

ステンレスばね鋼板によるパイプの製造

拓殖大学 工学部 機械システム工学科

教授 小奈 弘

(平成7年度研究開発助成 AF-95006)

1. 研究の背景

工場で製造された電縫管(パイプ)は機械部材あるいは建設部材として使用するためにトラック、船あるいは列車等で運搬される。ところで、電縫管は直径が大きくなればなる程、電縫管断面における空間の占める割合が多くなる。このため本材の運送は広い運搬容積を占める割には、数量的にはさほど運搬されていない。これを宇宙基地の建設に電縫管を運搬するという事を考えた場合にはロケットの発射費用が多大であることから、その運搬費用が膨大となり、ことは重大である。そこで筆者はロケットの限られた運搬スペースを如何に有効に使用するかについて考えた結果、地上においてパイプの形状を記憶させた薄鋼板をコイル状に巻き取り、これを宇宙空間において巻き戻すと再びパイプ形状に復元するようになれば、これを溶接することによって電縫管ができる。もし、この方法が可能ならばロケット運送はさほどスペースをとらないはずであるという結論に至った。本実験はこれを実現するために薄鋼板バネ材(SUS304 熱処理材)でパイプの成形を行い、上記の巻き取り・巻き戻し工程を含む製造方法でパイプ成形が可能であるかどうかについて実験的に検証した。

2. 実験方法

2-1. 実験材料 板厚 0.1mm、板幅 40mm の熱処理された SUS304 材のバネ帯鋼材を用いた。本材料の機械的性質は Table 1 に示すようである。

2-2. ロールパススケジュール 本材は強いスプリングバック性を有することから、これによるパイプの成形には従来の造管技術をそのまま適用する事ができない。そこで薄鋼板の各ロール曲げ成形後のスプリングバックを押さえるために①ロールスタンド間隔を極力狭くする、②板を 2.5 ～ 3 重

巻きに丸めてパイプにする、③成形中の材料に前方-後方張力を付加する、④パイプエッジの曲げ成形には従来のエッジベンド成形法を併合する等を設計に盛り込んだ。Fig.1 はこの設計方針によるロールパススケジュールである。図中の No.1 ～ No.4 はエッジベンド成形工程であり、No.5 ～ No.12 はブレークダウン成形工程であり、No.12 ～ No.16 はパイプエッジの一端を巻き込ませてながら成形する丸め込み成形工程となっている。

2-3. 実験装置 ロールスタンドの間隔が狭いロール成形機とパイプに成形した後に再びこれを平らな帯鋼板に戻して巻き取る巻き取り成形機とをタンデムに配列した実験装置を製作した。Fig.2 に示す本実験装置はこの他に材料の供給と後方張力が付加できるルーバー装置が設置されている。図中のロール成形機(Forming Stand)における前段部の4段はエッジベンド成形と噛み込み時の材料送りができる駆動スタンドであり、後段部はロール間隔を狭めた無駆動スタンドである。このような構成になっているためパイプの成形が進行するにつれて成形抵抗が高まるために材料がスムーズに送れなくなる。そこで材料の送りは成形されたパイプを一旦平板に戻した後に、これを巻き取り成形機(Coiler)で巻き取る、いわゆる、材料を引っ張る方法をとった。この方法はバネ材をパイプに成形した後に平板に戻してコイル状に巻いても、これを巻き戻せば再びパイプ形状に復元すると仮定する本実験を確認するには極めて適した実験工程である。Fig.3 はパイプの成形、平板への戻しと巻き取り、巻き取り後の巻き戻しおよびパイプ形状への復元の一連の成形工程の概略図である。

