鋼材の衝撃疲労における切欠き効果について*

内 田 猛** 岡 部 永 年**
矢 野 利 行** 森 忠 夫**

Effect of Notch on Impact Fatigue Strength of Mild Steels

by

Takeshi UCHIDA, Nagatoshi OKABE, Toshiyuki YANO
and Tadao MORI

(Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corporation, Fuchu)

In order to study the effect of notch on its impact fatigue strength of mild steels, low-cycle impact fatigue tests were carried out on the specimens of 0.2% carbon steel having various circumferential notches under repeated impact tensile loads. The experimental results are summarized as follows:

(1) The impact low-cycle fatigue strength σ , in the case of notched specimens, is expressed by $\sigma N_f m^* T^{n^*} = D^*$

where N_f is the life of rupture, T is the loading time and m^* , n^* and D^* are material constants.

(2) The relations of m^* and n^* with the stress concentration factor α are given by

$$m^* = m_0 \alpha^a, \quad n^* = m_0 \alpha^b$$

where m_0 , a and b are experimental constants.

(3) The fatigue notch factor β is related to the stress concentration factor α by

$$\beta = \alpha^{-c} \exp m_0 (\alpha^a - 1) \ln N_f$$

where c is an experimental constant.

(Received June 27, 1978)

キー・ワード：衝撃疲労，切欠き係数，負荷持続時間，低炭素鋼

1 緒 言

機械構造物や機械要素は，稼動中に生じる衝撃的な荷重を繰返し受けて比較的長寿命で疲労破壊してしまうことがしばしばある．平滑材としての材料の衝撃疲労強度あるいはその疲労現象の特徴についての究明は繰返し衝撃荷重に対する機械構造部材の疲労強度を評価していくうえで基本的には極めて重要であり，比較的多くの報告がなされている．これに反し，切欠き材としての衝撃疲労強度あるいは切欠き効果などの特徴についての究明は，実用上，極めて重要であるにもかかわらず，これらについての報告は極めて少いようである．そこで，本研究では，0.2%炭素鋼を供試材とした切欠きおよび平滑試験片に対して衝撃引張荷重の繰返しによる低サイクル疲労試験を行い，平滑材と切欠き材との間における衝撃疲労強度の関連性あるいは衝撃疲労現象における切欠き効果について実験的に究明した．

2 実 験

2・1 供試材および試験片

本実験に供した材料は，市販の機械構造成用炭素鋼 S20C である．その化学成分を Table I に示す．試験片は納入のままの 19 ϕ の丸棒から Fig. 1 に示すような形状寸法に機械加工したのち真空加熱炉中で Table II のような真空焼なましを施した．真空焼なまし後の平滑試験片の静的引張りによる機械的性質を Table II に示す．各切欠き試験片の切欠きは，いずれも環状溝切欠きであり，切欠き底の径を平滑試験片の径に合せている．切欠き試験片 [A]，[C] は U 形溝，切欠き試験片 [B] は半円溝，切欠き試験片 [D] は 60° の V 形溝である．各切欠き部の応力集中係数 α は (1) 式のような近似計算式⁶⁾を用いて求めると，Table

Table I. Chemical composition (%).

C	Si	Mn	P	S
0.20	0.21	0.52	0.018	0.013

* 原稿受理 昭和53年6月27日

** 正 会 員 東京芝浦電気(株)重電技術研究所 府中市東芝町

Notch detail of specimens

	A	B	C	D
D°	10	8.75	10	10.5
ρ	1	0.875	0.5	0.23
t	1.5	0.875	1.5	1.75

Fig. 1. Shape and dimension of specimens.

Table II. Mechanical properties and heat treatment.

Yielding stress σ_y (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation δ (%)	Reduction ψ (%)	Heat treatment
31.5	44.6	32.5	69.0	900°C×30 min Vaccume annealing

Table III. Stress concentration factor α .

