パーライト基地鑄鉄の低サイクル疲労寿命評価*

式 田 昌 弘^{*1}, 坂 根 政 男^{*2}

Low Cycle Fatigue Life Estimation of Pearlite Base Cast Irons

Masahiro SHIKIDA and Masao SAKANE

In this study the author carried out low cycle fatigue tests at room temperature in use of the flake graphite cast iron (FC-P) and the spheroidal graphite cast iron (FCD-P) of pearlite matrix structure, and then proceeded to estimate the fatigue life of the said two kinds of cast irons. Fatigue life prediction was made for each one of the testing materials in different graphite shapes by the Manson's universal slope method. As a result, the estimated life of FC-P was nearly as long as the life obtained from the experiment, but that of FCD-P was about 20% shorter than the one obtained from the experiment. Hence, the author introduced the modified universal slope method based on the plastic strain component under the Manson-Coffin rule obtained from the experiment, and applied it to the both testing materials. In this way, it became possible for the low cycle fatigue life of the two kinds of cast irons to be guided collectively by one formula.

Key Words: Low Cycle Fatigue, Life Prediction, Tensile Properties, Universal Slope Method, Cast Iron, Different Graphite Shapes

1. 緒 言

鑄鉄は複雑な形状の部品を容易に作ることができるため、多くの機械構造部品に使用されており、特にパーライト基地鑄鉄は一般の炭素鋼に劣らない強度を有することから強度部材としても広く利用されている。

鑄鉄はその基地組織内に黒鉛を析出させており、代表的な黒鉛形状としては片状および球状があり、それぞれ片状黒鉛鑄鉄および球状黒鉛鑄鉄と呼ばれている。黒鉛形状に起因して、前者は強度的に劣るが、熱伝導性、振動減衰能などの物理的性質に優れていることから内燃機関のシリンダブロック、ピストン、自動車のブレーキディスクなどに使用されている。また、後者は比較的高い強度を有するので内燃機関のクランクシャフトなどに使用されており、特にパーライト基地の球状黒鉛鑄鉄は高強度、高硬度の材料として重要である。

鑄鉄の疲労強度研究が行われたのは球状黒鉛鑄鉄の機械部品に使用される頻度が高くなった1960年

代に入ってからであるが、本格的に行われるようになったのは1980年代に入ってからであり、その研究の歴史は浅い。また、鑄鉄の疲労強度研究の大部分は高サイクル疲労条件下で行われたものであり、この分野では疲労限度および疲労き裂進展挙動に関する研究データの集積も多い。これに対し、鑄鉄の低サイクル疲労の研究は少なく⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾、この分野の研究は重要である。

本研究は実用的なパーライト基地鑄鉄を対象としており、同基地組織から成る片状黒鉛鑄鉄(以下、FC-Pと記す)と球状黒鉛鑄鉄(以下、FCD-Pと記す)を用いて室温下での低サイクル疲労試験を実施し、Mansonのユニバーサル・スロープ法を適用して、それら2種類の鑄鉄の疲労寿命評価を行った。

2. 実 験 方 法

実験に用いた鑄鉄材料は基地がいずれもパーライト組織のFC-PとFCD-Pの2種類であり、溶湯にCuを添加することによってパーライト組織を得た。また、黒鉛の球状化剤には市販のFe-Si-Mg系合金を使用した。素材はJISノックオフKb形に準拠した金型を用いて全長300mm、直径35mmの丸棒に鑄込んだ後、図1に示すように試験部の直径10mm、平行部

* 1997年3月22日 関西支部第72期定時総会講演会において講演、原稿受付 1998年1月5日。

*¹ 正員、大阪産業大学工学部(☎574-8530 大東市中垣内3-1-1)。

*² 正員、立命館大学理工学部(☎525-8577 草津市野路町1916)。

Table 1 Chemical composition of the material tested

Material	Chemical composition, wt. %							
	C	S	Mn	P	S	Cu	Mg	Sn
FC-P	3.15	2.46	0.80	0.025	0.008	0.54	0.002	0.048
FCD-P	3.63	2.81	0.75	0.031	0.008	0.48	0.046	0.041

Table 2 Mechanical properties of the material tested

Material	Proof stress $\sigma_{0.2}$ MPa	Tensile strength σ_B MPa	Elongation δ %	Area reduction ψ %	Elastic modulus E GPa	Hardness H _V
FC-P	272.2	325.5	0.989	0.179	112	253
FCD-P	529.6	867.8	3.95	0.968	167	356

Fig. 1 Specimen geometry (unit: mm)

