

撓性二重管形態行状の予測

木 村 正 彦*

Flexible Suction Pipe of Double Wall

By Masahiko Kimura*

Synopsis: A double walled pipe, out of flexible and strong sheet, was proposed for use as a suction pipe, keeping its shape by stiffened double wall, through filling compressed gas between them, in spite of prevailing negative pressure inside the pipe, which might collapse it.

It is herewith theoretically examined, if this idea of the double walled pipe be reasonable, and is tried to foresee its shapes and behaviours under some simple conditions.

抄訳 撓性に富み丈夫な膜材からなる二重管が吸込管として使用されると提案された。管内には負圧が起っているので撓管なら内方に崩れ込む筈の所、二重壁の間に圧縮したガスを詰めるのでその層が堅くなり管形が保たれると言う。

ここではこの二重管のアイディアが合法的であるか否かを検し、2～3の簡単な条件の下で管形挙動の予測が試みられた。

は し が き

撓性膜の同心二重壁からなる二重管の壁間に圧縮空気等を詰めると、海水浴用ドーナツ型浮袋に空気を吹き込んだ場合から連想されるようにこの二重管も形を保って、例えばポンプの吸込管の如く内管には負圧を生じても管が収縮し内側が互に密着して管流路を閉塞する事のない管を得る。しかも不使用時に壁間の圧力を抜いて大気に開放すれば管はひらたくなるからリールに捲く事ができて運搬に便利である、と着想する者があった。この考えの合理性、応用性等を検討するに当り、常識的な構造をもつ二重管に於て外気、壁間、内管の圧力関係、構成部分の寸法比等に応じて特有な断面形をとって平衡する事に思い及び、数種の条件による各断面の形態を理論的に予測し本管批判あるいは開発努力への資料として提供するものである。

1. 概 要

この二重管は撓性が大きく、曲げに対して抵抗が無く引張り及び圧縮によっては変形しないと見做される膜から成り、内外壁の間隔を規制すべく放射状に定寸法の間隔壁を等ピッチに入れてあるがこの間隔壁には適宜に孔がもうけてあって、二重壁間はどこも同じ圧力をもつよ

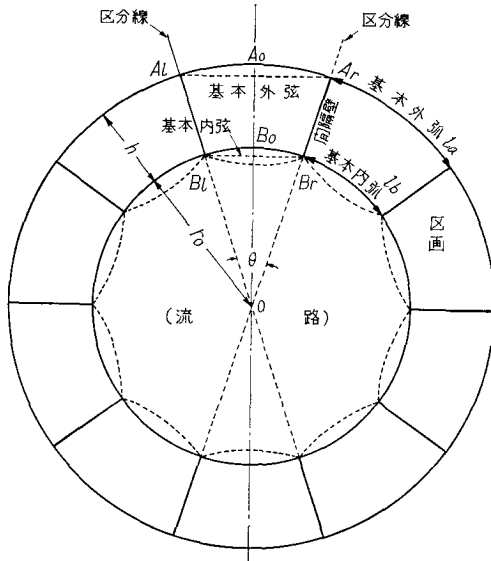
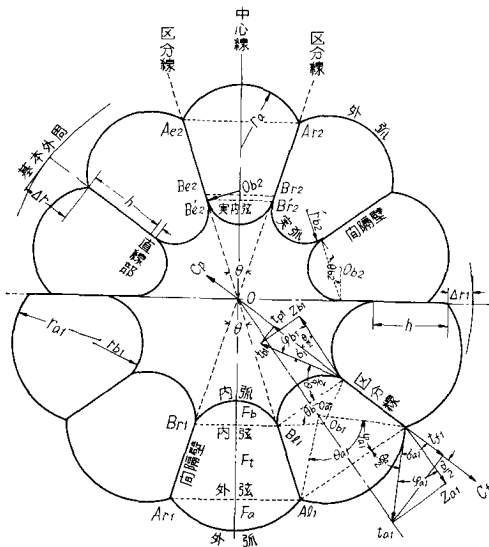
うになっている。この二重壁間に圧力を加えると外壁は外へひろろうとし、内壁は中心方向に収縮しようとする。しかし内外壁は間隔壁によってつながって居るから、外壁が間隔壁を外向きに引く力と内壁が間隔壁を中心方向に引く力が釣り合う時に管断面の形が定着する。その形は管中心を対称点とする環状である。圧力の関係を変えると平衡の位置が異なるので管断面も変る。管の構造によっても断面形は変る。各種条件による断面形を作図して変化の傾向、流路面積等を検討した。

2. 二重管の基本形及外臨界形

本二重管は二重壁間に圧力を加えない状態のもとで第1図に示すように内外壁を同心円とし、その中心点Oからの放射線上に間隔壁が存在する姿勢をとらせる事ができる。この形を基本形と名付ける。等ピッチに配列された間隔壁の数を n とすると、相隣る間隔壁により切り取られる内外壁の弧はそれぞれ n 個あり各弧が中心Oに対して張る中心角は $2\pi/n$ である。これを θ ラジアンであらわす事とする。また外壁の弧を基本外弧、内壁の弧を基本内弧と言う事にする。図のたて軸と外弧および内弧とが交る点をそれぞれ A_0 、 B_0 と名付ける。 A_0 の右方の間隔壁が外弧につながる点を A_r としその壁が内弧につながる点を B_r とする。同様に A_0 の左方の間隔壁が外弧および内弧につながる点をそれぞれ A_l および B_l とする。 $A_rA_0A_l$ は1基本外弧を成し A_0 はその中点であ

