

超長寿命確率疲労特性の解析

高松高専

○岡田憲司

高松高専[専]

古市真知子

立命館大学

酒井達雄

1. 緒 言

金属材料の $S-N$ 曲線は一般に $10^5 \sim 10^6$ 回程度の寿命域で水平に折れ曲り明瞭な疲労限度を呈することが知られており、機械・構造物の疲労設計において、この疲労限度を基準とした耐久設計が広く普及している。しかし、近年、高強度鋼や表面処理鋼に対して繰返し数 10^7 回以上の超長寿命域において $S-N$ 曲線が再び下降するという実験結果がしばしば報告されている。この事実はこれらの材料の疲労限度を基礎とする従来の耐久設計が、実は本来の耐久設計を与えないことを意味しており、機械構造物の長期信頼性保証の観点から、現在、金属材料の超長寿命域における疲労特性の解明が国内外ともに大きな課題となっている。

この観点から材料強度確率モデル研究会（代表：酒井達雄立命館大学教授）では共同研究として、SUS2 鋼に続いて SCM435 鋼の長寿命疲労特性に関するラウンドロビンテストを全国各地で実施している。この研究では共同研究の一環としての著者らの実験結果と、日本材料学会金属材料疲労強度データベースの同一材料、同一疲労試験条件下での検索結果を併合して、SCM435 鋼の長寿命疲労特性について検討を行った。

2. 使用材料と実験方法・実験結果

本研究で用いた材料はクロムモリブデン鋼 (SCM435) であり、その化学成分を Table 1 に示す。試験片は Fig. 1 に示す砂時計型であり、応力集中係数 $\alpha=1.08$ である。

Table 1 Chemical composition [wt.%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
0.36	0.19	0.66	0.012	0.007	0.01	1.01	0.02	0.20

熱処理は焼入れ 1128K-1.8ks+oil cooling, 焼戻し 873K-3.6ks+water cooling の調質を行った。試験機は 4 連式回転曲げ疲労試験機を使用し、試験速度 3150rpm とし、室温大気中で実験を行った。

本実験で得られた $S-N$ 曲線を Fig. 2 に示す。図は日本材料学会標準の $S-N$ 曲線回帰用ソフトウェアを用い、片対数折れ

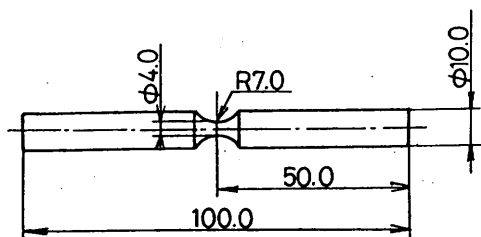
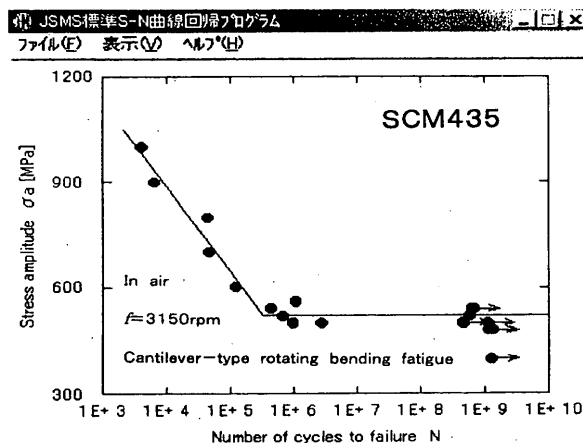


Fig. 1 Specimen.

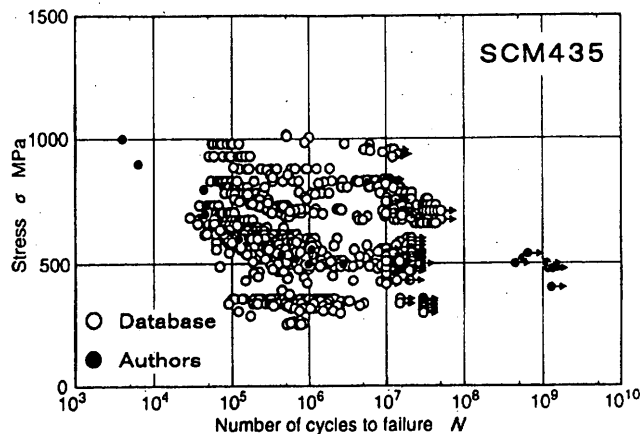
Fig. 2 $S-N$ diagram for SCM435 steel.

