SCM 3, SNCM 8, SUS 403 調質鋼の確率疲労特性*

西 島 敏** 阿 部 孝 行***

Statistical Fatigue Property of Heat-Treated SCM3,
SNCM8 and SUS403 Steels

by

Satoshi NISHIJIMA and Takayuki ABE

(National Research Institute for Metals, Tokyo)

The statistical fatigue property was investigated for 3 steels corresponding to AISI types 4135, 4340 and 403, heat-treated to 7 different strength levels. The fatigue tests were conducted in rotating bending with both smooth and notched specimens, so that 14 cases were studied in total, each using about 120 specimens.

The distribution characteristics in fatigue strength were discussed by examining those in the stress deviations of test data from the mean $S-N$ curve determined by the Probit analysis method, and then the $P-S-N$ curves were obtained for all test conditions. The $S-N$ curves for steels 4135 and 4340 revealed, with smooth specimens, no definite fatigue limit within the test range of cycles ($>2 \times 10^7$), especially for materials of higher strength levels, while with notched specimens they exhibited ordinal fatigue limits.

The variation in fatigue strength could be fitted by the normal distribution in most cases of smooth specimens, but it became asymmetric with larger scatter in the weaker side in the case of notched specimens. The magnitude of fatigue variations was analysed in relation to the Vickers hardness values and a possibility of predicting the fatigue variation from that of the hardness value was shown.

(Received June 21, 1976)

1 緒 言

金属材料の疲労強度は一般にばらつきを伴う統計量であるという認識にたち、設計データとしてこれを適確に把握しようとする試みがなされている¹⁾。しかし現用の国産金属材料についての統計的疲労特性データはまだ非常に少い。著者らはこれまで幾つかの汎用材料について統計的疲労特性を実験的に求め報告した^{2)~8)}。それらの実験では1条件当り120個程度以上の試験片を幾つかの応力レベルに分けて試験し、任意繰返し数において重み付きプロビット法により平均疲労強度を求めることにより平均値 $S-N$ 曲線を計算し、その曲線に対する各試験点の強度偏差を統計量とみなして分布特性などを検討した。この方法では全体で100個程度の試験を行えば1%の破壊確率に対する疲労強度を推定できる利点があり、疲労限度領域も含め、1%までの確率に対する確率疲労曲線($P-S-N$ 曲線)を推定し

得る利点がある。

これまでの実験で $S25C$ ²⁾, $S45C$ ^{3,7)}, $SCM3$ ⁷⁾ 等の標準調質材、およびアルミニウム合金のデータなどを得ているが、本報告では $SCM3$, $SNCM8$ 材を引張強度 190 kgf/mm^2 までの範囲に調質した高強度の材料、ならびに低強度レベルの材料として $SUS403$ の標準調質材を用い、これまでと同様の方法で確率疲労特性を検討した結果につき述べる。

2 実験方法および供試材の性質

実験方法は既報で述べたものと基本的に変わらないので詳細は省略するが、直径 8 mm の JIS 1 号平滑試験片と、形状係数 3.5 の環状 V 切欠き試験片を用い、室温、大気中の回転曲げ疲労試験を行った。

供試材は Table I に示す化学成分の 3 材種で、ここでは便宜上 D, Q, O の記号をもって表している。D 材は既報の中で一部報告したものと同一である。素材は直径 19~22 mm の熱間圧延丸棒で、これらを切断後、塩浴炉中で JIS による標準の焼ならし、焼入処理を施し、種々の温度で焼もどしを施した。

* 原稿受理 昭和51年6月21日

** 正会員 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒

*** 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒

Table I. Chemical composition (wt%) of the materials studied.

Material	Code	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
SCM3	D	0.35	0.24	0.72	0.016	0.017	0.14	0.96	0.07	0.17
SNCM8	Q	0.40	0.25	0.68	0.023	0.020	0.11	0.71	1.71	0.16
SUS403	O	0.14	0.27	0.44	0.022	0.018	—	11.76	0.16	—

Table II. Mechanical properties of the materials; mean μ and variation coefficient $\zeta(\%)$ determined from 10-20 samples.

