切欠き試験片の $S-N$ 曲線の多数収集データの の整理検討について[†]

菊 川 真* 畑 中 正 数** 三 沢 俊 明**

Analysis on Pooled $S-N$ Data of Notched Specimens from JSMS Data Book

by

Makoto KIKUKAWA*, Masakazu HATANAKA** and Toshiaki MISAWA**

In the previous paper, the fatigue strength data of notched specimens of steels had been analyzed by distinguishing the fatigue limit for crack initiation, σ_{wl} , and that for fracture, σ_{w2} , with the aid of Nishitani's critical notch radius ρ_0 , at the branch point, *i.e.*, at the critical point where a non-propagating crack appears.

In this study, $S-N$ (P-N, S-T) data of rotary bending tests of sharp (notch radius $\rho \leq \rho_0$), deep (notch depth $t \gg \sqrt{\rho t}/5$), notched specimens of steels were extracted from JSMS Data Book and analyzed by fitting a bi-linear type $S-N$ curve comprising of inclined and horizontal straight lines on a Log-Log diagram, using Nishijima's method.

By taking the stress intensity factor K of the circumferential crack with notch depth t instead of the stress σ in $S-N$ curves, and by using the following correction factor χ for low strength steels, *i.e.*

$$\chi = \sigma_B / \sigma_C \text{ for tensile strength } \sigma_B < \sigma_C = 940 \text{ MPa,}$$

$$\chi = 1 \text{ for } \sigma_B \geq \sigma_C,$$

$S-N$ Data of sharp, deep notched specimens of both low and high strength steels could be fitted by a bi-linear type curve on a Log (K/χ)-Log N diagram (Fig. 4(e)), with the coefficient of variation 14.0%, while the coefficient of variation for the Log (σ/σ_B)-Log N diagram (Fig. 3 (c)) of corresponding smooth specimens was 11.8%.

Key words: Fatigue, Notch-effect, $S-N$ curve, Stress intensity factor, Data analysis

1 緒 言

平滑試験片の疲労強度特性に関しては疲労限度のみならず $S-N$ 曲線についても、金属材料技術研究所における精密かつ膨大な疲労試験により作成されたデータシートについて西島らが^{1),2)}、多数の材料、多数の実験者からの多数収集データベースである日本材料学会の金属材料疲労強度データ集³⁾（これには上述のデータシートのデータもその大部分が含まれている）について田中らが^{4),5)}、精密に統計的な解析を行うなど、既に利用され易いかたちに整理が進められている。

しかし、切欠き試験片の疲労強度特性に関しては、もともとデータの総数が平滑試験片に比べてはるかに少ないうえ、切欠きの形状、寸法等試験条件の種別が多く統計的に解析できるほどのデータ数がまとまらないこともあってほとんど整理が進められていない。

筆者らは、さきに金属材料疲労強度データ集について切欠き試験片の疲労強度に関し破壊力学的な考え方

を加え整理検討し報告したが⁶⁾、つづいて鋭い切欠き試験片の $S-N$ 曲線に関しても若干の整理検討を進めたのでここに報告する。

前報と同様に鉄鋼材料のうち切欠き効果に対し特別な性質をもつと思われる鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄、焼結材料、高周波焼入れを含む表面処理材、加工硬化が著しく特異な切欠き効果を示すオーステナイト系ステンレス鋼を除外して、それ以外の炭素鋼および合金鋼の通常の環境、すなわち常温大気中の場合を対象とする。さらに両振り軸荷重の範囲でも疲労寿命に対しては、負荷方式、試験片形状の影響が大きいと考えられる。そこで今回は、データの大多数を占めることをも考慮して環状みぞ付き丸棒の回転曲げ試験の場合に範囲を限ることにした。

