

振動ピーニングを用いたピン成形における複曲面形状成形の制御

東海大学 工学部動力機械工学科

准教授 太田 高裕

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017015)

キーワード：インクリメンタルフォーミング，ピン成形，ハンマリング，アルミニウム合金

1. 研究の目的と背景

ピン成形は鋼球を板表面に衝突させ、表面近傍に塑性ひずみを与えることにより、金属を成形する手法である。主に、航空機の主翼外板の成形が適用されている^{1)~5)}。主翼外板の形状は球面、鞍型、単曲面に近い形状など複雑な形状で形成されている。しかし、球を用いた通常のピン成形では発生する塑性ひずみは軸対称であり、変形も球面となる傾向がある。このため、マスクングを行ってピーニング領域を限定したり、場所ごとに異なるサイズのショットを用いており、煩雑な成形準備が必要である。また、単曲面に近い形状では、主翼外板に予め応力を付与してピーニングを行うストレスピン成形法が適用されている⁵⁾。ストレスピン成形法は治具の設置など多大な時間が必要となる。近年では鋼球を衝突させる代わりに超音波ピーニングでピンを繰り返し衝突させる手法がピン成形に適用されている⁴⁾が、ピンの形状は円柱であり、軸対称に変形するという問題は解決されていない。

直方体ピンを用いたピーニングでは図1に示すように x 方向（直方体ピンの短辺方向）と z 方向（直方体ピンの長辺方向）で発生する塑性ひずみの大きさを変化させることが可能で、成形形状の x 方向曲率半径 R_x と z 方向曲率半径 R_z が異なる異方性（ $R_x < R_z$ ）を持った成形形状を得られる可能性がある⁶⁾。

本研究では電動ハンマを用いて、直方体ピンを供試体に投射する振動ピーニングを用いたピン成形において、曲率半径の異方性付与（ $R_x < R_z$ ）を実験により確認するとともに、数値解析による成形形状の予測手法を検討した。

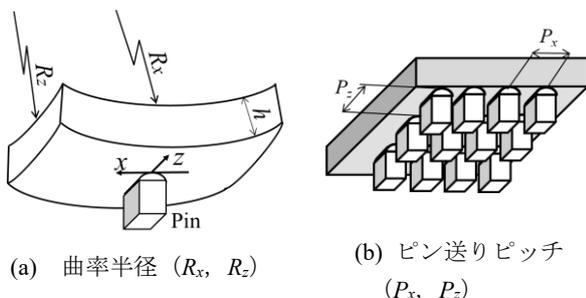


図1 直方体ピンを用いた時の方向と曲率半径 R_x, R_z とピン送りピッチ (P_x, P_z) の定義

2. 実験方法

本研究では周波数と振幅が安定している電動式ハンマを用いた。ハンマはモータに接続されており、ハンマの周波数は50 Hz、振幅は10 mmである。ハンマと供試体に打ち付ける直方体ピン（以下、ピンと略す）は固定されており、ピンはハンマと衝突することで運動をはじめ、供試体とハンマの間を往復運動する。ピンはガイド穴に沿って、供試体に直角に衝突する。ピンの運動エネルギーのみでピーニングを制御できるので、ピン形状とハンマの位置のみで施工管理ができる。また、反力制御が不要のため、装置構成も簡単にできる。

図2に実験装置を示す⁷⁾。ピン形状は短辺 (x 方向) 2.8 mm、長辺 (z 方向) 6 mm、高さ 70 mm である。先端には z 方向に半径 1 mm の面取りし、 x 方向には先端半径 r を設けた。 r は 4 mm、8 mm、12 mm の 3 種類である。ピンは HRC 37~43 のプリハードン鋼で製作した。供試体はアルミニウム合金 A7075-T6 材（降伏応力：506 MPa）である。板厚 h は 5 mm であり、幅 50 mm、長さ 50 mm である。供試体は固定し、1 s 間ピーニングを行った後、供試体を x 方向に送りピッチ $P_x = 1$ mm で移動して供試体の全長を 1 ライン施工する。その後、 z 方向に送りピッチ $P_z = 4$ mm（ピンの平行部の長さ）移動して、再び、 $P_x = 1$ mm で移動を繰り返し、全面にピーニングを行った。 $P_z = 5, 6, 7, 8$ mm についても実験を行った。ピーニング後に未施工部（固定のための抑え部）を切断し、レーザ形状計測機を用いて、変形形状を計測した。

