

高張力鋼板の形状凍結性に及ぼす引張り力の影響

中 哲夫*・村上 英正*・原田 康平**・今崎 友彰***

Effects of Stretching Force on Spring Back of High Strength Steel Sheets

Tetsuo Naka*, Hidemasa Murakami*, Kohei Harada** and Tomoaki Imazaki***

Abstract

Spring-back in stretch-bending were theoretically obtained on the assumption that the spring-back dose not occurs when stretching force reaches its large value. A program code for predicting spring-back of a metal strip subjected to stretch-bending is developed. The calculation method of this code is based on the modified total strain theory proposed by Yoshida and it applicable to the normal anisotropic material with the n-th power hardening law. Stretch-bending experiments were performed for three types 780, 980 and 1180MPa high-strength steel sheets at various stretching forces. The spring-back were in good agreement with the experimental results.

Keywords : stretch bending, high-strength steel sheet, stretching force, spring back

1. 緒 言

大型構造物を設計する際、同じ強度をもつ一般鋼材を用いる場合に比べて高張力鋼板（以下ハイテンと記す）は薄肉化できる¹⁾。そのため、主要構成部品などの軽量化に貢献できるといえる。さらに溶接性がよく、コストも低いため、様々な条件に適應するハイテンが相次いで開発されており、近年のハイテン化率は急速に伸びてきている²⁾。

しかし、ハイテンはプレス成形では延性の低下に伴う割れの発生や降伏強度上昇によりスプリングバックが大きくなるなど、形状凍結不良が生じやすい³⁾。このため、ハイテン板材のプレス成形シミュレーションの精度が未だ低い。このシミュレーション精度の向上には材料モデルの高精度が必要であり、ハイテンの複雑な弾塑性変形挙動を実験的に解明することが必要不可欠となる。本研究ではプレス加工時のパンチR部のスプリングバック挙動について検討する。

スプリングバックを軽減させる方法には、「曲げを受ける長さ（パンチ半径）を小さくする。」「断面二次モーメントを大きくする。」「曲げモーメントを小さくする。」といった方法がある。曲げモーメン

トを小さくする方法には、①曲げ時に引張り力を付加する方法、②曲げ加工後に引張る方法、③曲げ加工後に圧縮力を加える方法がある。

そこで本研究では、引張り強さ780,980及び1180MPa級ハイテンの引張り曲げ成形性に着目し、曲げ時に一様な引張り力を付加する引張り曲げ試験を行った。実験は引張り力を種々変化させて、スプリングバックに与える影響を調べた。また、ダイスの上に試験片を置いてパンチで押し込む三点自由曲げ（以下自由曲げと記す）と試験片をダイスとブランクホルダでクリアランスを与え挟み、テンションを加えない曲げ（以下単純曲げと記す）スプリングバックの値を比較した。また、実験結果を基に単純な力学モデルを用いてスプリングバック量を解析的に求め、実験値と比較検討を行なった。

2. 材料及び実験方法

2. 1 材料

供試材は、全てDP鋼板（二相鋼板：Dual Phase Steel）、引張り強さ780, 980及び1180MPa級のものを使用した。DP鋼板は軟質相のフェライト組織中に硬質相のマルテンサイトを分散させたもので、

* 商船学科
** 専攻科 海上輸送システム工学専攻
*** 商船学科5年

440~1180MPa級まで広範囲の強度を作り出せることができる。Fig.1に示すように各種ハイテンは引張り強さが大きくなると、延性が低下し、全伸びが小さくなる。しかし、DP鋼は引張り強さが大きくなっても他のハイテンに比べて延性が低下しない。