SN データから $S-N$ 曲線を求めるには、縦軸（応力軸）方向のばらつきが応力レベルにかかわらず水平部も含めて分散の等しい対数正規分布をすると仮定し、

[†] 原稿受理 昭和63年12月24日 Received Dec. 24, 1988

* 正 会 員 福井工業大学 福井市学園, Fukui Institute of Technology, Gakuen, Fukui

** 福井工業大学大学院 福井市学園, Graduate Student, Fukui Institute of Technology, Gakuen, Fukui

両対数線図上で傾斜部を直線になるとして最小自乗法で定め、その分散を用いて水平部を重み付きプロビット法で求めて折れ線で近似する西島らの方法を用いた。データ集には比較的小数のいわゆる PN, ST データもあるが今回は一緒に扱うため同じ方法で折れ線近似した。

上述のように切欠き試験片のデータは同一試験条件のデータの数がまとまらず、精粗、大きささまざまなものからなる。従ってこれらのデータのみから、同一母集団であることを検定し併合していく正統的な方法で、統計的に正確になんらかの特性を導き出すことは、疲労限度についての前報を見ても困難と思われる。そこで、適当にプールしてごく大局的な傾向、特性のあらましを調べ、むしろ今後補足すべき試験データ、実験の方向の示唆を見いだすことを主に考えることにする。

西島らの方法は多数の少数標本の $S-N$ データをパソコンのレベルで自動処理のできる優れた方法であるが、簡略化し計算量を減らすため折れ線の最適なあてはめの評価に破断データしか用いておらず一つの打ち切り繰返し数を定めそれ以下の繰返し数の未破断データは $S-N$ 曲線（折れ線）の決定に寄与せず、棄てられているという欠点がある。この欠点は耐久限を有する鉄鋼材料のはば一定の繰返し数で打切った通常の単一の試験のデータの計算に際してはほぼ適切な結果を与え問題とならない。しかし広い範囲の種々の打ち切り繰返し数で試験した多数の試験データをプールして取り扱う場合にそのまま適用すると、例えば少数の 10^8 に近い打ち切り繰返し数の試験が含まれとくに高強度鋼の場合にしばしばあるようにこれらに低い破断データがあるとそれに引かれ低い耐久限、大きい折れ曲がり繰返し数の $S-N$ 曲線を与え、一見大多数のデータと離れた傾向を示す。これは打ち切り繰返し数の大きいデータは打ち切り繰返し数の小さい未破断点のデータに含まれないより多くの情報を持つと考えれば、一点で水平になる折れ曲がり線の $S-N$ 曲線を仮定する限りにおいては誤りではなく安全側の推定というべきであろう。しかしどのデータも同様な重みを持つと考え平均的な傾向を求めようとすると未破断データの総数のある %, 必ずしも明確な根拠のある値ではないが例えば 20% 以上を棄てないよう打ち切り繰返し数に上限を設ける必要がある。ここでは多数の試験をプールして処理する Fig. 3, Fig. 4 に対しては後の方法を用いた。しかし本文ではデータをプールした耐久限の平均値を問題にしてはいないののでいずれをとっても以下の議論には影響しないものと思われる。

2 データの整理

データ集の上記範囲のデータについて前報同様に同一材料、同一試験条件の対応するデータと思われる平

Fig. 1. Typical sets of $S-N$ curves for smooth and 3 kinds of notched specimens.

滑、切欠き試験のデータの組をつくと 36 組できる。そのうち平滑と二種以上の切欠きの組はその 3 分の 1, 3 種以上の組はさらに半分となる。その SN データの若干組を Fig. 1 (a), (b) の両対数線図に例示する。切欠きの種類が多かつ一つの $S-N$ 曲線の試験片数の多いものではなく、 $S-N$ 曲線のばらつきがかなり大きいようで、一つの組でその材料について切欠き寸法による $S-N$ 曲線の信頼できる定量的な変化を求めることは困難と見られる。また各組で切欠き寸法が異なるのでこれらを合わせて整理することも困難と思われる。しかし、共通の傾向として深い切欠きでは、切欠き半径 ρ が、ある程度小さくなると $S-N$ 曲線、ことにその傾斜部は、ある一定の極限に収れんすることが認められる。

一方前報でも述べたように切欠き半径 ρ , 深さ t の切欠きの底に小さい深さ c のき裂が生じた時のき裂先端の応力拡大係数の値は、き裂深さ c が、 $\sqrt{\rho t}/5$

Fig. 2. Relation between notch radius at branch point ρ and tensile strength σ_B of steels.

