片状黒鉛鑄鉄の疲労における切欠感度*

野 口

徹^{*1}

Notch Sensitivity in Fatigue of Flake Graphite Cast Iron

Toru NOGUCHI

Zero-to-tension fatigue tests were performed on flat and notched bars of three gray cast irons, and the notch sensitivity was discussed based on the stress distribution obtained by considering the nonlinear behavior of the material. In flake graphite iron, the notch factor for notches with form factors 1.6 and 2.8 was 1.1-1.2 near the fatigue limit, this is higher than the notch sensitivity in static strength, but lower than that at fatigue in ductile iron. Calculated stress under the notch exceeded the fatigue strength of flat specimen down to 0.6-1.4 mm depth depending on the number of cycles to failure, matrix ductility, and notch radii. The minimum depth was 1/2-1/3 of this value in static rupture, equal to 1-2 graphite eutectic cell diameters, and was considered a minimum stress depth for crack formation.

Key Words: Metallic Material, Cast Iron, Fatigue, Notch Effect, Graphite Eutectic Cell

1. 緒 言

鑄鉄は脆性的な材料である一方、切欠感度の低い材料としても知られている⁽¹⁾。片状黒鉛鑄鉄では静的破断において切欠による強度低下がほとんどない⁽²⁾か、または低下割合が形状係数から予測されるよりも著しく小さい⁽³⁾。これは一般に、黒鉛片による内部切欠の効果が優先するためと考えられている⁽²⁾⁽³⁾。しかし、鈍い切欠では強度が上昇する場合があります⁽⁴⁾、また低温では切欠感度が著しく増加する⁽⁵⁾など、その特性は黒鉛の効果のみでは理解できない。著者は静的強度におけるこのような切欠特性を、黒鉛共晶セル数個分の領域 δ を想定することによって説明した⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。 δ はNeuber⁽⁸⁾、Siebel⁽⁹⁾らが用いた結晶粒大きさ ϵ_0 、および西谷⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾の提唱する線形切欠力学における有限領域 d などと同類である。

一方疲労については静的強度の場合と同様に切欠感度が低いこと⁽¹²⁾が知られているけれども、研究例はわずかであり、実験的にも理論的にもほとんど理解されていない。本報では数種類の鑄鉄の環状切欠丸棒試験

片を用いて、 $10^3 \sim 5 \times 10^6$ 時間強度域での片振引張疲労試験を行い、その切欠効果に対して前述の δ の概念を適用し、静的破断の場合と比較した。また切欠部の破壊過程の観察によって δ の意味を考察した。

2. 鑄鉄の切欠強度

一般に切欠材の強度は切欠底の最大応力のみでは定まらず、結晶粒大きさ程度の最小領域を想定して、その境界での応力値または領域内の応力の平均値を平滑材の強度と関係づける⁽¹³⁾。これは片状黒鉛鑄鉄の静的切欠強度および曲げ強度の理解にも有効であった⁽⁷⁾。

図1は切欠材の引張りおよびはりの曲げにおける破断時の応力分布の模式図である。鑄鉄の非線形挙動のために応力分布は破線で示される弾性応力分布よりも平坦で、最大応力 σ_0 は弾性値 σ_{0e} よりも低い。しかし σ_0 はなお平滑材の引張強度 σ_B を超える。このような、 $\sigma \geq \sigma_B$ の領域を過応力域⁽⁷⁾ δ とした。図2は種々の寸法、形状の切欠材およびはりによる δ の算定値である。 δ は応力こう配の指標⁽¹⁴⁾である $2/\rho$ または $2/h$ (ρ : 切欠半径, h : はりの高さ) によって変化し、材料による一定値とはならない。また鋼などにおける結晶粒単位の値に比べて大きい⁽¹³⁾が、その最小値は約1 mmで、黒鉛共晶セル1~2個に相当する。また液体

* 昭和63年8月26日 東北支部米沢地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年1月25日。

*¹ 正員、北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

室素中では ρ, h にかかわらず δ は 1 mm 以下であった。鑄鉄の静的破断では、最大荷重前に深さが共晶セル 1~2 個のき裂が生ずる⁽⁷⁾ことから、 δ の最小値はき裂発生要件、またこれ以上の δ はその伝ば条件に関連するパラメータと考えられた。本報では疲労における切欠効果に δ の概念を適用した場合について検討した。