Specimen	A	B	C	D
by formula (1)	1.87	2.00	2.65	3.78
by Neuber's theory	1.55	2.17	2.90	4.03
by Peterson's theory	2.01	2.06	2.65	3.73

III のような値になる。

$$\alpha = f(\theta) k_0 / \sqrt{\rho} = f(\theta) \sqrt{a/\rho} \quad (1)$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp\{-0.90\gamma/B/t(\pi - 2\theta)\}}{1 - \exp\{-0.90\pi\gamma/B/t\}}$$

ここで, $f(\theta)$ は切欠き部の角度係数, k_0 は $\theta=0$ のときの荷重モードによって決まる係数で, 引張荷重モードのとき $k_0 = \sqrt{a}$ である。なお, 2θ , $2B$, t , $2a$ は, Fig. 2 に示すように, 切欠きの角度, 試験片の外径, 切欠き深さおよび切欠き底の径である。

Fig. 2. Shape of notched specimens.

2・2 衝撃疲労試験装置および実験方法

衝撃疲労試験には, Fig. 3 に示すように, 円筒と丸棒との縦衝撃現象を利用した繰返し衝撃引張荷重装置を用いた。1 回の衝撃によって, 試験片には Fig. 4 に示すような矩形波状の引張応力パルスが負荷される。衝撃負荷応力の大きさ σ およびその持続時間 T は円筒の落下高さ h および円筒の長さ l をもとに次式で求められる。

Fig. 3. Experimental apparatus.

Fig. 4. An example of measured stress wave.

$$\sigma = \frac{A_1 A_3}{A_0 (A_1 + A_3)} \sqrt{E \gamma} \sqrt{2h} \quad (2)$$

$$T = \frac{2l}{C} \quad (3)$$

ここで, A_0 , A_1 , A_3 は試験片, 円筒, 吊り丸棒の各横断面積で, E , γ , C は鋼のヤング率, 比重量および縦弾性波の伝ば速度である。

Fig. 4 に示す実測応力波形は, 吊り丸棒のロードセル部に生じる衝撃ひずみを, 同一円周上に 90° 間隔に貼付してシリーズに接続した 4 枚のひずみゲージ (型式: KFC-1-C1-11) で検出し衝撃ひずみ計を介してデジタルメモリオシロスコープ (型式: NICOLET 1090A) に記録したものである。

実験方法としては, 大気中, 室温 (20~25°C) にて各試験片に対して, 円筒の落下高さ一定で衝撃引張荷

重を試験片が破断するまで繰返した。この繰返し数を衝撃疲労破壊寿命 N_f とし、衝撃負荷応力 σ (kg/mm²) としては、切欠き底の初期断面積を A_0 として (2) 式で求めた理論値を公称応力として用い、データの整理を行った。一方、負荷持続時間の条件としては、 $l=1,000, 2,000$ および $3,000$ mm の 3 種類の円筒を用いて、 $T=400, 800$ および $1,200$ μ sec とし負荷持続時間の影響を調べた。

3 実験結果および考察

3・1 0.2%炭素鋼平滑材の低サイクル衝撃疲労強度

Fig. 5 は平滑試験片に対して衝撃引張荷重を繰返したときの衝撃負荷応力 σ と破壊寿命 N_f とを両対数の関係で示したものである。同一持続時間の負荷条件下では、両者は、ほぼ直線関係があり、次式で近似できる。

Fig. 5. S-N curves for smoothed specimens.

Fig. 6. Relation between stress σ and total duration time $N_f T$ for smoothed specimens.

$$\sigma N_f^{m_0} = C_0 \quad (5)$$

また、衝撃負荷の応力が等しくても、負荷持続時間が長くなるほど、破壊寿命は短くなることがわかる。

そこで破壊寿命と負荷持続時間との積 $N_f \cdot T$ を破壊までの累積負荷時間とし、 σ と $(N_f T)$ とを両対数の関係で示すと Fig. 6 のようになり、両者は、ほぼ直線関係があるので、次式で近似できる。

$$\sigma (N_f \cdot T)^{m_0} = D_0 \quad (6)$$

なお、(5), (6) 式における指数 m_0 および強度定数 C_0, D_0 を Table IV に示す。

Table IV. Values of strength constant D_0 and constant m_0 for smoothed specimen.

