

スプリングバックゼロを目的とした局所加熱逐次曲げ加工法の開発

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械宇宙システム専攻

助教 井関日出男

(平成18年度一般研究開発助成 AF-2006014)

キーワード: 局所加熱曲げ加工、3点自由曲げ、スプリングバック、温度履歴、応力緩和、クリープ

1. 緒言

難成形薄板材料は高引張強さと微小破断ひずみの機械的性質を示す場合が多い。その冷間曲げ加工におけるスプリングバックは加工応力が生じる限り避けることのできない問題である。現状では経験知識、数値シミュレーション、突き曲げや工具形状変更などを適用し、その試行錯誤法によってVやU曲げ製品のスプリングバックゼロが達成されている。

著者は2002年に‘加熱スリットダイスによる円弧断面帯板の引抜き曲げ成形法’を提案し¹⁾、板厚0.1mmのばね用ステンレス鋼帯板(SUS304-CSP)が加工温度860℃でスプリングバックゼロになることを見出した。

本研究では、通電パンチ、レーザによる局所加熱逐次曲げ加工法を提示し、スプリングバックが大きくなる3点自由曲げとばね用帯板を対象として、工具寸法やパンチ速度を変えて実験を行い、スプリングバックゼロとなる実験条件を検討した。

2. 通電パンチ加熱方式の3点自由曲げ

2.1 実験装置および試験片

図1は万力、手動上下移動テーブルとニクロムブレードの通電加熱パンチからなる装置で、その3点自由曲げの概略を図2に示す。

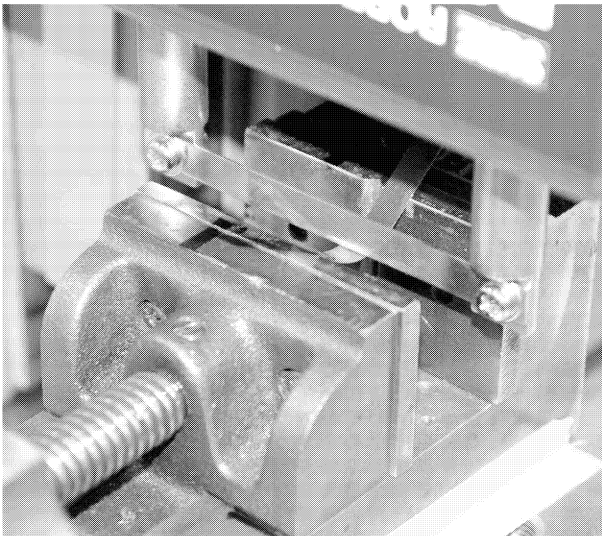


図1 通電パンチ加熱方式の3点自由曲げ装置

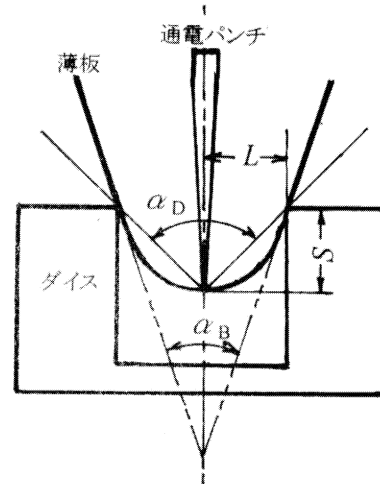


図2 ダイス角支持による3点自由曲げ

パンチ寸法は100mm×10mm×1mmで、刃状部の先端半径は0.2mmである。短冊状の試験片は板厚0.1mmのばね用ステンレス鋼帯板(SUS304-CSP)で、長さ100mm、幅10mmである。

引張り試験による0.2%耐力は1.1GPa、引張(破断)強さは1.2GPa、引張(破断)ひずみは1.1%であった。

2.2 実験方法

VやU曲げにおける設計曲げ角 $\alpha_D = 90^\circ$ に対し、3点自由曲げでは図2におけるパンチ先端と両ダイス肩のなす角を α_D と定義する。実験では $\alpha_D = 120, 90, 75$ および 60° を採用した。

