鑄鉄回転円板の低サイクル疲労き裂伝ば挙動*

式田 昌弘^{*1}, 坂根 政男^{*2}, 大南 正瑛^{*2}

Fatigue Crack Propagation for Cast Iron Rotating Disk

Masahiro SHIKIDA, Masao SAKANE and Masateru OHNAMI

This paper studies the crack propagation rate for three kinds of cast iron rotating disks. Fatigue crack propagation tests were carried out for flake, compacted vermicular and spheroidal graphite cast iron disks under repeated spin loading. The crack propagation rate of the flake graphite disk was the largest while that of the spheroidal graphite disk was the smallest. The crack propagation rate of the compacted vermicular graphite disk had the intermediate crack propagation rate between the two cast iron disks. The stress intensity factor range could not correlate the crack propagation rate for the three kinds of disks, while the J -integral range, which was calculated in finite element analyses, could correlate the crack propagation rate within a factor of five scatter band. The stress intensity factor range modified by the tensile strength of the material was also effective for correlating the crack propagation rate for three kinds of cast iron.

Key Words: Low Cycle Fatigue, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, J -Integral, FEM Analysis, Cast Iron, Rotating Disk

1. 緒 言

鑄鉄が回転体に用いられる例としては自動車のフライホイールがある。走行中の自動車は常に発進・停止を繰り返しているため、フライホイールには遠心力の繰り返し負荷による疲労破壊の危険性が伴う。回転体の疲労寿命評価法を開発する研究は、回転体の安全性や信頼性向上の点から重要な研究課題である。

筆者らは前報⁽¹⁾において、鑄鉄回転円板の低サイクル疲労寿命を推定する方法として、実験に多大の労力を必要とする回転疲労試験を行わずに単軸の疲労試験結果から推定する手法を提案した。しかし、前報では破損寿命についてのみ考察し、き裂伝ば挙動については言及しなかった。

本稿では、3種類の鑄鉄回転円板の低サイクル疲労き裂伝ば挙動について考察した結果を述べる。すなわち、黒鉛形状が片状、バーミキュラ、球状（以下、FC、CV、FCDと記す）の3種類のフェライト地鑄鉄の切欠き付円板を用いて、低サイクル回転疲労き裂伝ば試験

を実施した。あわせて、これらの材料のCCT試験片を用いて片振引張負荷の下での疲労き裂伝ば試験を行い、単軸応力下でのき裂伝ば速度と回転円板のき裂伝ば速度を比較考察した。比較基準となる破壊力学パラメータは応力拡大係数範囲と J 積分範囲を用いた。さらに、回転円板については一方向回転破壊強度も求め、簡単な考察を行った。

なお、応力拡大係数と J 積分の二つの破壊力学パラメータを用いた理由は、前者は回転円板では比較的簡易に求められる破壊力学パラメータであることによる。しかし、応力拡大係数はき裂先端に大きな非線形変形が生じた場合には必ずしも適用できないことがあり、き裂先端での非線形変形をも考慮することのできる J 積分も用いてき裂伝ば速度の考察を行う必要があると考えたからである。

2. 解析および実験方法

本研究に用いた供試材はいずれも少量のパーライト（面積率7～9%）を含んだフェライト組織のFC、CV、FCD鑄鉄であり、各材料の化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。FC、CV、FCDの黒鉛球状化率はそれぞれ5.6, 37.8, 83.5%であったが、黒鉛面積率は12.2, 13.9, 12.4%と大きな差はなかった。素材はφ210

* 平成2年11月28日 第68期材料力学講演会において講演、原稿受付 平成4年5月18日。

^{*1} 正員、大阪産業大学工学部（〒574 大東市中垣内3-1-1）。

^{*2} 正員、立命館大学理工学部（〒603 京都市北区等持院北町56-1）。

×35 mm の厚板円板に鋳込んだ後、焼なまし (850°C×3 h, 炉冷) することによって基地のフェライト化を図った。円板試験片の形状寸法を図 1 に示す。試験片は外径 200 mm, 内径 20 mm, 厚さ 3 mm の等厚中空円板であり, 中心孔の対称な 2 箇所に長さ 2 mm の V 形切欠きを有している。

円板の回転試験には空気タービン駆動のスピントスタ⁽²⁾を使用し, 上下限回転数の設定には制御回路付デジタル回転計を用いた。円板の低サイクル疲労試験の場合, 上限回転数は FC, CV, FCD についてそれぞれ 15 000, 23 000, 26 000 rpm とし, 下限回転数は前報⁽¹⁾と同様にすべての試験で 5 000 rpm とした。回転数の上昇速度および降下速度は一定 (1 200 rpm/s) となるように設定した。き裂の観察は適当な繰返し数ごとにスピントスタを停止させ, 円板の切欠き底からのき裂長さを 1/1 000 mm の分解能で工場顕微鏡を用いて計測した。

