

鑄鋼の疲労特性に及ぼす過大荷重の影響

林 忠夫*・大島 聰範**・桑原 克典***

Effect of Overload on the Fatigue Properties of Cast Steel

Tadao HAYASHI, Toshinori OSHIMA and Katsunori KUWAHARA

Abstract

The progress speed of a fatigue crack may decrease after the overload was applied, in the metal material with which the repetition load is carried out. In this research, the effect of the overload on the fatigue properties of S45C cast steel made by continuous casting process has been investigated. The fatigue life was remarkably prolonged by giving single overload as a result of the fatigue testing by bending stress.

1. はじめに

実際の機械・構造物が受ける荷重は不規則であり、一定振幅の繰返し荷重のなかに数回の疲労限度以上の荷重(応力)が加わることもある。この過大荷重は疲労き裂進展に影響を与え、過大荷重の負荷後にき裂進展の遅延現象が生じる。この原因としてき裂先端付近の残留応力、き裂先端の鈍化、き裂開閉口現象などが考えられる¹⁾。このような変動荷重のもとでの微視的停留き裂の挙動に及ぼす過大荷重の影響に関する研究^{2) 3)}は多数報告されている。そこで本実験では、残留応力による遅延現象を疲労特性の改善に積極的に利用することを考慮して、微小欠陥が存在する鑄造材の疲労試験およびき裂進展速度試験を行い、疲労寿命に及ぼす過大荷重の影響について若干の検討を行った。

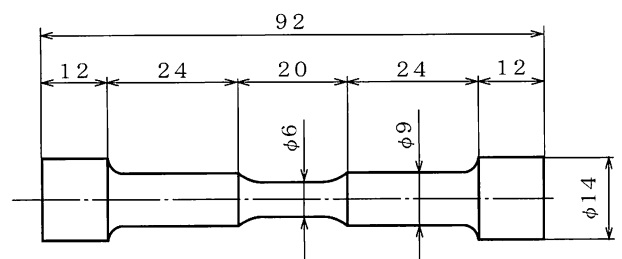
2. 供試材および実験方法

本実験に使用した材料は、S45C相当の連続鑄造材のブルームである⁴⁾。表1にその化学成分を示す。このブルームから欠陥率の違う材料を切り出し⁴⁾、旋削および機械加工した。図1に(a)引張り疲労、(b)三点曲げ疲労、(c)き裂進展速度試験片の形状および寸法を示す。疲労試験(引張り、

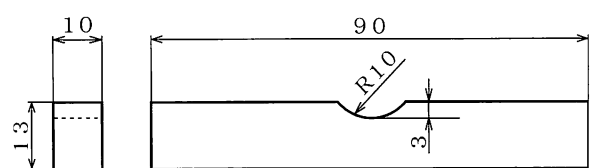
三点曲げ)および疲労き裂進展速度試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機で応力比 $R=0.1$ 、繰返し速度20Hzの片振り引張りおよび圧縮荷重条件下で行った。なお、過大荷重はき裂進展速度の途中で試験を中断して手動で加えた。き裂長さは読み取り顕微鏡で測定した。圧縮残留応力の測定はX線回折装置(ストレインフレックスMSF-2M)で行なった。表2にX線回折の測定条件を示す。

表1 供試材の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr
0.42	0.19	0.75	0.023	0.020	0.033	0.01	0.017	0.032



(a) 引張り疲労試験片



(b) 曲げ疲労試験片

* 技術専門職員 技術室(機械実習工場)
** 名誉教授 苫小牧工業高等専門学校
*** 技術職員 技術室(機械工学科)

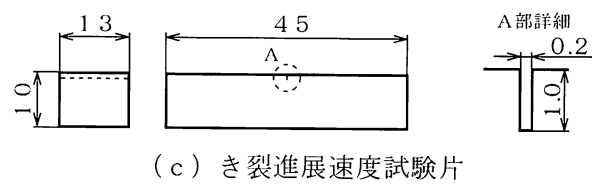


図1 試験片の形状および寸法

表2 測定条件

X線管球	Cr(クロム)
Kβフィルタ	V(バナジウム)
電流・電圧	30kV・10mA
スリット	DS=1° , RS=1° (シュルツスリット)
測定法	側傾法
φ0角	0° ~ 40° , 5° 間隔
測定面	α-Fe(211)Kα

