

冷間引拔せる鋼管中の残留応力 (I)*

今 井 宏**

RESIDUAL STRESS IN COLD-DRAWN STEEL TUBING (I)

Hiroshi Imai

Synopsis:

As a first step to study on residual stress in cold-drawn steel tubing, the author performed a preliminary test for determining the residual stress in tube-shaped test specimens. In selecting the various methods of measurement of residual stress, the author decided to adopt Sachs and Espey's splitting method, and investigated fully on this method, then obtained the following results.

(1) For determination of the diameter change, Sachs and Espey used an optical comparator and measured the length between the gauge points plotted on the outer surface both sides of the split line before and after splitting. But if, by splitting, there should take place the elastic deformation at the outer surface of the opposite arc, then the diameter change measured by this method resulted in the inclusion of this error. Therefore except for tubings with small diameter or thin wall thickness, this method was inferior, in regard to accuracy, to that which had been calculated from the mean outside diameter measured with a micrometer.

(2) But, when the author measured the diameter with a micrometer, if the wall thickness of the specimen tube be thin, the specimen was deflected by measuring pressure and this deflection resulted in an error in measurement. Then the author obtained the relationships between the specimen dimensions and the deflection amount by calculations. (Fig. 3)

(3) As the result of the above fact, the author revealed that the measurement with a micrometer within the size ranges of ordinary steel tubing was superior, in accuracy, to that with an optical comparator and he decided to perform the measurements with a micrometer thereafter.

(4) In order to determine the specimen length, the author measured the residual stress in the specimens of various lengths and revealed that the length should be 2 to 2.5 times the outside diameter. (Fig. 4)

(5) The author further obtained by accurate method the distribution diagrams of residual circumferential stress (Fig. 8 & 9) in plug-drawn and sunk steel tubing which had been drawn with two dies of different contour. (As to contours of the die and plug, see Fig. 5 (a) & (b)). As compared with those obtained by approximation method, it was made known that a general tendency was to be revealed through measurement values obtained by approximation method as far as sunk steel tubing and those which plug-drawn with (b) type die were concerned.

I. 緒 言

引拔管中の残留応力の研究は今日迄にその数も少ないが¹⁾²⁾, その多くは空引き管の研究で, 玉引き管の応力分布は作井氏の報告³⁾ 以外には知られていない. しかもその空引き管の研究も引拔条件との関係につき研究したものは極めて少い⁴⁾ のが現状である.

斯る事情に鑑み, 著者は種々なる加工条件で, 鋼管を空引き, 玉引きして, その残留応力分布を求め, 加工条件と残留応力との関係を明らかにする事を試みた. 研究を展開する前に応力分布の測定法の検討を行つたので,

第1報においてはまずその予備実験の結果を報告する.

II. 応力分布測定法

管の残留応力分布の測定法には数種の方法があるが, この内 1927 年 Sachs の発表した所謂 Boring method⁵⁾ が三主応力を同時に知り得るので, 最良の方法とされてきて, 殊に近年線歪計の普及と共に, 可成り広く行われる様になつてはいるが⁶⁾, 加工および測定に高い精度が要求されるので, 工場内で行うには, なお種々の困

* 昭和 29 年 4 月講演大会にて講演

** 日本特殊鋼管株式会社 工

難が予想される。

これに反し、試料を立ち割り、或いは切り出しを行う方法は、各方向の応力を各々独立と仮定するので、精度はおちるが、測定が上記のものより容易であるので、著者はこの方法を採用した。この方法に近似法と精密法の2種があるが、次にその大略を説明する。

(1) 近似法

薄肉管で内外面近くに方向反対の極大応力が存在している場合にはこの方法は極めて便利な方法である。円周方向応力を測定する場合は Fig. 1 (a) の如く軸に平行な一線で立ち割り、その前後の径変化 ΔD より次式により管の外表面より x なる位置の円周方向残留応力 S_c を求める。

$$S_c = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{\Delta D}{D_m^2} \cdot (d-2x) \dots\dots\dots (1)$$

但し E : ヤング率, ν : ポアソン比
 D_m : 立ち割り前後の平均直径, (但し中立層の径) d : 管の肉厚

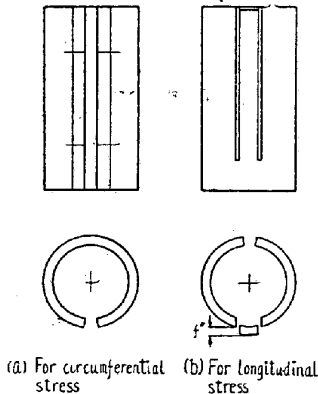


Fig. 1. Diagrammatic representation of the splitting method of residual stress determination.

