

展望・総説・総論

球状黒鉛鋳鉄における切欠き強度の新たな評価方法（8）

—— 一発破壊・疲労破壊に関する

球状黒鉛鋳鉄の切欠き強度 ——

池田 朋弘*・野田 尚昭†・佐野 義一‡

1 はじめに

第7回では、一発破壊に関して、球状黒鉛鋳鉄における切欠き強度の新たな評価について述べた。一方、球状黒鉛鋳鉄が用いられる分野では、自動車部品や機械部品などをはじめ、繰返しの場合が多い。したがって、その強度設計において、疲労に関連するデータが必要とされる。ここで、球状黒鉛鋳鉄製鋳物では肉厚変化部やリブ交点など、応力集中部が存在するため、切欠き材の強度を把握することが重要である。

しかしながら、これまで球状黒鉛鋳鉄における切欠き材の疲労特性に関して幾つか研究がおこなわれてきたにも関わらず、そのデータがまとめられたものは非常に少ない。そこで本稿では、一発破壊のみではなく疲労破壊にも注目する。それぞれにおける切欠き強度について、これまで筆者らがおこなってきた実験結果と既往研究のデータを用い、平滑材との比較をおこないながら切欠き材の強度について整理する。

2 切欠き材の一発破壊に対する強度

図2.1に一般的な材料であるフェライト-パーライト基地の球状黒鉛鋳鉄 JIS-FCD500 について、常温、静的条件の引張試験における平滑材および切欠き材の応力-ひずみ曲線を示す。図2.1より、

応力-ひずみ曲線における最大公称応力は切欠き材の方が平滑材より大きくなっている。このような切欠き強化は、第4回で考察したように、切欠きにより応力の多軸性が高くなることが影響していると考えられる。図2.2に、同じ初期断面積の平滑部と切欠き部を持つ球状黒鉛鋳鉄の引張試験片概観を示す。また、図2.2には、この試験片

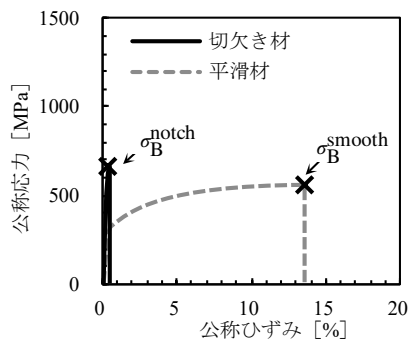


図 2.1 一般的な球状黒鉛鋳鉄の切欠き材および平滑材の応力-ひずみ曲線

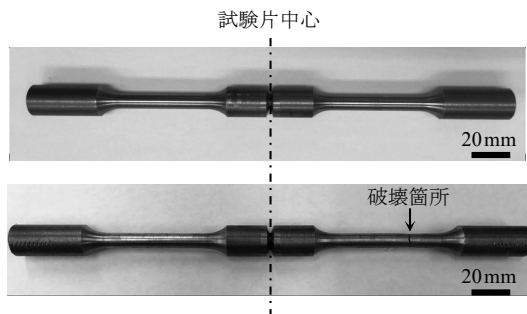


図 2.2 同じ初期断面積の平滑部と切欠き部を持つ球状黒鉛鋳鉄の引張試験結果（常温、静的）

* 日之出水道機器株式会社 R&D 総合センター (Tomohiro Ikeda)

† 九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系 教授 (Nao-Aki Noda)

‡ 九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系 (Yoshikazu Sano)

を用い、常温、静的条件の引張試験をおこなった後の状態も併せて示す。図 2.2 から分かるように、同じ初期断面積を有する場合、切欠き材の方が平滑材と比べて強い。このことは、図 2.1 で述べた切欠き強化によるものであると理解できる。後述する疲労破壊の場合とは異なり、一発破壊においては、切欠き部が最弱部になるとは限らない。

次に、切欠き材の強度が平滑材の強度を上回る条件について考える。図 2.3 に平滑材と切欠き材の丸棒試験片を用いてさまざまなひずみ速度と温度で引張試験した結果をひずみ速度・温度パラメータ R 値で整理したものについて示す。図の横軸の R 値については、この値が低いほど、低温・高速の条件となることを意味する。なお、図 2.3 における切欠き材は、シャルピー衝撃試験片で用いられている V ノッチと切欠き部が同形状の環状切欠き試験片である。シャルピー衝撃試験片に準じた切欠き深さ 2 mm は、実際の鋳物製品の鑄肌や加工によって形成される面の凹凸よりも明らかに深いものである。また、切欠き底半径 $\rho = 0.25 \text{ mm}$ については、実際に鋳造製品でみられる最小の $\rho = 2 \text{ mm}$ よりも非常に厳しいもので

