片状黒鉛鑄鉄および球状黒鉛鑄鉄におけるねじり疲労過程*
(回転曲げ疲労との比較)西谷 弘信^{*1}, 田中 哲志^{*2}
大橋 敏樹^{*3}, 山田 繁治^{*4}Torsional Fatigue Processes of Flake Graphite Cast Iron and Spheroidal Graphite Cast Iron
(Comparison of Rotating Bending Fatigue with Torsional Fatigue)Hironobu NISITANI, Satoshi TANAKA,
Toshiki OHASHI, and Shigezi YAMADA

In order to clarify the fatigue behavior in plain specimens of a flake graphite cast iron (FC 25) and a spheroidal graphite cast iron (FCD 45), torsional fatigue tests and optical microscopic observations were made successively, on the fatigue processes by using the plastic replica method. The process was then compared to that under rotating bending fatigue. The main results obtained are as follows. (1) The fatigue limit, in each case, is determined by the limiting condition for propagation of the microcrack initiated from graphite. (2) The ratios of the fatigue limit in reversed torsion to that in rotated bending were about 0.9 and 0.8 in FCD 45 and FC 25, respectively.

Key Words: Torsional Fatigue, Flake Graphite Cast Iron, Spheroidal Graphite Cast Iron, Non-propagating Micro-crack, Successive Observation

1. 緒 言

著者らはさきに、片状黒鉛鑄鉄 FC 25 および球状黒鉛鑄鉄 FCD 45 を使用し、回転曲げ疲労試験を行い、レプリカ法による表面の連続観察に基づいてその疲労過程の特徴を検討し、両材におけるき裂発生および初期き裂伝ば過程などを明らかにした⁽¹⁾。

本報では、前報と同一材料についてねじり疲労試験を行い、特に微視的き裂に注目しながら疲労過程を連続観察し、片状黒鉛鑄鉄 FC 25 および球状黒鉛鑄鉄 FCD 45 におけるき裂の発生および初期き裂の伝ば過程などを調べるとともに、回転曲げと繰返しねじりにおける疲労過程(き裂発生寿命やき裂の伝ば挙動など)の相違について考察した。これは一般の組合せ応力下における鑄鉄の疲労挙動を推定するための一つの根拠を与えるものである。

2. 材料、試験片および実験方法

供試材は片状黒鉛鑄鉄 FC 25 と球状黒鉛鑄鉄 FCD 45 で、砂型に鑄込み、FC 25 は丸棒($\phi 16$ mm)に、FCD 45 は Y ブロック(試験片製作部素材寸法 60 × 35 × 160 mm)に、鑄造したものである。

表 1 に化学成分を、表 2 に機械的性質を示す。FC 25 は片状黒鉛を取りまくパーライトからなる組織である。FCD 45 はフェライト(面積率約 90%)とパーライトからなる組織であり、フェライト平均粒径は 35 μm 、球状黒鉛の平均粒径は 42 μm である。また、黒鉛の球状化率は約 85% である。

表 1 化学成分 (wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Mg
FC25	3.29	2.08	0.43	0.039	0.013	—
FCD45	3.71	2.57	0.29	0.041	0.008	0.048

表 2 機械的性質

Material	H _B	E	$\sigma_{0.2}$	σ_B	ψ
		MPa			%
FC25	193	9.6 × 10 ⁴	254	333	—
FCD45	146	16.1 × 10 ⁴	318	466	24

* 昭和 62 年 8 月 21 日 第 65 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 3 月 9 日。

^{*1} 正員、九州大学工学部 (〒813 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*2} 正員、九州産業大学工学部 (〒813 福岡市東区松香台 2-327)。