回転円板の J 積分はき裂長さが 5~40 mm のモデ

ルについて有限要素法によって求めた。解析に用いた要素分割図の一例を図 2 に示す。同図はき裂長さが 30 mm の例であり, 矢印がき裂先端の位置を示している。き裂長さが 10, 15, 20, 30, 40 mm のモデルについては, 図 2 に示した要素分割図を使用した。5 mm のものについては, き裂先端をさらに細分割したものをを用いた。要素には 8 接点アイソパラメトリック要素を用い, 図 2 のモデルでは要素数 144, 節点数 485 である。

有限要素法解析は, 3 種類の鋳鉄円板にそれぞれの上下限回転数を負荷し, 3 サイクルまで繰返し解析を行った。 J 積分の計算は物体力を考慮した次式の Lorenzi⁽³⁾⁽⁴⁾の方法によった。

$$J = \int_C \left(t_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - W n_j \right) ds - \int_V f_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dv \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, t_i, u_i, n_j, W, f_i はそれぞれ表面力, 変位, 積分経路の法線ベクトル, ひずみエネルギー密度および物体力を表す。右辺第 1 項は経路 C に沿う線積分を表し, 第 2 項は領域 V に関する体積積分を表す。積分経路は図 2 に示した太線の部分をとった。この経路は, あらかじめ数種類の積分経路をとり, J 積分の積分経路独立性を確認した上で決定した。なお, 解析にははん用構造解析プログラム MARC を用いた。

3. 有限要素法解析結果

図 3 に有限要素法解析に用いた構成関係を示す。3 種類の材料とともに, 静引張試験より得られた実線で示す構成関係を, 図中の点線で示すように多直線近似したものを解析に用いた。

図 4 に繰返しに伴う J 積分値の変化を各き裂長さについて示し, 縦軸の値が小さいものから順にき裂長

表 1 供試材の化学成分

Material	Chemical composition wt %					
	C	Si	Mn	P	S	Mg
FC	3.24	2.31	0.314	0.025	0.008	—
CV	3.80	2.55	0.445	0.023	0.010	0.016
FCD	3.57	2.68	0.358	0.022	0.012	0.042

表 2 供試材の機械的性質

Material	Elastic modulus E GPa	Proof stress $\sigma_{0.2}$ MPa	Tensile strength σ_b MPa	Elongation δ %	Hardness Hv
FC	90	122	145	1.2	115
CV	142	254	334	8.1	128
FCD	163	293	436	27.8	183

図 1 円板試験片の形状・寸法 (mm)

図 2 回転円板の要素分割の一例 (き裂長さ 30 mm)

さが 5, 10, 15, 20, 30, 40 mm の解析結果を示す。同図の横軸は荷重開始からの時間 (sec) を表し、き裂伝ば試験 1 サイクルの所用時間は FC, CV, FCD でそれぞれ 16.7, 30, 35 sec であった。

FC, CV では 1 サイクル目の J 積分の最大値がやや小さいものの、3 種類の材料ともに 2 および 3 サイクルめの最大値にはほとんど差がないことがわかる。また、3 種類の鋳鉄ともにき裂長さが短い場合は下限回転数のところで J 積分値がゼロとなっているが、き裂長さが長くなると下限回転数のところでもある程度の J 積分値を有していることがわかる。

除荷過程においては J 積分の積分経路独立性が保証されていないので、ここでは、3 サイクルめの荷重過程での J 積分の最小値と最大値の差を J 積分範囲 ΔJ として定義した。このようにして求めた J 積分範囲とき裂長さとの関係を図 5 に示す。 J 積分範囲は FC が最も小さく、次いで、CV, FCD の順に大きくなっている。なお、本解析では J 積分の計算はき裂長さの異なる六つの解析モデルについて行ったが、解析モデル以外のき裂長さを有する円板の J 積分範囲は図 5 から内挿して求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 一方向回転破壊試験 回転円板の疲労き裂伝ば試験における上限回転数を設定するにあたっては、供試円板の一方向回転破壊強度を知る必要がある。表 3 は 3 種類の切欠き付鋳鉄円板について回転数を単調に上昇させて破壊する一方向回転破壊試験結果をまとめたものである。破壊回転数 n_b は各材料とも 4 回の実験の平均値であり、FC, CV, FCD の順に回転破壊強度が高く、また、これらの n_b 値は別の実験で

