

展望・総説・総論

球状黒鉛鑄鉄における切欠き強度の新たな評価方法（7） —— 切欠き引張強度に及ぼすひずみ速度・温度の 影響と設計上の切欠き強度 ——

池田 朋弘*・野田 尚昭†・佐野 義一‡

1 はじめに

これまで第2～4回において述べてきたように、新材料や代替材料などの開発に際して、シャルピー衝撃試験における吸収エネルギー値が従来材と比較して低いことにユーザーから不安を持たれたり、拒否される場合が少なくない。開発材のシャルピー吸収エネルギー値以外の特性が優れている場合には、大きな機会の損失にもつながりかねない問題である。

そこで筆者らは、強度設計で用いることができないシャルピー吸収エネルギー値に代わる合理的な切欠き強度評価法として、切欠き材の高速引張試験の導入を提案してきた。具体的には、第4回で、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー値が低く、適用が進まない高Si球状黒鉛鑄鉄を対象とし、平滑材強度および切欠き材強度に及ぼすひずみ速度と温度の影響をひずみ速度-温度パラメータ R 値により統括的に整理してきた。そして、構造部材がさらされる実用上の R 値（ひずみ速度と温度）を含む広い範囲で同材料の切欠き材強度が平滑材強度を上回ることを明らかにした。切欠き材の強度が平滑材の強度を上回る条件“切欠き強化 R 域（下限界 R 値： R_{th} ）”では、通常の静的な引張試験での結果を用いることにより一発破壊に対して安全側に設計できる。ところで、この設計上

有用な“切欠き強化 R 域”の存在やその特徴は何によって支配されるのであろうか。そこで、本稿では、広く用いられてきている中～高強度球状黒鉛鑄鉄を用いてこのことについて検討する。

2 実験方法

供試材は、球状黒鉛鑄鉄における中～高強度の材料に相当するフェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄の JIS-FCD500 と JIS-FCD700 および完全パーライト基地の球状黒鉛鑄鉄 (PDI) である。JIS-FCD500 と JIS-FCD700 は、鑄造後そのまま用い、PDI は完全パーライト基地とするために図 2.1 に示す熱処理を施した。評価試験片は、B 号 Y ブロックより、図 2.2 において灰色で示す Y ブロック底から 40 mm の範囲より採取した。

表 2.1 に供試材の成分を示す。図 2.3 に各供試材料の組織写真を示し、表 2.2 に JIS G 5502 に基づく各供試材料の球状化率測定結果を示す。各供

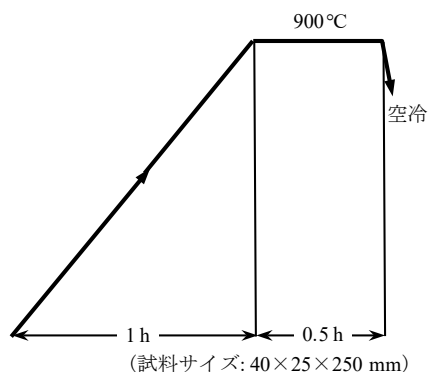


図 2.1 完全パーライト基地の球状黒鉛鑄鉄 (PDI) の熱処理条件

* 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)

表 2.1 供試材の成分

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
JIS-FCD500	3.75	2.08	0.40	0.021	0.004	0.24	0.044
JIS-FCD700	3.69	2.10	0.41	0.023	0.003	0.40	0.038
PDI	3.66	2.09	0.41	0.024	0.004	0.73	0.041

