回転曲げによる鋳鉄の疲労き裂進展挙動について*

上 田 祐 男**

On the Fatigue Crack Propagation Behavior in Cast Iron under Rotating Bending

by

Sachio UEDA

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

Low cycle fatigue tests of circumferentially notched flake graphite- and spheroidal graphite-cast irons were performed in rotating bending.

The primary results obtained are summarized as follows:

(1) The fatigue crack propagation curves of cast irons almost coincide with their deflection curves during the fatigue test.

(2) The fatigue striations were observed only in the ferrite regions on the fracture surface of spheroidal graphite cast iron.

(3) The rate of fatigue crack propagation (dl/dN) was closely related to the stress intensity factor K and could be expressed by

$$\frac{dl}{dN} = CK^{6.1} \text{ for flake graphite cast iron}$$

$$\frac{dl}{dN} = CK^5 \text{ for spheroidal graphite cast iron.}$$

(4) Under the low cycle rotating bending tests, the relation between N and σ_a/σ_{Bn} for both notched specimens of the flake graphite- and spheroidal graphite-cast irons can be given by almost the same straight line on logarithmic scale coordinates. (N : number of cycle to failure, σ_a : stress amplitude, σ_{Bn} : notched tensile strength.)

(Received Sep. 20, 1974)

1 緒 言

鋳鉄は組織的にはパーライト、フェライトおよび黒鉛の混合組織であるため疲労強度は鋼と全く異なったぜい性的な破壊特性を示す。これは黒鉛の形状による表面あらさや、内部切欠き効果による機械的因子が大きな役割を果たす結果であるとされている。

このような鋳鉄が繰返し応力を受けた場合の疲労き裂伝ば特性、切欠き効果あるいは破面のフラクトグラフィなどは非常に興味深い問題である。本報告では普通鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄の切欠き試験片について、塑性域における低サイクルでの回転曲げ疲労試験を行ない、試験中の試験片のたわみを測定し、環状疲労き裂の内部方向へのき裂の進展を調べる一方、走査電顕による疲労破面の状態の観察、および切欠き効果について鋳鉄の疲労特性を検討した。

2 材料および試験方法

実験に供した材料は普通鋳鉄 (Fc 25 に相当) と球状黒鉛鋳鉄の二種類で、Table I には試験材料の化学成分および機械的性質を示した。これら材料の顕微鏡組織は Fig.1 に示す。片状黒鉛鋳鉄は800℃、90分焼なまししたもので、パーライト地に非常に細かい片状

Table I. Chemical composition and mechanical properties of test materials.

Material	(%)					
	C	Si	Mn	P	S	Mg
Spheroidal graphite	3.5	2.82	0.47	0.004	0.0016	0.0059
Flake graphite	3.5	2.80	0.52	0.150	0.0040	—

Material	Yield strength $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation δ (%)
Spheroidal graphite	42	64.2	5.1
Flake graphite	19.2	25.1	0.3

* 原稿受理 昭和49年9月20日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

Fig. 1. Microstructure of materials.

Fig. 2. Shape and sizes of specimens for rotating bending fatigue test.

黒鉛が均一に、無方向に配列している。球状黒鉛鋳鉄は鑄放しの状態で、パーライト組織の地に球状黒鉛の周りをフェライトで包んだいわゆるブルスアイ組織である。切欠き疲労試験片は Fig. 2 に示す形状寸法に製作した。この試験片の応力集中係数は $\alpha_K = 2.15$ である。

疲労試験は片持梁型回転曲げ疲労試験機を用い、10 rpm の試験速度で定応力試験（定荷重試験）を行なった。試験中環状切欠き底の表面に観察されるき裂の発生は切欠き表面を100倍の実体顕微鏡で観察してき裂の発生状況を調べ、き裂発生までの繰返し数を求めた。また切欠き底より内部方向への巨視的な円周き裂の深さは、ある回数だけ繰返した後、試験機より取りはずし、縦に二つ割りにして、その断面を研磨、腐蝕し、光学顕微鏡によりき裂長さを測定した。試験中の試験片の荷重点における縦方向のたわみの変化を差動変圧器によって計測し記録した。

3 実験結果

低サイクル疲労試験結果を $S-N$ 曲線で表わしたものが Fig. 3 である。切欠き材の疲労強度は対数グラフ上で1本の直線で表示され、球状黒鉛鋳鉄では繰返し数の増加とともに直線的に低下し、その直線の傾きは大きく、片状黒鉛鋳鉄はゆるやかなこう配で変化している。図には平滑試験片の結果をも示した。黒鉛の形状により内部切欠きを有すると考えられる鋳鉄材に対しても外部切欠きを付けることにより低サイクル疲労強度は低下する。図中の破線は試験片の切欠き底を実体顕微鏡で観察し、切欠き底表面の全円周にわたってき裂が認められた時点の疲労強度を示したものである。この時点において試験片の縦断面における切欠き

底部を観察した結果切欠き底表面より中心方向へのき裂深さは平均 0.05 mm 程度であった。両材料ともき裂はかなり早い時期に発生し寿命の大部分がき裂伝播に費やされている。

 Fig. 3. $S-N$ curves under the constant stress amplitude in low cycle fatigue.