の長さ 30 mm のフランジ形丸棒試験片に機械加工した。供試材料の化学成分を表 1 に、静的引張試験による機械的性質を表 2 に示す。引張試験は図 1 と同一寸法の試験片を用いて両材料に対して 4 回実施し、各数値はそれらの平均値として求めた。その際、材料の延性を表す絞り ψ の値は測定精度 1/1 000 mm のデジタル式顕微鏡を用いて破断部の直径を測ることによって求めた。

使用試験機は容量 98 kN のマイクロコンピュータ制御の電気油圧サーボ式疲労試験機である。低サイクル疲労試験は室温下、全ひずみ制御のもとで引張・圧縮の完全両振三角波(ひずみ比 $R_\epsilon = -1$)を加えて実施し、ひずみ速度は 0.1%毎秒とした。試験片のひずみ計測には標点距離 12.5 mm の差動トランス式伸び計を使用した。本研究では、低サイクル疲労試験における疲労破損繰返し数は試験片が分離破断もしくは疲労試験中の最大引張荷重の 3/4 まで低下したときの繰返し数とした。

3. 実験結果および考察

3・1 低サイクル疲労寿命と繰返し構成関係 図 2 は 2 種類の鉄材料の全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ と疲労破損繰返し数 N_f との関係を示す。図 2 からわかるように疲労破損寿命(以下、疲労寿命と呼ぶ)に対する黒鉛形

Fig. 2 Fatigue life diagram

状の影響は明りょうに現れており、FCD-P は FC-P よりもかなり長寿命となっている。

鉄では基地組織が同一であっても黒鉛形状の違いによって破面形態は大きく異なる。これまでの研究報告⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾によれば、代表的な疲労破面としてのストライエーションはフェライト基地鉄では多く観察されているが、パーライト基地鉄においては未確認であり、FCD-P では例えば、パーライト組織に対応した層状模様が一般的である。図 3 は FC-P と FCD-P に対する疲労破面の一例を示し、いずれも試験片表面から約 1.0 mm 中心部へ入ったところの写真である。FC-P では黒鉛形状に起因する花びら状模様が特徴的に観察され、破面の大部分が黒鉛割れ、または黒鉛と基地のはく離であり、き裂は黒鉛を縫って進むと考えられる。これに対し、FCD-P では破面中に黒鉛の占める割合は小さくなり、き裂は基地内を進む傾向が強く現れ、このことが FCD-P の長寿命につながると考えられる。

Macro crack growth direction

(a) FC-P ($\Delta\epsilon=0.5\%$) (b) FCD-P ($\Delta\epsilon=0.5\%$)

Fig. 3 Fracture surface observation with SEM

(a) Initial stage

(b) Half life

Fig. 4 Hysteresis loop

2種類の鉄材料の疲労寿命の大きさを比較考察するうえで両材料の繰返し構成関係を知る必要がある。図4は両材料の代表的なヒステリシスループとして $\Delta\epsilon=1.0\%$ の場合のものを示し、(a)は初期状態($N=5$)、(b)は中間寿命($N=1/2N_f$)におけるループである。図4のようにFCD-Pでは初期状態と中間寿命の間でほとんど変化がなく、また一般の鋼や合金にみられるようにループは原点に関して対称な形状をしている。これに対し、FC-Pでは中間寿命になると初期状態に比べて引張側の応力低下が起こるためループの対称性はみられない。図5はコンパニオン・スペシメン法によって求めた各全ひずみ範囲の実験における中間寿命での応力振幅とひずみ振幅との関係を示したものである。図5においても、FCD-Pでは曲線は引張側と圧縮側で原点に関してほぼ対称な形状をしているが、FC-Pでは引張側の応力振幅は圧縮側のそれに比べて小さく、曲線の対称性もみられない。FC-Pにおけるこのような引張応力の低下は一般に鋼や合金の疲労破壊直前にみられることから、FC-Pでは疲労寿命の約半分の繰返し数ですでに内部き裂が発生していると推察される。したがって、FC-Pの疲労寿命がFCD-Pに比べて小さいのはその黒鉛形状に起因しており、繰返し数の比較的少ない時期からの黒鉛と基地のはく離および局部的応力集中をうける黒鉛先端からのき裂の発生によると考えられる。

図6は図2の縦軸を弾性ひずみ成分 $\Delta\epsilon_e$ と塑性ひずみ成分 $\Delta\epsilon_p$ に分けて示したもので、一点鎖線は $\Delta\epsilon_e$ 、実線は $\Delta\epsilon_p$ を表す。実線と一点鎖線が交さるA, B二つの点はFC-P, FCD-Pについて弾性ひずみ

Fig. 5 Constitutive relation between stress and strain amplitude

成分と塑性ひずみ成分の大きさが等しくなる遷移疲労寿命を与える。図6における $\Delta\epsilon_p$ と N_f の関係は図中にも示すようにManson-Coffin則⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾として次式によって表される。

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C \quad \dots\dots\dots (1)$$