本研究では、ハイテンの板厚が1.4mmのものを用いた。またFig.2に示す矩形試験片を用いた。圧延方向 (Rolling Direction) を400mmにとり、圧延直角方向 (Transverse Direction) を50mmとした。また、ひずみゲージはパンチ先端部外側 (以下、中心部ひずみゲージと記す) に一枚と中心部より25mmずらした位置 (以下、単軸部ひずみゲージと記す) に一枚貼った。ひずみゲージは東京測器研究所製の塑性域ゲージYEFLA-5-LA-1 ($\pm 2\%$ のひずみが測定可能)、ゲージ長5mmのものを使用した。

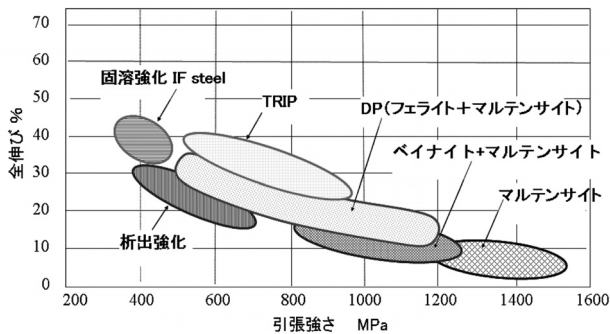


Fig.1 各種ハイテンの引張り強さと伸び

2. 2 実験方法

2. 2. 1 自由曲げ実験

本実験は容量200kNのアムスラー型万能試験機に自作の三点曲げ試験機を取り付け行った。ダイス肩部半径は $R=10\text{mm}$ とした。Fig.2の試験片をダイスの上に置き、中心部にパンチを押しあて、曲げ角度が 90° になるまで押し込み実験を行った。

実験は、室温にて試験速度を (応力-ひずみ関係がひずみ速度依存性がない) $約5\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、パンチ先端半径を8mm、ダイス間スパンDを100mmとして行った。またスプリングバック量を計測するため

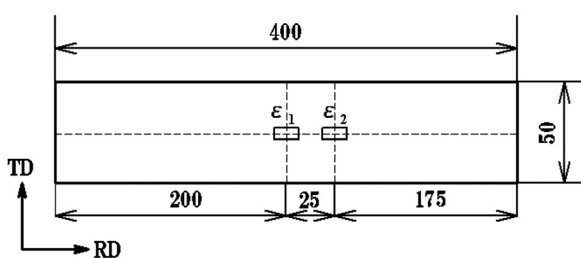


Fig.2 試験片形状

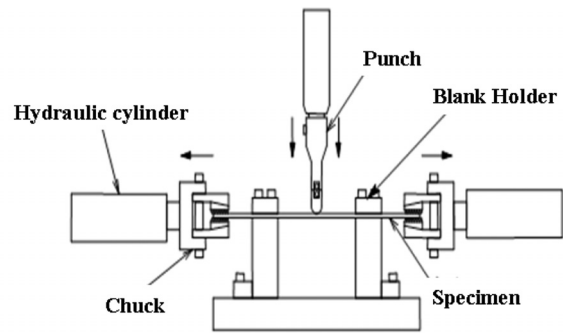


Fig.3 試験機概観図

曲げ部にひずみゲージ ϵ_1 を貼った。

2. 2. 2 単純曲げ実験

単純曲げ実験は自由曲げと同様にアムスラー型万能試験機に取り付けた三点曲げ試験機を用いて行った。試験片をダイスとブランクホルダで挟み、摩擦力の軽減のため試験片とダイス、ブランクホルダの間に潤滑剤としてグリースおよび厚さ0.05mmのテフロンシートを用いて1.1mmのクリアランスを与えた。なお、テンションはブランクホルダ通過時の摩擦力とダイスコナー部における曲げ戻し力のみである。実験は中心部にパンチを押しあて、曲げ角度が 90° になるまで押し込んだ。Fig.6に模式図を示す。

実験は、自由曲げ実験と同様で室温、試験速度を $約5\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、パンチ先端半径を8mm、ダイス間スパンDを100mmとして行った。この試験では引張り力を計測するために試験片の単軸応力部にひずみゲージ ϵ_2 も貼って行なった。

