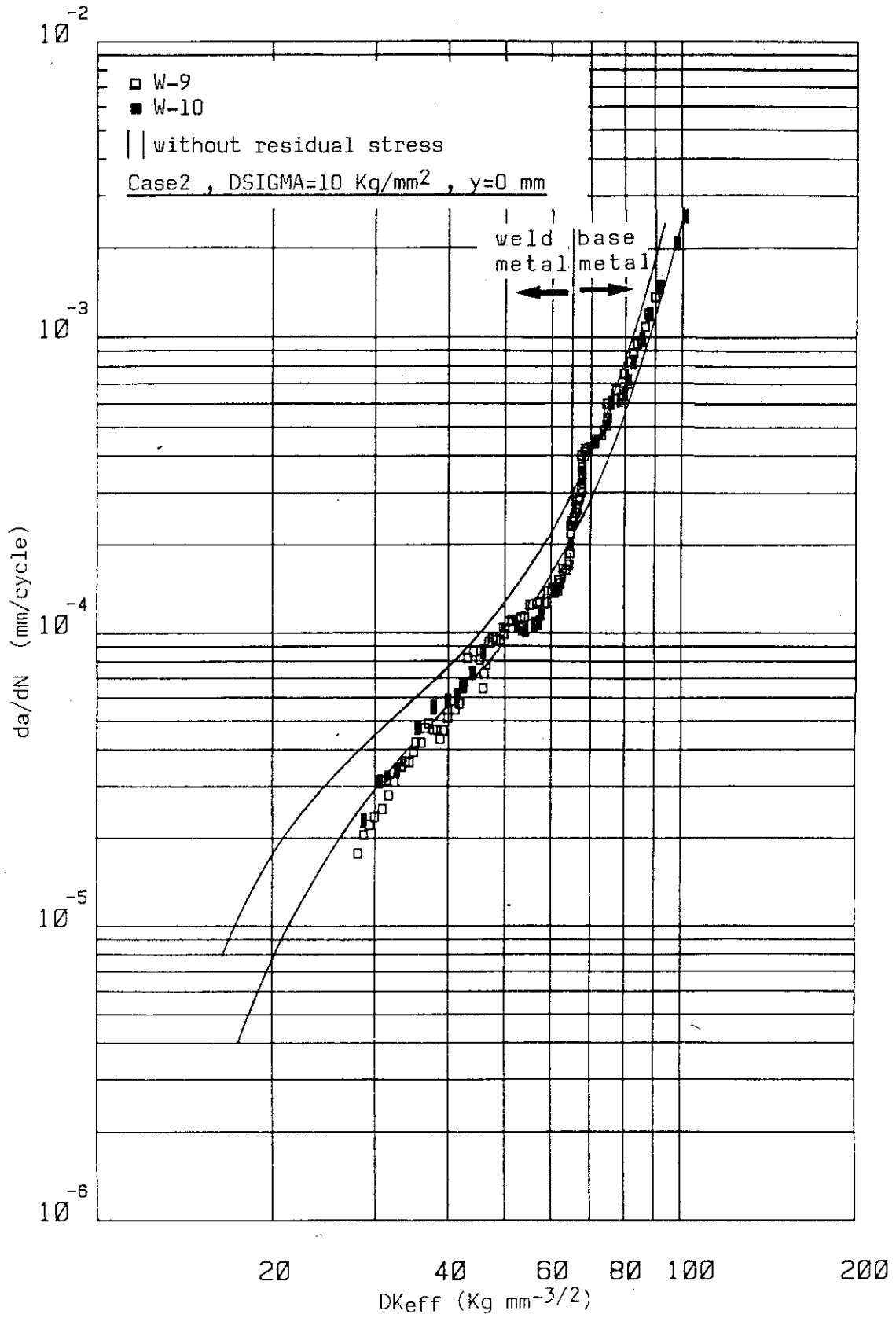


Fig.12 Comparison of da/dN vs. DK_{eff} curves

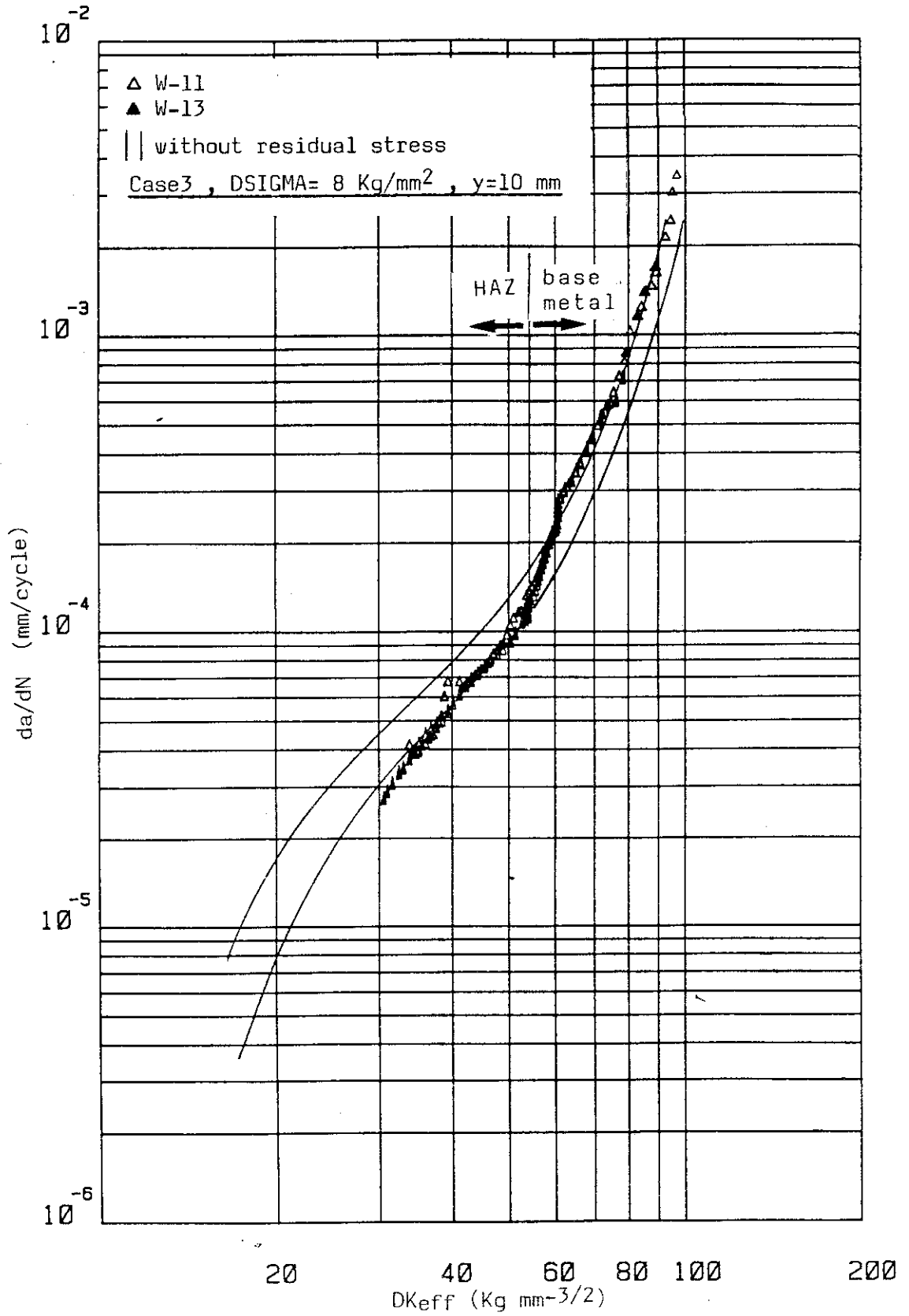


