

球状黒鉛鋳鉄における切欠き強度の新たな評価方法 (4) 一切欠き引張強度に及ぼすひずみ速度・温度の影響とその構造部材としての考察—

著者	池田 朋弘, 野田 尚昭, 佐野 義一
雑誌名	機械の研究
巻	70
号	8
ページ	630-637
発行年	2018-08-01
その他のタイトル	New Notch Strength Evaluation Method for Ductile Cast Iron
URL	http://hdl.handle.net/10228/00007873

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(4) —— 切欠き引張強度に及ぼすひずみ速度・温度の 影響とその構造部材としての考察 ——

池田 朋弘*・野田 尚昭†・佐野 義一‡

1. はじめに

球状黒鉛鑄鉄の強度、靱性は、温度のみならずひずみ速度の影響も受けることを第3回で述べた。新材料や新用途の実用化に向けた中では、温度のみならずひずみ速度にも注目し、強度、靱性面での材料の適用限界を知ることが重要である。各種構造物の設計においては、構造用材料の安全性を保障するためのひずみ速度の上限値と温度の下限値が存在する。ここでは、溶接構造部材における例を表1.1に整理して示す^{1)~3)}。また、表1.1には、一般的な平滑材の引張試験ならびにVノッチシャルピー衝撃試験でのひずみ速度および比較検討した温度の条件も示している^{4),5)}。表1.1において、引張試験やVノッチシャルピー衝撃試験などの一般的な試験法では、構造用材料の強度、靱性面の高速、低温側適用限界を適切に把握できないことが分かる。そこで、第3回では、応力集中の大きいVノッチシャルピー衝撃試験片に着目して様々な試験速度と温度での高速三点曲げ試験を行った結果について述べた。しかしながら、製品の設計、製造においては、三点曲げ試験の結果よりも、引張強さ、耐力や疲労限度などの引張特性に関連する値が必要とされる。ところで、引張特性に及ぼすひずみ速度と温度の影響に関する知見は少なく、特に球状黒鉛鑄

鉄ではほとんど調査されていない。

一方で、欧州を中心として近年、高Si球状黒鉛鑄鉄の構造部材への適用検討が進められている。しかしながら、同材料は、常温から低温側において従来材よりもシャルピー吸収エネルギー値が低い。このことが懸念され、特に国内においては、産業への適用は未だに限定的である。

したがって、高Si球状黒鉛鑄鉄の引張特性に及ぼすひずみ速度と温度の影響を示すことは、同材料の適用範囲を理解する上で重要な知見のひとつとなる。また、得られた知見は、一般的な球状黒鉛鑄鉄の実用上での評価においても有用と考える。そこで本稿では、高Si球状黒鉛鑄鉄において、平滑材を用いて様々な変位速度と温度での引張試験を行った結果について述べる。これとともに、切欠き材について同様の評価を行い、第3回における高速三点曲げ試験での検討に引き続き、切欠き強度に着目して、ひずみ速度-温度依存性の観点から、高Si球状黒鉛鑄鉄の構造部材への適応性を考察する。

2. 実験方法

供試材料は、表2.1に示す成分に調整した完全フェライト基地の高Si球状黒鉛鑄鉄である。300kg溶解炉で目的の成分に調整した溶湯を注湯取鍋に移してサンドイッチ法(ポケット取鍋式)により球状化处理し、JIS G 5502に規定されているB号Yブロック砂型を用いて0.2%の注湯流接種を施しながら注湯した。鑄造後そのまま図2.1に灰色で示すYブロック底から40mmの範囲より評価試験片を採取した。表2.2に、素材の引張試験結果を示す。引張試験結果は、JIS

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

† 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 1.1 溶接構造部材と工業的試験におけるひずみ速度と温度の条件^{1)~5)}

設計	項目	ひずみ速度 [s^{-1}]	温度 [$^{\circ}C$]	R 値 [K]
	外板・隔壁溶接部 柱・梁溶接止端部	～1 ～2	-10～ -18～	4846～ 4522～
試験	引張試験	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	室温 (≈ 25)	6864～8923
	シャルピー衝撃試験	$10^2 \sim$	表中の温度範囲 (-18～25)	3524～4118