程度になると、切欠きの形状にほとんど関係なく切欠きの深さ t を含めた $t+c$ の深さのき裂の応力拡大係数の値に速やかに近づく。従って $t \gg \sqrt{\rho t}/5$ で、 $t+c$ を t で近似できるような深く鋭い切欠きでは切欠きの深さ t のき裂の応力拡大係数 K で近似できる。

これらのことから、前報と同様切欠き半径 ρ が、その材料の停留き裂が発生するかどうかのいわゆる西谷の分岐点の切欠き半径 ρ_0 (Fig. 2 により推定) よりも小さく、かつ深さ t が ρ を越え $t \gg \sqrt{\rho t}/5$ となる深く鋭い切欠きでは切欠き試験片の S-N 曲線は切欠きの深さ t のき裂の応力拡大係数の値 K を用いれば切欠きの形にはほとんど関係なく K-N 曲線で整理できるものと考えられる。

そこで、上記の 36 組のデータから ρ ができるだけ小さくほぼこの条件を満たすであろうと思われる深く鋭い切欠き試験片のデータの K-N 曲線を求め、両対数線図で Fig. 4 (a) に焼入れ焼き戻し材、Fig. 4 (b) に焼なまし、および焼ならし材と二つに区分してプールプロットしてみた。

Fig. 3 (a), (b) には比較のため対応する平滑試験片の S-N 曲線を古くから行われているように応力振幅 σ を引張強さ σ_B で割って正規化した引張強さ比 σ/σ_B を縦軸にとり同様に区分してプールし、両対数線図上にプロットしたものを示す。これらの K-N、S-N 曲線は、前述の西島らの折れ線近似の方法を用いて求めた。計算にはこのデータ集についての久保泰生氏のパーソナルコンピュータ用のプログラムを利用して頂いた。

図中 $slope$ は折れ線近似した傾斜部の傾斜の値の真数、 $smean$ は水平部の平均値、 sd は傾斜部の破

Fig. 3. σ/σ_B -N diagrams of smooth specimens.

断点の直線からの標準偏差、 rms は全破断点の折れ線からの標準偏差、 $knee$ は折れ曲がり点の繰返し数 N_k でいずれもそれらの常用対数、三本の折れ線は個々の実験点に対する破断確率 99%, 50%, 1% の推定点である。平滑試験片では、このようにプールすれば、Fig. 3 (a), (b) はそれぞれ変動係数 δ が、約 10.4%, 12.2% となりよくまとまっており両者もほとんど重なるので Fig. 3 (c) のように併合しても変動係数は、約 11.8% におさまる。しかし、切欠き試験片の K-N 曲線については、Fig. 4 (a) の高強度の焼入れ焼き戻し材では、変動係数は、約 14.2% となるが、低強度材の焼なまし、焼ならし材では、Fig. 4 (b) のように下方へばらつき変動係数は、約 21.5% となり中心も下がり、両者を無理に併合すると Fig. 4 (c) のように変動係数は、約 31.3% にもなる。

そこで、

$$\sigma_B < \sigma_C \text{ では } \kappa = \sigma_B / \sigma_C$$

$$\sigma_B \geq \sigma_C \text{ では } \kappa = 1 \quad (1)$$

となる補正係数 κ を考え、第一近似として $\sigma_C = 1000$ MPa とし、 K/κ -N 曲線をつくると、Fig. 4 (d) に示すように全部をまとめても変動係数は、約 14.4% におさまる。

この補正係数 κ の傾向をより詳しく調べるために個々の K-N 曲線の傾斜部に対し両対数線図上で上下

Fig. 4. K-N diagrams of sharp deep notched specimens on Q & T (a), A or N (b), and all steels (c).

