

微小欠陥を有する鑄造材の疲労強度を表わす適切なパラメータについて

大 島 聡 範*・林 忠 夫**

An Appropriate Parameter Expressing Fatigue Strength of Defective Cast Materials

Toshinori OHSHIMA* and Tadao HAYASHI**

Abstract

An appropriate parameter including fracture strain was successfully applied for correction of scattering data on the proportionality of fatigue strength to tensile strength in defective cast steel.

The validity of the parameter was confirmed experimentally using artificially defective test specimens.

1. 緒 言

材料の強度特性評価において、各特性値の相互関係を知ることは極めて重要であり、特に疲労強度設計の立場から、引張り強さ σ_B と疲労強度 σ_w の関係が注目されてきた。

σ_B と σ_w の間には一般に良好な比例関係が成立し、この比例定数 $\mu = \sigma_w / \sigma_B$ は、疲労限度比として強度設計の基礎データに用いられている¹⁾。しかしながら、この関係は、圧延材または鍛造材においては十分に成立するが、鑄造材においてはデータのばらつきが大きく、満足すべき結果を得ることができない²⁾。これは鑄造材においては、内在する微小凝固欠陥に対する感受性が、 σ_B と σ_w では大幅に異なることが原因であろうと思われる。したがって、鑄造材の σ_B と σ_w の関係を整理するにあたっては、単なる σ_B ではなく、欠陥の影響を加味した適切なパラメータを用いることが必要であると考えられる。

本論文は上述の観点から、微小欠陥の影響を加味した適切なパラメータを用いて鑄鋼における σ_B と σ_w の関係を整理し、その妥当性を人工欠陥試験片によって実験的に検証した結果を述べたものである。

2. 鑄鋼の疲労強度と引張り強さおよび破断延性の関係

図1は著者らの実験結果³⁾と既存の多くの報告^{2)4)~7)}をあわせて、鑄鋼の疲労強度 σ_w と引張り強さ σ_B の関係を示したものである。全体としては σ_B の大きいものは σ_w も大きく、両者は比例関係にあると言えるが、データのばらつきは非常に大きく、左右に分れる傾向を示している。ここで図の中央に分布する△印のデータは焼鈍材および焼準材であり、この場合、 σ_w および σ_B の値は材質と熱処理条件によって決まるが、鑄造凝固条件が明らかではないので欠陥率は不明であり、その結果 σ_w と σ_B の関係は鑄鋼特有のばらつきの大きい比例関

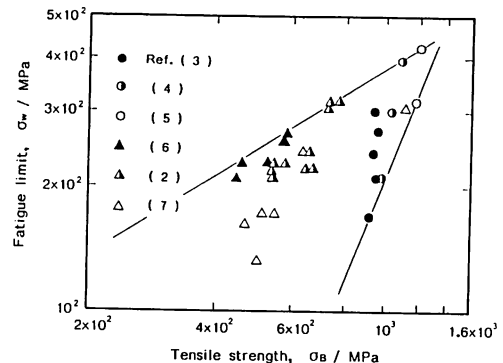


図1 鑄鋼の疲労限度と引張り強さの関係

* 教 授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

係として表わされる。これに対して図の右側に分布するデータ群は調質材であり、各データグループ内では材質および熱処理条件は同一であるが、鑄造凝固条件が異なるので欠陥率に差異を生じ、それにともなって σ_w も異なった値となる。ここで σ_w と σ_B の関係が垂直に近い急勾配の直線となることは、 σ_w が欠陥に対する感受性が大きいのにに対して、 σ_B は欠陥によってほとんど影響されないためであると理解される。すなわち鑄鋼では、凝固条件によってもたらされる欠陥の影響が、 σ_w と σ_B では著しく異なるので、この両者を単なる比例関係にあてはめて整理しても良い結果を得ることはできない。