表 2.1 供試材料の成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
3.27	3.94	0.35	0.023	0.010	0.02	0.043

表 2.2 供試材料の引張試験結果

引張強さ σ_B [MPa]	0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	破断伸び ε_B [%]	ブリネル硬さ
543	426	20	186

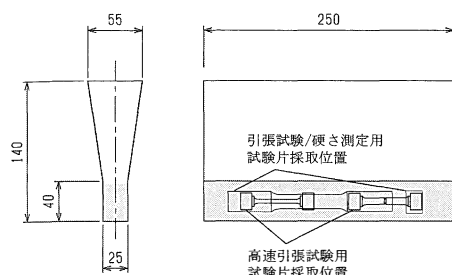
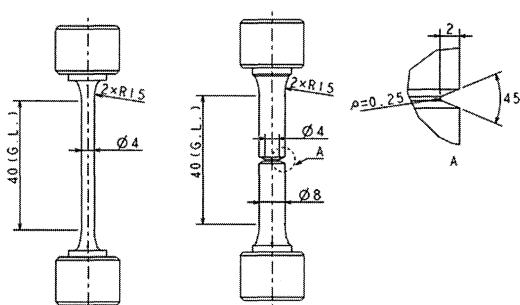


図 2.1 素材形状と供試材料の採取位置 (mm)

Z 2241 に規定されている 4 号引張試験片（直径=14mm，原標点間距離=50mm）を用いて同規格に準拠して試験を行った結果である。

図 2.2 に本実験で用いた試験片平行部の寸法を示す。試験片は、鋳鉄分野で一般的な試験片形状である丸棒の平滑材である。また、ひずみ速度と温度の感受性を高めるために環状切欠き材についても評価した。切欠き形状は、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る。ここで、シャルピー衝撃試験片に準じた図 2.2 (b) に示す切欠き深さ 2mm は、実際の鋳物製品の鋳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、図 2.2 (b) に示す切欠き底半径 $\rho=0.25\text{mm}$ については、例えば鋳造製品に関する規格でコーナー部の半径は 2mm 以上であることが規定されている^{6), 7)}。したがって、本実験に用いる切欠き形状・寸法は、実製品に見られるものよりも非常に厳しいものである。なお、後述の切欠き強化に関する考察では、 $\rho=0.25\text{mm}$ の切欠き材とは別に、切欠き底半径を変えた $\rho=2\text{mm}$ の切欠き材も用



(a) 平滑材 ($d=4\text{mm}$, $\rho=\infty$)
(b) 切欠き材 ($d=4\text{mm}$, $\rho=0.25\text{mm}$)

図 2.2 丸棒の平滑材と環状切欠き材 (切欠き材) の形状

いた。

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 $-130 \sim 25^{\circ}C$ 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部（切欠き底部）の試験前の直径である。さらに、試験条件に伴う破壊様式の変化を示すために試験片の破面観察を行い、延性破面率 f_b （破面上に観察されるディンプル破面領域の比率）を測定した。また、 f_b が 1% 以下の極めて小さい試料については、走査型電子顕微鏡（日立ハイテクノロジーズ

S-3400N) を用いて、延性破面の存在を観察した。

3. ひずみ速度-温度パラメータ R 値について

変形中の転位の運動に関して、外からの力による仕事以外に原子の熱振動のエネルギーの助けを借りる過程は熱活性化過程と呼ばれる。温度が高く、時間が長い程、転位が遭遇する様々な障害物のエネルギー的な山を乗り越え易くなる。言い換えれば、温度が高く、時間が長い程、外から加える力の仕事は小さくて済む。転位が運動し山を乗り越えるための活性化エネルギーを H と定義する。 H は、外から加える力の仕事の減少関数である。以上のような熱活性化過程が材料の変形において支配的であると仮定した場合、変形中のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ はアレニウス型の次式で表すことができる。

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp(-H/kT) \quad (3.1)$$

ここで、 A は材料定数であり、本稿では、球状黒鉛鑄鉄などの過去の研究結果より 10^8 s^{-1} とする^{8), 9)}。物理的には、 A は原子の熱振動のエネルギーの助けに伴って転位が移動する速度の上限 (転位が障壁を乗り越えようとする頻度) である。 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。

