

薄肉球状黒鉛鑄鉄における強度評価手法の開発

学位論文内容の要旨

鑄鉄による鑄造は形状の自由度が大きく、大量生産が可能である。リサイクル性、原料の入手性にも優れ、高い生産性と経済性を兼ね備える。中でも球状黒鉛鑄鉄は十分な強度、靱性を有し、機械構造物や建築構造物に広く用いられる。近年の環境問題に対する省エネルギー、省資源の観点から機械構造物、建築構造物の軽量化は重要かつ緊急の課題であり、球状黒鉛鑄鉄においても軽量化を目的とした薄肉化の要望は強い。しかし、鑄鉄鑄造品の薄肉化はこれまで困難とされてきた。その理由は、冷却速度の上昇による (1) 早期凝固、湯流れの限界による湯境等の湯周り不良、(2) チル組織の生成による靱性の低下である。これらの問題に対して、希土類金属の添加や脱酸処理などの方法が近年開発され、薄肉球状黒鉛鑄鉄の作製が実現した。これを実用化するには適切な強度評価が必要であるが、厚さ 2mm 程度の薄肉材から通常用いるような標準的な材料試験片を採取できない。そこで本研究では、薄肉材から採取可能な小寸法試験片により静的引張特性、疲労特性、破壊靱性を評価する手法の確立を目指した。また、球状黒鉛鑄鉄において鑄肌による強度の低下が多く報告されている。特に薄肉材においては鑄肌の凹凸の高さの肉厚に対する比率が通常肉厚材よりも大きく、その効果が大きいことが懸念される。また、鑄肌があるために試料の厚さを正確に測定できず、強度評価で用いる応力値に誤差が生じる。通常肉厚材ではこの誤差は小さく無視できるけれども、厚さ 1~2mm の薄肉材では 10% 以上にも及び無視することができない。これらのことから、薄肉鑄鉄において鑄肌を有する状態の強度を評価し、鑄肌の効果を定量化することは極めて重要である。そこで、静的引張特性および疲労特性について、鑄肌の効果を明らかにし、定式化することを試みた。

本論文は 7 章からなる。各章の内容は以下のように要約される。

第 1 章では、球状黒鉛鑄鉄の薄肉化の必要性和薄肉鑄鉄の実用化のために明らかにすべき事項を指摘し、本研究の目的と意義について述べた。

第 2 章では、薄板試験片により静的引張特性を評価するために、標準試験片による評価値との相関性を検討した。同一の球状黒鉛鑄鉄のブロック試料から薄板および標準試験片を作成し、引張試験を行った。その結果、引張強さ、0.2% 耐力、および破断伸びに対する断面形状の影響は小さく無視できたが、破断伸びは測定方法や標点距離により異なる値をとった。特に標点距離を大きく取ると破断伸びが小さく評価されること、また標点距離の測定で試験片を突合せた際の破面間の隙間の大きさを無視できないことが示された。以上から、薄板試験片で標準試験片と同等の破断伸びを得るためには、標点距離 L_0 をバルバの相似則により $L_0 = 4 \sqrt{A_0(A_0: \text{断面積})}$ とし、また破断伸びに応力-伸び率曲線から求まる塑性伸びを用いることを提案した。さらに、球状黒鉛鑄鉄のロックウェル硬さとブリネル硬さの関係が鋼における対応関係 (SAE J 417) と一致することを明らかにし、これより薄肉球状黒鉛鑄鉄の引張強さを薄板厚で測定可能なロックウェル硬さから推定できることを示した。

第 3 章では、鑄肌を有する試験片の有効厚さを評価するために、2mm 厚さに鑄込んだ薄肉球状黒

鉛鋳鉄試料に対して引張試験を行った。Ra 粗さの最大値約 $110\ \mu\text{m}$ の鋳肌を有する試験片の応力-伸び率曲線を鋳肌を除去した試験片の曲線に重ね合わせたところ、鋳肌を有する試験片の有効厚さは測定値よりも 0.25mm 程度小さいことがわかった。このように鋳肌を有する試験片の応力-伸び率曲線を除去した試験片のそれに重ね合わせることで、有効断面積を見積もる方法を提案した。またその値は表面粗さの最大値の約 2 倍であることから、鋳肌を有する鋳鉄試料の有効厚さを粗さから簡便に求められることを示した。