* 機械工学教室教授

Professor, Mechanical Engineering Division

第1図 基本形および外臨界形 $\Delta r=0$ 第2図 上半 内弧臨界を超えた城の形 $\Delta r=12$
下半 臨界間の一般形 $\Delta r=6$

る。弧 $B_r B_0 B_l$ は1基本内弧を成し B_0 はその中点である。図形 $A_r A_0 A_l B_l B_0 B_r A_r$ なる扇紙形を以後「区画」と呼ぶことにする。隣の区画もまったく同形であってこれが n 個つらなって O 点を中心とする環を成す。どの間隔壁もその延長は点 O に集っている。この線を区分線と呼ぶことにするが、この線は図上には記入されるけれども管の実体にはあらわれない線ではある。 A_r 点と A_l 点を結んだ直線は基本外弧 $A_r A_l$ の弦であるゆえに基本外弦と名付ける。同様に $B_r B_l$ は基本内弧 $B_r B_l$ の弦で

あるからこれを基本内弦と名付ける。基本形の内管の半径を r_0 とし、区画中心角が θ であらわされる事はすでに記したが、 $\theta \times r_0$ は基本内弧の長さであってこれを l_0 と記し、また $\theta \times (h + r_0)$ は基本外弧の長さであってこれを l_a と記すことにする。したがって $n \times l_0$ は基本形内管周長 $2 \times \pi \times r_0$ に等しく、 $n \times l_a$ は基本形外管周長 $2 \times \pi \times (h + r_0)$ に等しい。また基本外弦の長さは $2 \times (h + r_0) \times \sin \frac{\theta}{2}$ とあらわされ、基本内弦の長さは $2 \times r_0 \times \sin \frac{\theta}{2}$ とあらわされる。 $r_0, h, (h + r_0), \theta, l_a, l_0, 2 \times (h + r_0) \times \sin \frac{\theta}{2}, 2 \times r_0 \times \sin \frac{\theta}{2}$ は構造上の定寸法である。基本形において内弧のふくらみ方向を反対にしたものを第1図において破線で示した。この内側へ張り出した弧の半径はやはり r_0 であり弧は弦を対称軸として基本形弧に向い合っている。そして隣りとながつて波状線からなる環をなす。このものを内管壁とし他部分はまったく基本形と等しい形を外臨界形と呼ぶ事とする。以後の記述において「外」および「内」とは中心点 O に対しそれぞれ「遠い」および「近い」事を意味するものとする。

3. 断面変形を支配する法則

上に述べたような構造の二重管を垂直に吊るし二重壁間に圧力を加えかつ内管内には負圧を生ぜしめた場合に管断面形が変化しあるいは保持されるについてこれを支配する法則を考究した結果を列記する。

1) 各区画はすべて同一圧力条件を持つからその図形は皆まったく等しい。そして連鎖して中心点 O を中心とする環状形を成す。

2) 各区画の外弧は圧力により外に張り出ようとする。もしさまたげるものがなければ外弧は外臨界形と同じく $(h + r_0)$ を半径とする1個の円を形造るまでに張り切るであろう。しかし管壁をなす膜の材料が伸びないと見なされるので、この円以上には大きくはならない。「外臨界形」と名付けたゆえんである。

3) 各区画の内弧は外側から圧力により押しされ、内側からは負圧により引かれるから、もしさまたげるものがなければ内面を密着して点 O のまわりに集結収縮するであろう。しかるに実際にはさまたげるものがあるので無制限に収縮する事はない。

4) 外弧が外へ張り出される力(以後これを背心力と呼ぶ)と内弧が中心 O に収縮せしめられる力(以後これを向心力と呼ぶ)とはそれぞれ間隔壁の外端並びに内端に作用して互に引き合う。すなわち外弧と内弧とは間隔壁を介して互に相手の動きをさまたげようとする。その際背心力が向心力よりも大きい時は両力の差を以て間隔壁を外方に移動せしめる。各間隔壁が一様に移動する

から二重壁環は拡大する。向心力の方が大きい時は力の差を以て二重壁環は縮小する。背心力と向心力とが等しい時には力の平衡により二重壁環の拡大も減小も行われず静止して管形が定着する。

5) 間隔壁の両面はともに等しい圧力を受けかつ両端では背心力および向心力を以て引張られるからいつも直線をなし区分線上に存在する。したがって変形に拘らず区画の中心角を常に θ を保つ。

6) 各区画は $(l_a + l_b + 2h)$ なる周囲長さを持つ。この中に圧力がかかると図形は事情の許すかぎり大きな面積を持つとしようとするから、さまたげるものが無ければ同じ周長を持つ円となるであろう。しかし間隔壁は直線をなすべく強制されていると言う事情があるからひとつの円とはなり得ないで直線と円弧をつなげた周囲をもつ図形となる。以上のごとき法則にしたがって断面形は定まりあるいは変化する。

