球状黒鉛鑄鉄の高温疲労強度について*

上 田 祐 男**

On Fatigue Strength of Nodular Cast Iron at Elevated Temperatures

by

Sachio UEDA

(Faculty of Engineering, Osaka City University, Osaka)

The rotating bending fatigue tests were performed on the specimens of nodular cast iron with unnotch, semicircular notch and 60° V-notch at room temperature, 150°C, 300°C, 400°C, 550°C, and 800°C with the frequency of 3 600 rpm. Their values of fatigue strength were obtained at 10^7 cycles.

The results are as follows :

(1) The fatigue strength of the unnotched specimen decreases with the rising test temperatures. At about 400°C, however, the fatigue strength takes the slightly high value due to the blue brittleness. Beyond the range of 500°C to 550°C, the fatigue strength decreases rapidly.

(2) The fatigue strength of the notched specimens decreases with the rising test temperatures. At about 300°C to 400°C, however, the fatigue strength shows a near constant value. Beyond 400°C, the fatigue strength decreases rapidly.

(3) The value of fatigue notch factor gradually increases with the elevating temperatures above room temperature and then increases rapidly beyond about 400°C to 500°C.

(Received Feb. 12, 1974)

1 緒 言

鑄鉄は複雑な形状の部品をたやすく、しかも安価に生産することができる上に被削性や耐摩耗性もよいなどの利点のため、最近鑄鉄材も繰返し荷重を受ける箇所の機械構造用部材として使用されるようになってきた。それに伴って、鑄鉄の疲労強度に関する研究も数多く報告されている^{1)~4)}。球状黒鉛鑄鉄は、その機械的性質が、鋼と鑄鉄の中間に位し、鋼の特性である高度の強度、じん性や延性も具備しており、その疲労強度は鋼材のそれに比して低く、また外部切欠きに対する切欠き感度が鈍いということが実験的に知られており⁵⁾、鑄鉄中の表面に存在する黒鉛による表面あらさや黒鉛が内部切欠きとして作用するからとしている。

本研究は、球状黒鉛鑄鉄の平滑材と2種類の切欠き試験片について、常温より800°Cの間の温度で、回転曲げ疲労試験を行ない、高温における疲労強度や切欠き係数に対する温度依存性について、明らかにしたので報告する。

2 供試材ならびに試験方法

供試材は球状黒鉛鑄鉄で、使用した素材は厚さ35 mm、幅270 mm、長さ750 mmの板状に鑄造したものであり、これより試験片を削り出した。試験材の化学成分と室温における静的強度をTable IおよびIIに示す。この材料の顕微鏡組織はFig. 1に示すようにパーライト基地に球状黒鉛が分布し、その黒鉛の周囲をフェライトで囲んだいわゆるブルスアイ組織を示している。

Table I. Chemical composition of the material. (%)

C	Si	Mn	P	S	Mg
3.50	2.82	0.47	0.0042	0.016	0.059

Table II. Mechanical properties of the material investigated.

	Yield point (Kg/mm ²)	Ultimate tensile strength (Kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (H _R B)
As cast	42	64.2	5.1	81

* 原稿受理 昭和49年2月12日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本町

Fig. 1. Typical microphotographs of the nodular cast iron.

Fig. 2. Shapes and sizes of specimens.

疲労試験片はFig. 2に示した形状寸法に機械加工した後、鋳放しの状態で使用した。平滑試験片は高温での温度分布や、温度測定を正確にするために平行部を設けずに大きな曲率半径をもった試験片とした。切欠き試験片の形状係数は、半円切欠きでは、 $\alpha_K=1.65$ 、V形切欠きでは $\alpha_K=2.15$ である。いずれの試験片とも切削加工後エメリー紙で研磨を行なった。

疲労試験機は片持梁型回転曲げ疲労試験機を使用し、試験片の中央近傍に取り付けた熱電対によって炉内雰囲気温度を測定して試験温度とした。試験条件としては室温、150℃、300℃、400℃、550℃、および800℃とし、3600 rpmの繰返し速度のもとで試験を行なった。

3 実験結果およびその考察

3・1 疲労試験結果

それぞれの形状の試験片について得られた高温回転曲げ疲労試験の結果をS-N曲線で示すとFig. 3~5のようである。試験温度が高温になるにつれて、疲労強度は低下するが、S-N曲線の形状についてはそれほど大きな変化を示さないが、切欠き試験片においては、800℃の高温では 10^7 サイクルに至る広い繰返し数の範囲において、傾きのゆるやかな直線性をもって変化

Fig. 3. S-N curves for unnotched specimens of nodular cast iron in rotating bending fatigue test.

Fig. 4. S-N curves for semicircular notched specimens of nodular cast iron in rotating bending fatigue test.

Fig. 5. S-N curves for 60° V-notched specimens of nodular cast iron in rotating bending fatigue test.

