流体素子式疲労試験機の応用*

(90° V 曲げ加工した薄板冷間圧延鋼板の両振り平面曲げ疲労強度の評価)

矢畑 昇^{*1}, 渡辺 正昭^{*1}, 山本 英紀^{*2}Application of Fluidic-Deice Type Fatigue Testing Machine
(Evaluation of Reversed Plane-Bending Fatigue Strength
of Cold Rolled Steel Sheets Bent to 90° V-shape)

Noboru YAHATA, Masaaki WATANABE and Hideki YAMAMOTO

The effect of cold 90° V bent-working on the reversed plane-bending fatigue strength of cold rolled carbon steel sheets was investigated with a fatigue machine developed previously using a fluidic-device. The results obtained can be summarized as follows. (1) The fatigue strength of 90° V bent sheets was always higher than that of the flat ones. Moreover, the fatigue strength of bent sheets increased with decreasing bending radius. (2) The fatigue cracks in the bent sheets always initiated at the inside of bent location. (3) The fatigue machine can be used to evaluate the reversed plane bending fatigue strength of bent sheets.

Key Words: Fatigue Machine, Fluidic Deice, Fatigue Strength, Cold Rolled Steel, Bent Sheet

1. ま え が き

著者らの一人は純流体素子⁽¹⁾を利用して流体素子式疲労試験機を開発⁽²⁾し、本試験機を調質鋼薄板の両振り平面曲げ疲労試験⁽³⁾やリード弁の衝撃疲労試験機⁽⁴⁾に適用してきた。本試験機は試験機本体には全く機械的可動部がなく、構造が極めて簡単のため製作費や保守・管理費などが安価である。著者らは本試験機の特徴を生かして種々への応用を検討している⁽⁵⁾。

航空機、車両、自動車などの輸送機械には薄鋼板のプレス曲げ加工板が多く用いられており、使用中に振動や風圧などの繰返し負荷を受ける場合がある。しかし、それらのプレス曲げ加工板の疲労強度を評価するには市販の疲労試験機では困難であり、特殊なジグを製作して取り付ける必要がある。これまでに予加工された平板試験片の疲労強度については多くの研究報告があるが⁽⁶⁾、曲面状に加工された板材の疲労強度についての研究はほとんど見当たらない⁽⁷⁾。

そこで、開発した流体素子式疲労試験機の特徴を利

用して、種々の曲げ半径に90° V 曲げ加工した厚さ0.75 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC) について両振り平面曲げ疲労試験を行い、曲げ加工が疲労強度に及ぼす影響を調べるとともに、本試験機の曲げ加工板に対する疲労強度評価の有効性について検討した。

2. 供試材料と試験方法

2・1 供試材料 試験に用いた材料は良好なプレス成形性を有する板厚0.75 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC) である。納入時の表面粗さ R_y は3.2~6.3 μm であり、その表面状態を図1に示す。また、その化学組成を表1に示す。この圧延鋼板から引張試験片

Fig. 1 Specimen surface

* 原稿受付 1997年11月21日。

^{*1} 正員, 東京農工大学工学部 (☎ 184-8588 小金井市中町2-24-16)。^{*2} 東京農工大学大学院。

Table 1 Chemical composition (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	N
0.044	0.02	0.20	0.012	0.007	0.039	0.0065

Table 2 Mechanical properties

Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
249	316	41.4	114

Fig. 2 Shape and dimensions of specimen (mm)

Table 3 Bend radius and springback of specimens

	R0.5	R1	R2	R4	R6
Inside radius, mm	0.49	0.85	2.08	3.36	4.24
Outside radius, mm	1.16	1.62	2.84	4.18	5.00
Springback, deg.	0.03	-0.09	0.22	2.26	3.60

Fig. 3 Nominal stress-strain curve
(Tensile speed: 10 mm/min)

および疲労試験片の長手方向が一致するように採取した。

2・2 疲労試験片 圧延鋼板から図2に示すような平板試験片を機械加工により製作した。最小断面の円弧部は機械加工後にエメリー紙400番まで研磨仕上げするとともに、鋭い縁はエメリー紙で除去した。板表面は納入状態のままである。その後、機械加工で生じた残留応力を除去するために、真空中で600°C・30分間の低温焼きなましを施した。そのときの引張試験から得られた応力-ひずみ曲線の代表例と機械的性質を図3および表2に、さらに顕微鏡組織を図4に示す。

