切欠きをもつ板材の疲労強度に及ぼす圧こん付加の影響*

後藤 真宏^{*1}, 西谷 弘信^{*2}, 宮川 浩臣^{*1}
三浦 篤義^{*1}, 今戸 啓二^{*1}Effect of Indentation on the Fatigue Strength
of Plate Specimens with a Central NotchMasahiro GOTO, Hironobu NISITANI, Hiroomi MIYAGAWA,
Atsuyoshi MIURA and Keiji IMADO

It has been reported by the authors that two "Brinell" indentations facing each other near the bottom of a notch are effective in improving fatigue strength. However, it is not easy to form these indentations precisely. Therefore, this method does not seem to be convenient for practical applications. In this study, the effect of an indentation pressed near the bottom of a notch on the fatigue strength of plate specimens with a central notch having various notch root radii is investigated. The results show that an extreme increase in fatigue strength is caused by the application of an indentation. The effect of the indentation can be estimated approximately from the value of residual stresses produced by an indentation.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Life Prediction, Fatigue Limit, Residual Stress, Indentation, Plate Specimen, Central Notch

1. 緒 言

著者らは先に中央に切欠きをもつ板材の片振り引張疲労試験を行い、切欠底をはさんで対称に付加した4個のブリネル圧こんが疲労強度に及ぼす影響について報告した⁽¹⁾。それによれば、4個の圧こん付加は疲労限度・疲労寿命とも大幅に上昇させるので、応力集中部をもつ板材の疲労強度強化法として有効である。しかし、有効に圧こん付加の効果を生じさせるには、4個の圧こんを決められた位置に正確に付加するとともに付加順序にも注意を払う必要があるため、その煩雑さからいってあまり実用的な方法とはいえない。

本研究は以上のことを考慮して、切欠底近傍に1個のブリネル圧こんを付加することが、応力集中部をもつ板材の疲労強度強化法としてどの程度有効であるかを検討し、その効果を定量的に評価したものである。1個のブリネル圧こん付加の効果に関して、き裂をもつ板材ではき裂伝ば速度が低下すること⁽²⁾⁽³⁾、および疲労限度が上昇すること⁽³⁾などが報告されているが、切欠きをもつ板材でその影響を検討したものはほとんどない。

どない。

2. 使用材料・試験片および実験方法

素材は電気亜鉛めっき鋼板 (JIS G3313, 現在は JIS G3141 (1 830 mm×915 mm×0.8 mm)) で、圧延方向に荷重を受けるように試験片を切り出した。この材料の引張試験の結果を図1に示す。下降伏点 σ_s および引張強さ σ_B はそれぞれ 245 MPa および 344 MPa である。

試験片は長さ 320 mm, 幅 90 mm に切り出したものを図2に示す形状に機械仕上げして製作した。図2

図1 応力-ひずみ線図

* 原稿受付 平成3年6月26日。

^{*1} 正員, 大分大学工学部 (〒870-11 大分市且野原 700)。^{*2} 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

(a)は平滑材, (b)は切欠材である。切欠形状は、図3に示すように長さ10 mmで切欠半径を $\rho=1, 2.5, 5$ mmの3種類に変えたものである。圧こんはブリネル硬さ試験機を用いて、図3に示すように切欠底から d (d : 圧こん直径) だけ離れた位置に圧こんの中心がくるように、17/32 in 鋼球を試験片両面に押付けることにより付加した。付加荷重 P としては2.9 kNおよび

(a) 平滑材

(b) 切欠材 (中央部には図3に示す形状の切欠きが加工してある)

図2 試験片の形状と寸法

(a) $\rho=1$ mmの切欠き (b) $\rho=2.5$ mmの切欠き (c) $\rho=5$ mmの切欠き

図3 切欠形状と圧こん付加位置

5.9 kNを用いた。圧こんの直径 d および中心部の深さ t_i はそれぞれ、 $P=2.9$ kNの場合 $d=2.1$ mm, $t_i=0.06$ mmで、 $P=5.9$ kNの場合 $d=2.9$ mm, $t_i=0.11$ mmである。

使用した試験機は電気油圧制御式引張圧縮疲労試験機であり、繰返し速度を12 Hzとし、荷重制御で実験を行った。負荷の種類は最小応力を9.8 MPaで一定とした片振り引張りである。応力は切欠部を除いた試験片最小断面の公称応力である。き裂長さ $2a$ としては切欠きを含めて軸方向に投影した長さをとっている。き裂長さの測定は、試験機に取付けた顕微鏡($\times 30$)にて行った。

