

鋼 管 の 残 留 応 力 の 測 定

今 井 宏・中 村 康 治・久 保 慶 三 郎

1. ま え が き

鋼管の残留応力といえば、読者は黄銅管の時期割れを連想し、鋼管にも同様の現象があり、そのための研究かと考えられるかもしれない。事実、18-8 不銹鋼鋼管は或る種の条件では、使用中に粒界腐蝕を起し、残留応力割れが生じる。従つて 18-8 の場合は確かに問題になるのであるが、著者の一人が工場において残留応力の研究を始めた動機はこれとは別で、より一般的に、熱間仕上り普通鋼管の最低仕上り温度の決定のためと、冷間引抜きの基礎研究の一部として、この問題に着手したのである。

前者の熱間工程の問題は、明かに残留応力のない鋼管の製造を目標としたもので、後者の場合は基礎研究であるから各種の加工条件における残留応力の観測を行うことが一応の目的であるが、これとても究極は均整な加工すなわち残留応力の発生しない加工を目標とするので、広い意味ではやはり残留応力のない鋼管の製造を目的としたといえる。近年の残留応力の研究は、オート・フラタージ或はショット・ピーニング等、むしろ残留応力を利用せんとする方向に進んでいるようであるが、これらとは方向を逆にし、旧来のままの態度で問題を取り扱つたものといえよう。

設備も充分でない工場内での研究であるが、引抜き鋼管の残留応力の研究は今迄余り行われておらず、殊に芯金引きの残留応力分布は内外の文献に未だ報告を見ないので、これが応力分布を明かにすることは充分意味のあることと考え、正確な曲線を得るために努力した。こゝに報告するのはその努力の一端である。

2. 残留応力の測定法

残留応力の測定は、これまで多くの人により種々の方法が提案されているが、原理的に大別して、X 線的方法と機械的方法の二つに分けられる。

X 線的方法は X 線により試料の原子面間距離を測定し、これを応力のない場合と比較し、そこに残留する応力量を知るもので、材料を傷つけることなく測定を行うことができ、場合によっては格子歪よりミクロ的な内部応力も測定できるが、また下記の如き欠点がある。

- a) 材料の表面、極めて薄い層の応力しか測定できない。
- b) 廻折リングの鮮鋭度が要求されるため、材料組成

に制限があり、また加工度が大となると測定精度が著しく低下する。

- c) 応力のない場合の値を知らねばならないが、工場の実際の生産に流れているような材料では各試料間また試料内部において組成にかなりの変動があるので測定は非常に複雑となりほとんど不可能である。

一方、機械的方法は材料を適当な位置で切断、或はある部分を除去し、その時生ずる歪より応力を計算するもので、従つてマクロ的な内部応力しか測定できないが、種々の形状の材料の種々の条件に適する多くの方法が考案され、広く行われている。鋼管等の薄肉中空管で応力分布を求めるには 1927 年、Sachs が発表したいわゆる Boring method (孔ぐり法) が三主応力を同時に知り得るので最良の方法とされていたが、更に近年、Strain wire gauge の普及にともない。その測定精度も向上し、一層広く行われるようになっていゝ。しかしなお高度の測定技術が要求されるので、工場内でこれを行うには種々の困難がある。

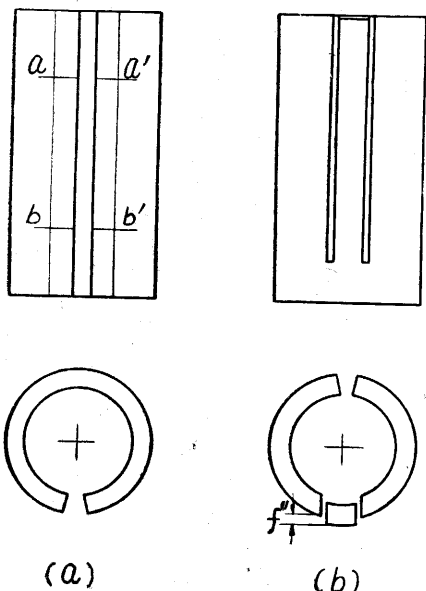
薄肉中空管の応力分布を決定するもう一つの方法は、同じく Sachs 及び Espey が 1941 年発表した Slitting method (切欠法) で、この方法では、円周方向応力、長さ方向応力を三主応力のおの独立と仮定して、近似的に測定するもので、精度は前者より劣ると考えられるが、比較的容易に応力分布を求め得るものである。