3. 実験結果

3-1. 巻き取り前のパイプ直径 Fig.4 はロール成

形機の最終段のロール直径とこれによって成形された巻き取り前のパイプ直径との関係を示している。図示のように本材料はバネ材であることからスプリングバックが大きく現れ、最終段のロール直径が 13mm 以上である場合には、ほぼ平板に近い状態にまで戻る。また、最終段ロール直径が 10 ~ 13mm の間での成形ではパイプ形状になるものの板両端が一致しない開いたパイプとなる。この範囲における成形では鋼板幅が 40mm であるためロール穴型内で鋼板の端部は互いに重ね合った状態である。このため狭いロール穴型内に強引に板を押し込む成形法であるため鋼板は強い圧縮力と引っ張り力を受ける。また、この範囲内ではパイプエッジに縁波座屈を生じない。これは成形前段部の 4 段で板端部の縁曲げを行っているためである。最終段ロール直径が 6.5 ~ 8mm の範囲での成形では完全に閉じたパイプを得ることができる。しかし、この範囲での成形は縁波座屈を生じやすい。このため実験では成形機の出口側にパイプのひずみを分散する事のできる簡単な装置を設置した。これにより縁波の発生が回避できた。Fig.5 は最終段ロールの直径が 6.5 ~ 8mm の範囲での製品直径とロール直径との関係を示している。図中の各種の記号は成形中における後方張力である。図示のように製品直径はロール径の減少と共に減少している。この範囲では製品径はスプリングバックによって最終ロール直径の約 1.5 倍となる。なお、後方張力の影響が認められないのは後方張力の値そのものが少ないためと考える。

3-2. 巻き戻し後のパイプ直径 パイプに成形されたものを円錐形状のシュウに通して平らな状態にした後、これを巻き取りドラムで巻き取った。つぎに、このドラムから巻き取った鋼板を巻き戻した。巻き戻された鋼板は形状記憶合金のように巻き取る前のパイプ形状にある程度復元する。この時の製品直径を最終段ロール直径との関係で示したのが Fig.6 である。図示のようにロール直径が製品径に影響を与える度合いは少ない。また、板幅が 40mm であるからパイプが閉じた円状になる時は直径が 12.7mm にならなければならない。このこと

を考慮すると本実験範囲では最小ロール直径の場合(6.5mm)でもパイプは閉じたパイプになっていないことが解る。しかし、最終ロール直径を約 5.5mm にすれば閉じたパイプが得られることが実験結果を外挿することによって求められる。

3-3. 巻き取り前、巻き取り後のパイプのそり 上記 3-1,3-2 のパイプについて製品長手方向そりを調べ Fig.7 に示した。図示のように巻き取る前の状態でのパイプは 10 ~ 18m の曲率半径のそりを持つが、これを巻き取りドラムで巻き取った後に再び巻き戻してパイプになった状態ではそりは一般的に減少する。これは平板がパイプに成形される時に生じるそりに影響する長手方向残留応力がパイプの巻き取り、巻き戻し等の複雑な変形過程により弱められたものと解釈できる。これについては今後の研究課題である。

3-4. パイプ直径の予測 SUS304 ステンレスばね鋼板を n 乗べき硬化材としてスプリングバック後のパイプの曲げ半径を予測した。まず、本材の応力-ひずみ関係が $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ であるとする。曲げ応力 σ_x は(1)式のようなのである。

$$\sigma_x = K'\epsilon_x^n = K'(z/r)^n, \quad (1)$$

$$K' = K(4)^{(n+1)/2}$$

結局、最終段ロール直径を r、スプリングバック後のパイプ直径を r'、板厚 t、加工硬化指数 n、また平面ひずみより $E' = E/(1-\nu^2)$ すると次の関係式で示される。

$$\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right) = \left(\frac{6}{2+n}\right) \left(\frac{K'}{E'}\right) \left(\frac{t}{2r}\right)^n \left(\frac{1}{t}\right) \quad (2)$$

これはパイプを巻き取る前の状態に対する式である故、(2)式を Fig.5 に白抜きの四角印で示して実験結果と比較した。図示のように本式は実験結果とほぼ一致した。なお、このパイプを巻き戻して平板にした後にドラムに巻き取り、次にこれを巻き戻してパイプに復元した場合のパイプ直径がどのようになるかを見積る式は現在検討中である。しかし、このような複雑な工程を経ているものの、これの応力-ひずみの概略経路は Fig.8 のようになっているものと考えられる。

4. 結論

薄板ばね材でパイプを成形した後に、これを平板状に戻してコイル状に巻き取る。この巻き取ったコイル状のものを使用現場に運搬してそこでこれを巻き戻すと平板は再びパイプ形状に復元できる。これを溶接すれば電縫管として使用できる。もしもこのようなことが可能になれば本材料は宇宙基地の建設に威力を発揮できるはずである。かかることが可能であるかを実験的に確認した結果、本実験範囲では完全に閉じたパイプ形状は得られなかった。しかし、閉じたパイプを得るためには最終段ロール直径をどのようにすれば良いか、また成形中のスプリングバックを避けるロール設計法および縁波座屈を除去方法等の貴重な知見を得ることができた。本実験結果から今後は実用に供する大径パイプを製造する実験を開始する予定である。最後に本研究を助成された財団法人天田金属加工機械振興財団および実験材料を提供して下さいました新日本製鐵(株)に深く感謝致します。