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験

図2に引張りにおける応力振幅 σ_a と破断繰返し数 N_f との関係を示す。低欠陥材(欠陥率0.2%)では過大荷重を負荷すると、応力振幅が260MPaおよび300MPaで破断繰返し数がほぼ同じであるが、高欠陥材(欠陥率2.2%)においては応力振幅が200MPaおよび240MPaで若干寿命が延びるが、このように引張り条件下では過大荷重の影響が小さい。

図3に三点曲げにおける応力振幅 σ_a と破断繰返し数 N_f との関係を示す。低欠陥材での応力振幅 $\sigma_a=380\text{MPa}$ では、塑性歪み $\epsilon=3.81\%$ で $N \approx 1000$ 回、 $\epsilon=0.92\%$ で $N \approx 2000$ 回、 $\epsilon=0.36\%$ では $N \approx 5 \times 10^6$ 回でも破断しない。高欠陥材での応力振幅 $\sigma_a=340\text{MPa}$ では、塑性歪み $\epsilon=0.74\%$ で $N \approx 1000$ 回、 $\epsilon=0.49\%$ で $N \approx 2000$ 回、 $\epsilon=0.41\%$ で $N \approx 3000$ 回と塑性歪みが小さいほど寿命が大幅に延びる。このように曲げ応力条件下において、疲労寿命に及ぼす過大荷重の影響が明瞭に現れる。

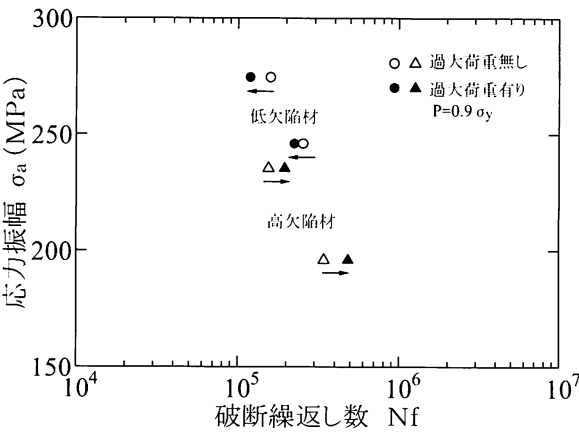


図2 引張り条件下における疲労寿命

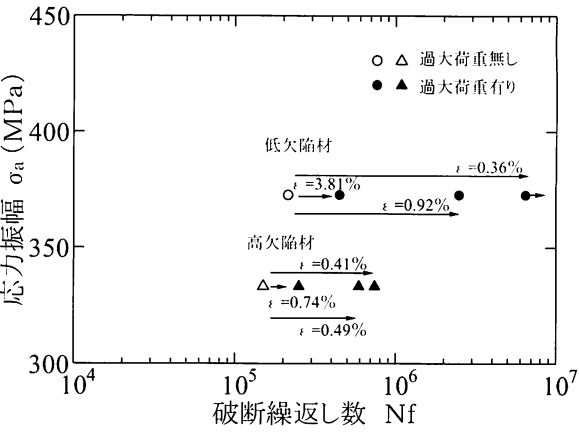


図3 曲げ条件下における疲労寿命

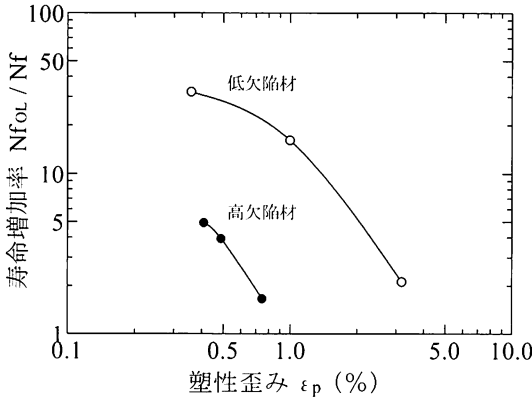


図4 塑性歪みと寿命増加率との関係

ここで、過大荷重を与えない場合の寿命 N_f と過大荷重を与えた場合の寿命 N_{fOL} の比を寿命増加率 N_{fOL}/N_f として表す。図4に塑性歪み ϵ_p と寿命増加率 N_{fOL}/N_f との関係を示す。塑性歪みが0.4%付近で寿命増加率は最大になる。このように疲労寿命の向上には塑性歪み、すなわち残留応力が影響していると考えられる。

