

溶接残留応力が曲げ疲労挙動に及ぼす影響について

Influence of welding residual stress on bending fatigue behaviour

小川清六
Seiroku Ogawa

馬込正勝
Masakatu Magome

片田宣彦
Norihiko Katada

岡純一郎
Junichiro Oka

Butt Welded joints have always high residual stress, which is almost equal to the yield strength of deposit metal, in the direction of weld line at welded zone. When a cyclic bending load is applied to these welded joints longitudinally for their weld line, the compressed side of specimen in bending results in a cyclic tensile stress state. Then, fatigue crack may initiate and propagate even in the compressed side in bending.

The purpose of this study is to reveal the fact experimentally that fatigue crack could initiate and propagate at the compressed stress field in cyclic bending where a tensile residual stress exists in by welding.

The following results were obtained in this study ;

- 1) Fatigue crack propagated at the compressed side in cyclic bending where a residual tensile stress existed in by welding and the macrograph of fracture surface was the same as that of general tensile fatigue fracture.
- 2) With the propagation of fatigue crack, the original tensile residual stress on and near the weld line was distinctly relieved, so that the crack propagation rate increased at the beginning of propagation, which attained maximum value before it decreased and ceased eventually the propagation.
- 3) No relationship between hardness at the crack front and propagation rate was observed and it seemed that the crack propagation mainly depends on stress intensity factor at the crack front.

1. 緒 言

軟鋼等の平板突合わせ継手の溶接線上には、溶接線方向に降伏点に近い高い引張残留応力が発生する。このような高い引張残留応力を持つ平板突合わせ継手が溶接線の長手方向に片張り曲げ荷重を加えられたとき、曲げの圧縮側であっても引張残留応力の存在により片張り引張応力状態になることを筆者等はH型拘束試験片を用いた実験により明らかにした。⁽¹⁾⁽²⁾したがって引張残留応力が存在する処では、曲げ応力の繰り返しで例えその部分が曲げの圧縮側となっても疲労き裂が進展することは、十分考えられる。

本研究は、以上のような観点から、高い引張残留応力が存在する平板溶接継手に、溶接線の長手方向に片振り曲げを負荷し、曲げの圧縮側であっても引張残留応力場では疲労き裂が進展することを実験的に明らかにすると共に、そのき裂の進展挙動を検討することを目的としたものである。

2. 実験方法

2-1 供試材並びに試験片形状

供試材は、市販の板厚9mmのSS41圧延材で、Fig.1, a)に示すように60×420の板2枚を突合わせ溶接したものを疲労試験に供した。溶接は、炭酸ガスアークの自動溶接機を用いFig.1, b)に示すようなX開先を表裏各1層で行なった。溶接終了後表裏とも余盛を削除して仕上げ、溶接の第1層目(初層側)を曲げ疲労試験の圧縮側とし、試験片の中央部にはFig.1, c)に示すような突起型の切欠きを設け疲労き裂の発生点とした。切欠きは、ワイヤカットで加工した。

2-2 残留応力の測定

疲労試験片とは別に用意した同一形状、寸法のもを同一溶接条件で溶接した試験片を用い、試験片長手方向の中央部で、溶接線に直角な線上に5mm間隔でストレインゲージを貼布し、ゲージ近傍を切断するいわゆる応力開放法により残留応力を測定した。

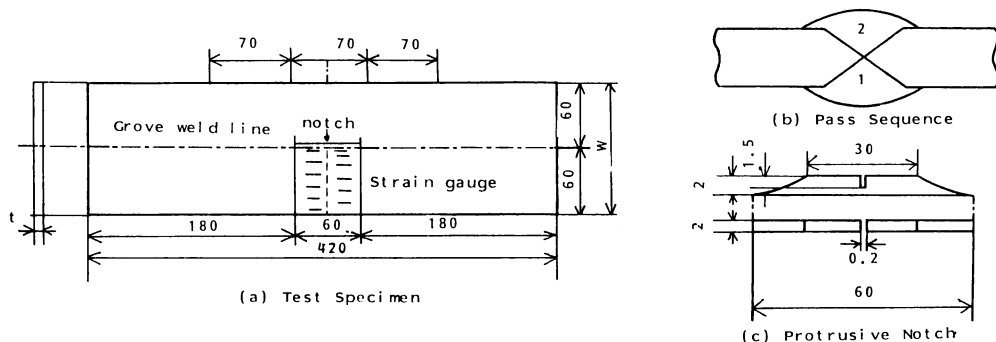


Fig 1 Butted Welded Specimen

2-3 疲労試験

疲労試験は、支点間距離を70mmとした4点曲げ片振り疲労試験で、容量10tonの油圧サーボ式疲労試験機を用い、正弦波の荷重制御で繰り返し速度3~5Hzで行った。

試験片の曲げ中心部で、試験片幅の片側半分の表裏にFig.2に示すように夫々12枚のストレインゲージを貼付し、疲労試験中のき裂の進展に伴う各部の歪の変化を測定し、溶接残留応力の変化状態を観察した。