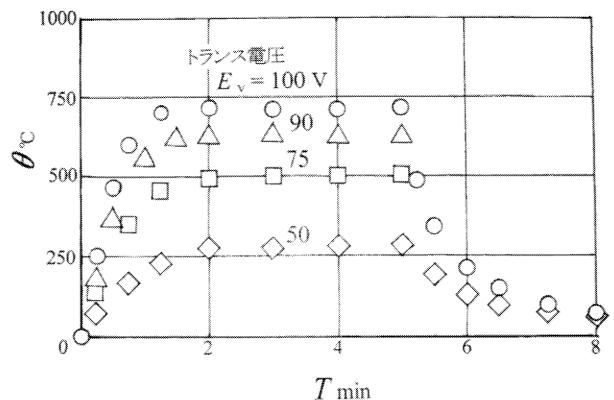


図3 パンチ温度 θ と熱電対の接触時間 T の関係

室温は 25℃で、熱電対をパンチ表面に接触させ、空気の自然対流状態でパンチ温度を測定した。トランス電圧を変えたときのパンチ温度と接触時間の関係を図3に示す。各トランス電圧において定常温度が得られており、便宜的にそれらを設定温度 θ_D と呼び、 $\theta_D = 280, 500, 620$ および 710 °Cとして採用した。

試験片から曲げ荷重を除荷し、室温 25℃に戻ったときの試験片の両端直線部のなす角をスプリングバック後曲げ角 α_A とし(図4参照)、板厚面にスタンプインクを塗って転写法で測定した。

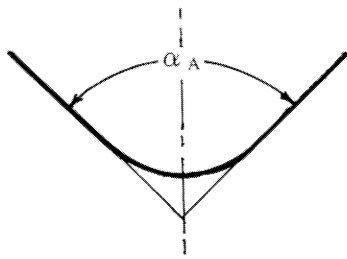


図4 スプリングバック後曲げ角 α_A

支持間隔 $2L$ の影響を調べるため、実験では $L = 4, 16\text{mm}$ を採用した。

加熱履歴として次の二つを採用した。(i)パンチに設計曲げ角 α_D となるストロークを与えてから、4 min 間加熱・保持後、3 min 間自然冷却する。(ii)パンチを設定温度 θ_D まで加熱した後、パンチ速度 v_p で設計曲げ角 α_D に対応するストローク S まで変形させる。

2.3 実験結果および考察

(a) パンチ温度 θ の影響

図5は設定温度を変えたときの半支持間隔 $L = 16\text{mm}$ におけるスプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係である。

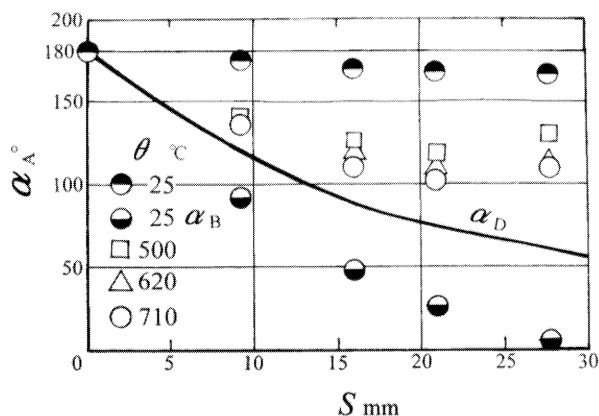


図5 スプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係
(半支持間隔 $L = 16\text{mm}$ 、パンチ速度 $v_p = 0$)

設計曲げ角 α_D とパンチストローク S の関係は次式で求められ、参考データとして実線で示した。

$$\alpha_D = 2 \tan^{-1}(L/S) \quad (1)$$

加熱履歴 (i) の3点自由曲げの場合、図2に示すように両端直線部のなす加熱前曲げ角 α_B は設計曲げ角 α_D よりも小さくなっている。加熱前曲げ角 α_B が小さくなるとパンチ荷重も小さくなり、熱移動量も小さくなるため、 α_A は極小値をとる。

