

ブルドン管圧力計について

小川正義・古川 浩・笠松 勇

1. はじめに

ブルドン管は Eugène Bourdon (1808—1884) によって考案されて以来、圧力計器として極めて古くかつ広範囲に使用せられてきているにもかかわらず、これについての研究は従来非常に少なく、楕円形断面を有する shell としての弾性論的立場からその応力と変形状態についての理論を二、三見る程度で、設計ならびに製作上、諸方面にわたって今後の研究にまつところが極めて多い。

とりわけブルドン管の性能に及ぼす製作過程の影響については全く文献がないため、ほとんど経験によって設計製作されているのが現状である。従つて近時改良の気運が見られるこの種の圧力計については実際と合致する理論の確立、および各種加工法による性能の相違等について明確なる決論が待たれている。

いま研究の対象となっている諸問題を挙げて見ると

①砂谷理論の改訂 砂谷博士の理論は高压の場合 (20~1000 kg), 非常によく実際と合うが低压においてはより精密な理論とその補正が望まれる。

②断面形状の問題 ブルドン管は楕円断面の半円形管であるからこれに内圧がかかると軸線方向には伸びを生じ、また断面は短軸方向に拡がり、長軸方向には縮んで円に近づくとする傾向を持つ。この時の力学的変化に従つて生ずるモーメントによって円弧は外方へ開くのであるが、伸びおよび開き具合は断面の形状およびブルドン管の中空部分と壁体部分の断面積によって違ってくる。近時平円形断面が盛んに使用されてきたのは楕円断面に比べて感度が良いためである。しかし強度、疲労等の点を考慮に入れるとさらに異なり、短軸側の側壁にひだの入った断面のブルドンも見受けられるようになった。従つて断面の変形する量等も正確に知りたい資料の一つである。

③加圧による管壁の応力分布状態 これについては、円弧半径 7.5 cm に対して幅 4.9 cm 厚さ 0.94 cm の低

圧用 (称呼圧力 6 kg/cm²) としては空前と思われる巨大な“マンモスブルドン”を試作し、特殊な焼付接着法によってストレイン・ゲージをはりつけ、第 1 図のような装置によって計測を行っている (第 1 図の測定器の重錘とブルドンの大きさを比較されたい)。

④冷間加工度 各試料について cold work した量がはっきりつかめない。従つて何% cold work ということが重大な問題となる。

⑤ヒステリシスと疲労 材料および工作法の差異によるこれらの減少方法、ヒステリシスの定性的傾向は非常につかみにくく、また疲労試験は 1,000,000 回位までくり返し圧力をかけたいためその実験は非常に困難で試験機の方が参る恐れもあり、筆者らは特別な試験機を設計している。

⑥弾性係数の問題 加圧時の力は曲げモーメントだけのはずであるからヤング率 E だけを問題にすれば良いわけであるが、剛性率 G も微小ながらきくそうである。従つて static な E と G, cold work の入った E と G, さらに dynamical なこれらの値も問題となる。

⑦塑性加工による管壁の厚さの均一性

⑧熱処理による残留永久歪および seasoning

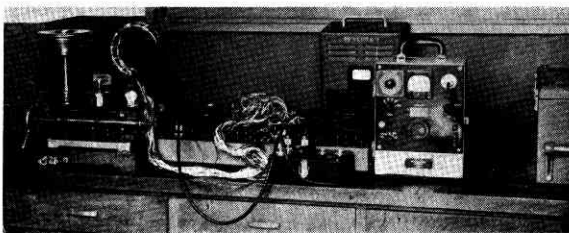
⑨ 等差目盛 ブルドン管圧力計の文字板は印刷目盛ではなく現物合せで書き入れるのがほとんどであるために、不等分布目盛になっているのが大半である。従つてこれを等分布印刷目盛にするには加圧によるブルドン管の管端変位の厳密な解析および拡大機構の改良が問題となる。

⑩管破の問題とその対策 等に大別できる。

筆者らは製作過程の影響を主としたブルドン管圧力計の総合的研究に着手し、上記 10 項目についてそれぞれ実験を進めているが、今回はこのような問題についての解決を与えるために、まずその基礎として内圧を受けたブルドン管の円弧の呈する変形の状態を測定して、その基本的性質を明らかにし、あわせて管の材質ならびに断面形状の成型法の影響につき主として報告するものである。

2. 材料、装置および実験の方法

実験に使用したブルドン管は、引抜管をロールで楕円乃至は半円形の断面に成型したものか、または薄板を折り曲げ継接によって同様な断面形にした管を、さらにロールで全体の形状を円弧状に作ったもので、いずれも称呼圧力が 10 kg/cm²、円弧直径 78 mm 内