Fig. 4. Typical deflection records at during fatigue test under the rotating bending stress.

Fig. 4 は定応力試験中を通じて鉛直方向(負荷方向)のたわみが繰返し数の増加に従っていかに変化するかを測定し記録させた一例を示したもので、負荷直後は大きなたわみが生じ繰返し数の増加とともにほぼ一定の速度で変化し、破断近くになればたわみの変化は増大し破断直前に著しく大きな変化となっている。片状黒鉛鑄鉄の破断近くでたわみの変化の振れに大きな幅がみられるのは切欠き底よりの円周き裂が深くなると切欠き底より一様な深さに入らず偏心して進展するためと考えられ、破断近くでき裂の進展が大きくなったことを示している。

4 試験結果に対する考察

4・1 破面観察

切欠き底近傍のき裂の進展状態をみるため、未破断試験片の軸方向断面における切欠き底より中心部への

巨視的なき裂を観察した結果を示したのが Fig. 5 である。Fig. 5 (a)は片状黒鉛鑄鉄におけるき裂進展状態を示したもので、疲労き裂の進展は微細な黒鉛片が多く分布している箇所を進展し、き裂先端近傍に存在する微細な黒鉛片の個々に発生したき裂が合体しながらき裂は拡大して太い主疲労き裂を形成しながら伝播するという過程をとるようである。(Fig. 5 (b))したがってその経路もジグザグ状を呈している。

Fig. 5 (c)は球状黒鉛鑄鉄材の切欠き底近傍におけるき裂の進展状態を観察したもので、切欠き底より発生したき裂は球状の黒鉛を結ぶように進展し応力集中源となる球状黒鉛周辺はき裂の発生が容易になるため(矢印)任意の方向にき裂が進展し、それらのあるものが成長して主疲労き裂を形成するようである。

つぎに疲労破断面を走査電子顕微鏡を用いて観察し

Fig. 5. Microphotograph of crack propagating in vicinity of notch in longitudinal section of fatigued specimens.

(a) Spheroidal graphite cast iron. ($\sigma=35 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=4982$)
 (b) Striations (ferrite).
 (c) Cleavage fracture pattern. ($\sigma=45 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=1175$)
 (d) Rock candy pattern. (flake graphite cast iron $\sigma=13 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=2430$)
 (e) Flake graphite. ($\sigma=15 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=201$)
 (f) Flake graphite. ($\sigma=20 \text{ kg/mm}^2$, $N_f=20$)

Fig. 6. Scanning electron fractographs of low cycle fatigued fracture surface pattern.

た結果を Fig. 6 に示す。図中の矢印はき裂伝ば方向を示したものであり、(a)は球状黒鉛鋳鉄の疲労破面で球状黒鉛とフェライト組織との境界から破壊し黒鉛の皮殻がはく離を起こしている。基地組織はしま状の破面を呈することから、塑性疲労クラックの進展によって形成されたものであることが明らかで黒鉛の周りのフェライト部分に疲労破面特有の striation の模様が観察される。(b)はこの部分を拡大したものである。(c)は高繰返し応力での破面を示したものでパーライト部分に劈開破面が観察され river pattern がき裂進展方向に放射状に広がっている。(d)~(f)は片状黒鉛鋳鉄にみられる粒界破面で Rock candy pattern を示している。(e)は片状黒鉛の破壊状態を示したもので紙片状を呈し、球状黒鉛の破壊と著しい相違を示している。(f)は繰返し応力の高い短寿命の破面を示したものである。

鋳鉄の疲労き裂の伝ばは黒鉛の形状によって左右され、球状黒鉛鋳鉄では黒鉛とフェライト組織との境界を進展しており、疲労破壊での特徴的な striation はフェライト領域にのみ観察された。一方片状黒鉛鋳鉄

での疲労き裂は微細な黒鉛片に発生したき裂が連結して主き裂となり片状黒鉛そのものが疲労き裂の進路となっている。

4・2 き裂伝ば速度

公称曲げ応力レベルでの切欠き材のき裂発生から破断までのき裂伝ば曲線の例を Fig. 7 に示す。図中に示した各点は1本の試験片に対応しており、実線は試験中測定し記録させた Fig. 4 の曲線を縦軸にたわみの変化値をとって図示したもので、き裂伝ば曲線としてき裂長さによく対応しており、×印の破断時点のき裂深さは最終破断面より測定した値を示したものである。これらの曲線から、疲労き裂伝ば過程は、片状黒鉛鋳鉄および球状黒鉛鋳鉄ともほぼ同様な傾向を示し、き裂発生初期の過程においては繰返し数に対してき裂はあまり進展しないが、そのつぎの過程ではき裂の進展は増加する領域があり、最後に最も速度が速くなり破断にいたる過程が観察され疲労寿命の大部分がき裂進展に費やされていることがわかる。

これらの曲線からサイクル当たりのき裂伝ば速度 dl/dN を求め、疲労進行過程中的このき裂伝ば速度を

Fig. 7. Fatigue crack propagation curves of cast iron specimens.