図6は設定温度 $\theta_D = 710$ °Cにおけるスプリングバック後曲げ角 α_A の試験片の写真である。スプリングバック角 α_S は次のように定義されるが、以上の実験条件ではスプリングバックゼロは生じなかった。

$$\alpha_S = \alpha_A - \alpha_D \quad (2)$$

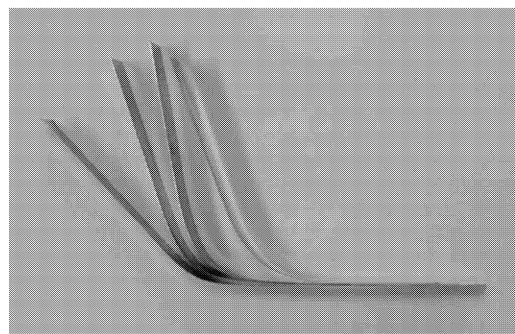


図6 $L = 16\text{mm}$ 、 $\theta_D = 710$ °Cの場合のスプリングバック後曲げ角 α_A (左より、設定曲げ角 $\alpha_D = 120, 90, 75$ および 60°)

(b) 支持間隔 $2L$ の影響

図7は半支持間隔 L を 4 mm にし設定温度を変えたときのスプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係を示す。パンチ温度 θ が大きくなるにつれてスプリングバック角 α_S は小さくなっている。

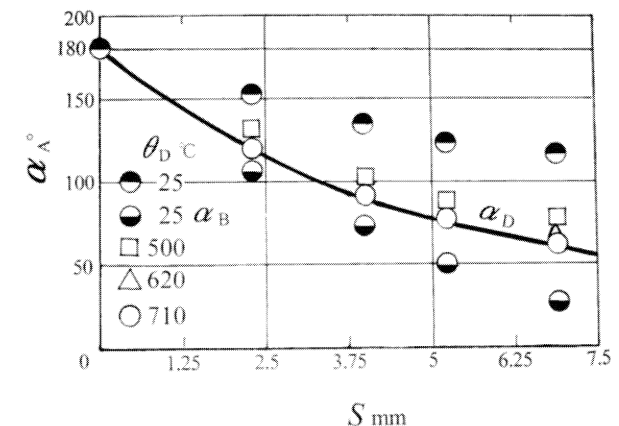


図7 スプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係
(半支持間隔 $L = 4\text{mm}$ 、パンチ速度 $v_p = 0$)

特に、パンチ設定温度 $\theta_D=710^\circ\text{C}$ のとき、設計曲げ角度 $60^\circ \leq \alpha_D \leq 180^\circ$ の範囲において、スプリングバックゼロになることを発見した。その曲げ形状を 図8 に示す。

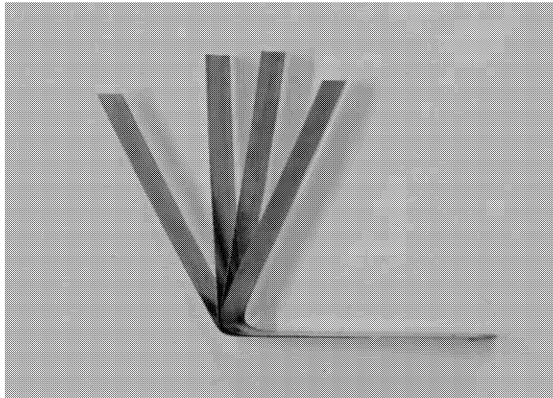


図8 スプリングバックゼロ加工条件による曲げ形状
($\theta_D=710^\circ\text{C}$ 、 $L=4\text{ mm}$ 、 $v_P=0$ 、左より、設定曲げ角 $\alpha_D=120, 90, 75$ および 60°)

(c) パンチ速度 v_P の影響

図9はパンチ速度を $v_P=2\text{ mm/s}$ にしたときのスプリング後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係である。パンチと薄板の接触時間は 15 s 程度のため、パンチ温度 θ_D の影響は小さかった。パンチ速度が小さいほど接触時間は長くなり、スプリングバック角 $\alpha_S (= \alpha_A - \alpha_D)$ は小さくなると推察できる。実験値と設計曲げ角曲線の傾向は一致しており、パンチ接触時間を 3 分程度にすれば、スプリングバックゼロの曲げ加工を期待できる。

