

円錐面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の開発

東京工業大学 理工学研究科 機械宇宙システム専攻

助手 井関日出男

(平成11年度研究開発助成 AF-1999016)

キーワード：引抜き曲げ成形，迅速試作品成形法，大変位高速疲れ試験

1. 研究の背景と目的

移動する物体に取り付けられたモーターやセンサーなどに電力を供給する方法として、カールコード、フラットケーブルやチェーン方式のケーブルベアなどがある。またフラットケーブルを円弧断面を持つ帯板(コンベックス)の折り曲げ座屈形状で補強する方法¹⁾も考案されている。曲線断面を持つ帯板の折り曲げ座屈形状は座屈平行移動や静粛性に優れており、高速移動体への給電ケーブルとして期待されている(図1参照)。この座屈式給電ケーブルは引き戸式自動ドアに使用されるので(図2参照)、耐久性も要求される。フラットケーブルを織物のチューブで帯板に抱き留める構造(図1参照)にすると給電ケーブルの耐久性が格段に向上することが著者らによって報告されている²⁾。

しかし、座屈形状や耐久性に及ぼす帯板の断面形状と機械的性質の影響がほとんど明らかにされておらず、試作品の設計と製作を難しくしている^{3), 4)}。また曲線断面を持つ帯板の大量・高速成形法としてロール成形法⁵⁾が確立されているが、難成形材料のばね鋼などの冷間成形⁶⁾についてはかなりの経験と熟練を必要とする。

そこで曲線断面ケーブルの迅速試作品成形法として、ワイヤーカット放電加工されたスリットダイスによる引抜き曲げ成形法を提案し⁷⁾、縁波発生による成形限界図を作成した⁸⁾。また縁波と反りを制御するために傾斜引抜き曲げ成形法を提案し⁹⁾、さらに多段スリットダイスの相対位置によって長手方向の反りを制御できることを実験的に確認した¹⁰⁾。

そのときの薄板の変形移動経路は曲面状であり、成形工具の剛性を高める利点もあり、円錐面スリットダイスによる引抜き曲げ成形法の開発を着手するに至った¹¹⁾。スプリングバックに及ぼすスリット間隔の影響を調べるために分割ダイスによる成形実験も行った^{12), 13)}。さらに円弧断面帯板の大変位座屈疲労試験機を開発し、引抜き曲げ成形品の疲れ試験を行った¹⁴⁾。