D_0	m_0
41.70 (kg/mm ²)	0.06263

0.2%炭素鋼の平滑材にみられる前述のような衝撃疲労特性は0.01%, 0.097%, 0.36%, 0.47%炭素鋼の平滑材においても、茶谷、中原、中沢等の研究で明らかにされている。¹⁾

3・2 0.2%炭素鋼切欠き材の低サイクル衝撃疲労強度

Fig. 7 は、各切欠き試験片 [A], [B], [C], [D] に対して衝撃引張荷重を繰返したときの衝撃負荷応力 σ と破壊寿命 N_f とを両対数の関係で示したものである。いずれの切欠き材においても平滑材の場合同様、同一持続時間の負荷条件下では、両者はほぼ直線関係があり、次式で近似できる。

$$\sigma N_f^{m^*} = C^* \quad (7)$$

なお、指数 m^* および強度定数 C^* を Table V に示す。 C_1^*, C_2^*, C_3^* はそれぞれ、負荷持続時間が $T=400, 800, 1,200$ μ sec の場合の値を示す。ここで、注

Fig. 7. S-N curves for notched specimens.

Table V (a). Values of constant m^* for notched specimens.

Specimen	A	B	C	D
m^*	0.1439	0.1538	0.2306	0.3269

Table V (b). Values of strength constant C^* for notched specimens.

Specimens	A	B	C	D
$C_1^*(\text{kg/mm}^2)$	161.5	175.8	305.3	580.3
$C_2^*(\text{kg/mm}^2)$	150.9	164.9	279.3	515.7
$C_3^*(\text{kg/mm}^2)$	145.0	158.3	265.1	481.3

目すべきことは、指数 m^* および切欠き材の衝撃疲労強度に及ぼす負荷持続時間の影響が、いずれも各切欠き材によって大いに異なることである。

そこで、各切欠き材における(7)式の強度定数 C^* と負荷持続時間 T との関係を両対数の関係で示すと、Fig. 8 のように両者はほぼ直線関係があるので、次式で近似できる。

$$C^*T^{n^*}=D^* \quad (8)$$

なお、指数 n^* は Table VI に示すような値となり、この指数 n^* もまた各切欠き材によって大いに異なることが明らかに認められる。

そこで、これらの指数 m^* および n^* と切欠き部の応力集中係数 α との関係を両対数の関係で示すと、Fig. 9 のようになり、両指数とも α の増大とともに直線的に増大する傾向があるので、両指数はそれぞれ、

Fig. 8. Relation between strength constants C^* and duration time T .

Table VI. Values of constant n^* for notched specimens.

Specimens	A	B	C	D
n^*	0.09838	0.09251	0.1283	0.1702

Fig. 9. Relation between stress concentration factors α and constants m^* , n^* .

α との関係を表式で近似できる。

$$m^*=m_0\alpha^a \quad (9)$$

$$n^*=n_0\alpha^b \quad (10)$$

なお、(9)、(10)式における指数 a 、 b は、 $\alpha=1$ のとき、 $m^*=n^*=m_0$ となるように定めた値で、Table VII に示すような値になる。一方、切欠き材の場合の(7)式における強度定数 C^* と切欠き部の応力集中係数 α との関係を明らかにするため、平滑材の場合の(5)式における強度定数 C_0 に対する強度定数 C^* の比 C^*/C_0 を求め、 (C^*/C_0) と α との関係を両対数の関係で示すと、Fig. 10 のようになり、切欠き材の場合の強度定数 C^* は切欠き部の応力集中が大きくなるほど、増大する傾向があり、次式でよく近似できる。

$$C^*=C_0\alpha^c \quad (11)$$

なお、指数 c は Table VII に示す。

Fig. 10. Relation between stress concentration factors α and C^*/C_0 .

Table VII. Values of constant a , b , c .

a	b	c
1.258	0.7214	1.616

次いで、(7), (8)式より C^* を消去して整理すると、切欠き材の衝撃疲労における衝撃負荷応力 σ と破壊寿命 N_f との関係は次式のようになり、

$$\sigma N_f^{m*} T^{n*} = D^* \quad (12)$$

平滑材の衝撃疲労の場合同様、負荷持続時間 T が衝撃疲労強度に効くことがわかる。しかしながら、その効き方は Fig. 11 に示す (n^*/m^*) と α との関係からわかるように、切欠き部の応力集中が大きくなるほど、減少する傾向がある。

Fig. 11. Relation between stress concentration factors α and n^*/m^* .