線モデルを選んだものである。なお、耐久限度はステアケース法で求めた 520MPa を用いた。 $N=10^9$ 程度までの長寿命域において、2 段折れ曲り現象は見られない。

3. JSMS 金属材料疲労強度データベースによる解析

3.1 データベースからの検索

前節の実験結果と日本材料学会で編集された DATABASE ON FATIGUE STRENGTH OF METALLIC MATERIALS に収録されている SCM435 の疲労試験結果の中から、ほぼ同一疲労試験条件のものは 31 シリーズである。Fig. 3 に著者らの実験結果と全 31 シリーズの疲労試験結果を併せて示す。これよりデータベースから適用した SCM435 の疲労試験結果は数種類の熱処理条件を使用しているため幅広い強度レベルで実験がなされていることがわかる。なお、著者らの実験結果はデータベース上へのプロットにおいて、ほぼ中央値付近に分布している。

Fig. 3 $S-N$ diagram for entire data.

3.2 2重 $S-N$ 特性 前報¹⁾ではSUJ2鋼の疲労特性がFig. 4の模式図のように表面起点型および内部起点型破断に関する2重 $S-N$ 曲線を表わす傾向に関して、表面起点型破断の $S-N$ 曲線の勾配より内部起点型破断の $S-N$ 曲線の勾配がゆるやか

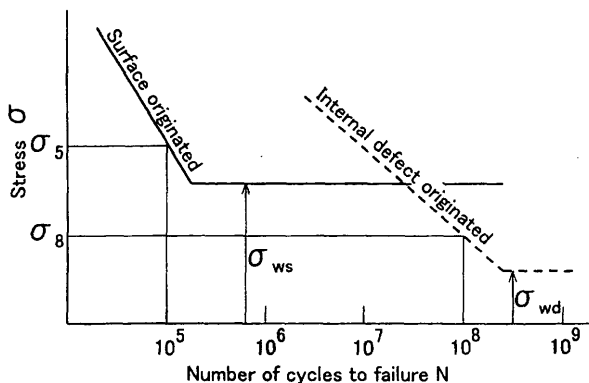


Fig. 4 Schematics of duplex $S-N$ characteristics.

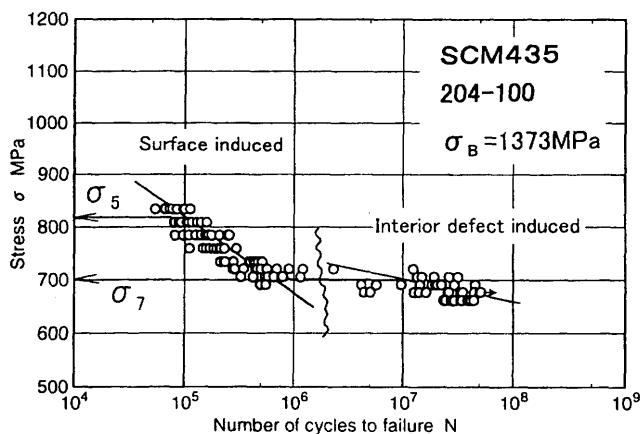


Fig. 5 $S-N$ diagram of code-series 204-100.

になることを示した。つまり、応力 σ ととき裂進展寿命 N_p の間に

$$\log \sigma = (-1/m) \log N_p + \beta \quad (1)$$

が成り立つため、パリス則 $da/dN = C (\Delta K)^m$ の指数 m が大きくなる真空中(内部起点型破断)での $S-N$ 関係の勾配がゆるやかになる傾向として説明できるものである。本研究の目的の一つに SCM435 鋼でもこの傾向が現われるかを調べることにある。しかし、著者らの実験結果には2段折れ曲がり現象は現われなかったため、データベースの中から $\sigma_B > 1300 \text{ MPa}$ 以上の5シリーズについて $S-N$ 特性を調べた。すると、Fig. 5の例(Code 204-100)のように表面起点型破断と内部起点型破断に分離すると取り扱える傾向が見られた。そこで、 10^6 程度を境として短寿命側と長寿命側に分け、それぞれの領域において目視で $S-N$ 曲線の勾配部の直線を描いた。これから今回は 10^5 の時間強度 σ_5 と 10^7 の時間強度 σ_7 で応力 σ_a を標準化し、表面起点型 (○) では σ_a/σ_5 を、内部起点型 (●) では σ_a/σ_7 を縦軸にとって $\sigma_B > 1300 \text{ MPa}$ 以上の5シリーズを1枚にまとめたのがFig. 6である。著者らの実験結果は表面

