

令和元年6月19日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06815

研究課題名(和文)非破壊的手法を利用した球状黒鉛鋳鉄の疲労限度予測法の確立

研究課題名(英文) Establishment of fatigue limit prediction method for spheroidal graphite cast iron using nondestructive method

研究代表者

白木 尚人 (Shiraki, Naoto)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：20298011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：FCD350相当の球状黒鉛鋳鉄の大型鋳物から軸荷重疲労試験片を切り出し、全ての試験片について高分解能X線CTを用いて材料に内在する黒鉛や欠陥を検出した。黒鉛や欠陥の寸法と疲労限度推定式を用いて疲労限度の推定を行った。その結果、X線CTにより検出された体積が最大の欠陥の欠陥寸法による推定の疲労限度は、実験により求められた疲労限度125MPaに対して誤差5%の安全側であった。実験により求められた疲労限度に対して誤差11%の危険側の推定となった。これらの結果から、非破壊検査による疲労強度の推定は可能と判断される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に鉄鋼材料の疲労限度は、引張強さの1/2又はビッカース硬さHVの1.6倍といわれているが、球状黒鉛鋳鉄の様に材料中に大きな欠陥が存在する場合、引張強さのみでは評価できない場合がある。欠陥を矩形近似し、その面積平方根を a とし、基地組織のビッカース硬さを考慮することで疲労限度を高い精度で推定できる推定式が提案されている。一方、鋳造品に内在する欠陥の検出は、高精度のX線CTで内在する欠陥を検出することが可能で、同様の手法で疲労限度を非破壊的に予測できる可能性をしめした。本手法は疲労試験を行うことなく球状黒鉛鋳鉄を構造材料として用いるための実用的な疲労強度評価方法となり得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：Axial load fatigue specimen were cut out from a large ingot of spheroidal graphite cast iron equivalent to FCD 350, and high resolution X-ray CT was used for all specimen to detect internal graphite and defects in the material. The fatigue limit was estimated using the dimensions of graphite and defects and the fatigue limit estimation equation. As a result, the fatigue limit estimated by the defect size of the defect with the largest volume detected by X-ray CT was a safety side with an error of 5% with respect to the fatigue limit of 125 MPa obtained by the experiment. It is an estimation of the danger side with an error of 11% with respect to the fatigue limit obtained by the experiment. From these results, it is judged that estimation of fatigue strength by nondestructive testing is possible.

研究分野：機械工学

キーワード：X線CT 球状黒鉛鋳鉄 疲労限度 欠陥寸法 破壊起点

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

材料試験法の中でも、簡便な試験法により機械的性質を明らかにすることは、実用上の観点から意義のあることであり、古来より各種の材料評価式が提案されている。例えば、ピッカーズ圧子により圧痕を導入し、くぼみの先端から生じるメジアンき裂長さを測定することにより、セラミックスなどの脆性材料の破壊靱性を評価する IF 法は JIS により規格化されており、その簡便性から各方面に利用されている¹⁾。また、浅見らはヤング率を考慮して硬さから引張強さや降伏応力を求める評価式を提案している^{2),3)}。

また、疲労限度を実験により求めるのは膨大な時間と労力を費やすため、強度設計上有用で安全かつ簡便な評価法の確立が望まれている。そこで、村上是破壊力学の概念を導入し、欠陥寸法を考慮することで高い精度で疲労限度が推定できる評価式を提案している¹⁾。これは欠陥(き裂)を有する材料の疲労限度は、図1に示すような4パラメータモデルを用いて推定できることが知られている⁴⁾。疲労限度と欠陥寸法の関係は、以下に示すような3つの領域に区分される。

領域 : 静的強度に強く支配される領域

領域 : 微小な欠陥(き裂)のき裂進展抵抗に強く支配される領域

領域 : 大きな欠陥(き裂)のき裂進展抵抗に強く支配される領域

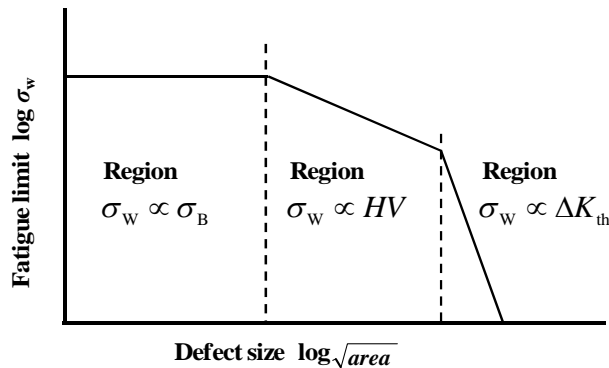


図1 疲労限度と欠陥寸法の関係
(4パラメータモデル)

