数種の金属材料の疲労き裂伝ばにおける寸法効果* (回転曲げにおける表面き裂の場合)

西 谷 弘 信**, 皮籠石 紀 雄***

Size Effect of Fatigue Crack Growth in Several Metals (Case of Surface Crack under Rotating Bending)

by Hironobu NISITANI and Norio KAWAGOISHI

The effect of size on the growth rate of a surface crack has been investigated through rotating bending fatigue tests of 5 kinds of metals. In general, the relation $dl/dN \propto \Delta K^m$ (ΔK : stress intensity factor range, l : crack length, m : constant) holds under the condition of small-scale yielding, and the relation $dl/dN \propto \sigma_a^n l$ (σ_a : stress amplitude, n : constant) holds under a high stress level. The effect of size on the crack growth rate is discussed based on these two relations.

Key Words: Fatigue, Metal, Size Effect, Surface Crack, Crack Growth Law, Rotating Bending

1. 緒 言

これまでに各種材料を用いて、高応力下で伝ばする微小き裂の伝ば速度が $dl/dN \propto \sigma_a^n l$ (σ_a : 応力振幅, l : き裂長さ) で示されること, そしてこの伝ば則と小規模降伏条件下での伝ば則 $dl/dN \propto \Delta K^m$ (ΔK : 応力拡大係数幅) とを併用することにより, ほとんどの応力レベル下での伝ば速度が表示でき, したがって疲労寿命予測が可能になることを報告した⁽¹⁾. このことはき裂伝ば速度の寸法効果も上記の伝ば則を通じて説明できることを示唆している.

しかしながら, 小規模降伏条件下におけるき裂伝ば速度の寸法効果⁽²⁾に比較して高応力下での伝ば速度の寸法効果についての研究⁽³⁾は少なくまだ不明な点が残されている.

本論文では, 数種の金属材料を用いて高応力下および低応力下における表面き裂の伝ば速度の寸法効果について検討した.

2. 材料, 試験片および実験方法

素材は, 市販の高強度 Al 合金 2017-T4, 7075-T6 (いずれも直径約 20 mm で時効硬化した状態で納入された), S35C 圧延丸棒 (直径約 44 mm) および S45C 圧延丸棒 (直径約 19 mm) である.

表 1, 2 にこれらの化学成分, 機械的性質をそれぞれ示す.

図 1, 表 3 に試験片の形状, 寸法をそれぞれ示す.

S45C 材は素材を 840°C で焼なまし後, 直径 17 mm に旋削し, その後 840°C で焼入れ, さらに異なる強度レベルを得るために 500°C および 350°C で焼もどしを行った後, S35C 材は素材を 870°C で焼なまし

表 1 化学成分

Material	Mg	Cr	Zn	Zr-Ti	Ti	Si	Fe	Cu	Mn	C	P	S
2017-T4	0.59	0.03	0.18	0.04	0.03	0.53	0.30	4.14	0.73	-	-	-
7075-T6	2.46	0.19	5.66	0.06	0.06	0.11	0.26	1.42	0.11	-	-	-
S35C	-	-	-	-	-	0.24	Bal.	0.011	0.74	0.33	0.012	0.014
S45C	-	-	-	-	-	0.27	Bal.	-	0.81	0.42	0.013	0.016

表 2 機械的性質

Material	MPa, %			
	σ _b	σ _{0.2}	σ _b	ψ
2017-T4 Age-hardened	358	534	672	22.7
7075-T6 Age-hardened	602	663	799	19.5
S35C Annealed	331	532	1066	53.3
S45C Quenched & tempered	821	966	1754	64.0
	500°C Temp	350°C Temp		
	1068	1124	1850	50.0

* 昭和 60 年 12 月 4 日 第 935 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 4 月 25 日.