ある。ここで、一発破壊に対する強度設計において最も基本的な強度は、常温・静的条件における平滑材の引張強さであり、これを図中に $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ で示す。この $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ を切欠き強度 $\sigma_{B,RT}^{\text{notch}}$ が下回る点を R_{th} として図中に示す。 R_{th} は第 7 回において定義した切欠き強化下限界値である。 R_{th} 以上では、切欠き材の強度が平滑材の強度を上回る。ここで、実用上の R 値として、溶接構造部材の例を図 2.3 中に斜線で示す。図 2.3 において、実用上の R 値が R_{th} を上回る条件、すなわち $R > R_{th}$ を満たす場合、切欠き部に対して平滑材の引張強度を用いることが一発破壊に対して設計上安全となる。

3 切欠き材の疲労破壊に対する強度 (疲労限度)

構造設計において最も基本的で重要な値として、疲労限度がある。ここでは、切欠き材の疲労限度について、平滑材の疲労限度と比較しながら整理する。球状黒鉛鋳鉄の疲労限度に関しては、鋼同様に基地組織の強度が影響する。一般的な球状黒鉛鋳鉄では、フェライト基地からフェライトパーライト基地、パーライト基地となるに連れて高い引張強さが得られるようになり、JIS 規格で規定される強度範囲は 380 から 800 MPa までに及ぶ。球状黒鉛鋳鉄についても鋼材などと同様に、このような材料の高強度化に伴って疲労限度は高くなる。図 3.1 に、球状黒鉛鋳鉄について、平滑材の回転曲げ疲労試験より得られた疲労限度

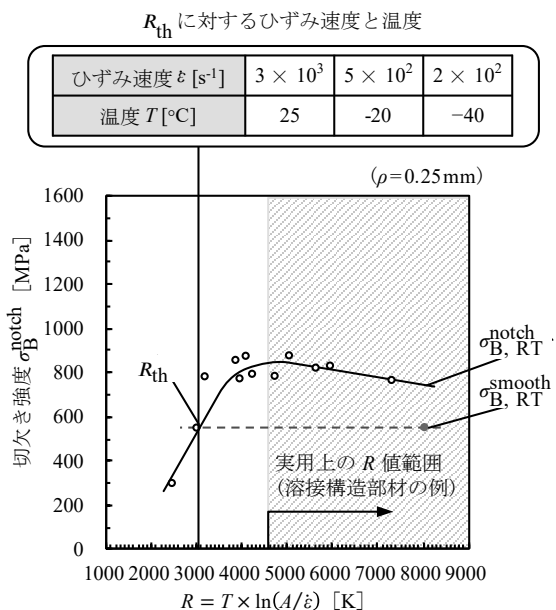


図 2.3 平滑材と切欠き材の丸棒試験片を用いてさまざまなひずみ速度と温度で引張試験した結果

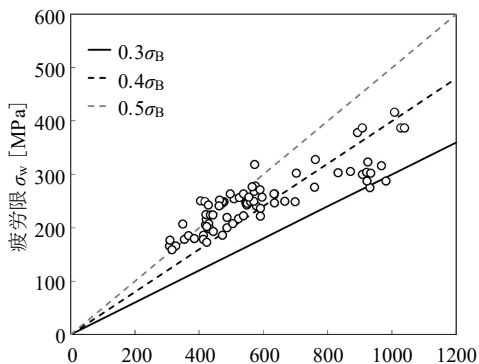
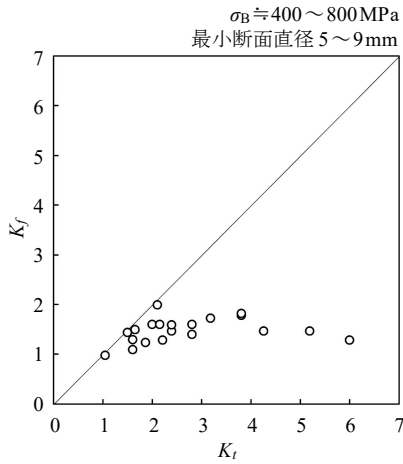


図 3.1 平滑材における疲労限度と引張強さの関係 (2~3)