Material code	Temper (°C)	Yield stress (kgf/mm ²)		Tensile stress (kgf/mm ²)		True fracture stress (kgf/mm ²)		Elongation (%)		Reduction in area (%)		Vickers hardness		Charpy impact value (kgf·m/cm ²)
		μ	$\zeta\%$	μ	$\zeta\%$	μ	$\zeta\%$	μ	$\zeta\%$	μ	$\zeta\%$	μ	$\zeta\%$	
D 1	600	94.1	3.7	106.2	1.8	182.0	1.4	16.6	5.4	61.3	1.5	331	0.9	16.9
D 2	450	126.7	6.8	140.0	4.6	203.5	4.6	11.4	9.6	51.1	3.9	434	1.1	3.4
D 3	300	153.0	2.0	179.1	1.1	236.9	2.2	9.5	6.3	41.8	7.2	535	1.0	0.8
Q 1	630	90.0	0.7	99.3	0.4	174.8	1.8	19.7	8.6	63.9	0.9	314	1.1	12.9
Q 2	400	139.0	0.4	149.5	0.5	222.9	0.6	12.5	3.2	56.3	1.4	462	1.1	2.0
Q 3	200	141.2	1.4	192.7	0.6	288.8	1.0	11.4	3.5	47.5	2.3	620	2.7	2.1
O 1	725	47.0	1.3	66.6	0.9	146.6	1.2	26.9	4.8	73.3	0.5	219	0.7	20.8

Table II は熱処理後の機械的性質で、材料は調質条件ごとに上述の材種記号と数字の組合せにより D1, Q1 などの記号で示してある。表中の数値は10~20個の試料による結果の平均値 μ と変動係数 $\zeta(\%)$ を示したものである。表からD, Q材について引張強度がほぼ 100~190 kgf/mm² の範囲で、またO材は 65 kgf/mm² 程度で、それぞれ機械的性質の異なる7条件の材料が得られたことがわかる。疲労試験片はこれらのおのにつき、平滑、切欠き試験片を各120~160個ずつ用意した。なお以下で切欠き材によるデータは材料別記号にKを追加し、D1K, Q1Kのように示してある。

Fig. 1 は疲労試験に先立ち測定した全試験片についてのロックウェルかたさを正規確率紙上に示したもので、材料間での比較の便のため、ビッカースかたさ目盛に換算してプロットしてある。いずれも良く直線にのり、疲労試験片のかたさの変動がそれぞれの熱

処理条件において正規分布則に従うことがわかる。

3 実験結果

疲労試験は各条件ごとに8応力レベル以上で各13個ずつ行うことを標準としたが、必要な場合は応力レベル数を多くした。疲労試験結果は以下で Fig. 4 に示す。

疲労試験結果の解析方法は既報³⁾で述べたものと同様である。重み付きプロビット法により求めた平均値 S-N 曲線からの強度偏差を、試験応力レベルごとに自乗平均平方値としてプロットすると Fig. 2 のようになる。前報⁶⁾でも述べたように、これは疲労強度の変動の大きさと試験応力レベルの間の相関を表すものと考えられるが、図で Q2 の場合には寿命の長い低応力レベルほど変動の大きい傾向があるのを除けば、それ

Fig. 1. Rockwell hardness distributions for all the fatigue specimens. Plots against converted Vickers hardness scale on normal probability paper.

Fig. 2. Correlation between R. M. S. stress deviations of data from the mean S-N curve and the test stress levels. The fatigue strength variation is assumed proportional to the test stress level, except for Q2.

以外の場合には疲労強度の変動が試験応力レベルにほぼ比例するとみることでもある。

そこで疲労強度の変動係数は各材料条件ごとに一定と仮定し、平均値 $S-N$ 曲線に対する各実験点の相対強度偏差を一括して統計量と考え、正規確率紙にプロットしたのが Fig. 3 である。このような取り扱いには Q2 については不適当であるが、ここでは一律に整理してある。いずれも共通の傾向として、平滑材(白丸)はほぼ正規分布で表され、切欠き材(黒丸)は弱い側

への分散が大きな非対称分布となっていることがわかる。

Figs. 2, 3 の結果から Fig. 4 (a)~(n) のように確率疲労曲線を求めることができる。すなわち Q2 以外では変動係数一定として、Fig. 3 に示される相対偏差分だけ、平均値 $S-N$ 曲線を応力軸方向に移動させればよい。Q2 では Fig. 2 のデータを直線近似して任意応力レベルにおける強度偏差を推定し、Fig. 3 の結果から正規分布を仮定して同様に確率疲労曲線を求めた。

Fig. 3. Comparison of the relative fatigue strength distributions for different materials with smooth specimens (open symbols) and notched ones (solid).

