層状不均質金属材料の曲げ疲労強度と 疲労き裂伝ば則の相関*

鳥居 太始之**, 本 田 和 男**

The Relation Between Bending Fatigue Strength of Laminated Inhomogeneous Plates and Fatigue Crack Growth Law

by Tashiyuki TORII and Kazuo HONDA

An expression for evaluation of fatigue life was proposed on the basis of fatigue crack growth law, confirming the fact that tensile mean stress and tensile residual stress did not influence the fatigue crack initiation life but had effects of acceleration for the fatigue crack growth. By using this expression, bending S-N curves for base metals and laminated inhomogeneous plates were discussed. As a result, a constant m of fatigue crack growth law in which the growth rate was proportional to the m th power of stress level and a ratio of crack initiation life to fatigue life were estimated for surface microcracks of base metals subjected to bending fatigue. In addition, especially in laminated inhomogeneous plates, tensile mean stress was found to decrease fatigue life remarkably because fatigue crack growth comprised a significant portion of fatigue lifetime.

Key Words: Fatigue, Metallic Materials, Laminated Inhomogeneous Plate, Residual Stress, Fatigue Crack Growth

1. 緒 言

各種機械部品には、種々の表面硬化処理が施されており、近年の過酷な使用条件に対しその有用性が高いものとなっている。表面硬化材の疲労強度を支配する巨視的因子としては、層状不均質性と硬化処理に伴う残留応力が指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾。このうち残留応力は、材料内部の最大応力値に関与し、疲労き裂開閉挙動を左右すると考えられることから⁽³⁾、疲労き裂伝ば挙動にも重大な影響を及ぼすと思われる。したがって、表面硬化材の疲労寿命評価を行う上に残留応力の効果が重要になってくる。一方、従来の疲労寿命評価式においては、最も一般的な Manson-Coffin 則にもみられるように、塑性ひずみ振幅を疲労寿命支配因子としている例⁽⁴⁾⁽⁵⁾は多いが、疲労き裂伝ば挙動に関係すると考えられる最大応力値も考慮して検討しているものは極めて少ないと思われる⁽⁶⁾。

そこで本研究では、疲労破壊現象が微小き裂の発生成長および巨視き裂伝ばという過程から成り立つこと、さらに、き裂開口の効果をもつ最大応力値と疲労

き裂伝ば速度との相関は、破壊力学的考察が可能であるとの認識に立ち、応力振幅と最大応力値が疲労破壊の各過程にどのように影響するかを若干の実験結果に基づき明確にした上で、疲労寿命評価式を提案する。それを用いて、単一材の S-N 曲線を検討し、さらに、表面硬化モデル材として製作した低・中炭素鋼層状接合材の曲げ疲労強度を単一材のそれと比較して調べ、曲げ疲労寿命に及ぼす残留応力の効果を検討した。

2. 実 験 方 法

2・1 試験片 使用した材料は低炭素鋼 (S 10 C) と中炭素鋼 (S 45 C) でその化学成分を表 1 に示す。曲げ疲労試験片の形状寸法を図 1 (a) に示す。層状接合材は、S 45 C-S 10 C-S 45 C の順に重ね合せ、硬化部-非硬化部-硬化部となる表面硬化モデル材である。重ね合せ後、高温での酸化および不純物の界面付着を防止するため端面周囲を溶接密封し、1 173 K、30 分保持後全圧下率 70% の熱間圧延法により層状接合材を製

表 1 供試材の化学成分 (wt %)

	C	Si	Mn	P	S
S 10 C	0.11	0.27	0.47	0.013	0.015
S 45 C	0.47	0.22	0.70	0.015	0.019

* 昭和 59 年 11 月 30 日 第 929 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 4 月 27 日。