図 3.2 K_f と K_t の関係^{5)~10)}

σ_{w0} を引張強さ σ_B との関係で整理した結果を示す^{2)~3)}。図 3.1 より、 σ_{w0} は、次式のように引張強さ σ_B の 30 ~ 50% となる傾向にあり、高強度になるほど引張強さに対する比は小さくなる傾向にある。

$$\sigma_{w0} = 0.3 \sim 0.5 (\sigma_B) \quad (3.1)$$

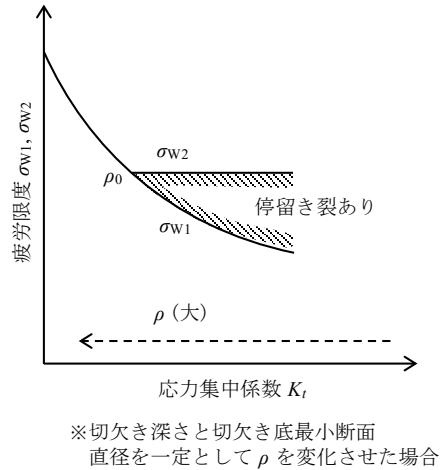
なお、以上で述べた基地組織の影響の他に、球状黒鉛の組織として構成されるものには黒鉛があるが、球状化率の上昇に伴い引張強さが高くなることが知られており、疲労限度についても、球状化率の上昇とともに高くなることが報告されている⁴⁾。

次に、切欠き材の疲労限度について、図 3.2 に、切欠き係数 K_f と応力集中係数 K_t の関係で整理した結果を示す^{5)~10)}。なお、切欠き係数 K_f は次式により得られる。

$$K_f = \sigma_{w0} / \sigma_w \quad (3.2)$$

ここで、 σ_{w0} は平滑材の疲労限度、 σ_w は切欠き材の疲労限度（ 10^7 回で破断しない限界値）であり、後述する σ_{w1} と σ_{w2} がある。図 3.2 より、球状黒鉛鋳鉄の場合も鋼と同様に、 K_f は K_t よりも小さい傾向にある。 K_t が小さい場合には、 $K_f \cong K_t$ としてみる事が出来るが、 K_t が大きい場合には、 $K_f < K_t$ である。

ここで、上述した切欠き材の疲労限度 σ_{w1} と

図 3.3 疲労限度 σ_{w1} 、 σ_{w2} と K_t の関係

σ_{w2} について、これまでの鋼材を中心とした研究結果から概略を述べる。おおよそ、 $K_f \cong K_t$ の範囲での疲労限度は σ_{w1} であり、そうでない範囲 ($K_f < K_t$) での疲労限度は σ_{w2} といえる。 ρ を変化させた疲労実験をおこなった場合、ある大きさの ρ (材料固有の値： ρ_0) 以下の場合には、き裂が切欠き底全周にわたっても試験片が破断しない限界の応力があり、図 3.3 に示すように、 ρ が小さくなくても変化しない。これが σ_{w2} である。このような停留したままのき裂は停留き裂と呼ばれ、停留現象には諸説あるが塑性誘起き裂開口現象などが関わっている。図 3.3 において、 ρ_0 以上で σ_{w2} はみられず、 σ_{w1} が試験片の破壊/非破壊の境界として捉えられるようになる。 σ_{w1} での切欠き材の表面状態は、微小な停留き裂が存在している状態であり、平滑材とほぼ同程度の状態にある。

参考文献

- 1) 村上敬宜：応力集中の考え方，養賢堂（2005）p.136.
- 2) 日本機械学会：疲労強度の設計資料（I）（1982）p.80.
- 3) J.R. Davis (Eds.)：ASM Specialty Handbook Cast Iron（1996）p.397.
- 4) Ductile Iron society：“DUCTILE IRON DATA FOR DESIGN ENGINEERS, SECTION III. ENGINEERING DATA (part 1)”（1990）.
- 5) 西谷弘信・内山修造・中江 洋・野口博司：「球状黒鉛鋳鉄の切欠き材の疲労強度」，日本機械学会論文集（A 編），58, 556（1992）p.2280.

- 6) 野口 徹・清水一道・小林智浩：「オーステンパ球状黒鉛鑄鉄の疲労における切欠き感度」, 日本機械学会論文集 (A 編), **60**, 575 (1994) p.1524.
- 7) 伊藤大二郎・清水一道・田中真人・松元秀人：「球状バナジウム炭化物鑄鉄の回転曲げ疲労における切欠き感受性」, 鑄造工学, **84**, 2 (2012) p.64.
- 8) 上田祐男：「球状黒鉛鑄鉄の高温疲労強度」, 材料, **23**, 251 (1974) p.640.
- 9) 塩田俊雄・小松真一郎：「黒鉛形状の異なる鑄鉄の疲労強度と切欠き効果および有効断面積との関係について」, 材料, **27**, 294 (1977) p.291.
- 10) 唐沢惟義・上田祐男：「低温における球状黒鉛鑄鉄および Ni-Zr 鑄鋼の疲労強度について」, 材料, **14**, 146 (1965) p.886.

(完)