アルミニウム合金板材の面外曲げ疲労強度に及ぼす曲げ加工の影響[†]

大 川 慶* 工 藤 充 史**
安 藤 丈 裕** 大 川 功***

Effect of Bending-Work on Fatigue Strength of Aluminum Alloy Plate under Out-of-Plane Bending

by

Kei OHKAWA*, Atsushi KUDO**, Takehiro ANDO** and Isao OHKAWA***

Fatigue tests were performed on 90° V-shape bending-worked aluminum alloy specimens with various radii of curvature under deflection-controlled fully-reversed out-of-plane bending to clarify the effect of bending-work on fatigue strength of plates. Fatigue strength of the bent specimens was entirely lower than that of smooth flat one and decreased with reduction in radius of curvature. In order to investigate the cause of the reduction in fatigue strength of bent specimens, stress state in the vicinity of the bending-worked portion was analyzed employing a finite element method. Besides, crack initiation and growth behavior was observed and compared with those of smooth flat specimen. The crack initiation tends to be earlier with decreasing the radius of curvature because of the higher stress concentration around the center of inner surface of the bent portion. In addition, the crack growth rate in bent specimens was higher than that in flat specimen, especially in an early stage of short crack growth regime and increased with decreasing the radius of curvature. Since cyclic bending stress decreased with crack growth and accumulation of residual strains, the crack growth rate gradually lowered in latter stage of the life. Consequently, the reduction of fatigue strength in bending worked plate results from the earlier crack initiation and the acceleration of crack growth rate in early stage due to the stress concentration around the bent portion.

Key words : Fatigue strength, Bending-work, Out-of-Plane bending, Aluminum alloy, Crack growth, Stress concentration

1 緒 論

実機には曲げ加工により成型された板材部品が多く用いられており、これらが繰返し負荷を受けて疲労破壊する事例が報告されているが、この曲げ加工が板材の疲労強度に及ぼす影響について検討した研究事例は極めて少ない^{1), 2)}。このような曲げ加工材の疲労強度に関する知見は、多数の曲げ加工成型部材により構成される実機の疲労設計に役立つだけでなく、曲げ加工法の改善や他の疲労破壊防止策について検討するためにも必要不可欠なものである。

本研究では、種々の曲率半径を有するアルミニウム合金の 90° 曲げ加工板材を用いて両振り面外曲げ疲労試験を行い、この曲げ加工が板材の疲労強度に及ぼす影響について調べた^{3)~5)}。さらに、曲面状に加工された曲げ部内側表面から発生、成長する疲労き裂の進展挙動を観察するとともに、繰返しにともなう曲げモーメントやひずみの変化を測定した。得られた試験結果を平板平滑試験片のそれと比較することにより、曲げ加工が板材の面外曲げ疲労強度に及ぼす影響について詳細に検討した。

2 試料および試験方法

2・1 供試材および試験片

供試材は板厚 3mm のアルミニウム合金 A5052P-H34 板材である。引張試験片および疲労試験片は、その長手方向がいずれも素材の圧延方向と一致するように採取した。供試材の化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。まず、素材を Fig. 1 (a) に示す形状の平板平滑試験片に機械加工し、さらにこれを Fig. 1 (b) に示すように、挟み角が 90° となるよう曲げ加工した。曲げ加工部内側の曲率半径は 15, 6 および 3mm の 3 種類であり以後、これらの試験片をそれぞれ、R15, R6, R3 曲げ加工材と表記する。なお、各試験片の最小断面部の板幅は基本的に

Table 1 Chemical composition and mechanical properties.