次に、平板試験片を図5に示す形状のポンチとダイを用いて最小断面部を90°にV曲げ加工を行い、曲げ加工した疲労試験片を製作した。ポンチの頂角半径は0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 mm (以降R0.5, R1, R2, R4, R6試験片と称する)の5種類とした。曲げ加工力とその保持時間は曲げ半径にかかわらず6 kN, 30秒一定とした。曲げ加工試験片R0.5, R1, R2, R4, R6の曲げ半径およびスプリングバック量を表3に示す。表3の曲げ半径の測定は試験片曲げ部を光学顕微鏡を用い400倍で撮影したフィルムを工具顕微鏡(分

(a) Plane surface

(b) Cross section

Fig. 4 Microstructure

Fig. 5 Bending Method

解能 $1\text{ }\mu\text{m}$) により円弧部の座標を読み取り最小二乗近似により測定した。測定誤差は約 2% であった。曲げ半径はポンチの頂角半径より若干小さくなっている。また、スプリングバック量は曲げ半径が大きいほど大きくなったが、 $R2$ 以下ではほとんど直角に加工されていた。また、曲げ加工部断面の顕微鏡組織を観察したところ、図 6 に示すように最も曲げ加工の厳しい $R0.5$ でも曲げ加工による亀裂などの欠陥は認められなかった。なお、比較のために平板試験片の疲労強度も求めた。

2.3 流体素子式疲労試験機 試験に用いた流体素子式疲労試験機は著者らの一人が前報⁽³⁾⁽⁸⁾で開発したものを一部改造したもので、その概略構造を図 7 に示す。エアドライヤ、フィルタにより油水分や塵埃が十分に除去された圧縮空気は、減圧弁 ($R.v$) で所定の供給圧力に調整され、アクリル性の流体素子に送られてパルス状の噴流となって両側のノズルから交互に噴出される。その噴流により両ノズルの中央に取付けられた薄板試験片は繰返しの両振り平面曲げを受ける。試験片に完全両振り曲げを与えるため、一方のノズル内にニードルバルブを取付けて噴流を調節できるようにした。ノズルからの圧縮空気の噴出量は供給圧力および出口流路に取付けたピストン・シリンダ式負荷容量部の容積を変えることにより、連続的に任意の値に設定できる。試験片に与えられている繰返し速度

および累積繰返し数は出口流路の半導体圧力変換器で検出されカウンタに表示される。また、試験片が破断した時には試験機を自動的に停止させる光電式自動停止装置が設置されている。これらの詳細については前報⁽⁸⁾で報告した。

図 8 に平板試験片および 90° V 曲げ試験片の取付方法を示す。本試験機は試験片ホルダの取付位置を変えることにより、任意の曲げ角の試験片について両振り平面曲げ疲労試験が可能である。

2.4 応力振幅の決定法 完全両振り平面曲げ疲労試験機の多くは応力振幅と破断までの繰返し回数、すなわち $S-N$ 曲線を求める。本試験においては平板試験片および曲げ加工試験片に負荷する応力は次のようにして行った。

まず、予備疲労試験で平板試験片および各種曲げ半径の曲げ試験片とも最小断面部で疲労破壊すること、および曲げ加工試験片では内側から疲労亀裂が発生・伝播することが確認された (図 16 参照)。そこで、たわみばり試験片の最小断面部 (曲げ加工試験片では内側) にひずみゲージ (ゲージ長さ 0.2 mm) を貼付し、静的負荷および噴流による動的負荷による校正曲線を求めた。静的負荷による校正はゲージの貼付の検定に用い、校正値の誤差 1% 以下の試験片を動的校正に使用した。その結果、図 9 に示すように静的負荷と

Fig. 6 Microstructure of $R0.5$ bent specimen

Fig. 7 Schematic diagram of fluidic-device type fatigue machine

(a) For flat specimen

(b) For bent specimen

Fig. 8 Layout of test section

(a) Static loading

(b) Dynamic loading

Fig. 9 Calibration curves between ε_{in} and ε_f for $R 0.5$ Fig. 10 Typical variation of strain with time (231 Hz, $R 0.5$)

動的負荷によるひずみ $\varepsilon_{in}-\varepsilon_f$ (ε_{in} : 曲げ試験片の曲げ部内側のひずみ, ε_f : たわみばりのひずみ) の校正曲線が異なった。これは、静的負荷の場合は荷重を集中荷重で行っており、動的負荷は噴流による分布荷重となるためであると考えられる。しかし、動的負荷において本試験範囲でのひずみ振幅(応力振幅)が変化しても、たわみばりと平板およびすべての曲げ加工試験片とのひずみの位相は図10に示すように完全に一致し、全体が一次振動していること、および校正曲線がほとんど変化しないことが確認された。したがって、動的負荷の校正曲線を用いて、たわみばりのひず