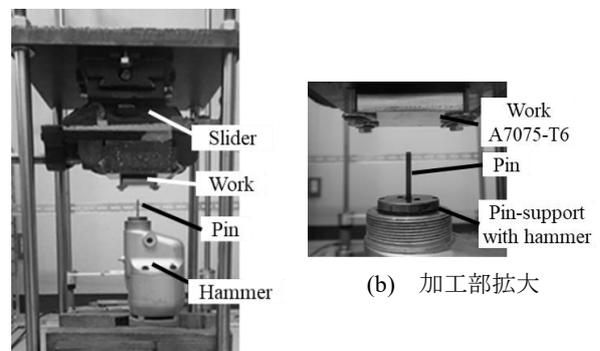


図2 実験装置外観⁷⁾

3. 実験結果

ピン成形後の供試体の形状計測結果の例を図 3 に示す。 $r=8\text{ mm}$ の例である。計測のため、図 2 の実験姿勢と天地逆転している。ピーニングの圧痕があり、表面には凸凹があるが、 x 方向の変形が z 方向の変形に比べて大きい。 R_x と R_z を求めるため、計測結果との誤差の二乗和が最小となるように円の方程式にフィッティングした。図中にフィッティングした円を示した。

r と R_x , R_z の関係を図 4 に示す。図の縦軸は曲率で示している。 r が小さくなると、 R_x は減少するが、 R_z も同時に減少するが、いずれの r においても $R_x < R_z$ が狙い通りに成立している。曲率半径の異方性 (R_z/R_x) をみると、 $r=4\text{ mm}$ では 1.76, $r=8\text{ mm}$ では 1.69, $r=12\text{ mm}$ では 1.58 と r が小さいほど R_z/R_x は大きくなる。

P_z と R_x , R_z の関係を図 5 に示す。 $P_z=5\text{ mm}$ 以上では P_z が増加すると、 R_x , R_z が増加する。異方性 (R_z/R_x) は $P_z=4\text{--}5\text{ mm}$ で大きくなる。図 6 には成形後の供試体の外観を示す。ピン底面の平行部長さと同じ $P_z=4\text{ mm}$ では供試体全面に圧痕がついているが、 $P_z=8\text{ mm}$ では圧痕がついていない部分がある。このため、 P_z が 5 mm 以上では曲率半径が大きくなる。

以上のように、同じ形状のピンを 1 つの電動ハンマで成形する場合であっても、 r と P_z を変えることにより、 R_x , R_z を変化させることが可能であることを確認した。

4. 数値解析手法

解析モデルを図 7 と図 8 に示す。 Step 1 として、図 7 に示すように、微小領域 ($6\text{ mm} \times 13.5\text{ mm}$) の領域を評価対象領域として、この領域に複数のピンをそれぞれ 1 回衝突させるモデルで動的陽解法の LS-DYNA を用いて解析を行った。振動を抑制するため、底面を拘束した。要素は 8 節点 6 面体低減積分要素で、サイズは表面近傍で板厚方向では 0.0625 mm , x 方向と z 方向では 0.125 mm である。ピンは x 方向に 1 mm ピッチで 6 列、 z 方向に 4 mm ピッチで 3 行の合計 18 本を配置している。供試体に同時に衝突するピンがないように初期位置を設定した。供試体は A7075-T6 を模擬した弾塑性体 (ヤング率 $E: 70\text{ GPa}$, ポア