Fig. 4. $P-S-N$ curves obtained for 14 different cases after the analyses in Figs. 2 and 3.

Fig. 4. Continued.

Fig. 4 の各曲線と実験点の分布とを比較すると、いずれも妥当な結果であると考えられる。

Fig. 4 の確率疲労曲線をみると、D材、Q材とも平滑試験片の場合に試験範囲で完全な疲労限度が現れていないことが注目される。焼もどし温度も比較的高いD1、Q1では、S-N曲線は繰返し数 10^6 以上で水平に近くなるが、 10^7 またはそれ以上で再び降下する傾向があり、焼もどし温度が低くなるほどその傾向が著しい。平滑材のこのような挙動に対し、同一材料の切欠き材では、S-N曲線は試験範囲で水平になる傾向をいずれも示している。

4 実験結果の検討

前節でQ2の平滑材では低応力域で疲労強度の変動が大きいことを述べた。平滑材でこのように低応力側で変動が増した例は、正常に疲労限度を示した粒状パーライト組織のSK5材にもみられ、その場合は疲労き裂発生過程の変動が低応力域で大きいのではないかと考えられた。今回のQ2ではFig. 4 (e)に見られるように、繰返し数 10^7 以上でS-N曲線の再降下が著しく、この範囲では疲労破壊過程に高応力域とは異った現象が大きな影響を及ぼしているように思われる。Q2の疲労強度変動の特殊性はこのような高応力域とは

異なる現象の影響によるものの可能性もあるが、同様の可能性が考えられるD2などでこれが現れていない点を説明することができない。

前報で切欠き材の疲労強度分布にはワイブル分布をあてはめることができたとして、Fig. 5 は今回の結果をワイブル確率紙上に整理したもので、ほぼ直線に沿うデータが多いが、とくに Q2K では良く合わない。Fig. 4 (1)からもわかるように、この場合は各応力レベルでとくに弱いデータが幾つかあるためであるが、それらについて素材の棒別、熱処理バッチ別、使用試験機別など、考えられる誤差の要因について何らの有意差も見いだされていない。

Fig. 5. Relative fatigue strength distributions with notched specimens replotted on Weibull probability paper.

Fig. 6 は前報に引続き、著者らの過去の統計的疲労データから、繰返し数 10^7 に対する疲労強度の中央値をビッカースかたさの中央値に対してプロットしたものである。矢印付きの点は前述のQ3など、S-N曲線に著しい再降下がみられたもので、直線から外れる傾向がある。図から平滑材の疲労強度は基本的にはビッカースかたさにほぼ比例すると考えることができるが、その場合には前報で述べたように、材料にあるかたさの変動があれば、疲労強度にも変動係数として等大の変動が生ずると考えられる。そこで観測された平滑材の疲労強度変動係数 ξ_w からビッカースかたさの変動

Fig. 6. Dependence of the median fatigue strength at 10^7 cycles on the median Vickers hardness for different heat treated steels.

Fig. 7. Correlation between Vickers hardness and net fatigue variation ξ_0 , together with the increasing ratio in notch fatigue variation ξ_{0k} , for different heat treated steels. Solid symbols refer to the results of present work and hollow ones to the previous works^{1)~7)}.

係数 ξ_H の寄与分を差し引いて、

$$\xi_0 = \sqrt{\xi_w^2 - \xi_H^2} \quad (1)$$

とした ξ_0 は、かたさ変動のない材料にみられるべき正味の疲労強度変動と考えた。Fig. 7 は著者らのこれまでのデータを変動係数一定の仮定で Fig. 3 のように整理し直した結果からまとめたもので、平滑材では明らかにかたさの高い材料ほど正味の疲労強度変動が大きい傾向がわかる。これはたとえば疲労強度に関しては高硬度材ほど欠陥の有無に敏感であることなどからも定性的には理解できよう。Fig. 7 の直線は概略 $\xi_0 = H_v/150(\%)$ で近似できるので、(1)式により平滑材の疲労強度変動を予測することができ、疲労試験の準備段階などに利用できる。