2. 2. 3 引張り曲げ実験

容量200kNのアムスラー型万能試験機に自作の引張り力を付加できる曲げ試験機を取り付け、実験を行った。試験機概観をFig.7に示す。

引張り曲げ試験はダイス肩部半径 R_D を10mm、パンチ先端部半径 R_p を8mm、ダイス間スパン100mmのものを用いた。実験条件は室温でパンチ速度を $約5\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ とした。引張り曲げ試験の引張り力は試験材料の降伏応力に試験片の初期断面積を乗じた荷重 (kN) 値の20%、40%及び60%の三種類を与えた。Table 1にこの実験に用いた1180MPa級ハイテ

Table 1 機械的性質

強度	ヤング率	降伏応力	硬さ係数	n値
[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	
780	206	500	1435	0.167
980	206	661	1581	0.155
1180	206	1056	1577	0.0512

ンの引張り力を示す。また、常に引張り力を一定にするため油圧装置のリリーフ弁で調整した。実験はFig.2に示す矩形試験片をFig.7に示す油圧シリンダのチャックで拘束し、ブランクホルダに単純曲げ試験と同様の潤滑剤によるクリアランスを付与し、中心部にパンチを押しあて曲げ角度90°になるまで押し込み行なった。実験では、パンチ上部に取り付けた自作のロードセルによりパンチ部にかかる荷重を測定し、ストロークをシャフトに取り付けたポテンションメータより求めた。また、ひずみはFig.6と同様に、中心部ひずみゲージ ε_1 と単軸部ひずみゲージ ε_2 より測定した。

これらの4つのデータは、実験中動ひずみアンプを介して自動的にノートPCメモリに収録した。

3. 実験結果

本研究では、矩形試験片を用いて三点曲げ試験を行い、スプリングバック量 $\Delta\theta$ と試験片断面内にかかる応力 σ とひずみゲージより計測された曲げひずみ量 ε と種々に与えた引張り力が実験結果に与える影響について検討を行った。Fig.4に各種鋼板の引張り強度と除荷後の角度、Fig.5にスプリングバック量

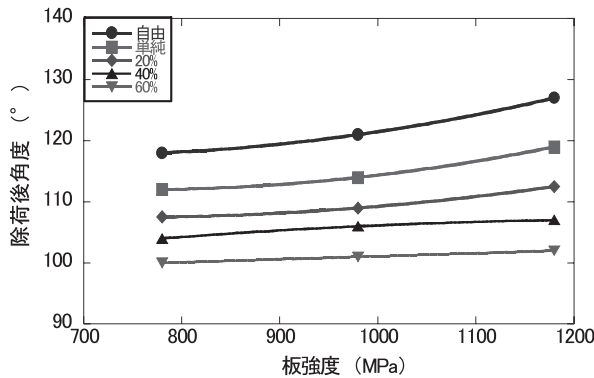


Fig.4 強度と除荷後の角度の関係

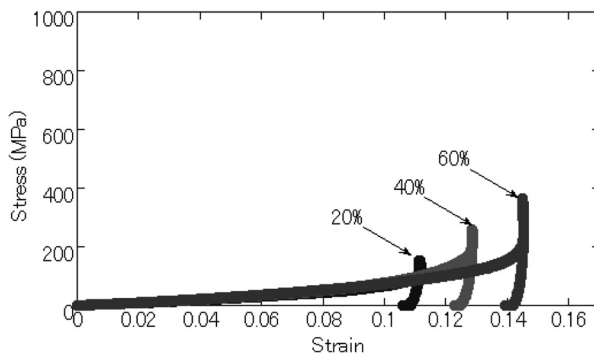


Fig.5 強度とスプリングバック量の関係 (プロトラクターによる計測)

をプロトラクターで計測した結果を示す。

$$\Delta\theta = \theta_* - \theta_0$$

上式の θ_* : 負荷除荷後の角度 (°), θ_0 : 負荷時の角度 (°) である。に示されているように自由曲げ、単純曲げ、引張り曲げの順にスプリングバックが減少されていることが示された。