活性化エネルギー H のみが応力に依存するものと仮定し、式 (3.1) において $R=H/k$ とすることで、ひずみ速度-温度パラメータ R 値を式 (3.2) のように定義できる⁹⁾。ここでは、材料の変形が熱活性化過程に支配されている場合、材料の変形特性に対する温度低下の影響はひずみ速度の上昇と同様の影響を与えると考える。したがって、温度低下とひずみ速度上昇は R 値の減少として表現される。

$$R = H/k = T \cdot \ln(A/\dot{\epsilon}) \quad (3.2)$$

この R 値によって、鋼材などの bcc 金属における降伏点のひずみ速度-温度依存性を整理できることが示されており、実験的にも裏付けされている^{10), 11)}。また、降伏点だけでなく引張強さも同様に整理できることが実験的に報告されており¹²⁾、フェライト基地球状黒鉛鑄鉄の引張強度、降伏点 (耐力) も R 値と良い相関があることが報告されている⁸⁾。以上のことから、本稿では、ひ

ずみ速度-温度パラメータ R 値によって平滑材の引張強度 σ_B^{smooth} および環状切欠き材の切欠き強度 σ_B^{notch} の整理を試み、高 Si 球状黒鉛鑄鉄の引張強度特性に及ぼすひずみ速度と温度の影響を定量的にまとめる。

なお、式 (3.2) における $\dot{\epsilon}$ 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 (3.3) により定義した。

$$\dot{\epsilon}^{\text{smooth}} = (u(t)/t)/\ell \quad (3.3)$$

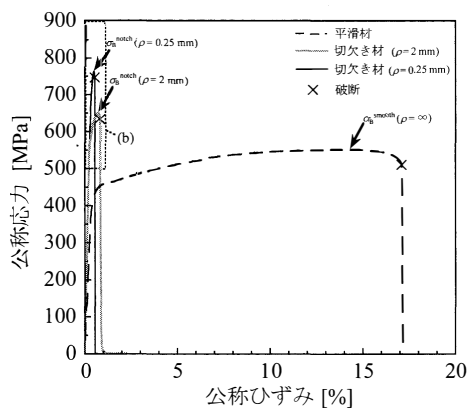
ここで、 $u(t)$ はストローク変位であり、時間に比例するものとする。 ℓ は平行部長さ 40mm、 t は負荷時間である。一方、環状切欠き材の場合は、最も高いひずみ速度が生じる切欠き底に着目する。切欠き底のひずみは、実験での計測が極めて困難であるので、 $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ は式 (3.4) で表される算出方法^{13)~15)}により求めた。

$$\dot{\epsilon}^{\text{notch}} = (u(t)/t)/\ell \cdot K_{t\dot{\epsilon}} \quad (3.4)$$

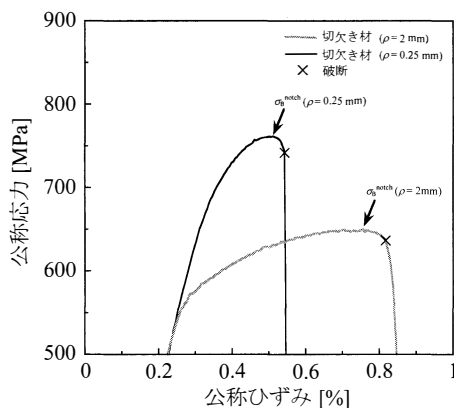
ここで、 $K_{t\dot{\epsilon}}$ は有限要素法による弾性解析で求められたひずみ速度集中係数で^{13)~15)}、本研究で用いた環状切欠き材の場合、 $K_{t\dot{\epsilon}}$ は 9.49 である。 $K_{t\dot{\epsilon}}$ の導出に関する詳細は、次回以降に記す。