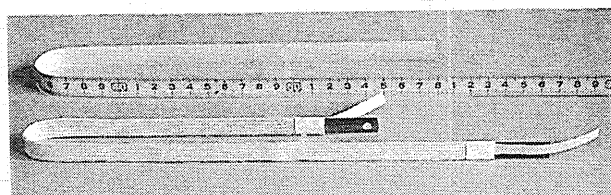


図1 円弧帯板の折り曲げ座屈形状と座屈式給電ケーブル

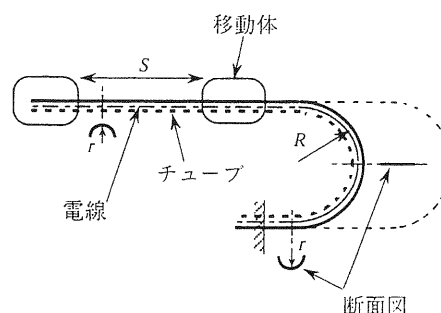


図2 座屈式給電ケーブルシステムの概略図

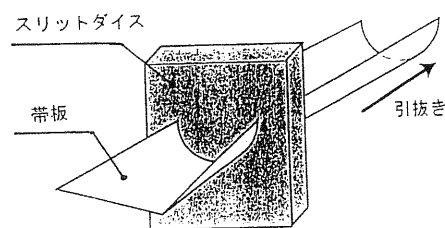


図3 スリットダイスによる引抜き曲げ成形法

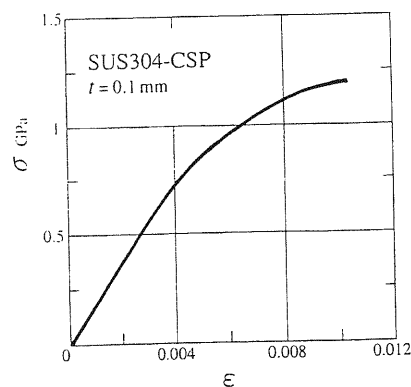


図4 使用したばね用ステンレス鋼帯の応力-ひずみ曲線

2. 円錐面ダイスによる引抜き曲げ成形法

2.1 引き抜き装置及び実験材料

図3はスリットダイスによる引抜き曲げ成形法の概略であり、成形工具は前川レバー式万能材料試験機の上部に固定され、帯板は下方に引張られる。

試験片は板厚0.1mmのオーステナイト系ばね用ステンレス鋼帯 (SUS304-CSP)であり、その応力-ひずみ曲線を図4に示す。主な機械的性質は、ヤング率 $E=190\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、耐力(0.2%) $\sigma_p=1.13\text{GPa}$ 、引張強さ $\sigma_B=1.21\text{GPa}$ であり、かなりの難成形性材料である。

帯板はスリット形状の拘束によって幅方向に凹曲げとなる。長さ(引張り)方向には鞍形に反る場合と樽形に反る場合が生じたが、鞍形の反りを正の曲率半径とした。

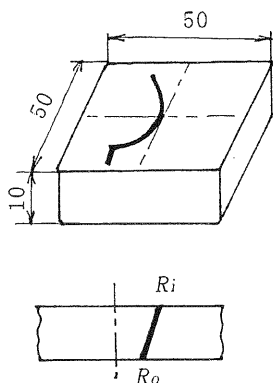


図5 円錐面スリットダイスの概略

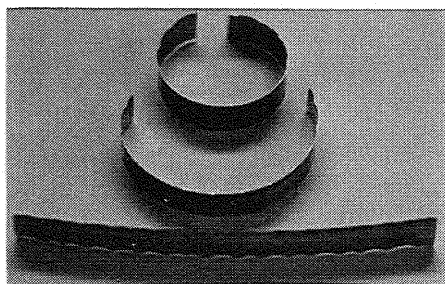


図7 円錐面スリットダイスによる製品例
($R_i=10\text{mm}$, $R_o=5\text{mm}$)

2.3 分割円錐面ダイスによる引抜き曲げ

難加工性のばね用ステンレス鋼製の板厚0.1mmに対し、円錐面スリット間距離は0.5mmであるため、スプリングバック比 r/R_s が4~6と大きくなる傾向を示した。そこで分割スリットダイスにして、スプリングバック比に及ぼすダイス間距離 ΔS の影響を検討した。

図9は分割円錐面ダイスであり、凸状の上ダイス、凹状の下ダイスと締付けボルトを示す。平均円弧半径 $R_s=5.0\text{mm}$ 、スリット幅0.3mmの円錐面ダイスを分割したものであり、ダイス厚さ t_D は15mmで

2.2 円錐面スリットダイスによる引抜き曲げ

図5は円錐面スリットダイスの概略であり、帯板の成形速度は100mm/minとし、潤滑剤は使用していない。図6に円錐面スリットダイスの上下面を示す。スリット間距離は0.5mmである。 $R_i=10\text{mm}$ 、 $R_o=5\text{mm}$ の円錐面スリットダイスを用い、ダイス面の傾斜角を変化させたときの製品例を図7に示す。 $R_i=5\text{mm}$ 、 $R_o=2\text{mm}$ の円錐面スリットダイスを用い、帯板幅を変化させたときの製品例を図8に示す。小奈氏の重ね合わせロール成形法⁶⁾によるパイプの最小曲率半径は3.2mmであり、図8の製品の曲率半径は3.6mmであり、円錐面スリットダイスによる引抜き曲げ成形法は簡易迅速成形法として有効である。

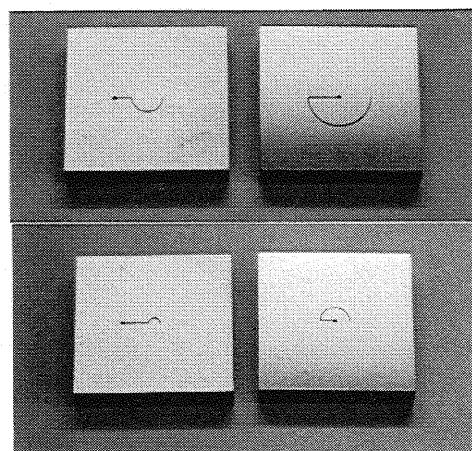


図6 円錐面スリットダイスの上下面 (R_i-R_o)