Chemical composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
wt%	0.25	0.4	0.1	0.1	2.8	0.35	0.1	—
Mechanical properties	Young's modulus		GPa		66.7			
	0.2% proof stress		MPa		184			
	Tensile strength		MPa		213			
	Elongation %				14			

[†] 原稿受理 平成 24 年 12 月 21 日 Received Dec. 21, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

* 学生会員 法政大学大学院 〒184-8584 小金井市梶野町, Graduate school, Hosei Univ., Kajino-cho, Koganei, 184-8584

** JUKI (株) 〒206-8551 多摩市鶴牧, JUKI corporation, Tsurumaki, Tama, 206-8551

*** 正 会 員 法政大学理工学部 〒184-8584 小金井市梶野町, Faculty of Sci. and Eng., Hosei Univ., Kajino-cho, Koganei, 184-8584

Fig. 1 Configuration of smooth and bending-worked specimens.

はすべて 20mm であるが、平滑材の長寿命域での試験では試験片取付け部でのフレットによる破壊を防ぐため、板幅を 18mm とした試験片も用いた。

曲げ加工は、90° 溝下型と 90° 上型をプレスブレーキに取付け、平板試験片を冷間において 15 秒間で一回型曲げを行うこととした。その際、板外表面の長手方向におけるひずみ速度は、内側曲げ半径 $R = 15 \sim 3\text{mm}$ に対して $6 \times 10^{-3}/\text{s} \sim 2 \times 10^{-2}/\text{s}$ 程度である。この曲げ加工が機械的性質に及ぼす影響を調べるため、試験片を長手方向に切断し、断面内での長手方向のマイクロビッカース硬さの分布を調べた。その結果、曲げ変形の大きい箇所での硬さは、加工の影響がない部分に比べて 15% 程度硬度が高くなっていることがわかった。⁶⁾ この冷間加工による硬化の程度は、材質、加工度、加工方法や加工速度に依存する。曲げ半径 R が小さくなるほど硬化量は大きくなる傾向がみられたが、これは、主として試験片長手方向に生じる最大ひずみが曲げ半径 R の減少につれて増大することに起因するものであると考えられる。

2・2 疲労試験およびき裂観察

疲労試験には、曲げ変位一定型の面外曲げ疲労試験機（東京衝機製造所製、PBF-30C）を用い、繰返し速度は 1000cpm とした。曲げ加工材を試験機に取り付ける際には、基準面から試験部の曲げ中心までの距離が平板平滑材のそれと同一となるように、各曲げ加工材ごとに専用の固定治具を用いた。

各試験片に両振りの曲げ変位を負荷して面外曲げ疲労試験を行い、疲労寿命 N_f を求めた。繰返し数が 10^7 回を超えても破壊しない場合は打ち切りデータとし、 10^7 回時間強度の推定にはステアケース法を用いた。繰返しにともなう曲げモーメントの変化を測定し、 $1/2N_f$ の時点での曲げモーメント M を用いて、各試験片の公称曲げ応力 σ_{nom} を次式より算出した。

$$\sigma_{nom} = \frac{6M}{bt^2} \quad (1)$$

ここで b および t は、試験片の最小断面部の幅と厚さである。寿命試験の結果得られた各材の疲労強度は、平板平滑材の 10^7 回時間強度 σ_{w0} により標準化した値、 σ/σ_{w0} を用いて表示した。

平滑材、曲げ加工材ともに、一部の試験片では Fig. 1 に示す最小断面中央部 A、B の表裏に電気抵抗線ひずみゲージを貼り、この箇所を生ずるひずみを測定した。疲労き裂は平滑材では最小断面部の両端で、曲げ加工材では加工部内側中央付近で発生し板幅方向に沿って伝播する。所定の繰返し数ごとに試験機を停止し、静的曲げモーメントを負荷してき裂を開口させた状態で表面レプリカを採取し、光学顕微鏡を用いて観察した。き裂の発生は、板幅方向に沿って長さ 0.1mm のき裂が認められた時点とした。また、き裂を所定の長さまで成長させた後、試験部を切断、研磨することにより平滑材と曲げ加工材におけるき裂面形状とアスペクト比の変化を調べた。