3・3 0.2%炭素鋼の衝撃疲労現象における切欠き効果

Fig. 12 は負荷持続時間が $T=800 \mu\text{sec}$ の場合の平滑材および各切欠き材の衝撃疲労における衝撃負荷応力 σ と破壊寿命 N_f との関係の近似直線〔近似式：(5)あるいは(7)式〕を示したものである。低寿命領域では、切欠き材の方が平滑材よりその衝撃疲労強度は高いけれども、高寿命領域に移るに従って切欠き材と平滑材との衝撃疲労強度は、応力集中の大きい切欠き材の方から次第に逆転して行く。各切欠き材の間での衝撃疲労強度も、切欠き部の応力集中の大きいものほど、低寿命領域では高応力レベルにあり、高寿命領域に移る

Fig. 12. Comparison of S-N curves for smoothed and notched specimens.

につれて逆転し、低応力レベルになる。これらの現象は程度の差こそあれ、一般の疲労の場合においても認められることである。

以上のような切欠き材の衝撃疲労現象を以下のような解釈で説明する。低寿命領域で疲労破壊するような大きな公称衝撃負荷応力に対しては、弾性解析による環状切欠き底近傍の応力分布が供試材の動的降伏強度 σ_{dy} を越える範囲には、Fig. 13 (a) のように塑性領域が形成される。その塑性領域内での軸方向の真の引張応力 σ_{true} は3軸性による塑性拘束の影響で切欠き底から半径方向へ向うほど、次式のように増大し、弾塑性境界で最大となる。

$$\sigma_{true} = \sigma_{dy} [1 + \ln(1 + r/\rho)]$$

衝撃負荷の解放後、弾性領域の弾性復元により塑性領域内には太破線で示されるような圧縮残留応力が生じる。したがって、つぎの衝撃負荷による応力分布は細破線で示すようになり、切欠き先端での応力は公称衝撃負荷応力の値より低くなる場所が出てくる。それゆえ、応力集中係数 α の大きいものほど、同一値の公称衝撃負荷応力に対する切欠き底での疲労き裂発生寿命は延び、それだけ破壊寿命 N_f が長くなるものと考えられよう。これに反し、高寿命領域で疲労破壊す

Fig. 13. Schematic presentation of stress distribution.

るような公称衝撃負荷応力に対しては、弾性解析による応力分布が切欠き先端でも供試材の動的降伏強度 σ_{dy} を Fig. 13 (b) のように越えず、衝撃負荷の解放後に残留応力が生じないか、あるいは、動的降伏強度 σ_{dy} をわずかに越すが衝撃負荷の解放後に生じる圧縮残留応力が小さなため、次の衝撃負荷による真の応力分布が切欠き先端で公称衝撃負荷応力の値より大きくなる。したがって応力集中係数 α の大きいものほど、切欠き底での疲労き裂発生寿命は短くなり、それだけ破壊寿命 N_f が短くなると考える。

切欠き材と平滑材との疲労破壊強度が逆転するような寿命領域では、衝撃負荷の解放後に切欠き先端の塑性領域に生じている圧縮残留応力に次の衝撃負荷応力が重畳したときの切欠き先端の真の応力が公称衝撃負荷応力の値とほぼ等しいか、わずかに低い程度になり、切欠き底での疲労き裂発生寿命が平滑材の疲労き裂発生寿命とほぼ一致するか、わずかに長いのではないかと考える。

次いで下記のように一般に定義される切欠き係数 β を用いて 0.2% 炭素鋼の衝撃疲労現象における切欠き効果の特徴について考えることにする。

$$\text{切欠き係数 } \beta = \frac{\text{平滑材の疲労強度}}{\text{切欠き材の疲労強度}}$$

いま、(6)式と(12)式から切欠き係数 β の式を導くと、次式のようになる。

$$\beta = (D_0/D^*) \exp\{(m^* - m_0) \ln N_f + (n^* - m_0) \ln T\} \quad (13)$$

ところが、(5)、(6)式より $C_0 T^{m_0} = D_0$ 、(8)式より $C^* T^{n^*} = D^*$ 、(11)式より $C^* = C_0 \alpha^c$ であり、また、(9)、(10)式より $m^* = m_0 \alpha^a$ 、 $n^* = m_0 \alpha^b$ であるので、これらの式から C_0 、 C^* 、 m^* 、 n^* を消去して整理すると、 D_0/D^* は次式で与えられる。