Fig. 4. (d), (e) K/κ - N diagrams plotting all data of sharp deep notched specimens of steels.

に移動させ Fig. 4 (d) の中心線との偏差の自乗和を最小にする κ' を求め σ_B に対してプロットすると Fig. 5 のようになる。各 K - N 曲線は、Fig. 6 (a), (b) に例示するように傾斜部の実験点数 n_1 、標準偏差 sd 、傾斜の標準偏差 sds_l が、著しく異なるので、焼なまし、焼ならし材を中実、焼入れ焼戻し材を中空で区分するとともに、自由度 n_1-2 、標準偏差 sd をそれぞれだ円の面積、縦線の長さで示した。

これらを原点を通り低、高強度材の境界の一点で折れ曲がる折れ線で近似することとし、 n_1-2 の重み、 sd のばらつきを考慮して、最小自乗法で求めると Fig. 5 のように $\sigma_B=870\text{MPa}$ で折れ曲がり、折れ曲がり後は、ほとんど水平になる。よってこれらを簡単にして折れ曲がり後を水平な式(1)の補正係数を用いることとし、全体を併合した時の傾斜部の標準偏差を最小

Fig. 5. Relation between correction factor κ' and tensile strength.

Fig. 6. Typical K - N curves for large and small sample size.

にように折れ曲がり点を定めると、折れ曲がり点 $\sigma_c=940\text{MPa}$ となり、Fig. 4 (e) のように変動係数は、約 14.0% でまとめることができた。

(a) Correlation between slope of K - N curves of sharp deep notched specimens and tensile strength.

(b) Correlation between slope of S - N curves of smooth specimens and tensile strength.

Fig. 7. Correlation between slope of S - N curves and tensile strength.

Fig. 8. Relation between stress intensity factor at fatigue limit and tensile strength.

ここで傾斜は、 $slope=0.188=1/5.3$ で $1/4$ より小さく折れ曲がり点は、 $K=7.34 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $N_k=4.44 \times 10^6$ となった。

Fig. 7 (a) は K-N 線図の傾斜部の傾斜を σ_B に対しプロットしたもので、傾斜のばらつきは標準偏差 sds_l を Fig. 6 の例に示すように、きわめて大きい場合もあるが、一応回帰直線を求めると、 $\sigma_B=400 \text{ MPa} \sim 1800 \text{ MPa}$ で、 $slope=0.174 \sim 0.162$ と高強度になるほどゆるやかに減少する。平滑試験片の S-N 線図の傾斜は Fig. 7 (b) に示すように $\sigma_B=400 \text{ MPa} \sim 1800 \text{ MPa}$ で、 $slope=0.089 \sim 0.035$ とやや大きく減少する。これは西島らの結果¹⁾ともほぼ一致する。

つぎに鋭く深い切欠き試験片の K-N 曲線の水平部すなわち疲労限度に対応する K 値、 K_w を σ_B に対しプロットすると Fig. 8 のようになる。水平部を定めるに寄与する実験点の数は、試験片総数 n の数分の一以下で、その寄与の重みも複雑で定めにいがりあえずほぼ総試験片数に比例するとして相対的に重みを考え、 K_w の標準偏差は、傾斜部の標準偏差にほぼ等しいとしておく。

このようにして、最小自乗法で原点を通る折れ線を定めると $\sigma_B=815 \text{ MPa}$ で折れ曲がるが、傾斜が約

Fig. 9. Relation between σ'_B and σ_B .

Fig. 10. Relation between fatigue limit and tensile strength.