Fig.13 Comparison of da/dN vs. DK_{eff} curves

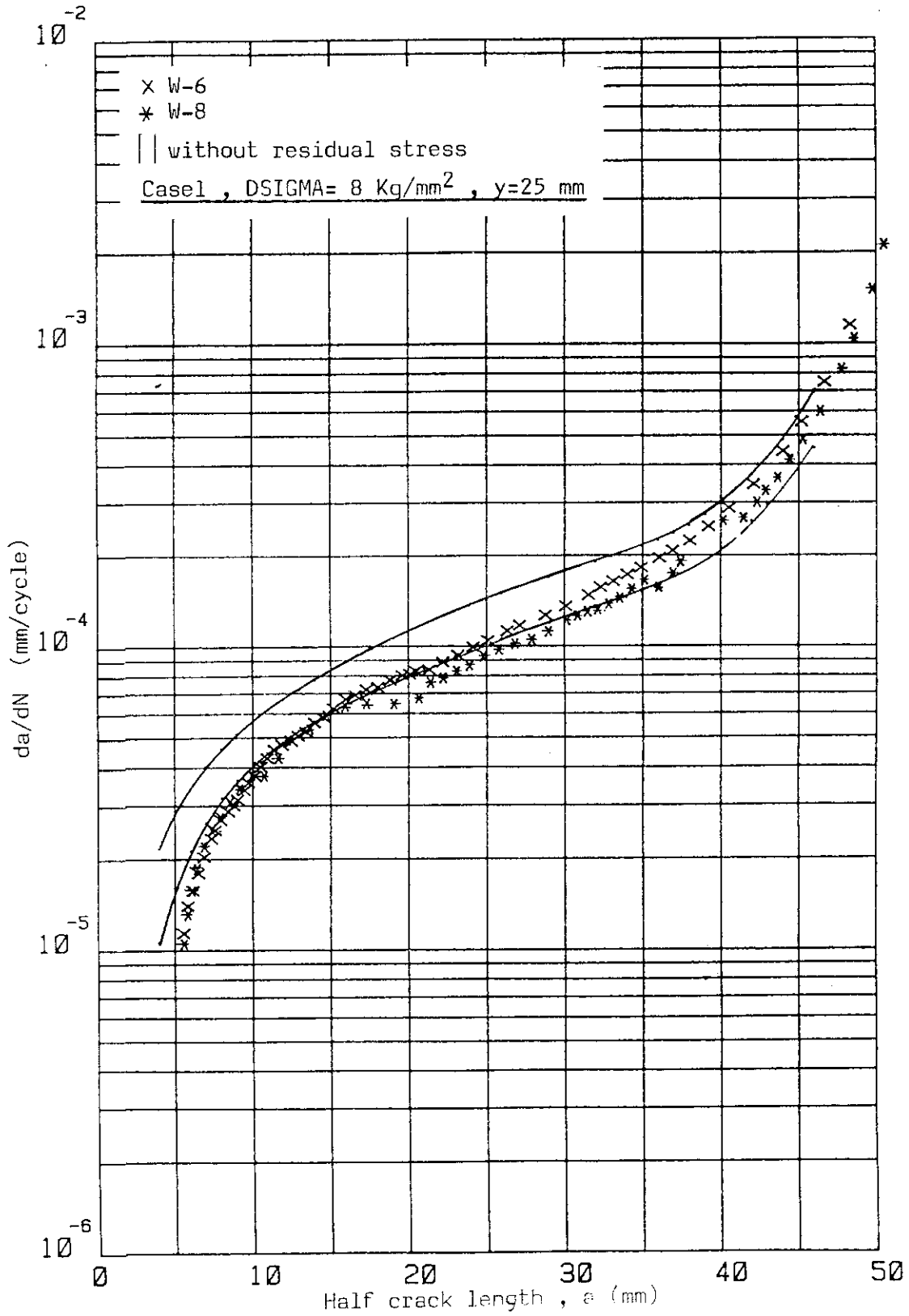


Fig.14 Comparison of da/dN vs. a curves