4. 実験結果

図 4.1 に高 Si 球状黒鉛鑄鉄の常温、静的で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。また、表 4.1 に、各応力-ひずみ曲線中の最大強度 σ_B^{smooth} および σ_B^{notch} を一覧に整理して示す。図 4.2 には、表 4.1 に記した最大強度と切欠き底半径 ρ の関係を示す。ここでは、考察のために、図 2.2 (b) に示した $\rho=0.25 \text{ mm}$ とは別に、切欠き底半径を変えた $\rho=2 \text{ mm}$ における引張試験結果も示している。図 4.2 より、切欠き底半径が小さいほど最大強度は上昇しており、このような切欠き強化は、鋼などの延性の高い材料で広く認識されている。一般のフェライト-パーライト基地球状黒鉛鑄鉄においても切欠き強化は確認され、応力の多軸性と関連付けて考察されている¹⁶⁾。そこで、有限要素法により応力の多軸度を示す指標 η を求めた^{17), 18)}。 η は、式 (4.1) により表される。



(a) 応力-ひずみ曲線

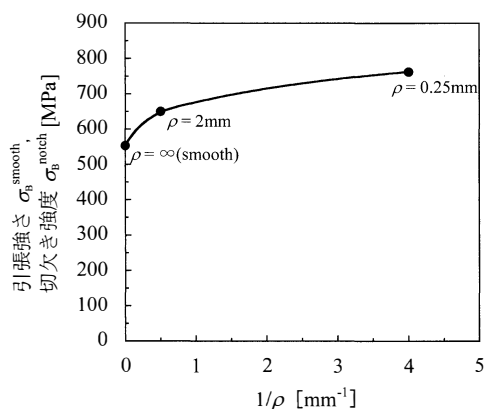


(b) 応力-ひずみ曲線中の破断領域の拡大図

図 4.1 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の常温，静的で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

表 4.1 常温，静的での平滑材と切欠き材の引張試験結果

条件			試験結果		η
切欠き底半径 ρ [mm]	温度 T [°C]	ストローク変位速度 u(t)/t [mm/s]	最大荷重 P _{max} [kN]	引張強さ σ _B ^{smooth} [MPa]	
∞ (平滑)	25 ± 1	0.01	6.8	553	1
2		0.01	8.3	650	1.29
0.25		0.01	10.0	762	1.47

図 4.2 常温，静的での引張試験における平滑材，切欠き材の最大強度 (σ_B^{smooth} および σ_B^{notch}) と 1/ρ の関係

$$\eta = 3\sigma_m / \sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)}{\sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}} \quad (4.1)$$

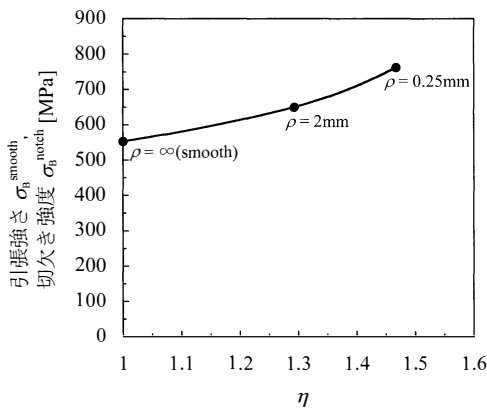
ここで，σ_m は平均垂直応力，σ_{eq} は相当応力で

ある。なお，上式では，弾性解析の結果を用いているが，例えば間島ら¹⁸⁾は，この方法で種々の鋼材に対して切欠き強化と応力の多軸性との関係を整理できている。したがって，基地組織がフェライトである高 Si 球状黒鉛鋳鉄も，同手法により切欠き強化と応力の多軸性との関連付けが定性的に可能であると考えられる。図 4.3 に，最大強度を η との関係で整理した結果を示す。図 4.3 より，η の上昇に伴い最大強度は上昇しており，切欠きにより応力の多軸性が高くなることが高 Si 球状黒鉛鋳鉄の切欠き強化に影響していると考えられる。

表 4.2 に，高 Si 球状黒鉛鋳鉄の平滑材における様々な温度と速度での引張試験結果を一覧に整理して示す。図 4.4 には，表 4.2 に記した引張強さ σ_B^{smooth} と R 値の関係を実線で示す。また，同程度の強度を有する鉄鋼材料や通常フェライト基地球状黒鉛鋳鉄の実験結果についても比較のために示した^{8), 19)}。本実験での高 Si 球状黒鉛鋳鉄の平滑材の引張強さ σ_B^{smooth} は R 値により整理で