** 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中 3-1-1)。

作した。さらに、試験片形状寸法に加工後 1123 K から油焼入れを行い、エメリー紙により中央付近の両表面と側面を仕上げた。

次に、疲労き裂の発生寿命と伝ば速度を測定するための切欠き試験片の形状寸法を図 1 (b) に示す。すなわち、疲労き裂発生個所を限定するため、中央に直径 1 mm の穴を付けた。機械加工後 1123 K に 1 時間保持して真空焼なましを行った。特に、残留応力場の疲労き裂の発生・伝ばを観察する試験片には、その後図 2 に示すように、試験片の両面に同じ材質のジグをボルトで締付け A₁ 変態点以下の温度から急冷を行って残留応力を発生させた。すなわち、この方法によれば、試験片板幅方向の冷却が支配的になるので、急冷後治具から取り外された試験片には中央部引張り、両側圧縮の熱応力軸方向残留応力が発生することになる。ここでは、冷却剤を水とし、急冷温度を 873 K とした。なお、切欠き試験片にはすべて S 45 C 材を用いた。

2・2 硬さ分布の測定 層状接合材の硬さ分布は、試験片切断面をエメリー紙およびバフによる研磨後マイクロビッカース硬さ計を用いて測定した。図 1 (b) の薄板試験片の硬さ分布は、試験片長手方向の中央付近を板幅方向に 2.0 mm の間隔で移動して同様の条件により測定した。

2・3 残留応力分布の測定 層状接合材の残留応力の板厚方向に沿う分布は、試験片の両表面を電解研磨により逐次除去し、新表面の X 線応力測定値に両表面除去による補正値を加えて求めた。なお、回折線には Cr-K_α 線を用い、2×10 mm² の照射面積とした。また、回折強度曲線のピーク位置決定には半価幅法を

用い、最小二乗法により $\sin^2\psi$ - 2θ 線図の傾きを求め、計数管定数-318 MPa/deg を用いた。一方、図 1 (b) の薄板試験片の板幅方向に沿う残留応力分布は、X 線照射域を直径 0.5 mm の円とし、試料振動角度範囲 $\Delta\psi = \pm 6.5$ deg および振動速度 20 deg/s の条件により Cr-K_α 回折強度曲線を得て、試験片を板幅方向に移動して測定した。なお、 $\sin^2\psi$ - 2θ 線図から応力算出の手順は上述と同様である。

2・4 疲労試験 曲げ疲労試験は、島津製サーボペット Lab-5 に均一曲げ試験となる四点支持のチャック装置を取付け、正弦波形荷重制御および繰返し速度 2~4 Hz の条件で行った。なお、曲げ応力 σ は試験片中央部の曲げモーメントを断面係数で除した値とした。一方、図 1 (b) の試験片を用いた疲労試験は、同様の試験機により繰返し速度 20 Hz の引張圧縮正弦波形の定荷重振幅の条件で行った。疲労き裂の発生および伝ばは、試験機に備え付けた倍率 100 倍の光学顕微鏡により観察した。なお、疲労き裂長さは両側のき裂を平均した。

3. 実験結果

3・1 試験片の残留応力分布と硬さ分布 図 3 および図 4 は、それぞれ層状接合材の板厚方向に沿う硬さ分布および残留応力分布を示したものである。図 3 において、境界付近の硬さは連続的な変化を示している。これは S 45 C 部から S 10 C 部へ炭素が拡散することによるものである⁽⁷⁾。また、試験片横断面において両部材の硬さの平均値を境界とし、硬化比 R_H を定義した。図より、 $R_H = 0.35$ と $R_H = 0.55$ となった。一方、図 4 の残留応力分布は、硬化部で圧縮・非硬化部で引張り、および境界付近で零の分布となっている。さらに、軸方向および幅方向において差は小さく、ほ

図 1 試験片の形状寸法

図 2 軸方向残留応力発生用ジグ

ば等二軸の残留応力分布であること、および板厚中心の左右を示す Side A, B の値はほぼ等しい分布であることがわかる。なお、両素材焼入れ後の残留応力は接合材に比べて著しく小さく、ここでは残留応力を考慮しなくてよい試験片として扱う。

図5は、図1(b)の形状寸法で穴のない試験片の板幅方向に沿う残留応力分布および硬さ分布である。これより、残留応力は両側圧縮・中央部引張りの熱応力形分布となっており、板幅方向残留応力はほとんどないことがわかる。また、硬さは板幅内でほぼ一定($HV \approx 190$)であり、この値は焼なまし材の硬さ($HV \approx 195$)にほぼ等しい。したがって、この方法により製作した試験片において硬さに現れる材質変化はなく、また中央穴から発生する疲労き裂は引張りの軸方向残留応力場にあることがわかる。