ここで ΔD は立ち割りにより径を増大するものを正とする。従つて (1) 式 S_c は外表面で張力の場合正となる。

管軸方向残留応力 S_L は Fig. 1 (b) の如く舌片を切り出し、その撓み f'' を測定し (2) 式により求める。

$$S_L = E(d-2x) \cdot \frac{f''}{L^2} \dots\dots\dots (2)$$

L : 舌片長さ

これ等は何れも応力が管肉中を一次的に分布すると仮定しているので、分布の形状がこれと甚しく偏倚する時は本法を以て残留応力を論ずる事はできない。

(2) 精密法

上の近似法の欠点を補うために考え出されたものが精密法である。この方法で円周方向応力分布を求めるには引抜き管より、適当な長さの試片を約 20 本切り出し、その各々の内面または外面を切削または腐蝕し、その除去層が表面から肉厚の中央附近迄適当な厚さ間隔に配分される様にし、次にこれ等の試料を近似法同様に立割りその際の径変化を測定し、次の (3) 式により管表面より x なる位置における応力を計算するものである。

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \dots\dots\dots (3)$$

$$S_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (d-2x) \cdot \frac{\Delta D_1}{D_m^2}$$

$$S_2 = -\frac{1}{d-x} \int_0^x (S' - S_1) dx$$

$$S_3 = \frac{E}{1-\nu^2} (d-x) \frac{\Delta D}{D_m^2}$$

$$S_4 = -\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{(d-x)^2}{3D_m^2} \cdot \frac{dD}{dx}$$

但しここで E : ヤング率, ν : ポアソン比
 d : 管の肉厚, ΔD_1 : 原肉厚の管の立割り前後の径変化, ΔD : 内外面除去せる管の立割りによる径変化を $\Delta D'$ とする時次式で定義される量
 $\Delta D = \Delta D' - \Delta D_1$
 D_m : 各試片の立割り前後の平均直径(但し中立層の径)

(3) 式 S_1 は近似法で得られる分布で、 S_2, S_3, S_4 はこの補正項となるものである。また4成分応力中 S_2 は右辺に未知量 S を含む故、計算できないが、

$$S - S_1 = S_2 + S_3 + S_4$$

かつ S_2 は S_3, S_4 に比し小さいので、これを無視すれば (4) 式より S_2 は近似的に求め得るものである。

$$\int_0^x (S - S_1) dx = \int_0^x (S_3 + S_4) dx \dots\dots\dots (4)$$

管軸方向の応力分布も、円周方向応力の場合同様の方法で応力分布を決定できるが、通常現場に流れる引抜き管では舌片切出しの位置により測定値に可成りの変動があり、かつ鋼管の使用条件からも円周方向残留応力の方が重要と考えられるので、本研究では円周方向残留応力を主として取扱う事とし、近似法、精密法両者を必要に応じて使いわけた。

III. 測定法の検討

次に測定に当り直面する 2, 3 の問題につき検討をしたがこの予備実験に使用した試料の履歴を述べ、次に検討結果を記述する。

(1) 供試試料

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of the specimen.