従つて工場における測定は切欠法に依ることとし、その仮定に伴う誤差を検定するために、同一の鋼管を孔ぐり法及び切欠法で応力分布を求め、二つの結果を比較して見ることにし、孔ぐり法の測定を生産技術研究所で行うこととした。諸種の都合により未だ充分の結果を得ていないが、以下に両法の概略と、それぞれ測定に際し問題となる点の検討の結果を紹介する。

3. 切欠法による残留応力分布の測定

3-1) 測定法の概略

前述の如く Sachs, Espey の切欠法は三主応力、おのおの独立として近似的に円周方向及び長さ方向応力もそれぞれ求めるものであるが、円周方向応力の分布を求めるには、分布を求めんとする管より約 20 本の試片を切断し、そのおのおのの内面または外面を切削し、除去層が表面より肉厚中央部迄、適当な間隔で配置されるように除去し、次にこれ等の試片を第 1 図(a)に見る如く管軸



第1図 残留応力測定試片の切断方法

に平行な一線で立割り，その立割り前後の径変化を測定し， d なる肉厚の管の x の位置における応力を下式より計算で求めるものである。

$$\begin{aligned}
 S &= S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \\
 S_1 &= \frac{E}{1-\nu^2} (d-2x) \frac{4D_1}{D_m^2} \\
 S_2 &= -\frac{1}{d-x} \int_0^x (S-S_1) dx = -\frac{1}{d-x} \int_0^x (S_3+S_4) dx \\
 S_3 &= \frac{E}{1-\nu_2} (d-x) \frac{4D}{D_m^2} \\
 S_4 &= -\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{(d-x)^2}{3D_m^2} \times \frac{dD}{dx}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで， E ；ヤング率， ν ；ポアソン比。

$4D_1$ ；原肉厚の管の立割り前後の径変化

$4D$ ；内外面を除去せる管の立割りによる径変化を Δ とするとき次式で定義される量

$$\Delta D = \Delta D' - \Delta D_1$$

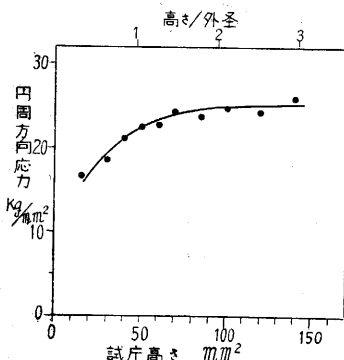
D_m ；試片の立割り前後の平均直径

長さ方向応力の分布を求めるには，これ等の試片に更に第1図 (b) の如き合片を切り出し，その撓み量を測定し，これから (1) 式と同様な式で計算により求めるものである。

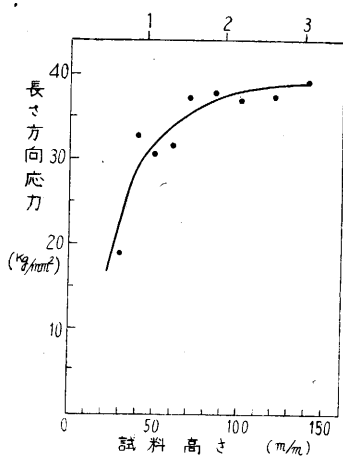
3.2) 試片長さの影響

残留応力を測定するには，一定長さの試片を切り出さねばならないが，この時試片両端では長さ方向残留応力が除去され，これに伴い円周方向，半径方向応力も違ってくる。従って測定試片はこの両端の影響が無視できるのに十分な長さを必要とするものである。この点は後の孔ぐり法においても同様で Sachs は直径の2~3倍を要

するといっている。切欠法の実験をはじめる前にこの点を更めて確かめて見た。試料は $48.0 \phi \times 5.0$ の鋼管を使用



第2図 円周方向応力測定における試片高さの影響



第3図 長さ方向応力測定における試片高さの影響

し $15\text{mm} \sim 140\text{mm}$ の種々の長さの試片につき切欠法で応力を測定した。その結果が第2図及び第3図である。図に見る如く試片長さが直径の倍以上になればほぼ一定の応力値を示す。従って以後の実験は直径の2倍の長さで行うこととした。