3. 実験結果および考察

本研究では、1個のブリネル圧こん付加が切欠きをもつ板材の疲労強度強化法としてどの程度有効かを調べ、その定量的評価を行う。以下では、圧こんの押付け荷重を一定($P=2.9$ kN)とし切欠半径が異なる場合の効果を示し、さらに押付け荷重が異なる場合の効果を切欠半径一定($\rho=1$ mm)のもとで検討する。

3.1 切欠半径が異なる場合の圧こん付加の効果

図4にS-N曲線を示す。点線で圧こんを付加しない場合を、実線で付加した場合をそれぞれ示す。切欠材では疲労限度・破断寿命のいずれも平滑材より著しく減少するが、圧こん付加によりいずれの切欠半径の場合も疲労強度はかなり回復しており、1個の圧こん付加が板材の強化法として有効であることがわかる。表1にそれぞれの ρ の場合の疲労限度・応力集中係数 $\alpha^{(4)}$ および切欠係数 β の値を示す。圧こん付加による疲労限度の回復は ρ により異なり、 $\rho=1$ mmでは疲労限度の回復が認められるが、他の ρ ではほとんど疲

図4 各種切欠材と平滑材のS-N曲線

疲労限度は上昇しない。 $\rho=1\text{ mm}$ の場合の疲労限度が上昇した理由として、破断限界が σ_{w1} (振幅で表した切欠材のき裂発生に対する疲労限度) 支配から σ_{w2} (切欠材の停留き裂の伝ば限界に対応する疲労限度) 支配に変わることが考えられる。またこのことは、分岐点の切欠半径 ρ_0 が平均応力により支配されることに関係する⁽⁶⁾。 $\rho=1\text{ mm}$ の場合、図 5 (a) の伝ば曲線からわかるように、疲労限度の応力のもとでは停留き裂が発生する (他の ρ では疲労限度において停留き裂は認められなかった)。一方、圧縮の残留応力による σ_{w1} の上昇は一般に小さく、本実験ではその効果はほとんど認められない。

以上のように、圧こん付加による疲労限度の上昇は $\rho=1\text{ mm}$ の場合しか認められないが、有限寿命域の破断寿命はいずれの ρ の場合もかなり増加している。

図 5, 6 に、各種 ρ の場合のき裂伝ば曲線および $a-N/N_f$ 関係をそれぞれ示す。比較のため図 5 では圧こんを付加しない場合の伝ば曲線を点線で示す。これらの図から、いずれの ρ の場合も圧こん付加によりき裂

伝ば速度は減少すること、それぞれの ρ ごとに相対繰返し数で整理すれば伝ば曲線は応力にあまり影響されず 1 本の曲線で近似できることが分かる。また、圧こん付加によるき裂伝ば遅延効果は、 $a=6\sim 8\text{ mm}$ の範囲で特に大きい (これはき裂先端が圧こん部を伝ばする範囲と一致している)。また、き裂伝ば寿命の大部分はき裂が圧こん部を伝ばする寿命で占められる。そこで、圧こんが有効に作用し始める $a=6\text{ mm}$ 以後の寿命を基準とした相対繰返し数 $(N-N_{a=6})/(N_f-N_{a=6})$ とき裂長さの関係を図 7 に示す。いずれの ρ の場合も、き裂が $a=6\text{ mm}$ から 8 mm に至るまでに $N_f-N_{a=6}$ の約 80% が費やされている。また、この範囲では伝ば曲線のかかなりの部分が直線で近似できる。このことは、圧こん部を伝ばするき裂の da/dN は近似的に一定とみなせることを意味する。

$\rho=1\text{ mm}$ の切欠きについて、1 個の圧こん付加による効果が先に報告した 4 個の圧こん付加 (鋼球および押付け荷重は同一) による効果に比べてどの程度異なるかを比較したものを図 8 に示す。伝ば速度の低下が認められるき裂長さの範囲は 4 個のほうが広いが、全体としてみれば両者に大きな違いは認められない (他の ρ についても同じ傾向の結果を得た)。したがって、この場合はその簡便さからみて実用上 1 個の圧こん付加のほうがより優れているといえる。ただし、疲労限度はいずれの ρ の場合も 4 個のほうが 1 個の場合より 10% 程度大きい。