切欠試験片の K-N 曲線に対するのと同様に平滑試験片についても、個々の S-N 曲線の傾斜部に対し両対数線図上で上下に移動させ Fig. 3 (c) の σ/σ_B-N 曲線の中心線との偏差の自乗和を最小にする除数 σ'_B を求め σ_B に対しプロットすると、Fig. 9 のようにほぼ原点を通る直線上来て S-N 曲線の傾斜部は σ_B によく比例することがわかる。

しかし、個々の S-N 曲線の水平部で求めた疲労限度 σ_w を σ_B に対しプロットすると Fig. 10 のようになり原点を通る折れ線で近似すると $\sigma_B=1050 \text{ MPa}$ で傾斜が、 0.54 からその約 40% になり σ_w の増加率は減少する。このことは 1000 MPa をこえる超高強度材の疲労限度が、やや飽和きみになるという従来からいわれていることと一致する。

K-N 曲線で水平部の K_w が傾斜部ほどには高強度レベルで飽和しないことを調べるために、鋭く深いこれらの切欠き試験片についても、その見掛け応力による疲労限度にせん断ひずみエネルギー説（八面体せん断応力説）による等価応力集中係数 α_{oct} を乗じ疲労限度における切欠き底の最大等価応力 σ_{emax} を求め σ_B に対しプロットすると Fig. 11 のようになる。

Fig. 11. Relation between maximum equivalent stress of sharp deep notched specimens at fatigue limit and tensile strength.

$1/3$ に減少するだけで傾斜部に対する Fig. 6 のように水平に近くはならず K_w は σ_B とともに増加をつづける。

α_{oct} は、現在最も正確と思われる最大主応力に対する応力集中係数 α の⁷⁾値を用い、Neuber の深い双曲線切欠きの理論値、およ

び文献 8) の有限深さの切欠きの実験値などから推定した α_{oct}/α により求めた。これは、通常よく使われている Neuber の等価応力集中係数の近似値より数 % 以上高い。Fig. 10 の $\sigma_w-\sigma_B$ 線図と較べると Fig. 11 の方が、ばらつきが大きく、とくに σ_B の低い領域で著しい。Fig. 10 と同様原点を通り一点で折れ曲がる折れ線で近似すると実線のようになり折れ曲がり点の σ_B は $\sigma_B=810$ MPa となる。比較のため一点鎖線で記入した Fig. 10 の $\sigma_w-\sigma_B$ 線図と較べると折れ曲がり点以上で約 15% 程度上になりほぼ平行して増加する。

3 整理結果のまとめと考察

鋭く深い切欠き試験片の S-N データを切欠きと同じ深さのき裂の応力拡大係数 K を用いた $K-N$ 曲線を両対数線図上で折れ線近似をして整理した。傾斜部については、 $\sigma_B \geq \sigma_c=940$ MPa の高強度材料ではそのまま $\kappa=1$ 、これ以下の低強度材料では σ_B に比例して低下するとして $\kappa=\sigma_B/\sigma_c$ なる補正係数を考え、 $K/\kappa-N$ 曲線を用いると全体をプールして変動係数約 14.0% でまとめることができる。この変動係数は平滑試験片の S-N 曲線を σ/σ_B-N 曲線でまとめた時の約 12% よりやや大きい。傾斜は 1/5 程度で巨視き裂の Paris 則に対応する 1/4 より小さいが平滑試験片の σ/σ_B-N 曲線の傾斜 1/10 程度よりは大きく、傾斜の σ_B 逆依存性も小さい。

これらのことは、鋭く深い切欠き試験片の有限寿命は、高強度材料では、応力、強度レベル依存性がほとんどないようで、多くを応力拡大係数依存の巨視き裂進展則に支配されるが、低強度材料になると平滑試験片の場合のように、応力、強度レベル依存性の強い微小き裂進展則に支配される部分が大きくなることを示唆するものと思われる。このように、切欠き試験片の有限寿命の範囲の疲労強度が、ある強度レベル ($\sigma_B=940$ MPa) 以上で完全に飽和するのに対し、疲労限度に対応する K_w が、ある強度レベル ($\sigma_B=815$ MPa) で増加率は減少するが、平滑試験片の疲労限度と同様増加をつづけることは、疲労限度における切欠き底の最大等価応力 $\sigma_{emax}=\alpha_{oct}\times\sigma_w$ が、高強度範囲で平滑試験片の疲労限度より若干大きい、ほぼ平行して強度レベルとともに増加することと考え合わせると、この場合疲労限度は強度レベルと最大応力に主として支配される微小き裂が発生するか否かにより定まり、強度レベルに少なくとも正の依存性を持たないと思われるき裂進展下限界応力拡大係数 K_{th} に支配される発生したき裂が停留するか否かによらないことを示唆する。