し平滑材にはみられない結果となっている。

Fig. 6は 10^5 、 10^6 および 10^7 サイクルにおけるそれぞれの形状の試験片についての疲労強度の温度依在性について示したもので、疲労強度は温度上昇につれて減少するが平滑試験片では400℃付近に現われる疲労強度の上昇は青熱現象のためと考えられ、切欠きを付けることにより高温側に移動し、半円切欠きでは550℃付近に現われている。このように400~500℃に

Fig. 6. Relationship between fatigue strength and test temperature.

において疲労強度に極大値が存在することは軟鋼などの高温疲労試験の結果にも現われることが確認されている^{6,7)}。さらに切欠きの鋭い 60°V 形切欠きにおいては、前者のような疲労強度の上昇がみられず半円切欠きと全く異なった状態を示し、V 形切欠き材の特徴ある挙動を示している。

Fig. 7 は、このように試験片の形状が異なったときの 10^7 時間強度の温度依存性を一つの図にまとめたものである。試験温度上昇に対する 10^7 時間強度の変化の傾向は平滑試験片、切欠き試験片とも大体よく似た状態とみなせるが、400°C 以上の高温になれば切欠きが鋭くなると 10^7 時間強度の減少が著しくなる。また 500°C をすぎれば 10^7 における時間強度は急激に減少し 800°C では $\sigma_w = 1 \text{ kg/mm}^2$ となっている。これらの傾向は普通鉄鋼やオーステナイト・ステンレス鋼に対する回転曲げの高温現象とよく似た性質を示している¹⁾。

Fig. 7 に示すかたさ曲線は、 10^7 サイクルの疲労試験後の断面の常温におけるかたさを測定したもので、550°C 以上の試験温度では急激な低下を示している。このことは高温長時間の試験による時効、および析出による組織変化に伴う材質劣化などの影響と考えられ、パーライト組織の球状黒鉛鉄に対する高温における

Fig. 7. Influence of the high temperature on the fatigue strength (at 10^7 cycles) and room temperature hardness H_{RB} of specimens fatigued (at 10^7 cycles) at test temperature.

引張強度も同様な傾向を示している。

3・2 切欠き係数

平滑試験片の疲労強度と、切欠き試験片の疲労強度

Fig. 8. Relationship between fatigue notch factor β_K and the test temperature.

Fig. 9. Relationship between fatigue notch factor β_K and the stress concentration factor α_K .

との比として与えられる切欠き係数 β_K が試験温度によってどのように変化するかを示したのが Fig. 8 である。切欠き係数の温度依性は常温より 300℃付近まではあまり変化がなく $\beta_K=1.6$ 程度であり、破壊までの繰返し数による相違はごくわずかしき認められない。しかし青熱ぜい性を示す温度と考えられる 400℃付近で、半円切欠き材はやや高い切欠き係数を示すが、550℃で再び300℃とほぼ同じ値となるが、高温の 800

℃では切欠き係数は急激に高い値を示す。一方 60°V 形切欠き材においても半円切欠き材と同様繰返し数の多いものほど高い値を示し、800℃における 10^7 サイクルでは $\beta_K=6$ と非常に大きい切欠き係数を示しており、青熱ぜい性温度以上の高温では切欠き係数が急激に上昇し高い値となっている。

つぎに 10^7 サイクルにおける切欠き係数 β_K と形状係数 α_K との関係を温度をパラメータとして示したの

(a) 400℃, $\sigma=30 \text{ kg/mm}^2$, $N=7.5 \times 10^5$.

(b) 500℃, $\sigma=25 \text{ kg/mm}^2$, $N=5.63 \times 10^5$.

(c) 800℃, $\sigma=20 \text{ kg/mm}^2$, $N=4.11 \times 10^4$.

(d) 800℃, $\sigma=15 \text{ kg/mm}^2$, $N=1.44 \times 10^5$.

Fig. 10. Photomicrographs of cross section of fatigued specimens.

がFig. 9であり、常温より 400℃の温度範囲においては、半円切欠きに対する $\alpha_K=1.65$ 付近までは切欠き係数と形状係数は、ほぼ同じ値を示すが、それ以上の鋭い切欠きに対しては、しだいに切欠き係数は飽和していく傾向を示している。一方550℃では形状係数 $\alpha_K=2.16$ を越すような鋭い切欠きに対しては飽和することなく $\alpha_K=\beta_K$ の直線に接近し、まだまだ増大する傾向を示している。さらに 800℃の高温になれば急激に増大し、半円切欠きの $\alpha_K=1.65$ に対して、 $\beta_K=4.0$ 、60°V 切欠きの $\alpha_K=2.15$ に対して、 $\beta_K=6.0$ と高い値を示す。すなわち常温より 400℃付近までは切欠きの形状によって著しい相違はみられないが、550℃以上の高温になれば、破壊までの繰返し数が大いほど高い切欠き係数を示しており、試験温度が常温より 400℃付近までは切欠きの影響による強度の不安定はそれほど大きくはなく、ほぼ安定した高温強度を示すと考えられる。