3 実験結果および考察

3・1 疲労強度に及ぼす曲げ加工の影響

寿命試験の結果より得られた平板平滑材および各曲げ加工材の S-N 線図を Fig. 2 に示す。縦軸の曲げ応力は、曲げ加工を受けていない平滑材の疲労限度（ 10^7 回時間強度） σ_{w0} により標準化して表示した。曲げ加工半径 R が小さくなるにつれて疲労強度は低下し、S-N 曲線は順次下方に移動することがわかる。曲げ加工部内側での曲率半径が最も小さい R3 曲げ加工材では、疲労限度は平滑材のおよそ 50% にまで減少する。

この曲げ加工材の疲労強度の低下は、曲げ加工部に生ずる応力集中によるものであると考えられる。そこで、弾性有限要素法（FEM）により平滑材および曲げ加工材の最小断面部における応力状態を解析した。加工部表面では二軸応力状態となっているが、試験片長手方向に沿う応力の式 (1) の公称曲げ応力に対する比、 σ/σ_{nom} として表示すると、平滑材および曲げ加工材の加工部内側表面における応力の板幅方向に沿った分布は Fig. 3 のようになる。平滑材の表面における曲げ応力はほぼ一様であるが、両端でわずかに大きく、この箇所での弾性応力集中係数 K_t は 1.038 である。曲げ加工材では最大曲げ応力

Fig. 2 S-N diagrams.

Fig. 3 Variation of bending stress at inner surface.

は加工部内側表面の中央部分にて生じる。R15 材、R6 材および R3 材における弾性応力集中係数 K_t はそれぞれ、1.181, 1.268 および 1.440 であり、曲率半径が減少すると K_t は急増する傾向を示す。

Fig. 4 は曲げ加工部の内側および外側表面中央において、多段振幅変動法により測定した繰返し曲げ応力-ひずみ関係を示したものである。曲げ加工部の曲率半径を増す方向のモーメントが作用した場合を想定して、加工部内側および外側面に生ずるひずみをそれぞれ、引張側と圧縮側にプロットした。応力は平滑材の疲労限度 σ_{w0} により標準化した値を用いて表示した。曲げ加工材の加工部外側でのひずみは平滑材よりもやや小さいが、内側でのひずみは曲率半径 R が小さくなるにつれて増加し、応力集中が顕著となる。

Fig. 4 の弾性範囲でのひずみの測定値より求めた応力集中係数と曲げ加工部の内側曲率 $1/R$ の関係を Fig. 5 に示す。前述の弾性 FEM と曲がりはりの理論⁷⁾より得た曲線も合わせて示す。内側および外側表面での応力集中係数は、いずれも弾性 FEM のほうが大きく評価されるが、この結果はひずみ測定から得られた実測値に近い。

3・2 疲労き裂の発生

前述のように、曲げ加工部内側表面には応力が集中するが、この箇所に生じた最大応力を平滑材の寿命曲線に適用して曲げ加工材の疲労寿命を求めてみると、とくに加工部の曲率半径が小さく応力集中が顕著な場合には、過度に安全側の評価となることがわかった。そこで、局所的な応力集中の影響のみならず、この応力集中部付近から発生、伝ばするき裂の観察を行い、疲労き裂成長の

Fig. 4 Strains on inner and outer surfaces of bent specimens.

観点から、疲労強度に及ぼす曲げ加工の影響についてさらに考察した。

Fig. 3 から明らかなように、平板平滑材では最小断面部の板幅方向の両端で、また曲げ加工材では加工部内側中央で曲げ応力は最大となることから、疲労き裂はいずれもこの近傍で発生、成長した。Fig. 6 は、各試験片に同一の曲げ応力 $1.31\sigma_{w0}$ を繰返した場合の疲労き裂の成長曲線の例である。いずれも板幅方向に沿って多数のき裂が発生し、7～10mm 程度の長さまで進展した後、急速に合体、伝ばして破断に至った。破壊に関与した 3 本程度の主き裂を選んで表示しているが、曲率半径 R が小さくなるほどき裂の発生時期は早く、き裂成長も促進されることがわかる。

平滑材の疲労限度 σ_{w0} の 0.87～1.57 倍の範囲の曲げ応力を負荷し、各試験片におけるき裂発生寿命 N_i を調べた結果を Fig. 7 に示す。曲げ応力が増加するほど、また曲率半径 R が小さくなるほど、き裂発生寿命は短くなることがわかる。き裂発生は危険箇所における局所的な弾塑性ひずみに支配されると考え、曲げ加工材の最小断面内側中央に生じる弾塑性の最大ひずみ ϵ_{max} を、Neuber 則⁸⁾

Fig. 5 Stress concentration at inner and outer surfaces.