第 1 図

外、肉厚約 0.5 mm 前後のもので、その詳細寸法および断面の形状はそれぞれ第 1 表 および 第 2 図に示す。ま

が野書いてあり、野書き線は野書き針で線の太さ約 1/100 mm に書いてある。

第 1 表 試料の詳細寸法

試料の種類	称呼圧力 kg/cm	中立円直径 2r (mm)	中心角 θ (deg)	断面長径 2a (mm)	断面短径 2b (mm)	円弧外側肉厚 t_1 (mm)	円弧内側肉厚 t_2 (mm)
引抜アルブラック管	10	77.2	253.0	16.9	6.0	0.44	0.51
鍛付燐青銅管	10	71.3	216.5	17.9	5.3	0.40	0.50
鍛付黄銅管 A	10	73.4	268.8	17.9	4.4	0.60	0.65
〃 B	10	74.4	268.7	18.0	4.4	0.56	0.71
引抜黄銅管	10	74.3	254.0	20.1	6.0	0.70	0.79
引抜半硬鋼管	10	73.4	273.6	19.5	6.0	0.61	0.70
引抜硬鋼管	10	78.0	226.8	18.3	3.9	0.58	0.65

内圧に応じて変化するブルドン管の円弧の形状は、野書き線の交点の座標の変位を読取顕微鏡で測定し、後に述べる計算式によって求めることができる。

3. 円弧の形状

ブルドン管の中立線の形状は本来円弧であるはずであるから、この中立円上に野書いた数個の十字線の交点は、野書く際に多少の誤差があるとしても、一つの円弧を形成するものと考えられる。従ってこの円弧の方程式を求めればブルドン管の円弧の形状が決定できるわけである。

読取顕微鏡で測定したブルドン管の中立円上の野書き点の座標から最小二乗法により、円弧の方程式を決定し、圧力の変化に対する円弧の中立円と中心座標の変化の状態を調べる。

ブルドン管の正しい中立円弧上の点およびその中心座標をそれぞれ (x, y) および (x_0, y_0) 、その半径を r とする。また野書き点の座標を (x_i, y_i) として、この両者の形成する円の方程式の誤差を ϵ として最小二乗法で次のように円弧の方程式を求める。

読取顕微鏡で測定したブルドン管の中立円上の野書き点の座標から最小二乗法により、円弧の方程式を決定し、圧力の変化に対する円弧の中立円と中心座標の変化の状態を調べる。

$$\epsilon_i = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2$$

$$\sum \epsilon_i^2 = \sum \{ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2 \}^2 \dots \dots (1)$$

上の式から、 $\partial \sum \epsilon_i^2 / \partial x_0 = 0$, $\partial \sum \epsilon_i^2 / \partial y_0 = 0$, $\partial \sum \epsilon_i^2 / \partial r = 0$ として規準方程式を求めると次式になる。

$$\left. \begin{aligned} &(\sum x_i / n - \sum x_i^2 / \sum x_i x_0) + (\sum y_i / n - \sum x_i y_i / \sum x_i y_0) \\ &+ (\sum x_i^3 + \sum x_i y_i^2) / 2 \sum x_i y_i - (\sum x_i^2 + \sum y_i^2) / 2n = 0 \\ &(\sum x_i / n - \sum x_i y_i / \sum y_i x_0) + (\sum y_i / n - \sum y_i^2 / \sum y_i y_0) \\ &+ (\sum x_i^2 y_i + \sum y_i^3) / 2 \sum y_i - (\sum x_i^2 + \sum y_i^2) / 2n = 0 \\ &r^2 = x_0^2 + y_0^2 - 2x_0 \sum x_i / n - 2y_0 \sum y_i / n \\ &\quad + (\sum x_i^2 + \sum y_i^2) / n \end{aligned} \right\} \dots \dots (2)$$

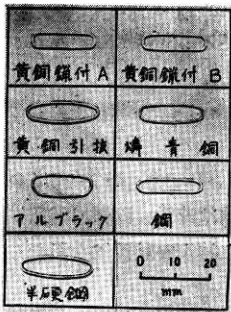
ここに、 (x_i, y_i) はある内圧に対する数個の野書き点の座標であるから、異なった内圧に対する野書き点の座標を測定すれば、各々の内圧に対する円弧の方程式が得られ、かつ(2)式の連立方程式を解くことにより、その内圧に対する円弧中心の座標 (x_0, y_0) および中立円弧半径 r が求められる。従ってまた円弧上の野書き点の位置も誘導できる。

上の式は、ブルドン管を円弧と仮定して円の方程式にあてはめて求めたものであって、ブルドン管が正しい円弧をなしており、かつ内圧を受けたのちにおいてもなお初期と相似の円弧になっているという前提において成り

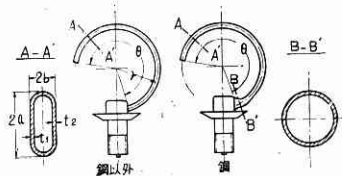
たその外形は第 3 図に示してあるように、銅の場合にその断面が固定端の付近で半円形から円形に極端に変化しているが、他のものゝ場合にはいずれも固定端から自由端まで一様な断面を形づくっている。