3. 実験

実験に用いた試料は FC 25 級のパーライト地片状黒鉛鑄鉄 (FCP) およびその基質を焼鈍によりフェライト化したもの (FCF) ならびに比較のための FCD 60 級の球状黒鉛鑄鉄 (FCD, フェライト面積率約 50 % のブルスアイ組織) の、計 3 種類の鑄鉄である。試料の化学成分を表 1 に示した。

疲労試験用の試験片を図 3 に示した。底半径 $\rho=120$ mm のゆるい曲率を持つものを平滑材 (S) とする。切欠材の切欠深さは 2 mm で、底半径は 2 mm (R 2) および 0.7 mm (R 07) の 2 種類である。いずれも最小断面直径は 8 mm である。形状係数は 1.6 (R 2) および 2.8⁽¹⁵⁾ (R 07) である。平滑材の試験部および切欠材の切欠部は # 1000 のエメリー紙で仕上げ、鑄鉄切粉中で 550°C 90 min 焼鈍した後試験に供した。

試験機は容量 50 kN の電気油圧サーボ式疲労試験機で、正弦波の片振引張疲労試験とした。荷重の下限値は約 50 N で、最大荷重に対して無視できる。試験速

度は荷重レベルに応じて 2~10 Hz とした。荷重を順次低下させて破断繰返し数 N_f を測定し、 5×10^6 で破断しない場合はこれを疲労限度とした。

4. 実験結果

得られた S-N 曲線を図 4 に示した。応力 σ は最大荷重を最小断面積で除した値である。パーライト地の片状黒鉛鑄鉄 FCP では S-N 関係が直線にならず、まためいりょうな折れ点を示さない⁽¹⁶⁾ので、滑らかな曲線で実験点を結んだ。フェライト地の FCF および球状黒鉛鑄鉄 FCD では 10^3 ないし $10^4 \sim 10^6$ 間でおおむね直線関係が認められるので、この間は回帰直線により実験点を結んだ。 $N_f=1/2$ 上の点は静的強度であり、いずれも 4 本の平均値である。

各時間強度での切欠係数 K_f を次式で定義する⁽¹⁷⁾。

$$K_f = (\text{平滑材の各時間強度}) / (\text{切欠材の各時間強度})$$

K_f と N_f の関係を図 5 に示した。片状黒鉛鑄鉄の静的切欠係数はいずれもほぼ 1 であり、切欠きによる強度低下がほとんどない。FCFR 07 では強度が約 6 % 増加した。一方疲労では応力の減少、 N_f の増加とともに K_f が増加し、疲労限度 (5×10^6 時間強度) 近傍では $K_f = 1.1 \sim 1.2$ で、切欠による強度低下がある。

球状黒鉛鑄鉄では、いずれの切欠でも静的強度が増加するが、 N_f による K_f の増加が急で、疲労限度近傍で約 1.3 (R 2) および 1.6 (R 07) となり、片状黒鉛鑄鉄より切欠感度が高い。

5. 切欠断面の応力分布

実験で得られた鑄鉄の低い切欠感度について考察す

表 1 試料の化学成分 (%)

	TC	GC	Si	Mn	P	S
FCP	3.48	2.42	2.03	0.61	0.080	0.041
FCF	3.44	3.07	2.09	0.48	0.058	0.046
FCD	3.71	2.71	1.91	0.50	0.062	0.041

図 1 鑄鉄の切欠引張りおよびはりの曲げの応力分布

図 2 種々の試験条件における δ

図 3 試験片の形状、寸法

るため、切欠断面の応力分布を求めた。鑄鉄の応力-ひずみ曲線(図6, いずれも4本の平均)は低応力からわん曲するので、これを $\sigma = A(C + \epsilon_p)^n$ (A, C, n : 定数)で近似し⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 山田による有限要素法弾塑性応力解析プログラム⁽¹⁸⁾を用いた。ただし塑性ひずみ $\epsilon_p = \epsilon$ (全ひずみ) - σ/E とみなし、弾性率 E は一定とした。

$N_f = 10^4 \sim 5 \times 10^6$ の各時間強度に相当する応力 σ_f での軸方向応力の分布を図7に示した。また各 N_f における平滑材の疲労強度のレベルを横線で示した。切欠底の最大応力 σ_0 はいずれの材料、切欠でも平滑材の疲労強度を超えている。

