

ブルドン管の感度について

小川 正義・古川 浩・笠松 勇

1. はし が き

従来ブルドン管圧力計においては、その感度を高めることが重要な問題の一つであった。これには拡大機構の作用や計器の使用状態なども当然考慮に入れなければならないのであるが、基本はやはりブルドン管そのものの特性にある。最近、管先の移動量が内圧に比例する直線性さへ得られれば、移動量自体は僅かであっても、これを電気的または磁氣的にピック・アップしてXYレコーダに記録させるなど、検出や拡大方式が発達したので、特殊の計器——とりわけ耐久性が問題になる場合——においては、ブルドン管の強度を主体に考え、感度は検出、増幅装置の方にまかせるような傾向も生まれてきている。また管の疲労という観点からもこの方が望ましいと考えられる。ただこの場合には設備も大きく、価格も高く、取扱いも厄介になるので、現場で数多く使われる圧力計の感度は、ブルドン管そのものの材質、形状、寸法および加工法や熱処理法などに依存していることは従来通りである。

一般に、感度を高めることと、強度および耐久性を増大することとは、矛盾する関係にあるので、設計に際しては、双方の要求を適当なところで妥協させなければならない。

管にほぼ同一の断面形状を与え、その材質と加工法のみが異なるものの感度についてはすでに報告* してあるので、今回は同一材質、同一加工法で、断面の形状と寸法が違つと、感度にどんな影響があるかという点について述べることにする。

2. 試料および測定装置

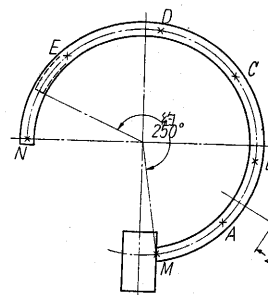
実験に使用したブルドン管は、いずれも株も内機も付けてないままのものに、試作した特別なアタッチメントを取り付けて加圧を容易にした。管の材質にはアルミブラス(BsTFs)JIS H3632 を使用し、継接によってパイプ形成をした後、ハンマリングで腰を入れたものである。表面にはバフ研磨をほどこし、180~200°C で1.5hr の歪取りを行なつてある。試料の諸元を第1表に示す。試料は四つのグループにわかれ、各グループは長径 2a、短径 2b、肉厚 t および円弧曲率半径 r の四つの基本寸法の中、いずれか三つをかなりの範囲に変化させ、他の一つはだいたい同じ値であるようなものを用いた。断面形状はほぼ楕円である。

測定には万能測定顕微鏡(UMM)の載物台の上に圧力

第 1 表

断面 形状	断 面 (単位 mm)			円弧曲率 半径 r (mm)
	長径 2a	短径 2b	肉厚 t	
	17.64	5.16	0.84	28.60
	17.72	5.18	0.82	35.25
	17.86	5.20	0.80	47.85
	17.72	5.18	0.83	60.40
	13.60	5.06	0.76	48.10
	17.50	5.34	0.81	47.60
	20.38	5.28	0.81	47.50
	22.64	5.28	0.82	47.55
	18.12	3.86	0.83	48.25
	17.70	5.28	0.80	47.27
	17.50	6.04	0.80	47.19
	18.59	7.38	0.77	46.68
	17.60	5.46	0.64	45.15
	17.60	5.48	0.71	44.92
	17.28	5.74	0.85	44.52
	17.06	5.78	0.94	44.62

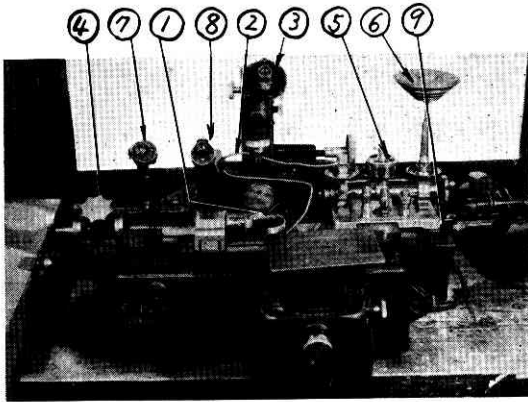
検定器を固定し、これから接続した曲管により試料に油圧を供給する。試料のブルドン管には、第1図に見られるように円弧の中立線の上に極めて細い十字線の標点をつけ(標点や内端面の位置がだいたいこのようにということであつて試料ごとにばらつきがある)、これらが顕微鏡の視野内に入るように管の円弧面を水平に置き、油圧による標点の移動を測定した。第2図は実験装置の全景である。