Chemical composition					Mechanical properties				
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Tensile strength kg/mm ²	Elong- ation %	Elastic limit kg/mm ²	Young's modulus	
								Static method	Dynamic method
0.11	0.02	0.41	0.019	0.022	46.5	25.9	32.0	2.09 × 10 ⁴	2.10 × 10 ⁴

予備試験に使用した鋼管は化学成分 Table 1 に示すもので、冷間仕上り継目無鋼管 50.8φ × 6.35 を焼準後円弧型ダイスで空引き 47.3φ × 6.35 としたもので、その間の加工度は外径減少率 6.9% 断面減少率 7.9% であり、この試料の加工状態のままの機械的性質は Table 1 に示す通りである。ヤング率は静的な撓み測定法と振動法の両方で測定した結果を夫々あげた。

(2) 径変化測定法

この立割り法で応力分布を求めるのに、測定が最も困難で最終の応力測定値の精度を決定するものは、試片の立割り前後の径変化である。この測定法として考えられるものに下記の2つがある。

(i) マイクロメーターによる方法

最も普通の方法で、立割り前後に試片の外径を数ヶ所においてマイクロメーターにて測定し、その平均外径の差より径変化を求める。

(ii) コンパレーターによる方法

試片表面に立割るべき一線をはさんで、Fig. 1 (a) に示す標点を記し、この間隔を立割り前後にコンパレーターにより測定し、これから径変化を測定する方法である。マイクロメーターは通常、精度 1/100 程度しかなく更に測定時に試片を両側より圧するから、この圧力による撓みがあり、薄肉の管においては、この撓みは相当大きくなる。このため Sachs, Espey はコンパレーターによる方法をとつた。併しこのコンパレーター法にも欠陥がある。この方法では測定する円弧の反対側、即ち切断部を含まぬ弧の長さ(外表面)は立割り前後で不変

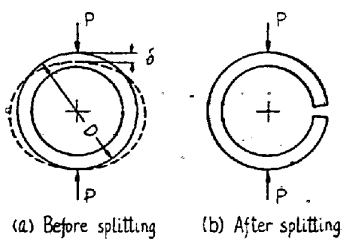


Fig. 2. The deflection of the specimen by measuring diameter with micrometer.

と仮定しているが、実際には立割りで弾性変形が生ずるので外表面の円周方向残留応力を $S_{c \max}$ とすれば、大略 $S_{c \max}/E \times D_0$ の伸縮があり、 $S_{c \max} = 40 \text{ kg/mm}^2$ 、 $D_0 = 50 \text{ mm}$ ではこの誤差は 0.1 mm 程度に達する。従つ

て試片が小径薄肉でマイクロメーターの測圧で大きな撓みを生ずるもの以外はこの方法は行われぬがよいと考えられる。従つて著者は最小目盛 2/1000 mm、測定圧力 0.43 kg、測定精度高く、測圧小なる特殊マイクロメーターによる測定を計画、その場合の試片の撓みを計算で求めて見た。

マイクロメーターで管径を測定する場合の力学的関係は Fig. 2 に示す如くで、この場合の試片の撓み δ は次式で与えられる。

(a) 立割り前

$$\delta = \frac{\pi D^3}{8 EI} \times P \left(\frac{1}{4} - \frac{2}{\pi^2} \right) \dots \dots \dots (5)$$

(b) 立割り後

$$\delta' = \frac{\pi D^3}{16 EI} \times P \dots \dots \dots (5)'$$

但し I は弾性二次モーメント

また (5), (5)' より $\delta = 0.048 \delta'$

従つて、測定誤差の検討には誤差の大きい、立割り後の撓み δ' のみを問題にし、この値が充分小さければ測定精度は充分と考えてよい。

試片の長さ $h = nD$ 。肉厚を d とすれば、

$$I = hd^2/12 = nDd^3/12 \dots \dots \dots (6)$$

(6) を (5)' に代入し次の関係が得られる。

$$\delta' = \frac{3\pi}{8nED} \left(\frac{D}{d} \right)^3 \times P \dots \dots \dots (7)$$

今回の実験に使用するマイクロメーターでは $P = 0.43 \text{ kg}$ 、試料のヤング率は Table 1 に示す如く $E = 2.09 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、従つて $n = 2$ の場合につき (7) 式より d/D 、と D の関係を計算すると、Fig. 3 を得る。図に見る様に δ は d/D が小になり、或いは D が小となるにつれて大となる。

この図を使えば、試片の形状により変化するマイクロメーター測定値の精度を知り得るもので、以後試験計画の前にこの検討を行いマイクロメーターを使用する事とした。本研究において使用した試料は外径 50 mm 肉厚 5 mm 程度であるから内外面を切削し肉厚を 2.5 mm にした場合でも δ は $4 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 程度で充分小さい。