4. 解析的予測

吉田ら⁴⁾は引張り曲げの破断限界を最大荷重条件から解析的に求める方法を提案している。この方法は、肩小半径部変形部R部の変形を平面ひずみ状態で近似して、R部の板厚 t を求めている。

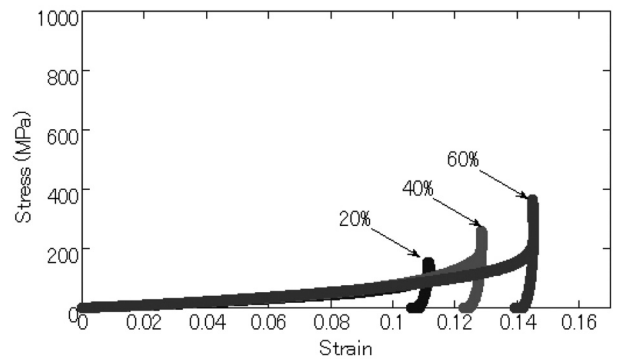


Fig.6 780MPa級の応力-ひずみ曲線

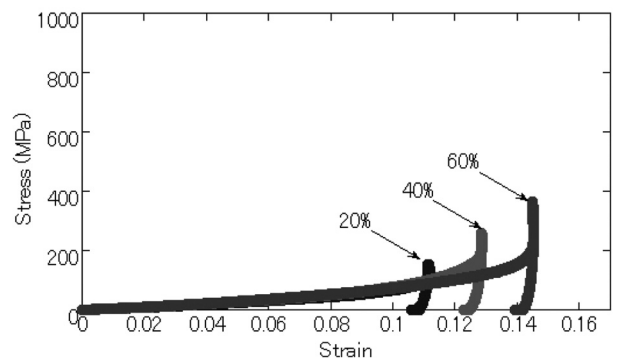


Fig.7 980MPa級の応力-ひずみ曲線

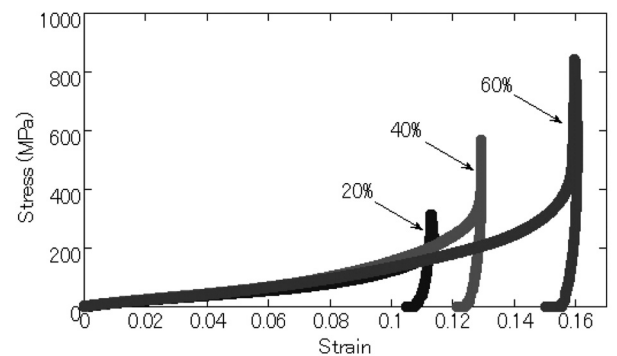


Fig.8 1180MPa級の応力-ひずみ曲線

本解析的予測は、下記の仮定に基づいて解析を行った。

- ① プレス肩小半径R部の曲げ変形を平面ひずみ状態と考え、パンチ先端部のせん断変形の影響を考慮しない。
- ② 相当応力-相当ひずみの関係を $\sigma_{eq} = C \epsilon_{eq}^n$ の n 乗硬化則でモデル化する。
- ③ 工具-ハイテン材間の摩擦を考慮しない。
- ④ ハイテン材は全て面内等方性とする。
- ⑤ 断面内の対数ひずみ分布を幾何学形状から算定する。
- ⑥ ハイテンの局所伸びが非常に小さいと考え、Swiftの拡散くびれ発生条件を用いた最大荷重発生条件を破断限界とする。

これらを正確に検討するためには“ひずみ増分理論”が適切であると考え、本研究では、簡便な“全ひずみ理論”で検討を行った。

Fig.10にパンチ先端の曲げ加工部の変形状態の模式図を示す。張力 $T=0$ のとき変形形態 $OABC$ となる部分(曲げ角度 ϕ)が、張力 T の負荷時に変形形態 $OA'B'C'$ (曲げ角度 θ) のように変形すると仮定する。

