逆張力附加引拔法の研究(第1報)純鐵線について*

五 弓 勇 雄**

Isao Gokyu : Studies on the Wire Drawing with Back Tension (1st Report).
On Pure Iron Wire. Wire drawing with back tension (so-called reactive drawing)

** 東京大學工學部

* 1948 年 4 月本會東京大會に發表.

was carried out on pure iron wire, and it was clarified that this method had the following good characteristics in increasing back tension: (1) The compressive deformation decreases and the tensile deformation increases. (2) The die pressure decreases. (3) The friction loss between die and wire decreases and the efficiency of deformation increases. (4) The temperature rise of wire and die is small, so the self annealing of wire is lessened. (5) The obliteration of die is small. (6) High speed drawing is possible. (7) The power consumption of drawing decreases. (8) The lubrication of die becomes good. (9) The shearing deformation during drawing decreases and both the inside and the skin part of wire deforms uniformly, so the cupping defect hardly occurs. (10) The mechanical properties are uniform about the inside and the skin part of drawn wire. (11) At low reduction the strength of the drawn wire is ordinary, but the twisting property becomes better. (12) The residual stress is small, so the corrosion resistance becomes very good.

(Received September 27, 1952)

I. 緒 言

逆張力附加引拔法については今次戦争中および戦後を通じて各國で研究されすでに實施の段階に達している。従来の研究については著者および他の研究者がすでに本會分科會報告⁽¹⁾に述べている。著者は冶金學的立場から本方法の研究をとりあげ、その結果幾多の長所を新たに見出した。以下の一連の研究において使用した材料は純鐵線、炭素鋼線、磷青銅線およびタングステン線であるが、本報において主として純鐵線について基礎的に實驗した結果について報告する。

II. 實驗方法

實驗裝置としては Olsen の 10 噸引張試験機を用い、Fig. 1 のごとく上部のチャックの位置 D にダイスを置き

Fig. 1 Experimental Apparatus for Drawing with Back Tension.

このダイスを通し線材を下部のチャック C にて握み引拔を行い、線材の他端は滑車 P を通して死荷重 W を加え逆張力をかけた。ダイス壓力は試験機の負荷重で読み、逆張力は死荷重の重さによつた。

試料は 0.06 % C の工業的純鐵線で 750°で 30 分焼鈍せる直径 1.96 mm のものでこれを原線とした。この線材の降伏荷重は 79 kg (降伏點 26.2 kg/mm²)、破斷荷重は 101 kg (抗張力 33.5 kg/mm²) である。逆張力の限界としては

原線が逆張力により、また引拔線が引拔力により塑性變形しては不都合故、逆張力は原線の降伏點 (嚴密には弾性限) 以下で、引拔力が引拔線の降伏點 (嚴密には弾性限) 以下にあるという二條件を満足するよう選ぶべきであ

る。今まで行われていた研究は多く引拔力を基準として逆張力を加えているが、著者は原線の性質に着眼して逆張力としては原線の降伏點を基準にとり、その約 25 % (20 kg), 50 % (40 kg), 75 % (60 kg), 95 % (75 kg) および降伏荷重よりやや高い 82 kg の 5 種を選び、これを逆張力を加えぬ普通法と比較した。使用せるダイスはタンガロイ製 H 型で潤滑劑として乾燥石鹼を用いた。引拔速度は 80 mm/min である。加工度は 1.96 → 1.78 mm φ (加工度 17.5 %), 1.96 → 1.73 mm φ (22.2 %), 1.96 → 1.65 mm φ (29.2 %) の 3 種を選んだ。

III. 力の関係

Fig. 2 The Equilibrium of Forces.

P_d : Die pressure
 P_f : drawing force
 P_r : Back tension
 l_0 : Length of original wire
 l_1 : length of drawn wire.

Fig. 2 The Equilibrium of Forces.