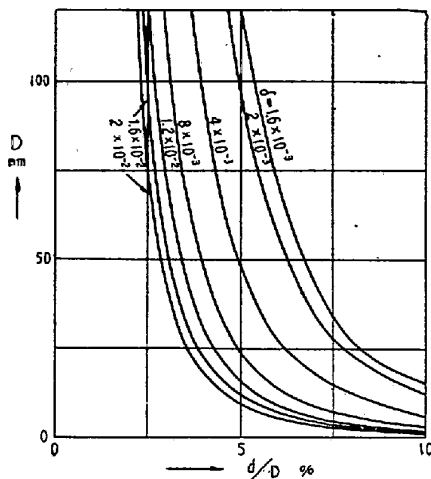


Fig. 3. Effect of the dimensions of specimen on its deflection, which is produced by measuring pressure of micrometer. ($p=0.43 \text{ kg}$)

(3) 試片長さの検討

試片の径および肉厚の条件による測定精度は上により明らかとなつたので、次に試片の長さを検討した。測定を行うには便宜上適當長さの試片に切断せねばならない。併しこの場合端面では長さ方向応力は除去され0となる筈であるから、試片長さが短いと、この端面の影響で応力測定値は小に出る。Sachs, Espey⁷⁾はこの点を実験的に確かめ径の2~3倍を要する事を明らかにしたがこれと若干相違した説⁸⁾もあるので、種々の長さの試片を作り応力を測定して、この点を更に調査した。

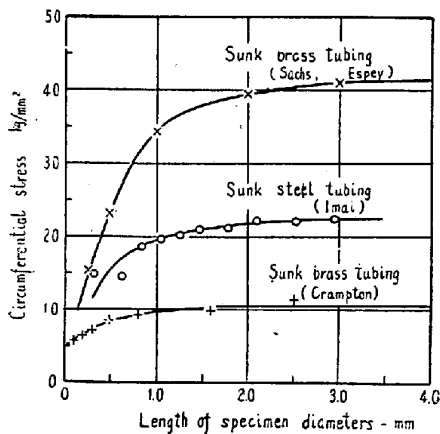


Fig. 4. Effect of length of specimens on residual stress.

結果は Fig. 4 に示す如くで、縦軸は近似法により測定した外表面の円周方向応力の値である。図中 Sachs, Espey 或いは Crampton とあるのは空引き黄銅管でそれ等の人々が実験した結果で、いずれの場合も試片長さは径の2倍以上を要する事がみえている。従つて著者は以後の実験は外径の2~2.5倍の長さの試片で行う事

とした。

IV. 精密法による空引き及び玉引き鋼管の残留応力分布の測定

前述の如く、立割り法の中にも近似法と精密法とがあり、精密法では、管肉中の応力の分布状態透明らかとなるが、この方法もなお、かなり煩雑な方法で、種々引抜き条件を変えた多数の試料につき残留応力を比較する様な場合には必ずしも適當な方法でない。これに反し近似法は極めて簡単で加工条件等の比較の手段としては便利である。併し近似法では残留応力が管肉中一次的に分布すると仮定しているので、内外面で応力の符号が逆でかつ表面近くに極大値を有する様な応力分布以外の場合、たとえば、内外面近くの応力が同方向の応力で、中央部に逆な応力が存在する様な場合、或いは両面で方向が逆でも片面で flat に分布し、他面の分布が sharp な場合には近似法は使用できない。

従つて著者は鋼管の冷間引抜きに使用される工具型式の主なるものにつき標準的な加工条件で、空引き、玉引きを行い、その場合の応力分布を精密法で求め、工具型式および引抜き法の内、近似法で残留応力値を推定できるものと然らざるものとをまず判別する事とした。

引抜き索管としてはキルド鋼第一種 ($C=0.14, Si=0.14, Mn=0.53, P=0.07, S=0.029, Cu=0.17$) の冷間仕上り継目無鋼管、外径 43.0ϕ 肉厚 4.2 mm を使用し、これを Fig. 5 に形状および寸法を示した2種の型式の