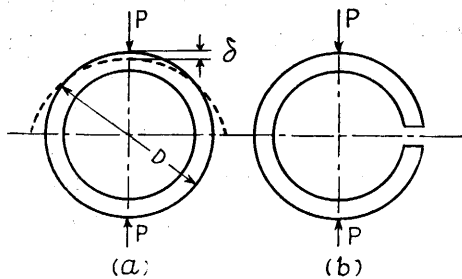
3.3) 径変化の測定法

切欠法での円周方向残留応力の測定においては径変化測定の精度が最終測定値の精度を決定する。Sachs 及び Espey は試料外面に第1図 (a) に a, a' ; b, b' で示した標点を記し，この間の距離

を立ち割り前後にコンパレーターで測定，その距離を円弧に直した長さの差を円周方向長さの変化量とした。この方法では a, a' の立ち割り部分を含み反対側の円弧長さは立ち割り前後において不変と仮定しているが，実際には管は弾性変形をおこすのでこの長さも当然異なる。従って径の極く小さい場合以外には精度が甚しくおちる。

これに対しマイクロ・メーターは直接に直径を測定するので上の如き問題はない。しかも測定する際に材料に圧力を加えるので，薄肉の管の場合は使用できないが，われわれが実験に使用するような鋼管では充分使用できると考えられる。従って最小目盛 $2/1000$ 耗の特殊マイクロ・メーターでの径測定を計画し測定圧力による管の撓みを計算して見た。

問題は第4図に図示した如く，マイクロ・メーターの圧力 P による管の撓み δ を計算することである。計算によると立ち割り前 (a) の撓みは立ち割り後 (b) の撓みの $1/20$ 程度であるので，立ち割り後の場合を検討す



第4図 マイクロメータ測定による試片の撓み

る。この場合材料力学の示す所によれば δ は下式で与えられる。

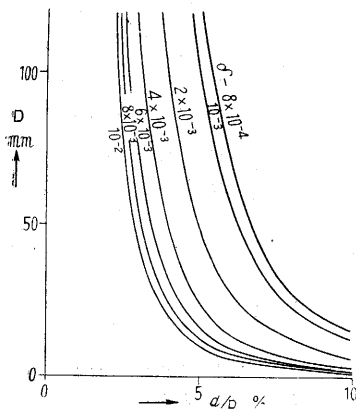
$$\delta = \frac{\pi D^3}{32EI} \cdot P \quad (2)$$

但し I は弾性二次モーメントで試片長さを h 、肉厚を d とすれば、 $I = hd^3/12$ (3)

われわれの実験では $h = 2D$ としたので

$$I = 2Da^3/12 \quad (4)$$

$$(2) \text{ 及び } (4) \text{ 式より } \delta = \frac{3\pi}{16ED} \left(\frac{D}{d} \right)^3 \cdot P \quad (5)$$



第5図

マイクロメータによる直径の測定における試片寸法と試片撓みの関係が小となると δ は (マイクロメータ測定圧力=0.43kg) 大となる。しかしわれわれの実験の試料 $D=40\sim50\text{mm}$ では $d/D=5\%$ 程度で $\delta=2\times10^{-3}\text{mm}$ 程度であるので、このマイクロメータで充分精度をもった測定を行い得ることがわかった。

3.4) 測定結果の一例

上記方法で実際に測定を行った結果の一例を示す。試料としては、キルド鋼一種、外径 43.0mm 肉厚 4.25mm の鋼管をダイスで空引き、外径 40.0mm 肉厚 4.25mm に引抜いたものを使用した。

内外面を切削した試片の立ち割りによる径変化を実測した結果は第6図上図に示す。これより各成分応力を計算したものがその下の図である。これ等の成分応力より

(5) 式に試片のヤング率 $E=209\times10^3 \text{ kg/mm}^2$ 及び使用するマイクロメータの $P=0.43 \text{ kg}$ を入れ d/D を両軸にとり、 δ との関係グラフに示すと第5図の通りである。図に見る如く、 d/D が小

となり、或は D が小となると δ は

大となる。しかし

われわれの実験の試料 $D=40\sim50\text{mm}$ では $d/D=5\%$ 程度で $\delta=2\times10^{-3}\text{mm}$ 程度であるので、このマイクロメータで充分精度をもった測定を行い得ることがわかった。