図 3 有限要素法解析に用いた構成関係

求めた切欠きのない平滑円板の 92~96% にあたる。

円板の破片数は FC では 4 個、FCD では 2 個、CV では 2 個または 4 個となった。これは、FC の場合には 2 箇所の切欠きに沿って発生したき裂が外周に達した

(a) FC

(b) CV

(c) FCD

図 4 FC, CV, FCD 回転円板の J 積分値の繰返しに伴う変化

最初の破壊の直後に、遠心力による曲げ破壊⁽¹⁾が起こったのに対し、FCDでは高強度ゆえに曲げ破壊が起こらなかったと考えられる。

回転円板の実用上簡便な破壊条件として、歴史的には平均応力説があり、それを修正したものとして回転円輪の破壊強さを基準にした修正平均応力説⁽⁵⁾がある。表3には3種類の鋳鉄円板の破壊回転数における平均接線応力 $\bar{\sigma}_\theta$ を材料の引張強さ σ_b または回転円輪の破壊強さ σ'_b で除した値を示す。ここで、 $\bar{\sigma}_\theta$ は図1に示した試験片で内径を切欠き先端にまで広げた平滑円板に対するもの⁽²⁾⁽⁶⁾である。また、 σ'_b は材料の静的引張試験による応力-ひずみ線図から求めたもの⁽⁶⁾であり、FC, CV, FCDの値はそれぞれ、137, 308, 392 MPaとした。表3より $\bar{\sigma}_\theta/\sigma_b$ の値は0.81~0.86となっており、平均応力説はFCでは19% 危険側の破壊強度を推定することになる。しかし、 $\bar{\sigma}_\theta/\sigma'_b$ の値は0.86~0.93と高くなっており、FCにおける14%の推定誤差はやや大きいものの、CV, FCDでは回転破壊強度は修正平均応力説によって9%以内の誤差で推定され、これらの数値は実用的にも十分な精度であると考えられる。したがって、切欠き付鋳鉄回転円板の破壊強度は平均応力説よりも修正平均応力説によって推定するほうが望ましく、とくに、CV, FCDに対しては修

正平均応力説がより高い精度の推定結果を与え、実用上有効であると考えられる。

4.2 疲労き裂伝ば試験 黒鉛形状が異なる3種類の鋳鉄回転円板の疲労き裂伝ば試験は、一方向回転破壊試験から得た破壊回転数 n_b (表3)の約75%の値を上限回転数に選んで実施した。3種類の鋳鉄円板の上限回転数 n_1 とその時の平均接線応力 $\bar{\sigma}_\theta$ を表4に示す。また、実験より得た疲労き裂長さ a と繰返し数の関係を図6に示す。同図からわかるように、3種類の鋳鉄円板のいずれの場合も、左側に伝ばした疲労き裂Aと右側に伝ばした疲労き裂Bは破壊に至るまでほぼ同様な伝ば挙動を示した。円板の破壊直前の観察時の最大き裂長さ a_{max} と破壊繰返し数 N_f の値を表4に示す。 a_{max} は33.1 mmから38.5 mmの値となり、材料間で大きな差はなかった。これは一方向回転試験から求めた円板の破壊回転数の75%を上限回転数に設定したことによると考えられる。

また、低サイクル疲労試験の場合、円板の破片数はいずれの材料も2個となった。FCでも破片数が2個となったのは、上限回転数が15 000 rpmと低いために、疲労き裂が外周に達した直後の遠心力による曲げ破壊が起こらなかったことによると考えられる。

鋳鉄では、疲労き裂の伝ば経路は黒鉛の存在に強く影響される。図7にFCD円板の疲労き裂伝ば経路の

表3 一方向回転破壊試験結果

Material	Burst speed $n_b \times 10^3$ rpm	Average stress $\bar{\sigma}_\theta$ MPa	$\frac{\bar{\sigma}_\theta}{\sigma_b}$	$\frac{\bar{\sigma}_\theta}{\sigma'_b}$	Fragments
FC	19.8	117.1	0.81	0.86	4
CV	31.0	287.1	0.86	0.93	2, 4
FCD	34.6	357.7	0.82	0.91	2

表4 疲労き裂伝ば試験における試験条件および最大き裂長さ a_{max} と破壊繰返し数

Material	Upper speed $n_1 \times 10^3$ rpm	Average stress $\bar{\sigma}_\theta$ MPa	Max. crack length $a_{max} \times 10^{-3}$ m		Cycles to fracture Nf
			Crack A	Crack B	
FC	15.0	67.2	36.0	33.9	3193
CV	23.0	158.1	33.6	33.1	2880
FCD	26.0	202.0	37.6	38.5	3405