応力が平滑材の疲労強度を超える範囲 δ を図7に○印で示した。その値は表2のようにまとめられる。 δ は応力レベルの低下, N_f の増加とともに減少し、疲労限度近傍では、FCPで約0.6 mm, FCFでは約0.8

mmとなる。静的破断では1.4~1.9 mmであるから、疲労における δ はその1/2~1/3であり、図2の静的 δ の最小値より小さい。フェライト鑄鉄の δ はパーライト鑄鉄よりも大きく、基質の延性の影響が示唆される。また、切欠半径 ρ の影響については、 $N_f \leq 10^5$ で ρ の小さいほうが δ が小さいが、疲労限度近傍での差はわずかである。

一方球状黒鉛鑄鉄では $N_f = 10^4$ で0.6~0.7 mmであり、FCPと大差ないが、 N_f の増加とともに減少し疲労限度近傍では約0.4 mmである。

材料の非線形を考慮せず弾性応力分布から算定した δ_e を()内に示した。 δ_e は δ より小さいが $N_f \geq 10^6$ ではその差は0.1~0.2 mmである。応力レベルおよび切欠半径の影響は δ の場合と同じである。

図4 S-N 曲線

図5 各時間強度における切欠係数 K_f

図6 引張応力-ひずみ曲線

図7 切欠断面の応力分布

6. 破壊過程の観察による考察

鑄鉄の疲労は(1)黒鉛片からの微視き裂の発生、(2)微視き裂と隣接黒鉛片の連結による主き裂の形成、(3)主き裂の伝ば拡大および最終破断、の三つの過程を経て進行する⁽¹⁶⁾。本実験では疲労試験を中断した試験片の切欠部たて断面を顕微鏡で観察した。それによれば片状黒鉛鑄鉄では寿命の約10%で切欠底近傍の黒鉛片に微視き裂が観察された。寿命の60~70%ではき裂が多数になり、黒鉛片を連結するき裂が形成された〔図8(a)〕。明りょうな連続き裂は寿命の約90%で観察され〔図8(b)〕、その深さはおおむね0.5~1mmであった。5×10⁶で破壊しなかった試験片にも多数の微視き裂が見られたが明りょうな連続き裂は観察されなかった。

平滑材では表面部に限らずほぼ全域にわたって微視き裂が観察されたが、寿命の約90%で連続する主き裂は、SEMで観察した破面の基質に疲労の特徴^{(18)~(20)}が見られる部分の分布(図9、中断後液体窒素中で破断・スケッチ図)から、深さ0.5~1mmで長さ数mmにわたると判定された。これらは回転曲げによる西谷の観察結果⁽¹⁶⁾とも一致する。

表2 各時間強度における δ

		δ (δ_e)				
Nf		1/2	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	5×10 ⁶
FCP	R2	1.6 (0.83)	0.78 (0.65)	0.72 (0.62)	0.67 (0.60)	0.54 (0.48)
	R07	1.4 (0.68)	0.59 (0.52)	0.63 (0.48)	0.62 (0.48)	0.57 (0.47)
FCF	R2	1.9 (0.84)	1.4 (0.90)	1.1 (0.75)	0.75 (0.63)	0.73 (0.58)
	R07	1.6 (0.83)	1.1 (0.64)	0.83 (0.57)	0.79 (0.58)	0.86 (0.60)
FCD	R2	- (1.0)	0.74 (0.58)	0.52 (0.50)	0.36 (0.32)	0.36 (0.32)
	R07	2.0 (1.0)	0.59 (0.45)	0.48 (0.33)	0.40 (0.30)	0.37 (0.28)

FCFR07 Nf=10⁵ N/Nf=0.6

(a)

" N/Nf=0.9

(b)

図8 切欠底近傍のき裂

図10は試料の黒鉛共晶セル組織である。セル内の黒鉛片は連続した立体構造をとる⁽²¹⁾。セルの平均直径は約0.5mmで、前述の主き裂はこの1~2倍である。

静的破断の過程⁽²²⁾もこれと類似である。最大荷重の30~50%で黒鉛片から微視き裂が生じ、荷重の増加とともにこれらが連結して、最大荷重の90~95%で共晶セル1~2個の連続き裂が形成される⁽⁷⁾。静的破断の δ の最小値はこのようなき裂形成の要件と考えられた。