第 4 章では、薄肉球状黒鉛鋳鉄の弾塑性破壊靱性 J_{IC} を評価するために、厚さ 0.5mm の試験片を用いるスモールパンチ (SP) 試験を球状黒鉛鋳鉄に適用することを検討した。SP 試験では小球を試験片に押付けて破壊等価ひずみを測定し、実験的に得られる破壊靱性 J_{IC} と破壊等価ひずみの相関関係から破壊靱性を推定する。本研究ではまず、球状黒鉛鋳鉄の Y ブロック試料に対して CT 試験を実施し、その J_{IC} 値を測定した。次に同一試料に対して SP 試験を行い、球状黒鉛鋳鉄における破壊等価ひずみの評価法を検討した。試験片に生じたき裂の形状からその応力状態とき裂の発生機構を検討し、靱性の低い試料では主に曲げ応力が、高い試料では引張応力がき裂発生の主因となることを明らかにした。これにより SP 試験で得られる荷重-変位 (小球の押付け深さ) 曲線におけるき裂の発生点の判断方法を提案した。また、試験片の肉厚減少量とそのときの変位の関係から、球状黒鉛鋳鉄における破壊等価ひずみの算定式を明らかにした。以上の CT 試験と SP 試験の結果より、球状黒鉛鋳鉄における弾塑性破壊靱性 J_{IC} と破壊等価ひずみの相関式を提案した。また、硬さと破壊等価ひずみの間には線形の関係があることを明らかにし、硬さから破壊靱性を推定する手法を示した。

第 5 章では、矩形断面を有する薄板試験片による疲労特性評価の信頼性を確認するために、薄板試験片の疲労特性値と円断面を有する砂時計型試験片による値を、特に試験片断面の角部の影響に着目して比較した。同一の球状黒鉛鋳鉄のブロック試料から薄板および砂時計型試験片を作成し、疲労試験を行った。S-N 線図において疲労限度、疲労寿命ともに試験片形状による有意な差は認められず、また破壊起点位置 (角部あるいは辺部) による違いも認められなかった。破壊起点寸法から初期応力拡大係数範囲 ΔK_{ini} を算出し疲労寿命との関係 ($\Delta K_{ini} - N_f$ 線図) を求めたところ、プロットは試験片形状や破壊起点の位置によらず直線状に分布した。以上により、球状黒鉛鋳鉄において矩形断面の試験片で円断面による場合と同等の疲労特性評価が可能であることが示された。

第 6 章では、薄肉球状黒鉛鋳鉄試料において鋳肌の凹凸が疲労特性に与える効果を検証し、疲労限度を鋳肌のプロファイルや粗さパラメータから予測することを試みた。厚さ 2mm の板状に鋳込んだ球状黒鉛鋳鉄試料に対して疲労試験を実施した。破面観察の結果、破壊起点は鋳肌の凹部、引け巣、ドロソであった。き裂が鋳肌の凹部底から生じている場合、その凹部底の曲率半径 ρ と破面の凹部の深さ c を有する半楕円を起点寸法と見なすことを提案した。その起点寸法から初期応力拡大係数範囲 ΔK_{ini} を計算し $\Delta K_{ini} - N$ 線図を求めたところ、起点の種類や位置 (角部、辺部) によらずよく整理された。また ΔK_{ini} の下限界値 $\Delta K_{ini,th}$ は通常肉厚試料のき裂進展試験で得られる有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff,th}$ とほぼ一致した。これは通常肉厚材の $\Delta K_{eff,th}$ を用いて鋳肌を有する薄肉球状黒鉛鋳鉄の強度設計が可能であることを示している。さらに粗さ計で採取した鋳肌のプロファイルの凹部を欠陥と見なし、極値統計により鋳肌表面に存在する最大級の欠陥寸法を予測した。その値と硬さから求めた疲労限度は、疲労試験による値とよく一致した。すなわち鋳肌の凹凸のプロファイルを用いて、薄肉球状黒鉛鋳鉄の疲労限度を予測できることが示された。さらに、簡便法として Ra および RSm 粗さから疲労限度を見積もる手法を提案した。

第 7 章では、本研究により得られた成果および知見をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 村 孝