第 1 図

圧力検定器は最大加圧能力 50kg/cm²、最小加圧能力 0.5kg/cm² で、試料に用いたブルドン管はいずれも呼び圧力 20kg/cm² のものである。加えた圧力は 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5 kg/cm² で、圧力 0 の

場合の標点の座標から出発して、各圧力に対する各標点の座標を 1μ まで測定し、これらを 3 および 4 に述べる各種の関係式に用いて、5 の諸結果を導き出した。



第 2 図

- 1. 試料のブルドン管 2. 油圧導入用曲管 3. 標点測定用顕微鏡 4. 載物台 5. 圧力計検定器
- 6. 油圧荷重 7. x 軸目盛尺読取顕微鏡 8. y 軸目盛尺読取顕微鏡 9. ベッド

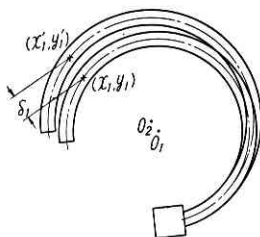
実験中に負荷部分および油圧回路に摩擦と漏洩がないように、装置のすり合せ部分には十分な精密加工とシーリングを施した。

3. 変位, 円弧中心および曲率半径の算出

内圧が変わって、ある標点の座標が (x_1, y_1) から (x_1', y_1') になったときの変位量 δ_1 は、その標点の位置が株のごく近傍であったり、圧力変化が極端に大きかったりする場合を除き、直線上を移動するものとして

$$\delta_1 = \{(x_1' - x_1)^2 + (y_1' - y_1)^2\}^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

として差し支えない(第3図)。



第 3 図

一般に、変位量は内圧による管の物理的变化によって生じるものであるが、結果的に見ると、前述のような特殊な場合を除けば、管の円弧性* がかなり良く維持され、そのため幾何学的な関係、すなわち

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

ただし r ; 管の最初の曲率半径 r' ; 管の変形後の曲率半径 Δr ; 曲率半径の変化量 θ ; 標点の最初の中心角 θ' ; 変形後の中心角

が成り立つのである(第4図)。これは変位現象の説明には何の役にも立たないが、実用上の便宜には使うことがある。

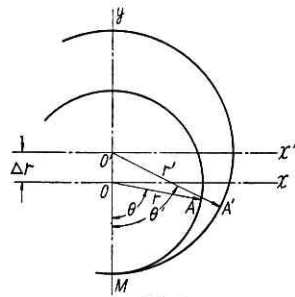
次に、測定した各標点の座標(各圧力に対してA~Dの5組ずつ)から、それぞれの円弧の中心の座標および曲率半径を求めるのに、管に標点をつける時に、完全に中立線上にはのらないための誤差があり、またその座標

測定の際の誤差もあるはずであるから、最小二乗法による処理を行なって、5組の標点の座標を通る、最も確からしい円弧のそれとして算出する。すなわち円弧中心の座標 (x_0, y_0) は、

$$\left. \begin{aligned} (\Sigma x_i/n - \Sigma x_i^2/\Sigma x_i)x_0 + (\Sigma y_i/n - \Sigma x_i y_i/\Sigma x_i)y_0 \\ + (\Sigma x_i^3 + \Sigma x_i^2 y_i)/2\Sigma x_i y_i - (\Sigma x_i^2 + \Sigma y_i^2)/2n = 0 \\ (\Sigma x_i/n - \Sigma x_i y_i/\Sigma y_i)x_0 + (\Sigma y_i/n - \Sigma y_i^2/\Sigma y_i)y_0 \\ + (\Sigma x_i^2 y_i + \Sigma y_i^3)/2\Sigma y_i - (\Sigma x_i^2 + \Sigma y_i^2)/2n = 0 \end{aligned} \right\} (3)*$$

をとりて求め、また曲率半径 r は

$$r = x_0^2 + y_0^2 - 2x_0 \Sigma x_i/n - 2y_0 \Sigma y_i/n + (\Sigma x_i^2 + \Sigma y_i^2)/n \dots \dots \dots (4)*$$



第 4 図

から求まる。ただし $i=1, 2, 3, 4, 5$ である。

なお、ある標点の単位圧力に対する変位量 δ/p を得るのには、用いた五つの内圧の和 $2.5+4.5+6.5+8.5+10.5=32.5$ で、その点について求められた各変位量

