球状黒鉛鑄鉄の疲労破面観察*

砂 田 久 吉**

Fractography of Spheroidal Graphite Cast Iron in Fatigue Fracture

by

Hisakichi SUNADA

(Himeji Institute of Technology, Himeji)

Notched specimens of spheroidal graphite cast iron were fatigued under alternating bending stress. The fatigue fracture surface was observed using a two-stage plastic-carbon replica with Cr shadowing.

The result obtained are as follows :

(1) Ductile-appearing fatigue striations were observed in the ferrite region on the fracture surface of spheroidal cast iron as in the cases of steels, Al alloys, etc.

(3) Roughly speaking, the striation spacing was equivalent to the magnitude of macroscopically measured rate of crack growth. But in the range of lower growth rate, there was a tendency of striation spacing being larger than the macroscopic rate.

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

$$(dl/dn) = c \cdot K^3$$

(Received June 24, 1972)

1 緒 言

最近鑄鉄材も繰返し荷重を受ける個所の強度部材として使用されるようになり、それに伴い疲労に関する報告も数多く行なわれている。たとえば球状黒鉛鑄鉄の疲労強度に及ぼす基地組織・黒鉛粒度の影響について調べ、それはパーライト量^{1)~3)}によって変化し、その量が多くなるに従って強くなり¹⁾、また表面近くの黒鉛粒度の影響は表面あらさ²⁾に関係づけられるとしている。

このように鑄鉄の疲労強度は組織的には炭素鋼のパーライト・フェライトの他に黒鉛による表面あらさ・内部切欠き効果による機械的因子も考慮しなければならないことはよく知られている。

一方フラクトグラフィーによる疲労機構の解析も盛んとなり、鋼・Al 合金などの疲労破面観察から、巨視的なき裂伝ば速度は1つの striation 間隔⁴⁾⁵⁾と対応する⁶⁾とした報告も多くみられる。鑄鉄の疲労破面観察に関しては Glover らのフェライト量による破面の相違を述べた報告がみられる程度でいまだ数少ないようである。ここでは球状黒鉛鑄鉄の疲労破面観察を行ない、

巨視的なき裂伝ば度と striation 間隔について検討したので報告する。

2 実験方法

この実験に用いた材料は Table I に示す化学成分を有する球状黒鉛鑄鉄で、その顕微鏡組織を Fig. 1 に示す。黒鉛周辺の大部分はフェライトであるが、その間にパーライト組織が散在している。なお黒鉛の平均径は 0.05 mm である。

この素材を Fig. 2 に示す形状寸法の平滑および切欠き疲労試験片に製作した。なお切欠き試験片の応力集中係数は $\alpha=2.0_0$ である。

疲労試験は小野式回転曲げ疲労試験機 (3600 rpm) を用いて実施した。

Table I. Chemical composition and mechanical properties of materials.

T.C	G.C	Si	Mn	P	S	Cr
3 12	2.05	2.73	0 23	0.04	0.02	0.02
Yield strength (kg/mm ²)		Tensile strength (kg/mm ²)		Elongation (%)		Hardness Hv (500 g)
30.7		43 2		8.7		234

* 原稿受理 昭和47年 6月24日

** 正 会 員 姫路工業大学 姫路市書写

Fig. 1. Macrostructure of materials.

Fig. 2. Dimension of specimens.

巨視的なき裂伝ば速度は酸化着色法によって求めた。ここでいう巨視的なき裂とは切欠き底から内部に向かう環状き裂をいう。測定方法は任意の繰返し数後疲労試験を中止し、試験片を約 400℃に 3～4 時間大気中にて加熱酸化着色後、疲労破断させて両疲労破面を倍率 100 倍の投影器によって 60° 間隔に着色深さを測定し、き裂長さとした。これより繰返し数き裂長さ ($n-l$) 曲線を描き巨視的なき裂伝ば速度を求めた。

ミクロな破面観察は Cr シャドウイング 2 段階プラスチック・カーボン・レプリカ法によって行なった。巨視的なき裂伝ば速度に対応する微視的なき裂伝ば速度は破面各位置について約 10 枚の破面写真の striation 間隔を測定して求めた。

3 疲労試験およびき裂伝ば曲線

参考のため使用した試料の平滑材および切欠き材の $S-N$ 曲線を Fig. 3 に示す。図より平滑材の疲労限は 19 kg/mm²、切欠き材のそれは 15 kg/mm² であり、切欠き係数は $\beta=1.2_0$ となっている。破面観察は図

Fig. 3. $S-N$ diagram of materials.

Fig. 4. Crack length-numbers curve.