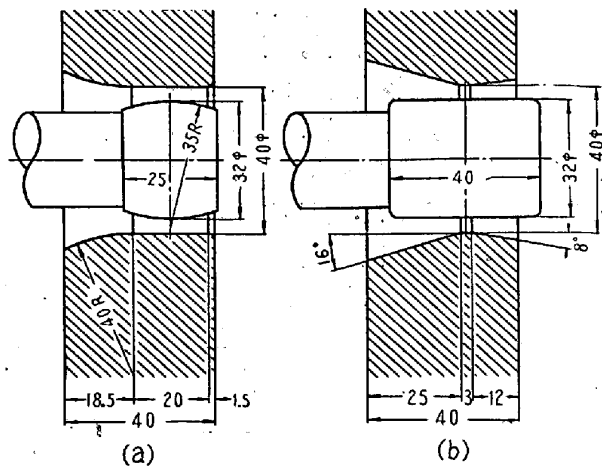


Fig. 5. Contour of die and plug.

ダイスおよびプラグで空引きおよび玉引きし（空引きの場合はダイスのみ使用）仕上り管の残留応力を調査した。各々の場合の近似法による応力測定値を表に示したものが Table 2 である。Table 2 においても判る様に空引きにおいては極めて大きな応力が残るが玉引きの

場合残留応力は比較的小で、かつ円弧ダイス、楕円プラグを使用すると外表面 Compression の残留応力が残る事が注目される。

Table 2. Residual stresses of various cold drawn steel tubings, measuring by approximation method.

	Type of Die and plug	
	a—Type	b—Type
Sinking	35*6 kg/mm ²	40*8 kg/mm ²
Plug-drawing	-12*7 kg/mm ²	15*6 kg/mm ²

面では近似法の値よりかなり低くなっている。これ等の相異はあるが、空引きの場合にはダイスの形状に関係なく近似法により得た応力分布は精密法より得た分布の第一近似としての目的を達していると考えられる。

次に Fig. 9 は玉引鋼管中の応力分布で、同様 (a) が円弧ダイス、楕円プラグによるもの。(b) が円錐ダイス円筒プラグによるものである。円弧ダイスの場合、外表面で圧縮力、内面で張力となつているばかりでなく、応力0の点が、肉厚中央より可成り偏倚している。本図においては近似法の近似度も左程悪くはないが、かかる偏

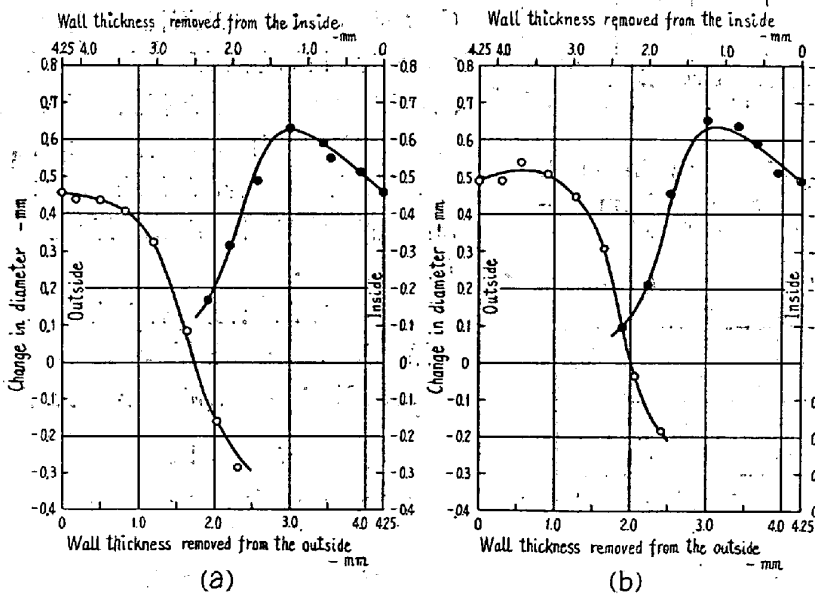


Fig. 6. Diameter change observed on specimens of splitting sunk steel tubing, removed by various amounts from the outside and inside.