一方、切欠き材の疲労強度に関しては、Fig. 6 で明らかにように高硬度材ほど一般に高く、平滑材の疲労強度を形状係数で除した値より上側でばらついている。切欠き材の疲労破壊過程には、き裂伝ば過程の含まれる割合が平滑材の場合より大きくなる点で、疲労強度変動も一般に平滑材の変動とは異と考えられるが、試みに(1)式と同様にしてかたさの変動分を補正した正味の變動係数 ξ_{0k} を求め、 ξ_0 に対する比として Fig. 7 に併せて示した。なお、ここで切欠き材の疲労強度の變動係数としては、ワイブル分布をあてはめたときの形状パラメータから推定した値を用いた。図からかたさの低い材料ほど、切欠き材の場合に疲労強度の変動が基本的に大きくなる傾向が認められる。このことは先に S45C 材について指摘したことと一致する。

以上のように、調質を施した汎用の材料について、疲労強度の変動の性質とその大きさに関するある程度の工学的知見は得ることができたが、破壊機構との関連など更に詳細な研究を要する点が多くある。またこれまでの実験がいずれも単一チャージの材料を母集団とするものであって、工学的にはたとえば同一規格材

というような母集団を選ぶことが設計資料として有用であろうと考えられる点など、今後の課題と考えられる。

5 結 言

前報に引続き、疲労強度とその変動を量的に把握する目的で、今回は SCM3, SNCM8, SUS403 鋼を用い、引張強度 190 kgf/mm² までの 7 レベルに調質を施し、平滑、切欠き試験片により合計14条件の統計的疲労試験を回転曲げにより行った。1 条件当りの試験片個数は 120 以上の程度とし、重み付きプロビット法⁹⁾で求めた平均値 $S-N$ 曲線からの 個々のデータの強度偏差分布を検討することにより、破壊確率 1% までの確率疲労曲線 ($P-S-N$ 曲線) を求めた。主な結果は以下のようである。

(1) SCM3, SNCM8 鋼を 600℃ 以上で焼もどしすると、平滑材の $S-N$ 曲線は繰返し数 10^6 以上で水平に近くなるが、 10^7 またはそれ以上でわずかに降下する傾向がみられ、450℃ 以下の焼もどしではその傾向が顕著となる。切欠き材の $S-N$ 曲線はいずれも 10^7 以上で水平に近づく。

(2) 熱処理材のかたさは正規分布をなし、平滑材の疲労強度も正規分布をなす。同一材料条件では疲労強度の変動係数が一定とみなしうる場合が一般であるが、例外もある。

(3) 平滑材の 10^7 における疲労強度はビッカースかたさとはほぼ比例するが、 $S-N$ 曲線の再降下が著しい材料ではそうではない。観測された疲労強度の変動か

らかたさの変動の寄与分を差し引いて正味の変動を求めると、それはかたさの増加とともに増加する傾向がある。

(4) 切欠き材の疲労強度の変動は一般に同材料の平滑材の変動より大きく、弱い側に分散の大きな非対称分布をなす。切欠き材の疲労強度の正味の変動と平滑材のそれとの比はかたさが低いほど大きい傾向がある。
(昭和51年7月9日 第13回材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば田中道七他, 疲労部門委 Sub-Group III, 日本材料学会シンポジウム「疲労における最近の諸問題」前刷集, 125 (1975).
- 2) Nishijima, S., Proc. 15th Japan Congr. Materials Research, 7 (1972).
- 3) 西島 敏, 増田千利, 材料, **22**, 1097 (1973).
- 4) 西島 敏, 材料, **23**, 9 (1974).
- 5) Nishijima, S., Proc. 1974 Symp. Mech. Behav. Materials, **1**, 417 (1974).
- 6) 西島 敏他, 機講論, No.740-1, 9 (1974); No.750-1, 151 (1975).
- 7) 西島 敏, 材料, **25**, 53 (1976).
- 8) 西島 敏, 機講論, No.760-2, 101 (1976).
- 9) Pearson, E. S., and H. O. Hartley, "Biometrika Tables for Statistician", **1**, 4 (1970) Cambridge University Press
- 10) 日本規格協会, 「統計数値表」, 182 (1972).