の合計を割った商を取る。

以上のような方法によって得られる実測値に基づく結果と比較するための、従来知られている理論式をかかけておく。

砂谷の式; 楕円断面をもつ管に対して、力学的な変形理論から導かれたものである。

$$S = p \frac{RBC'}{E} \dots \dots \dots (5)$$

ただし S ; 変位量, R ; 内圧 0 のときの半径

$$p; \text{内圧} \quad B = \frac{3a^4}{4bt^3} W$$

$$\left\{ \begin{aligned} W &= V - \frac{4\rho^2}{a^2}(1+U) \\ V &= 3 - e^2 + \frac{1}{2e}(5 - e^2)(1 - e^2) \log \frac{1+e}{1-e} \\ U &= \frac{1 - e^2}{2e} \log \frac{1+e}{1-e} \\ \frac{\rho^2}{a^2} &= \frac{1}{3} \{2 - e^2 + 1.3727(1 - e^2)\} \end{aligned} \right.$$

$2a$; 断面の長径, $2b$; 断面の短径

e ; 楕円断面の離心率

t ; 肉厚

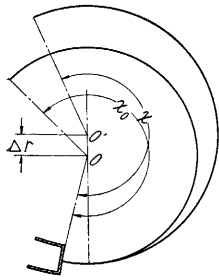
$$C' = \{2(1 - \cos\theta) - 2\theta\sin\theta + \theta^2\}^{1/2}$$

θ ; 変位量を求める点の中心角

E ; 材質の弾性係数

Lorenz の式; これは変位量を与える理論式ではなく、加圧前後の円弧の中心角の関係を示すもので(第5図)、

$$\frac{\chi_0 - \chi}{\chi_0} = \pi \frac{a}{h} \frac{b}{s} \frac{p}{E} \left\{ \frac{r_0^2}{k^2} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) - 1 \right\} \dots\dots\dots (6)$$



第 5 図

ただし χ_0 ; 加圧前の管弧の中心角 χ ; 加圧後の管弧の中心角 h ; 肉厚 s ; 楕円断面の全周 k ; 楕円断面の肉の部分の、断面中立軸に関する回転半径 r_0 ; 加圧前の管弧の半径

で与えられるが、変位量と関係のある中心角の変化が計算できるから、本実験による実測値から求められる値と比較するために使用する。

4. 感度の算出

ブルドン管の材質、円弧半径、断面形状および肉厚が一定であれば、管の中立線上の 1 点の変位量は、加えた内圧とその点の円弧に沿う中心角とで決まるから、その感度 S は

$$S = \frac{\partial \delta}{\partial p} \cdot \frac{1}{\theta} \dots\dots\dots (7)$$

で表わされるが、実際上の計算には、 $\frac{\partial \delta}{\partial p}$ を $\frac{\delta}{p}$ で近似して

$$S = \frac{\delta}{p} \cdot \frac{1}{\theta} \dots\dots\dots (7')$$

とする方が都合が良い。この値を中心角感度と呼ぶ。

また一般的に言えば、感度は中心角を横軸に、単位圧力あたりの変位量を縦軸にとってプロットしてできる曲線の勾配として定義されるから

$$S = \partial(\delta/p) / \partial \theta \dots\dots\dots (8)$$

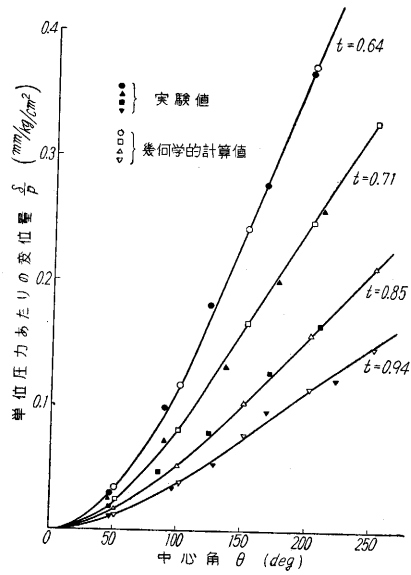
で表わされる。この値を公称感度と呼ぶ。

中心角感度は変位量の少ない株近傍をも含んだ中心角で割った値であるのに対して、公称感度の方は、考える点における中心角に対する変化の割合をとるのであるから、一般には両者は一致しない。