図5 J積分範囲のき裂長さに伴う変化

図6 3種類の鋳鉄回転円板の疲労き裂伝ば曲線

一例を示す。き裂は円板表面に点在する球状黒鉛を縫うような形で半径方向に伝ばしている。また、鋳鉄では疲労き裂伝ば過程において、き裂の枝分かれとその後の合流および黒鉛を起点に発生した微小き裂と疲労主き裂との合体が起こるのも一つの特徴である。これらの現象は、FCD 円板ではき裂伝ば過程の後期にお

図 7 FCD 円板における疲労き裂伝ば経路の一例 ($N/N_f=0.75$)

(a) FC 円板 ($N/N_f=0.47$)

(b) CV 円板 ($N/N_f=0.63$)

図 8 疲労き裂伝ば経路の枝分かれと合流

いて認められたが、FC 円板では繰返し数の比較的小さい時期から起こり、CV 円板ではき裂伝ば過程の中期から起こることが確認された。

図 8 に FC 円板と CV 円板の疲労き裂の枝分かれと合流の一例を示す。図 8 (a) から FC 円板において枝分かれたき裂 A, B が片状黒鉛を縫って進んだ後、合流してき裂 C となり、矢印の方向へジグザグに伝ばしていく様子がわかる。また、図 8 (b) は CV 円板の場合であり、同図の左上にある一つのき裂が A, B に枝分かれし、き裂 A はパーミキュラ黒鉛を縫って矢印の方向に伝ばするが、A のき裂は、その後、C, D に分岐している。さらに、これらのき裂は図の範囲外で合流していた。このように、鋳鉄ではき裂の分岐や合流が生じるのが大きな特徴である。

4.3 疲労き裂伝ば速度の ΔK および ΔJ による整理 図 9 は 3 種類の鋳鉄回転円板の疲労き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係を示す。本研究では da/dN は図 6 に示したき裂伝ば曲線から接線法によって求め、円板の応力拡大係数 K の計算には、村上・西谷ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾ によって得られた次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} K &= \sigma_0 \sqrt{\pi(r_1 + a)} \cdot F_1 \\ \sigma_0 &= \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{3 + \nu}{8} (r_2 \omega)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ_0 は中実円板の中心における接線応力、 a は

図 9 3 種類の鋳鉄回転円板および CCT 試験片のき裂伝ば速度の ΔK による整理結果

切欠き長さを含むき裂長さ, r_1 および r_2 は円板の内外半径, F_t は a/r_1 に依存する係数, γ は円板材料の比重, ν はポアソン比, ω は回転角速度, g は重力加速度である。

なお, 図中には, 3種類の鋳鉄回転円板の da/dN と ΔK の関係を同一材料の CCT 試験片による片振引張疲労試験結果⁽⁹⁾ も併記してある。単軸疲労試験は応力比 $R=0$ のもとで正弦波荷重を加えて行い, 繰返し速度は 30 Hz である。また, CCT 試験片に対する K は Tada の式⁽¹⁰⁾ より計算した。

図 9 からわかるように, 同一 ΔK においては疲労き裂伝ば速度 da/dN は FC が最も大きく, FCD が最も小さく, CV が前二者の中間となった。FC の da/dN が最も大きいのは図 8 (a) からわかるように, 黒鉛がアスペクト比の大きい片状であるため, き裂が黒鉛内を進む度合いが CV, FCD に比べて大きいからであると考えられる。このことは FC 円板の SEM による破面観察結果⁽¹¹⁾ でも確認されている。また, 3種類の鋳鉄円板のいずれにおいても da/dN は 1 サイクル当たり 10^{-6} m から 2×10^{-4} m まで増加したが, 実験の初期段階から da/dN が大きい値となるのも黒鉛の存在に起因する鋳鉄回転円板の特徴的な挙動であると考えられる。

さらに, 図 9 から 3種類の鋳鉄回転円板のき裂伝ば速度は ΔK では統一的に整理できず, 顕著な材料依存を示すことがわかる。しかし, 回転円板のき裂伝ば速

度は伝ば速度のレベルが異なるものの, CCT 試験片を用いた単軸応力下でのき裂伝ば試験の延長線上にあり, 材料が同一の場合には CCT 試験片と回転円板のき裂伝ば速度は ΔK を用いて統一的に取扱えるものと思われる。また, 3種類の伝ば線図はこう配はあまり変わらず, 切片のみが異なっているのも特徴である。