4. 区画の図形

1) 基本形における区画はすでに記述し第1図に示した通り同心円をなす内外壁からなる環を放射方向をもつ間隔壁 n 個により等分に仕切った、扇の紙部の形をしている。その1区画の面積を F_s と記すならば：—

$$\begin{aligned} F_s &= OA_r A_0 A_e O - OB_r B_0 B_i O \\ &= \theta(r_0 + h)^2/2 - \theta r_0^2/2 \\ &= (\theta/2)(2r_0 + h)h \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

この形は壁間も内管内も同じ圧力のときに採らせ得るのみである。

2) 外臨界形における区画の形は基本形におけるそれと内弧のふくらみ方向が異なるのみである。その1区画の面積を F_e と記するならばそれは式(1)に示す基本形区画面積に弦 $\overline{B_i B_r}$ と弧 $B_i B_0 B_r$ とに囲こまれる弓形面積の2倍を加えた値であるので：—

$$\begin{aligned} F_e &= (\theta/2)(2r_0 + h)h + 2\{(\theta/2)r_0^2 - (r_0^2 \sin \theta)/2\} \\ &= \theta h^2/2 + \theta h r_0 + \theta r_0^2 - (\sin \theta) r_0^2 \end{aligned} \quad (2)$$

とあらわされる。

この形は二重壁間も内管内も同じ圧力のときにのみ採り得るのであるが、これから二重壁間に圧力をかけようとする出発時態形とみればよい。

3) 外臨界形にある管の二重壁間に圧力を加えると第3章2)～6)に示す法則により各間隔壁が内側に移動して、外臨界形では各々 A_i , B_i , A_r , B_r であった間隔壁の端点がそれぞれ A_{i1} , B_{i1} , A_{r1} , B_{r1} へと内方へ一斉に等距離移る。その移動距離は Δr と記すことにする。弦 $\overline{A_{i1} A_{r1}}$ は弦 $\overline{A_i A_r}$ よりも小になり弦 $\overline{B_{i1} B_{r1}}$ も弦 $\overline{B_i B_r}$ よりも小となる。それに応じて外弧も内弦も円形のふく

らみを増す。特に外弧にあっては隣同志の弧がひとつの円をなさず、間隔壁上端とのつながり点で弧の張力には間隔壁方向の分力ができて間隔壁を外側へ引き出そうとする。隣りの区画の外弧端もこの間隔壁の外端点につながっていて弧の張力には間隔壁方向の分力を持つ。その大きさはどの弧でも同じだから間隔壁上端は1区画分の張力分力の2倍の力で外方へ引張られる。これを背心力と名付けてある。すべての間隔壁には等しい背心力がかかる。内弧についても同様にしてその端において間隔壁内端とつながり弧の張力の分力は間隔壁を内方に引張る。これは向心力である。背心力と向心力とが釣り合へば管形は定着するが差のあるときは大なる方へ間隔壁が移動する、ここにおいて管断面の変化は間隔壁の移動にしたがって起こり、その移動は区分線の上のみ各間隔壁が一斉に等値に行こなうものと認められる。したがってひとつの移動量 Δr についてはひとつの断面形が存在する。そして変形は鈎合状態に向って進行する。

(i) 外弦 $\overline{A_{i1} A_{r1}}$ および内弦 $\overline{B_{i1} B_{r1}}$ 第1および2図参照

間隔壁が Δr だけ内側に移動したときの区画图形について：—

$$\Delta A_i O A_r, \Delta A_{i1} O A_{r1}, \Delta B_i O B_r, \Delta B_{i1} O B_{r1}$$

はそれぞれ相似であるから

$$\frac{\overline{A_{i1} A_{r1}}}{A_i A_r} = \frac{O A_{i1}}{O A_e}$$

これに $\overline{A_i A_r} = 2(r_0 + h) \sin(\theta/2)$, $O A_i = r_0 + h$,

$O A_{i1} = r_0 + h - \Delta r$, を入れると,

$$\frac{\overline{A_{i1} A_{r1}}}{2(r_0 + h) \sin(\theta/2)} = \frac{r_0 + h - \Delta r}{r_0 + h}$$

となり整理すると,

$$\overline{A_{i1} A_{r1}} = 2(r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) \quad (3)$$

となる。

ここに外弦の長さが求められた。

内弦についても同様にして

$$\overline{B_{i1} B_{r1}} = 2(r_0 - \Delta r) \sin(\theta/2) \quad (4)$$

とあらわされる。

外弦 $\overline{A_{i1} A_{r1}}$ と内弦 $\overline{B_{i1} B_{r1}}$ とは平行であってその間隔は $h \cos(\theta/2)$ である。この量の中には Δr が入っていないゆえに内外弦の間隔は Δr の大きさに関係なく一定である。

(ii) 外弧 $A_{i1} A_{r1}$ およびその半径 r_{a1}

外弧は常に基本形外弧の長さに等しい。その値は：
 $l_a = (r_0 + h)\theta$ であらわされて、その中には Δr は含まれていない。その長さを似って外弦の両端は定点 A_{i1} および A_{r1} に連結し、しかも内圧により面積を最大に持とう