従来、鑄鋼における σ_w と σ_B の比例関係が、圧延、鍛造材と比べてばらつきが大きいことの原因は、漠然と鑄鋼に内在する凝固欠陥や材質の不均一性に起因するものとされてきた。しかし、著者らのこれまでの研究によれば、前述したようにこの原因は、欠陥に対する感受性が σ_w と σ_B では著しく異なっていることによるものと考えられる。すなわち、 σ_w は基本的には σ_B に比例するものであるが、欠陥に対する感受性が σ_w と比べて非常に大きいので、この両者を単なる比例関係として整理することは無理であると考えられる。したがって、ここでは単なる σ_B ではなく、 σ_w と同様に欠陥に対する感受性の大きな特性をあわせて取り入れた、適切なパラメータを設定することが必要である。

図2⁸⁾は中炭素鑄鋼調質材の引張り特性に及ぼす欠陥の影響を示す。ここで欠陥率 R_s は引張り破断面上の欠陥面積を A_s 、破断面の面積を A_t として、 $R_s = A_s/A_t$ である。 R_s の増加にともなって破断延性を ϵ_f は減少するが、引張り強さ σ_B は $R_s < 0.08$ ではほぼ一定であり、欠陥の影響は小さい。すなわち欠陥に対する感受性は ϵ_f では大きく σ_B では小さい。

そこで、 σ_w と同様に欠陥に対する感受性の大きい特性として ϵ_f に着目し、 σ_B とあわせてパラメータを構成して、 σ_w との関係を整理事をを試みた。

図3はこのような観点から、縦軸の σ_w に対して横軸には $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ なるパラメータを用いて図1のデータを再整理したものである。その結果、図1で左右に大きく分れてばらついていたデータは、すべて所定の直線関係の範囲内に収まって統一的に整理され、とくに、図1の右側部分に分布していた調質材のデータは、ほとんど一本の直線で表わされる。したがって、これらの結果より $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ は、鑄

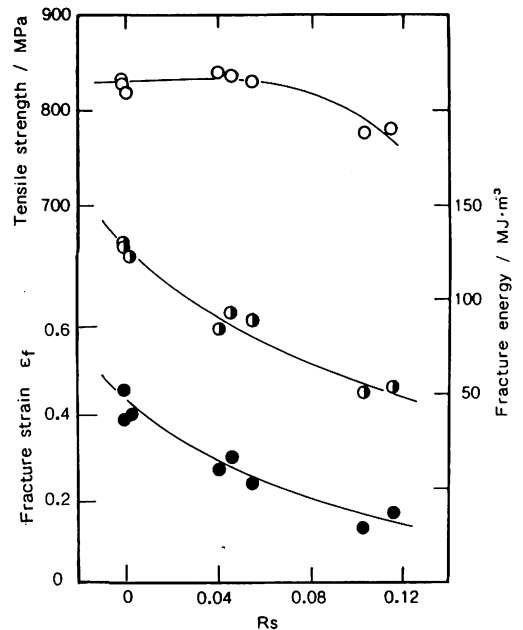


図2 中炭素鑄鋼の引張り特性と欠陥率 R_s の関係

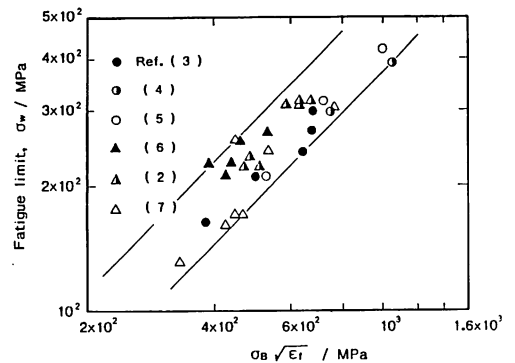


図3 鑄鋼の疲労限度とパラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ の関係

鋼の疲労強度を表わすパラメータとして簡便かつ適切なものであることがわかる。

図3より鑄鋼の疲労限度は次式で表わされる。

$$\sigma_w = C(\sigma_B \sqrt{\epsilon_f})^r \quad (1)$$

ここで C および r は定数であり、図3においては $C \approx 0.4 \sim 0.7$, $r \approx 1$ を得たが、その意味については明確ではなく、今後さらに検討が必要である。