$$D_0/D^* = \alpha^{-c} \exp m_0(1 - \alpha^b) \ln T \quad (14)$$

したがって、(13)式に(14)式を代入して整理すると、(13)式の切欠き係数 β は次式のようになり、

$$\beta = \alpha^{-c} \exp m_0(\alpha^a - 1) \ln N_f \quad (15)$$

切欠き部の応力集中係数 α と破壊寿命 N_f との関数として与えられる。このように衝撃疲労における切欠き効果を任意の破壊寿命における切欠き係数 β の形で考慮すると、各切欠き材の衝撃疲労において(12)式のように切欠き部の応力集中係数 α によってそれぞれ異なる負荷持続時間 T の影響がなくなる。このことは、切欠き材の衝撃疲労における切欠き効果の特徴の一つであると考え。すなわち、平滑材としての衝撃疲労強度に対して、(6)式のように負荷持続時間 T の影響を累積負荷時間 $(N_f T)$ の形で考慮しておけば、切欠き効果は、あと切欠き部の応力集中係数 α と破壊寿命 N_f とによって決まり、疲労損傷の累積による強度劣化の傾

向に影響するだけであると考えてよからう。

3・4 繰返し衝撃引張荷重に対する許容応力および疲労破壊寿命の推定

本実験結果から明らかなように、平滑材の衝撃疲労強度〔(6)式〕と衝撃疲労における切欠き効果〔(15)式〕とを考慮することにより、0.2% 炭素鋼（焼なまし材）の場合、その切欠き部材の繰返し衝撃引張荷重（負荷持続時間 T sec）に対する許容応力 σ_a は、その切欠き部の応力集中係数 α を(1)式で求めると、任意の破壊寿命 N_f に対して次式で推定できる。

$$\sigma_a = \sigma / \beta = D_0 / \beta (N_f T)^{m_0} = \alpha^c D_0 / N_f^{m_0 \alpha^a} T^{m_0} \quad (16)$$

また、負荷持続時間 T sec の衝撃引張負荷応力 σ をその切欠き部材が繰返し受ける場合の破壊寿命 N_f は次式で推定できる。

$$N_f = [\alpha^c / m_0 (D_0 / \sigma)^{1/m_0} / T]^{1/\alpha^a} \quad (17)$$

ここで、注目すべきことは、平滑材の衝撃疲労強度の近似式における強度定数 D_0 が、供試材の静的引張強さ σ_B および破断絞り φ (%) との間に深い関係があることである。茶谷、中沢、中原等の研究結果では、0.01%、0.097%、0.36%、0.47% 炭素鋼を中心とした数種類の金属材料において(18)式のような関係があることを明らかにしているが、0.2% 炭素鋼およびその他の鋼材の平滑材に対する著者等の衝撃疲労強度の研究で得られている強度定数 D_0 の値を含めて鋼材のみに限定した場合の強度定数 D_0 では、Fig. 14 に見られるように、 σ_B および φ との間の関係は(19)式で近似できるようである。

$$D_0 = (0.8 + 0.002 \varphi) \sigma_B \quad (18)$$

$$D_0 = (0.75 + 0.0025 \varphi) \sigma_B \quad (19)$$

また、指数 m_0 の値に関しても、鋼材のみに限定した場合、Fig. 15 のように D_0/σ_B との間に次式のような関係がある。

Fig. 14. Relation between reduction of area φ and D_0/σ_B .