鉄鋼材料の場合、通常の製造過程で形成される欠陥や介在物の大きさは数十 μm 程度と小さいため、比較的硬さが低い場合の疲労限度は欠陥や介在物の寸法に影響されず、一般的に鋼材の疲労限度 σ_w と引張強さ σ_B の間には $0.5\sigma_B$ (引張強さ σ_B の $1/2$) の様な比例関係(領域)が成立することが知られている。一方、球状黒鉛鑄鉄は材料に内包する欠陥が大きいいため前述の引張強さのみでの評価

では不十分である場合がある⁵⁾。そこで、材料に内包する欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}}$ と基地組織の硬さ HV を考慮し、疲労限度 σ_w の予測式を提案しており、その評価法は寸法が $1000\mu\text{m}$ 程度の微小欠陥であれば、精度良く推定することが可能であることが知られている(領域)。

2. 研究の目的

大型の機械部品に用いられる球状黒鉛鑄鉄には多くの欠陥(球状化されない黒鉛や引け巣)が存在し、これらは疲労破壊の起点となることが知られている。著者らは疲労試験を行い、その破面上の破壊起点の欠陥寸法を統計的に解析することにより疲労限度を精度良く推定する手法について検討してきた。

そこで、本研究では X 線 CT で観察された試験片の欠陥寸法を統計的に解析するとともに、得られた結果から村上の式を用いて疲労限度を予測した。また観察した試験片の軸荷重疲労試験を行い、それらの結果を比較することで、非破壊的な疲労限度予測の有効性について検討を行った。

3. 研究の方法

供試材の Mn 含有量は 0.9% , レアアース添加量は溶湯に対して 200ppm とし球状化剤にミッシュメタルとして含まれ, 後期接種は行っていない. 鑄型寸法は $h500 \times w500 \times t500$ mm の厚肉ブロック型を用い, 10t 低周波誘導炉にて元湯を溶解し, 取鍋にて溶湯 1500 kg をサンドイッチ法により球状化处理を行い溶製した. この溶湯を 1623K にて掛け堰を設けたフラン自硬性砂型に注湯し, 鑄塊を作製した. この鑄塊の温度を K 熱電対を用いて測定したところ, 1623K から共晶温度に到達するまでの冷却速度は 0.08K/s であった. 軸荷重疲労試験片を鑄塊から 15 本採取した. 黒鉛球状化率は 66% , 基地はパーライト面積率 34% を有するフェライトとパーライトの 2 相組織を有する試料を作製した. また, 引張試験の結果から, 本供試材は FCD350 相当であり, 基地組織の平均ビッカース硬さは HV190 であった. 球状化率は JIS で規定されている 80%⁹⁾ を下回っており, 本研究で用いた供試材は球状黒鉛鑄鉄とは定義できないが, 本研究は大型の鑄塊を作製し, 球状化率の低い供試材中に球状化されない黒鉛や大きな引け巣を取って発生させ, これらを X 線 CT で検出することが可能な試料とし, それらが破壊起点となるように狙ったものである.

X 線 CT による試験片観察を行う試験機には, 高分解能 X 線 CT として東芝 IT コントロールシステム製 TOSCANER-33000 μ FD-Z(最高管電圧 300kV のマイクロフォーカス X 線発生装置, 有効視野 400 \times 400mm の FPD<フラットパネル X 線ディテクタ>を搭載)を使用した. 管電圧と管電流を 280kV-100 μ A とした. X 線による観察に漏れがないように, 断面画像 1 枚あたりのスライス厚は 0.024mm, スライスピッチを 0.012mm とした. 軸荷重疲労試験片の斜線で示した平行部を含む 36mm について, X 線 CT で横断面画像を 3000 枚撮影した. そして, 断面画像の黒色部を引け巣もしくは黒鉛と仮定し, その寸法を測定した. また, 各試験片について概ね 10~20 個の欠陥を抽出できるよう, 体積が 0.02mm³ 以上の欠陥を付属解析ソフトを用いて解析し, その条件を満たす多数の欠陥の体積や位置及び投影面積の情報が得られる.