Fig. 6 Crack growth curves.

Fig. 7 Number of cycles to crack initiation.

Fig. 8 Relation between maximum strain and crack initiation life.

$$K_t = K_\sigma \cdot K_\epsilon \quad (2)$$

に平板平滑材の繰返し応力-ひずみ関係

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

を適用して算出した。ここで、 K_σ と K_ϵ はそれぞれ、弾塑性応力集中係数と弾塑性ひずみ集中係数であり、弾性応力集中係数 K_t には弾性FEM解析により求めた値を用いた。また、式(3)中の繰返し強度係数 k は448MPa、繰返し加工硬化指数 n は0.0827である。

このようにして算出した弾塑性の最大ひずみ ϵ_{max} を用いて、各材のき裂発生寿命を整理したものがFig. 8である。試験片の種別によらず、各材のき裂の発生寿命は両対数線図上の直線の近傍にプロットされることから、これよりき裂発生寿命を求めることができる。

3・3 疲労き裂の成長挙動

各試験片の応力集中部付近で発生したき裂のうち、直接破壊に関与した3本程度の主き裂を選び、それらのき裂成長過程を観察した。平板平滑材の場合は最小断面部の四隅から発生した表面き裂長さ c の、また曲げ加工材では中央部から発生した表面き裂全長 $2c$ の変化を測定し、増分多項式法によりき裂成長速度 dc/dN を算出した。各試験片とも $1.05 \sim 1.57\sigma_{w0}$ の範囲の3応力レベルにおいて試験を行い、その結果を長さ c に対して表示したものがFig. 9である。プロットはかなりばらついていて、各試験片ともき裂成長速度とき裂長さの関係を、両対数線図上の直線により近似した。Fig. 9(a)に示す平滑材の場合は、とくにき裂長さの短い領域でのき裂成長

が遅いが、Fig. 9(b)~(d)の曲げ加工材では、曲率半径 R が小さくなるにつれて繰返し初期段階のき裂長さが短い領域でのき裂成長速度が増大する傾向にある。

Fig. 9の各試験片のき裂成長速度を、き裂先端における弾塑性ひずみから算出したひずみ拡大係数幅⁹⁾に基づいて評価することを試みた。Fig. 10は平板平滑材とR6曲げ加工材のき裂面形状とアスペクト比を調べた結果を示したものである。平滑材では2つの応力レベルにおいて繰返しにともなう表面き裂長さ c と端部の長さ a の変化を測定した。曲げ加工材では、平滑材の疲労限度 σ_{w0} の0.87~1.57倍の範囲の応力を繰返しして所定のき裂長さ $2c$ まで成長させた後、順次研磨してゆくことにより個々のき裂の表面から最深部までの距離 a を求めた。き裂前縁形状は平滑材ではほぼ1/4だ円形、R6曲げ加工材では半だ円形であり、いずれの場合もき裂成長にともなうアスペクト比は減少する。これらの観察結果に基づき、平滑材の場合は1/4だ円形の縁き裂に対する応力拡大係数幅の評価式^{10), 11)}を、また曲げ加工材の板幅中央部から伝ばする半だ円き裂の応力拡大係数幅には、曲率半径 R によらずアスペクト比の変化は同一として、Newman-Rajuの表面き裂に対する解¹²⁾を用いた。さらに、これらの評価式中の応力幅 $\Delta\sigma$ を3・2節で求めた弾塑性の引張最大ひずみ ϵ_{max} で置換えてひずみ拡大係数幅 ΔK を算出し、これに縦弾性係数 E を乗じたパラメータ $E\Delta K$ を用いて、各試験片のき裂成長速度を評価した。