引拔力を P_f , ダイス壓力を P_d , 逆張力を P_r とすると、Fig. 2 を参照して力の平衡關係から次式が成立する。

普通法 $P_f = P_d \dots (1)$

逆張力法 $P_f = P_d + P_r \dots (2)$

故に P_f, P_d, P_r の中二者を測定すれば第三の力は決定される。實驗においては P_d および P_r を測定した。實驗結果を示せば Fig. 3 のごとくである。逆張力法における

引拔力の理論式として一般に認められて多く利用されているのは次の F. Körber と A. Eichinger⁽²⁾の式である。

$$\sigma_f = \frac{P_f}{F_1} = k_{fm} \left[\left(1 + \left\{ \frac{\alpha}{\mu} \right\} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right\} + \frac{4}{3\sqrt{3}\alpha} \right] + \frac{P_r}{F_0} \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \dots (3)$$

ここに σ_f は引拔應力、 F_0, F_1 は引拔前後の線の斷面積、 k_{fm} は平均變形強度、 μ はダイスと材料間の摩擦係數、 α はダイス半角である。同一ダイスで同一加工度で加工した場合は $F_0, F_1, k_{fm}, \alpha, \mu$ は一定と考えてもよいから、(3)

(1) 五号, 日本金屬學會分科會報告, IV-B(1952) 1.

(2) F. Körber u. A. Eichinger, Mitt. Kais. With. Inst. Eisenforsch., 22 (1940). 57.

式は次のごとく表わされる. こゝに $K_1 K_2$ は常数である.

$$P_r = K_1 + K_2 P_r \dots\dots\dots(4)$$

(2) 式をこれに組合せて

$$P_d = K_1 - (1 - K_2) P_r \dots\dots\dots(5)$$

Fig. 3 Effect of Back Tension on Drawing Force and Die Pressure.

くまた加工度が大きくなる程小さくなる. このことは引拔力は加えた逆張力だけ上昇するのではなく, それより著しく小さく, またダイス圧力は逆張力と共に著しく低下する. すなわち逆張力を原線の降伏点の 95% も加えれば何れの場合もダイス圧力は普通法の場合より 80% も減少することがわかる. しかして加工度を大にした方が逆張力の効果は著しく現われる. しかし加工度を大きくすれば引拔力は増加しこれが引拔線の抗張力より大となれば断線をする故加工度には一定の限度がある譯である. 逆張力を増せば引拔力はやはり増加する故この 1 回の加工度の理論的の限度は, 逆張力の増加と共に減少する. しかし實際作業上は, かゝる理論的の限度に近い加工度は断線の危険があるからこれよりずつと低い加工度で作業している. この限界加工度以内では普通の引拔の場合も 1 回の加工度を大にした方が変形効率はいよから兩々相俟つて逆張力引拔にては 1 回の加工度を大きくした方が有利であることがわかる. なお Fig. 3 の横軸には各加工度における従来いわれておる逆張力比 P_r/P_f を附記したが, 今まで發表された實驗はこの比が 50% 附近までのが多かつた故逆張力としては案外小さく, あまり効果が發揮されていなかった譯である.

さてダイス圧力が逆張力の増加と共に急減すればダイス壁と材料との間の潤滑膜は普通法の場合より當然厚く, 潤滑がよく行われると考えられる. この潤滑膜の厚さは定量的には測定し得なかつたが引拔線の残留石鹼の状況により確かに感ぜられる. 潤滑剤が厚くつけば高壓に堪え得るような高級の潤滑剤でなくても支障なく引拔し得る譯である. この潤滑剤の問題は更に第 2 報において言及する. またダ

イス壁と材料との間の摩擦も減少し, 従つてダイスの壽命は著しく大きくなることが期待される. このダイス磨耗の問題は第 4 報において詳述する.

IV. 引拔材料間の應力關係

ダイス孔内にある材料に微小體積を考えるとこの部分に逆張力なき場合はダイス壁壓力 P とこれに基く摩擦力 μP の各水平分力の和に相當する引張應力 σ_t が軸方向に働き, これと直角方向には P と μP の各垂直分力の和に相當する壓縮應力 σ_c が作用する. 塑性變形の最大剪斷應力説によればその材料の變形強度を k_f とせば (この値はその材料の降伏應力 σ_y と等しいと考え得る) 次式が成立した時塑性變形が始まる. すなわち

$$\text{普通法 } \sigma_t + \sigma_c = k_f = \sigma_y \dots\dots\dots(6)$$

若し逆張力 σ_r を加えれば變形は同様條件で起る故

$$\text{逆張力法 } \sigma_t + \sigma_r + \sigma_c = k_f = \sigma_y \dots\dots\dots(7)$$

が成立する. 兩者の場合 σ_y は一定である故, 逆張力を加えれば σ_c は減少し, これに伴いダイス圧力 P および摩擦力 μP は減少する.