3.2 層状接合材の曲げ疲労強度 図6は層状接

図3 層状接合材の硬さ分布

図4 層状接合材の残留応力分布

合材の曲げ疲労強度を両素材のそれと比較して示したものである。これより、接合材の曲げ疲労強度は硬化比 R_H が大きいほど増加しており、特に $R_H=0.55$ の値は S45C 素材よりも大きいことがわかる。これには接合材の両側面硬化部の圧縮残留応力が関与しているものと推測される。図7は、層状接合材疲労破断後において、試験片側面の光学顕微鏡観察結果から得られたものの一例である。図より、き裂の両端はそれぞれ硬化部および非硬化部にあることがわかる。また、境界に近い非硬化部ではすべり線が多数観察された。すなわち、本層状接合材の疲労破壊は、非硬化部で発生した疲労き裂が境界をほぼ直角に横切って硬化部へ伝ばして破断が生じたものと判断できる。一方、破面観察において、両素材は表面からの疲労き裂発生であり、多くの場合に角からの起点を示しているのに対して両硬化比の層状接合材の破面はともに類似して、両素材のそれとは著しく相違する観察結果であった。図8は疲労強度増加が著しい $R_H=0.55$ の層状接合材と S10C 素材について、曲げ疲労強度に及ぼす引張平均応力 σ_m の影響を示したものである。なお、 σ_m の値は各材とも疲労限度の約 60% に統一した。これより、層

図5 薄板材の残留応力分布と硬さ分布

図6 曲げ S-N 曲線

状接合材は S10C 素材に比べて、曲げ疲労強度に及ぼす引張平均応力の影響が著しいことがわかる。

3.3 切欠き底からの疲労き裂の発生と伝ば

図 9 は、中央穴付試験片の引張圧縮疲労試験から得られた疲労き裂伝ば曲線である。これより、疲労き裂発生部に引張残留応力が存在する場合も、引張平均応力が負荷された場合も、疲労き裂発生寿命には変化がなく、疲労き裂伝ば寿命に著しい変化のあることがわかる。すなわち、その影響はともに疲労き裂伝ばの促進として現れる。なお、1~2 結晶粒程度の疲労微小き裂の発生にも平均応力は関与しないことが、西谷らにより報告されている⁽⁸⁾。

4. 考 察

4.1 疲労寿命評価式の提案 引張平均応力がある場合の疲労寿命 N_f は、平均応力零の疲労寿命 N_f より減少することを、すでに実験的に示した。一般に、金属材料の疲労寿命は、残留応力あるいは平均応力の軸方向引張応力が関与しない疲労き裂長さとなるまでの寿命 N_{ci} (これを疲労き裂発生寿命と呼ぶ) と疲労き裂伝ば寿命との和により示される。そこで、同じ材料の等応力振幅下において、引張平均応力の有無による疲労寿命の相違を表 2 のように記述する。ただし、 R_{ci}

は N_{ci} の N_f に対する比率すなわち完全両振りの試験条件下の疲労き裂発生寿命比である。したがって、引張平均応力の有無による疲労き裂伝ば寿命の比 β は次式となる。

$$\beta = \frac{N_f' - R_{ci}N_f}{(1 - R_{ci})N_f} \quad (1)$$

これより、引張平均応力の有無による疲労寿命の比 $\gamma (=N_f'/N_f)$ は次式となる。

$$\gamma = \beta + (1 - \beta)R_{ci} \quad (2)$$

式(2)より、 R_{ci} および β が決定できれば、平均応力の有無が疲労寿命に及ぼす影響を定量的に把握できることがわかる。

さて、応力比 $R < 0$ の条件で引張平均応力が疲労き裂伝ば寿命に影響する理由は、平均応力が材料内部の最大応力値 σ_{max} を遷移させ、1 サイクル中のき裂開口範囲を変化させることによって疲労き裂伝ば速度が変化するためであると考えられる。一般に、1 個のき裂において、疲労き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の間には、次式の関係が成立する⁽⁹⁾。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