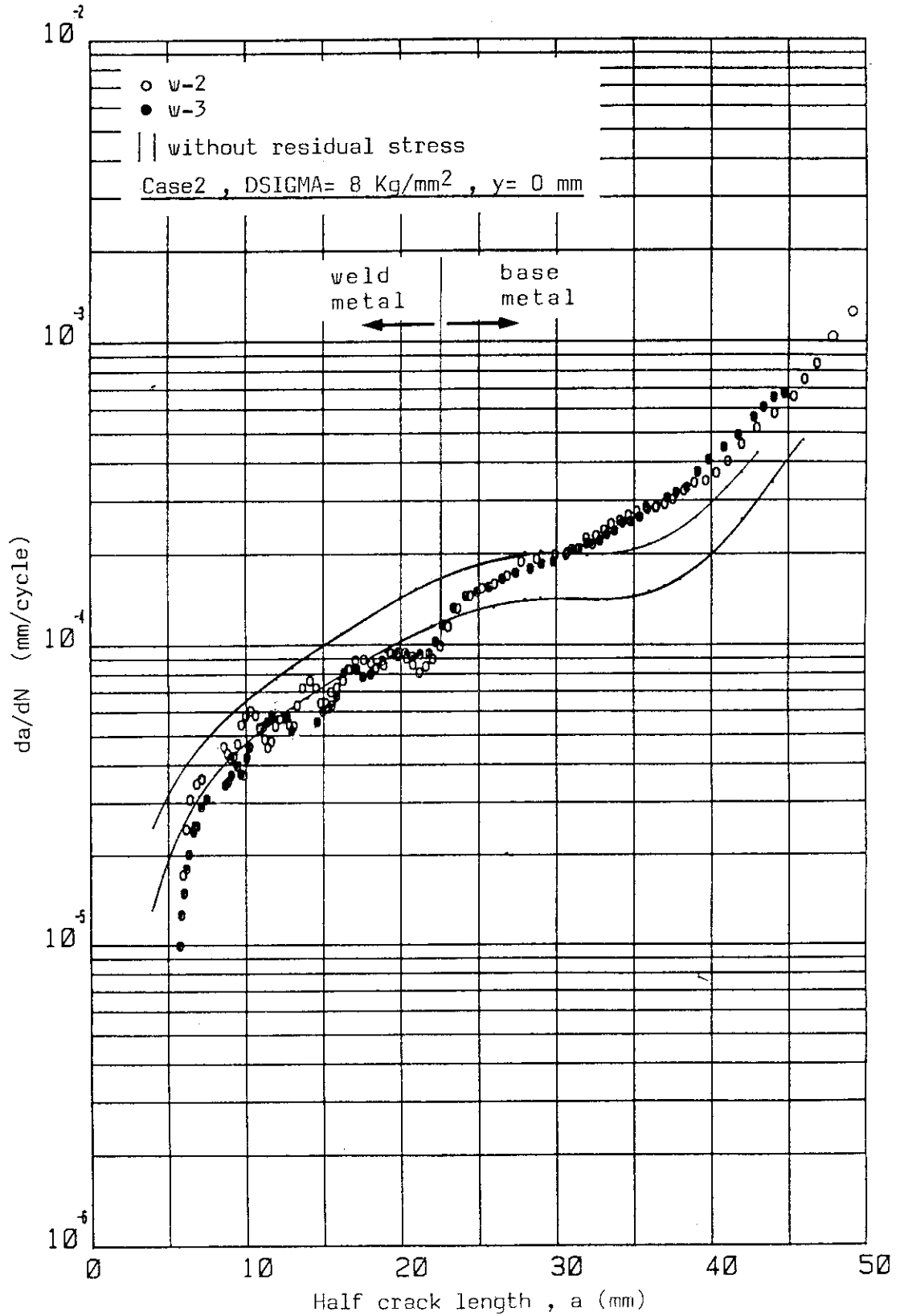


Fig.15 Comparison of da/dN vs. a curves

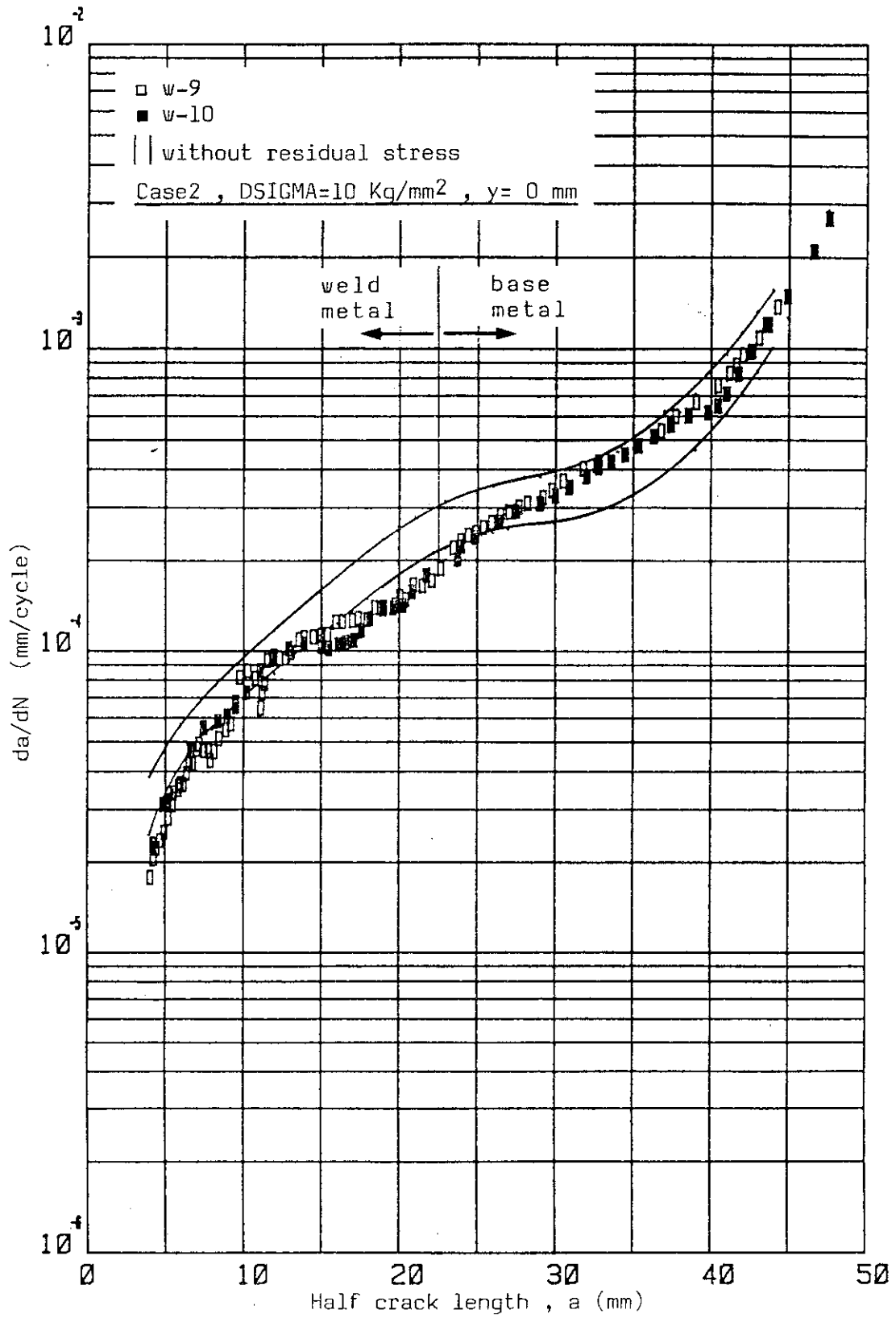