引拔材料内の應力分布は測定不可能であるが, ダイス入口および出口の應力は決定出来る. すなわちダイス入口では常に變形應力が原線の降伏應力 σ_{y0} に達した時に變形が始まり, ダイス出口では引拔線の降伏應力 σ_{y1} にて變形するから, (6) 式および (7) 式を考慮することにより, ダイス入口の應力は,

$$\text{普通法 } \sigma_t = 0, \sigma_c = \sigma_{y0} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{逆張力法 } \sigma_f = \sigma_r = P_r/F_0, \sigma_c = \sigma_{y0} \dots\dots\dots(9)$$

ダイス出口の應力は兩方法とも

$$\sigma_t = \sigma_f = P_f/F_1 \sigma_c = \sigma_{y1} - \sigma_f \dots\dots\dots(10)$$

σ_{y0} : Yield stress of original wire

σ_{y1} : Yield stress of drawn wire

σ_f : Drawing stress

σ_r : Back tension stress

Fig. 4 Stress Distribution in Wire During Drawing.

これらの式に II にて測定した F_0, F_1 の値, III で求めた σ_f, σ_r の値および VII で求めた σ_{y0}, σ_{y1} の値をそれぞれ代入して前記 3 種の加工度の場合のダイス内應力の一例を示すと Fig. 4 の如くなる。ダイス内部の應力分布は材料の加工硬化能に従い曲線的に變化する筈であるが、この加工硬化能が不明故近似的に直線的に硬化するとして、ダイス入口および出口の應力を直線で結んだ。この圖で判る如く逆張力が増加するにつれ全體として壓縮應力が小となり、引張應力が優勢に作用し、引張變形に近づいてくる。

V. 仕事量および變形効率

Fig. 2 に示せる如く始めの長さ l_0 の材料が引拔後 l_1 の長さになったとすると、これだけ加工するに要した全引拔仕事 W_t は $W_t = P_r \cdot l_1$ .....(11)

逆張力を加えた場合、逆張力のなした仕事 W_r は

$$W_r = P_r \cdot l_0 \text{ .....(12)}$$

この逆張力仕事は装置によつては回収し得るものであるから眞の引拔に要した仕事 W_a は

$$W_a = W_t - W_r = P_r \cdot l_1 - P_r \cdot l_0 \text{ .....(13)}$$

この眞の引拔仕事は純塑性變形に要した仕事 W_p と、ダイス壁と材料との摩擦に費される外部摩擦仕事 W_{ef} と、ダイス入口および出口で材料の繊維の方向變換に費される内部摩擦仕事 W_{if} および弾性的變形に要する仕事 W_e とから成る。すなわち

$$W_a = W_p + W_{ef} + W_{if} + W_e \text{ .....(14)}$$

しかして純塑性變形仕事は k_{fm} を平均變形強度、 V を變

形する體積とすれば次式で表わされ、これは逆張力の如何にかかわらず同一加工度では一定である。

$$W_p = k_{fm} \cdot V \cdot 2.3 \cdot \log(l_1/l_0) \text{ .....(15)}$$

平均變形強度は普通加工前および加工後の材料の降伏應力の平均値をとる。すなわち

$$k_{fm} = (\sigma_{y0} + \sigma_{y1})/2 \text{ .....(16)}$$

内部摩擦仕事はダイス半角を α とすれば Siebel⁽³⁾ により次式で與えられ降伏點以下の逆張力附加の引拔では一定と見做し得る。

$$W_{if} = k_{fm} \cdot \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \alpha \cdot V \text{ .....(17)}$$

弾性的仕事は λ_0, λ_1 を原線および引拔線の弾性變形量、 E をヤング率とすれば次式で表わされる。

$$W_e = \frac{1}{2} P_r \lambda_0 + \frac{1}{2} P_f \lambda_1 \text{ .....(18)}$$

$$\text{ここに } \lambda_0 = \frac{P_r}{F_0 E} l_0 \quad \lambda_1 = \frac{P_f}{F_1 E} l_1$$