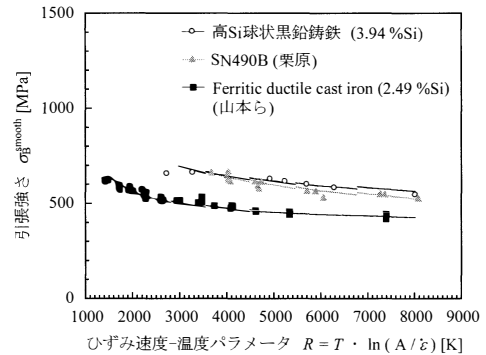
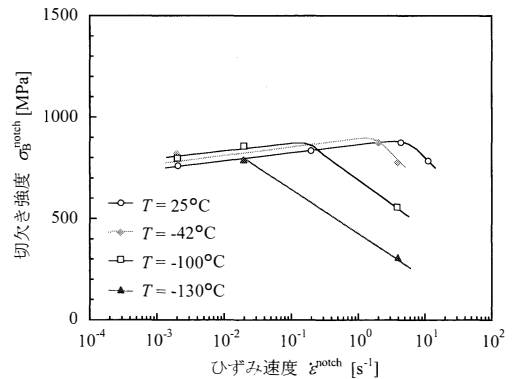
表 4.2 高 Si 球状黒鉛鉄における平滑材の高速引張試験結果

条件			試験結果		R 値 [K]
温度 T [°C]	ストローク変位速度 $u(t)/t$ [mm/s]	ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ [s ⁻¹]	最大荷重 P_{max} [kN]	引張強さ σ_B^{smooth} [MPa]	
25±1	0.01	0.0002	6.8	553	8033
	2.76	0.07	7.3	588	6292
	20.0	0.50	7.3	601	5701
	97.9	2.45	7.8	620	5237
	273	6.84	7.7	630	4921
-100±1	20.0	0.50	8.2	668	3276
-130±1	20.0	0.50	8.1	664	2726

図 4.3 常温、静的での引張試験における平滑材、切欠き材の最大強度 (σ_B^{smooth} および σ_B^{notch}) と応力の多軸度を示す指標 η の関係

きており、 R 値が低下するほど、 σ_B^{smooth} が上昇する。この σ_B^{smooth} の R 値依存性は、一般に用いられている延性の材料の鉄鋼材料やフェライト基地球状黒鉛鉄と同様の傾向である。

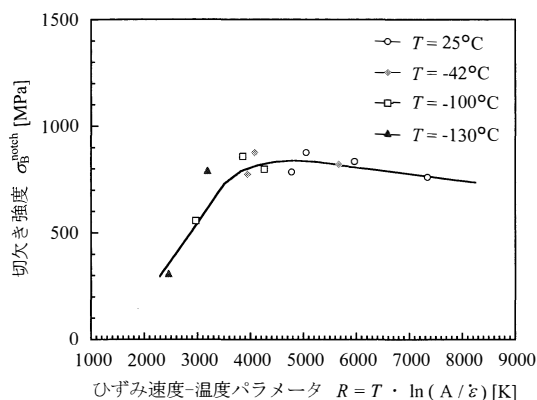
表 4.3 に、高 Si 球状黒鉛鉄の環状切欠き材における種々の温度と速度での引張試験結果を一覧に整理して示す。これまでに、図 4.4 の平滑材では、ひずみ速度と温度の影響を R 値により整理できることを述べてきた。次に、 $\rho=0.25\text{mm}$ の切欠きを設けた引張試験片の場合についても R 値による整理を試みる。図 4.5 に、 T が 25°C の他に、 -42 、 -100 、 -130°C の各温度における σ_B^{notch} と $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ の関係を示す。図 4.5 では、 σ_B^{notch} は $\dot{\epsilon}^{\text{notch}}$ の上昇に伴い大きくなるが、ある限界のひずみ速度を超えると低下する。この σ_B^{notch} が低下し始めるひずみ速度は、温度が低くなるほど小さくなっている。そこで、図 4.5 を σ_B^{notch} と R 値の関係に再整理した結果を図 4.6 に示す。図 4.6 で