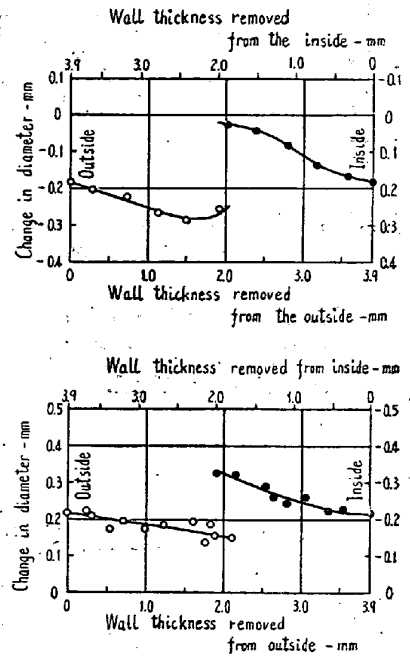


Fig. 7. Diameter change observed with specimens of splitting plug-drawn steel tubing, removed by various amounts from the outside and inside.

次に精密法により管肉中の応力分布を求めたが、その内外面よりの除去層の厚さおよびその試料を立割る時生じた径変化を図に示すと Fig. 6 および7で、夫々空引きおよび玉引きの場合を示す。内外表面よりの管肉の除去は旋盤により切削で行つた(切削速度 16m/min)。図に見る通り、実験値はよくその傾向性を示している。これ等の結果を (3) 式に適用し各試料の残留応力分布を決定したものが、Fig. 8 および9である。

Fig. 8 は空引き鋼管中の残留応力分布で、(a)が円弧ダイス (b) が円錐ダイスの場合である。図中点線で示したのが、近似法で求めたものである。いずれの場合も外面張力、内面圧縮力で中央附近で応力0となつているが、極大点はかなり中央近くに存在しており、内側の表

倚があるのでリダクションその他の相違によつては近似度が相当低下する場合もあり得ると考えられる。これに反し (b) 円錐ダイス円筒プラグにおいては応力分布は近似法より求めた直線とよく重なり精密法を行う必要は殆んどない事が示されている。

従つて円弧型ダイス、楕円プラグの玉引きの場合にはなお検討を要するが、円弧型および円錐型ダイスの空引き或いは円錐型ダイス、円筒プラグの玉引きの場合には残留応力の比較は近似法により概略を知り得ると考えられる。

V. 総 括

引抜き鋼管中の残留応力研究の第一歩として、管状試

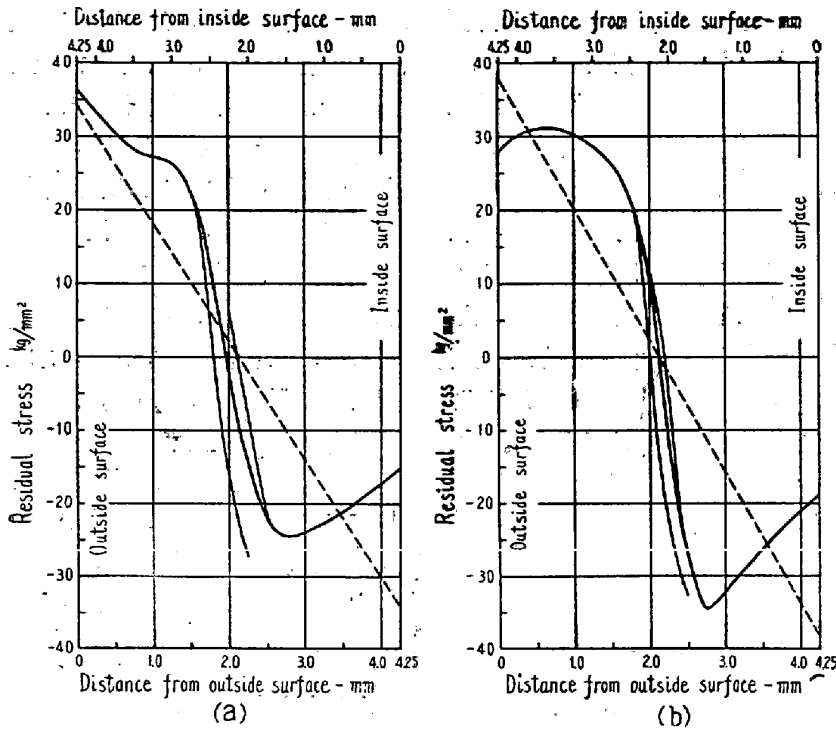


Fig. 8. Distribution of circumferential stress in sunk steel tubing. Dotted line indicates stress from approximation method.