^{*3} 学生員、九州産業大学大学院。

^{*4} 正員、第一工業大学 (〒899-43 国分市中央 1-10-2)。

試験片は図1に示す形状に機械加工した。表面はエメリー紙、バフ研磨の順で仕上げた後、FC 25は4%ピクルルで、FCD 45は4%ナイトルで腐食したものである。

用いた試験機はねじり疲労試験機TB-10（容量98 N・m、繰返し速度約33 Hz）である。

疲労被害の観察は、応力繰返しの途中所定の繰返し数ごとに試験機を止めて試験片表面より採取したレプリカに真空中でクロムを蒸着したものについて、金属

顕微鏡で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 S-N曲線と疲労過程 図2にFC 25とFCD 45のS-N曲線を示す。図3には、停留き裂($\tau = \tau_w$)の伝ば曲線を、図4(a), (b)はそれぞれFCD 45, FC 25の破断する場合($\tau > \tau_w$)のき裂伝ば曲線を示す。また、図5, 6はき裂伝ば曲線(図3, 4)に対応させて両材の表面状態の変化を示したものである。すなわち、図5(a), (b)はそれぞれFCD 45, FC 25における停留き裂を示し〔図5(a)(i), (b)はそれぞれ図3中○, ▲印に対応する〕, 図6(a), (b)はそれぞれFCD 45およびFC 25の破断する場合を示す〔図6(a)中の矢印はき裂発生箇所を示す。また図6(a), (b)はそれぞれ図4(a)中●印, (b)中▲印に対応する〕。

以上の結果によると、S-N曲線の形状は、FC 25では下側に凸な曲線となっており、折点は明りょうではない。FCD 45では鋭い折れ曲がりを示し、折点は 3×10^6 回付近に存在する。S-N曲線の形状は前報の回転

図1 試験片の形状（繰返しねじり）

図2 S-N曲線（繰返しねじり）

図3 停留き裂伝ば曲線 ($\tau = \tau_w$)

(a) FCD 45

(b) FC 25

図4 き裂伝ば曲線 ($\tau > \tau_w$)

曲げの場合とほぼ同様な傾向を示す。

疲労限度の応力 ($\tau = \tau_w$) を繰返す場合, FCD 45 [図 3 中○, ●印, 図 5 (a)] および FC 25 [図 3 中△, ▲印, 図 5 (b)] において, それぞれ球状黒鉛および片状黒鉛から発生した微視的き裂はいくぶん伝ばした後, その伝ばを停止する。したがって, 両材のねじり疲労限度はともに黒鉛から発生した微視的き裂の伝ば限界条件で決まることになる。

疲労限度より高い応力 ($\tau > \tau_w$) を繰返す場合, FCD 45 [図 6 (a)] では, 球状黒鉛から発生した微視的き裂は, 隣接する黒鉛と連結し, 主き裂となり, その後は炭素鋼などの場合と同様, この主き裂は $\sigma_{\max}$ と垂直方向に単一き裂としての伝ば過程⁽²⁾をたどる (この場合, 主き裂前方の黒鉛から発生した微視的き裂を連結しながら, すなわち黒鉛をぬう形⁽¹⁾⁽⁵⁾で伝ば拡大する)。

一方, FC 25 [図 6 (b)] では, 微視的き裂は多くの場合 $\tau_{\max}$ によって片状黒鉛の先端から $\tau_{\max}$ 方向に発生する。その後は, $\tau_{\max}$ 方向に成長するものと $\sigma_{\max}$ 方向と垂直方向に成長するものがあるが, いずれにしろ隣接する片状黒鉛から発生した円周方向または軸方向

図 6: 表面状態の変化 (き裂伝ば経路)

の二、三のき裂と連結する（同じ方向同士の連結より円周方向と軸方向のき裂の連結が多い。この連結き裂長さは0.2~0.3mmであり、試験片表面には多数発生している）。このような連結をしたき裂同士がさらに連結し、主き裂となって、主き裂前方の片状黒鉛から発生した微視的き裂や連結き裂と連結しながら、ミクロには階段状に伝ば拡大し、最終破断に至る。マクロには軸線に45°に破断する。したがって、FC 25のねじり疲労では $\sigma_{\max}$ によるき裂の伝ばを $\tau_{\max}$ 方向の伝ばがかなり促進することになるとと思われる。このことは図2におけるFC 25のS-N曲線が下側に凸となる現象と密接に関係している。