なお、予備試験の結果人工切欠からの疲労き裂の発生は、初めから曲げの圧縮側とした場合には全く認められなかったため、初期き裂の発生は、最初切欠側を曲げの引張側として繰り返し荷重を与えた。この場合試験部の実応力即ち[引張残留応力+負荷応力]が降伏応力を越えないように注意した。このようにして疲労き裂が僅かに発生したことを確認後試験片を裏返し、試験部を曲げの圧縮側として疲労試験を行った。

疲労試験条件は、Table1に示すとおりで、曲げの引張側の溶接線上では、[引張残留応力 σ_{res} +負荷応力 $\Delta\sigma$]=58.2kgf/mm²となり、後述のTable2に示した溶接線上の降伏強度と比較すると僅かに降伏した状態となっている。

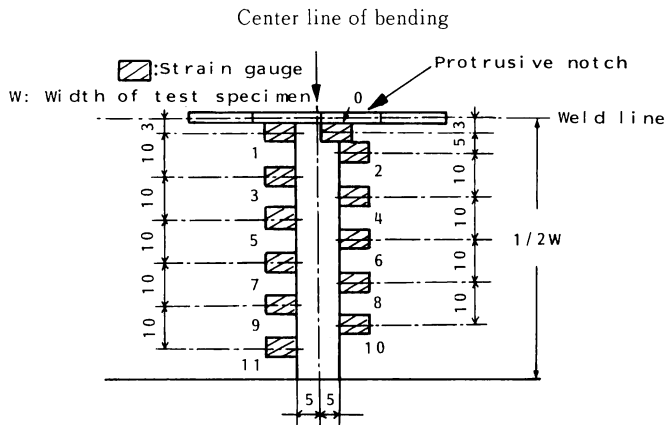


Fig. 2 Arrangement of Strain Gauges in Test Specimen

Table 1 Fatigue Test Condition

Pmax (kgf)	Pmin (kgf)	Stress (kgf/mm ²)	
		$\Delta \sigma$	$\sigma_{res} + \sigma_{app}$
550	0.1 × Pmax	14.6	58.2

3. 実験結果及び考察

3-1 試験片の残留応力分布

曲げ疲労試験に供した試験片の初期残留応力分布は、Fig.3に示すとおりで、溶接線上には、初層側で、Fig. 3, a) に示すように43.6kgf/mm²、第2層側(裏側)で同図 b) に示すように37.5 kgf/mm²と云う高い引張残留応力を示した。この残留応力分布は、通常平板突き合わせ継手に見られる典型的な形である³⁾。疲労試験には同図 b) に示すように分布状態が単純な第2層側が曲げの圧縮側となるようにした。また別に用意した全く同一条件の溶接継手試験片から求めた溶着金属部、熱影響部及び母材部の降伏強度は、Table2に示すとおりであって、疲労試験の曲げの引張側となる溶接の初層側では溶接線上の引張残留応力は、溶着金属の降伏応力に等しい値であることが解る。また曲げの圧縮側となる第2層側(裏側)の引張残留応力は、溶着金属の降伏応力の約86%の値である。