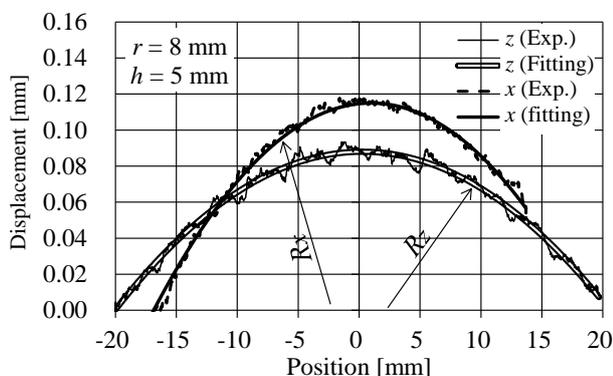


図 3 成形後の供試体形状の計測結果 ($r=8\text{ mm}$) 7)

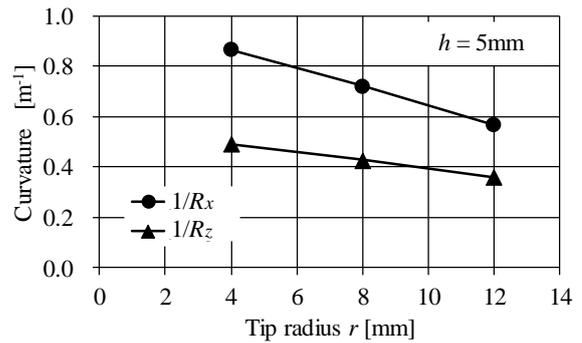


図 4 曲率半径とピン先端半径 r の関係 7)

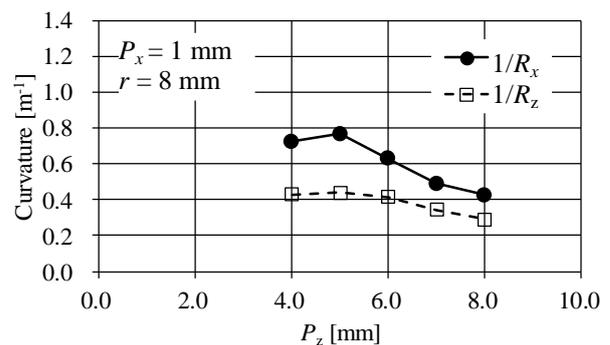


図 5 曲率半径に及ぼす z 方向送りピッチ P_z の影響

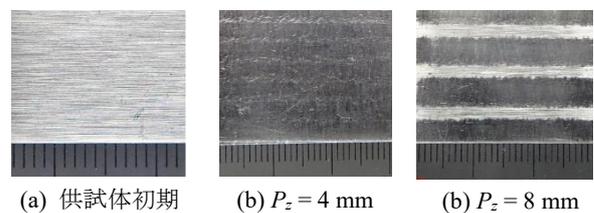


図 6 ピン成形後の供試体外観

ソン比 $\nu: 0.3$, 密度 $\rho: 2.7 \times 10^{-6}\text{ kg/mm}^3$) とした。材料モデルは直線硬化の移動硬化則を用いた。ピンは弾性体 (ヤング率: 210 GPa , ポアソン比: 0.3 , 密度 $\rho: 7.8 \times 10^{-6}\text{ kg/mm}^3$) とした。接触摩擦はクーロン摩擦とし、摩擦係数は潤滑剤を使用していない場合の代表的な値として 0.2 とした。ピンの初期速度を $5\text{--}10\text{ m/s}$ として解析を実施した。

Step 2 として、図 8 に示すように広い領域 ($80 \times 80\text{ mm}$) での底面がフリーの状態の変形を解析するため、LS-DYNA で求めた x 方向塑性ひずみ ϵ_x と z 方向塑性ひずみ ϵ_z の板厚方向分布を固有ひずみとして入力して、静的陰解法 Marc(2015)で弾性解析を実施した。固有ひずみを与えるため、表面から同じ深さの要素にそれぞれ異なる線膨張係数 (x 方向と z 方向の異方性を考慮) を入力して、全体の温度が仮想的に $100\text{ }^\circ\text{C}$ に上昇する条件で解析を行った。材料物性値は図 7 と同じである。幾何学的対称性を考慮して $1/4$ でモデル化した。板厚内の要素分割は LS-DYNA のモデルと一致させた。