圧こんの効果を定量的にみるため、伝ば寿命の大部分を占める、き裂が圧こんの付加範囲を伝ばするとき

表 1 各種切欠材と平滑材の疲労限度と α, β の値

Specimen	Fatigue limit ⁺		α	$\beta (= \frac{\sigma_{we}}{\sigma_w})$	$\beta_1 (= \frac{\sigma_{w2}}{\sigma_{w1}})$
	σ_w^*	σ_{w1}^{**}			
Plain	245 ($=\sigma_{we}$)	—	1	1	—
$\rho=1\text{ mm}$	101	130	5.01	2.43	1.88
$\rho=2.5\text{ mm}$	135	138	3.46	1.81	1.78
$\rho=5\text{ mm}$	163	163	2.73	1.50	1.50

+ : MPa, * : Without indentation, ** : With indentation

(a) $\rho=1\text{ mm}$ の場合

(b) $\rho=2.5\text{ mm}$ の場合

(c) $\rho=5\text{ mm}$ の場合

図 5 各種切欠材のき裂伝ば曲線 ($P=2.9\text{ kN}$)

の da/dN を測定し（この範囲では da/dN は一定とみなせるので、便宜上き裂が圧こんの中心を伝ばするとき ($a=7\text{ mm}$) の da/dN - ΔK 関係を求めた）、図 9 に $\circ$, $\triangle$, $\square$ 印で示す。実線は、圧こんを付加しないときの da/dN - ΔK 関係である。圧こんを付加したときの da/dN - ΔK 関係は、切欠半径にほとんど影響されず 1 本の直線で近似される。

このような圧こんによりき裂先端に分布する圧縮応力の影響は、図 10 のモデルを用いて近似的に評価で

きる。すなわち、圧こん付加による残留応力により見掛けの $K=\sigma_\infty\sqrt{\pi a}$ が K_0 だけ減少することになる。この減少量 K_0 は、き裂先端から $b \leq |x| \leq a$ の範囲に作用する残留応力による K に等しい。したがって、残留応力による K の減少量は図 11 に示す基本解⁽⁶⁾を用いれば次式のようにになる。

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_b^a \left\{ \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} + \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} \right\} \sigma_\infty dx$$

図 6 各種切欠材のき裂長さ a と N/N_f の関係 ($P=2.9\text{ kN}$)

図 7 各種切欠材のき裂長さ a と $(N - N_{a=6}) / (N_f - N_{a=6})$ の関係 ($P=2.9\text{ kN}$)

図 8 $\rho=1\text{ mm}$ の切欠材の 4 個の圧こん付加⁽¹⁾と 1 個の比較

図 9 da/dN - ΔK 関係に及ぼす圧こん付加の影響 ($P=2.9\text{ kN}$)

$$= \frac{2}{\pi} \sigma_s \sqrt{\pi a} \int_b^a \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}}$$

$$= \sigma_s \sqrt{\pi a} \left(1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{b}{a} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sigma_s = 245 \text{ MPa}$ 、 $a - b = 0.5 \text{ mm}$ として計算して補正値をプロットすれば●、▲、■印のようになり、

図 10 圧こん付加による残留応力を評価するためのモデル

図 11 集中力が作用する場合の基本解

図 12 圧こん付加荷重が 5.9 kN のときの切欠材 ($\rho = 1 \text{ mm}$) の S-N 曲線

圧こんがない場合の結果とほぼ一致する(図 9)。すなわち、図 10 のモデルにより残留応力の影響が近似的に評価できる ($a - b$ の値は直接求めることは困難であるので、ここでは補正後の $da/dN - \Delta K$ 関係が圧こんなしの結果とほぼ一致するように $a - b$ の値は決めている)。

3.2 圧こんの押付け荷重の影響 ここでは、圧こんを押付ける荷重 P が異なる場合の効果について検討を加える。 P としては、2.9 kN および 5.9 kN を用いた。また、 ρ の違いにより圧こんがき裂伝ば挙動に及ぼす効果に本質的な差が認められないことから、ここでは $\rho = 1 \text{ mm}$ について P の影響を検討する。

図 13 き裂長さと N/N_f の関係 ($\rho = 1 \text{ mm}$, $P = 5.9 \text{ kN}$)

図 14 $da/dN - \Delta K$ 関係に及ぼす圧こん付加の影響 ($P = 5.9 \text{ kN}$)