Table 2 Yield Strength of Weld Joint

Yield Strength kgf/mm ²		
Depo. Metal	HAZ	Base Metal
43.6	31.5	28.5

3-2 曲げの圧縮側における疲労き裂の進展。

3-2-1 疲労き裂の進捗状態

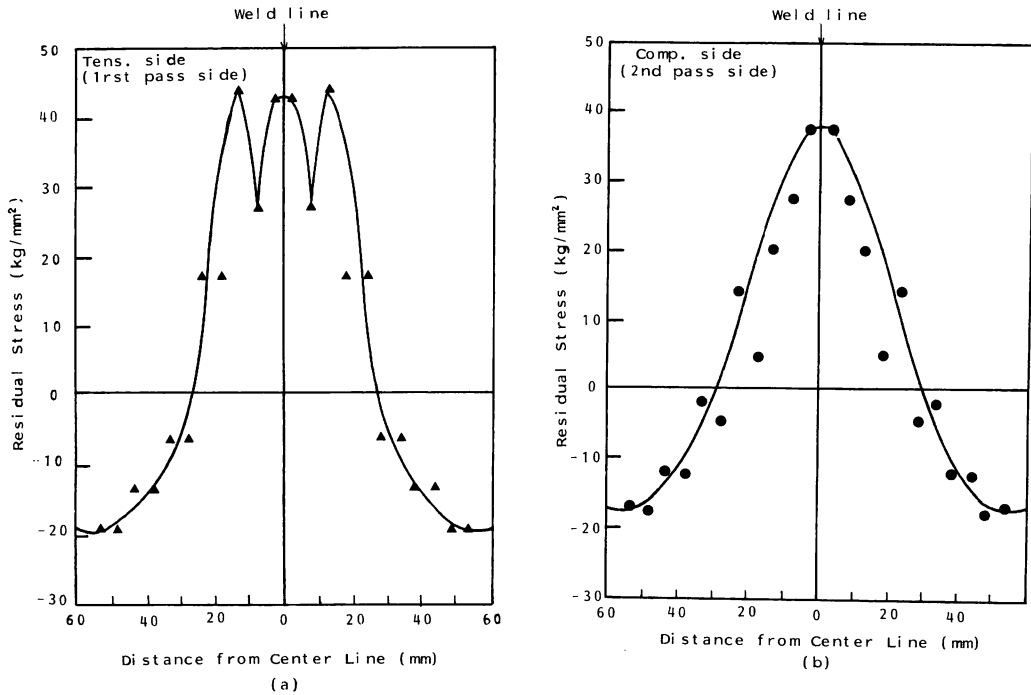


Fig. 3 Initial Residual Stress Distribution at Each Side of Test Specimen

曲げの圧縮側でも予想したように疲労き裂の進展が認められた。Photo 1は、そのマクロ破面を示したものである。写真の上側が曲げの圧縮側、下が曲げの引張側である。き裂は、圧縮側で半楕円状に進展しているのが解る。この形状は、通常曲げの引張側に発生する疲労き裂と全く同様である。

Fig. 4は、疲労試験中の曲げの圧縮側での試験片表面の応力状態を示したものである。図

中の1は初期引張残留応力値 37.5 kgf/mm^2 で、曲げ負荷により2の応力 25.5 kgf/mm^2 まで低下し、除荷により3の応力値 36.7 kgf/mm^2 となる。以後の荷重の繰り返しにより試験片は、図中に示した3~2の間即ち $\sigma_{\max} = 36.7 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $\sigma_{\min} = 25.5 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $\Delta \sigma = 11.2 \text{ kgf/mm}^2$ の片振り引張疲労状態となる。Fig. 5は、疲労試験中の曲げの圧縮側での応力状態を模式的に示したものであるが破面はこの片振り引張疲労により形成されたものである。このように引張残留応力場においては、例え曲げの圧縮側であっても実際の応力状態は片振り引張応力状態となるから、曲げの繰り返しによって疲労き裂が進展することが解かる。