実験の装置は第 4 図に示したもので、最大検定圧力 20 kg/cm² の圧力計試験機 T に

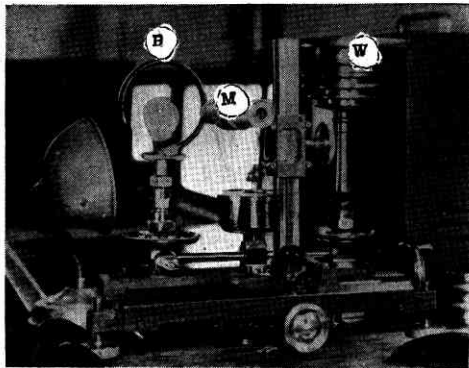
試料のブルドン管 B を取りつけ、管内に称呼圧力までの油圧を加え、その油圧に平衡させた重錘 W からブル



第 2 図 試料の断面形状



第 3 図 試料の外形



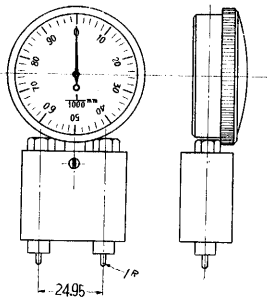
第 4 図 実験装置

ドン管の内圧を知る。一方材料に野書いた数個所の十字線の交点の座標を、直交 2 軸にそれぞれ主尺と、1/100 mm の副尺を備えた倍率 40 倍の読取顕微鏡 M でよみとる。

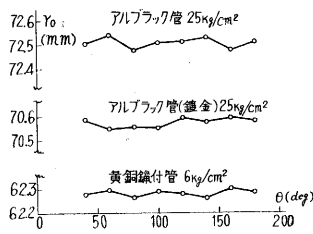
ブルドン管にはその円弧の中立線上に数個所の十字線

立つものである。

このような仮定をすることが妥当であるかどうかを、次の2通りの測定を行って検討してみた。



第 5 図 曲率測定器



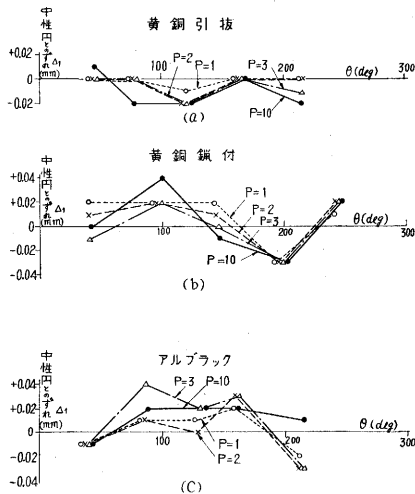
第 6 図 ブルドン管の真円性

その第1はブルドン管の円弧の真円度を測定したもので、最小目盛1/1000 mm のダイヤルゲージのついた第5図のような構造の曲率測定器を作り、これで二、三の試料についてその外側半径を測定した。第6図はこの結果を示したもので、ブルドン管の円弧は曲率半径の偏差が $\pm 4/100$ mm 以内で円弧状をなしていることが判る。

第2に、この円弧は内圧を受けてもお初期の真円度を維持しているかどうかという点

について、次の方法で二、三の試料について検討した。すなわち内圧を与えないときの円弧の中立円半径を式(2)から求め、一方円弧中心から罫書き点までの距離を求め、前者と後者との差をもって中立円に対する罫書き点の誤差とし、これを仮に罫書き誤差と名づける。従って個々の罫書き点の座標に対してその点の罫書き誤差相当分の補正を施せば、おのおのの罫書き点はすべて中立円上に位置することになる。

次にブルドン管に内圧を与えて円弧を変化させ、罫書き誤差の補正を行った個々の罫書き点から円弧中心までの距離、すなわちその罫書き点における中立円の曲率半径と、式(2)から得たその内圧に対する円弧の曲率半径とを比較



第 7 図 加圧時の真円性

すれば、この差は円弧の曲率半径が円弧全体について一様に変化したものか、あるいは局部的に変化したものかどうかという

ことを示すことになる。第7図はその結果を示したもので、(a) 図は引抜黄銅管、(b) 図は鍍付黄銅管、(c) 図は引抜ブラック管の場合であって、いずれも円弧は内圧を受けたのちでも、その内圧に対する中立円半径とのずれ Δ_1 は $\pm 4/100$ mm 以内である。

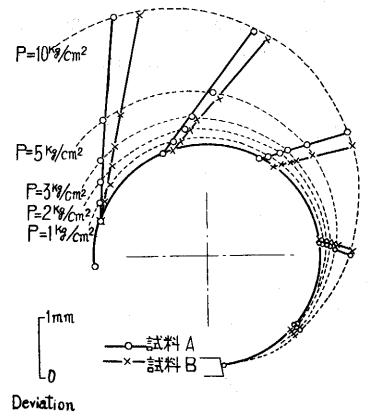
以上の2つの結果によりブルドン管の形状は、初期の真円性においても、また加圧時の真円性においても、そのいずれの場合でも円弧として取扱うということは十分妥当であるという結論が得られる。