大となる。しかし

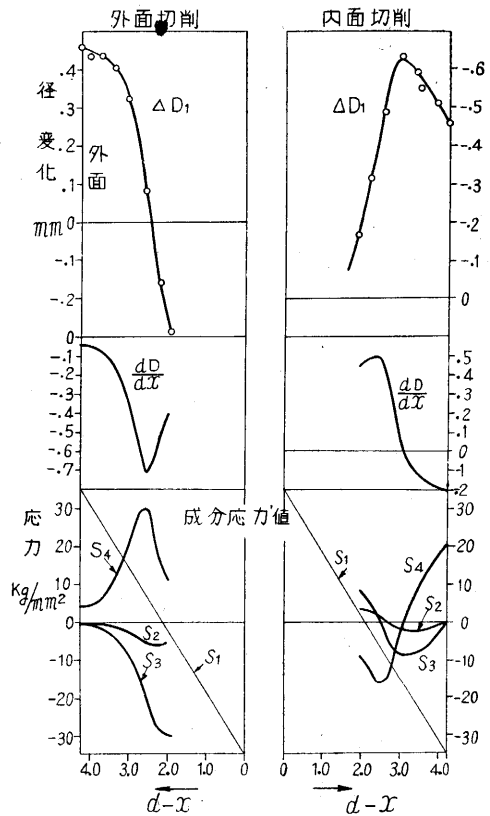
われわれの実験の試料 $D=40\sim50\text{mm}$ では $d/D=5\%$ 程度で $\delta=2\times10^{-3}\text{mm}$ 程度であるので、このマイクロメータで充分精度をもった測定を行い得ることがわかった。

大となる。しかし

われわれの実験の試料 $D=40\sim50\text{mm}$ では $d/D=5\%$ 程度で $\delta=2\times10^{-3}\text{mm}$ 程度であるので、このマイクロメータで充分精度をもった測定を行い得ることがわかった。

大となる。しかし

われわれの実験の試料 $D=40\sim50\text{mm}$ では $d/D=5\%$ 程度で $\delta=2\times10^{-3}\text{mm}$ 程度であるので、このマイクロメータで充分精度をもった測定を行い得ることがわかった。



第6図 43.0×4.25 より 40.0×4.25 に空引きした鋼管の切欠法による残留応力分布の決定過程

管肉厚中の残留応力の分布曲線を作れば第7図のようになる。外面切削より得た曲線と内面切削より得た曲線は中央部で若干の開きを見せたが、その中間を結び一本の曲線とした。現在迄、この切欠法ですでに数個の試料につき分布曲線を得ているが、いずれも満足すべき結果が得られている。

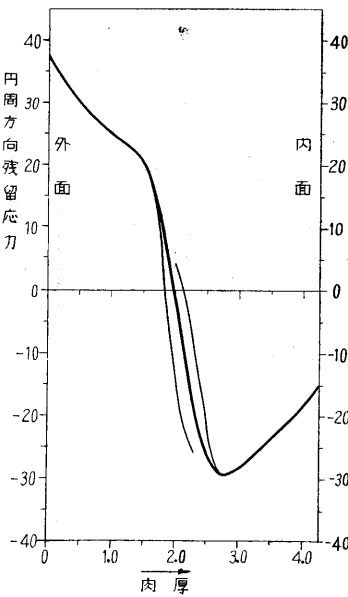
4. Wire Strain gauge による測定

この方法による残留応力の測定は、先に内外面よりの冷却速度の異なる鋳造パイプのいわゆる鋳造応力について本誌に報告した。前報ではその残留応力の発生の機構と測定結果について述べたものであったが、ここでは上述の切欠法に関連してその測定の実際と測定に当る諸注意を述べることにする。

前述の Sachs の Boring Method の発表はすでに古いものであるが、この測定に当って Boring 前後の外径および長さ方向の偏位を測るのにコンパレーターまたはマイクロメータが使用された。これでは測定精度が比較的 low、外径の余り大でないパイプではその誤差の割合が径に対して大となる。微少な偏位の測定に細い線の電気抵抗変化を利用する Wire Strain gauge の使用の一般化とともに、これを Boring Method における旋削前

後の微小変位の測定に適用することが行われ、これに関する報告も見受けられる。

残留応力はこの2方向の長さの変化を測定し、次の式を用いて計算される。



第 7 図

43.0φ×4.25 より 40.0φ×4.25に空引きした鋼管の残留応力分布

$$S_L = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ (F_b - F) \frac{dA}{dF} - A \right\}$$

$$S_T = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ (F_b - F) \frac{d\theta}{dF} - \left(\frac{F_p + F}{2F} \right) \theta \right\}$$

$$S_R = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \left(\frac{F_b - F}{2F} \right) \theta \right\}$$