とするから外弧は $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ を弦に持つ真円弧となる。この円の中心は区画中心角の二等分線上にある。しかしその半径 r_{a1} は弧形がふくらんだので $\widehat{OA_{e1}}$ より短い。 A_{i1} 点を中心とし r_{a1} を半径とする円が区画の中心線と交る点を外弧の中心点 O_{a1} となる。弦 $A_{i1}A_{r1}$ を二等辺三角形 $A_{i1}O_{a1}A_{r1}$ の底辺と見るとき、 $A_{i1}A_{r1} = 2r_{a1} \sin(\theta_{a1}/2)$ なる関係がある。これと式(3)とを比較し、右边どうしを等しく置くと、 $2(r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) = 2r_{a1} \sin(\theta_{a1}/2)$ となる。

整理すると、 $r_{a1} = (r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) / \sin(\theta_{a1}/2)$ (5)

外弧 l_a を弦 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ についた半径 r_{a1} なる円弧と見るとき、 $l_a = r_{a1} \times \theta_{a1}$ とあらわされる。本項(ii)のはじめに記した通り $l_a = (h + r_0) \times \theta$ であるので両式から、

$$r_{a1} = (h + r_0) \times \frac{\theta}{\theta_{a1}} \quad (6) \text{ を得る。}$$

式(5)と式(6)の右边同志は等しいから

$$(r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) / \sin(\theta_{a1}/2) = (h + r_0) \times \frac{\theta}{\theta_{a1}}$$

を得る。

これを整理して、

$$\frac{\theta_{a1}}{\sin(\theta_{a1}/2)} = \frac{(h + r_0)}{(h + r_0 - \Delta r)} \times \frac{\theta}{\sin(\theta/2)} \quad (7)$$

と書く。

今 Δr の値を任意に定めたならば本式の右边は既知数だけになるから数値が算出される。すると θ_{a1} は唯一に定まる筈だが $\sin(\theta_{a1}/2)$ の形が入っている為に簡単には θ_{a1} の値が出ない。これを解くには次の方法をとるがよい。まず θ_{a1} の値として 0 から π に至る一連の角度値を書きならべ、その半角値 ($\theta_{a1}/2$) を次行に書きならべる。その $\theta_{a1}/2$ の“sin”値を一々三角関数表から引いて次行に書きならべる。次に第1行 θ_{a1} の値を第3行の $\sin(\theta_{a1}/2)$ で割った数〔すなわち $\theta_{a1} / \sin(\theta_{a1}/2)$ 〕を書きならべる。こうすると各 θ_{a1} の値について $\theta_{a1} / \sin(\theta_{a1}/2)$ の値を示す所の1種の三角関数表を作成した事となる。そこですでに算出した(7)式右边の値と同じ値を $\theta_{a1} / \sin(\theta_{a1}/2)$ の行で見い出すとその表の第1行目には θ_{a1} の値が読めるのである。次には(8)式へ θ_{a1} の値を入れて r_{a1} の長さがわかる。それから O_{a1} を求め外弧 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ を図上に描き入れる事は容易である。

(iii) 内弧 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ およびその半径 r_{b1}

内弧 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ の長さは外臨界形における内弧 $\widehat{B_iB_r}$ の長さ l_b に等しく、 Δr に関係なく常に一定長 $l_b = r_0 \theta$ である。その長さを持ち弦 $B_{i1}B_{r1}$ を張る円弧がすなわち内弧である。その円の半径を r_{b1} と記す。中心 O_{b1} は区画中心線上にあり、この点に関し弧の中心角は θ_{b1} と記す。半径 r_{b1} のもとでは、—

$$\theta_{b1} = \frac{\widehat{B_{i1}B_{r1}}}{r_{b1}} = \frac{l_b}{r_{b1}} \text{ である。}$$

$$\text{半径 } r_0 \text{ のもとでは：— } \theta = \frac{\widehat{B_iB_r}}{r_0} = \frac{l_b}{r_0} \text{ となる。}$$

$$\text{よって、} \theta_{b1} \times r_{b1} = \theta \times r_0, \text{ ゆえに } r_{b1} = r_0 \frac{\theta}{\theta_{b1}} \dots\dots (8)$$

と r_{b1} があらわされる。

弦 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ をこの r_{b1} を半径とする円の弦と見れば：—
弦 $\widehat{B_{i1}B_{r1}} = 2r_{b1} \sin(\theta_{b1}/2)$ となる。またこれを二等辺三角形 $B_{i1}O_{b1}B_{r1}$ の底辺と見るならば：—

弦 $\widehat{B_{i1}B_{r1}} = 2OB_{i1} \sin(\theta/2)$ となる。上2式の右边同志は等しいから $r_{b1} \sin(\theta_{b1}/2) = (r_0 - \Delta r) \sin(\theta/2)$

$$\text{ゆえに } r_{b1} = (r_0 - \Delta r) \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\theta_{b1}/2)} \quad (9)$$

(8)式と(9)式の各右边は相い等しいから：—

$$r_0 \frac{\theta}{\theta_{b1}} = (r_0 - \Delta r) \frac{\sin(\theta/2)}{\sin(\theta_{b1}/2)} \text{ となる。これを整理すると；}$$

$$\frac{\theta_{b1}}{\sin(\theta_{b1}/2)} = \frac{r_0}{(r_0 - \Delta r)} \times \frac{\theta}{\sin(\theta/2)} \quad (10) \text{ となる。}$$