X 線 CT で観察を行った試験片を用いて軸荷重疲労試験を行った. 軸荷重試験片の形状及び寸法は JIS Z 2273⁷⁾ に準拠した平行部直径 8mm の 1 号試験片を用いた. 試験片の平行部はエメリーパーパで #2000 まで研磨後, 平均粒径 1 μ m 及び 0.3 μ m の Al₂O₃ 砥粒で鏡面仕上げとした. 試験機は, 容量 \pm 98kN の島津製作所製電気油圧式サーボパルス型疲労試験機を使用した. 試験条件は正弦波の荷重制御方式で行い, 荷重繰返し周波数を 17Hz, 応力比を $R = -1$ とした. また, 試験雰囲気は室温大気中, 疲労試験打ち切りまでの繰返し数は 1×10^7 回とし, 打ち切り回数に達した試験片は破壊起点の観察のために, 疲労限度よりも約 10MPa 程度応力振幅を増加し破断させた. なお, 軸荷重疲労試験によって得られた S-N 線図の近似方法は JSMS-SD-6-04⁸⁾ に準拠した. 軸荷重疲労試験後, 破断した試験片の破面観察を行った. 破面観察には走査型電子顕微鏡を用い, 破壊起点部を観察することにより破壊起点となった欠陥の寸法を測定した.

4. 研究成果

X 線 CT により撮影した試験片の断面画像の例を図 2 (a) に示す. 断面画像 3000 枚を画像処理ソフト ImageJ⁹⁾ により多断面再構成像(MPR 像)を表示し, 得られた試験片長手方向の A-A', B-B' 断面画像の例を図 2 (b) に示す. 図 2 (b) 中の点線は図 2 (a) の断面画像の位置を示している. 画像処理を行うことにより, 試験片内部に存在する黒鉛や欠陥を 3 次元的に観察することが可能となった.

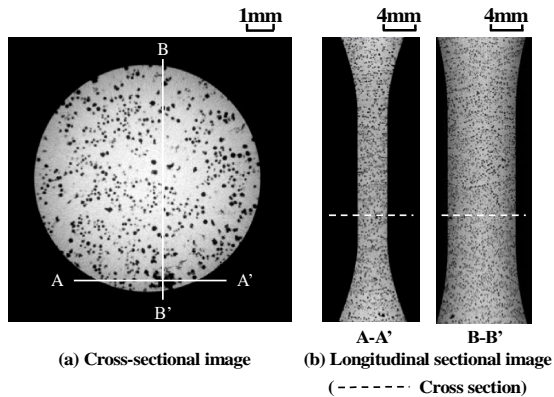


図2 X線CTによる疲労試験片の観察結果例

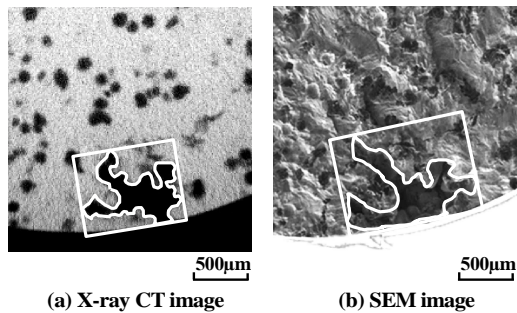


図3 X線CTとSEMにより観察された軸荷重疲労試験片の破壊起点の例

疲労破壊の起点となる欠陥の寸法測定に関しては、欠陥を切欠きではなく微小亀裂とみなし、微小欠陥からの亀裂の発生状態は同じ最大主応力方向に投影した面積をもつ亀裂と力学的に等価であるということが知られている。このような複雑な欠陥形状の結果を統一的に評価できる可能性のある代表寸法として、 \sqrt{area} による評価が有望視されている¹⁰⁾。X線CTにより観察された欠陥及び疲労試験により破壊した試験片の破壊起点の欠陥を図3のように矩形近似し、その面積の平方根を \sqrt{area} とした。内部に存在する欠陥は同じ大きさの $area$ を有する表面の欠陥に比べて $K_{\square_{max}}$ が小さく¹¹⁾、このことを考慮し、内部欠陥 $\sqrt{area_i}$ を有する場合、同一の $K_{\square_{max}}$ を与える表面欠陥の $\sqrt{area_s}$ に置き換えた。

一方、球状黒鉛鋳鉄は黒鉛や引け巣などの欠陥が存在する。このような内部に数百 μm 以上の欠陥が存在する材料の場合、その端部で応力集中が生じる。その疲労限度は欠陥寸法や基地組織の硬さに影響されることから、引張強さの1/2で求められる値よりも低くなることが知られている。村上らは、数百 μm 以上の欠陥が存在する材料の疲労限度について検討した結果、欠陥が1000 μm 未満の材料の疲労限度は、金属組織の硬さと欠陥寸法を用いて精度よく推定できることを報告している¹²⁾。