Fig.16 Comparison of da/dN vs. a curves

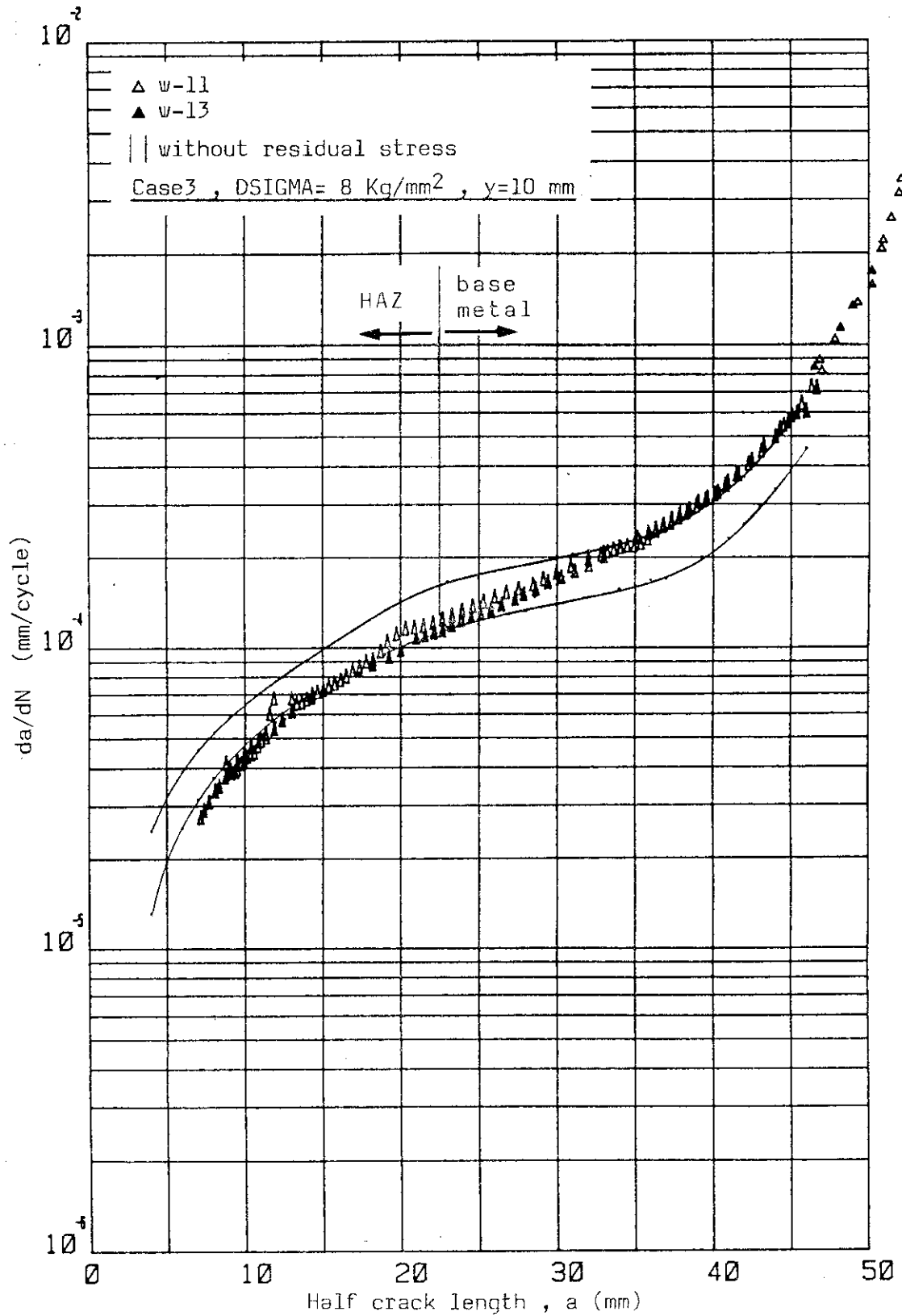


Fig.17 Comparison of