3-2-2 き裂進展特性

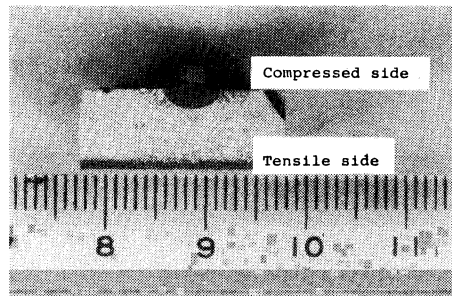


Photo 1 Macrograph of Fracture Surface

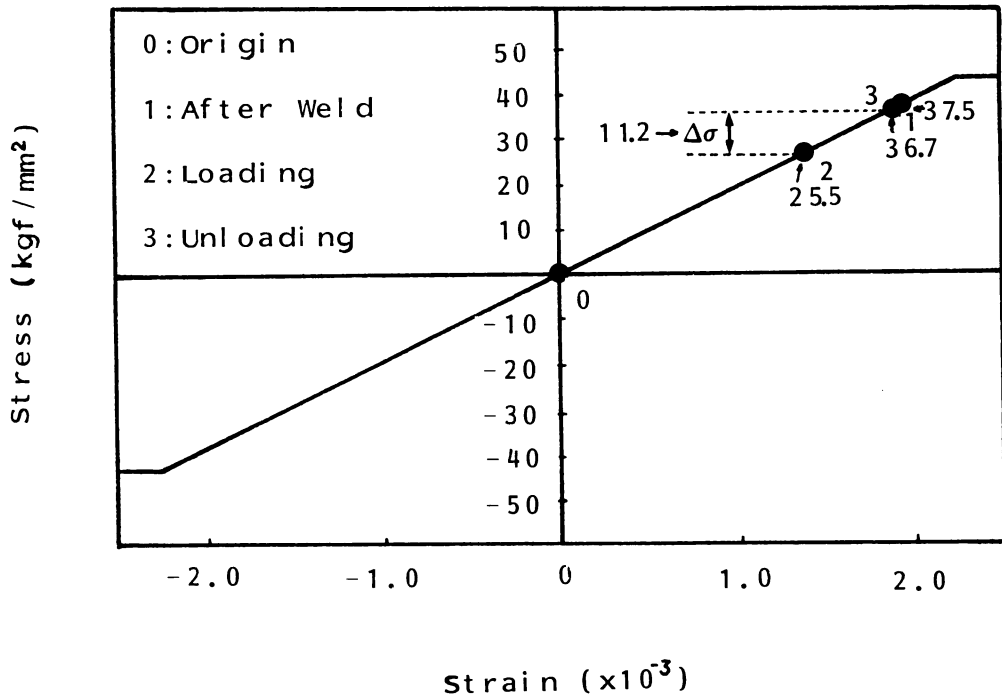


Fig. 4 Stress State at Gauge No.1 of Compressed side

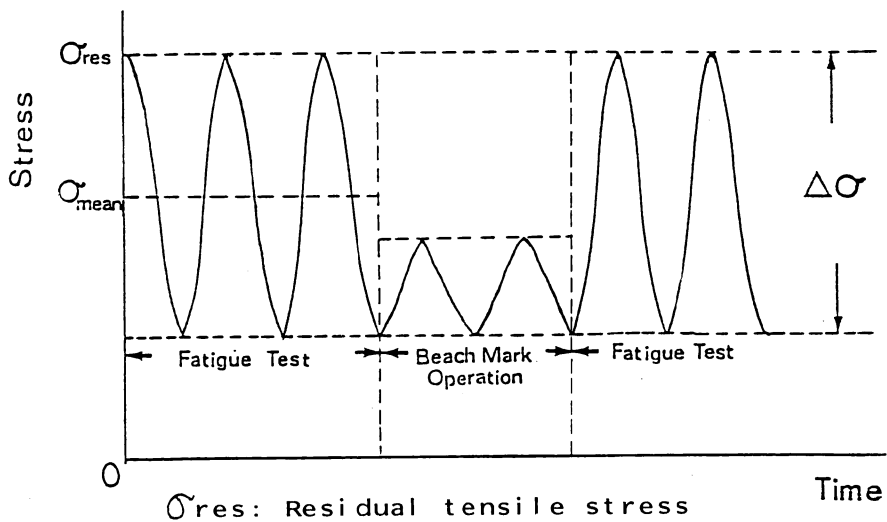


Fig. 5 Stress State at compressed Side during Fatigue Test

a) き裂長さとき裂進展速度の関係

Fig. 6に示すように試験片表面でのき裂進展速度 da/dn は、当然のことながらき裂進展の初期には小さく、き裂成長と共に徐々に増加するが、き裂長さ約2mmで最大($da/dn=2.015 \times 10^{-6}$)

となり、以後き裂が長くなるに従い急速に低下している。このことは、圧縮側でのき裂の進展は引張残留応力によるものであり、き裂の進展に伴ない引張残留応力は開放されてゆくからこのように或る長さ以上になるとき裂進展速度が急激に低下するものと考えられる。本実験ではき裂長さ $a = 2.31\text{mm}$ で殆んど進展を停止したため疲労試験を中止した。

b) き裂進展速度と硬さの関係

Fig.6 a)、b)中には、き裂進展速度が硬さに影響されるか否かをみるために、き裂中央部(き裂開始部)からき裂進展方向への硬さ分布を示した。Fig.6 a)は、同図 c)に示すように試験片表面から1mm深さの位置、同図 b)は2mm深さの位置での硬さ分布である。1mm深さの位置では、き裂長さ $a = 0$ 即ちき裂開始部での硬さはかなり高く、以後硬さの変化はやや大きい、き裂長さ $a = 1.5\text{mm}$ 以降はほぼ $Hv = 150$ と云った一定値となっている。また同図 b)に示した深さ2mm位置での硬さ変化は、前者より小さく最も高い処でも $Hv = 180$ 程度であって、