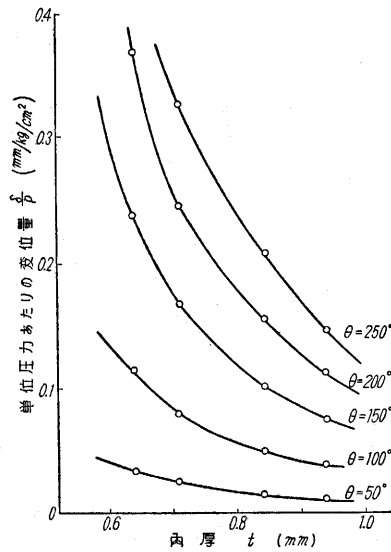
なおこの中心角としては、株に近い実際に動き始める点からのものを取るべきであるが、そう大きな差でもないから、通常のやり方に従って、管の株との接合点からの全角を用いることにした。

5. 実験結果とその考察

各標点の単位圧力あたりの変位量と、管の肉厚との関係を求めた例が第 6 図、第 7 図である。他の諸元がだいたい同じ管なら、肉厚が薄いものほど変位量は大きく、中心角が小さい範囲では肉厚の大小の影響はそう大きくはないが、中心角が大きい所では、その影響が非常に大きい。多くの例について調べてみると、曲線は不動点*から中心角とともに初めは徐々に次いで急に上昇し、後多少上昇度が減ずる傾向にある。本図中幾何学的計算値とあるのは、実測した各圧力に対する標点の座標から、(2)



第 6 図



第 7 図

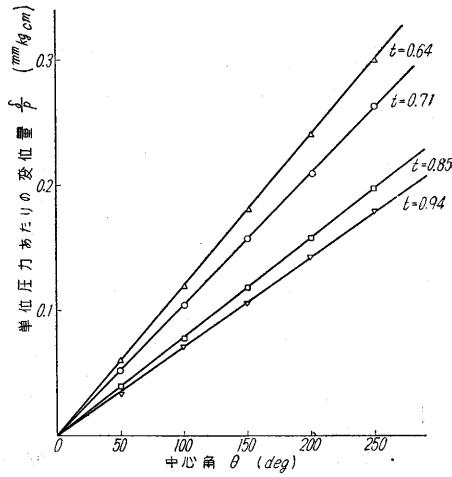
式の右辺の各項を計算で求め、これによって算出した δ にもとづく値を比較のためプロットしたものである。両者が非常によく一致していることから、逆に管の円弧性が内圧を受けても変わらないこと

わかるのである。

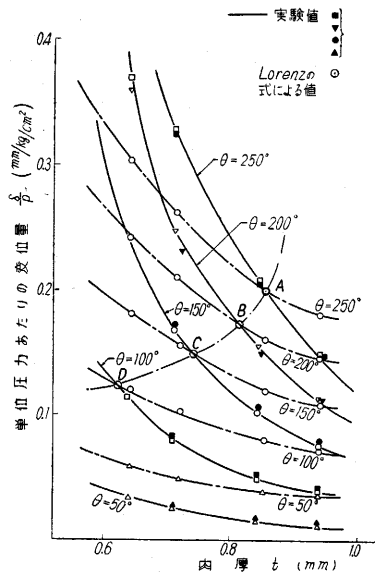
第 8 図、第 9 図は中心角に関しては実測値より出した値を用いず Lorenz の式によって算出し、これに実測値から求めた $r, \Delta r$ を組み合わせて、(2)式による δ を算出し、その結果をまとめたもの

で、第 6 図、第 7 図との比較のために掲げた。Lorenz 式を用いたものは、 δ/p の肉厚変化による影響が比較的ゆるやかである。第 10 図は第 7 図と第 9 図を重ねて画いたもので、両者の対応する曲線が交叉する所がある (点 A ~ D)。このあたりの肉厚は、工場での設計に際し、長年の経験から妥当と認められている値にかなり近いものであることは興味深いことである。なお砂谷の式(5)による計算の結果も比較のため示すべきであるが、この傾向は実験によるものとだいたい似ており、本実験の範囲外の高圧の方では数値も近づくようなのであるが、低圧部分では余り合わないのここには省略した。