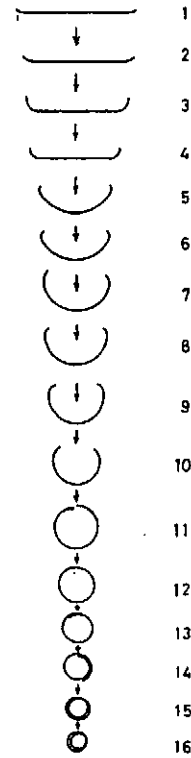


Fig.1 パイプのロール成形工程

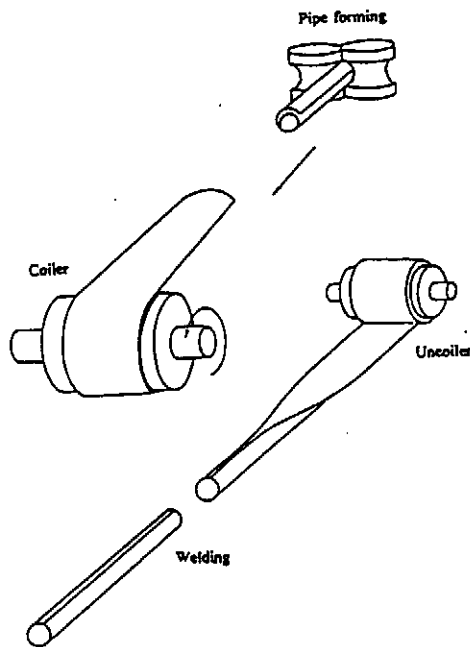


Fig.3 パイプの全成形工程概略図

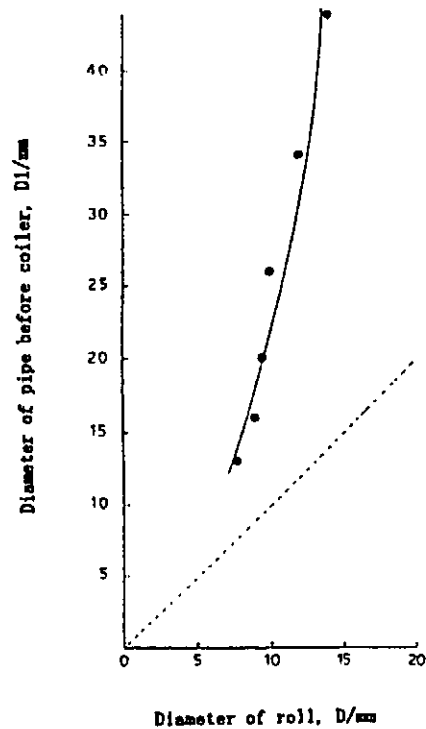


Fig.4 巻き取り前のパイプ直径とロール直径(半製品)