象と密接に関係している。

3.2 回転曲げとねじりにおけるS-N曲線の比較

図7(a), (b)はそれぞれFCD 45, FC 25の回転曲げとねじりのS-N曲線をそのままのスケールで比較したものである($\sigma_{\max}$ 一定で比較したことになる)。FC 25〔図7(b)〕の場合、ねじりと回転曲げとでき裂の発生はほぼ一致するが、破断寿命は回転曲げのほうが10倍程度大きくなる。これは前に述べたように、FC 25のねじり疲労では、 $\sigma_{\max}$ によるき裂の伝ばを $\tau_{\max}$ 方向の伝ばがかなり促進するためであろう〔図6(b)〕。しかしFCD 45〔図7(a)〕の場合は、両負荷形式のもとにおけるき裂発生も一致しない。そこで、FCD 45を円孔を有する欠陥材とみなして、欠縁の応力集中（ねじりでは $\sim 4\tau_a$ 、回転曲げでは $\sim 3\sigma_a$ ）⁽³⁾を考慮して、ねじりと回転曲げのS-N曲線を $K_t \cdot \sigma_a (= 3\sigma_a)$, $K_t \cdot \tau_a (= 4\tau_a)$ とNの関係で整理比較したものを図8に示す。これによると両負荷形式のもとにおけるき裂発生はほぼ一致するが、破断寿命は回転曲げのほうがいくぶん短くなる。

FC 25とFCD 45におけるねじり疲労限度 τ_w と回転曲げ疲労限度 σ_w の比 τ_w/σ_w はそれぞれ ~ 0.8 と ~ 0.9 である。通常の鋼の平滑材では、一般に $\tau_w/\sigma_w \sim 0.6$ である⁽⁶⁾⁽⁷⁾ので、両材とも黒鉛を欠陥として考えれば、その影響が τ_w より σ_w に顕著に現れていることがわかる。またFCD 45の $\tau_w/\sigma_w \sim 0.9$ という値は、著者の一人が先に行ったノジュラー鑄鉄（FCD 60相

図7 回転曲げとねじりにおけるS-N曲線の比較 (FCD 45およびFC 25)

図8 $K_t \cdot \sigma_a (= 3\sigma_a)$, $K_t \cdot \tau_a (= 4\tau_a)$ -N関係 (FCD 45)

当)の値⁽⁴⁾と一致する。

4. 結 言

片状黒鉛鑄鉄(FC 25)および球状黒鉛鑄鉄(FCD 45)の平滑試験片についてねじり疲労過程を連続観察し、回転曲げ疲労の結果と比較したところ、次の結論が得られた。

(1) ねじり疲労において、FCD 45のS-N曲線は明りょうな折点を示すが、FC 25のS-N曲線は下側に凸な曲線となり、折点は明りょうではない。しかし、疲労限度の応力を 10^7 回繰返したとき、FC 25では片状黒鉛から、FCD 45では球状黒鉛から発生した微視的停留き裂が認められた。したがって、両材のねじり疲労限度はともに黒鉛から発生した微視的停留き裂の伝ば限界条件で決まることになる。

(2) 通常の鋼の平滑材では、一般に $\tau_w/\sigma_w \sim 0.6$ であるが、FC 25およびFCD 45ではそれぞれ ~ 0.8 および ~ 0.9 である。この場合、黒鉛を欠陥として考えれば、その影響が τ_w より σ_w に顕著に現れていること

がわかる。

(3) FC 25のねじりの τ_a -N曲線と回転曲げの σ_a -N曲線において、 $\tau_a = \sigma_a$ のもとでは、両者のき裂発生寿命はほぼ一致するが、破断寿命は大きく異なり回転曲げのほうが大きくなる。

一方、FCD 45の場合、両負荷形式の応力集中を考慮して、 $K_t \cdot \sigma_a (=3\sigma_a)$ -Nと $K_t \cdot \tau_a (=4\tau_a)$ -N曲線を比較すれば、き裂発生は両者でほぼ一致するが、破断寿命は回転曲げのほうがいくぶん短くなる。

終わりに、実験に協力された当時九産大卒研生の大島浩君、古賀浩司君、桜井康裕君に深く感謝する。

文 献

- (1) 西谷・田中, 機論, 51-465, A (昭60), 1442.
- (2) 加藤・中野, 機論, 51-464, A (昭60), 1208.
- (3) 西谷・河野, 機論, 37-300 (昭46), 1492.
- (4) 西谷・村上, 機械の研究, 25-4 (昭48), 543.
- (5) 小川・ほか4名, 機論, 51-467, A (昭60), 1660.
- (6) 西谷・村上, 機論, 35-275 (昭44), 1389.
- (7) 西谷・田中, 機論, 48-431, A (昭57), 873.