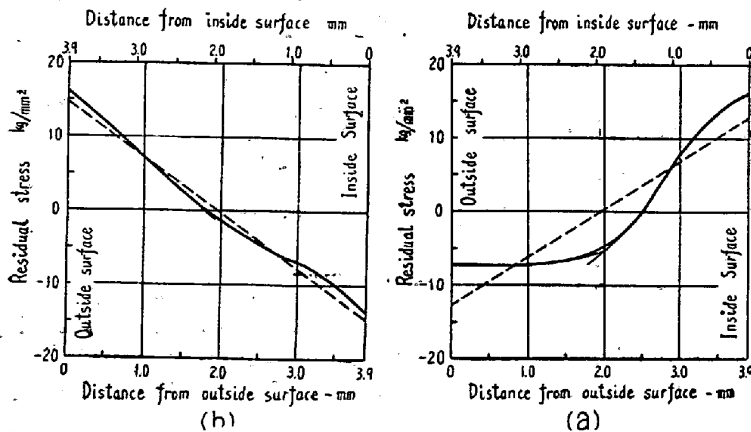


Fig. 9. Distribution of circumferential stress in plug-drawn tubing. Dotted line indicates stress from approximation method.

片の残留応力測定法の予備試験を行つた。

測定方法としては Sachs, Espey の所謂“立割り法”の近似法および精密法を採用する事としたので、本法で測定を実施する際直面する2, 3の問題につき検討を加え下の如き結果を得た。

(1) Sachs, Espey は立割り線の両側外表面に記した標点間の距離を、立割り前後にコンパレーターで測定し径変化を求めているが、この方法は切断部を含みぬ弧の弾性変形が誤差として入るので小径薄肉の場合以外はマイクロメーターにより平均外径から求めるものより精度が劣る。

(2) マイクロメーターによる径測定は試片の肉厚が薄いと測定圧力で撓みを生じ、これが測定誤差となり得る。従つて計算により試片寸法とこの撓み量の関係を求めた。(Fig. 3)

(3) この結果通常の鋼管の寸法範囲ではマイクロメーターの方が精度がよい事が明らかとなつたので今後の測定はマイクロメーターによる事とした。

(4) 試片長さを決定するために、種々の長さの試片で測定を行い、外径の2~2.5倍の長さを要する事が明らかとなつた。(Fig. 4)

(5) ダイスの円弧型、円錐型2種(Fig. 5 (a), (b))で玉引き、空引きを行つた鋼管の円周方向残留応力分布を精密法で求め(Fig. 8, 9)近似法で得たものとを比較し、空引きの場合、および円錐ダイス玉引きの場合は近似法により求めた測定値で大略の傾向は知り得る事が明らかとなつた。

次にこの方法で作業条件と残留応力の関係を求めたがその結果については次報にこれを述べる。(昭和30年6月寄稿)。

文 献

- 1) Residual Stress Measurements 1952 A.S.M.
- 2) G. Sachs: Iron Age 148(1941) 12 p. 31~71
- 3) 作井誠太: 科研報告27 (1951) 4 p. 300
- 4) G. Sachs & G. Espey: Metals Technology, A. I. M. E. Tech. Publ. No. 1386, Oct 1941

- 5) G. Sachs: Z. f. Metallkunde 19 (1927) p. 352
- 6) H. Buhler & W. Schreiber: Z.V.D.I. 94 (1952) 35, p. 1147
- 7) G. Sachs & G. Espey: Metals Technology A.I.M.E. Tech. Publ. No. 1384 Oct. (1941)