図 10 には図 5 に示した J 積分範囲を用いて回転円板と CCT 試験片のき裂伝ば速度を整理した結果を示す。なお, CCT 試験片の J 積分範囲は平面応力を仮定して次式によって ΔK から換算した。

$$\Delta J = \frac{\Delta K^2}{E} \dots\dots\dots (3)$$

ΔJ による整理結果では, ΔK の場合に比べて材料依存性は小さくなり, 回転円板のき裂伝ば速度は 3種類の材料間で約 1 けたの差の範囲で ΔJ によって評価できることがわかる。また, 回転円板の伝ば速度は CCT 試験片の延長線上にあり, ΔJ を用いれば単軸のき裂伝ば試験から回転円板の伝ば速度を推定できることがわかる。CCT 試験片, 回転円板ともに CV と FCD のデータは比較的まとまりがよいが, FC のみがき裂伝ば速度が大きい側に整理される結果となっている。

本論文で実施したような繰返し J 積分範囲の FEM による解析は, 計算に費用と時間を要し, 一般に容易ではない。そこで, 簡易的な回転円板のき裂伝ば速度の評価法として, ΔK を各材料の引張強さ σ_b で除し

図 10 3種類の鋳鉄回転円板および CCT 試験片のき裂伝ば速度の ΔJ による整理結果

図 11 3種類の鋳鉄回転円板および CCT 試験片のき裂伝ば速度の $\Delta K/\sigma_b$ による整理結果

たパラメータでき裂伝ば速度の再整理を行った。整理結果を図 11 に示す。 ΔK による整理で見られたような、き裂伝ば速度の材料依存性はなくなり、3 種類の材料の伝ば速度は 1 本のマスターカーブによって評価できることがわかる。したがって、応力拡大係数範囲を材料の引張強さで除したパラメータを用いれば、単軸でのき裂伝ば試験結果から、回転円板のき裂伝ば速度を材料に依存せず簡便に推定できることがわかる。

5. 結 言

黒鉛形状が異なる 3 種類の切欠き付鋳鉄円板を用いて、一方向回転破壊試験と低サイクル疲労き裂伝ば試験を行った。得られた結論は以下のようである。

(1) 切欠き付円板の一方向回転破壊強度は CV, FCD 円板については修正平均応力説によって高い精度で推定できるが、FC 円板については推定誤差がやや大きくなることがわかった。

(2) 疲労き裂伝ば速度に対する黒鉛形状の影響は明りょうに現れ、FC 円板の da/dN が最も大きく、FCD 円板が最も小さく、CV 円板はこれらの中間となった。

(3) 応力拡大係数範囲を用いた場合は、3 種類の円板のき裂伝ば速度は材料間で統一的に整理することができなかった。しかし、 J 積分範囲を用いると、3 種類の円板のき裂伝ば速度は、1 けたの差の範囲で推定することができた。また、簡易的には、応力拡大係数範

囲を供試材の引張強さで除したものをを用いれば、3 種類の鋳鉄回転円板のき裂伝ば速度は材料間で統一的に整理することができた。

(4) 3 種類の鋳鉄回転円板のき裂伝ば速度は、応力拡大係数範囲、 J 積分範囲のいずれを用いても CCT 試験片のき裂伝ば速度から推定することが可能であった。

終わりに、本研究に用いた供試材料は扶桑鋳工(株)より提供を受けたものであり、同社の黒崎文彌氏、佐々木裕氏に多大なご協力を頂いた。記して謝意を表す。また、スピントスタの運用に関して多大の協力を賜った丸和電機(株)の柴崎司郎氏に深く感謝する。さらに、有限要素法解析に協力された立命館大学院生、橋本清司君ならびに実験に協力された当時大阪産業大学学生、水谷清二君、兼原秀夫君、西本政史君および西川清三君に謝意を表する。

文 献

- (1) 式田・ほか 3 名, 機論, 55-515, A(1989), 1499.
- (2) 式田・ほか 2 名, 機論, 45-399(1979), 1323.
- (3) Lorenzi, H. G., *Int. J. Fracture*, 19(1982), 183.
- (4) MARC, *User Information K-4*(1992), A 5-70.
- (5) 中西, 機論, 18-75(1951), 44.
- (6) Wine, D. H. and Wundt, B. M., *Trans. ASME*, 80(1953), 1643.
- (7) 村上・西谷, 機論, 41-348(1975), 2255.
- (8) 日本材料学会編, 応力拡大係数ハンドブック,(1987), 328.
- (9) 式田・ほか 2 名, 材料, 36-404(1987), 457.
- (10) Tada, H., *Eng. Fract. Mech.*, 3(1971), 345.