ここで、 C および m は材料定数である。また、本疲労試験条件である応力比 $R < 0$ の場合は $\Delta K = K_{max}$ とすれば、 R にかかわらず式(3)が成立するとしてよいようである⁽¹⁰⁾。そこで、応力繰返し下の最大応力値 σ_{max} を用いれば、式(3)は次式により表される。

$$\frac{da}{dN} = C\{\sigma_{max}\sqrt{\pi a}F(a)\}^m \quad (4)$$

ただし、き裂長さを a とし、試験片形状による補正係

$R_H=0.35, \sigma_a=1080.7 \text{ MPa}$

図 7 層状接合材の疲労き裂観察

図 8 曲げ S-N 曲線に及ぼす引張平均応力の影響

図 9 平均応力および残留応力と疲労き裂の発生伝ば

数を $F(a)$ とする。

疲労き裂伝ば寿命は、式(4)の逆数を試験片幅の範囲で積分することにより導くことができる。したがって、同一試験片に引張平均応力を負荷した場合の最大応力値を $\sigma'_{\max}$ で表すと、引張平均応力の有無による疲労き裂伝ば寿命の比 β は、次式となる。

$$\beta = \alpha^m, \text{ ただし } \alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma'_{\max}} \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここでは、引張平均応力の有無によって疲労き裂伝ばの様相が大きくは変化しないものと考えている。また、切欠き材や曲げ疲労の場合のように試験片内に応力こう配があっても、引張平均応力の有無の比較において、応力分布形態が同一であれば、その影響は式(4)の $F(a)$ に含めることができるので、式(5)は同様に成立する。さらに、式中の m の値は、1個の貫通き裂に適用される式(3)において、2~4となる場合が多く⁽⁹⁾、一方微小な疲労き裂の伝ば則 $da/dN = C\sigma^n a$ において、 $n=7\sim 8$ となること⁽¹¹⁾も報告されており、式(5)の m を一意的に決定するのは現時点では困難なように思われる。しかし、式(5)が成立する条件として、き裂長さ a を一定にした時、 da/dN が $\sigma_{\max}$ の m 乗に比例しておればよく、そのことを示す疲労き裂伝ば則は実際に多くみられる^{(9)(11)~(13)}。

4.2 単一材の $S-N$ 曲線と疲労寿命評価式

まず、定数 m が $S-N$ 曲線から求められることを述べる。図10に示すように、平均応力 σ_m を一定にした $S-N$ 曲線上の隣接した二点 $A(\sigma_j, N_j)$, $B(\sigma_{j+1}, N_{j+1})$ を考える。この二点を接近してとり、疲労き裂発生寿命比 R_{ci} を両点において等しくすれば、両点の疲労き裂発生寿命 $(N_{ci})_j$ および $(N_{ci})_{j+1}$ は次式で与えられる。

$$(N_{ci})_j = R_{ci} N_j, \quad (N_{ci})_{j+1} = R_{ci} N_{j+1} \quad \cdots \cdots (6)$$

したがって、二点の疲労き裂伝ば寿命の比 β は次式となる。

$$\beta = N_{j+1}/N_j \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

これに、 $\sigma_{\max} = \sigma_j + \sigma_m$, $\sigma'_{\max} = \sigma_{j+1} + \sigma_m$ とおいた式(5)を用いると、 m は次式により計算される。

$$m = \frac{\log(N_{j+1}/N_j)}{\log\{(\sigma_j + \sigma_m)/(\sigma_{j+1} + \sigma_m)\}} \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