応力拡大係数 K を用いて整理すると次の式で表わされる。³⁾

$$(dl/dN) = CK^m$$

ここで C , m は試験条件, 性質などに依存する係数である。回転曲げに対する切欠き材の K 値の計算には⁴⁾小林らによる近似式を用い, 圧縮側ではき裂が閉じる⁵⁾として計算した。Fig. 7 の結果を用いて応力拡大係数とき裂伝ば速度の関係を示すと Fig. 8 となる。図より片状黒鉛鋳鉄および球状黒鉛鋳鉄も dl/dN と K との関係は若干のばらつきはあるが直線で近似することができ, 片状および球状黒鉛鋳鉄の低サイクル疲労における K の指数 m は, 片状黒鉛鋳鉄では約 6.1, 球状黒鉛鋳鉄では約 5 であり, m の値は片状黒鉛鋳鉄の方が球状黒鉛鋳鉄よりも大きくなっている。

Fig. 8. Plots of the fatigue crack propagation rate (dl/dN) versus the stress intensity factor K for cast irons.

4・3 時間強度と切欠き効果

高サイクル疲労における切欠き係数と同様に低サイクル疲労強度の切欠き係数 β として

$$\beta = \frac{\text{平滑試験片の時間強度}}{\text{切欠き試験片の時間強度}}$$

と定義し, 縦軸に β の値をとり, 横軸に破断までの繰返し数をとってプロットしたのが Fig. 9 で細線 S45C の結果を示したものである。図より片状黒鉛鋳鉄は繰返し数の増加とともに β は増加するが $N=10^3$ 以上になれば一定値 (1.47) に近づき飽和する傾向にある。一方球状黒鉛鋳鉄は繰返し数の増加とともに β の値は増加の傾向を示し S45C とよく似た傾向を示し, 弾性域における応力集中係数を α_K とすれば鋳鉄の低サイクル疲労においてもおのおのの時間強度に対して $\beta < \alpha_K$ なる関係が成立している。

Fig. 9. Relationship between fatigue notch factor and number of cycle to failure.

つぎに鋳鉄に対する切欠きが低サイクル疲労強度に及ぼす影響をみるため Fig. 3 に示す切欠き材の S-N 曲線を縦軸の応力振幅 σ_a の代わりに切欠き材の引張強度 σ_{Bn} (切欠き疲労試験片と同一の切欠き寸法に対する切欠き引張強度で球状黒鉛鋳鉄では $\sigma_{Bn}=54$ kg/mm², 片状黒鉛鋳鉄では $\sigma_{Bn}=16.9$ kg/mm²) との比 σ_a/σ_{Bn} を用いて整理すれば Fig. 10 に示すように両対数²⁾グラフ上ではほぼ一本の直線で表わされ, 平滑材のそれとはほぼ同様な傾向を示し, 両材料とも塑性域における時間強度が切欠き引張強度と一義的な関係を有することが明らかとなった。

Fig. 10. Low cycle rotating beam bending fatigue strength of notched cast irons.

5 結 言

片状黒鉛および球状黒鉛鋳鉄の切欠き材について片持梁型回転曲げの低サイクル疲労試験を行なった結果、疲労破面や環状疲労き裂の進展状況および低サイクル疲労強度について次の事項が明らかとなった。

- (1) 巨視的なき裂伝ば曲線は試験中の試験片のたわみの変化曲線とよく対応している。
- (2) 球状黒鉛鋳鉄における疲労き裂は黒鉛とその周りのフェライト組織との境界を進行し、片状黒鉛鋳鉄では微細な黒鉛片自体が破壊しき裂進展の経路となっている。
- (3) 球状黒鉛鋳鉄の低サイクル疲労破面は、鋼などに観察される striation 模様が観察され、それはフェ

ライト組織にのみ形成された。

- (4) き裂伝ば速度 dl/dN は応力拡大係数 K を用いて整理すれば、直線関係が存在し、次の関係がある。

片状黒鉛鋳鉄では $dl/dN = CK^{6.1}$

球状黒鉛鋳鉄では $dl/dN = CK^5$

- (5) 応力振幅と切欠き引張強さとの比 σ_a/σ_{Bn} と破壊までの繰返し数 N との関係は両対数グラフで表わすと両材料ともほぼ一本の直線で表示することができる。
(昭和47年3月17日 日本機械学会関西支部第47期定期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) PoPe, J. A., "Metal Fatigue", p. 220 (1959) Chapman & Hall, London; 大橋正昭, 黒沢正義, 小松康彦, 鋳物, **42**, 634 (1970); 新美 格, 大橋正昭, 小林康彦, 鋳物, **43**, 101 (1971).
- 2) 上田祐男, 材料, **23**, 861 (1974).
- 3) Paris, P. C., and F. Erdogan, Trans. ASME, Ser. D, **85**, 528 (1963).
- 4) 小林英男, 中沢 一, 材料, **18**, 627 (1969); 機械学会論文集, **36**, 1238 (1970).
- 5) 国尾 武, 萩原芳彦, 日本機械学会講演論文集, No. 700-3 (1970).