図 4.4 高 Si 球状黒鉛鉄、通常のフェライト基地球状黒鉛鉄 (2.49%Si)、SN490B (鋼材) の引張強さ σ_B^{smooth} とひずみ速度-温度パラメータ R の関係^{8), 19)}図 4.5 高 Si 球状黒鉛鉄の切欠き強度 σ_B^{notch} とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_B^{\text{notch}}$ の関係

は、図 4.5 と異なり、 σ_B^{notch} は R 値に一本の曲線にまとまり、本実験範囲において、切欠き強度のひずみ速度-温度依存性の評価にひずみ速度-温度パラメータ R 値を利用できることを示唆している。

表 4.3 高 Si 球状黒鉛鋳鉄における平滑材の高速引張試験結果

条件			試験結果		R 値 [K]
温度 T [°C]	ストローク変位速度 $u(t)/t$ [mm/s]	ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$ [s ⁻¹]	最大荷重 P_{max} [kN]	引張強さ σ_B^{smooth} [MPa]	
25±1	0.01	0.0002	6.8	553	8033
	2.76	0.07	7.3	558	6292
	20.0	0.50	7.3	601	5701
	97.9	2.45	7.8	620	5237
	273	6.84	7.7	630	4921
-100±1	20.0	0.50	8.2	668	3276
-130±1	20.0	0.50	8.1	664	2726

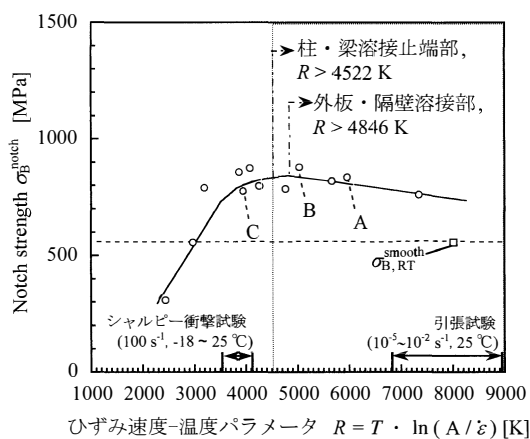
図 4.6 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の切欠き強度 σ_B^{notch} とひずみ速度-温度パラメータ R の関係

5. R 値を用いた高 Si 球状黒鉛鋳鉄の構造部材としての適用性に関する考察

図 4.6 では、 R 値の低下に伴う σ_B^{notch} ($\rho=0.25$ m) の低下が R 値 2450～4300 K の範囲で確認された。そこで、このような σ_B^{notch} の低下が溶接構造部材の設計要件として用いられる温度とひずみ速度の条件において、実用上問題となるか考察する。溶接構造部材の分野で要求されるひずみ速度や温度の部材強度特性に及ぼす影響を調査した研究は多く、ひずみ速度の上限値と温度の下限値は、表 1.1 のようにまとめることができる^{1)～3)}。これらの条件を用いて、各溶接構造部材の R 値を式 (2.3) より算出し、一般の材料試験である引張試験およびシャルピー衝撃試験における R 値とも比較した。表 1.1 より、今回の実験の範囲内においては、溶接構造部材の設計に求められる下限 R 値 4522 K と比較して、シャルピー衝撃試験に

おける R 値 3524～4118 K は低 R 値側にあり、過剰な条件であるといえる。

図 5.1 に、図 4.6 の切欠き強度 σ_B^{notch} と R 値の関係の中に、強度設計の基準として用いられる常温、静的での平滑材引張強さ $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ を破線で示す。同図には、表 1.1 での溶接構造部材の下限 R 値と引張試験、シャルピー衝撃試験における R 値の範囲も示している。図 5.1 より、 R 値 4522 K 以上の範囲において高 Si 球状黒鉛鋳鉄の σ_B^{notch} は、 $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ に比べて 30～50% 程高い。このことから、溶接構造部材で要求される R 値 4522 K 以上の範囲においては、高 Si 球状黒鉛鋳鉄品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瞬時破壊の発生に対し安全側の設計であると言える。なお、シャルピー衝撃試験は、今回の事例において、実用上の下限界を下回る R 値における評価法であり、設計強度評価法としては、その妥当性に疑問がある。