Δr を一応定めると右边は既知数だけとなるのでその値は算出される。残る未知数は θ_{b1} であって唯一に定まるべきところ $\sin(\theta_{b1}/2)$ が存在するので簡単には解けない。しかし今は先に作成した θ_{a1} と $\theta_{a1} / \sin(\theta_{a1}/2)$ の表があるから、これを利用して式(7)から θ_{a1} を求めたと同様に式(10)から θ_{b1} が求められる。これを式(8)に代入すれば r_{b1} が求められる。それから O_{b1} 点を定め弧 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ を図中に描き入れる事が容易にできる。

以上により、ある Δr の値に対しひとつの区画の間隔壁、外弦および内弦、外弧および内弧の大きさや位置が皆わかって図に描く事ができた。区画を n 個つなぐと二重管の断面となる。計算例では Δr はある一定の値に定めとしたが種々な Δr の値にとればそれぞれ異なる断面形が求められるのである。

(iv) 区画の面積 F_1 および内管流路面積 F_{i1}

[A] 間隔壁が Δr_1 だけ内方に移動した場合の区画面積 F_1 は弦 $A_{i1}A_{r1}$ と弦 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ とに囲まれた面積 F_{a1} と梯形 $A_{i1}A_{r1}B_{r1}B_{i1}$ の面積 F_{t1} 並びに弦 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ と弧 $B_{i1}B_r$ とに囲まれた面積 F_{b1} との和として求めるがよい。 $F_1 = F_{a1} + F_{t1} + F_{b1}$

$$\textcircled{\text{B}} F_{a1} = \pi r_{a1}^2 \times \theta_{a1} / 2\pi - (r_{a1}^2 \times \sin \theta_{a1}) / 2 \\ = (r_{a1}^2 / 2) (\theta_{a1} - \sin \theta_{a1})$$

$$\textcircled{\text{C}} F_{t1} = (1/2) (A_{i1}A_{r1} + B_{i1}B_{r1}) h \cos(\theta/2) \\ = (h/2) \{ 2(r_0 - \Delta r) + h \} \sin \theta$$

$$\textcircled{\text{D}} F_{b1} = (r_{b1}^2 / 2) (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1})$$

$$\text{ゆえに } F_1 = (r_{a1}^2 / 2) (\theta_{a1} - \sin \theta_{a1}) + (h/2) \{ 2(r_0 - \Delta r) \\ + h \} \sin \theta + (r_{b1}^2 / 2) (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \\ = [\{ (h + r_0) \theta / \theta_{a1} \}^2 / 2] (\theta_{a1} - \sin \theta_{a1})$$

$$+ (h/2) \{2(r_0 - \Delta r) + h\} \sin \theta \\ + \{(r_0 \theta / \theta_{b1})^2 / 2\} (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \quad (11)$$

[B] 上記区画周のうち内弧 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ を環状につなげた内側の面積は管のその時の流路面積 F_{I1} である。

このものの1区画分の面積は三角形 $OB_{i1}B_{r1}$ の面積から弓形 $\widehat{B_{i1}B_{r1}B_{i1}}$ の面積を差し引いたものである。

$$\frac{F_{I1}}{n} = \frac{B_{i1}B_{r1}}{2} (r_0 - \Delta r) \cos \frac{\theta}{2} - (r_{b1}^2/2) \times (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \\ = (r_0 - \Delta r) \sin \frac{\theta}{2} (r_0 - \Delta r) \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} r_{b1}^2 (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \\ = (r_0 - \Delta r)^2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} r_{b1}^2 (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \\ = \frac{1}{2} \{ (r_0 - \Delta r)^2 \times \sin \theta - r_{b1}^2 (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \} \quad (12')$$

1 管分の流路面積：—

$$F_{I1} = (n/2) \{ (r_0 - \Delta r)^2 \times \sin \theta - r_{b1}^2 (\theta_{b1} - \sin \theta_{b1}) \} \quad (12)$$

5. 区画に掛る力

前章(4—3)節において「外臨界形以内の区画形」が明に示された。この管がゲージ圧力 0 kg/cm^2 なる大気圧に囲まれ、二重壁内にはゲージ圧力 $P_s \text{ kg/cm}^2$ の圧力をかけ、内管内にはゲージ圧力 P_i なる負圧がかかっているとする。

第2図参照

(i) 外弧 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ には弧壁内外の圧力の差 ($P_s - 0$) $= P_s \text{ kg/cm}^2$ が外向(弧の法線方向)に平等に分布している。この力の弦 $\overline{A_{i1}A_{r1}}$ に垂直方向(区画中心線方向)の分力は、周知の如く弦 $\overline{A_{i1}A_{r1}}$ 上に $P_s \text{ kg/cm}^2$ の圧力が分布しているものと同じである。その値は $\overline{A_{i1}A_{r1}} \times P_s \text{ kg}$ である。但し管長 1 cm とする。