第 11 図は内圧によって管円弧の曲率半径が変化する模様を示すものである。後述するように、ブルドン管にお



第8図



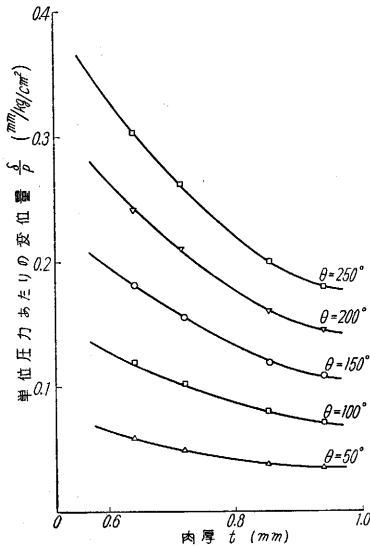
第10図

積効果もあるということである。また長径と短径とではいずれがその大小の δ/p に対する影響が大きいかを較べてみると、短径の方の影響がはるかに大きいことがわかる。

このような断面の形状に関する事柄は、ブルドン管の設計上特に重要な項目の一つであって、後にさらに触れることにする。

以上のデータから、ブルドン管の感度を計算してプロットしたのが第18図～第23図である。

肉厚をパラメータとした公称感度曲線(第18図)を見ると、中心角



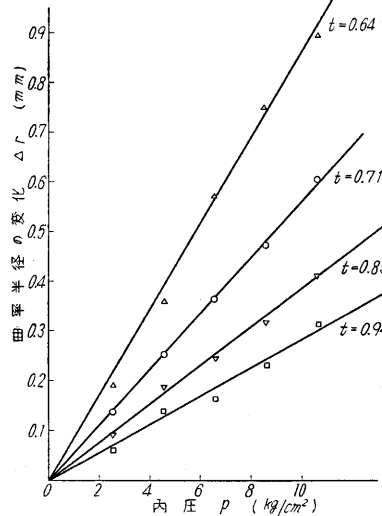
第9図

ける変位は内圧による断面形状の変化にもとづく円弧半径の変化によって起こされるものであるから、 $p-\Delta r$ 図は $p-\delta$ 図*と同じ傾向を示すべきものである。したがって、同じ p に対しては、肉厚が薄いものでは Δr が大きく、

肉厚の大きいものでは Δr が小さくなる。

次に第12図、第13図は、曲率半径をかなり大きな範囲に変えた試料グループによる実験結果で、曲率半径 r が δ/p に及ぼす影響を示している。 r が大きいものほど δ/p は大きく、中心角が大きい所では特に r の影響が著しい。また曲率半径の大きいものほど、曲線の傾斜がゆるやかになる位置が、管先に近い方へ寄っている。

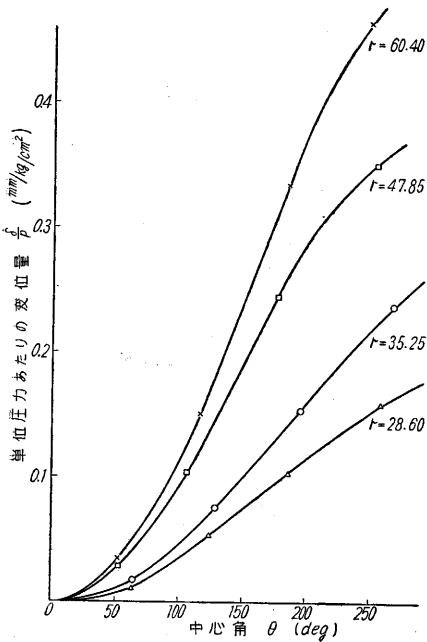
断面形状の影響としては、その長径 $2a$ および短径 $2b$ の大小が δ/p に関係するかを調べた(第14図～第17図)。これによれば同じ中心角の点に対して、長径はそれが大きいものほど、また短径はこれが小さいものほど δ/p が大きい。中心角が大きい所ではいっそうその効果が著しい。つまり扁平な断面形状のものほど、単位圧力に対して大きな変位量を与えるし、中心角による累



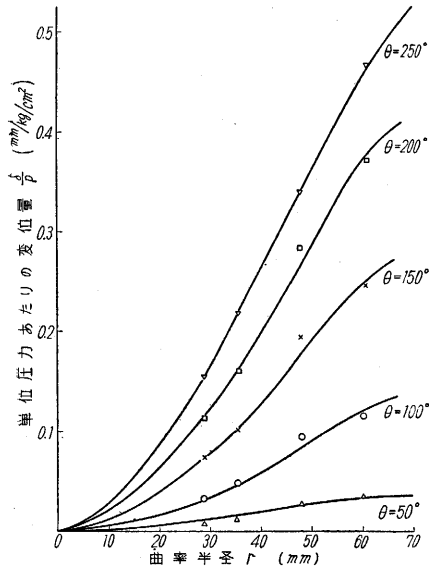
第11図

150° くらいまでは θ とともに次第に感度が増大しているが、それ以後はほぼ一定値となる。これは管端に近づくとき、変位量は中心角に比例した分しか増えず(つまり直線の変化)、累積作用がとまってくることで、もう一つは厳密には曲線である変位を、直線として取り扱っていることのためであろう。なお肉厚が薄いものほど感度が高く、肉厚が大きいものほど飽和が小さな中心角で始まる。