図 5.1 切欠き強度 σ_B^{notch} と常温、静的での引張強さ $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ の比較および溶接構造物の設計要件

ところで、図 5.1 では、 R 値の低下、すなわち低温、高速化によって切欠き強度 σ_B^{notch} が上昇し、ピークに達した後に低下する挙動が見られる。この挙動を以下に考察する。図 5.2 に、図 5.1 で示す切欠き材の各実験点について、破面に占めるディンプル破面の比率 f_b (延性破面率) と R 値の関係で整理した結果を示す。図 5.3 (a), (b), (c) では、図 5.2 (b) 中に示される実験点 A, B, C それぞれの試験片切欠き底部の破面 SEM 像を示している。図 5.2 および図 5.3 において、 R 値の低下に伴い f_b は減少しており、ディンプル破面領域の減少 (脆性破面領域の増加) と図 5.1 で示した σ_B^{notch} の上昇が対応している。この傾向は、例えば坂巻らの報告にあるような極低炭素鋼での事例²⁰⁾と同様である。そして、高強度な材料ほどディンプル破面の領域が小さくなり破面様相が

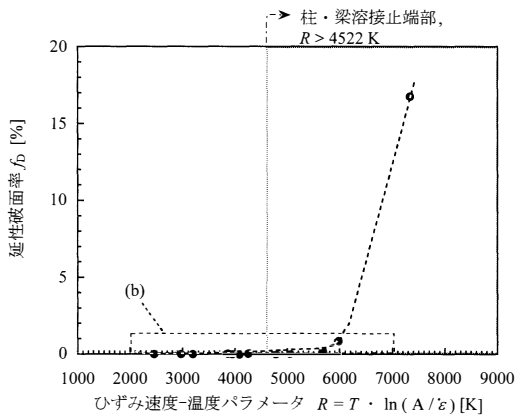


図 5.2 延性破面率 f_b とひずみ速度-温度パラメータ R の関係および溶接構造物の設計要件

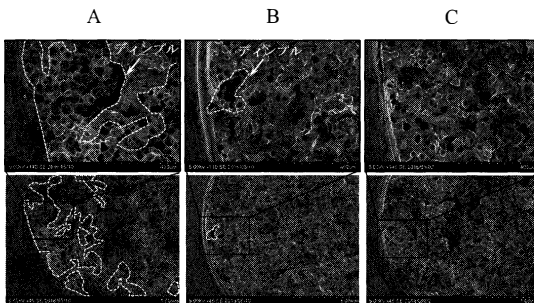


図 5.3 高速引張試験における実験点 A, B, C (図 5.1 および 5.2) の試験片破面 SEM 像

脆性的になる傾向と一致する。また、図 5.2 および図 5.3 において、 R 値 4000 K 付近でディンプル破面は完全に消失し始めており、図 5.1 における σ_B^{notch} が低下し始める R 値と一致している。このように、破面が完全に脆性的な様相を示すようになってからは R 値の低下に伴い切欠き強度 σ_B^{notch} が低下する傾向は、第 3 回で述べた V ノッチシャルピー衝撃試験片を用いた高速三点曲げ試験での報告と一致する。以上のように、高 Si 球状黒鉛鋳鉄における σ_B^{notch} の R 値依存性を破面解析の結果と関連付けることができる。

6. おわりに

本稿では、設計上において最も一般的な負荷形式である引張負荷形式に着目し、高 Si 球状黒鉛鋳鉄の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調査するために、 $T = -130 \sim 25^\circ\text{C}$ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{smooth}}$, $\dot{\epsilon}^{\text{notch}} = 10^{-4} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ の条件にて、高速引張試験を行った。そして、平滑材強度および切欠き材強度を対象に、ひずみ速度-温度パラメータ R 値による整理を試みた。また、構造部材がさらされる最も厳しい部類のひずみ速度・温度条件と比較することで、高 Si 球状黒鉛鋳鉄の構造部材としての適応性を考察した。結果をまとめると、以下の通りである。