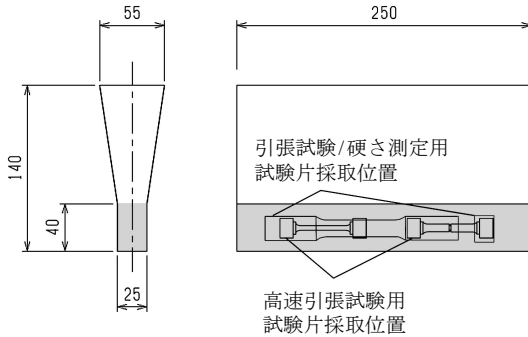


図 2.2 試験片採取位置

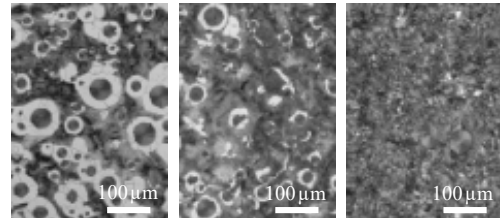


図 2.3 供試材の組織写真

表 2.2 供試材の球状化率測定結果

平均黒鉛粒径 [μm]	球状化率 [%]	黒鉛面積率 [%]	パーライト面積率 [%]
27.0	93.3	10.5	52.2
26.0	95.8	10.1	83.6
25.3	93.4	9.9	100

試材料において黒鉛粒径，球状化率，黒鉛面積率は同等である．表 2.3 に，各供試材料の JIS Z 2241¹⁾ に基づく 4 号試験片での引張試験結果と JIS Z 2243²⁾ に基づいたブリネル硬さ試験結果を示す．ここで，図 2.4 (a)～(c) に，各供試材料の引張特性およびブリネル硬さを表 2.2 に示した各供試材料のパーライト率の関係で整理した結果を示す．図 2.4 (a)～(c) に示すように，パーライト率の上昇に伴い，供試材料の引張強さ，耐力と硬さは高くなり，伸びは低下する．

図 2.5 に本実験で用いた試験片平行部の寸法を示す．試験片は，第 4 回と同様に，図 2.5 (a) に示す丸棒の平滑材と図 2.5 (b) に示す環状切欠き材を準備した．本研究に用いる切欠き形状・寸法は，第 4 回で述べたように，シャルピー衝撃試験片で用いられている V ノッチと同形状であり，実製品に見られるものよりも非常に厳しいものである³⁾．

高速引張試験には，電気油圧サーボ式試験機（島津製作所 E100kN）を用い，ストローク変

位速度を $8.5 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^2 \text{ mm/s}$ ，温度 T を $-180 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ の条件にて試験した．そして，平滑材の引張強さ σ_B^{smooth} および環状切欠き材の切欠き強度 σ_B^{notch} を次式より求めた．

$$\left. \begin{aligned} \sigma_B^{\text{smooth}} &= 4P_{\text{max}}/\pi d^2 \\ \sigma_B^{\text{notch}} &= 4P_{\text{max}}/\pi d^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ここで， P_{max} は試験時の最大荷重， d は平滑材試験片平行部および環状切欠き材最小断面（切欠き底部）の試験前の直径である．

本研究では，ひずみ速度と温度の影響を統一的に評価するために，第 4 回と同様に，ひずみ速度-温度パラメータ R 値を用いて平滑材の引張強さ σ_B^{smooth} および環状切欠き材の切欠き強度 σ_B^{notch} を整理した． R 値の算出式について式 (2.2) に再度示す．

表 2.3 供試材の引張試験結果および硬さ試験結果

材料	引張強さ σ_B [MPa]	0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	伸び ε_B [%]	ブリネル硬さ (HBW 10/3000)
JIS-FCD500	566	323	11	190
JIS-FCD700	711	394	9	229
PDI	933	573	7	293