Lorenz の式を用いて出した $\delta/p-\theta$ の関係(第8図)から公称感度を求めると、これは中心角軸に平行な直線になる(第19図)。そして前図と比較してみると、中心角と肉厚の両者が大きい領域ではかなり良く合うようであるが、その他では大きくくい違い、したがって Lorenz の式は、ブルドン管の機能を十分にとらえたものとはい



第 12 図

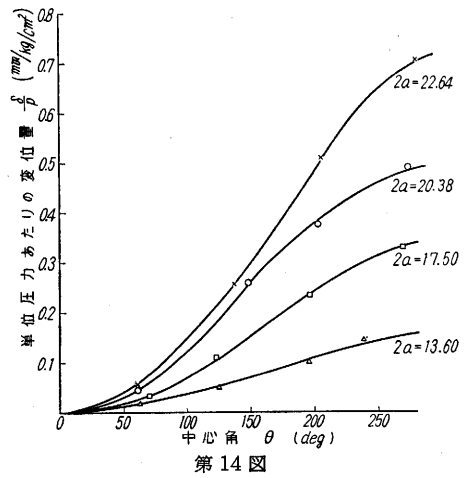


第 13 図

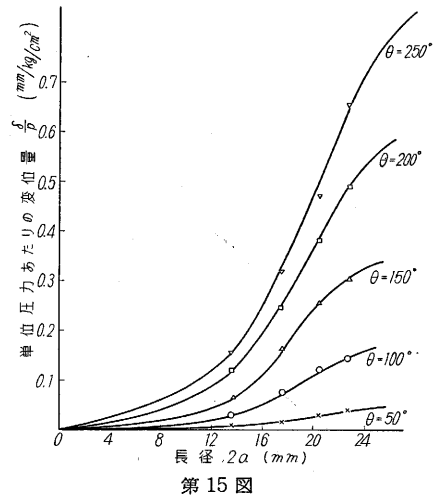
い難いように思われる。

肉厚をパラメータにした中心角感度の曲線 (第20図) は、公称感度曲線よりかなりゆるやかで、中心角が大きくなっても飽和に達する現象が見られない。これはブルドン管自体が一種の片持梁であって、仮にある中心角以上で断面変化がとまったとしても変位の累積作用はなくなるが、梁の長さ按比例した変位は残るからと考えられる。

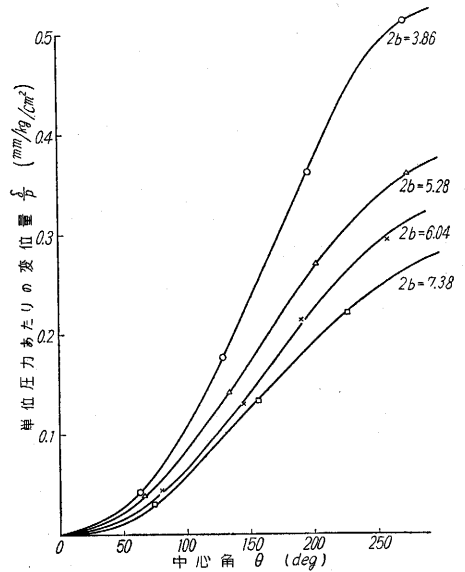
ブルドン管の実用目的からいえば、公称感度を調べ一定値に達した所の値で表わせば良いわけであるが、管の機能、動作の研究目的からは、中心角感度をも求めて比較検討することに意義があるのである。