Fig. 9のき裂長さ $c = 0.1 \sim 9\text{mm}$ の範囲において、各回帰直線上での9組の $\{c, dc/dN\}$ の値に対して上記のパラメータ $E\Delta K$ を適用した結果をFig. 11に示す。またすべての結果をFig. 12にまとめて表示した。Fig. 12では全試験結果はある幅をもつ領域に収まっているようにみえるが、依然として試験片形状や応力レベルによるき裂成長速度の相違が認められ、便宜的に上記のパラメータを用いて各材のき裂成長を統一的に評価することは難しい。

平面曲げの高応力下での長さ l の微小き裂の成長速度を律するパラメータとして、繰返し曲げ応力や塑性ひずみのべき乗を用いた $\sigma^n l$ あるいは $\epsilon_p^n l$ の有用性が報告されている。¹³⁾本研究では、曲げ加工材の内側表面における応力集中の影響を考慮した弾塑性の最大曲げ応力 σ_{max} を式(2)と(3)より求め、そのべき乗を用いたパラメータ $\sigma_{max}^{7.3} c$ によりき裂成長速度を評価した。Fig. 13に示すように、平滑材と曲げ加工材のき裂成長は依然として相違するものの、曲げ加工材のき裂成長速度は、曲率半径や応力レベルによらず狭い領域にプロットされるという結果が得られた。

Fig. 8の結果を用いてき裂発生までの寿命 N_i を求め、またFig. 13の回帰直線の式を発生時のき裂長さ $c_i = 0.1\text{mm}$ から破壊時の長さ $c_f = 10\text{mm}$ に至るまで積分して伝ば寿命 N_p を求め、両者を合算して全寿命 N_f を試算した。その結果をFig. 14に示す。き裂の発生と伝ばの実測値に基づいて計算した寿命であるから当然のことであるが、予測寿命は実測値とよく一致している。

Fig. 9 Comparison of crack growth rate.

Fig. 10 Relation between aspect ratio and surface crack length in smooth and bent specimens.

板材に冷間加工を施すと加工部に残留応力を生じ、この残留応力の影響により寿命は非加工材よりも延伸することが報告されている^{14), 15)}。本研究の曲げ加工材においても、き裂の発生個所となる加工部内側表面に生じる初期残留応力や加工硬化（2・1節参照）が、同様な影響を寿命に及ぼすと考えられる。しかし、このような寿命延伸効果にもかかわらず、Fig. 2のように曲げ加工を施すと短寿命になるのは、これに重畳される応力集中の影響のほうがより大きいことを意味している。このため、Fig. 7とFig. 9に示したように、曲げ加工材では疲労き裂は早期に発生し、かつき裂長さの短い繰返し初期におけるき裂成長が促進され、その結果、短寿命になったと考えられる。なお、き裂長さの長い領域で曲げ加工材のき裂成長速度が低下する原因については次節で考察する。

3・4 繰返しによる曲げモーメントとひずみの変化

本研究で用いた疲労試験機は曲げ変位一定型であるため、繰返し過程での硬化/軟化や疲労き裂の成長にともなって曲げモーメントは変化する。Fig. 15は、平滑材と曲げ加工材の寿命がいずれも 10^5 程度となるような曲げ変位を负荷した場合の繰返しにともなう最大および最小曲げモーメント、 $M_{\max}$ と $M_{\min}$ の変化を示したものであり、曲げ半径 R を減ずる方向に作用するモーメントを正として表示している。平滑材では最大値 $M_{\max}$ と最小値 $M_{\min}$ の大きさはともに寿命終期に減少する。これに対し、曲げ加工材では $M_{\max}$ はほぼ一定かやや増加するが、 $M_{\min}$ の絶対値は繰返しにともなって漸減する傾向を示し、繰返し終期には急減する。寿命がおおよそ 10^6 程度となるような小さな曲げ変位を负荷した場合について

Fig. 11 Crack growth rate dc/dN versus parameter $E \Delta K$.