Fig. 11 Relation between stress amplitude and frequency

Fig. 12 S-N curves for flat and bent specimens

みにより試験片に付加する応力振幅を設定した。図9(b)の $R 0.5$ に対する動的負荷の校正曲線において曲率半径が小さいため圧縮側と引張側の傾きが若干異なるが、他の曲率半径の試験片では圧縮側と引張側で傾きが異ならなかったため、校正値は圧縮・引張側とも同一値とした。校正値の誤差は $R 0.5$ で $\pm 3.0\%$, $R 1$ で $\pm 1.7\%$, $R 2$ で $\pm 1.5\%$, $R 4$ で $\pm 1.3\%$, $R 6$ で $\pm 1.1\%$, 平板で $\pm 1.4\%$ である。応力振幅は負荷容量の容積変化および供給圧力により変えることができるが、ここでは供給圧力を 0.5 MPa 一定として負荷容量の変化により周波数を変化させる方法を採用した。各種試験片の周波数と応力振幅との関係を図11に示す。いずれの場合も周波数の増加とともに応力振幅が減少する。

3. 実験結果および考察

開発した流体式疲労試験機により冷間圧延鋼板 (SPCC) の板厚 0.75 mm の平板試験片および各種曲げ半径で 90° V 曲げ加工した試験片について両振り平面曲げ疲労試験を行った。それらの $S-N$ 曲線を図 12 に示す。ここで、 σ_{in} は曲げ加工試験片の曲げ部内側の応力振幅である。図 12 から曲げ半径が小さいほど時間強度および疲労限度が上昇することがわかる。

一般に金属材料に曲げ加工を施すことにより、材料は加工硬化するとともに残留応力が発生することが予想される。多くの場合、加工硬化は材料の疲労限度を上昇させる⁽⁶⁾。一方、発生した残留応力は平均応力と考えられ⁽⁹⁾、圧縮残留応力は疲労限度を増加させるが、引張残留応力は疲労限度を低下させることが知られている。本実験では前述したように最も厳しい曲げ加工 $R 0.5$ 材においても、曲げ加工による割れや表面粗れなどが観測されなかったことから、曲げ加工による疲労強度に及ぼす主因として加工硬化と残留応力が考えられる。

そこで、曲げ加工材の加工部内外面の硬さおよび残留応力の測定を行った。硬さ測定は試験片曲げ部が圧子先端以外で接触しない幅に切断し ($R 0.5$ で約 50 μm 幅, $R 1$ で約 100 μm 幅, 他は約 2 mm 幅)、測定用ジグに固定しマイクロビッカース計 (荷重 200~300 gf) で測定し、残留応力測定は試験片固定ジグを用い、微小部 X 線応力測定装置 (入射スリット $\phi 0.5$ mm) で測定した。これらの結果を表 4 に示す。硬さ値はほぼ表面層 20 μm の平均硬さである。曲げ加工部における硬さ測定値および残留応力測定値は曲面のため測定の困難性からばらつきがあり (ばらつきは標準偏差で表示)、特に残留応力のばらつきが大きい。

図 13 に引張試験の途中止め試験からえられた真ひずみ-硬さ曲線を示す。硬さ Hv は式 (1) および (2) の指数曲線で近似できることがわかる。

$$Hv = 181 \varepsilon^{0.111} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 0.14 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$Hv = 217 \varepsilon^{0.199} \quad 0.14 \leq \varepsilon \quad \cdots \cdots (2)$$

硬さから上式を用いて算出したひずみ ε_H とし、曲げ加工によって中立軸が移動しないものとして曲げ部の曲率半径 (表 3) から算出したひずみを ε_R としたときの両者の相関を図 14 に示す。図 14 から ε_H と ε_R は両者とも測定時の誤差が大きい、図中の $\varepsilon_H = \varepsilon_R$ の直線とよく一致する。いま、 ε_H と ε_R の平均値を加工硬化ひずみ ε_W として疲労限度 S_w との関係を図 15 に示す。疲労限度は加工硬化ひずみの増加とともに一次比例して増加することがわかる。

疲労限度に影響を与える内外面の残留応力は予想されているように内面に引張残留応力、外面には圧縮残留応力が生じた。そして、外面の圧縮残留応力は内面

Fig. 13 Relation true strain ε and hardness Hv at tensile test

Fig. 14 Relation between strain of work-hardening calculated bend radius (ε_R) and hardness (ε_H)

Fig. 15 Relation between work-hardening ε_W and fatigue limit S_w

Table 4 Residual stress and hardness of specimens

Type of specimen	Residual stress, MPa		Hardness, Hv	
	inside	outside	inside	outside
Flat	29 ± 66	—	114 ± 4	—
R6	84 ± 37	-108 ± 76	137 ± 7	139 ± 6
R4	105 ± 15	-139 ± 49	144 ± 5	144 ± 4
R2	113 ± 33	-247 ± 57	166 ± 9	158 ± 6
R1	118 ± 27	-290 ± 43	179 ± 11	165 ± 12
R0.5	126 ± 58	-239 ± 100	190 ± 8	178 ± 13