da/dN vs. a curves

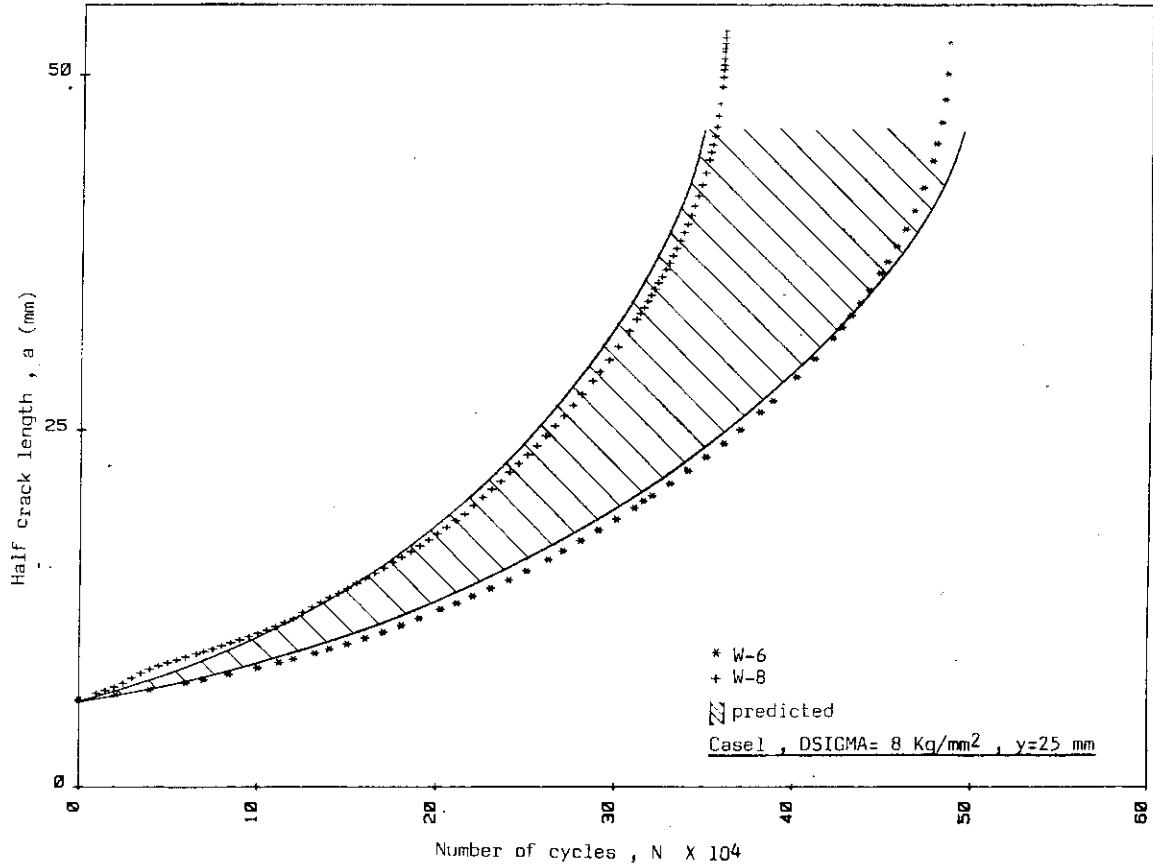


Fig.18 Comparison of crack growth curves between prediction and test result