中 * 印に示す切欠き材について行なった。

Fig. 4 は公称曲げ応力 29.6 および 19.6 kg/mm² の 2 つの応力レベルで破面観察を行なった切欠き材の巨視的なき裂伝ば曲線を示す。鋳鉄切欠き材の疲労破面は炭素鋼などにみられる同心円環状き裂に進展せず、ランダムに成長するため、き裂深さにもかなりのバラツキがあるため一本の曲線としたのちき裂伝ば速度を求めた。

4 破面観察とその検討

疲労破面観察は先述した切欠き材の $S-N$ 曲線に * 印を付した公称曲げ応力 29.6 kg/mm² ($N_f=2 \times 10^4$) および 19.6 kg/mm² ($N_f=5.6 \times 10^5$) で破断した試料について行なった。

この観察によりみられた代表的な破面写真を Fig. 5 に示す。これらの破面模様は炭素鋼に観察されるパターンと同様であった。

Fig. 5(a)は黒鉛の破面でへき開破面となっている。Fig. 5(b)はパーライト組織の破面で Fe₃C の抜けた模様がみられる。Fig. 5(c)～(f)はフェライト領域にみられた破面模様である。Fig. 5(c)は低き裂伝ば速度範囲にみられる粒界破面、Fig. 5(d)は疲労破面特有の striation である。疲労寿命の後半のき裂伝ば速度が大きくなり始めると Fig. 5(e)に示すへき開状破面 (river pattern) が現われ、最終破断面には dimple pattern が観察された。

この他疲労初期段階では ripple 状の無地破面、マクロなき裂伝ば方向に一致しない微細な平行縞模様、介在中の集合なども数多く観察された。

Fig. 6 はき裂伝ば速度変化による観察された各破面模様の分布状態を図示したものである。鋳鉄疲労破面では疲労破面特有の striation 模様の占める割合はわずかであることがわかる。さらにこの striation を巨視的なき裂伝ば速度に一致する regular striation とこれに一致しない irregular striation に分けると伝ば速度の増加とともに前者の割合が多くなる。

Fig. 5. Fracture surface pattern.

Fig. 6. Schematic distribution of fracture patterns.

Fig. 7 はこれらの破面模様の中から、1 例として $\sigma = 29.6 \text{ kg/mm}^2$ で破断した破面写真から巨視的なき裂進展方向に直交する striation のみを取り出してまとめたものである。繰返し数の増加とともに striation は明りょうとなり、その間隔は次第に広がり、その幅も粒界を越えて多結晶間に広がっている。なお Fig. 7 において巨視的なき裂の進行方向は左より右に進んでいる。

次に巨視的および微視的なき裂伝ば速度の対応について調べるため、Fig. 4 より巨視的なき裂伝ば速度 dl/dn を、Fig. 7 より巨視的なき裂進行方向と一致する striation 間隔を測定し、これを比較した図が Fig. 8 である。図より低きき裂伝ば速度範囲では微視的なき裂伝ば速度は巨視的なそれよりも大きくなる傾向が認められるが、全体としては巨視的なき裂伝ば速度は巨視的なき裂伝ば方向に測定した striation 間隔と一致している。これは巨視的なき裂伝ば速度が Fig. 4 に示した一本のき裂伝ば曲線から求めた平均的なき裂伝ば速度であるのに対し、低きき裂伝ば速度域の微視的なき裂伝ば速度は、切欠きとき裂の干渉あるいはき裂先端の塑性変形量の不連続などの不安定状態にあるため、巨視的な

Fig. 7. Striations.

Fig. 8. Relation between crack propagation rate and striations spacing.

き裂伝ば方向に一致した striation の中には irregular striation も含んだ微視的伝ば速度となっている。このため両者に差異を生じたものと考えられる。き裂がある程度成長した後はき裂先端の塑性域も安定し、両き裂伝ば速度は一致するようになる。疲労進行過程のこのき裂伝ば速度の変化をき裂先端の状態をパラメータとして決定される応力拡大係数 K を用いて整理する方法が試みられ、両者の関係を次式で表わしている。

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

ここで c , m は試験条件・材質などに依存する係数である。そこで回転曲げに対する K 値の計算には小寺沢らの方法を用いて、応力拡大係数 K とき裂伝ば速度 dl/dn の関係を整理すると Fig. 9 となる。図中○印は微視的き裂伝ば速度であり、●印は巨視的き裂伝ば速度である。図より両者の関係は鋼・Al 合金などと同様に直線で近似することができ、次式のようになる。

Fig. 9. Plotting of K value verse crack propagation rate and striation spacing.