3・3 高温におけるき裂の観察

疲労破壊の過程は、き裂の発生と、その伝ば過程に分けることができるので、高温疲労強度に及ぼす疲労過程中的各温度における組織変化と、き裂の発生や、伝ばとの影響を調べるため、試験後の断面を光学顕微鏡で観察し、き裂の状態について調べた。その結果各温度とも平滑試験片では 10^6 サイクルの疲労強度よりも比較的高い応力で破壊した試験片は、破断部近くにもき裂が観察された。その一例として Fig. 10 に示したのは破断部近くのき裂の写真で、(a)は400℃で、 $\sigma=30 \text{ kg/mm}^2$ 、 $N=7.5 \times 10^6$ で破断した破断部近くに観察されたき裂を示したもので、表面層のフェライトとパーライトとの境界近くが発生したき裂は、フェライト結晶粒内を伝ばし隣接したフェライト部分の間を結ぶようにジグザグに進んでいる。一方(b)の 550℃においては表面層のフェライト部分にき裂が発生し、黒鉛を結ぶように伝ばし、パーライトに突き当たって数本のき裂に分岐している。800℃の高温においては、繰返し応力の高いときは(c)に示すように表面のパーライト部分にき裂が発生し、軸心に向かって伝ばしているが、応力が低くなると(d)に示したように表面のフェライトのごく近くの黒鉛部に発生したき裂はパーライトに突き当たって数本のき裂に分岐し隣接の黒鉛部へと伝ばしている。

高温における球状黒鉛鑄鉄の表面に発生する疲労き裂はフェライト部分か、あるいはフェライトとパーライトの境界部分よりき裂が発生しているのが観察された。

各温度で、 10^7 に耐えた平滑材あるいは切欠き材の断面を観察したが、き裂は認められなかった。黒鉛がフェライトに囲まれているような鑄鉄では形状係数が

Fig. 11. Photomicrographs of notch root section and inner section.

$\alpha_K=2.5$ 位より大きい切欠きの場合にのみ停留き裂¹⁰⁾が発生するようであり、本実験に使用した形状係数の試験片では停留き裂はみられなかった。その一例として Fig. 11 (a)は550℃で 10^7 サイクルで破壊しなかった切欠き部の断面組織で、切欠き底は強度の低いフェライトあるいは応力集中源となる黒鉛であるにもかかわらず停留き裂は認められなかった。(b)は 800℃で 10^7 付近で破壊した試験片の内部組織で、球状黒鉛とフェライト部分よりなっている。これは共析組織を作っているパーライト中のセメンタイトが温度の上昇と長時間(46時間= 10^7 サイクル)の加熱に従い遊離し、層状のパーライト中のセメンタイトが消え、フェライトだけになったためで、これがためFig. 7に示すようにかたさは550℃付近より急激に低下しており、800℃における疲労強度の急激な低下も組織変化による材質劣化と表面層の高温腐蝕のためでないかと考えられる。

4 結 言

高温における球状黒鉛鑄鉄の回転曲げ疲労強度に及ぼす温度、形状係数や切欠き係数、繰返し曲げ応力などを変数とした図より、種々の考察を加え次の事項が明らかとなった。

(1) S-N曲線はいずれの試験片とも550℃まではほとんどよく似た曲線であるが、800℃ではS-N曲線はすべての繰返し数の範囲で直線的な関係を有し、切欠きが鋭くなるにつれて傾斜がゆるやかとなっている。

(2) 球状黒鉛鑄鉄に対する切欠き係数の温度依在性としては、常温より400℃までは変化はわずかで、550℃付近より温度上昇とともに切欠き係数は急激に増加し、繰返し数の多いものほど高い値を示す。

(3) 各形状の試験片の疲労強度の温度依在性は平滑材で 400℃において顕著に現われる青熱ぜい性現象が、切欠き材では 550℃付近の高温側に移行し、切欠きが

鋭くなると消滅するに至る。

(4) 切欠き係数と形状係数の関係は常温より 550℃の温度範囲においては $\alpha_K > \beta_K$ であるが、800℃の高温になると $\alpha_K < \beta_K$ となり平滑試験片に対して切欠き試験片の高温疲労強度が著しく低下することは、高温による組織変化による材質劣化や、高温腐蝕による切欠き効果が著しいためと考えられる。

(昭和42年9月8日 第11回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

1) Pope, J. A., "Metal Fatigue", p. 220 (1959) Chapman & Hall

- 2) 大橋正昭, 黒沢正義, 小松康彦, 鋳物, **42**, 634 (1970).
- 3) 新美 格, 大橋正昭, 小松康彦, 鋳物, **43**, 101 (1971).
- 4) 森田正俊, 機会学会誌, **63**, 1656 (1960).
- 5) 石橋 正, 材料試験, **1**, 26 (1952).
- 6) 河本 実, 田中道七, 三宅光憲, 機械学会論文集, **27**, 403 (1961).
- 7) 舟久保照康, 西島 敏訳, "金属の疲れ", p. 384 (1973) 丸善
- 8) 金沢健二, 吉田 進, 材料, **22**, 257 (1973).
- 9) Gilbert, G. N. J., Found. Trade. J., 120, 667 (1966).
- 10) 石橋 正, "金属の強さ", p. 167 (1961) 養賢堂