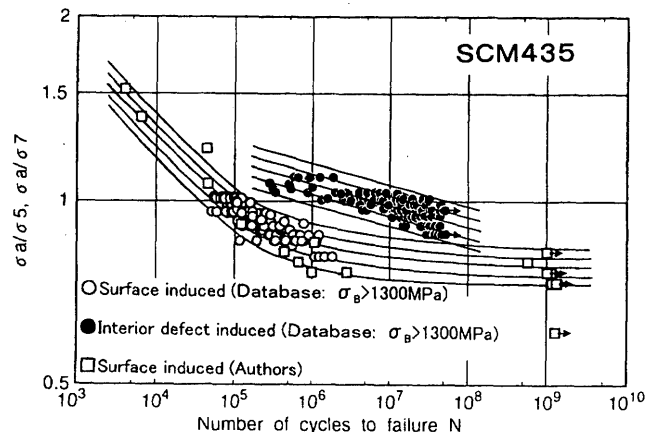


Fig. 6 σ_a/σ_5-N and σ_a/σ_7-N diagram ($\sigma_B > 1300 \text{ MPa}$)

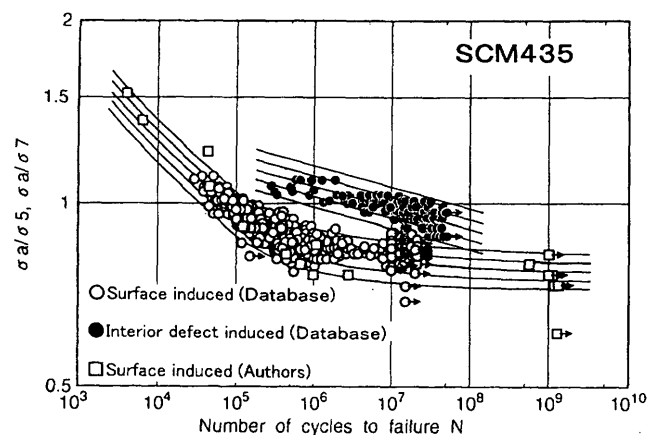


Fig. 7 σ_a/σ_5-N and σ_a/σ_7-N diagram.

起点型と取り扱い、□で示した。Fig. 7はFig. 6の○に加え、残り26シリーズのうち、(σ_B 不明の3シリーズ) + (疲労限度付近の応力レベルによる特殊な目的の疲労試験の3シリーズ) + (ばらつきの極端に大きい1シリーズ)を除いた19シリーズを表面起点型 (○) と取り扱って、Fig. 6に加えたものである。これより、SUJ2鋼と同様の傾向が見られることがわかった。Fig. 6、Fig. 7にそれぞれ描いた5本の曲線と5本の直線は、日本材料学会標準の $S-N$ 曲線回帰法ソフトウェアを使って描いた確率1%、10%、50%、90%、99%の $P-S-N$ 曲線をこの図上にトレースしたものである。表面起点型領域 (○□) には両対数斜交双曲線モデルを、内部起点型領域には両対数直線モデルを選んだものであり、ソフトウェアの利用価値を確かめることができた。

4. 結 言

SCM435 鋼に関する著者らの実験結果と、日本材料学会金属材料疲労強度データ集からの検索結果を併合して長寿命確率疲労特性を解析した。その結果、 $\sigma_B > 1300 \text{ MPa}$ の5シリーズに2重 $S-N$ 特性が見られ、それぞれの傾斜部の勾配の大小にはSUJ2鋼の実験結果と同等の傾向があることがわかった。

参考文献

- 1) T. Sakai et al., Proc. EcoDesign2001, 438 (2001).