Coffinは熱疲労試験結果から、式(1)において $\alpha=0.5$ とする式は低サイクル疲労試験にも適用できるとした。また、静的引張試験を $N_f=1/4$ とするとともに、そのときの破断ひずみ ϵ_f を $\Delta\epsilon_p$ に用いて

$$\Delta\epsilon_p = \epsilon_f = \ln A_0 / A = \ln \frac{100}{100 - \psi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

とすれば、低サイクル疲労試験結果と静的引張試験結果は両対数グラフ上で1本の直線にのるとした。ここで、 A_0 は引張試験前の断面積、 A は破断時の断面積、 ψ は絞りである。したがって、Coffinによれば式(1)は

Fig. 6 Fatigue life diagram by elastic and plastic strain

Fig. 7 Relation between $\Delta\epsilon_p/\delta$ and N_f

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^{0.5} = \frac{1}{2} \epsilon_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる⁽¹¹⁾。式(2)は後で述べる材料の延性を表す式であるから、式(3)より疲労寿命 N_f は材料の延性に依存することがわかる。したがって、図6の図中に示すように、延性の小さいFC-Pでは疲労寿命の遷移点Aは図の左端にあって全寿命域で弾性ひずみ成分のほうが大きくなり、FCD-Pは延性が比較的大きいため遷移点Bは右寄りにきて、ひずみ範囲の大きい場合は塑性ひずみ成分のほうが大きくなるが、それ以外のひずみ範囲では弾性ひずみ成分のほうが大きくなると考えられる。それゆえ、強度の異なる2種類のパーライト基地鋳鉄の低サイクル疲労においては一般の延性材料に比べて塑性ひずみ成分よりも弾性ひずみ成分のほうが支配的であるといえる。Manson-Coffin則における定数 α 、 C の値は図6の図中に示すようにFCD-Pのほうが大きい、FCD-Pの値については原田⁽³⁾が求めた値とほぼ一致する。

次に2種類の鋳鉄の低サイクル疲労寿命を統一的に整理する方法について、ひずみおよび応力の両面より考察する。まず、ひずみについては2種類の鋳鉄の破断伸び δ が異なることから、両材料について塑性ひずみ $\Delta\epsilon_p$ を δ で除したもので疲労寿命を整理してみた。図7にその整理結果を示す。図7からわかるように、疲労寿命は係数2の範囲で整理することができる。このことは、どちらか一方の鋳鉄の疲労寿命が実験的に求めれば、他方の鋳鉄のそれが図7の関係から推定できることを示している。

また応力基準での疲労寿命の整理結果を次に示す。図8は疲労寿命を引張側の応力振幅 σ で整理したも

Fig. 8 Fatigue life diagram by tensile stress amplitude

のである。ここで、 σ は各全ひずみ範囲の実験における中間寿命 $N_f/2$ での応力振幅である。図 8 のように、疲労寿命は材料別に 2 本の直線で示され、FC-P は FCD-P よりも強度はかなり低い。いま、縦軸の引張応力振幅をその材料の引張強さで除して無次元化して表すと図 9 のようになる。図 9 において若干のデータのバラツキはあるものの、この場合も 2 種類の鉄のデータはほぼ 1 本の直線で整理することができる。しかし、図 9 の整理では直線のこう配が小さく、わずかな応力差が疲労寿命の推定結果に影響を与える。したがって、図 9 の応力基準の推定よりも図 7 のひずみ基準のほうがより高精度の推定結果を与えるものと考えられる。

3.2 ユニバーサル・スロープ法による疲労寿命評価

Manson は延性の異なる約 30 種類の材料の静

Fig. 9 Relation between σ/σ_B and N_f

Fig. 10 Corresponding relation between calculating result by universal slope method and experimental one (FC-P)

的材料特性と低サイクル疲労破損繰返し数との関係を考察し、静的特性から疲労破損寿命を推定する方法として、次式で示されるユニバーサル・スロープ法(共通こう配法)^{(12)~(14)}を提案している。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon &= 3.5 \frac{\sigma_B}{E} N_f^{-0.12} + D^{0.6} N_f^{-0.6} \\ D &= \ln \left(\frac{100}{100 - \psi} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 D は材料の延性を表し、 ψ は絞りである。

図 10, 11 は 2 種類の鉄について式(4)による計算結果と図 2 および図 6 に示した実験結果を材料別に表示したものである。FC-P においては全ひずみ、弾性ひずみ、塑性ひずみのいずれについても計算結果と実験結果はほぼ一致する。これに対し、FCD-P においては全ひずみ基準では式(4)は安全側を予測する。そこで、実験結果に一致するように予測値を上げると、図 11 において太い線で示すように予測値の 120% の寿命で実験結果に近い値となる。FCD-P において、式(4)が 20% 安全側を予測することは FCD-P の疲労寿命推定については若干の余裕を与えることになり、実用上有効である。しかし、式(4)をより精度の高いものにするため、以下のような修正を行った。