4. 変位の均等性

この実験ははじめに記した通りブルドン管の加圧による円弧の形状の変化を測定することによって、材質ならびに製作法の影響を調査するものであるが、もし同じ種類のブルドン管であるにもかかわらず、円弧の変化の性質が著しく異なることがあるならば、たと1個の試料を測定したのでは無意味になる。

そこで、同一製造所で同一時期に製作された第1表のような類似の諸元をもつ鍍付黄銅管 (A), (B) の2個について、それぞれの円弧の変化を測定して両者の性質が均等であるかどうかを比較してみる。

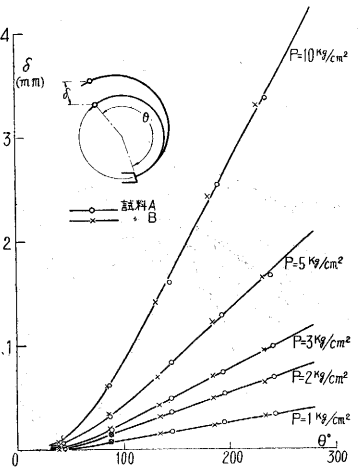
第8図は、ブルドン管の中立円上の罫書き点の座標を種々の内圧について測定し、罫書き点の座標が内圧に応じて移動する状態を示したもので、座標の移動量すなわち管の変位の大きさを円弧の中立円半径に対して20倍に拡大して図示してある。



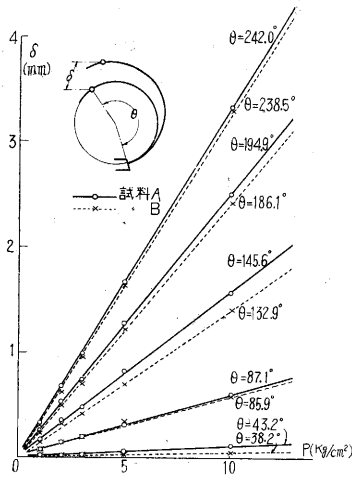
第 8 図

第9図は固定端を基点として表わした円弧の中心角と、直線として求めた円弧の変位量との関係を示したものである。

これらの図で明らかな通り、試料は (A), (B) 共にその変位の性質ならびに大きさがよく一致している。



第 9 図



第 10 図

次に第10図は、第9図の座標を変えて内圧と変位との関係を比較したもので、この場合は両者の野書き点の位置が異なっているために両者の直線がずれて示されているが、これも第9図と同様に両者が同性質であることを立証している。

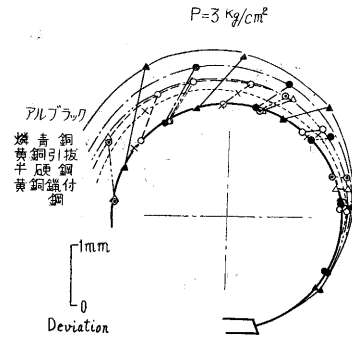
以上の通り、同一製造工程を経て製作されたブルドン管の変位はおのおの全く一致した性質を示しているのであるから、他の性質や性能もまた同様に均等であるものと考えられる。

従来、ブルドン管の性能は個々について相異なるものと考えられていたが、それは変位の性質が不定なためではなくて他の原因、すなわち弧長または管先の取付角や位置の不定もしくは指示拡大機構の欠陥がその原因をな

しているものと思われる。

5. 変位におよぼす材質ならびに製造法の影響について

丸棒を引抜いて円管にし、これをロールで所定の断面と円弧状に成型して作った引抜のアルブラック、黄銅、半硬鋼および鋼の3種の試料と、薄い平板を折り曲げて接合部を鍍付けして所定の断面の管とし、これをロールで、所定の円弧状に作った鍍付の磷青銅および黄銅の2種、従って材質と製造法の異なった



第 11 図 (c)

のようなになる。

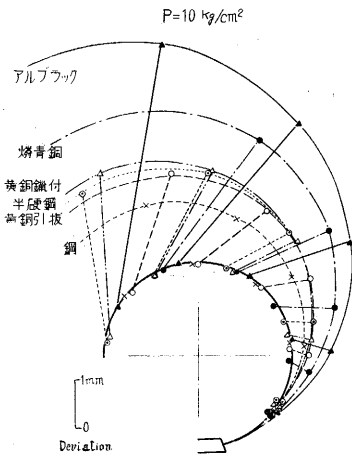
第11図(a), (b), (c)はおのおのの試料について、円弧上の変位量の分布と変位方向とを示したもので、変位量は円弧半径に対し20倍に拡大して図示してあり、変位方向は初圧と終圧の測定点を直線で結んで表わしてあ