ここに F_b は全断面面積、 F は旋削した面積、

$A = (\lambda + \nu\delta)$ 、 $\theta = (\delta + \nu\lambda)$ で λ 、 δ はそれぞれ長さ方向および切線方向のひずみである。

このひずみの測定に Wire Strain gauge を利用する

(15ページから続く)

の各常数を実験によって求めればよい。

多くの場合に切込みの値は削りしろから定まるので、最後の仕上げ削りの場合には切込みは与えられたものと考えることができる。また切削速度は大体予想される切削面積に対する刃物の寿命の点と、使用機械のこわさから経験上大体決定されるので、選定すべき条件は刃先半径と送りとなる。

この場合には、実際のあらさは

$$h_a = \eta h_t = k \cdot \mu \cdot s \cdot \nu \cdot 1/8 \cdot (1/r) s^2 \\ = k/8 \cdot (1/r)^4 \cdot \mu \cdot \nu \dots \dots \dots (5)$$

で表わされる。

あらさ H のみが指定された場合には、この式から $h_a = H$ として、 r または s の一方もしくは s/r を適当に選定して $1/r$ と s の組み合わせを求めて切削条件とすればよい。

さらにあらさ係数 K をも指定されたときには、第3式において、 $\eta = K$ として、第5式との連立方程式を解

のであるが、切削に当って多少の発熱と振動は避けることができないのでいろいろな問題がおこる。すなわち Paper gauge では温度上昇に耐えないので bakelite gauge を使用し、gauge の絶縁性の保持には絶えず十分な監視を行うことが必要である。温度の問題は最も重要で抵抗の温度係数と測定すべき Strain による抵抗変化の order とが比較的近いので、測定のときの温度の均一性が保たなければならない。試料に貼付された gauge は試料とともに冷却し、dammy gauge はその温度の影響を受けないので meter の読取値は時間とともに変化し、両 gauge が同一温度に到達したとき一定値を示す。その所要時間はパイプの材質、外径、肉厚などにもよるが本実験では約40分であった。またこの gauge はこのように温度履歴を経るので、その抵抗に温度ヒステリシスのあるものは当然使用不可能で、そのため gauge の抵抗線の素材の加工経歴なども問題となる。実験に際しては active gauge に温度変化を加えてヒステリシスのないことを確かめる必要があった。

またこの gauge の使用は測定精度は高いが、測定する場所がせいぜい 20mm という限られた長さであるのでパイプの偏肉偏心の影響をうけやすい。これは鋳物や引抜鋼管の場合始めから真の円および肉厚の同心は期待し難いので、旋削の第1回の値は信頼し難くなる。

以上の諸点からいってこの方法の実際適用にはかなりの困難があり、殊に外径の小さいパイプでは一層困難が増される、われわれも今のところ内面切削による外半分の残留応力しか結果を得ていないので、こゝに切欠法との比較を行うことができず、誠に遺憾であるが、以上この方法の欠点と長所を挙げることにした。(1954. 8. 21)

いて r と s を決定すればよい。しかしこれでは面倒であるからあらかじめ図表を作成しておけば簡単に求められる。(1954. 8. 13)

文 献

- (1) Tool Engineers' Handbook (1949) p. 320
- (2) Am. Machinist. Oct. 2. (1950) p. 125
- (3) Rosenhain of Sturney: Proceeding of I. M. E Bd. 1 (1925) p. 141
- (4) 大越: 理研叢報, 11輯, p. 616
- (5) Ernst: ASM. Machining of Metals (1938)
- (6) 同上
- (7) Schwerdt: Zeitschrift des VDI Bd. 76 (1932) p. 1257
- (8) 大越: 精機協会誌 1. (1934) p. 16 大越, 福井: 火兵学会誌 26 (1932) p. 299
- (9) 竹中: 東京大学生産技術研究所報告. 1巻6号 (1951)
- (10) 竹中: 生産研究, 2巻10号 (昭和25年) p. 362
- (11) H. Moll: Maschinenbau, Bd. 19 Ht. 10 (1940)
- (12) 斎藤, 鶴川: 機械学会論文集 16巻 53号 (昭和25年) p. 11