すなわち、1000 MPa を超える強度レベルでは、分岐点の切欠半径 ρ_0 のデータもあまりないが、0.1 mm 以下になることが予想されるのに対し、データ集にはこれ以下の切欠半径 ρ のデータがほとんどなく、多

くが停留き裂の発生する条件を満たしていなかったものと思われる。

従って Fig. 11 の実線 $\sigma_{emax}-\sigma_B$ が一点鎖線 $\sigma_w-\sigma_B$ よりこの領域において約 15% 上になることは、この領域の高強度材料でもき裂発生に対する切欠き係数 β_1 が平均としては α_{oct} より若干小さく切欠感度係数が 1 より小さくなることを示すものと考えられる。しかし双方のデータのばらつきの範囲を考慮すると、このデータでその差を定量的に推定して設計等に利用することは無理ではないかと思われる。

前報でも述べたように切欠き底のき裂発生には仕上げ、加工硬化、残留応力など影響する因子が多く、ばらつきを考えると β_1 の安全側の上限として α_{oct} をとり、平滑試験片の疲労限から切欠き試験片の疲労限度を推定する以上の情報を得ることは、 α_{oct} とき裂発生に対する切欠係数 β_1 の差の小さい高強度レベルでは困難で、しかも意義が薄いのではないかと考えられる。またこのような試験では、あらかじめどの情報が得たいかの目的により試験片の形状寸法の試験精度をも考慮した適切な設定が重要であると思われる。

4 結 言

日本材料学会、金属材料強度データ集の鉄鋼材料について切欠き試験片の SN (PN, ST) データを用い疲労限度に引き続き S-N 曲線について整理検討を試みたが、データ数が少ないうえ切欠きの形状、寸法等試験条件が多く、かつ影響する諸因子が多くてばらつきが大きいなどの特質のため、鋭く深い切欠きの回転曲げ試験の場合についてのみ全体をほぼ $K/\kappa-N$ 曲線で整理してまとめることができた。

しかし、これを定量的に解析利用するには、なお微小き裂を含む疲労き裂進展挙動の破壊力学的な研究の裏付けが、必要と思われる。

おわりに本研究の一部には文部省科学研究費の援助を受けた。このこととともに S-N 曲線推定法につき有益な御助言を頂いた金属材料研究所西島敏部長、立命館大学理工学部田中道七教授、酒井達雄助教授、金属材料疲労強度データのパーソナルコンピュータによる整理プログラムを利用して頂いた小松製作所の大久保泰生氏らの方々に深く謝意を表したい。

(昭和63年11月8日 第19回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 西島 敏, 石井 明, 材料, **33**, 2 (1984).
- 2) 西島 敏, 石井 明, 材料, **34**, 340 (1985).
- 3) 日本材料学会編, “金属材料疲労強度データ集”, **1**, **2**, **3** (1983).
- 4) 田中道七, 岩谷隆史, 酒井達雄, 材料, **36**, 348 (1987).
- 5) 酒井達雄, 安井秀昭, 田中道七, 材料, **36**, 915 (1987).
- 6) 菊川 真, 小沢康美, 矢吹彰彦, 城野政弘, 材料, **34**, 1140 (1985).
- 7) 村上敬宜, 野田高昭, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, **A-48**, 800 (1982).
- 8) 菊川 真, 佐藤芳久, 日本機械学会論文集, **38**, 1673 (1972), **38**, 1681 (1972).