疲労の場合、寿命のほとんどは(2)の主き裂形成の過程⁽¹⁶⁾である。一般に結晶粒1個程度の深さがき裂発生の目安となる⁽¹³⁾が、片状黒鉛鑄鉄の場合は共晶セル寸法程度のき裂をもって主き裂とみなすのが妥当であり、疲労限度近傍での共晶セル1~2個分の δ はこれに必要な最小領域と見ることができ。応力レベルおよび基質による δ の差は(3)のき裂伝ば・最終破断の過程に影響を与えると考える。

球状黒鉛鑄鉄における0.4mmの δ はフェライト粒径(25 μ m)、黒鉛粒間距離(50 μ m)などに比べて大きい。西谷らはき裂発生の目安を長さ0.3mm⁽¹⁶⁾としており、この程度の寸法のき裂の形成との関連が示唆される。

7. 結 言

片状黒鉛鑄鉄の疲労における切欠感度について考察するため、数種類の鑄鉄の平滑材および切欠材による引張片振疲労試験を行った。実験によれば形状係数1.6および2.8の環状切欠に対し、片状黒鉛鑄鉄の静的切欠係数 K_f はほとんど1または1以下であったが、疲労では応力レベルの低下、破断繰返し数の増加

図9 平滑材の疲労中断破面

図10 黒鉛共晶セル組織

にともなって切欠感度が増し、疲労限度 (5×10^6 時間強度) 近傍で $K_f = 1.1 \sim 1.2$ になった。

算定される切欠底の応力は材料の非線形挙動を考慮してもなお平滑材の疲労強度を大幅に超える。その深さ δ は基質組織、切欠半径および応力レベルによって $0.6 \sim 1.4$ mm の値であったが、破断繰返し数 N_f の増加とともに減少し、疲労限度近傍では黒鉛共晶セル 1~2 個分の $0.6 \sim 0.8$ mm であった。これらは同じ切欠の静的破断における δ の $1/2 \sim 1/3$ であり、液体窒素温度での値とほぼ等しい。切欠感度が片状黒鉛鑄鉄より大きい球状黒鉛鑄鉄では約 0.4 mm であった。

片状黒鉛鑄鉄の疲労限度近傍での δ は、寿命の約 90 % で形成される主き裂の深さと同程度であり、き裂形成に必要な最小領域と考えられた。静的破断の場合と同様に疲労においても、黒鉛共晶セルを破壊に関する組織上の最小単位とみなすことによって、低い切欠感度が理解される。

本研究は北大大学院学生 気賀澤忠宏君 (現在富士フィルム(株)) に負うところが大きいので、ここに謝意を表する。

文 献

- (1) AFS, *Cast Metals Handbook*, (1957), 92, Des Plaines.
- (2) 中西, 機論, 17 (昭 26), 103.
- (3) 石橋, 機論, 18 (昭 27), 87.
- (4) 野口, 鑄物, 45 (昭 48), 11.
- (5) 野口, 材料, 28 (昭 54), 306.
- (6) 野口, 材料, 29 (昭 55), 387.
- (7) 野口, 材料, 32 (昭 58), 509.
- (8) Neuber, H., *Kerpspannungslehre*, (1937), 144, Berlin.
- (9) Siebel, E., *VDI-Z*, 97 (1955), 121.
- (10) 高尾・西谷, 材料, 36 (昭 62), 1060.
- (11) 西谷, 機論, 49, A (昭 58), 1353.
- (12) 川田・ほか 3 名, 材料強度工学ハンドブック, (昭 51), 427, 朝倉書店.
- (13) 前川, 機誌, 74 (昭 46), 1393.
- (14) 西田, 応力集中, (昭 42), 80, 森北出版.
- (15) 文献(14)の 617, 620 ページ.
- (16) 西谷・田中, 機論, 51, A (昭 60), 1442.
- (17) 日本機械学会編, 疲労強度の設計資料IV, (昭 58), 150, 日本機械学会.
- (18) 山田, コンピュータによる構造解析講座 II・2 A (昭 50), 173, 培風館.
- (19) 黒田, 鑄鉄鑄物破面写真集, (昭 43), 151, 日刊工業新聞社.
- (20) 武田, 材料, 36 (昭 62), 455.
- (21) ボイチェック, A., 機械の損害, 特別号, (昭 54), 27.
- (22) 日本鑄物工業会, 鑄鉄の材質, (昭 22), 28, コロナ社.
- (23) 野口, 機講論 (北海道支部 12 回), (昭 43), 61.