も測定したが、モーメントの変化は Fig. 15 に示すほど顕著ではないものの、変化傾向は同様であった。

Fig. 16 は、R6 曲げ加工材の加工部内側および外側表面におけるひずみ測定により得られた繰返し数比 $N/N_f \approx 0.5$ の時点でのヒステリシスループの例を示したものである。曲げ加工部を開き、曲率半径 R を増す方向に負のモーメントが作用する時に内側表面に生じる引張ひずみは、正のモーメントの場合の圧縮ひずみよりも大きく、かつ平均引張ひずみを生じている。外側表面では、それほど顕著ではないが逆に平均圧縮ひずみを生じている。一部の試験では繰返しを中断して試験片を取外し、表面での残留ひずみを測定したが、ヒステリシスループから得られた値と良く一致した。

以上のように、曲げ加工材では繰返しにともなって加工部内側には引張りの、外側には圧縮のひずみが残留し、かつ内側表面から発生した疲労き裂が成長するため、曲げ加工部を開き、曲率半径 R を増す方向の変形が容易となり、しだいに負の曲げモーメントが減少すると考えられる。Fig. 11 ~ 13 のき裂成長速度の評価では繰返し曲げモーメントは一定とみなして応力を計算していることから、き裂の長い領域で曲げ加工材と平滑材の成長速度が相違するのは、このき裂を開口させる方向のモーメントの減少を考慮していないことがその一因である。また、曲げ加工材のき裂先端での応力の評価には便宜的に Newman-Raju の解を用いたが、断面内での曲げの中立軸は曲率半径 R の減少につれて内側表面方向に移動し、応力も中立軸について非対称な曲線状の分布となることから、

Fig. 12 Summary of dc/dN and $E \Delta K$ relation.

ら、正しく評価されているとはいえない。曲げ加工材におけるき裂成長を簡便に精度よく評価できる方法についてさらに検討を要する。

本研究では、 $R = 3\text{mm}$ 以上の曲率半径を有する曲げ加工材の疲労強度について報告したが、以前、同一材料のこれ以下の曲率半径となるよう曲げ加工した試験片を用いて面外曲げ試験を行ったところ、長寿命域での疲労強度は R3 曲げ加工材よりもやや高くなるという結果が得られている。³⁾ き裂開口方向の曲げモーメントの減少によるき裂成長速度の低下に関連したものではないかと推察されるが、加工部内側表面でのき裂観察が困難であるため現時点では確認していない。また、本研究で得られた知見が異なる材料や板厚の曲げ加工材に対して適用可能か否かについて、さらに検討する必要がある。

Fig. 13 dc/dN versus $\sigma_{\max}^{7.3}c$.

Fig. 14 Comparison of predicted and actual lives.

4 結 論

曲げ加工が板材の疲労強度に及ぼす影響について明らかにするため、種々の曲率半径を有するアルミニウム合金の90°曲げ加工板材を用い、変位制御下で両振り面外曲げ疲労試験を行なった。

曲げ加工材の疲労強度は平板平滑材よりも低下し、曲率半径が小さくなるほどその減少は著しい。曲げ加工にともなう応力集中のため、最大曲げ応力は加工部の内側表面中央付近に生じ、疲労き裂はこの応力集中部から発生、成長した。この曲げ加工部に生じる応力集中のため、曲率半径が小さくなるほど疲労き裂は早期に発生する。また平滑材に比べると、とくにき裂長さが短い繰返し初期段階でのき裂成長が速く、加工部の曲率半径が小さくなるほどき裂成長速度は増大する。

繰返しにともなって曲げ加工部内側には引張りの、外側には圧縮のひずみが残留し、かつ内側表面においてき裂が成長するため、曲げ加工部を開き、曲率半径を増す方向の変形が容易となり、しだいに曲げモーメントは減少する。このため、繰返し終期には曲げ応力は低下し、き裂成長速度は平滑材と同程度となる。以上のことから、板材に曲げ加工を施すと疲労強度が低下するのは、応力集中のため疲労き裂が早期に発生し、かつ繰返し初期におけるき裂成長が促進されるためであることが明らかとなった。

Fig. 15 Variation of bending moment with number of cycles.