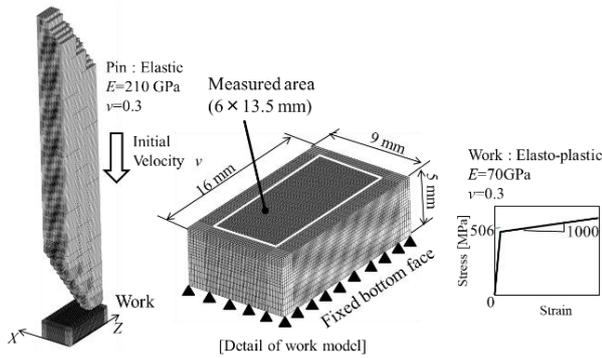


図7 Step1の数值解析モデル⁷⁾

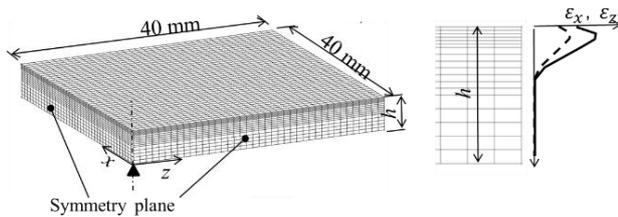


図8 Step2の数值解析モデル⁷⁾

5. 数值解析結果

5.1 ピン先端半径 r の影響

板厚内の ϵ_x と ϵ_z の分布に及ぼすピン初期速度 v の影響を図9に示す⁷⁾。 $r=8\text{ mm}$ の場合である。評価領域内の表面からの深さが同じ3840個の要素の平均をプロットしている。 ϵ_x は v が増加すると値が大きくなり、塑性ひずみが発生する深さも深くなる。 ϵ_z も同じ傾向であるが、どの深さにおいても ϵ_x よりも小さい。

図10には $v=6.5\text{ m/s}$ における ϵ_x と ϵ_z の分布に及ぼす r の影響を示す⁷⁾。 $r=8\text{ mm}$ と 4 mm ではピークの ϵ_x はほぼ同じであるが、 $r=4\text{ mm}$ の方が導入される塑性ひずみ深さが深い。また、 ϵ_z も同じ傾向であるが、どの深さにおいても ϵ_x よりも小さい。一方、 $r=12\text{ mm}$ では ϵ_x のピークも小さく、導入される深さも浅く、 ϵ_x と ϵ_z でほぼ差がみられない。

図11には v および r と R_x 、 R_z の関係の解析結果を示す⁷⁾。縦軸は曲率で示している。図3と同様に R_x 、 R_z は節点変位との誤差の二乗和が最小となるように円の方程式にフィッティングして求めた。同じ r では v が速いほど R_x は小さくなる。同じ v では r が小さいほど R_x は小さい。 R_z はどの条件でも R_x より大きいが、 r が小さいほどその差は大きい。図11には実験結果も示しているが、傾向は解析結果と一致し、 $r=4\text{ mm}$ と 8 mm では v は 6.5 m/s よりもやや遅い条件と推定される。一方、 $r=12\text{ mm}$ では v は 6.5 m/s より速い条件と推定される。

以上のように、数值解析でピン初期速度を約 6.5 m/s とすれば、実験結果と解析結果の曲率半径が一致することを確認し、曲率半径の異方性は発生する x 方向と z 方向の塑性ひずみの差によることを明らかにした。