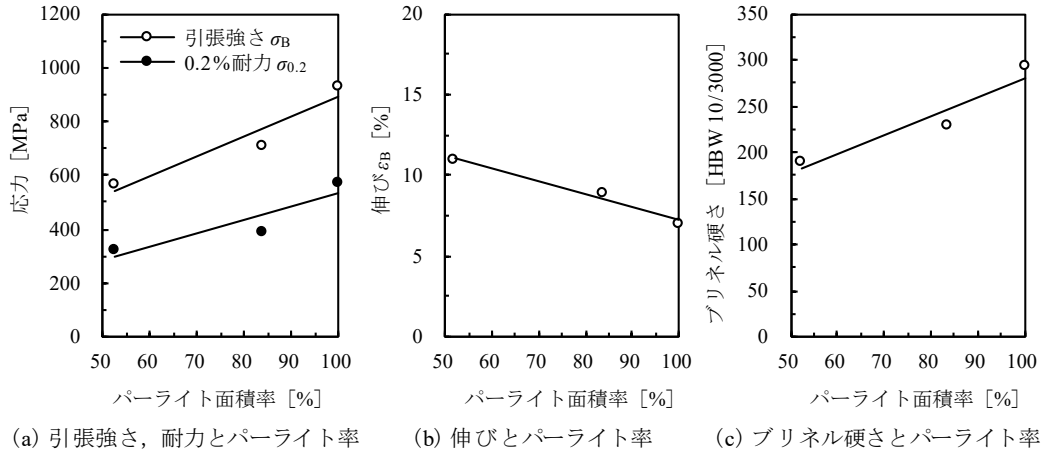


図 2.4 機械的性質（引張試験結果および硬さ試験結果）とパーライト率の関係

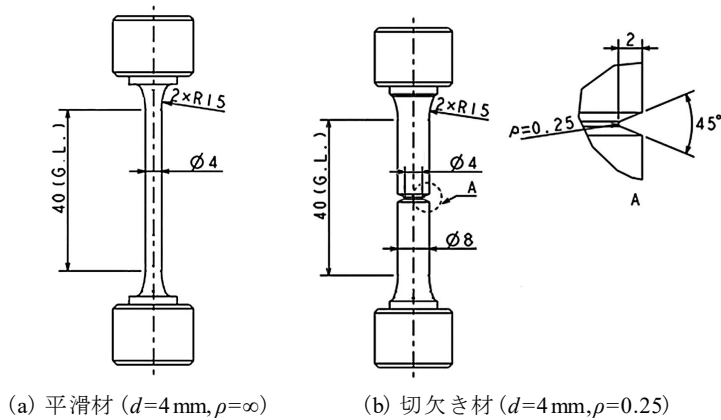


図 2.5 丸棒の平滑材と環状切欠き材（切欠き材）の形状

$$R = T \ln(A/\dot{\epsilon}) \quad (2.2)$$

ここで、 T は試験温度、 A は材料定数、 10^8s^{-1} である^{4),5)}、 $\dot{\epsilon}$ は平滑材の平行部のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ 、または環状切欠き材の切欠き底のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ である。平滑材の平行部のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ は、式 (2.3) により定義した。

$$\dot{\epsilon}^{\text{smooth}} = (u(t)/t)\ell \quad (2.3)$$

ここで、 $u(t)$ はストローク変位であり、時間に比例するものとする。 ℓ は平行部長さ 40mm、 t は負荷時間である。環状切欠き材の場合は、最も高いひずみ速度が生じる切欠き底に着目する。切欠き底のひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ は、式 (2.4) で表される

算出方法^{6)~8)}により求めた。

$$\dot{\epsilon}^{\text{notch}} = (u(t)/t)/\ell Kt\dot{\epsilon} \quad (2.4)$$

ここで、 $Kt\dot{\epsilon}$ は有限要素法による弾性解析で求められたひずみ速度集中係数で^{6)~8)}、本研究で用いた環状切欠き材の場合、 $Kt\dot{\epsilon}$ は 9.49 である。ひずみ速度集中係数の導出に関しては、第 5 回および第 6 回で詳細に解説されている。

3 実験結果

図 3.1 (a) ~ (c) に中～高強度の材料として、フェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄 (JIS-FCD500, 700) およびパーライト基地球状黒鉛鑄鉄 (PDI) の常温、静的での引張試験における平