Table 1 ステンレスばね鋼板の機械的性質

降伏応力	引張り強さ	弾性係数	塑性係数	加工硬化指数
12.2 (MPa)	12.9 (MPa)	2245 (MPa)	114.8 (MPa)	0.6

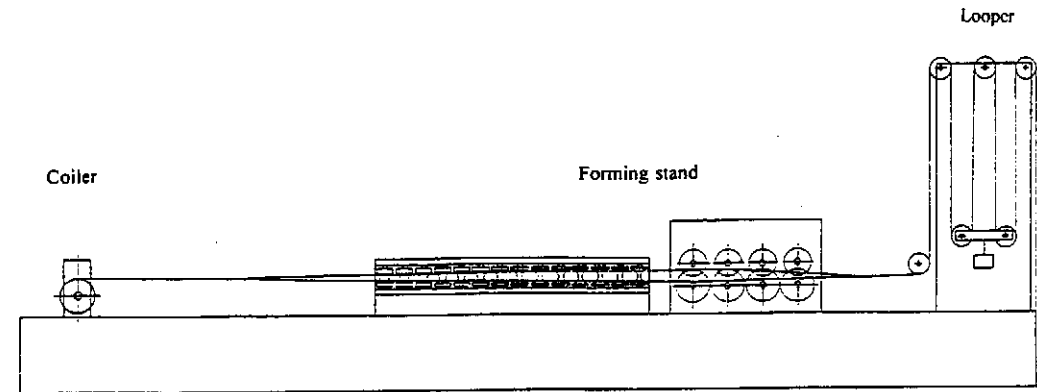


Fig.2 パイプの成形実験装置

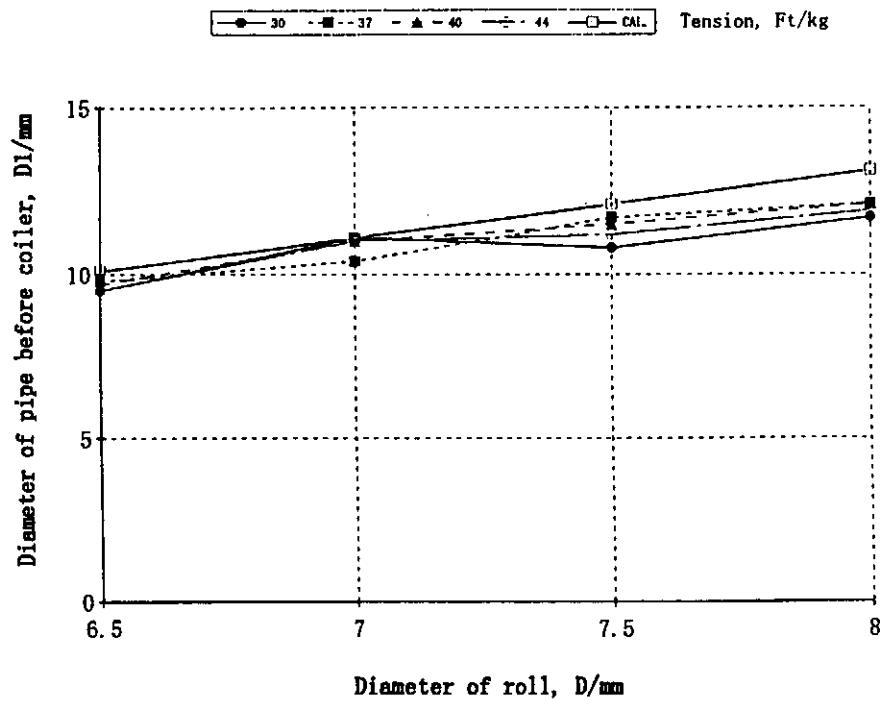


Fig.5 巻き取り前のパイプ直径
とロール直径(完全製品)