第 14 図

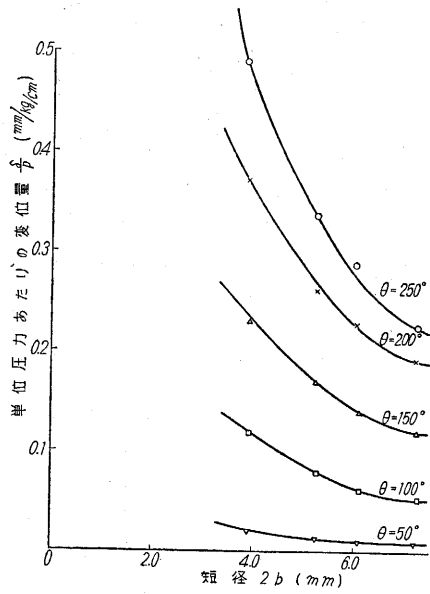


第 15 図

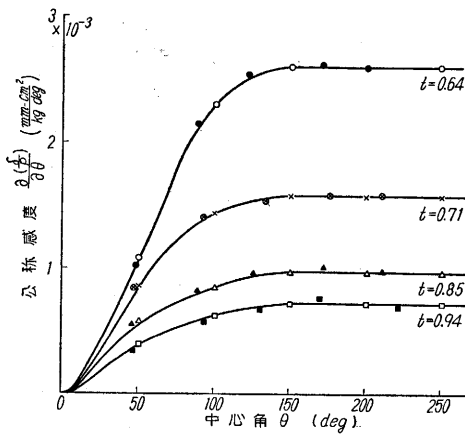


第 16 図

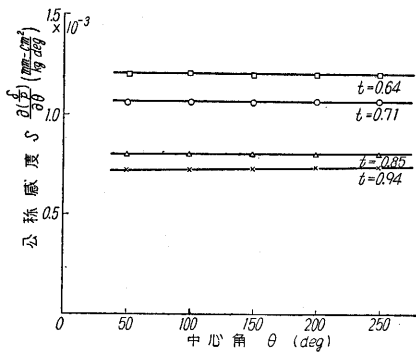
第 21 図, 第 22 図には、感度に影響を及ぼす因子である管の肉厚、曲率半径、長径、短径などと両感度との関



第17図



第18図

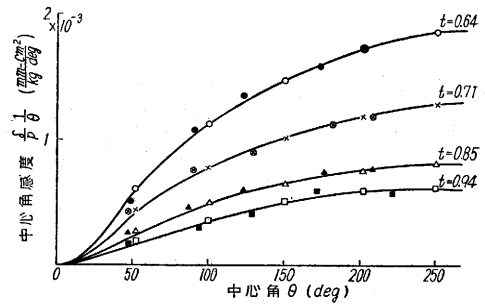


第19図

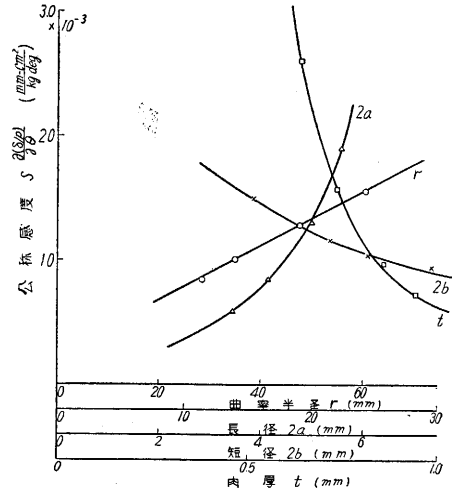
係を、管先に近い中心角の位置について、一括して表わしてみた。

また第23図には断面形状の主要因子である長径、短径の比と両感度との関係を、管先に近い所での値で対照してみた。

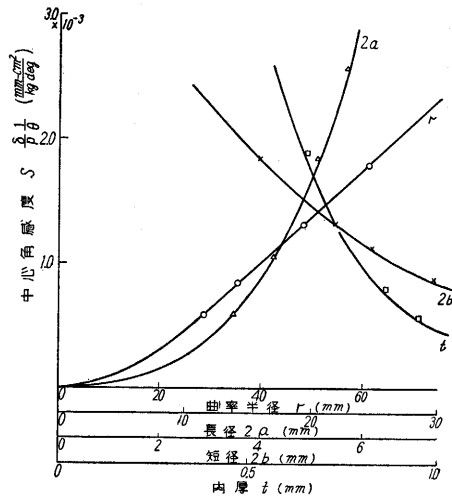
しかしこれらは一応得られているというだけで、管先付近の状況をもっと細かく調べてからでないと、その傾向や大小についての決定的なことはいえない。



第20図



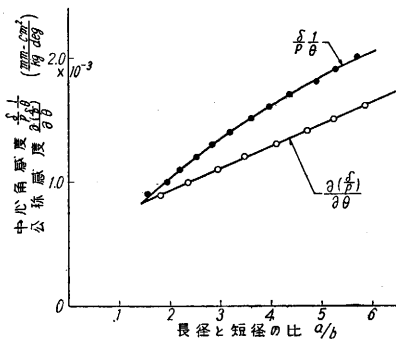
第21図



第22図

ここで、以上に挙げてきた実験結果が、ブルドン管が内圧によつてその円弧の曲率半径を変えるという力学的変化を起こす理由にさかのぼって見て、これからの統一な解釈に合うかどうかを考察しなければならない。