** 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1).

*** 正員, 鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40).

後、そして時効硬化 Al 合金は納入のまま、図 1、表 3 に示す試験片形状、寸法に仕上げた。

図 2 に S 45 C 焼入れ焼もどし材の横断面における硬さ分布（ピッカース硬さ Hv：荷重 9.8 N）の一例⁽⁴⁾を示す。いずれも硬さは試験片断面にわたりほぼ一様であることがわかる。

S 35 C 焼なまし材は、機械加工の後 600°C、1 時間の焼なましを行った。

試験片はすべて試験に先立ち、表面を直径当たり約 40~50 μm 電解研磨した。

き裂長さの測定はレプリカ法により行い、その時のき裂長さ l は試験片表面に沿う円周方向の長さ（小穴材では小穴径 0.3 mm も含む）とした。

応力は、応力振幅を σ_a 、応力幅を $\Delta\sigma$ で表示する ($\Delta\sigma = 2\sigma_a$)。

用いた試験機は、2 種類の小野式回転曲げ疲労試験機（容量：15, 98 N・m、回転数：約 3 000, 3 400 rpm）である。

表 3 試験片寸法

Material	Shape of specimen	d_1	d_2	D	l_1	l_2	l_3	L	R_1	R_2	R_3	t
2017-T4 Age-7075-T6 hardened	(a)	5	5.5	8	10	5	20	60	10	10	-	-
		10	11	15	20	15	80	210	20	20	-	-
S35C Annealed	(b)	5	5.5	8	10	5	20	60	5	50	25	0.1
		10	11	15	20	15	80	210	100	5	0.2	
S45C Quenched & tempered	(b)	5	5.5	8	10	5	20	60	10	10	25	0.1
		8	9	15	20	15	80	210	20	20	5	0.2

(a) 小穴付き試験片 (2017-T4, 7075-T6)

(b) 部分切欠試験片 (S 35 C, S 45 C)
図 1 試験片形状

図 2 試験片横断面における硬さ分布⁽⁴⁾

3. 実験結果および考察

3・1 低応力下におけるき裂伝ば速度の寸法効果

ここでは小規模降伏条件が満たされるような低い応力レベルでの結果に基づいて、表面き裂の伝ば速度の寸法効果を検討する。

図 3 は、時効硬化 Al 合金 2017-T4 および 7075-T6 のき裂伝ば速度 dl/dN と応力拡大係数幅 $\Delta K \{ (2/\pi)(\Delta\sigma\sqrt{\pi l}/2) \}$ で近似する⁽⁵⁾の関係である。いずれも dl/dN は ΔK により一義的に決まり、しかも両者の間には試験片寸法の影響もなくほぼ 1 本の曲線

図 3 dl/dN と ΔK の関係 (2017-T4 と 7075-T6, 試験片は図 1(a))

図 4⁽¹⁾ S-N 曲線 [S 35 C 焼なまし材, S 45 C 焼入れ焼もどし材, 試験片は図 1(b)]

⁽¹⁾ 相似試験片では一般に小形試験片のほうが疲労限度は大きくなる。図 4 で逆の傾向がみられるのは、応力こう配が $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}^{-1}$ でわずかしちがいがわかない⁽⁴⁾ため、ばらつきが関係したことによるものと思われる。なお、破断寿命については文献(6)を参照されたい。

で示されている。したがってこの範囲の条件下ではき裂伝ば速度の寸法効果は ΔK を通じて説明されることになる。図3における応力レベルは、2017-T4では、 $\sigma_a/\sigma_{0.2}=0.45\sim0.56$ 、7075-T6では、 $\sigma_a/\sigma_{0.2}=0.23\sim0.43$ であり、小規模降伏条件が満たされているものと思われる。

3.2 高応力下におけるき裂伝ば速度の寸法効果

ここではS35C焼なまし材⁽⁶⁾および強度レベルの異なる2種類のS45C焼入れ焼もどし材について、小規模降伏条件が満たされないような高応力下におけるき

裂伝ば速度の寸法効果を検討する。

図4はこれらの材料のS-N曲線である。時間強度の寸法効果をみると、S35C焼なまし材ではほとんど寸法による差はないが、S45C焼入れ焼もどし材ではいずれも大形試験片の寿命が長い。そして大形と小形のS-N曲線の傾きはほぼ平行になっている。これは後述するように、全寿命の多くがき裂伝ば期間であり、しかもその時のき裂伝ば速度は、両試験片ともに $\sigma_a l$ により一義的に決まるためである。

図5は各材の高応力下におけるき裂長さ l と繰返し数の関係を、縦軸に相対き裂長さの対数 $\ln l/d$ をとり、横軸に l/d が0.02となる繰返し数 N_0 を基準とする繰返し数 $N - N_0$ をとって示したものである。両者はほぼ直線関係で示されることから $dl/dN \propto l$ となることがわかる。また、同一応力下で寸法の影響をみると、S45C350°C焼もどし材の場合のみ、多少小形の直線の傾きが大きい。これは、全体的には直径が異なってもき裂伝ば曲線はほぼ1本に重なっている。このことは、直径の異なる試験片に同じ応力を加える場合、表面き裂長さの相対値 l/d が等しければき裂伝ば速度の比が直径の比にほぼ等しいことを意味している。