しかしこの値は他の仕事量に比し極く微少で無視し得る程度である。外部摩擦仕事は μ の函數である。しかしこの μ は測定困難故、 W_a, W_p, W_{if} を計算し(14)式より求めるのが普通である。以上の各式に實驗値を代入すれば各仕事量が求められる。すなわち原線 1 m を各加工度にて引拔せる場合の一例を示すと Fig. 5 の如くである。なお同圖には變形効率 η すなわち

$$\eta = W_p / W_a \text{ .....(19)}$$

および眞引拔仕事の減少率、外部摩擦仕事の減少率をも圖示した。これによると各加工度共眞の引拔仕事は逆張力の増加と共に減少し逆張力仕事を回収し得る装置を用うと著しく動力の節約をし得ることを示している。又外部摩擦仕事は逆張力とともに著しく急減し降伏荷重の 70~90 %

の逆張力を加えると外部摩擦仕事は 80~90 % も減少する。この外部摩擦仕事は全部熱に變換するものであるから、この減少はとりもなおさずダイスおよび材料の溫度上昇を少くし、材料の自己燒鈍作用も緩和されるとともに高速引拔が可能となる。このダイスおよび材料の溫度上昇については第 4 報に詳述する。

Fig. 6 Flow Lines in Transverse Section of Wire.

Wt: Total drawing work consumed
Wa: Actual drawing work consumed
Wr: Work consumed by back tension
Wp: Work consumed by plastic deformation
Wef: Work consumed by external friction
Wif: Work consumed by internal friction
 η : Efficiency of deformation
Fig. 5 Work Consumed and Efficiency of Deformation.

(3) E. Siebel, V. D. I., 84(1940), 761.

屬の變形狀態を知り得る。實驗には直徑大なるものを必要

VI. 變形過程

棒材を中心線に沿ひ 2 分し、その分割面に規則正しく縦横の線を描きこれを再び合せて加工後その線の變化を調べると加工による金

としたため軟質の純アルミニウムを用い、半角約 9° の鋼ダイスで潤滑剤として乾燥石鹼を用いて直径 9.56 mm ϕ より 7.97 mm ϕ に加工度 30 % で普通法および逆張力 140 kg を加えて引抜いた。この逆張力の値は原線の降伏荷重の 16 % に相當する。これを圖示したのが Fig. 6 である。比較のため純引張變形の場合も描いてある。純引張變形では縦線は直線のまゝなのに反して普通引拔法ではこれが弧状となり、中心部が外周より著しく前進している。これはダイス壁壓と摩擦力の棒の軸方向の分力が引拔力とは同一線上に作用しないため剪断應力を受け剪断變形をするからで、この作用は外周程著しい。換言すれば棒の中心程自由な變形が行われるが、外周はダイス壁の摩擦に制約される譯である。しかるに逆張力が加わると上記軸方向分力の値は小さくなり、剪断變形は少くほとんど引張および壓縮變形となるとともに IV で述べた如くその壓縮應力も著しく減少し純引張變形に近づいてくる。それ故縦線の弧状も著しく緩和される。外周と中心との進みの差を前進量 h とし (Fig. 6 参照) これを兩方法について比較したがこの場合逆張力は僅かしか加えておらないにもかかわらず明かに逆張力法では前進量は著しく小さく普通法の 3/5 に過ぎなかつた。かく棒の内外一様に近い變形をしてくれれば當然カッピング等の欠陥も起りにくいことが考えられる。但し内部に硬質の非金屬介在物、金屬間化合物があれば別である。かく逆張力法は普通法に比し不均一變形たる剪断變形が小である故残留應力が小なることは當然豫期される。この残留應力の測定法は種々あるが、何れも相當直径の大なる試料でなくては測定困難である。著者はその大小を比較するためとりあえず腐蝕試験を行つた。残留應力が大きければ大きい程腐蝕速度は大きいからである。試料としては上記アルミニウムを同一條件で引拔、これを KOH で腐蝕した。その結果の一例を Table 1 に示す。

Table 1 Corrosion Experiment of Drawn Al Red.