3.2 応力測定

試験片の切欠き底(R溝)の圧縮残留応力をX線回折により測定した。図5に塑性歪み0.3%の残留応力の測定結果を示す。図6に圧縮残留応力 σ_r と塑性歪み ε_p との関係を示す。塑性歪みが0.5%付近から圧縮残留応力が一定の値になる。本節では0.4%の塑性歪みを与えたので、圧縮残留応力 σ_r は約350MPa発生していると考えられる。

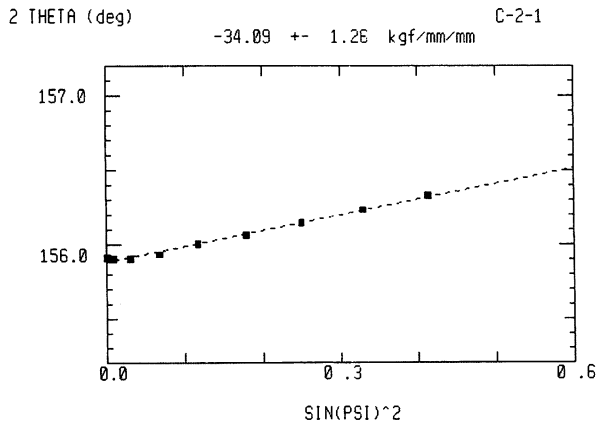


図5 残留応力の測定結果

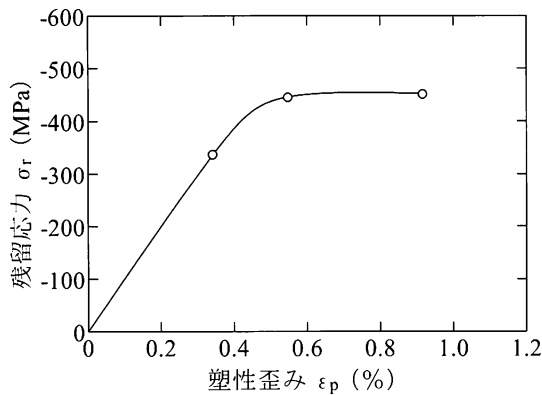


図6 塑性歪みと圧縮残留応力との関係

3.3 疲労き裂進展速度

図7に応力振幅380MPaで試験を行ったときのき裂長さ a と繰返し数 N との関係を示す。き裂長さが約2.2mmの地点で単一の過大荷重(P)を1.0Pyを負荷したところ、過大荷重を負荷後、暫くしてA点からB点で遅延現象が生じき裂進展の速度が鈍化した。このことは、この時点に圧縮残留応力場が発生しているものと考えられる。なお、図中の破線は過大荷重を負荷しないときのき裂進展曲線を表す。

次に図7の疲労き裂進展曲線から進展速度 da/dN を求め、応力拡大係数幅 ΔK との関係を図8に示す。応力拡大係数幅 ΔK の算出には次式を用いた⁵⁾。

$$\Delta K = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/W) \cdots (1)$$

$$\sigma = 3SP / 2W^2$$

$$a/W = \xi \quad \text{とおくと}$$

$$F(\xi) = A_0 + A_1 \xi^1 + A_2 \xi^2 + A_3 \xi^3 + A_4 \xi^4$$

ここで、P：単位厚さあたりの力、a：き裂長さ、S：スパン、W：試験片幅である。

応力拡大係数幅 $15\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ で進展速度が急激に低下し折れ曲がった曲線になる。