図 12 に $S-N$ 曲線を示す。押付け荷重の大きいほうが(言い換えれば、圧こん寸法の大きいほうが)、疲労限度・破断寿命とも大きく、 $P=5.9\text{ kN}$ の場合圧こん付加によって、疲労限度は約 1.7 倍、破断寿命は最大で 25 倍程度増加する。

図 13 に $a-N/N_f$ 関係を示す。 $P=5.9\text{ kN}$ の場合も 2.9 kN と同様、き裂が圧こん部を伝ばする($a=6.5\sim 9.5\text{ mm}$)間に寿命の大部分が費やされている。また、この範囲では伝ば曲線のかなりの部分が直線で近似できる。

図 14 に、 $P=2.9\text{ kN}$ の場合と同様にして求めた $da/dN-\Delta K$ 関係を△印で示す(この場合も、き裂が圧こんの中心($a=8\text{ mm}$)を伝ばするときの da/dN を使用している)。▲印は式(1)により K_0 を求め、 K を補正したときのプロット点である。補正值は、圧こんがない場合の $da/dN-\Delta K$ 関係にほぼ一致し、残留応力の効果が近似的に評価できている。ここで、 K_0 を求める際の $a-b$ の値は、 $a-b=1\text{ mm}$ としている。

以上のように、図 10 のモデルにより圧こん付加の影響が近似的に評価できるが、式(1)から圧こん付加による残留応力による K の減少分を計算するには、 $a-b$ の値を大きさの異なる圧こんについて推定しなければならない。図 15 は、 $a-b$ と圧こん中心部の板厚 t_i の関係を調べたものである。 $a-b$ と $\ln t_i$ の関係はほぼ 1 本の直線で近似できる。したがって、本材料では板厚 0.8 mm に限れば図 15 から任意寸法の圧こんに対する $a-b$ の値を決定できるので、式(1)によりき裂伝ばに対する圧こん付加の影響を定量的に予測できる。板厚が異なる場合の圧こん付加の影響を予測するには、 $(a-b)-t_i$ 関係を板厚ごとに求めておく必要がある。

4. 結 論

中央に長さ 10 mm の切欠きをもつ板材の片振り引張疲労試験を行い、切欠底から圧こんの直径 d だけ離れた位置に圧こんの中心がくるように付加した 1 個のブリネル圧こんが疲労強度に及ぼす影響について検討した。得られた主な結論を以下に示す。

(1) 圧こん付加により切欠半径 ρ の小さい($\rho=1\text{ mm}$)切欠材の疲労限度は増加するが、 ρ の大きい($\rho=2.5$ および 5 mm)切欠材では疲労限度の増加はほと

図 15 $a-b$ と圧こん中心部の板厚 t_i の関係

んど認められない。 $\rho=1\text{ mm}$ の場合の疲労限度の増加は、圧縮の残留応力により分岐点の切欠半径が大きくなる(破断限界が σ_{w1} 支配から σ_{w2} 支配へ変わる)ことによって説明される。

(2) 圧こん付加により、破断寿命はいずれの ρ の場合も著しく増加する(本実験の範囲では、最大で約 25 倍の増加が認められる)。

(3) き裂長さと相対繰返し数 N/N_f の関係は、それぞれの ρ ごとに応力レベルにあまり影響されずほぼ 1 本の曲線で近似できる。また、伝ば寿命の大部分はき裂が圧こん部を伝ばする寿命に費やされ、この範囲の伝ば速度は近似的に一定とみなせる。

(4) き裂が圧こん部を伝ばするときの $da/dN-\Delta K$ 関係に及ぼす圧こん付加による残留応力の影響は、図 11 に示すモデルにより近似的に評価できる。

以上のことは、1 個の圧こん付加が応力集中部をもつ板材の疲労強度強化法として十分有効であることを示唆している。

終わりに、本実験は本学卒業研究生甲斐昭成君〔現：日立エレベータサービス(株)〕の協力のもとに行われたことを記して、謝意を表する。

文 献

- (1) 宮川・ほか 3 名, 機論, 53-486, A(1987), 220.
- (2) De Rijk, P. and Otter, A. A. M., Swedish Natl. Inst., Rep. TR, 70029(1970).
- (3) 後藤・ほか 3 名, 機論, 56-526, A(1990), 1348.
- (4) 石田, 機論, 21-107(1955), 514.
- (5) 西谷・岡坂, 機論, 39-317(1973), 49.
- (6) Erdogan, F., Proc. 4th U. S. Natl. Congr. Appl. Mech., (1962), 547.