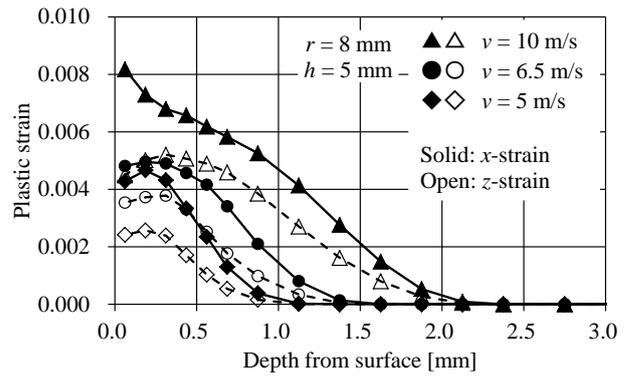


図9 塑性ひずみの板厚内での分布に及ぼすピン初期速度 v の影響⁷⁾

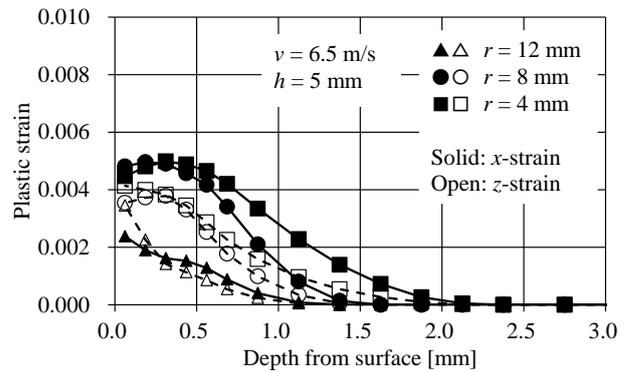


図10 塑性ひずみの板厚内での分布に及ぼすピン先端半径 r の影響⁷⁾

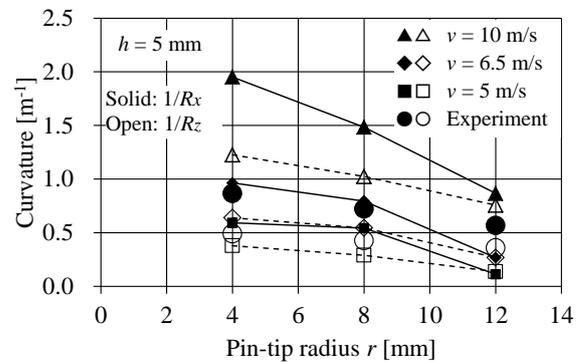


図11 曲率半径に及ぼすピン先端半径 r の影響；実験結果と数值解析結果の比較⁷⁾

5.2 z 方向送りピッチ P_z の影響

P_x を 1 mm に固定して、 P_z を 2 mm から 8 mm まで変えて、数值解析を行った。ピンは供試体の中央部の評価領域に衝突するように配置した。評価領域の大きさはピンの配置 (6列×3行) で図7に示した大きさと異なる。ピン初期速度は 7 m/s とした。塑性ひずみの板厚方向分布に及ぼす P_z の影響を図12に示す。評価領域内の表面からの深さが同じ要素の平均値で評価した。 P_z が 4 mm の場合に ϵ_x が最も大きく、 ϵ_x と ϵ_z の差も大きくなる。曲率半径への P_z