Fig. 16 Fracture surface for R6

の引張応力に比べて、その絶対値が大きくなるとともに、一定値となる曲げ半径は大きくなった。

2・4節で述べたように多くは図16に示すように、内面から疲労亀裂が発生・伝播したことが観察された。この原因としては表5に示したように、同一両振り曲げモーメント下での内外応力比 $|\sigma_{in}/\sigma_{out}|$ を曲がりばりの理論式⁽¹⁰⁾から求めると常に大きいこと、および外面に大きな圧縮残留応力が内面には引張残留応力が生じているためと考えられる。

また、図15に示したように、加工硬化が大きくなるほど（曲げ半径が小さくなるほど）、時間強度や疲労限度が上昇する理由として次のように考察される。

曲げ半径が小さくなるほど内面は著しく加工硬化されるが、疲労強度を低下させる引張残留応力値はさほど大きくなり、かつ一定値になる。表6に繰返し応力数 N が 10^7 回後の残留応力を示す。引張・圧縮残留応力とも初期残留応力より減少しているが、特に試験片内側の引張残留応力は初期値に比べ非常に小さくなっており、ほぼ零に近い値となっている。これは残留応力が繰返し応力により減衰するという従来指摘されていることと一致している⁽¹¹⁾。この結果、疲労限度に及ぼす引張残留応力の影響はほとんどないと考えられる。したがって、本試験で得られた結果は初期残留応力の影響は小さく、曲げ加工による加工硬化が支配的因子と考えられる。

4. 結 言

著者らの一人が以前に開発した純流体素子式疲労試験機を、これまでほとんど研究報告されていないプレス曲げ加工板材の両振り平面曲げ疲労強度の評価に適用することを試みた。今回は0.75 mmの冷間圧延鋼板（SPCC）に種々の曲げ半径（内半径 R 0.5～ R 6 mm）の90°V曲げを施し、曲げ加工が疲労限度に及

Table 5 Theoretical Ratio of $|\sigma_{in}/\sigma_{out}|$

R0.5	R1	R2	R4	R6
1.74	1.53	1.23	1.16	1.12

Table 6 Residual stresses after $N=10^7$ (MPa)

	Flat	R0.5	R1	R2	R4	R6
Inside	5±62	44±20	21±12	17±27	12±12	13±31
Outside	—	-147±61	-177±36	-163±18	-82±40	-69±68

ぼす影響を調べるとともに、本疲労試験機の曲げ加工板に対する疲労強度評価への適用性を検討した。その結果、次のようなことが明らかとなった。

(1) 90°V曲げ加工板の疲労限度は平板のものに比べて常に大きくなった。さらに、曲げ半径が小さくなるほど、すなわち曲げ部の加工硬化量が大きくなるほど疲労強度が加工硬化量に比例して増加した。この主因としては加工硬化が推測された。

(2) 曲げ加工板では疲労亀裂の発生は曲げ部の内側であることが確認された。

(3) 流体素子式疲労試験機は曲げ加工板の平面疲労強度評価に有効である。

最後に、本研究の実験遂行に協力された東京農工大学工学部生今橋正守君、ならびに材料を提供された日本鋼管株式会社に厚く感謝する。

文 献

- (1) Wood, R. L., 山本圭次郎, 機誌, **90**-882 (1987), 594-596.
- (2) 矢畑昇, 特許第2089781 (1996).
- (3) 矢畑昇・茅野雅久, 機論, **58**-547, C (1992), 962-966.
- (4) 田村進・矢畑昇, 機論, **60**-570, C (1994), 632-638.
- (5) 矢畑昇, 材料試験技術, **42** 1 (1997), 31-37.
- (6) 例えば, 国本隆・松本祐一・土井幸雄, 軽金属, **37**-7 (1987), 468-472.
- (7) Vossoughi, H., Soudki, K., White, R. N., Ingraffea, A. R. and Sansalone, M., *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Tech.*, **111** (1989), 259-265.
- (8) 矢畑昇・茅野雅久・地代所俊彦・斎藤知樹, 材料試験技術, **39** 3 (1994), 194-199.
- (9) 児玉昭太郎, 機誌, **75** 642 (1972), 1026-1083.
- (10) 鶴戸口英善・川田雄一・倉西正嗣, 材料力学上巻, (1982), 306, 裳華房.
- (11) 西原利夫・平修二・ほか2名, 機論, **14** 48 (1948), 1107-1113.