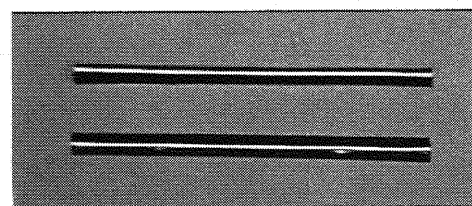


図8 円錐面スリットダイスによる製品例
($R_i=5\text{mm}$, $R_o=2\text{mm}$)

ある。上ダイスと下ダイスの間に挿入したスペーサの厚さを便宜的なダイス間距離 ΔS としている。帯板の引抜き速度は100mm/minであり、潤滑剤として二硫化モリブデンを使用した。

円弧帯板の成形品例を図10に示す。円錐の半頂角 $\alpha=15^\circ$ 、ダイス傾斜角 $\beta=0^\circ$ のときの板幅 b とダイス間隔 ΔS による成形限界図を図11に示す。曲率 $1/\rho$ と板幅 b の関係をダイス間隔 ΔS をパラメータとして図12に示す。図13はスプリングバック係数 r/R_s と板幅 b の関係をダイス間隔 ΔS をパラメ

ータとして表示したものである。図14は曲率 $1/\rho$ とダイス傾斜角 β の関係を示し、反りのない成形品を得るための最適傾斜角 β はおよそ $\alpha+10^\circ$ となっ

ている。図15はスプリングバック係数 r/R_s とダイス傾斜角 β の関係を示す。

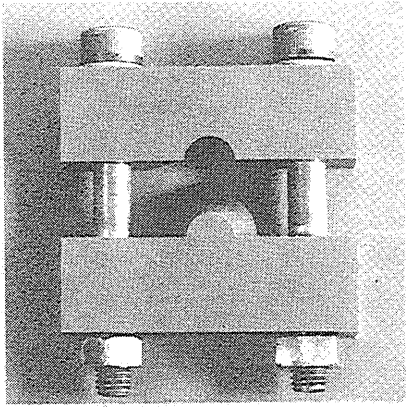


図9 分割円錐面ダイス (半頂角 $\alpha = 15^\circ$)

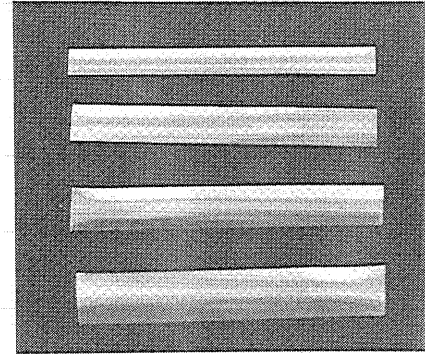


図10 円弧帯板の成形品例

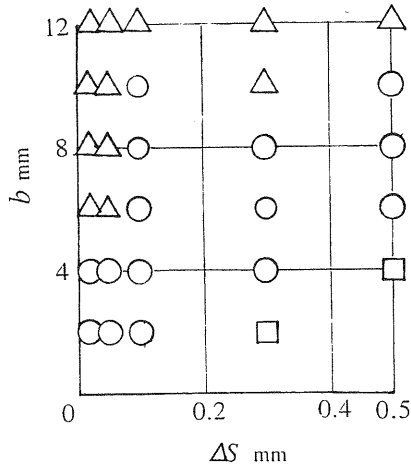


図11 板幅 b とスリット間隔 ΔS による成形限界図 (縁波 Δ 成形 \circ 不可 \square , $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $R_s = 5\text{mm}$)

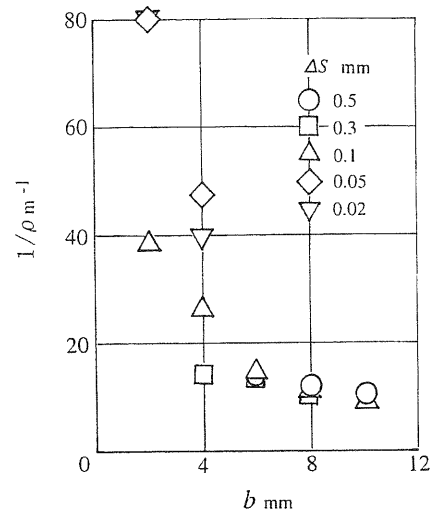


図12 曲率 $1/\rho$ と板幅 b の関係 ($\alpha = 15^\circ$, $\beta = 0^\circ$)