4 パラメータモデルを用いて疲労限度の推定を行うにあたり、試験片内部に存在する最大体積の欠陥に着目した。X線CTにおいて欠陥は3次元的に観察されるため、同じ欠陥でも観察する横断面により欠陥の投影面積が異なり、その結果 \sqrt{area} の計測結果が異なることになる。そこで、最大体積の欠陥から疲労限度の推定を行う際、欠陥の断面積が最大となる位置で \sqrt{area} を計測し、これを $\sqrt{area_{max}}$ とした。撮影した横断面画像から15本の試験片の欠陥の $\sqrt{area_{max}}$ をそれぞれ計測し、各試験片の推定疲労限度を計算した。ただし欠陥が試験片内部に存在していた場合は、破壊起点の欠陥寸法 $\sqrt{area_i}$ を表面近傍欠陥の欠陥寸法 $\sqrt{area_s}$ に置き換えることで欠陥寸法 \sqrt{area} を算出したため、表面近傍欠陥の欠陥として計算した。その結果、全15本の推定疲労限度の算術平均値は119MPa、中央値は122MPaとなり、標準偏差は19.9MPaであった。

軸荷重疲労試験により得られたS-N線図から疲労限度を算出した結果、疲労限度は125MPaであった。前述したX線CTにより検出された各試験片の最大欠陥寸法 $\sqrt{area_{max}}$ による推定疲労限度は119MPaであることから、約5%の誤差を有する安全側の推定となった。

X線CTで観察された最大体積の欠陥と、疲労試験を行った試験片の破面を走査型電子顕微鏡で観察された破壊起点の比較を行った。今回観察された破壊起点は全て引け巣であった。試験片中の最大体積の欠陥と、疲労試験の破壊起点が一致した場合がある一方、試験片中の最大体積の欠陥と、疲労試験の破壊起点が一致しなかった場合もあった。この場合、X線CTにより得られた横断面画像から破壊起点に対応する欠陥を探したところ、体積上位5番目の欠陥と一致していることが確認された。

全15本の試験片について同様の比較を行った結果、破壊起点が最大体積の欠陥と一致したものが3本、体積上位10番目までの欠陥と一致したものが7本、体積上位10番目までの欠陥と

一致しなかったものが5本であった。

X線CTにより試験片の欠陥を検出し、その欠陥寸法から村上の式により疲労限度を推定し実験結果と比較検討した結果、検出した最大の欠陥が破壊起点とならない場合もあるため、ある程度の誤差は生じるもののX線CTを利用した非破壊的手法により疲労限度の推定ができる可能性について示唆された。

<参考文献>

- 1) JIS R 1607, ファインセラミックスの室温破壊じん(靱)性試験方法, 2010.
- 2) 浅見克敏, 杉山好弘, 竹嶋康之, 圧子押し込み深さを利用した金属材料の機械的性質の推定(引張強さと降伏応力の場合), 材料試験技術, Vol.38, No.2, P104-110(1993).
- 3) 浅見克敏, 杉山好弘, 竹嶋康之, 圧子押し込み深さを利用した金属材料の機械的性質の推定(ヤング率の場合), 材料試験技術, Vol.38, No.4, P235-242(1993).
- 4) 村上敬宜, 金属疲労・微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, 1993.
- 5) 田村宏, 杉山好弘, 木村太郎, 球状黒鉛鑄鉄の疲労限度の推定, 鑄造工学 69 (1997) 234-239.
- 6) JIS G 5502 (2007):「球状黒鉛鑄鉄品」
- 7) JIS Z 2273 (1978):「金属材料の疲れ試験方法通則」
- 8) 日本材料学会, JSMS SD-6-04 (2006):「金属材料疲労試験信頼性評価基準」
- 9) Abramoff, M.D., Magelhaes, P.J., Ram, S.J. "Image Processing with Image J". Biophotonics International, volume 11, issue 7, pp. 36-42, 2004.
- 10) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響(養賢堂)(1993)41
- 11) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響(養賢堂)(1993)17
- 12) 村上敬宜, 遠藤正浩, 微小き裂の下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th} に及ぼす硬さとき裂形状の影響, 材料 35 (1986) pp.911-917

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

白木尚人, 田中香帆, 菅原暁, 藤本亮輔, 富澤雅美, 原拓生, X線CTを利用した球状黒鉛鑄鉄の疲労限度予測, 鑄造工学, 査読有, 91巻, 2019, 264-269

DOI:10.11279/jfes.91.264

〔学会発表〕(計2件)

田中香帆, 菅原暁, 白木尚人, 藤本亮輔, 富澤雅美, 原拓生, X線CTを利用した球状黒鉛鑄鉄の疲労限度予測手法の検討, (公社)日本鑄造工学会 第171回全国講演大会, 2018

K.Tanaka, N.Shiraki, A.Sugawara, R.Fujimoto, M.Tomizawa, T.Hara, T.Hirose, Possibility on Estimation of Fatigue Limit X-ray CT Apparatus in Spheroidal Graphite Cast Iron, 73rd World Foundry Congress (WFC2018), 2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。