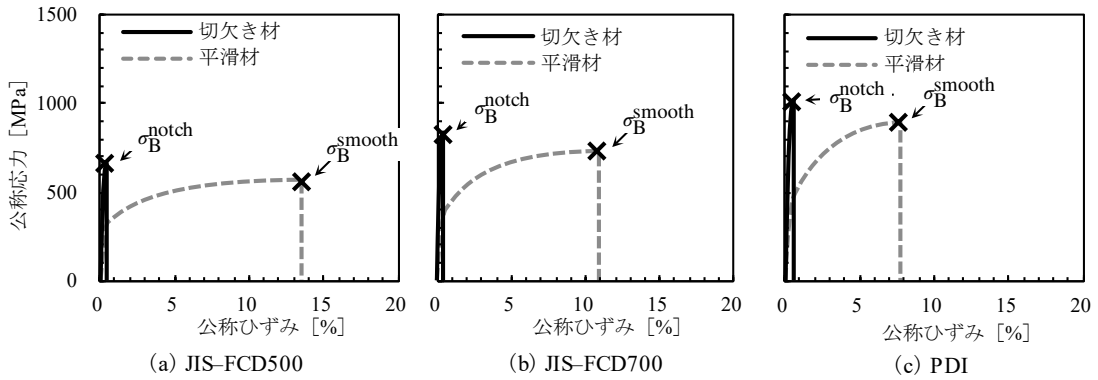


図 3.1 切欠き材および平滑材の応力-ひずみ曲線

平滑材および切欠き材の応力-ひずみ曲線を示す。中～高強度のいずれの供試材料においても、第4回の高Siフェライト基地球状黒鉛鋳鉄と同様に応力-ひずみ曲線における最大公称応力は上昇している。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 3.2 に JIS-FCD500, 700 および PDI における平滑材の引張強さ σ_B^{smooth} と R 値の関係を示す。ひずみ速度が高く、温度が低いほど R 値は小さい。図 3.2 では、JIS-FCD500, JIS-FCD700 および PDI のいずれの材料においても、 R 値の低下に伴い σ_B^{smooth} は上昇している。この σ_B^{smooth} の R 値依存性は、第4回で述べた高Si球状黒鉛鋳鉄

と同様の傾向を示した。

ところで、第4回では、高Si球状黒鉛鋳鉄において、切欠き強度 σ_B^{notch} は、平滑材の引張強さ σ_B^{smooth} と同様に R 値の低下に伴い上昇したが、その後さらに R 値が低下すると、これに伴い σ_B^{notch} は低下し始め、一発破壊に対する設計において最も基本的な常温、静的での平滑材引張強さ $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ を下回る R 値が存在した。これを図 3.3 に再度示す。図 3.3 に示すように、本研究では、切欠き強度 σ_B^{notch} の R 値に伴う遷移曲線が常温、静的での平滑材引張強さ $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ を下回る交点を切欠き強化下限界値 R_{th} と定義する。ここで、球状黒鉛鋳鉄品の使用上で要求される R 値が使用材料における R_{th} を上回れば、設計時の破

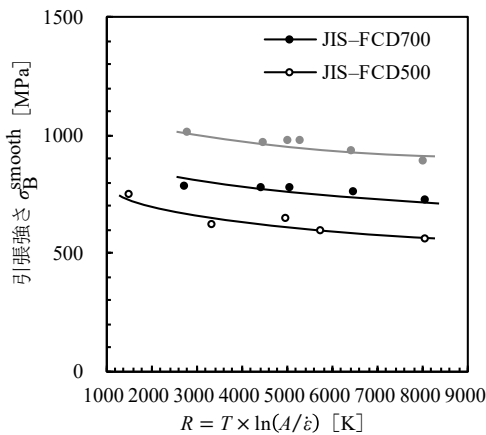


図 3.2 各供試材の引張強さとひずみ速度-温度パラメータ R 値の関係

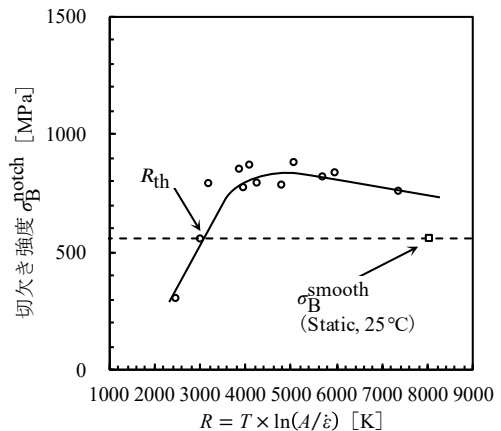


図 3.3 高Si球状黒鉛鋳鉄における切欠き強化下限界値 R_{th}

壊基準として常温、静的での引張強さを用いることが一発破壊の発生に対し安全側の設計であると言える。この条件を切欠き強化下限界条件 ($R \geq R_{th}$) と定義し、球状黒鉛鑄鉄の一発破壊に対する構造材料としての安全性と適用範囲を明示するための設計強度評価法として提案する。