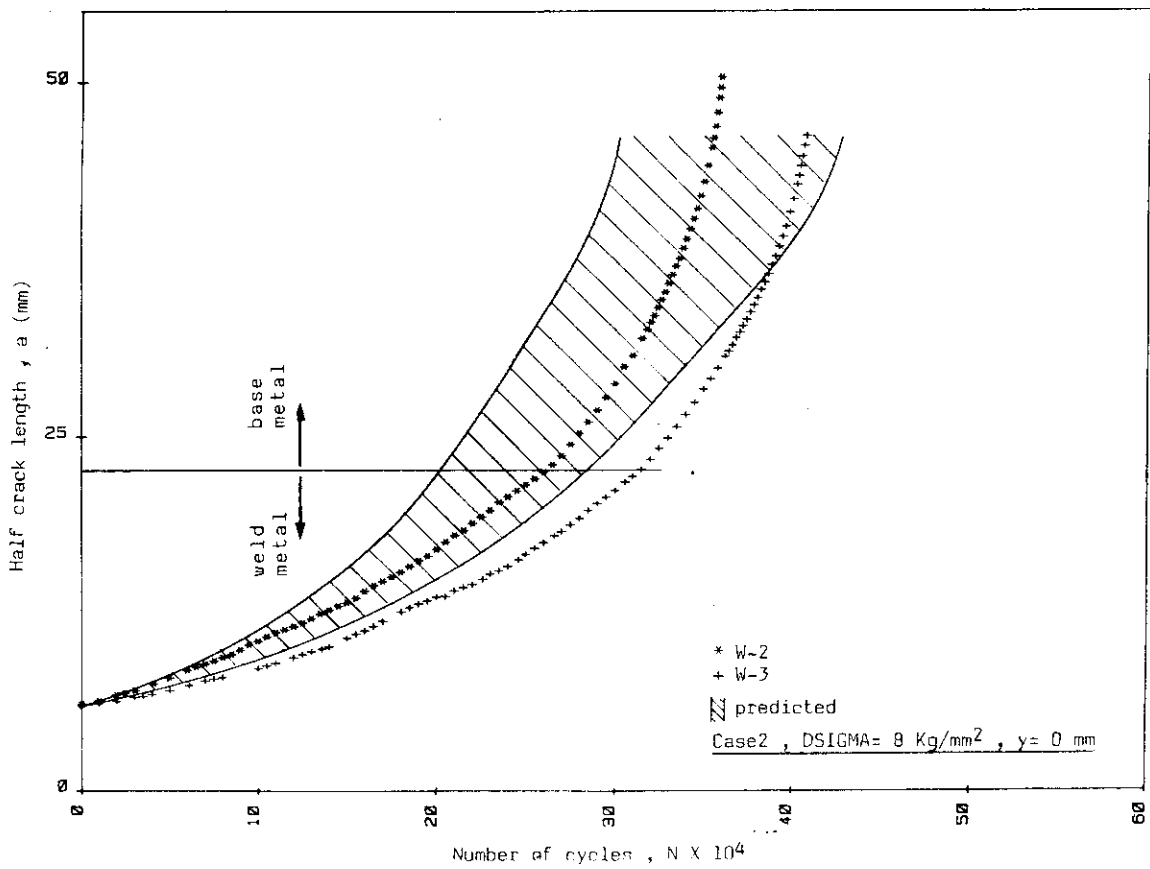


Fig.19 Comparison of crack growth curves between prediction and test result