外弧 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ は端点 A_{i1} 並に A_{r1} でそれぞれ間隔壁外端点につながり $\overline{A_{i1}A_{r1}}$ を弦とする円弧をなしている。のであるから各端点における接線方向に間隔壁外端点を引張る。これは弧の張力である。この張力は1区画分弧全長に渉り圧力 $P_s \text{ kg/cm}^2$ を受けて弧に生じた力を2端点に2等分してそれぞれ掛るものである。しからばその1端の張力の区画中心線方向の分力は $(1/2) \times \overline{A_{i1}A_{r1}} \times P_s$ である筈である。また弧の端点 A_{i1} および A_{r1} における接線と端点を通る半径は直角をなし、各半径の交点は当然円弧 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ の中心 O_{a1} であり、それは区画中心線上にある。両半径がなす角は弧 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ の中心角 θ_{a1} に外ならない。そこで円の弦と接線のなす角は弦の中心角の $1/2$ に等しいと言う幾何の定理を適用して、弦 $\overline{A_{i1}A_{r1}}$ と点 A_{i1} における弧の引張力線とのなす角は $\theta_{a1}/2$ である事を知る。また引張力線と間隔壁とのなす角を σ_{a1} と記せば、 $\sigma_{a1} = (1/2)(\theta + \pi - \theta_{a1})$ となる。区画中心線と引張

力線とのなす角を φ_{a1} と記せば $\varphi_{a1} = (1/2)(\pi - \theta_{a1})$ となる。ついでには引張力の大きさを t_{a1} とするとその区画中心線方向の分力が $(1/2) \overline{A_{i1}A_{r1}} \times P_s \text{ kg} = Z_{a1}$ なのだから、 $t_{a1} \cos \varphi_{a1} = (1/2) \overline{A_{i1}A_{r1}} \times P_s$ なる関係がある。ゆえに $t_{a1} = (1/2) \overline{A_{i1}A_{r1}} \times P_s / \cos \varphi_{a1}$ として弧 $\widehat{A_{i1}A_{r1}}$ の張力をあらわす事が出来る、 φ_{a1} 、 $\overline{A_{i1}A_{r1}}$ の値をそれぞれ代入すると：— $t_{a1} = (r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) \times P_s / \sin(\theta_{a1}/2)$ (13) 隣の区画においてもこれと等値であって区分線(間隔壁の乗る線)を対称線として向い合っている引張力がある。間隔壁の方から言えばその左右の区画の外弧に圧力がかかる為に前記引張力がかかって来る。しかるにその両引張力の間隔壁に垂直な方向の分力は互に消し合うので間隔壁を横様にずらせようとする事は無い。残る間隔壁の方向の分力を t_{f1} と記すと、これは次の如くあらわされる：—

$$t_{f1} = t_{a1} \times \cos \sigma_{a1} = t_{a1} \times \cos \{ \pi/2 - (\theta_{a1} - \theta)/2 \} \\ = t_{a1} \times \sin \{ (\theta_{a1} - \theta)/2 \} \\ \{ (13) \text{式を代入すると} \} \\ = \{ P_s \times (r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) / \sin(\theta_{a1}/2) \} \\ \times \sin \{ (\theta_{a1} - \theta)/2 \} \quad (14)$$

この分力は両引張力について同値同方向であるので上記(14)式の値の2倍の大きさで間隔壁を外方に引張るのである。この力はすでに背心力と名付けてある。その記号を C_f とすると：—

$$C_f = 2 \{ P_s \times (r_0 + h - \Delta r) \sin(\theta/2) / \sin(\theta_{a1}/2) \} \\ \times \sin \{ (\theta_{a1} - \theta)/2 \} \quad (15)$$

この背心力のことを相い隣る左右の両弧が共通な間隔壁との結合点にそれぞれ作用する引張力を合成したものであると言ってもよい。

(ii) 内弧 $\widehat{B_{i1}B_{r1}}$ の端点における接線張力を t_{b1} と記す。 t_{b1} の弦 $\overline{B_{i1}B_{r1}}$ とのなす角は $\theta_{b1}/2$ であり、 t_{b1} と間隔壁(区分線)とのなす角を σ_{b1} と記すと、

$$\sigma_{b1} = \angle OB_{i1}B_{r1} - \theta_{b1}/2 = \pi/2 - \theta/2 - \theta_{b1}/2 \\ = \pi/2 - (\theta/2 + \theta_{b1}/2) \text{ とあらわされる。}$$

t_{b1} の弦 $\overline{B_{i1}B_{r1}}$ に垂直方向の分力 z_{b1} は $t_{b1} \times \sin(\theta_{b1}/2)$ であってそれが $(1/2) \overline{B_{i1}B_{r1}} \times (P_s - P_i)$ と等しい。

$$\text{ゆえに } t_{b1} = (1/2) \overline{B_{i1}B_{r1}} \times (P_s - P_i) / \sin(\theta_{b1}/2) \quad (16)$$

として t_{b1} の大きさを知る。張力 t_{b1} の間隔壁方向の分力を t_{p1} と記すならば、

$$t_{p1} = t_{b1} \times \cos \sigma_{b1} = t_{b1} \times \cos \{ \pi/2 - (\theta/2 + \theta_{b1}/2) \} \\ = t_{b1} \times \sin(\theta/2 + \theta_{b1}/2) = \{ (1/2) \overline{B_{i1}B_{r1}} \\ \times (P_s - P_i) / \sin(\theta_{b1}/2) \} \sin \{ (\theta + \theta_{b1})/2 \} \quad (17)$$