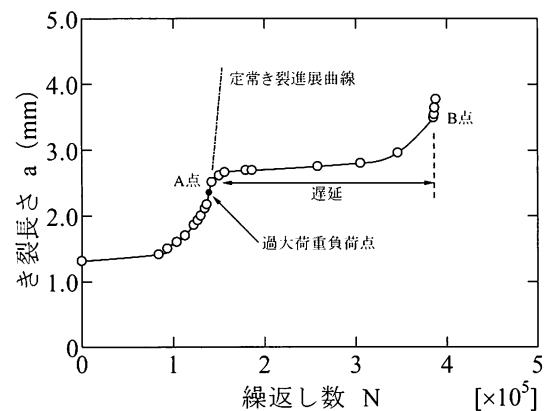


図7 疲労き裂進展曲線

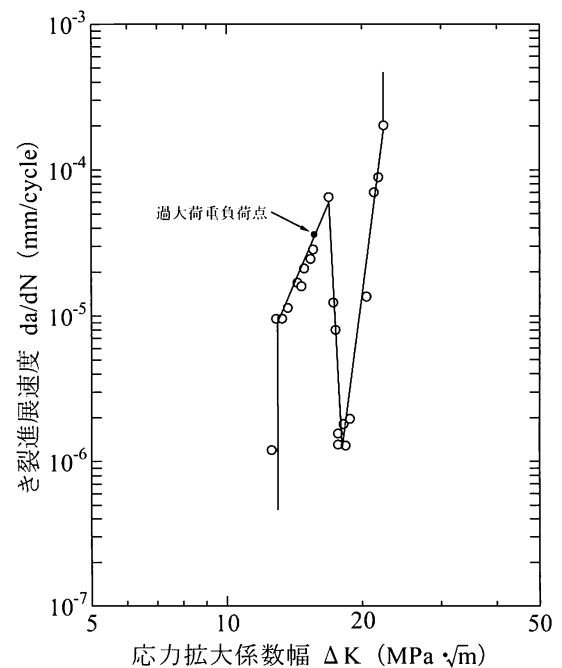


図8 応力拡大係数幅とき裂進展速度との関係

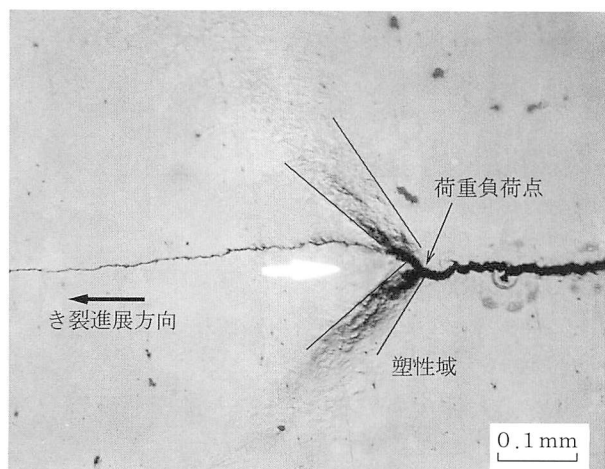


図9 き裂先端における塑性変形の様子

図9に過大荷重によるき裂先端の塑性変形の様子を示す。この写真より、過大荷重を負荷した地点(図中の矢印)から約0.05mmのところでひずみ模様が發生し、遅延現象が觀察される。

4. おわりに

S45C連続鋳造材の疲労特性に及ぼす過大荷重の影響について検討し、次の結果が得られた。

- (1) 曲げ応力条件下では、過大荷重を与える事により疲労寿命が延びた。
- (2) 過大荷重を負荷後、暫くして遅延現象が生じき裂進展の速度が鈍化する。

以上、微小欠陥が存在する鋳造材のような部材では、その欠陥の状態や応力集中の程度はそれぞれ異なるため、それに適した過大荷重を負荷することが重要であると考えられ、今後の検討課題である。

謝 辞

使用した材料は、新日本製鐵(株)室蘭製鐵所より提供されたものである。また、X線回折による圧縮残留応力の測定は、理学電機(株)において行われたものである。各位のご厚意に深く感謝の意を表します。本研究を卒業研究として実験に協力された前田憲一氏に感謝します。なお、本稿をまとめるにあたり、機械工学科高澤幸治助教授にご指導、ご助言いただいたことを記し感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中沢一，本間寛臣：金属の疲労強度，(株)養賢堂 pp. 98～127
- 2) 陳玳珩，西谷弘信，赤崎正幸：機論，52-481，A(昭61-9)，p. 2162
- 3) 陳玳珩，西谷弘信：機論，52-481，A(昭61-9)，p. 2167
- 4) 大島聡範，林忠夫：苫小牧高専紀要，第19号，1984，p. 1
- 5) 岡村弘之：線形破壊力学入門，(株)培風館，p. 218

(平成17年12月1日受理)