以上により、欠陥を有する鑄鋼の疲労強度と引張り強さの比例関係におけるデータのばらつきは、破断延性 ϵ_f を含むパラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ を用いることによって適正化されることを明らかにした。

3. 人工欠陥試験片の疲労強度と引張り強さおよび破断延性の関係

前章において、鋳造材の疲労強度と引張り強さの比例関係におけるデータのばらつきは、 $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ をパラメータとして適正化できることを示した。本章ではこれを実験的に検証することを目的として、人工欠陥を有する試験片について引張り試験および疲労試験を行なった。

供試材は S25C 炭素鋼の熱間圧延材と、7-3 黄銅および Al-5%Mg 合金の熱間押し出し材を用いた。引張り試験片および疲労試験片は図 4 に示す同一の寸法および形状である。人工欠陥としては、試験片の平行部中央にマイクロドリルで直径 0.5 mm および 0.8 mm の小孔をあけた。欠陥寸法は孔の深さで表わし、 $h=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ mm の 4 種類とした。引張り試験はロードセル型の高剛性試験機を使用し、疲労試験は回転曲げ疲労試験機を使用して行なった。

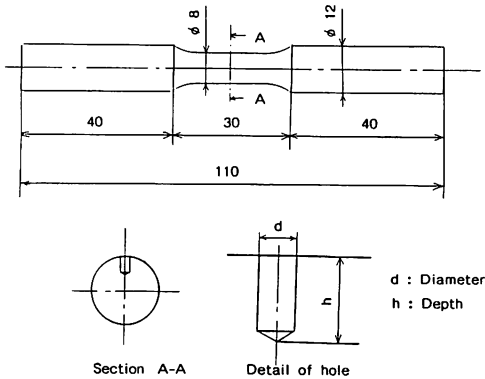


図 4 人工欠陥試験片の形状と寸法

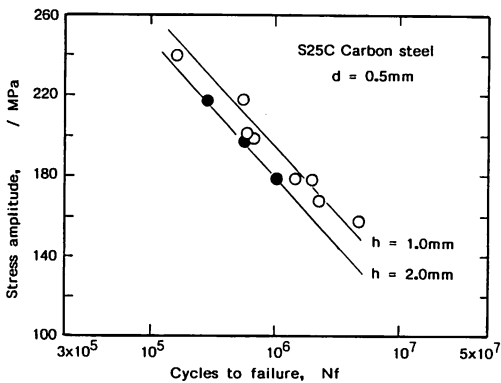