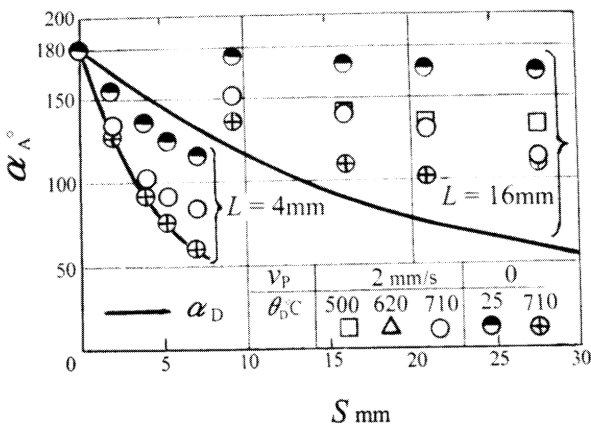


図9 スプリングバック後曲げ角 α_A -パンチストローク S 関係に及ぼすパンチ温度 θ_D とパンチ速度 v_P の影響

3. レーザ加熱方式の3点自由曲げ

3.1 実験装置および試験片

図10はアルゴンイオンレーザーと手動平行移動テーブルを用いた3点自由曲げ装置である。直径 6 mm の支持棒中心による支持間隔 $2L$ は 40 mm で、レーザービーム径は 2 mm であり、パンチの反対側から照射した。短冊状の試験片は長さ 100 mm 、幅 2 mm 、板厚 0.1 mm である。パンチ寸法は $30\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ で、刃状部の先端半径は 0.2 mm である。

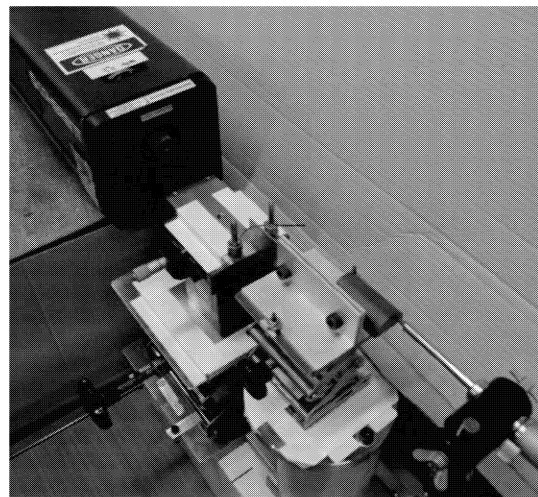


図10 レーザ加熱方式の3点自由曲げ装置

3.2 実験方法

設計曲げ角は前章の通電加熱パンチ方式と同じ $\alpha_D=120, 90, 75$ および 60° を採用した。

室温は 25°C で、レーザービームを試験片表面の黒丸に照射し、空気自然対流状態の熱電対で試験片温度を測定した。レーザー出力 $E_W=1.5\text{ W}$ のとき $2, 3\text{ s}$ 後に定常温度 160°C が得られた。

温度履歴としては、試験片に設計曲げ角 α_D となるパンチストロークを与えた後、設定温度 $\theta_D=160^\circ\text{C}$ で 7 min 間保持し、 3 min 間自然冷却させた。

3.3 実験結果および考察

(a) 試験片温度 θ の影響

図11は試験片の設定温度 $\theta_D=160^\circ\text{C}$ 、支持棒中心の半支持間隔 $L=20\text{ mm}$ のときのスプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係である。試験片温度 θ_D が大きいほどスプリングバック角 $\alpha_S (= \alpha_A - \alpha_D)$ は小さくなる。スプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストロークはほぼ比例しており、実験式は次のようになった。

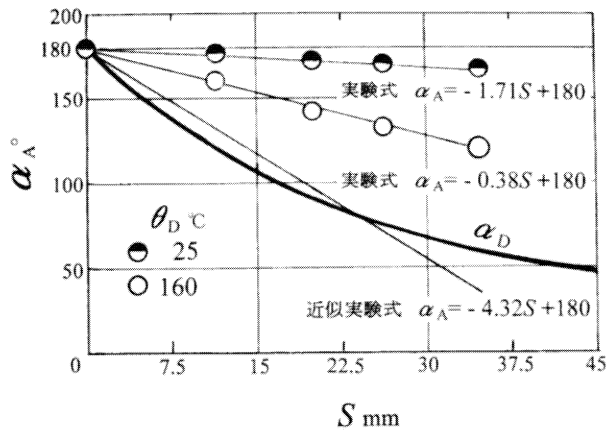


図11 スプリングバック後曲げ角 α_A とパンチストローク S の関係に及ぼす試験片温度 θ_D の影響 (半支持間隔 $L=20$ mm、パンチ速度 $v_P=0$)