とあらわれる。 t_{b1} と z_{b1} との間の角を φ_{b1} と記すと $\varphi_{b1} = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_{b1}}{2}$ 。隣接区画の内弧が点 B_{i1} に作用する張力

は大きさ t_{b1} であってその間隔壁上の分力は t_{p1} に等しい。したがって間隔壁は内方に向って t_{p1} の2倍の力で引張られる。これは向心力とすでに名付けてあるが C_p と記す事とする。なお $2 \times t_{p1}$ は左右の弧の張力 t_{b1} の合力であってそれが間隔壁と方向が一致している。したがって間隔壁を左右にずらすような力は存在しない。間隔壁はその線上の背心力と向心力とに引かれて一直線をなす。

$$C_p = 2t_{p1} = 2\{ (r_0 - \Delta r) \sin(\theta/2) \times (P_s - P_i) \} / \sin(\theta_{b1}/2) \times \sin\{(\theta + \theta_{b1})/2\} \quad (18)$$

(iii) 間隔壁へ掛る背心力と向心力とが釣り合う場合には管断面の形はそこへ定着する。しかし釣り合わない場合には断面は釣り合う形状にまで変化してゆくのである。

ここでは二重壁間の空室は大きな一定圧力源につながっていて断面の変化によって室の体積が変っても圧力は一定に保たれるものとして置く。

平衡して定着する断面形を求めるには管の構造および使用圧力を定めてから、 Δr をパラメーターとして各 Δr 値について背心力および向心力を計算してグラフとし、背心力と向心力との差が0となる点の値を見出し、それにもとづいて作図するがよい。

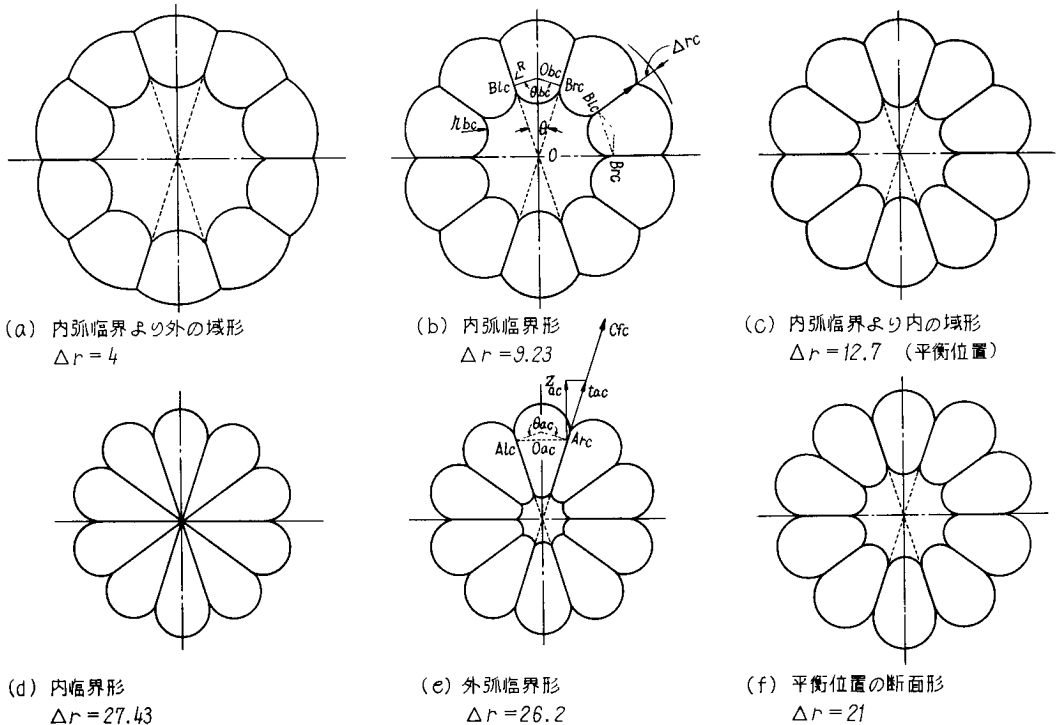
6. 臨界形

二重管の外管壁がもっとも拡大した形を外臨界形として第II章に述べた。それ以外にも臨界形と名付くべきものがあるので本章にまとめて述べる。第3図参照

1) 内弧臨界 第3図(b)

(i) 区画の間隔壁が方向は維持しながら移動する量 Δr が小な域では背心力が向心力に劣るので Δr を増し両力が等しくなる方へと区画形が変化してゆく。その際外弦と内弦はともに小となるが外弧も内弧も長さは縮まらずに基本形弧長 l_0 , b_0 を保つ、それだけに弧のふくらみが深くなってゆく。そして内弧壁の成す円弧が弦端において間隔壁に接するに至る。この形を内弧臨界形と呼ぶことにする。この位置における区画の形の特徴は弧の中心 O_{bc} と弦の端とを結ぶと半径となり、それは間隔壁に垂直となる事にある。四角形 $O B_{ic} O_{bc} B_{rc}$ の内角のうち2箇がそれぞれ直角となるから残る θ_{bc} と θ の和は π である。ゆえに $\theta_{bc} + \theta = \pi$ として θ_{bc} の値が知れる。 $\theta_{bc} = l_0 / r_{bc}$ であるから $r_{bc} = l_0 / (\pi - \theta)$ として弧の半径 r_{bc} の値が知れる。

$$\overline{B_{ic} B_{rc}} = 2 \times r_{bc} \cos(\theta/2) = \{2l_0 / (\pi - \theta)\} \cos(\theta/2) \quad (19)$$