Drawing Method	Condition of Corrosion	1 % KOH, 5.3 hr	2% KOH, 18hr
Ordinary M		0.375 g/cm ²	0.017 g/cm ²
Back Tension M		0.296 g/cm ²	0.010 g/cm ²

(9.56 mm $\phi \rightarrow$ 7.97 mm ϕ , back tension).

す。これによれば逆張力法による引拔材は腐蝕量少く耐蝕性良好であり、残留應力が小さいことも推測し得る。

VII. 引拔材の性質

逆張力法にては普通法とはダイス内材料の應力分布や變形状態に差異が認められる故、その引拔材の性質にも差異を期待し得る。

先づ引拔材の横断面の硬度分布を調べた。すなわち線材を斜に切斷し、その橢圓面上を長軸に沿ひ 1 kg の荷重にてヴィッカース硬度を測定した一例を Fig. 7 に示す。一般に引拔材は VI で述べた如く外周は剪断變形を受けるか

ら内部より加工硬化が著しく硬度は高い。逆張力を増すにつれ剪断變形は少くなる故、外周の硬度は減じ内外の硬度

Fig. 7 Hardness Distribution Across the Drawn Wire Section.

硬化し内外の硬度差が増して來ているが、これはダイス通過前にすでに塑性變形し従つて加工硬化され降伏點も上昇し、見方をかえれば降伏點以下の逆張力を加えて引抜いたこととなり、剪断變形も多く受け、外周が硬化したのではないかと考えている。

なお一、二の文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾は普通法にて外周が内部より軟かく逆張力を加えるに従ひ、外周が硬化し内外一様になる結果を出しているが、これは引拔速度が大なるため温度上昇し、自己焼鈍した結果で、逆張力の増加とともに V で述べた如く、自己焼鈍効果が少くなつたため内外の硬度が一様になつたと考えられる。この場合は著者の場合と直接原因が別であるがともに逆張力の増加とともに線の内外の性質が均一になることは注目すべきことである。

降伏點 $\sigma_{y0.2\%}$ および抗張力の測定はアムスラー 300 kg 引張試験機にて行つた。その結果を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 Effect of Back Tension on Mechanical Properties of Drawn Wires.

著しく揃つてくるためその影響が加わり強度の増加も期待し得る場合もあると考えられる(第 5 報参照)。

(4) L. Simons, Wire & Wire Prod., 13(1938), 260.

(5) 田中, 本誌, 8(1944), 641.

捻回値の結果も Fig. 8 に併示した。これによると逆張力の増加とともに捻回値は増加する。これは内外の性質が均一化したことから期待し得る所である。原線の降伏點以上の逆張力を加えた場合の捻回値が一般に低下するのは断面硬度分布から見て表面が硬化している故當然であらう。これら引拔線の性質から考えても逆張力の大きさの限度は原線の降伏點以下にすべきことは明かである。

VIII. 總 括

純鐵線に對し逆張力附加引拔法を実施した結果、逆張力増加に伴い次の各効果が認められた。すなわち

- (1) 引拔加工中の壓縮變形が少くなり引張變形が多くなる。
- (2) ダイス壓力が減少する。
- (3) ダイスと材料間の摩擦損失が減少し變形効率大となる。
- (4) 材料およびダイスの温度上昇少く材料の自己燒鈍作用が緩和される。

(5) 引拔速度を増すことが可能となり、生産量が增大する。

(6) 逆張力仕事回収可能の裝置を用うれば眞の引拔仕事は減少し動力消費量が少くなる。

(7) 潤滑が良好となる。

(8) 剪斷變形が少くなり内外ほとんど一様に變形され、カップングを起しにくい。

(9) 表面部の殘留壓力が減少し、これに伴い耐蝕性良好となる。

(10) 機械的性質が線の内外均一となる。

(11) 低加工度では抗張力、降伏點はほとんど變化しないが、捻回値は上昇する。

(12) 力の關係および引拔材の性質から も 逆張力は原線の降伏荷重以下にすべきである。

終りに臨み本研究遂行の端緒を作られるとともに試料その他に便宜を計られた東芝柳町工場奥村保吉氏に深謝するとともに實驗に協力された永松敬三、根本忠行兩君に謝意を表する。