破断限界断面線長比 L/L_0 (最大張出部の線長 L 、元の線長 L_0) は張力負荷前後の体積一定条件(張力 $T=0$ 時の $OABC =$ 張力 T を加えて変形した状態 $OA'B'C'$) から、次式で得られる。

$$\frac{\theta}{\phi} = \frac{1}{2} \frac{2R_i + t_0}{R_i + t} e^{\epsilon_0} \quad (1)$$

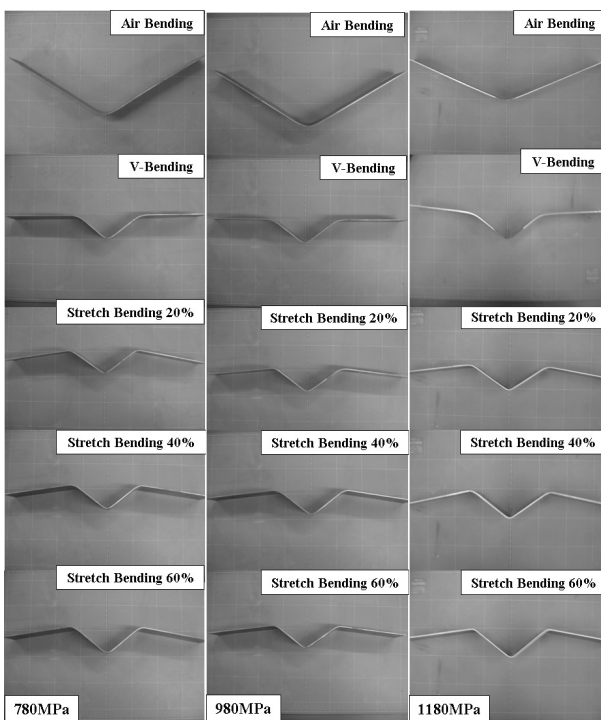


Fig.9 実験後の試験片

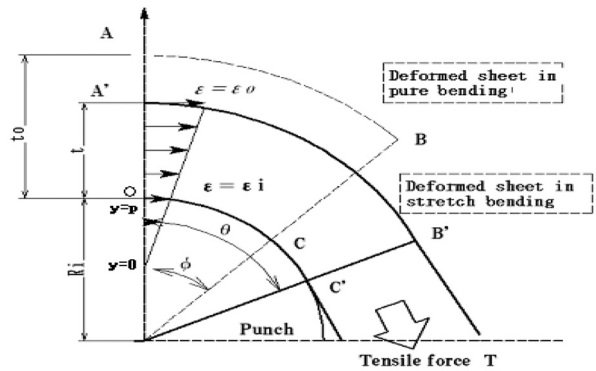


Fig.10 パンチ曲げ加工部の変形形態模式図

そして、曲げR部の板厚 t は次式となる。

$$t = t_0 e^{-\epsilon_0} - R_i + \sqrt{R_i^2 + (t_0 e^{-\epsilon_0})^2} \quad (2)$$

式(2)より求めた板厚変化率 ($t/t_0 \times 100\%$) と曲げ加工法の関係を一例として1180MPa級の供試材をFig.11に示す。

自由曲げでは、Fig.16に示されているように板厚は変化しないと仮定し、ひずみを算出する次式が成り立つ。なお、 h は曲げ角度が 90° の時のストロークである。