図 3.4 に中～高強度の球状黒鉛鑄鉄における切欠き強度 σ_B^{notch} と R 値の関係を示す。いずれの材料も、 σ_B^{notch} は R 値と良い相関がある。そこで、図 3.5 には、図 3.4 のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄 (JIS-FCD500, 700) の σ_B^{notch} と R 値の関係に、各材料における常温、静的での平滑材引張強さ $\sigma_{B,RT}^{smooth}$ を記して再度示す。同図では、 $\sigma_{B,RT}^{smooth}$ を σ_B^{notch} が下回る R 値が存在するため、それぞれの材料に対して、上述した切欠き強化下限

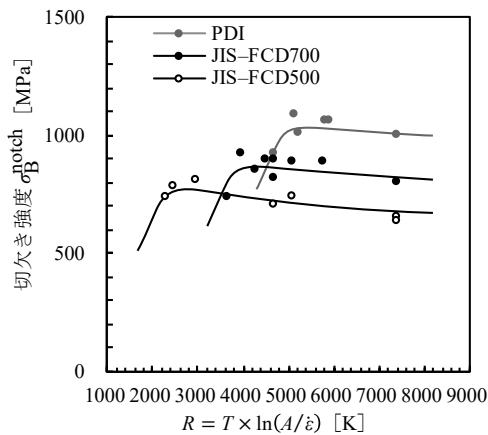


図 3.4 各供試材の切欠き強度と R 値の関係

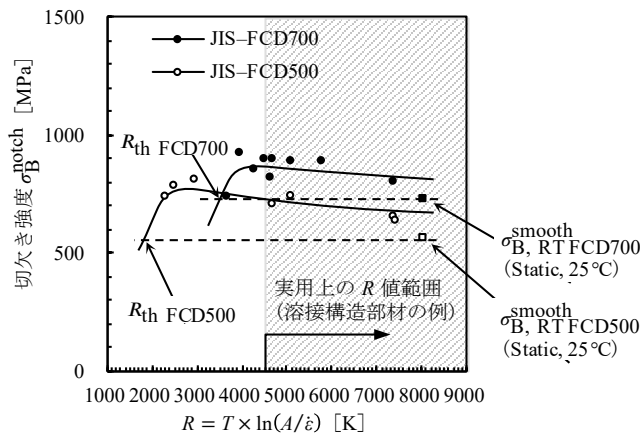


図 3.5 JIS-FCD500, 700 における R_{th} と実用上の R 値事例の比較

界値 R_{th} を図中に矢印で示す。さらに、図 3.5 には、構造部材がさらされる最も厳しい部類の R 値として、第 4 回で述べた溶接構造部材における R 値 4522K を示す。図 3.5 より、中強度の JIS-FCD500 のみならず、高強度の JIS-FCD700 においても、構造部材がさらされる最も厳しい部類の R 値に対して、切欠き強化下限界条件 ($R \geq R_{th}$) を満たしている。JIS-FCD700 は、JIS-FCD500 よりも常温を含む広範囲の温度においてシャルピー吸収エネルギー値が大幅に低い。しかしながら、このような高強度球状黒鉛鑄鉄は、これまでの実用上での経験や設計検討の蓄積もあり、建設機械や自動車、土木などの各分野で構造材料として実際に安全に用いられている^{9)~11)}。このことについて、材料の一発破壊の観点からは、切欠き強化下限界条件 ($R \geq R_{th}$) を満たしているためであるとして理解できる。