図 5 S25C 炭素鋼の S-N 線図に及ぼす人工欠陥寸法の影響

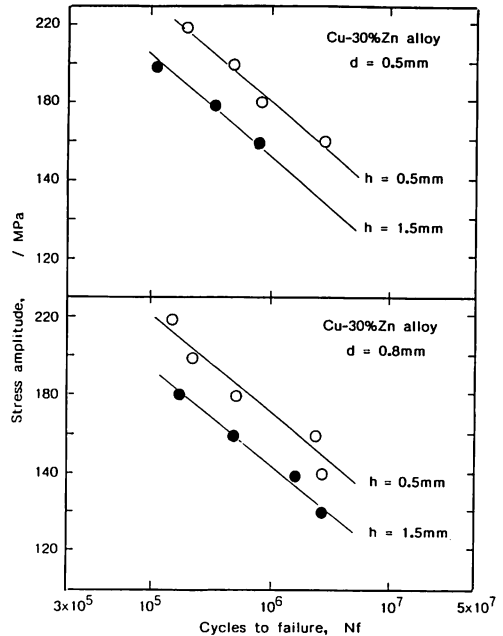


図 6 7-3 黄銅の S-N 線図に及ぼす人工欠陥寸法の影響

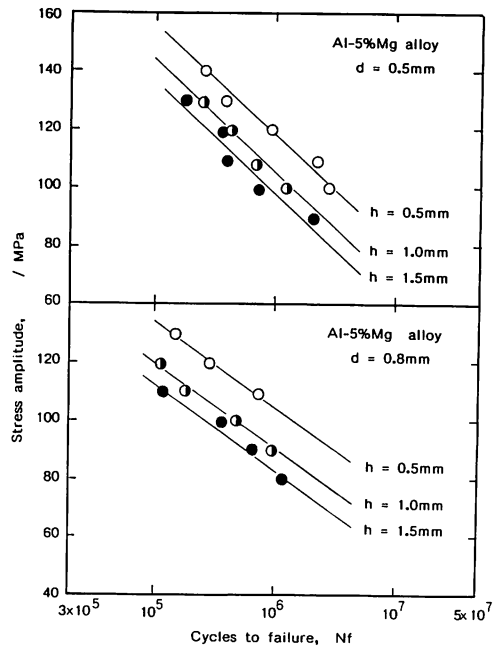


図 7 Al-5%Mg 合金の S-N 線図に及ぼす人工欠陥寸法の影響

図5, 6および7は, 炭素鋼, 7-3黄銅およびAl-Mg合金における疲労試験のS-N線図を示す。いずれにおいても欠陥寸法が増加するにつれてS-N線図は低応力, 短寿命側へ移行し, 疲労強度も低下することがわかる。ここで疲労強度としては, $N_f=5 \times 10^6$ に対応する時間強度を用いた。

図8, 9および10は, 炭素鋼, 7-3黄銅およびAl-Mg合金における引張り強さ, 破断延性および疲労強度と人工欠陥寸法の関係を示す。引張り強さは欠陥寸法が増加してもほとんど変わらず一定値を保っているが, 破断延性 ϵ_f は欠陥寸法の増加にともなって減少し, その減少傾向は疲労強度 σ_w とほぼ同様である。ここでこれらのデータから σ_w と σ_B の関係をプロットしてみれば, 図11のように同一の材料において σ_B は欠陥寸法に関係なくほぼ一定であるのに対して, σ_w は欠陥寸法によって大幅に変動するので, 両者の間に良好な比例関係を得ることはできない。これは図1における鑄鋼の場合と同様である。そこで, 前章の図3の結果にもとづいて, 横軸にパラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ を用いて図11のデータを再整理すれば, 図12に示すように材質お