$$\epsilon = \frac{t_0/2}{h + (t_0/2)} \quad (3)$$

単純曲げ及び引張り曲げでは、板厚の変化と中立軸の移動

量 y も考慮に入れ、次式が成り立つ。また、Fig.12 (1180MPa) に板表面(パンチ側)からの中立面位置と曲げ加工法の関係を示す。

$$\epsilon = \frac{t/2 - y}{h + (t/2) - y} \quad (4)$$

ひずみが求まれば、曲率 κ は次式で得られる。

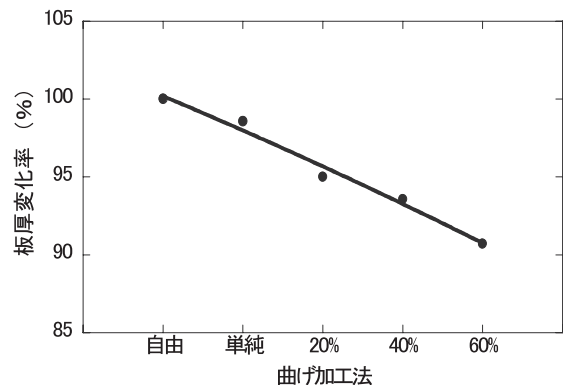


Fig.11 板厚変化率 (%) と曲げ加工法 (1180MPa級)

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{y} \quad (5)$$

そして、曲率半径 ρ は次式となる。

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (6)$$

スプリングバックの曲げ角度変化率として、次式を用いた。

$$\frac{\Delta\theta}{\theta^0} = 3 \left(\frac{Y}{E} \right) \left(\frac{\rho}{t} \right) \quad (7)$$

ここで $\Delta\theta$ はスプリングバック量、 θ^0 は曲げ角度、 Y は降伏応力、 E はヤング率である。式 (4.11) より求めた曲げ角度変化率から除荷後角度 θ^* を次式により得られる。

$$\theta^* = \Delta\theta + \theta^0 \quad (8)$$

Fig.13 (1180MPa) に式 (2), (6), (7), (8) より求めた除荷後における予測角度及びプロトラクターで計測した実測値と各々の曲げ加工法の関係と比較して示す。

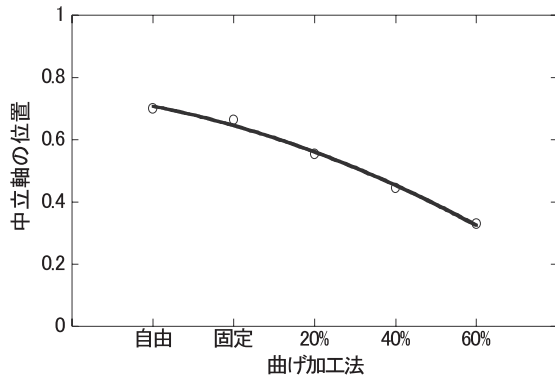


Fig.12 中立軸位置と曲げ加工法 (1180MPa)

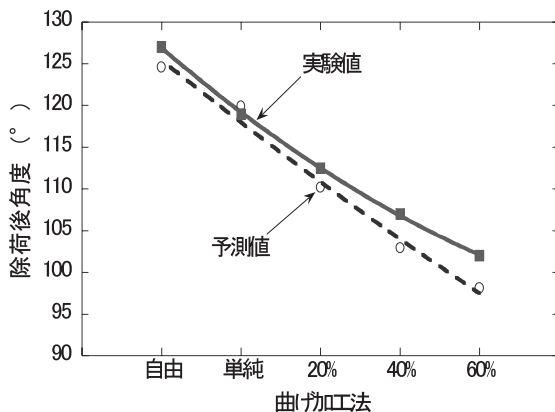


Fig.13 予測から求めた除荷後の角度 (1180MPa級)

5. 実験結果と予測値

自由曲げ、単純曲げ及び引張り曲げのスプリングバック量について実験結果と予測値との比較・検討を行なった。Fig.14,15及び16に各々の曲げ加工法とスプリングバック量 $\Delta\theta$ の関係を実験結果と予測値を比較して示す。これらの図に見られるように若干誤差が生じるが、自由曲げ、単純曲げを含めてほぼ一致することが示された。