さて、実際に図6と図8の両素材の $S-N$ 曲線から計算した m の値を図11に示す。なお、横軸は応力振幅 σ_a から疲労限度 σ_w を差し引いた $\Delta\sigma_a$ とした。また、図10の二点間の応力振幅差 $\Delta\sigma_j$ は25 MPa とした。これより、S10C材において平均応力の有無に関係なく両結果はよく一致し、さらにS10C材とS45C材による差もほとんどなく $m=5\sim 10$ となることがわかる。一方、切欠き材の疲労き裂の発生と伝ばに関する実験結果からは疲労き裂発生寿命 N_{ci} が実測されるので、平均応力の有無による疲労き裂伝ば寿命の比 β から式(5)を用いて m の値が直接計算できる。その結果を表3に示す。これより、貫通した疲労き裂の伝ば挙動となる切欠き材の m は約2となり、小規模降伏を満足する通常の疲労き裂伝ば則に近いことがわかる。この m も図11に併記した。なお、疲労微小き裂伝ば挙動が疲労寿命支配要因と考えられる平滑材曲げ疲労において、疲労き裂伝ば速度の応力振幅依存性を示す m の値が大きくなることは、西谷らが報告している小規模降伏が満たされない場合の実験結果においても示されている⁽¹¹⁾⁽¹³⁾。

次に、同一応力振幅下で平均応力の有無に分けた2本の $S-N$ 曲線を適用することにより、 R_{ci} が式(2)と(5)を用いて計算できる。すなわち、引張平均応力による疲労寿命の比 γ を図8から求め、図11のS10C ($\sigma_m=0$) の m を用いて R_{ci} を計算した結果を図12に示す。これより、 $R_{ci} > 0.3$ となり、また応力振幅の増大とともに R_{ci} は増大することがわかる。一方、平面曲げ疲労試験 ($N_f = 10^4 \sim 10^6$) において、 $R_{ci} = 0.5 \sim 0.7$ で伝ば開始となる表面き裂が観測されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。また、曲げ疲労試験では、微小き裂の発生は最大応力振幅となる表層部に限定されるが、応力振幅が増大すると試料内の応力こう配が急になるため、伝ば開始となる疲労き裂は深くなる必要があると推測さ

表2 引張平均応力の有無による疲労寿命の相違とその記述

	Fatigue failure life	Initiation life of fatigue microcrack	Propagation life of fatigue crack
Without mean stress	N_f	$R_{ci} N_f$	$(1 - R_{ci}) N_f$
With mean stress	N_f'	$R_{ci} N_f$	$N_f' - R_{ci} N_f$

図10 $S-N$ 曲線のモデル図

れる。このために、高応力振幅ほど疲労寿命に対する疲労き裂伝ば開始時期は遅れることになり、 R_{ci} は増大する結果になったものと考えられる。

4.3 層状接合材の曲げ疲労強度の検討 残留応力と平均応力はともに試料内最大応力の分布に関与して、疲労き裂伝ば速度を変化させる効果のあることをすでに述べた。層状接合材内部の最大応力値は負荷応力のみでは定まらず、図4に示した残留応力の影響を受ける。すなわち、図13は図4の残留応力がある場合、平均応力 $\sigma_m = 367.7$ MPaの有無による最大応力値の比 α の分布、および同一負荷条件下で残留応力がない場合の α の値を、各応力振幅について示したものである。これより、初期の残留応力によって α の値は試料内で一定とならず、図4に対応させれば圧縮および引張りの残留応力は α の値をそれぞれ減少および増大させることがわかる。したがって、 α^m ($m=5\sim 10$) で表される疲労き裂進展寿命の比 β は、曲げ疲労寿命に支配的な表面圧縮残留応力域で著しく減少することになる。このことから、図8に示すように層状接合材の曲げ疲労寿命の引張平均応力による減少がS10C素材より著しい結果になったものと考えられる。さらに、低応力振幅では残留応力の応力繰返しによる減衰が小さいこと⁽²⁾、たとえその減衰を考慮しなくても図13から圧縮残留応力による α の低下は大きいために、

表3 切欠き試験片の m の値

Applied stress condition			Experiment		Estimation	
σ_a MPa	σ_m MPa	σ_{max} MPa	$N_{ci} \times 10^5$	$N_f \text{ or } N_{fx} \times 10^5$	β	m
100.0	50.0	150.0	3.7	9.3	0.406	2.17
99.0	0	99.0	4.0	17.8		
100.0	100.0	200.0	3.6	6.9	0.239	2.04
108.9	52.0	160.9	2.5	6.2	0.451	2.04
108.9	0	108.9	1.9	10.1		
107.9	107.9	215.8	2.5	4.7	0.268	1.92