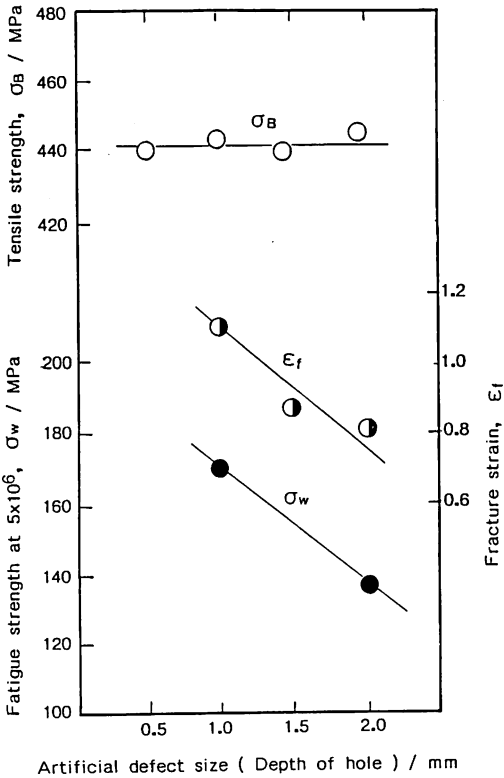


図8 S25C炭素鋼の引張り強さ,破断延性および疲労強度と人工欠陥寸法の関係

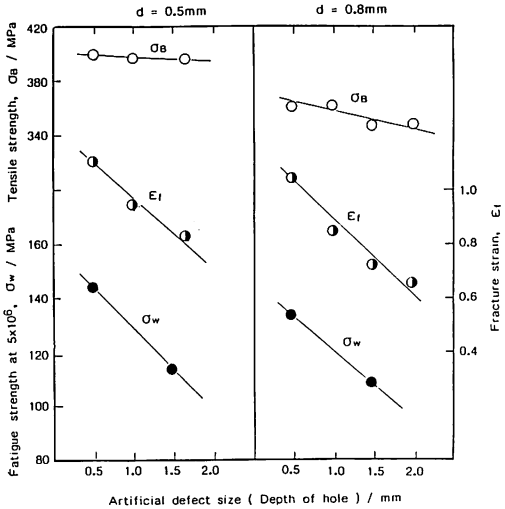


図9 7-3黄銅の引張り強さ,破断延性および疲労強度と人工欠陥寸法の関係

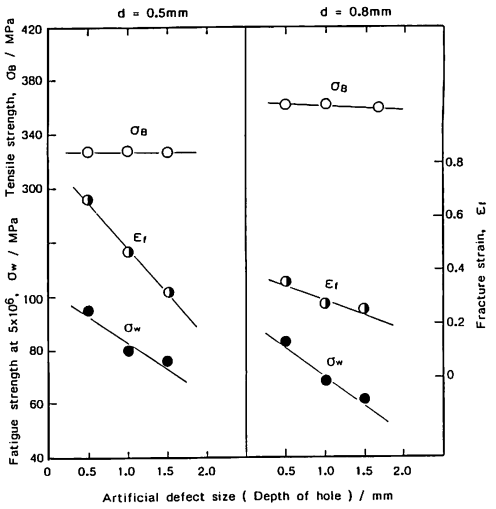


図10 Al-5%Mg合金の引張り強さ,破断延性および疲労強度と人工欠陥寸法の関係

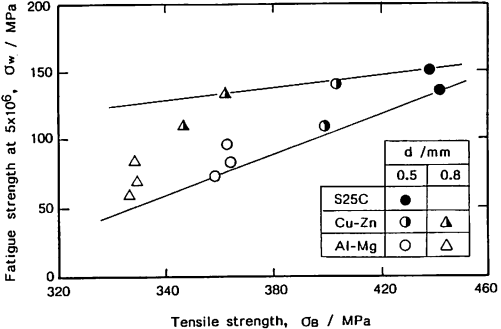


図11 人工欠陥試験片の疲労強度と引張り強さの関係

よび欠陥寸法の差異にかかわらず、すべてのデータは一本の直線で表わすことができる。

ここで図3の鋳鋼のデータと図12の人工欠陥材のデータを同一のスケールでまとめて表示すれば、図13のように両者はほぼ同一勾配の直線関係として表わされ、いずれも式(1)に適合することがわかる。以上の結果により、微小欠陥を有する材料の疲労強度を表わすパラメータとして $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ が有効かつ適切なものであることは、人工欠陥試験片を用いた検証実験によって確認された。

ここで $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ の意味は次のように考えられる。図2において ϵ_f は R_s の増加にともなって減少することを示したが、さらに ϵ_f と $R_s^{1/2}$ の関係を示せば、図14⁸⁾ のように直線関係を得る。ここで R_c は欠陥を外接円で標準化した標準化欠陥率である。図14より次式⁸⁾を得る。

$$\epsilon_f = B - AR_s^{1/2} \quad (A, B \text{ は正の定数}) \quad (2)$$

したがって ϵ_f は $R_s^{1/2}$ に対応する。ここで欠陥率 R_s は破断面上の欠陥の面積分率であるから、欠陥寸法を a とすれば R_s は a の二乗に対応するものである。よって $\sqrt{\epsilon_f}$ は $\sqrt{a}$ に対応し、パラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ は $\sigma_B \sqrt{a}$ に対応する。これは応力拡大係数 $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ と同じ形式である。以上の結果により、 $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ が疲労強度特性を表わすパラメータとして有効かつ適切なものであることが明らかにされた。