$$(dl/dn) = C \cdot K^{2.0}$$

なお K 値の計算の際のき裂底の実応力は、き裂の短いときは切欠き底の応力とあまり変わらないとして、き裂のない切欠きのみので応力分布をそのまま用い、き裂が長くなると切欠きの影響は小さくなり、実断面積のみを考慮した平滑材として計算した応力値を用いて計算されたものである。

これまで巨視的なき裂伝ば速度とこの方向に垂直にあらわれた striation 間隔との関係について述べてきたが、striation は必ずしもその進行方向に直交するものばかりでなく、Fig. 6 にも示したように低き裂伝ば速度範囲では巨視的なき裂進行方向に直交しない striation が数多く観察された。このき裂の進行状態を調べるため、未破断試験片の切欠き底付近の断面の観察を行なった。Fig. 10 はその断面写真を示す。Fig. 10(a) は切欠き底に発生したき裂がパーライト組織をさけて、隣接した黒鉛との間のフェライト部分を結ぶようにして進んでいる場合であり、Fig. 10(b) は切欠き底黒鉛より発生したき裂がパーライトに突き当たって停止し、これに近接する黒鉛から発生したき裂が表面（切欠き底）に向かって成長してパーライト組織のところで成長を阻止されている。

Fig. 10. Microphotograph of cracks in vicinity of notch.

以上の観察より鋳鉄のき裂伝ば過程は次のように考えられる。黒鉛は Fig. 5(a) にみたようにへき開破壊を起こしやすく、またその強度も小さく、材料中の欠陥あるいは先在き裂とみなすことができれば、黒鉛周辺は応力集中源となりき裂の発生しやすい条件にあるから、任意の方向に微細なき裂が発生する。このようにして黒鉛周辺から発生・成長したき裂が連結しながら主疲労き裂（環状き裂）を形成していくため、低き裂伝ば速度範囲の破面に観察される striation の中で巨視的なき裂に対応する striation の割合は少なくなる。

また主き裂の前方に黒鉛が存在すると、この主き裂先端が黒鉛に達すると黒鉛はへき開破壊を起こし、周辺のフェライトよりも局部的にき裂は先行するため、フェライトの striation の間隔も広がりやすくなる。反対に黒鉛の分布の粗な領域やパーライト部の striation は黒鉛周辺よりも密になる。したがって低き裂伝ば速度範囲ではデータの散らばりが大きくなる。

しかし本実験の場合き裂の進展とともにき裂の発生・伝ばに対する黒鉛の影響は少なくなり、き裂先端の応力集中、さらに実断面積の減少による実応力の増加となって striation 間隔は巨視的なき裂伝ば速度と一致するようになる。

5 結 言

球状黒鉛鑄鉄切欠き材に繰返し回転曲げ応力を加え、その疲労破面観察およびき裂長さ測定を行ない、次の事項が明らかとなった。

- (1) 鑄鉄の疲労破面にも鋼と同様な破面模様が観察され、フェライト部には striation が形成される。
- (2) 表面近くの黒鉛はき裂発生ストレスレイサーとして作用する。
- (3) 巨視的なき裂進展方向に直交する striation の 1 間隔は機械的に測定された巨視的なき裂伝ば速度とほぼ一致する。しかし低き裂伝ば速度域では striation

間隔は巨視的なき裂伝ば速度よりも大きくなる傾向がある。

- (4) 応力拡大係数 K を用いてき裂伝ば速度 dl/dn を整理すれば直線関係が存在し、次式のようになる。

$$(dl/dn) = C \cdot K^{2.0}$$

最後に本実験に際し、試料をご提供くださった日立造船（株）上田実彦氏に謝意を表わします。

（昭和47年5月30日 日本材料学会第21期総会講演会にて講演）

参 考 文 献

- 1) 大橋正昭, 黒沢正義, 小松康彦, 鋳物, **42**, 634 (1970).
- 2) 大橋正昭, 黒沢正義, 小松康彦, 鋳物, **42**, 101 (1971).
- 3) 岸本秀弘, 小倉興一, 栗津重男, 材料, **21**, 104 (1972).
- 4) Foreyth, P. J. E., and D. A. Ryder, Metallurgia, **63**, 117 (1961).
- 5) Bates, R. C., and W. G. Clark, ASTM STP. **453**, 192 (1968).
- 6) Glover, A. G., Iron and Steel, 138 (1971).
- 7) 平 修二, 田中啓介, 材料, **21**, 97 (1972).
- 8) 中沢 一, 小林英男, 材料, **18**, 627 (1969); 機械学会論文集, **36**, 1238 (1970).
- 9) 松井孝夫, 小寺沢良一, 機械学会関西支部講演前刷集 (1971); 小野沢良一, 志茂大治郎, 機械学会論文集, **36**, 904 (1970).