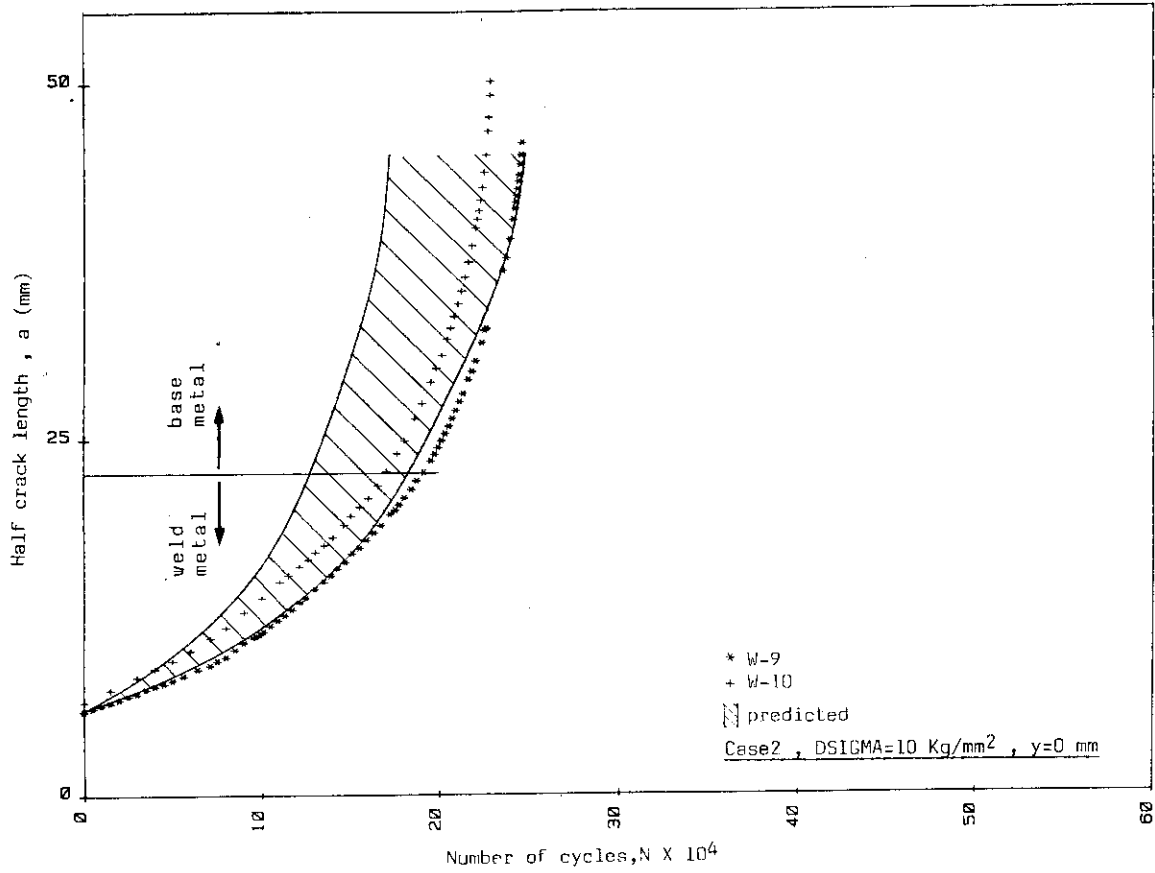


Fig.20 Comparison of crack growth curves between prediction and test result