4. 結 言

鋳鋼の疲労強度 σ_w と引張り強さ σ_B の比例関係におけるデータのばらつきの原因を微小欠陥に対する σ_w と σ_B の感受性の差異に起因するものと考え、破断延性 ϵ_f を用いたパラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ で σ_w を整理して、ほぼ満足すべき比例関係を得た。

さらにこれを炭素鋼、黄銅およびAl合金の人工欠陥試験片を用いた検証実験によって確認した。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編：金属材料疲労強度の設計資料 (I), 改訂第二版, 日本機械学会, (1982).
- 2) 同 上 84.
- 3) 大島聡範, 林 忠夫, 高橋忠義：日本金属学会誌, 52(1988), 236.
- 4) R. F. Polich and M. C. Flemings: Modern Castings, 65 (1965), 84.

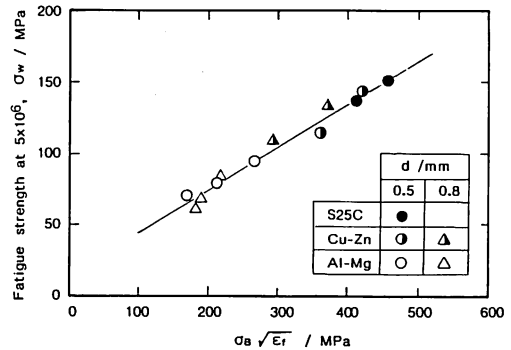


図12 人工欠陥試験片の疲労強度とパラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ の関係

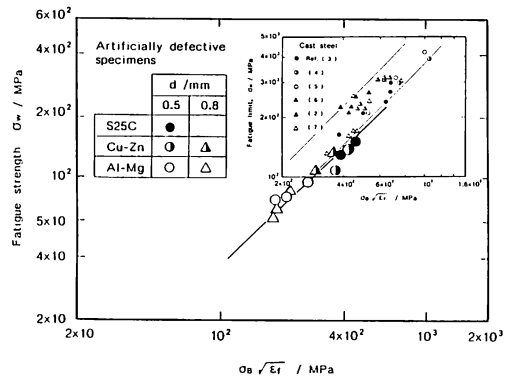


図13 同一スケールで整理した鋳鋼および人工欠陥材の疲労強度とパラメータ $\sigma_B \sqrt{\epsilon_f}$ の関係

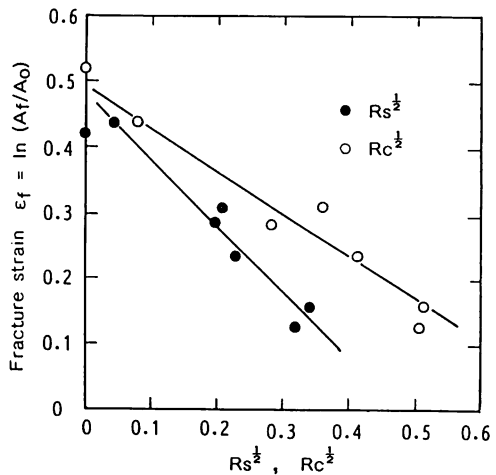


図14 破断延性 ϵ_f と実欠陥率および標準化欠陥率の $1/2$ 乗 $R_s^{1/2}$, $R_c^{1/2}$ の関係

-
- 5) 河合末男, 鯉淵興二: 材料, 25(1976), 61.
- 6) 日本材料学会編: 金属の疲労, 丸善, (1968) 100.
- 7) 鋳物の実体強度調査研究部会編: 鋳物の実体強度に関する調査研究報告書(II), 綜合鋳物センター, (1983), 132.
- 8) 大島聡範, 高橋忠義, 林 忠夫: 日本金属学会誌, 51(1987), 375.
- (昭和63年11月30日受理)