- ① 高 Si 球状黒鉛鋳鉄の切欠き強度 σ_B^{notch} ($\rho = 0.25 \text{ mm}$) は R 値によって整理できる。すなわち、 R 値は切欠き強度のひずみ速度-温度依存性を統一的に評価するパラメータとして有用である。
- ② 船舶、建築分野など溶接構造部材におけるひずみ速度の上限値と温度の下限値の設計条件より具体的な R 値を示した。これと比較して、シャルピー衝撃試験の条件は過剰に厳しい。
- ③ 溶接構造部材の設計条件とされる R 値の範囲において、本実験では、切欠き強度 σ_B^{notch} は、常温、静的での平滑材引張強さ $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ よりも十分に高かった。この場合、高 Si 球状黒鉛鋳鉄の設計強度として $\sigma_{B,RT}^{\text{smooth}}$ の適用が可能である。

参考文献

- 1) 上田幸雄・村川英一・谷川雅之・米田尚弘・岩田節雄・後藤浩二 「衝突時における船体構造不連続部の延性破壊評価法に関する研究」, 日本造船学会論文集, 177 (1995) p.371.
- 2) 豊田政男 「材料・溶接施工からみた阪神・淡路大震災における建築鉄骨損傷: 被害から何を学ぶか」, まてりあ, 35, 4 (1996) p.370.
- 3) 岡下勝彦・大南亮一・道場康二・山本晃久・富松実・丹治康行・三木千壽: 「兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 p75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討」, 土木学会論文集, 591 (1998) p.243.
- 4) 大畑 充・澤 靖典・高嶋康人・南二三吉: 「シャルピー衝撃試験と破壊力学靱性試験の延性・脆性破壊遷移温度相関に及ぼす鋼材特性の影響の評価モデルの提案」, 日本船舶海洋工学論文集, 4 (2006) p.277.
- 5) 杉浦伸康・小林俊郎・山本 勇・西戸誠志・林 勝三 「AC4CH-T6 アルミニウム合金鑄物の衝撃引張り及び三点曲げ特性」, 軽金属, 45, 11 (1995) p.638.
- 6) 日本規格協会: JIS B 0703 鑄造品の丸み (1987) p.2.
- 7) 日本鑄造工学会編 鑄造工学便覧 (2002) p.12.
- 8) 山本 博・小林俊郎・藤田秀嗣 「球状黒鉛鑄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.
- 9) 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.
- 10) 藤井英輔・大熊 勇・川口喜昭・塚本雅敏 「鋼材の動的破壊靱性特性における温度および歪速度の影響の検討」, 日本造船学会論文集, 158 (1985) p.619.
- 11) 後藤浩二・平澤宏章・豊貞雅宏: 「ひずみ速度, 温度を考慮した構造用鋼構成方程式の簡易推定法」, 日本造船学会論文集, 176 (1994) p.501.
- 12) 南二三吉・橋田知幸・豊田政男・森川 潤・大村剛・有特和茂・菅田 登: 「ローカルアプローチの適用による構造用鋼の動的破壊靱性評価」, 日本造船学会論文集, 184 (1998) p.453.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 野口 徹: 「環状切欠きを有する鑄鉄丸棒の破断強度について」, 材料, 29, 319 (1980) p.387.
- 17) E.A. Davis and F.M. Connelly: "Stress distribution and plastic deformation in rotating cylinders of strain hardening material", Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME, 26 (1959) p.25.
- 18) 間島 保・安西政徹・中澤 一: 「延性材料の切欠き引張強さ」, 日本機械学会論文集 A 編, 52, 476 (1986) p.1171.
- 19) 栗原正好: 「鋼材の引張特性に及ぼす歪速度の影響」, 溶接学会誌, 66, 1 (1997) p.6.
- 20) 坂巻清司・稲田貞俊: 「極低炭素鋼の曲げ遷移挙動に及ぼす変形速度の影響について」, 材料, 26, 286 (1976) p.658.

(次号へつづく)