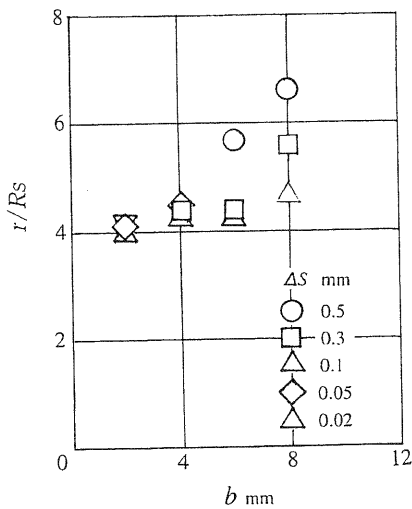


図13 スプリングバック係数 r/R_s と板幅 b の関係 ($\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$)

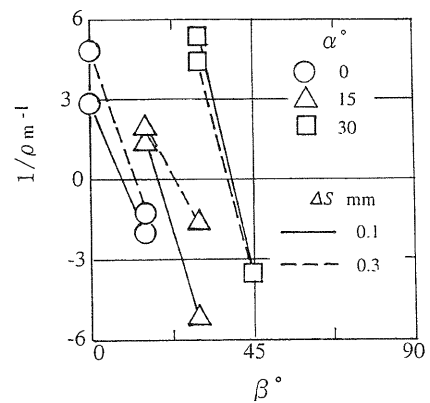


図14 曲率 $1/\rho$ とダイス傾斜角 β の関係

3. 円弧断面帯板の座屈疲労試験

3.1 大変位高速疲れ試験機

ボールネジとサーボモータによる往復式疲労試験機によると長さ1.20mの円弧帯板の一端は、試験機のスライダに取り付けられ、平均速度0.5m/sで平行に往復移動する。したがって、往復に要する時間は約2.5s(24rpm)であり、耐久回数を100万回としても1ヶ月の試験期間が必要となる。本報では偏心ピストンクランク機構による大変位高速疲れ試験機を試作し、スリット工具を用いた引抜き曲げ成形による円弧断面帯板の折り曲げ座屈疲労試験を行った。

図16は試作した大変位高速疲れ試験機である。ストローク $S=132\text{mm}$ 、回転速度 $n=60\sim 1500\text{rpm}$ 、駆動モートル出力 $H_p=1.5\text{kW}$ である。ただし、回転速度を大きくすると試験片は慣性力と空気抵抗の影響を受け、座屈平行移動が保持できなくなり、回転速度には限界がある。回転速度限界は円弧帯板の長さや剛性によるが、試験は360~900rpmで行うことができた。

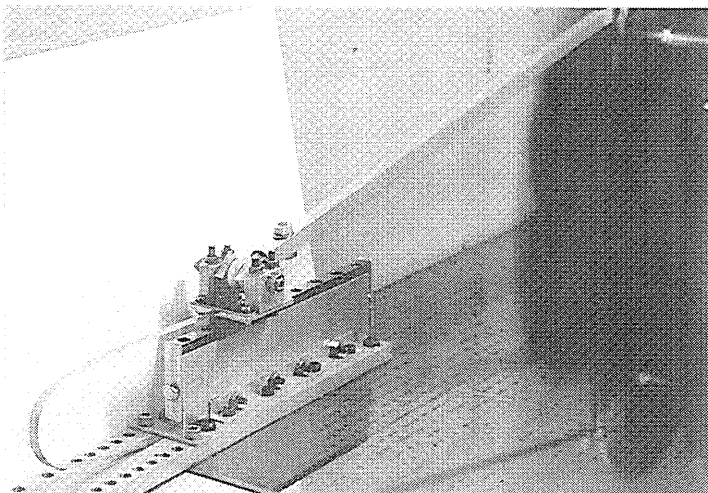


図16 ピストンクランク式大変位高速疲労試験機

4. 結論

- (1) 円錐面スリットダイスによる引抜き曲げ成形法を提案し、板厚0.1mmのばね用ステンレス鋼板の曲面帯板成形に適用し、曲率半径が3.6mmの円弧帯板を成形できた。
- (2) 分割円錐面スリットダイスを用いた引抜き曲げ成形法を提案し、板厚0.1mmのばね用ステンレス鋼板の円弧帯板成形に適用し、(a)成形領域は半頂角 $\alpha=15^\circ$ 付近で最大となる、(b)ダイス間隔が大きくなると、曲率は小さく、スプリングバック係数は大きくなる、(c)最適傾斜角は約 $\alpha+10^\circ$ となること、などを見出した。