図 3.6 に、図 3.4 のパーライト基地球状黒鉛鑄鉄 (PDI) の σ_B^{notch} と R 値の関係に、同材料の常温、静的での平滑材引張強さ $\sigma_{B,RT}^{smooth}$ を記して再度示す。また、切欠き強化下限界値 R_{th} を図中に矢印で示すとともに、第 4 回で述べた溶接構造部材における R 値 4522K を示す。図 3.6 より、PDI においても、構造部材がさらされる最も厳しい部類の R 値に対して、切欠き強化下限界条件 ($R \geq R_{th}$) をほぼ満たしており、高強度球状黒鉛鑄鉄は、一発破壊に対して安全に強度設計を行うことが可能であり、幅広い分野へ適用できるも

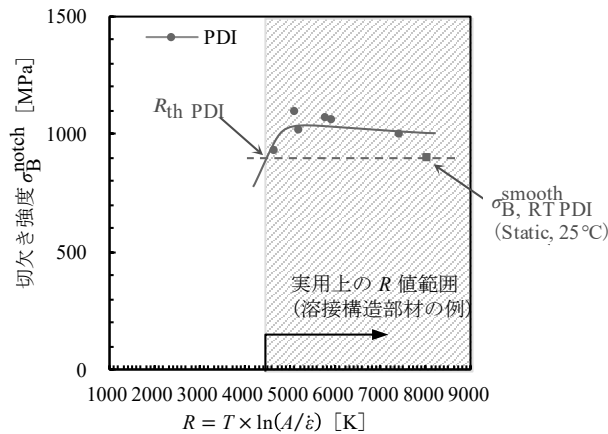


図 3.6 PDI における R_{th} と実用上の R 値事例の比較

のと考えられる。

図 3.4 では、JIS-500、700 において、高強度になるほど、切欠き強化下限値 R_{th} は高 R 値側に移動する傾向を示した。そこで、PDI も参考として含め、中～高強度のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄における R_{th} と材料の一般的機械的性質（引張特性および硬さ）との関係について考察する。球状黒鉛鋳鉄品では、材質検査の一環として引張試験が頻繁に行われるため、このような検討は品質管理の観点から有益である。図 3.7 (a)～(c) に JIS-500、700、PDI における R_{th} を表 2.3 に示した JIS 準拠の試験で得られる引張特性および硬さの関係でそれぞれ整理した結果を示す。図 3.7 (a)、(b) より、フェライト-パーライト基地球状黒鉛鋳鉄において、引張強さ

や硬さが上昇するほど、 R_{th} は直線的に上昇することが分かる。また、図 3.7 (c) より、伸びが低下するほど、 R_{th} は直線的に上昇することが分かる。したがって、球状黒鉛鋳鉄の材質検査（引張試験）における要求では、引張強さや耐力において下限値を定めるだけではなく、これらの値の上限値を定めることや伸びの下限値を定めることも重要である。なお、図 3.7 で示した関係が得られることについては、図 3.8 に示すように R_{th} がパーライト率との関係で整理でき、また、図 2.4 (a)～(c) に示したように引張特性および硬さもパーライト率で整理できることによると考えられる。パーライト率の上昇は、各種強度試験において遷移温度を上昇させる。このようなことが、材質により R_{th} が変化することに関係してい