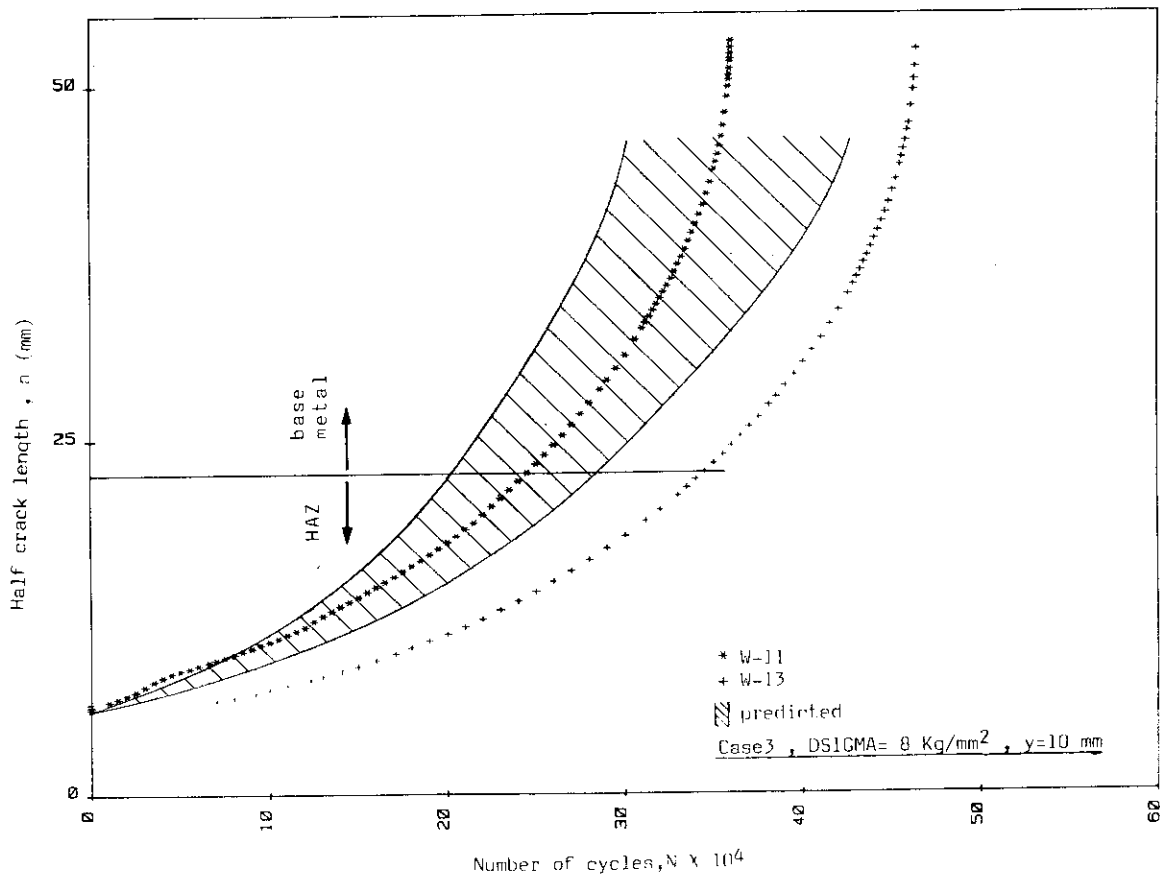


Fig.21 Comparison of crack growth curves between prediction and test result