Fig. 15. Relation between constants m_0 and D_0/σ_B .

$$D_0 = (0.75 + 2.3m_0)\sigma_B \quad (20)$$

したがって、鋼材の引張強さ σ_B および破断紋り φ を基に(19), (20)式で強度定数 D_0 および指数 m_0 を求めると、その平滑材の繰返し衝撃引張荷重に対する疲労強度は充分推定できることがわかる。

一方、鋼材の疲労における切欠き感受性については、村木、石黒等の研究結果によると、一般に(21)式で定義される切欠き感受係数 η は引張強さ σ_B に依存するが $\sigma_B \leq 70 \text{ kg/mm}^2$ の鋼材では η の値はばらつき範囲内ではほぼ一定の値を示すようである。

$$\eta = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1} \quad (21)$$

したがって、本研究で得られている切欠き部の応力集中係数 α と切欠き係数 β との関係(15)式も、 $\sigma_B \leq 70 \text{ kg/mm}^2$ の鋼材に対しては、充分適用できると考える。

以上のことより、 $\alpha_B \leq 70 \text{ kg/mm}^2$ の鋼材の場合、その切欠き部材としての繰返し衝撃引張荷重に対する許容応力および疲労破壊寿命の推定には(16)式および(17)式を充分適用できると考える。

以上の考えのもとに、0.2%炭素鋼切欠き材(切欠き試験片[B], [C])の場合について、衝撃疲労強度と破壊寿命との関係を逆推定した直線を Fig. 16 に示す。実用上、充分な推定であると考ええる。

Fig. 16. Comparison between experimental and estimated values.

4 結 言

本研究では、0.2%炭素鋼の平滑材および4種類の環状切欠き材に対して繰返し衝撃引張荷重による低サイクル疲労試験を行い平滑材と切欠き材との間におけ

る衝撃疲労強度の関連性あるいは切欠き効果の特徴について究明した。得られた結果は下記のとおりである。

(1) 0.2%炭素鋼の衝撃疲労強度は、平滑材の場合、次式で近似でき、

$$\sigma(N_f T)^{m_0} = D_0$$

切欠き材の場合、次式で近似できる。

$$\sigma N_f^{m^*} T^{n^*} = D^*$$

(2) 切欠き材の衝撃疲労強度の近似式における指数 m^* , n^* はいずれも、切欠き部の応力集中が大きくなるほど、増大する傾向があり、応力集中係数 α と次式のような関係がある。 $\alpha \rightarrow 1$ のとき、 m^* , n^* の値は $m^* = m_0 \alpha^a$, $n^* = m_0 \alpha^b$

いずれも、平滑材の場合の指数 m_0 に等しくなる。

(3) 切欠き材の場合の強度定数 D^* は、平滑材の場合の強度定数 D^* との間に次式のような関係があり、 $\alpha \rightarrow 1$ のとき、 D^* は D_0 に等しくなる。

$$D^* = D_0 \alpha^c \exp m_0 (\alpha^b - 1) \ln T$$

(4) 切欠き材の衝撃疲労強度は、低寿命領域では平滑材より高応力レベルにあるが、高寿命領域に移るに従って応力集中の大きい切欠き材から順次、平滑材の衝撃疲労強度と逆転して行く。

(5) 切欠き材の衝撃疲労における切欠き係数 β は切欠き部の応力集中係数 α および破壊寿命 N_f の関数として次式のように与えられる。

$$\beta = \alpha^{-c} \exp m_0 (\alpha^b - 1) \ln N_f$$

(6) 引張強さが $\sigma_B \leq 70 \text{ kg/mm}^2$ の鋼材の場合、その切欠き部材の衝撃疲労強度は、その鋼材の引張強さ σ_B および破断紋り φ を基に、推定可能であると考えられよう。

(昭和51年5月20日 日本材料学会第25期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 茶谷明義, 中沢 一, 中原一郎, 日本機械学会誌, **73**, 1508 (1970).
- 2) 秋園幸一, 安宅 健, 材料, **21**, 660 (1972).
- 3) 有井 満, 内田 猛, 岡部永年, 日本機械学会講演論文集, No. 730-12, 193 (1973).
- 4) 井口 宏, 日本材料学会第25期総会学術講演会前刷, 27 (1976).
- 5) 田中道七, 中山英明, 材料, **23**, 678 (1974).
- 6) 西田正孝, 応力集中, 105 (1971) 森北出版
- 7) Tetelman, A. S., and A. J. McEvily, "Fracture of Structural Materials", **1**, 278 (1970).
- 8) 村木潤次郎, 石黒隆義, 半沢 貢, 片屋信彦, 学振第129委員会1分科会資料 (1966).