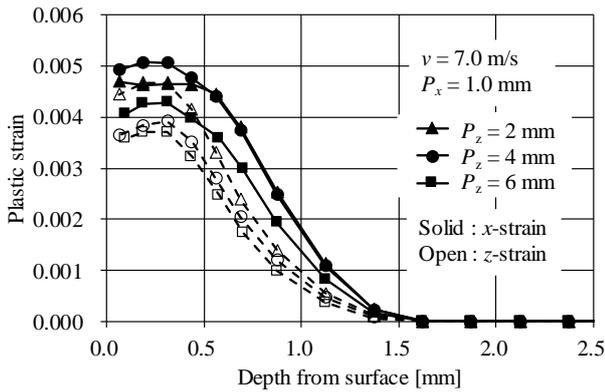


図 12 塑性ひずみの板厚内での分布に及ぼすピン z 方向送りピッチ P_z の影響

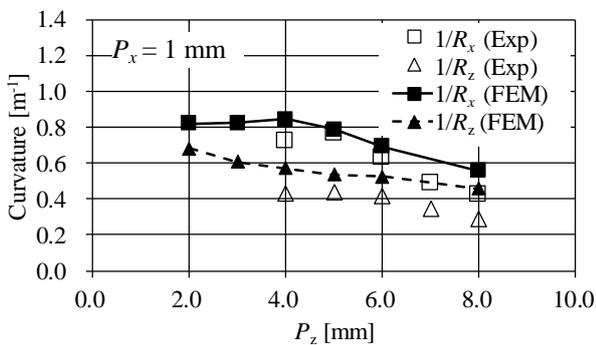


図 13 曲率半径に及ぼすピン z 方向送りピッチ P_z の影響；実験結果と解析結果の比較

の影響の解析結果を図 13 に示す。 P_z が増加すると、 $1/R_x$ が減少する。一方、 P_z がピン平行部は長さである 4 mm 以上では P_z が増加すると、 $1/R_x$ が減少し、 P_z が 4 mm 以下では $1/R_x$ は変化が小さい。このため、曲率の異方性 (R_z/R_x) は $P_z=4$ mm で最大となる。この結果は実験結果と一致する。

以上のように P_z により、曲率半径の制御が可能である。また、圧痕に隙間がある場合でも、評価領域内の表面からの深さが同じ要素の平均塑性ひずみを用いることで曲率半径が評価できることを確認した。

6. 結論

電動ハンマを用いて、直方体ピンを供試体に投射する振

動ピーニングによるピン成形において、曲率半径の異方性付与を実験で確認するとともに、有限要素法解析による成形形状の予測手法を検討した。

(1) 直方体ピンを用いて成形する場合、 x 方向のピン先端半径 r を変えることにより、 x 方向曲率半径 R_x と z 方向曲率半径 R_z を変化させることが可能である。また、 r が小さいほど R_z/R_x は大きく、曲率半径の異方性は大きくなる。

(2) ピンの z 方向送りピッチ P_z により、曲率半径が変化する。供試体全面に均一にピーニングを行う P_z が 4 mm の時、異方性が最も大きくなる。

(3) ピン成形の解析は以下の方法で行った。 Step 1 で 18 本の直方体ピンに初期速度を与えて、供試体に衝突させる解析を動的陽解法で行った。 Step 2 で Step 1 で得られた板厚内の塑性ひずみ分布を 80×80 mm の供試体全域に与える変形の解析を静的陰解法で行った。本解析手法により、 r および P_z と R_x 、 R_z の関係は実験結果と解析結果で一致した。評価領域内の表面からの深さが同じ要素の平均塑性ひずみが曲率半径に影響を与えていることを確認した。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の研究助成（一般研究開発助成 AF-2017015）を受けて実施した。記して感謝の意を示します。実験に協力してくれた東海大学工学部卒研生の伊原瑞貴君に感謝いたします。

参考文献

- 1) Baughman, D. L.: Machine Design, 42(1970), 156-160.
- 2) Clausen, R. & Bruder, M.: Proc. 3rd Int. Conf. Shot Peening (ICSP-3), 4(1987), 319-326.
- 3) Yamada, T., Takahashi, T., Ikeda, M., Sugimoto, S. & Ohta, T.: Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review, 39-2 (2002), 57-61.
- 4) Kuroi, K., Kono, A., Kozaki, T., Handa, M. & Sasaki, S.: Proc. 48th Aircraft Symp. (2010), No.3C9.
- 5) Li, K.: Proc. 1st Int. Conf. Shot Peening (ICSP-1), (1981), 555-564.
- 6) Ohta, T.: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 83-849 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00451.
- 7) Ohta, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 60-697(2019), 33-38