副 査 教 授 佐々木 一 彰

副 査 教 授 成 田 吉 弘

副 査 教 授 松 浦 清 隆

学 位 論 文 題 名

薄肉球状黒鉛鋳鉄における強度評価手法の開発

球状黒鉛鋳鉄は十分な強度、靱性を有し、機械構造物や建築構造物に広く用いられている。近年の環境問題に対する省エネルギー、省資源の観点から、機械構造物、建築構造物の軽量化は重要かつ緊急の課題であり、球状黒鉛鋳鉄においてもこれを目的とした薄肉化の要望が強い。従来、鋳鉄鋳造品の薄肉化は困難とされてきたが、近年、希土類金属の添加や脱酸処理などの新たな手法により薄肉球状黒鉛鋳鉄の作製が実現するようになった。しかし、厚さ 2mm 程度の薄肉材からは標準的な材料試験片が採取できないという問題があり、薄肉球状黒鉛鋳鉄の強度評価手法は確立されていない。また、薄肉材においては鋳肌厚さの肉厚に対する比率が大きく、これによる強度低下が懸念されているけれども、それを適切に予測する手法は見当たらない。本論文は、これらの問題に焦点を当て、薄肉材から採取可能な小寸法試験片により、引張特性、疲労特性、破壊靱性を評価する手法を提案するとともに、鋳肌を有する状態での引張特性および疲労特性の定式化を試み、薄肉球状黒鉛鋳鉄における強度評価手法の確立を目指したものである。

本論文は 7 章からなり、各章の内容は以下のように要約される。

第 1 章では、本論文の背景と目的および構成を述べている。

第 2 章では、薄板試験片により静的引張特性を評価するために、同一球状黒鉛鋳鉄のブロック試料から薄板および標準試験片を作成し、両者の引張特性を比較している。その結果、試験片断面形状の引張強さ、0.2% 耐力、破断伸びに及ぼす影響は無視できるが、測定方法や標点距離によっては破断伸びが異なる値となることを明らかにしている。種々の実験結果の定量的評価に基づき、薄板試験片で標準試験片と同等の破断伸びを得るためには、標点距離 L_0 をバルバの相似則により $L_0 = 4 \sqrt{A_0}$ (A_0 :断面積) とし、破断伸びに応力-伸び率曲線から求まる塑性伸びを用いることで適切な評価ができることを明らかにしている。

第 3 章では、鋳肌を有する試験片の有効厚さを評価するために、2mm 厚さに鋳込んだ薄肉球状黒鉛鋳鉄試料に対して引張試験を行なっている。鋳肌を有する試験片の応力-伸び率曲線を鋳肌を除去した試験片のそれに重ね合わせることで鋳肌材の有効厚さを見積もる手法を提案し、その妥当性を示している。

第 4 章では、薄肉球状黒鉛鋳鉄の弾塑性破壊靱性 J_{IC} を測定するために、厚さ 0.5mm の試験片を用いるスモールパンチ (SP) 試験法を適用している。SP 試験は小球を試験片に押付けることで破壊

等価ひずみを求め、これによって靱性を評価する手法である。本論文では、はじめに球状黒鉛鑄鉄の Y ブロック試料に対して CT 試験を実施し、その J_{IC} 値を測定した。次に同一試料に対して SP 試験を行い、破壊等価ひずみを求めた。これらの CT 試験と SP 試験の結果を比較することで、球状黒鉛鑄鉄における J_{IC} と破壊等価ひずみの関係を定式化し、SP 試験のみによって薄板試験片の弾塑性破壊靱性を求める手法を提案している。

第 5 章では、矩形断面を有する薄板試験片を用いた疲労特性評価の妥当性を確認するために、同一球状黒鉛鑄鉄のブロック試料から薄板試験片および円断面を有する砂時計型試験片を作製し、それらの疲労試験を行なっている。その結果、疲労限度、疲労寿命への試験片形状による有意差は認められず、矩形断面の試験片で円断面の場合と同等の疲労特性が評価できることを明らかにしている。

第 6 章では、薄肉球状黒鉛鑄鉄試料において鑄肌の凹凸が疲労特性に与える効果を検証し、疲労限度を鑄肌のプロファイルや粗さパラメータから予測することを試みている。厚さ 2mm の板状に鑄込んだ球状黒鉛鑄鉄試料に対して疲労試験を実施し、起点周囲の破面観察を行なうことで、き裂発生に寄与する鑄肌凹部の欠陥寸法を明らかにしている。さらに粗さ計で採取した鑄肌プロファイルにこの手法を適用し、鑄肌表面に存在する最大級の欠陥寸法を極値統計によって求め、この値と材料の硬さを用いることで、疲労試験を行わずに疲労限度を精度良く求められることを明らかにしている。また、簡便法として Ra および RSm 粗さから疲労限度を見積もる手法も示し、その有効性を検討している。

第 7 章では、本研究により得られた主な成果をまとめている。

以上のように、本論文は、薄肉球状黒鉛鑄鉄における強度評価手法を新たに開発し、その有効性を示したものであって、鑄造工学、機械材料学、材料強度学の分野に貢献するところ大である。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。