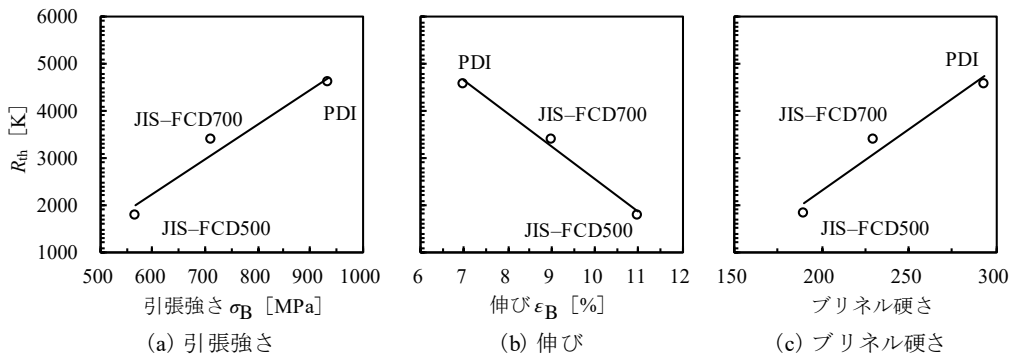


図 3.7 R_{th} と機械的性質（引張試験結果および硬さ試験結果）の関係

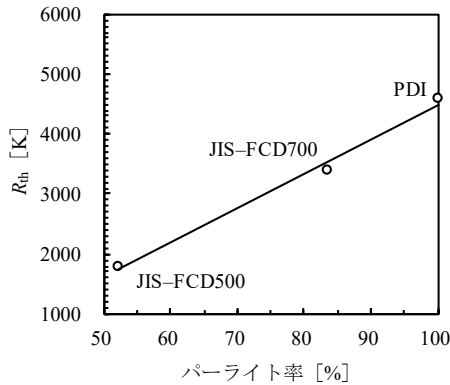


図 3.8 R_{th} とパーライト率の関係

る。

4 おわりに

本稿では、各種産業分野で長年安全に用いられてきた中～高強度の球状黒鉛鋳鉄を対象に、切欠き材の強度が平滑材の強度を上回る条件“切欠き強化 R 域（下限界 R 値： R_{th} ）”に関する検討を行った。まとめると以下の通りである。

- (1) R (使用上での要求) $\geq R_{th}$ の場合には、設計時の破壊基準として常温、静的での引張強さを用いることが一発破壊に対し安全側の設計である。
- (2) 同系統の中～高強度の球状黒鉛鋳鉄材質において、品質管理上で広く行われている引張試験の結果（引張強さや伸び）と R_{th} を関連付けることができた。一発破壊における観点からの要求では、引張強さや伸びの適正範囲を定めることが重要である。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I JIS Z 2241 (2011) 金属材料引張試験方法 (2013) p.321.
- 2) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I JIS Z 2243 (2008) プリネル硬さ試験-試験方法 (2013) p.378.
- 3) 日本規格協会：鋳造品の丸み JIS B 0703, (1987), p. 2.
- 4) 山本 博・小林俊郎・藤田秀嗣：「球状黒鉛鋳鉄における衝撃引張特性の歪速度-温度依存性と延性破壊挙動」, 鉄と鋼, **85**, 10 (1999) p.765.
- 5) P.E. Bennett and G.M. Sinclair : “Parameter representation of low-temperature yield behavior of body-centered cubic transition metals”, Transactions of the ASME, **65** (1966) p.518.
- 6) 野田尚昭・大塚 駿・安藤誠人・佐野義一・高瀬康・篠崎貴宏・菅 文海：「高速引張試験における切欠き試験片の動的応力集中とひずみ速度集中の解析」, 日本機械学会論文集 A 編, **79**, 804 (2013) p.1182.
- 7) 安藤誠人・野田尚昭・黒島義人・石川康弘・竹田英俊：「ポリジメチルシロキサンを共重合したポリカーボネートの衝撃特性と時間-温度換算則の適用」, 日本機械学会論文集, **80**, 814 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0149.
- 8) N.-A. Noda, H. Ohtsuka, H. Zheng, Y. Sano, M. Ando, T. Shinozaki and W. Guan : “Strain rate concentration and dynamic stress concentration for double-edge-notched specimens subjected to high-speed tensile loads”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **38** (2015) p.125.
- 9) 矢野 満：「球状黒鉛鋳鉄部品の信頼性試験とその結果」, 鋳造工学, **77**, 9 (2005) p.641.
- 10) 信木 関・旗手 稔・鳥谷 豪・宮本輪卓・浜坂直治・加納慎也：「球状黒鉛鋳鉄の引張と衝撃特性に及ぼす Cu 添加および熱処理の影響」, 鋳造工学, **86**, 9 (2014) p.719.
- 11) 旗手 稔, 信木 関, 河崎裕介, 浜坂直治：「窒化処理した高強度球状黒鉛鋳鉄の疲労強度特性」, 日本鋳造工学会 第 163 回 全国講演大会講演概要集 (2013) p.55.

(次号へつづく)