図6にS45C350°C焼もどし材の小形試験片の dl/dN と ΔK の関係を示す。図からわかるように、低応力レベルでは dl/dN は ΔK によりほぼ一義的に決まるが、高応力レベルでは両者に応力依存性があり ΔK による整理はできない(S35C焼なまし材およびS45C500°C材の結果も同様である)。なお、同図には大形試験片の低応力レベル下での結果も示しているが、小形の結果とはほぼ重なっており、本材料でも前節で述べたように低応力下での伝ば速度の寸法効果は ΔK を通じて説明されることがわかる。

(a) S35C 焼なまし材

(b) S45C 500°C 焼もどし材

(c) S45C 350°C 焼もどし材

図5 l/d と $N - N_0$ の関係 (試験片は図1(b))

図6 dl/dN と ΔK の関係 図7 dl/dN と σ_a の関係 (S45C 350°C 焼もどし材) ($l=1$ mm の場合)

図 8 dl/dN と $\sigma_a^2 l$ の関係 [S 35 C 焼なまし材, S 45 C 500°C, 350°C 焼もどし材, 試験片は図 1 (b)]

表 4 き裂伝ば速度における寸法効果の支配因子

Material	Parameter	Range of σ_a/σ_s
S 35 C Annealed	$\sigma_a^2 l$	0.71-1.07
S 45 C 500°C Temp	$\sigma_a^2 l$	0.61-0.79
Quenched & tempered	$\sigma_a^2 l$	0.66-0.80
	ΔK	0.56-0.61
2017-T4 Age-hardened	ΔK	0.45-0.56
7075-T6 Age-hardened	ΔK	0.23-0.43

図 7 は、 dl/dN と ΔK の関係に応力依存性が生じするような高応力レベル下での $l=1.0$ mm における dl/dN と σ_a の関係を各材に対して求めたものである。それぞれ $dl/dN \propto \sigma_a^2$ で示され、しかもいずれの材料においても試験片寸法の影響はほとんどなく 1 本の直線で示されている。したがってこの関係と前述の $dl/dN \propto l$ の関係から $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ となることがわかる。

図 8 は、各材の dl/dN と $\sigma_a^2 l$ の関係を示したものである。すべての材料で、 dl/dN は $\sigma_a^2 l$ によりほぼ一義的に決まり、しかも S 45 C 350°C 焼もどし材の場合多少小形試験片の dl/dN が大きいものの全体としては寸法の影響もほとんどない。

以上のことから、き裂伝ば速度の寸法効果は、低応力レベルでは $dl/dN \propto \Delta K^m$ 、応力レベルが高く小規模降伏条件が満たされない場合 $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ により説明されることになる。

これらの結果は、伝ば速度がき裂先端の繰返し塑性域寸法 $r_{p\text{rev}}$ に比例する⁽⁷⁾ことから理解される⁽⁸⁾。すなわち、小規模降伏条件下では $dl/dN \propto r_{p\text{rev}} \propto \Delta K_{\text{eff}}^2$ であり、一方応力が高い場合、き裂長さが増加しても開口比 U はほぼ一定と考えられることから、同一応力下では相似試験片の $r_{p\text{rev}}$ は直径比に比例するはずであり dl/dN も直径比に比例すると考えられるから

図 9 $\sigma_a-(N_f-N_0)$ の関係 [S 35 C 焼なまし材, S 45 C 500°C, 350°C 焼もどし材, $N_0: l=0.02d$ となるときの繰返し数, 試験片は図 1 (b)]

である。

表 4 は、伝ば速度の寸法効果を支配するパラメータとそのときの応力レベルの関係を相対応力 σ_a/σ_s ($\sigma_s: \sigma_{sl}$ または $\sigma_{0.2}$) を基準に整理したものである。

これらの結果は、前報⁽⁹⁾で示した二つの伝ば則 ($dl/dN \propto \Delta K^m$, $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$) におけるパラメータ ΔK , $\sigma_a^2 l$ の適用限界ともほぼ一致している。