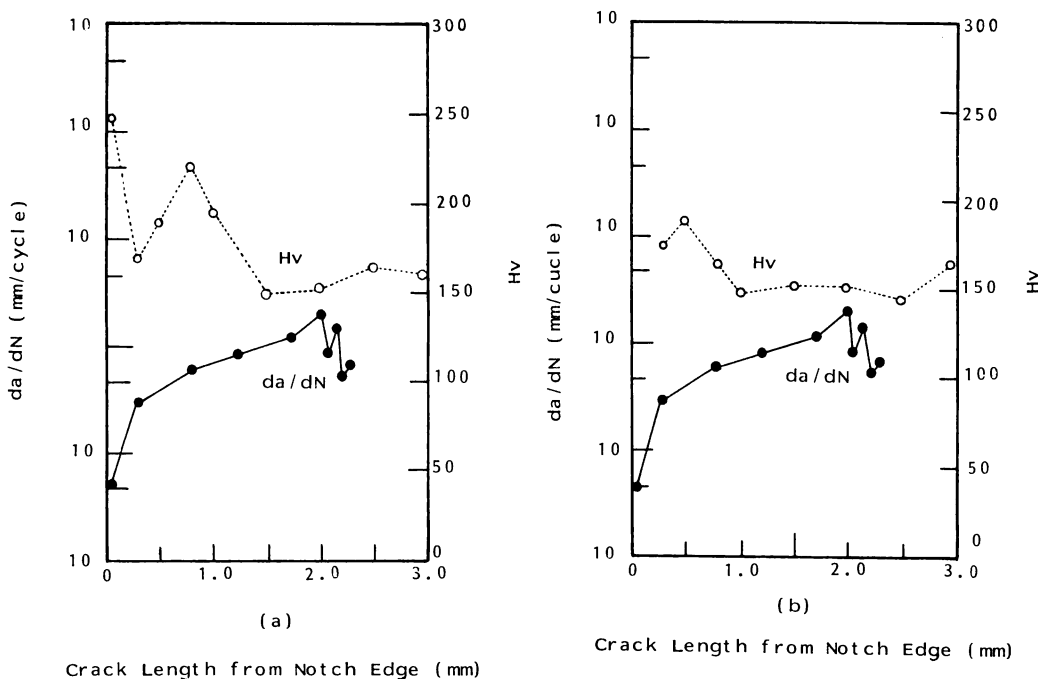


Fig.6 Relationship between da/dN , Hardness and Crack Length

a=1.0mm以降は前者と同様 Hv=150程度である。き裂進展速度は表面き裂長さで測定したものであるが、破面は、同図 c) 或いは Photo 1 に示すように半楕円伏であるから、内部のき裂進展速度も表面のそれと同様と考えられる。即ち同図 a)、b) を見ても明らかなようにき裂進展速度は、き裂長さのみに依存し硬さには全く関係ないようである。換言すれば、疲労き裂進展速度は、き裂先端の応力度即ち応力拡大係数に支配され、き裂先端の硬さには余り影響されないものと考えられる。疲労試験終了時の最終き裂長さは、 $a=2.31\text{mm}$ であって溶着金属幅約10mm に対して十分溶着金属内である。従って、同一溶着金属組織であれば、き裂進展速度は、き裂先端の硬さに関係なく主としてき裂先端の応力拡大係数に支配されると言うことができる。

3-3 疲労き裂の進捗に伴う残留応力分布の変化

3-2-2 a) 項において、き裂長さ $a=2\text{mm}$ 以上になるとき裂進展速度が急激に低下し、き裂長さ $a=2.31$ で殆んど進展を停止したのは、き裂の進展に伴う引張残留応力の低下によるものと考えられる。従って疲労試験終了後の残留応力の変化状態を測定したのが Fig. 7 である。同図 a) は、疲労試験開始前、b) は試験終了後の夫々残留応力分布である。疲労き裂長さ $a=2.31\text{mm}$ と云った小さいき裂でも引張残留応力の最大値は、初期の 36.7kgf/mm^2 から約 20kgf/mm^2 まで低下している。これは、き裂進展に伴う応力開放の結果と考えられ、疲労き裂の進展が停止