る。

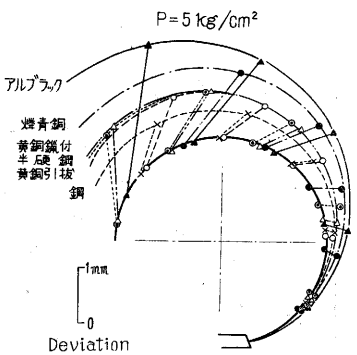
第12図(a), (b), (c)はおのおのの試料について固定端を基点とし自由端の方向に測った円弧の中心角と直線的に測った変位量との関係を示したものである。

同一の内圧に対する変位量の大小はブルドン管の感度に関する量であるが第11図および第12図ではいづれも、アルブラック—磷青銅—鍍付黄銅—半硬鋼—黄銅引抜 (これは鍍付黄銅やその他より肉厚が大きい(第1表))=鋼の順位となっている。

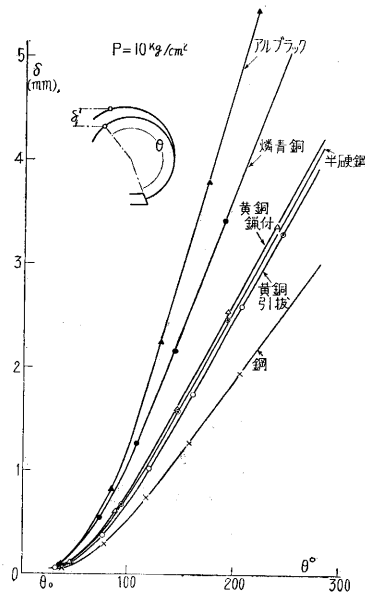
ここに、第11図の円弧群は中心角 θ_0 で原円



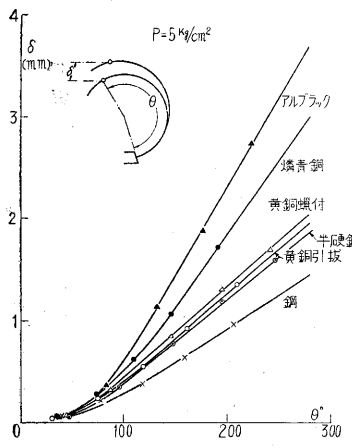
(a)



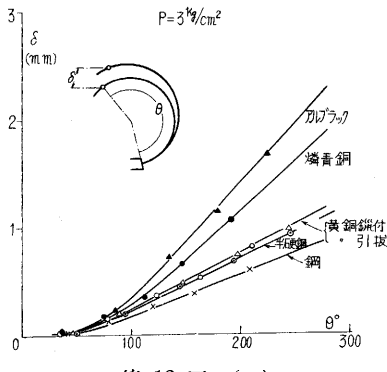
(b)



(a)



(b)



第 12 図 (c)

弧と外接しており、また第 12 図においても同様に中心角 θ_0 に集中する彎曲した曲線となっている。

次に固定端を基点として自由端の方向に測った中心角と、内圧を与えないときの円弧中心を原点として求めた角変位との関係は、第 12 図の場合と同じ傾向にあり直線的な関係となって中心角 θ_0 に集中する。

このように、変位を生じない点が固定端ではなくて、中心角 θ_0 の点にあるということについては別に詳記することにする。

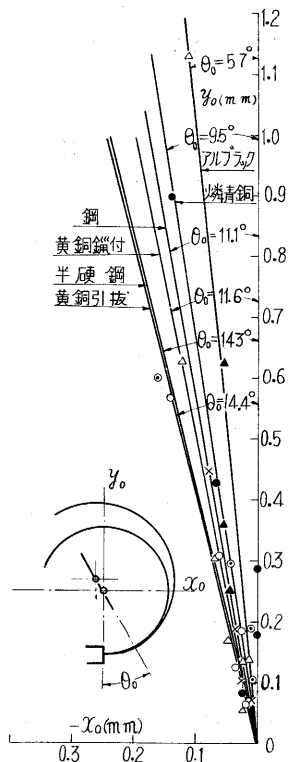
また内圧と変位量との関係は、第 10 図と同様に原点を通る直線となり、等差分布目盛板の実現の可能性を明示している。

6. 円弧中心の軌跡と不動点について

第 8 図もしくは第 11 図に示されてあるように、内圧を受けたときのブルドン管の円弧は、すべて内圧を受けないときの原円弧に外接するものであるが、これらの円弧群の共通切点の位置は従来固定端にあるものと考えられてきたが、それより僅か自由端に寄った中心角 θ_0 の位置に存在することが判った。

ところで円弧群の共通切点の位置は、おのおのの円弧の中心の軌跡と原円弧との交点であるから、この共通切点の位置を円弧の中心の軌跡を求めることによって知ることができる。