図11 疲労き裂伝ば則の m と応力レベルの相関

層状接合材の曲げ疲労寿命の引張平均応力による低下は低応力振幅ほど増大することが考えられる。事実、図8において、応力振幅 $\sigma_a = 931, 784$ および 637 MPaでは、引張平均応力の有無による疲労寿命の比 γ は、それぞれ $0.19, 0.16$ および 0.13 となっている。

また、本層状接合材のように、曲げ疲労寿命を支配する試験片表層付近において式(5)の β が著しく小さい場合には、式(2)は次式のようになる。

$$R_{ci} \approx \gamma \quad \dots\dots\dots (9)$$

本実験条件では硬化域の β は γ より $1\sim 2$ けた小さい値である。式(9)を用い、図8から層状接合材の疲労き裂発生寿命比 R_{ci} は $0.13\sim 0.20$ の値となり、図12のS10C素材の値に比べて非常に小さな値である。すなわち、完全両振りを受けた層状接合材では、疲労き裂伝ば期間が素材に比較して著しく増大することを示している。

5. 結 言

引張りの平均応力および残留応力が疲労き裂の発生と伝ばに及ぼす効果を実験的に確認した上で、疲労き裂伝ば則に基づく疲労寿命評価式を提案した。さらに、その評価式が素材並びに層状接合材の曲げ $S-N$ 曲線とどのように関連するかを検討した。得られた結果は、

図12 疲労き裂発生寿命比と応力レベルの相関 (S10C)

図13 α に及ぼす残留応力の影響

以下のように要約される。

(1) 切欠き試験片を用いて、疲労寿命は引張りの平均応力と残留応力が関与しない疲労き裂発生期間とその後疲労き裂伝ば期間に分けられること、並びに引張りの平均応力と残留応力は疲労き裂伝ばを加速させる効果のあることを確認した。

(2) 本層状接合材の曲げ疲労強度は、硬化比 $R_H = 0.55$ において両素材のそれよりかなり大きくなった。また、本層状接合材は内部にある S 10 C 部境界付近からの疲労き裂発生・伝ばの疲労破壊となる様相を呈することがわかった。

(3) 疲労き裂伝ば則において伝ば速度に影響する応力振幅依存性を表す定数 m を各素材の $S-N$ 曲線から推測した。その結果、S 10 C 材と S 45 C 材とともに $m=5\sim 10$ となり、この値は切欠き底から発生・伝ばする疲労き裂伝ば試験から得られた $m \div 2$ に比べてかなり大きい。この相違は、小規模降伏条件を満足するか否かに関係した巨視的あるいは微視的な疲労き裂伝ば挙動の差に関係していると考えられる。

(4) 疲労寿命評価式を用いて $S-N$ 曲線を検討した結果、完全両振り疲労試験において層状接合材は素材に比べて疲労き裂伝ば期間が増大することがわかつ

た。また、層状接合材の曲げ疲労寿命は引張平均応力による低下が著しく、それは表面層硬化部の圧縮残留応力のためであることがわかった。

終わりに、実験装置の製作にご協力いただいた文部技官徳田勝氏、および実験に協力された当時学生中野博美君、杉山雅彦君、栗屋敬君および橋本敬君に謝意を表する。

文 献

- (1) 高橋・桃谷, トヨタ技術, 18 (昭 41), 19.
- (2) 早山, 機論, 41-343 (昭 50), 721.
- (3) 本田・ほか 3 名, 材料, 31-348 (昭 57), 908.
- (4) 菊川・ほか 6 名, 機論, 39-327 (昭 48), 3263.
- (5) 幡中・ほか 2 名, 機論, 45-398, A (昭 54), 1125.
- (6) 菊川・ほか 2 名, 材料, 29-325 (昭 55), 998.
- (7) 本田・ほか 2 名, 材料, 26-285 (昭 52), 551.
- (8) 西谷・山下, 機論, 32-242 (昭 41), 1456.
- (9) 例えば, 中沢・本間, 金属の疲労強度, (昭 57), 98, 養賢堂.
- (10) 太田・ほか 2 名, 機論, 43-373 (昭 52), 3179.
- (11) 西谷・森光, 機論, 42-354 (昭 51), 325.
- (12) Murakami, Y., ほか 4 名, *Eng. Fract. Mech.*, 18-5 (1983), 909.
- (13) 西谷・皮籠石, 機論, 50-450, A (昭 59), 277.
- (14) 平・ほか 2 名, 機論, 31-221 (昭 40), 39.
- (15) 田中・ほか 2 名, 材料, 31-343 (昭 57), 376.