$\theta_D=25$ °C のとき

$$\alpha_A = -0.381 S + 180 \quad [^\circ] \quad (3)$$

$\theta_D=160$ °C のとき

$$\alpha_A = -1.71 S + 180 \quad [^\circ] \quad (4)$$

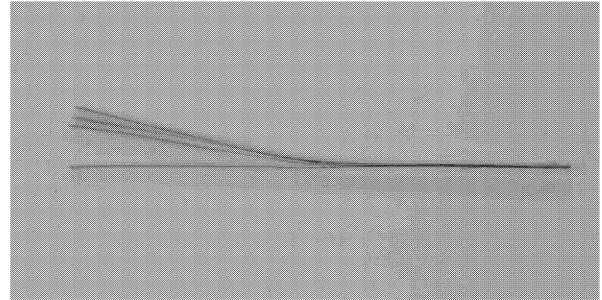
試験片温度が大きくなると熱伝導が問題となるが、直線実験式を仮定し、設計曲げ角曲線を最小自乗法で直線式に当てはめ、さらに直線式の勾配からスプリングバックゼロとみなせる設定温度を比例外挿すると $\alpha_A=430^\circ\text{C}$ となった。

図12はそれぞれ設定温度 $\theta_D=25, 160^\circ\text{C}$ のときのスプリングバック後形状である。設定曲げ角 $\alpha_D=120^\circ$ のとき、 $\theta_D=25^\circ\text{C}$ ではほとんど弾性変形となっているが、 $\theta_D=160^\circ\text{C}$ ではスプリングバック後曲げ角 $\alpha_A=160^\circ$ の残留変形となっており、温度履歴による応力緩和やクリープの影響が大きいと考えられる。

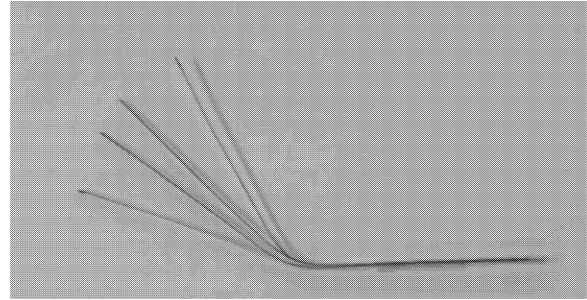
4. 結言

難成形薄板材料のスプリングバックゼロ成形を目的とし、通電パンチ、レーザ加熱による局所加熱逐次曲げ加工法を提示し、板厚 0.1 mm のばね用ステンレス鋼帯板 (SUS304-CSP) の3点自由曲げを行い、試験片(パンチ)温度、支持間隔、成形速度の影響を調べ、本実験環境(装置、材料、条件)の範囲で次の成果を得た。

[1] 通電パンチ加熱時間 4 分、設定温度 710°C 、支持間隔 8mm のとき、スプリングバックゼロ変形になることを発見した。一方、パンチ速度を遅くして、成形接触時間を 3min 程度にすれば、スプリングバックゼロになる可能性がある。



(a) 試験片温度 $\theta_D=25$ °C



(b) 試験片温度 $\theta_D=160$ °C

図12 レーザ加熱方式によるスプリングバック後の曲げ形状 (半支持間隔 $L=20$ mm、 $v_P=0$ 、左から $\alpha_D=120, 90, 75$ および 60°)

[2] レーザ出力 1.5 W、レーザ加熱時間 7 分、設定温度 160°C 、支持間隔 40 mm のとき、スプリングバック後曲げ角とパンチストロークは比例関係にあった。さらにレーザ出力を大きくし、支持間隔を小さくすれば、スプリングバックゼロ変形が得られる可能性がある。

[3] 本報告のファクトデータによって、スプリングバックゼロの局所加熱逐次曲げ加工の具現化の見通しが良くなった。

謝辞

本研究のハード部分は天田金属加工機械技術振興財団の 2006〔平 18〕年度研究開発助成金 (AF-2006014、190 万円) によって遂行できたものであり、財団の方々に心から御礼申し上げます。

参考文献

1) 井関日出男、加熱スリットダイスによる曲線断面帯板の引抜き曲げ成形法、平 14 塑加春講論集、(2002)、377-378。

発表論文

1) 井関日出男、局所高温パンチによるスプリングバックの減少、平 21 塑加連講論集、(2009-11)、〔投稿中〕