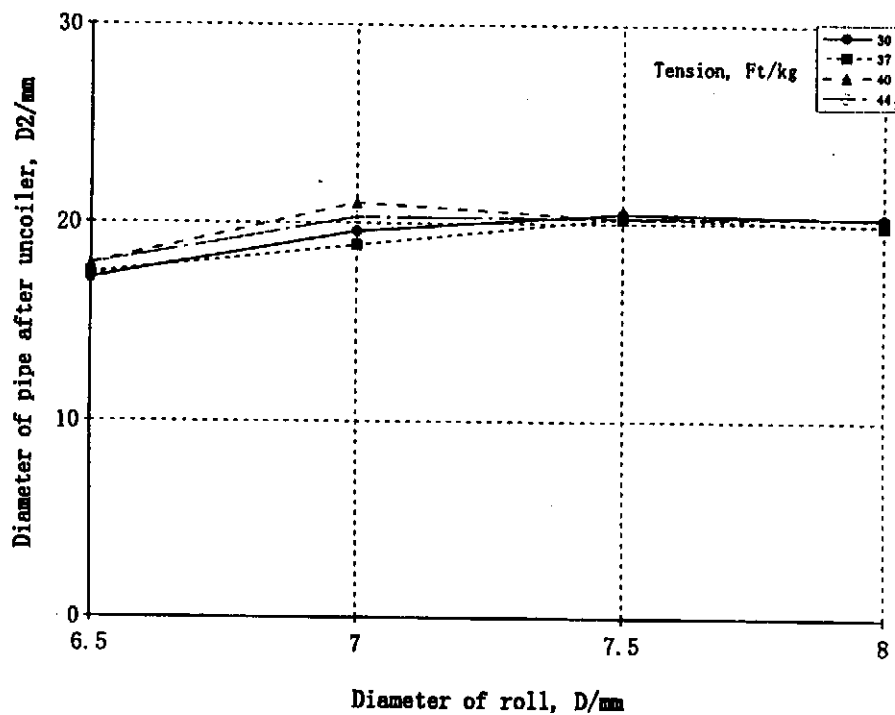


Fig.6

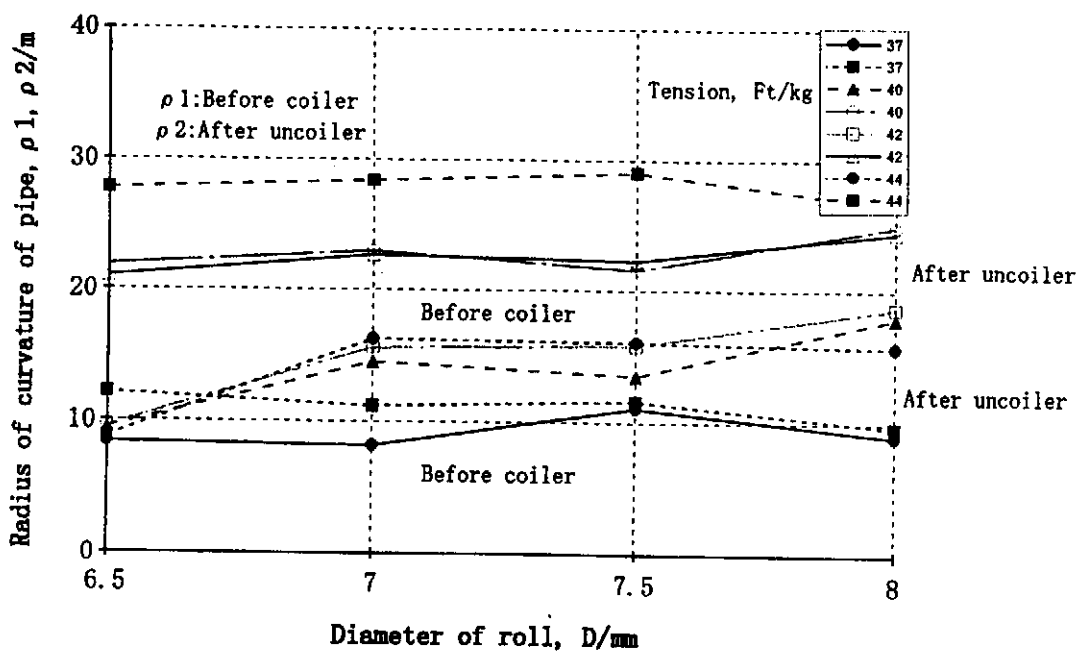


Fig.7

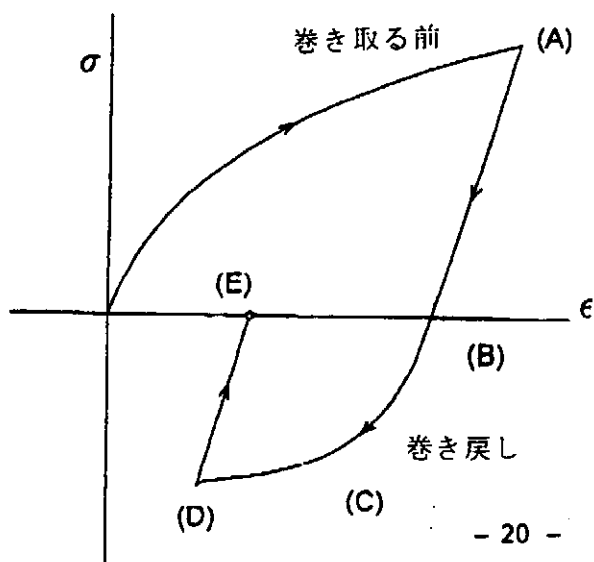


Fig.8

Fig.6 巻き戻し後のパイプ直径とロール直径

Fig.7 巻き取り前、巻き取り後のパイプそり

Fig.8 巻き取り、巻き戻し過程での応力-ひずみ関係