討 論

〔質問〕 西 田 新 一〔新日本製鉄(株)〕

残留応力場における疲労寿命評価式のご提案を興味深く拝見した。一般に、残留応力場を疲労き裂が伝ばする場合、き裂の成長とともに残留応力が再分布し、この応力の中立点も移動することが知られている。貴評価式にはこのことが考慮されているのかどうか。また、残留応力をそれと同等の平均応力とみなすと圧縮応力場では危険側の評価式を与えることになると考えられるが、いかがか。

〔回答〕 残留応力をもつ板材の曲げ疲労寿命を評価するためには、ご指摘の点を考慮しなければならぬことは、著者も同意見である。しかし、現在、提案した評価法を用いて曲げ疲労寿命推定を行う段階に至っておらず、本報では、平均応力の有無に分けた $S-N$ 曲線から曲げ疲労寿命に及ぼす残留応力の効果を説明することに留めている。その理由をご質問の主旨に照らして答えさせていただく。

(1) き裂進展に伴う残留応力の再分布 疲労き裂進展に伴う残留応力再分布は、き裂進展経路と密接に関係すると考えられる。本層状接合材では、側面(R

部)の非硬化部境界付近の疲労き裂進展開始であると推測されるが、その後のき裂進展経路は明らかでない。したがって、ご指摘の中立点移動には、疲労き裂進展経路の究明とき裂進展に伴う三次元的な残留応力再分布を知る必要があると考えられるが、現段階では難しく、このことが引張平均応力の有無による疲労き裂伝ば寿命比 $\beta(=\alpha^m)$ にどのように影響するかについて、検討していない。

(2) 残留応力と平均応力の相関 一般には、ご指摘のように、表面圧縮残留応力は疲労過程において減少するので、初期圧縮残留応力を平均応力とみなした疲労寿命推定は危険側の評価になると思われる。しかし、実際にどの程度残留応力の減少があるかを試験片内部も含めて見積もることは難しいのが実状かと思う。一方、硬化部圧縮残留応力の変化は、内部の非硬化部塑性変形に支配される場合もある^{(2)(付1)}。本層状接合材のように硬化比が大きい場合、疲労限度付近の応力レベルでは表面ひずみの変化がほぼ弾性的挙動を示したことから、応力繰返しによる残留応力変化量は小さいと考えた。すなわち、 α^m で表される疲労き裂進

展寿命比 β は非常に小さくなることから、引張平均応力による著しい曲げ疲労寿命の低下を説明した。本実験範囲において、 $S-N$ 曲線は全体的にかなり引張平均応力による曲げ疲労寿命低下を示しているのです、その低下を引き起こす程度の側面圧縮残留応力は残存していると考えている。

なお、ご参考までに、質問を頂いてから疲労限度付近の未破断試験片表面の軸方向 X 線残留応力測定を行った。ただし、疲労試験後約 1 年経過していることをお断りする。その結果、両振り試験片では約 -380

MPa であり、一方平均応力を負荷した試験では引張平均応力側で約 -290 MPa および他方の側では約 -430 MPa の値となった。すなわち、初期残留応力値からの若干の変化が認められる。さらに、応力振幅の増大につれて圧縮残留応力の減少量は大きくなり、 α の値が小さくならず $\beta(=\alpha^m)$ の値が 1 の大きさに比べて無視しにくくなることが考えられる。今後曲げ応力の繰返しに伴う残留応力再分布の定量的考察(付1)に関連して β の値の検討を行いたいと思う。

(付1) 鳥居・ほか2名, 材料, 34-380 (昭60).