そこで、式 (2) から内圧の変化に対する中心座標の変化を計算して、これから中心座標の軌跡を求めた。第 13 図はそれを示したもので、この軌跡を直線と



第 13 図 中心座標の軌跡

して取扱って最小二乗法から、この直線と固定点とのなす角を求めれば、その角が共通切点の位置 θ_0 を与える。

第 2 表はおのおのの試料に対する共通切点すなわち不動点の位置を計算した結果を示したものである。

第 2 表

試料の種類	不動点の位置 (deg)	感度 mm-cm ² /kg-deg	半径増加率 cm ² /kg
引抜アルブラック管	5.7	0.24 × 10 ⁻³	2.9 × 10 ⁻³
引抜黄銅管	9.5	0.17 × 10 ⁻³	2.5 × 10 ⁻³
引抜半硬鋼管	11.6	0.14 × 10 ⁻³	1.8 × 10 ⁻³
引抜鋼管	14.3	0.14 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³
引抜黄銅管	14.4	0.12 × 10 ⁻³	1.6 × 10 ⁻³
引抜鋼管	11.1	0.089 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻³

以上の通り原円弧に外接する円弧群はすべて中心角 θ_0 の点において相接し、この接点においては変位を全く生じないのであるから、この点を不動点と称することができ、その位置は固定端よりずれた位置に存在する。実際はこの不動点も加圧される圧力に比例してごく僅かずつ固定端方向に動くのであるが、その量が微小であるために、円弧群の見掛け上の接点をもって不動点と称した方が、称呼圧力の範囲内では妥当であると考えられる。このように実際のブルドン管においては、見掛上変位の全く生じない点が固定端のみではなく、上記の不動点まで、ある長さ存在するという事は、あたかも片持梁における end effect と同様な性質のもので、固定端の支持方法、すなわち引抜の影響によるものと考えられる。

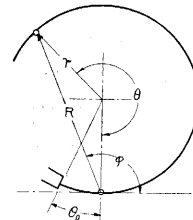
7. 変位曲線および変位方向について

ブルドン管が内圧を受けて円弧が拡張されるときに、円弧の中立円上の点の描く軌跡は次の式で与えられる。

$$dy/dx = \{(\theta + \theta_0) \sin(\theta + \theta_0) + \cos(\theta + \theta_0) - 1\} / \{(\theta + \theta_0) \cos(\theta + \theta_0) - \sin(\theta + \theta_0)\} \dots (3)$$

ここに、 θ は不動点を基点として自由端の方向に測った円弧の中心角、 θ_0 は不動点の中心角である (第 14 図)。

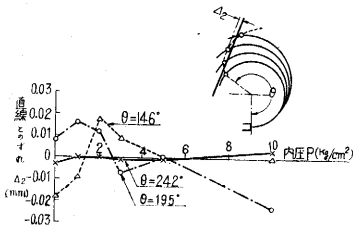
実際の変位は第 8 図の自由端に近い部分で判るように、固定端側に僅かに彎曲した曲線となる。



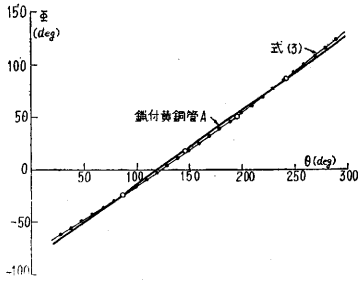
第 14 図

この変位曲線は曲率半径の極めて大きな円弧 (厳密な意味では 2 次曲線) と考えられるから、直線におき代えられれば実用上さらに便宜となる。そこで引抜黄銅管 (A) を試料として、その変位曲線を直線におき代えたときの誤差を求めてみた。すなわち内圧に対応して変位したそれぞれの中心角の野書き点の座標について最小二乗法で変位の直線を決定し、測定点からこの直線に下した垂線の長さ A_2 をもって誤差とした。

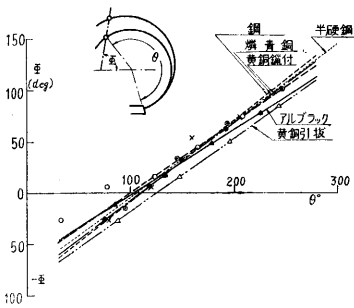
第 15 図はこの誤差 A_2 を内圧に関して図示したものである。変位曲線と、これを直線におき代えたときのずれの



第 15 図



第 16 図 変位の方向の理論値と実験値との比較



第 17 図 各試料の変位の方向

したものと鋼付黄銅管 (A) について実測した結果から求めたものとを比較して図示したもので、式 (3) から得たものは曲線であるが、実験から得たものは直線に近く、両者の差は極めて小さいから変位の方向と中心角との関係は直線的であると考えても実際上大差を生じない。