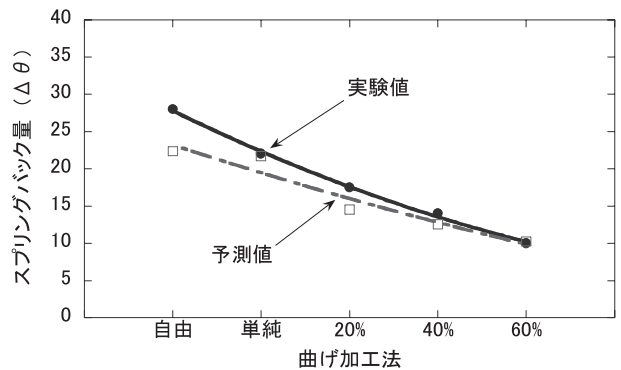


Fig.14 780MPa級のスプリングバック量と曲げ加工法

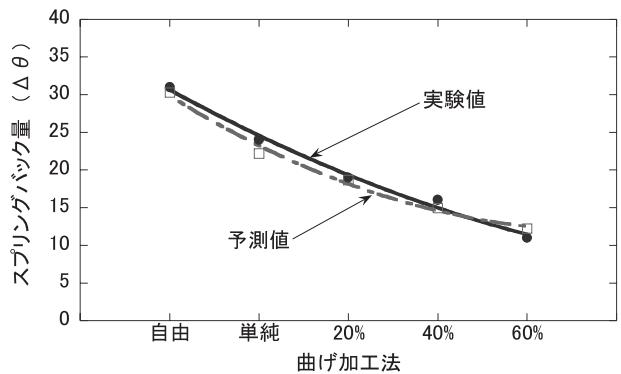


Fig.15 980MPa級のスプリングバック量と曲げ加工法

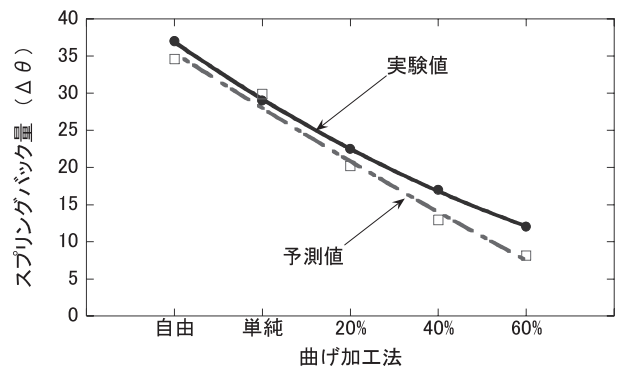


Fig.16 1180MPa級のスプリングバック量と曲げ加工法

6. 結 言

本研究では、超高張力鋼板の曲げ成形性に着目し、スプリングバックの低減を目的として、780,980及び1180MPa級のハイテンを用いた自由曲げ、単純曲げ及び引張り曲げ試験を行なった。また、単純な力学モデルを用いてスプリングバック量を解析的に求め、実験値と比較・検討を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 材料の強度の上昇に伴い、スプリングバック量が大きくなっていることが示された。このことから強度が高く、 n 値が小さいほど、スプリングバックが上昇することが示された。
- 2) 引張り曲げ加工において引張り力の増加の増加に伴って、応力とひずみが増えていくことが示された。
- 3) 引張り曲げ加工において引張り力の増加に伴って、スプリングバック量が減少した。引張り力によりスプリングバック量が軽減できることが示された。
- 4) スプリングバック量の実験値と解析的予測は良好に一致し、この解析的予測が有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：わかりやすいプレス加工 PP.28-30.
- 2) 占部俊明・細谷佳弘：塑性と加工 (2005), 46-534, PP.16-20.
- 3) 岩谷二郎・山野隆行：塑性と加工 (2006-12), 47-551, PP.63-68.
- 4) 吉田正敏・吉田総仁・小西晴之・福本幸司：塑性と加工 (2005-9), 46-536, PP.859-863.