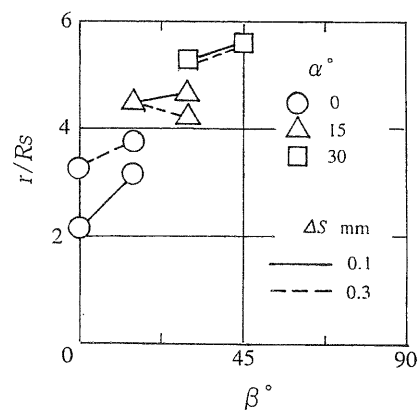


図15 スプリングバック係数 r/R_s とダイス傾斜角 β の関係

3.2 表面ひずみ-往復回数線図

図17は表面ひずみ-往復回数線図であり、表面ひずみに対応するひずみ尺度 $0.5t/r$ と往復回数 N の関係を示したものである。疲れ表面ひずみ限度は0.003程度になっており、所要日数は1~2日である。

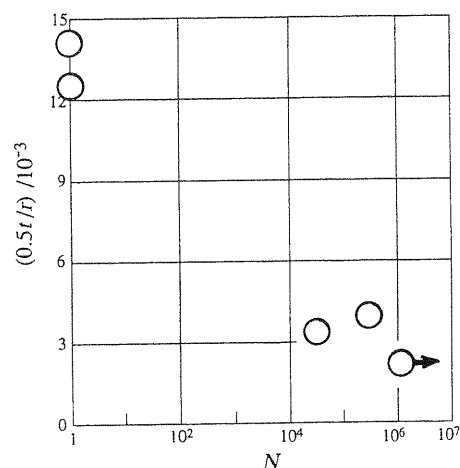


図17 公称表面ひずみ $0.5t/r$ と往復回数 N の関係

- (3) 大変位往復型高速疲れ試験機を製作し、座屈型給電ケーブル用の円弧断面帯板の疲れ試験を行い、表面ひずみ-往復回数線図を作成し、疲れ限界表面ひずみを求めた。

謝辞

本研究は(株) ツーデンと天田金属加工機械技術振興財団のご援助を頂いており、感謝の意を表します。

円錐面ダイスの加工をしていただいた(株)アマダ、

電気加工部門の吉田部門長と浦上係長，円弧帯板のロール成形法についてご教示頂いた大阪熱処理(株)の広岡技術部長，コンベックスの資料を戴いたサンコースプリング(株)の丹野営業部長にも感謝いたします。

卒業研究としてご協力をいただいた高橋，川原，谷口氏にも感謝いたします。

参考文献

- 1) 特開昭62-19498, 特開昭63-253813,
特開平8-132152, 特開平8-149651
- 2) 井関ほか, 日機講論集[No.99-23], (1999),
69-70.
- 3) 井関ほか, 第49回塑加連講論集 (1998), 31-32.

- 4) Wuest, W. : Zeit.f.Angew.Math.u.Mech.,
34-12 (1954),444-454.
- 5) 日本塑性加工学会編: 最新塑性加工要覧,
(1986), 180-184. , コロナ社.
- 6) 小奈, 平9 塑加春講論集 (1997), 151-152.
- 7) 井関ほか, 第49回塑加連講論集 (1998),
435-436.
- 8) 井関ほか, 平11塑加春講論集 (1999), 221-222.
- 9) 井関ほか, 第50回塑加連講論集 (1999),
465-466.
- 10) 井関ほか, 平12塑加春講論集 (2000), 121-122.
- 11) 井関, 第51回塑加連講論集 (2000), 51-52.
- 12) 井関ほか, 平13塑加春講論集(2001), 355-356.
- 13) 井関, 第52回塑加連講論集 (2001), 225-226.
- 14) 井関, 平14塑加春講論集 (2002), 107-108.