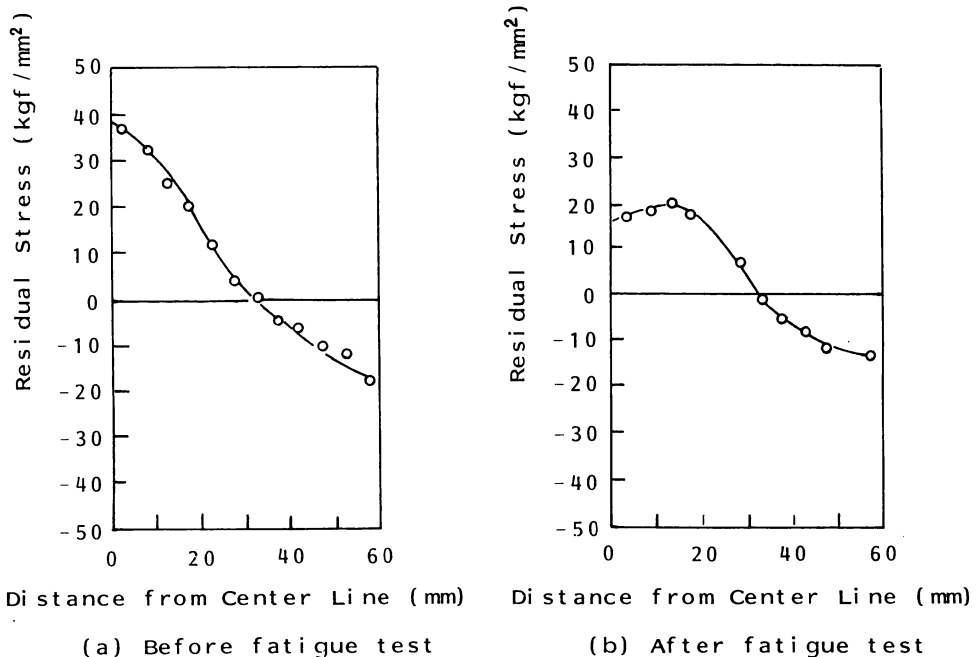


Fig. 7 Residual Stress Distribution at Compressed Side before and after Fatigue Test

したのは、この残留応力の低下によることを物語っている。

以上のような実験結果から、引張残留応力場では曲げの圧縮側であっても疲労き裂は十分進展することが明らかとなった。しかし上述のようにき裂の進展と共に引張残留応力は開放されるから、本実験では表面き裂長さが2.31mmと云う比較的小さい値でき裂の進展は殆んど停止した。しかし板厚方向に対しては、Photo 1 にみられるように板厚の約27%に達しており、仮りに曲げの引張側からも疲労き裂が進展する場合には、試験片の破断寿命を著しく低下させることになる。

4. 結 言

本研究の結果、つぎのようなことが明らかになった。

1)降伏点に近い引張残留応力が存在すると例え曲げの圧縮側でも疲労き裂が進展することが実験的に証明された。

2)この場合のき裂のマクロ破面形状は、通常の曲げ疲労の引張側に発生する破面と同様半楕円状の破面であった。

3)疲労き裂長さと進展速度の関係は、き裂進展の初期はき裂進展と共にき裂速度は増加するが、き裂がある長さに達すると最大値を示し、以後は急速に低下し遂には停止した。これはき裂の進展に伴う残留応力の解放、低下によるものと考えられる。

4)き裂進展速度とき裂先端部の硬さの間には関連性は認められず、き裂の進展は、き裂先端の応力拡大係数に主として支配されることが明らかとなった。

5)疲労き裂の進展により溶接残留応力は変化し、溶接線近傍の引張残留応力はかなり低下した。これが疲労き裂進展の停滞原因と考えられる。

本研究を行なうに当っては、大阪産業大学産業研究所の特別研究費を研究費の一部に充当させて頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1)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、(社)日本溶接協会、J W E S - A E - 8401、昭和59年1月
- (2)大阪産業大学論集、大学開学20周年記念、1985
- (3)佐藤他、溶接工学、1979.5.1.理工学社