次に第 17 図は、この関係をおのおのの試料に対して比較して図示したもので、いずれの材質の場合でも直線的な関係が存在するが材質による特別な影響はないようである。

8. 感度について

材質、断面形状および円弧半径一定の場合のブルドン管の変位量は、内圧 p および変位する点の中心角の大きさ θ によって定まるから、ブルドン管の感度は次式で定義することができる。

$$s = \partial\theta / \theta \cdot \partial p \dots\dots\dots (4)$$

上の式から計算したおのおのの試料の感度を第 2 表に示す。

9. 円弧半径の伸びについて

ブルドン管の円弧の曲率半径は、内圧の増加に伴って伸張するが、円弧の形状は内圧を受けないときと同じ程

最大は 0.02mm 程度であってこのずれの大きさは中心角の大きいところほど従って自由端に近づくほど小さくなる。よって称呼圧力の範囲内における自由端の変位曲線は直線として取扱って実際上差支えないといえる。

次に変位の方向は、変位曲線を直線として取扱ひ、かつこの直線と x 軸とのなす角 θ で表わし、 θ と固定端を基点とした円弧の中心角との関係を図示すると第 16 図および第 17 図のようになる。第 16 図は式 (3) から計算

度に円弧状をなしている。従って内圧と円弧半径の伸びとの間にはなんらかの関係があると思われる。

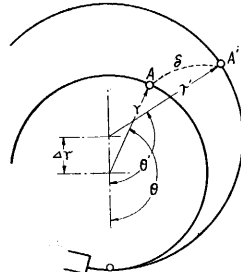
第 18 図は、この内圧 p と円弧半径の伸び、 $\Delta r/r$ との関係を図示したもので、原点を通る直線となる。

また、内圧に対する円弧半径

の増加率を $\partial r/r \cdot \partial p$ で表わし、おのおのの試料について計算した結果を第 2 表に示す。感度の大きい試料は半径増加率も大きい。

10. 再び変位について

いま変位を直線として考え純幾何学的に計算した値 δ_c と正しく曲線として計算したものとを比較してみる。直線としてたてた変位の式は第 19 図において



第 19 図

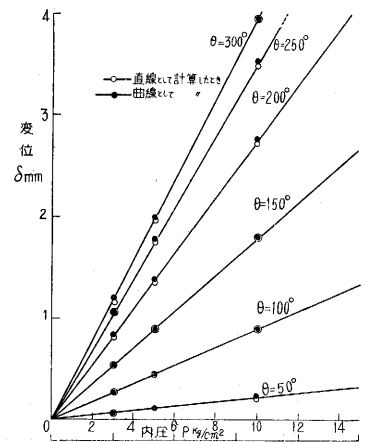
$$\delta_c = \sqrt{2} [r^2 + \Delta r^2 + r \cdot \Delta r - r(r + \Delta r) \cos(\theta - \theta')]^{1/2} \dots (5)$$

また変位を理論的に算出した大きさ δ_c は

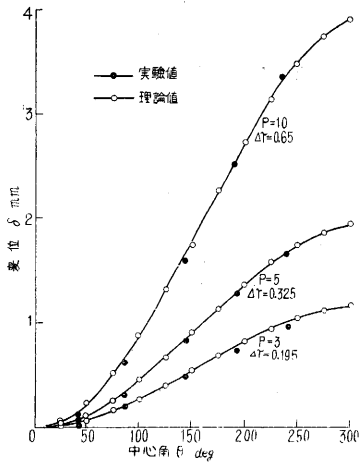
$$\delta_c = r\theta \int_0^{\theta + \Delta\theta} \frac{1}{\theta^2} \sqrt{\theta^2 - 2(\theta \sin \theta + \cos \theta - 1)} d\theta \dots (6)$$

で表わされる。

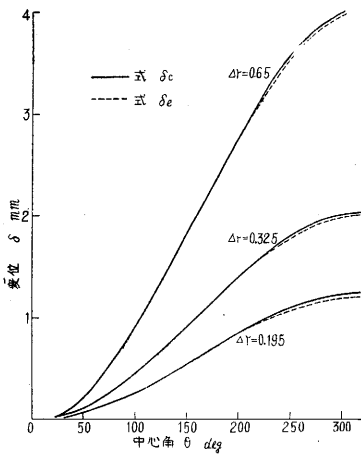
第 20 図は白点、黒点でそれぞれ δ_c 、 δ_c を示してこの両者を比較したものでこの図からみて称呼圧力の範囲では加圧による変位量は直線であるとして差支えなく、変位量と内圧の関係は直線となる。次に変位 δ と中心角 θ との関係を



第 20 図



第 21 図



第 22 図

11. 結 論

上述の通り、ブルドン管が内圧を受けたときに呈する変位の諸性質は結論として次のようなものである。

1) 内圧を受けないときの円弧の形状は、その曲率半径が 4/100 mm 以内の範囲で円弧をなしている。

またこれが内圧を受けたときの円弧の形状も、その曲率半径が 4/100 mm 以内の範囲で円弧をなしている。

従ってブルドン管の円弧は内圧を受けても初期と同程度の真円性がある。

2) 同一工程を経て製作された同種のブルドン管の変位は全く同じ性質であるから、指示機構の改良を行えば印刷目盛板への道が展げ、あわせて量産ならびに価格低減が実現できる。