ブルドン管の根本の動作原理は、次の二つの効果によるものと解されている。その第1は管の内端面に働く圧力により、管の肉の部分はすべて、その点での管の円弧



第 23 図

に対する切線方向に引き伸ばされる。これが全体としての円弧の状態を曲率半径を増すように変化させると考えられる。た

だこの場合伸び率を計算してみると、これは極めてオーダの低い値であって、無視して差支えない程度のものである。

第 2 の原因は、管の横断面の変形にもとづくものである。これは管内面の端面以外の壁に、円弧半径方向に働く圧力によって起こされ、断面はいたる所でその短径は伸び、長径は縮小する。これによって管円弧の外側部分のものは、元より引き伸ばされた状態となり、内側部分のものは、元より圧縮された状態となる。これらが元の弧に戻ろうとする力がモーメントとなって、管を引き起こし円弧の曲率半径を増すような向きに作用すると考えられる。つまり各断面の短径の伸び、長径の縮みが、管上の点の変位を惹起する原因となるのである。薄肉円筒でないものこのようにした内圧による変形量を計算で求めることは容易ではないが、ただその値のオーダは、第 1 に挙げた伸びに比べて高いものであり、ちょうど棒を引張って伸ばすのは容易でないが、曲げにより撓ませるのは比較的容易なと同様である。したがってブルドン管の場合も、もっぱらこの第 2 の原因によって変位を生ずるといって良いのである。

ブルドン管の断面形状が一般に扁平に作られているのは、短径の伸びを容易にするためであり、円形断面のままのものでは、著しい変位を生ずることはできないのである。

このような考えによって、今回の実験結果を振り返って考察してみよう。

まず肉厚と変位量との関係であるが、肉厚が薄いものほど、内圧による断面形状変化が大きいはずであるから、変位量も大きく出るわけである(第 5 図)。そして断面形状変化があまり自由でない管の基および先に近い部分で、曲線の勾配がゆるやかになるのも自然であろう。管の基の方では、株への固着の影響があるうし、先の部分では、端面を封ずるため鏝を流し込んであったり、他のブロックを鏝付けしたりしてあるからである。以下のものにもすべて、これの影響と思われるものが現われている。

第 11 図の曲率半径の変化量については、肉厚の薄いものは変位量が多いことから、当然である。

曲率半径の大小の影響を示す第 12 図、第 13 図については、曲率半径の大きいものほど、同一中心角の点でも、断面形状の変化を起こす円弧の長さが大であり、中心角が大きくなると、その効果が累積されてゆくから、変位量が增大するのである。

長径、短径に関しては(第 14 図、第 16 図)、短径が同じなら長径の長い方が、また長径が同じなら短径が短い方が短径の伸びは容易であろうから、ここに現われた傾向も理解できる。

すでにちょっと述べたように、断面形状はブルドン管の感度、強度および工作の難易というような観点から、設計上極めて大切な項目なのである。感度上からは好都合の形でも、内圧により応力集中が起こり易いような鋭角に近い隅をもつ形状は避けなければならないし、またこのようなものは、工作上でも管を扁平につぶしたり円弧状を与えるためのロールを行なったりする際に、割れを生ずる恐れがあって好ましいものではない。また長径を大きくといっても、現実には管全体の容積や、工作の便などからの制限がある。実際に用いられているブルドン管の断面形状は、これらの総合的な考慮の上に立ってできているのであって、主なものを挙げてみると、楕円型、平円型、卵型、矩型、D型などになる。いま、長径および短径をある限界寸法内に抑えて、なるべく感度を高くしたいという要求だけに問題を限定すれば、それは長径端面の曲率半径をできるだけ小さく、短径端面のそれはできるだけ大きくということになるであろう。

6. む す び

以上、いままでに得られた実験値にもとづいて、ブルドン管の感度に関する考察の概略を述べたのであるが、もちろん、まだ十分な結果ではない。おおよその傾向が察知できて、今後さらにもっと詳細な実験を進めるための手がかりがつかめたという程度である。

ブルドン管に関しては、理論的にも実際的にも、まだほとんど未開拓領域といっているほど、解明すべき事柄が残っているのが現状である。物は簡単に見えるが、関係する因子が多く、事情が複雑で、一方面の専門家だけで解決されるとは思われない。多くの方々に、興味と関心を持っていただくことをお願いしたい。

なお本実験は、文部省科学助成金でその一部を行なったものであることを付記し、試料を提供された長野計器製作所ならびに実験に便宜を与えられた東大工学部西村源六郎先生に、厚く御礼申し上げます。(1960.6.15)

註；* 生産研究 第 8 巻 第 1 号 (1956・1)