FCD-P においては弾性ひずみ成分と疲労寿命との関係では、予測結果と実験結果はよく一致していることから、式(4)の右辺第 1 項は妥当な寿命推定を行っていることがわかる。しかし、塑性ひずみ成分と疲労寿命との関係では予測結果は実験結果よりもかなり安全側となる。したがって、FCD-P において全ひずみを基準としたユニバーサル・スロープ法による寿命推定

Fig. 11 Corresponding relation between calculating result by universal slope method and experimental one (FCD-P)

が短寿命側を予測するのは塑性ひずみ成分に原因があると考えられる。

そこで、FCD-P において塑性ひずみ成分による推定精度を改善するため、前述した図 7 の関係を式 (4) の右辺第 2 項の代わりに用いた。すなわち、図 7 の $\Delta\epsilon_p/\delta-N_f$ の関係が 2 種類の鉄に対して近似的に共通な 1 本の直線で表せることから、この直線の式より両材料に共通な式

$$\Delta\epsilon_p = 2 \cdot 3 \delta N_f^{-0.54} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。これを式 (4) の塑性ひずみ成分である右辺第 2 項へ代入すれば、次のような修正式を得る。

$$\Delta\epsilon = 3 \cdot 5 \frac{\sigma_B}{E} N_f^{-0.12} + 2 \cdot 3 \delta N_f^{-0.54} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図 12 は両材料に対する式 (6) による寿命計算曲線と図 10, 11 に示した全ひずみ範囲による実験点との比較を示したものである。式 (6) は黒鉛形状の異なる 2 種類のパーライト基地鉄の疲労寿命を同時に精度よく推定していることから、この種の鉄の室温における低サイクル疲労寿命評価には式 (6) を用いることがより有効であると考えられる。

4. 結 言

黒鉛形状が片状、球状である 2 種類のパーライト基地鉄 FC-P, FCD-P を用いて引張・圧縮の全ひずみ範囲制御による室温下での低サイクル疲労試験を実施した。得られた結果は次のようである。

(1) 疲労破損寿命に対する黒鉛形状の影響は明らかに現れ、FCD-P は FC-P よりもかなり長寿命となった。

(2) 強度の異なる 2 種類のパーライト基地鉄の低サイクル疲労においては全寿命域にわたって塑性ひずみ成分よりも弾性ひずみ成分のほうが支配的であった。

(3) 両供試材料に対してユニバーサル・スロープ法を適用し、それぞれの疲労寿命推定を行ったところ、FC-P では推定寿命は実験から得た寿命にほぼ一致したが、FCD-P では推定寿命は実験から得た寿命よりも 20% 安全側を示した。

Fig. 12 Calculating values of total strain range by modified universal slope method

(4) FCD-P において推定寿命が安全側を予測するのは、ユニバーサル・スロープ法による塑性ひずみ成分が短寿命側にかなりずれるためである。

(5) Manson-Coffin 則における塑性ひずみ成分を鉄の破断伸びで基準化したものをユニバーサル・スロープ法の塑性ひずみ成分に適用した式 (6) を用いれば、2 種類のパーライト基地鉄の低サイクル疲労寿命は統一的に整理できることがわかった。

文 献

- (1) 原田昭治・ほか 3 名, 機論, 55-511, A (1989), 392-398.
- (2) 炭本治喜・ほか 2 名, 鋳物, 61-1 (1989), 20-24.
- (3) 原田昭治・ほか 3 名, 材料, 39-443 (1990), 1133-1138.
- (4) 式田昌弘・ほか 3 名, 機論, 57-536, A (1991), 700-707.
- (5) 原田昭治・ほか 3 名, 機論, 58-552, A (1992), 1306-1312.
- (6) Shikida, M., ほか 2 名, JSME Int. J., A, 38-1 (1995), 104-110.
- (7) 増尾義信・ほか 4 名, 材料, 34-380 (1985), 568-573.
- (8) 式田昌弘・ほか 2 名, 材料, 36-404 (1987), 455-461.
- (9) Coffin, L. F., Trans. ASME, 76-6 (1954), 931-950.
- (10) Manson, S. S., NACA Tech. Note, 2933 (1953).
- (11) 中沢一・本間寛臣, 金属の疲労強度, (1982), 141, 養賢堂.
- (12) Manson, S. S., Expl. Mech., 5-7 (1965), 193-226.
- (13) Manson, S. S., Int. J. Fract. Mech., 2-1 (1966), 327-363.
- (14) Berling, J. T. and Slot, T., ASTM STP, 459 (1969), 3-30.