Fig. 16 Hysteresis curves at $N/N_f \approx 0.5$ in R6 bent specimen.

本研究は、JUKI (株)からの委託研究として行われたものである。関係者各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) N. Yahata, M. Watanabe and T. Jidaisho, "Application of fluidic-device type fatigue testing machine (Evaluation of reversed plane-bending fatigue strength of aluminum alloy plates bent to 90° V-shape)", Journal of Material Testing Research Association of Japan, Vol.41, No.2, pp.57-61 (1996).
- 2) N. Yahata, M. Watanabe and H. Yamamoto, "Application of fluidic-device type fatigue testing machine (Evaluation of reversed plane-bending fatigue strength of cold rolled steel sheets bent to 90° V-shape)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.64, No.628, pp.333-338 (1998).
- 3) K. Ohkawa, A. Kudo, T. Ando and I. Ohkawa, "Fatigue

- strength and deformation behavior of bent-worked aluminum alloy under plane bending”, Proceedings of the 55th Japan Congress on Materials Research, pp.187-188 (2011).
- 4) K. Ohkawa, A. Kudo, T. Ando and I. Ohkawa, “Fatigue behavior of bent aluminum alloy under plane bending”, Proceedings of the 50th Chugoku-Shikoku Branch JSME annual meeting, CD-ROM, No.125-1, 207 (2012).
 - 5) K. Ohkawa, A. Kudo, T. Ando and I. Ohkawa, “Crack growth and fatigue strength of bent aluminum alloy under plane bending”, Proceedings of the 48th Tohoku Branch JSME autumn meeting, pp.114-115 (2012).
 - 6) T. Hasegawa, A. Kudo, T. Ando and I. Ohkawa, “Fatigue strength in bent specimens of aluminum alloy under plane bending”, Proceedings of the 60th JSMS annual meeting, CD-ROM, 128 (2011).
 - 7) R. T. Fenner, “Engineering Elasticity, application of numerical and analytical techniques”, pp.132-140 (1985) ELLIS HORIZONTAL.
 - 8) A. Moftakhar, A. Buczynski and G. Glinka, “Calculation of elasto-plastic strains and stresses in notches under multi-axial loading”, International Journal of Fracture, Vol.70, pp.357-373 (1995).
 - 9) H. Kitagawa, S. Takahashi, C. M. Suh and S. Miyashita, “Quantitative analysis of fatigue process-microcracks and slip lines under cyclic strains”, ASTM STP 675, pp.420-449 (1979) ASTM, Philadelphia.
 - 10) A. S. Kobayashi and A. N. Enetanya, “Stress intensity factor of a corner crack”, ASTM STP 590, pp.477-495 (1976) ASTM, Philadelphia.
 - 11) K. Tanaka, T. Hoshida and O. Maekawa, “Surface-crack propagation in plane-bending fatigue of smooth specimen of low-carbon steel”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.2, pp.207-220 (1982).
 - 12) J. C. Newman, Jr and I. S. Raju, “Stress-intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads”, NASA Technical Memorandum, 85793 (1984) NASA.
 - 13) N. Kawagoishi, H. Nishitani, X. Wang, H. Ide and H. Tanaka, “Effect of cross-sectional shape of specimen on fatigue strength under plane bending (Investigation based on small-crack growth law)”, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.62, No.595, pp.607-613 (1996).
 - 14) Division of X-Ray Study on Fatigue, “Data sheets on residual stresses and their change due to fatigue”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.25, No.277, pp.1010-1019 (1976).
 - 15) M. Watanabe, N. Yahata and H. Yamamoto, “Reversed plane-bending fatigue strength of high tensile steels sheet bending to 90° V-shape”, Proceedings of Society of Automotive Engineers of Japan, No.33-99, pp.5-8 (1999).