図 9 は、各材の $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ の成立する範囲における $\sigma_a-(N_f-N_0)$ 曲線である。

き裂伝ば速度の寸法効果が $\sigma_a^2 l$ により一義的に決まり $dl/dN \propto d$ となることを反映していずれの材料とも試験片寸法に関係なくほぼ 1 本の曲線で示されている。

4. 結 論

時効硬化 Al 合金 2017-T 4, 7075-T 6, S 35 C 焼なまし材および強度レベルの異なる 2 種類の S 45 C 焼入れ焼もどし材を用いて、回転曲げ疲労試験を行い、高応力下および低応力下での表面き裂の伝ば速度における寸法効果をき裂伝ば則との関連で検討した。

得られた結論は次のとおりである。

(1) 小規模降伏条件が満たされる場合、伝ば速度は ΔK により一義的に決まる。したがって伝ば速度の寸法効果も ΔK を通じて説明される。この場合の応力レベルの目安は、 $\sigma_a/\sigma_s < 0.5$ ($\sigma_s: \sigma_{sl}$ または $\sigma_{0.2}$) である。

(2) 高応力下における伝ば速度は $\sigma_a^2 l$ により一義的に決まり、しかも相似試験片の直径比に比例する。したがって伝ば速度の寸法効果も $\sigma_a^2 l$ を通じて説明される。この場合の応力レベルの目安は、 $\sigma_a/\sigma_s > 0.6$ である。

文 献

- (1) 例えば, 西谷・ほか2名, 機論, 50-449, A (昭59), 23.
- (2) 例えば, Rooke, D. P., ほか3名, *Aeronaut. J. Roy. Aero. Soc.*, 73 (1969), 335.
- (3) 河野・西谷, 機講論, No. 710-9 (昭46-10), 53.
- (4) 西谷・皮龍石, 機論, 51-467, A (昭60), 1668.
- (5) 西谷, 機論, 34-259 (昭43), 371.
- (6) 西谷・皮龍石, 機論, 49-440, A (昭58), 431.
- (7) 西谷・皮龍石, 機論, 50-450, A (昭59), 277.
- (8) 西谷, 機講論, No. 790-13 (昭54-10), 63.; Nisitani, H. (Mura, T. 編), *Mechanics of Fatigue-AMD*, 47 (1981), 151, ASME.
- (9) 西谷・皮龍石, 機論, 51-471, A (昭60), 2560.

討 論

〔質問〕 越 智 保 雄〔電気通信大学機械工学科〕

以下の点についてご教示願いたい。

(1) 高応力下のき裂伝ば速度の整理方法として $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ が有効であると述べられているが, 比較的軟らかい材料で回転曲げの場合高サイクル疲労範囲でも σ_a/σ_s の値が1よりかなり大きくなる場合(例えば S 15 C など $\sigma_a/\sigma_s = 1.5 \sim 2.0$) もあるが, そのような場合にも上述の整理が有効とお考えか。

(2) 最近低サイクル疲労範囲のような全断面降伏条件となる領域では表面き裂伝ば特性を ΔJ で整理する例も見受けられるが, 貴研究の高応力の範囲ではそのような整理も有効であるとお考えか。

〔回答〕 (1) これまでに研究した材料の中で, σ_a/σ_s が1よりかなり大きくしかも高サイクル疲労範囲に対する例としては, 焼なまし Al 合金 ($\sigma_a/\sigma_s \approx 2.5 \sim 3.4$) があるが, その場合も $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ は成立し, その時の n の値は, 他の焼なまし材とほぼ等しく約 8

であった(付1)。

(2) ΔJ がき裂伝ば速度を規定する有効なパラメータであることを示す報告は多く, 著者らも注目している。一方, ここで示した伝ば則 ($dl/dN \propto \sigma_a^2 l$) は, (i) 物理的根拠が明確であること, (ii) 実用上特に有益と思われる簡便さを有すること, (iii) 多くの材料や応力条件下で成立し, 疲労における各種現象の説明や寿命の予測を可能にすること, などその有用性が示されている。しかしながらこの伝ば則をさらに完全なものにするためにはまだ検討すべき項目が残されている。したがって, 本研究においては, 疲労問題におけるパラメータ $\sigma_a^2 l$ の広範な有効性を明らかにすることを主目的としており, ΔJ による検討は行っていない。

(付1) 西谷・皮龍石, 機論, 50-455, A (昭59), 1334.