3) ブルドン管の変位の大いさと中心角との関係は、中心角の大きい部分では比例関係があるが、中心角の小さい部分では曲線となって固定端以外の点に集中する。角変位と中心角との関係も同様になる。中心角に対する変位の大いさや角変位との関係が、直線にならず、かつ固定端に集中しない理由は次の通りである。

第 21 図に示す、
 鐵付黄銅 A の実験値とその試料の有する

$$r = 36.63 \text{ cm}$$

$$\rho = 10 \text{ kg/cm}^3$$

$$\Delta r = 0.65 \text{ cm}$$

$$\theta_2 = r_1/r_2 \cdot \theta_1$$

$$= 0.9826 \theta_1$$

なる諸元をもって式 (6) から求めた理論値を比較したもので、両者は非常によく一致している。

第 22 図は δ_c 、 δ_e と中心角 θ の関係で、実線は (6) 式を数値積分した近似解、点線が直線として取扱った変位である。両者は θ が 200° 以上でごく僅かの差が生じ、いずれも 360° で一定の値に飽和する。

すなわち、内圧を受けた円弧中心の軌跡は、軸に対してある傾きをもつ直線となり、従って円弧は固定端を支点としてではなく、それより少しはずれた点を支点として変位する。よって変位を全く生じない点は固定端のほかにも見掛上の不動点として存在し、変位の小さい範囲ではこの点が支点としての作用をするからである。

この不動点の位置は、試料によって相異なり、中心角で 10° 内外の位置にある。

4) 変位曲線の形は式 (3) で与えることができるが、実際上は直線として取扱っても一向差支えない。

変位の方向は理論、実測ともによく一致しており、これと中心角との関係は直線的であるとみなせる。

また、材質や製造法の影響はないようである。

5) ブルドン管の感度を式 (4) で表わすと、その順位はアルブラック—磷青銅—鐵付黄銅—半硬鋼—引抜黄銅—鋼となる。

6) 内圧に対するブルドン管の円弧半径増加率を式 (6) で表わすと、その順位は感度の場合と一致する。

12. む す び

以上私達が実験を進めている 10 項目の基礎となる測定結果を簡単に述べた。10 項目の個々については紙面の都合で別紙にゆずることにしたい。終りに実験に種々ご便宜を与えていただいた東京計器、黒田狭範、東京機器、岩崎計器、玉川計器の各社および真木守俊、早瀬佑次郎、山口隆二の諸氏に末筆ながら厚く御礼申し上げる。

(1955. 11. 7)

文 献

- 1) R. A. Clark, On the theory of thin elastic toroidal Shell, Journ. Math. & Phys. Oct 1950 p. 146~178
- 2) R. A. Clark and E. Reissner, Bending of curved Tubes Advances in App. Mech. Vol. II 1951 p. 93~122
- 3) R. A. Clark & T. E. Gilrory & E. Reissner, Stress and Deformation of Toroidal Shells of Elliptical cross section, Journ. Appl. Mech. 1952 Vol. 19 No. 1 p. 37~48
- 4) R. A. Clark & E. Reissner, A problem of Bending of Toroidal Shells, Quarterly App. Math. No. 1 1953 p. 335~346
- 5) W. Wuest, Influence of the Cross Section Form on the Behaviour of Bourdon Tube, Ing.-Arch. 20 Haft 2 S. 116-125 1952
- 6) M. Tueda, Mem. Coll. Engin. Kyoto (1934/35) H. 8 und (1934/37) H. 9
- 7) Ergebnisse der Rechnussg S. W. Wuest Technik 3(1948) S. 23; Vol. Auch Bild 4 der vorliegenden Arbeit.
- 8) R. A. Clark und E. Reissner, J. Appl. Physics 21(1950) S. 1340 R. A. Clark T. I. Gilrory und E. Reissner, J. Appl. Mech. Paper No. 51-A-11 (1951)
- 9) Einige Berechnungs beispiele finden sich in Technik 3 (1948) S. 24 Bild 3
- 10) C. B. Biezno und J. G. Koch, proc Amsterdam 44 (1940) S. 779 und 914
- 11) Chido Sunatani, The Theory of a Bourdon Tube Pressure Gauge and an Improvement In Its Mechanism. 機械学会誌 大正13年 7月
- 12) 小川, 古川, 笠松, ブルドン管圧力計について 産産研究 1954. 1
- 13) H. Lorenz, V. D. I. Bd. 54, Nr. 44 29 Okt. 1910 s. 1865-1867.
- 14) 古川, 笠松. ブルドン管の円弧について, 中大 70 周年記念論文集 1955. 11