第3図 Δr による断面の種々相(a)~(d)は第1例, (e)~(f)は第4例

として内弦の長さが知れる。そのものはまた

$$2(r_0 - \Delta r) \times \sin(\theta/2) \text{ としてもあらわされるから;}$$

$$\{2l_b/(\pi - \theta)\} \cos(\theta/2) = 2(r_0 - \Delta r) \times \sin(\theta/2)$$

と置き $l_b = r_0 \theta$ を入れて整理すると:—

$$\Delta r_e = r_0 [1 - \theta / \{(\pi - \theta) \tan(\theta/2)\}] \quad (20)$$

として外臨界から内弧臨界に至るまでの間隔壁移動量 Δr_e を得る。これでこの位置における区画の図形が作図される。

(ii) 内弧臨界における内弧の張力 t_{be} は丁度間隔壁線上にある。そしてその弦に垂直の方向の分力は $(1/2) \overline{B_{e2}B_{r2}} \times (P_s - P_i)$ に等しく、弦への垂直線と間隔壁との成す角は $\theta/2$ であるので、 $t_{be} \times \cos(\theta/2) = (1/2) \overline{B_{e2}B_{r2}} \times (P_s - P_i)$ なる関係がある。ゆえに

$$\begin{aligned} t_{be} &= \overline{B_{e2}B_{r2}} (P_s - P_i) / 2 \cos(\theta/2) \\ &= \{r_0 \theta / (\pi - \theta)\} (P_s - P_i) \end{aligned} \quad (21)$$

隣る区画も同じで弧端の張力も同大かつ間隔壁の線の上に重なっている。ここでは向心力 C_{pe} は t_{be} の 2 倍である。 $C_{pe} = 2\{r_0 \theta / (\pi - \theta)\} (P_s - P_i)$ (22)

2) 内弧臨界を超えて区画が内側に移動した場合

(i) 内弧の図形 第2図上半参照

内弦 $\overline{B_{e2}B_{r2}}$ がさらに短くなるので内弧のふくらみはさらに深くなり、その端点 B_{e2} , B_{r2} の付近では間隔壁を超えて隣りへ張り出そうとし同様な隣区画の内弧と干渉する結果両弧壁は間隔壁線の上に密着して短い直線部を成し残る弧壁が実際の円弧となって他側間隔壁線にかかりそこから間隔壁線に沿ひ弦端までは短い直線部となる。図について示せば基本形弧長 l_b は B_{e2} から B'_{e2} までは直線をなしそれから円弧となって B_r 側の間隔壁線上の B'_{r2} に至りふたたび直線になって B_{r2} に至るのである。ゆえに $l_b = \overline{B_{e2}B'_{e2}} + \overline{B'_{e2}B'_{r2}} + \overline{B'_{r2}B_{r2}}$, そして弧 $\overline{B'_{e2}B_{r2}}$ は真円弧であって点 B'_{e2} および点 B'_{r2} において間隔壁線にそれぞれ接して居る。このとき $\overline{B_{e2}B'_{e2}} = \overline{B'_{r2}B_{r2}}$ 。実際の弧 $\overline{B'_{e2}B'_{r2}}$ の中心角 θ_{b2} は $(\pi - \theta)$ である。その弧の半径 r_{b2} は $r_{b2} = \overline{B'_{e2}B'_{r2}} / (\pi - \theta)$ と示される。 $\Delta O_{b2}B'_{e2}$ は直角三角形だから

$$\begin{aligned} r'_{b2} / \overline{OB'_{e2}} &= r_{b2} / (\overline{OB_{e2}} - \overline{B_{e2}B'_{e2}}) \\ &= r_{b2} / \{(r_0 - \Delta r_2) - \overline{B_{e2}B'_{e2}}\} = \tan(\theta/2) \end{aligned}$$

となる。これらの関係から次の式も導かれる:—

$$\begin{aligned} \text{弧壁端直線部 } \overline{B_{e2}B'_{e2}} &= \{l_b - (\tan(\theta/2)(\pi - \theta)(r_0 \\ &\quad - \Delta r_2)) / \{2 - (\tan(\theta/2)(\pi - \theta)\} \} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{実弧半径 } r_{b2} &= \{2(r_0 - \Delta r_2) - l_b\} \tan(\theta/2) / \\ &\quad \{2 - (\pi - \theta) \tan(\theta/2)\} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{実弧長 } \overline{B'_{e2}B'_{r2}} &= \{2(r_0 - \Delta r_2) - l_b\} \times (\pi - \theta) \\ &\quad \times \tan(\theta/2) / \{2 - (\pi - \theta) \tan(\theta/2)\} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{実弧の弦 } \overline{B'_{e2}B'_{r2}} = 2\{2(r_0 - \Delta r_2) - l_b\} /$$

$$\{2 - (\tan(\theta/2)(\pi - \theta))\} \sin(\theta/2) \quad (26)$$

すでに述べた Δr_e よりも大きな値をもつ Δr_2 をひとまずきめて各図形寸法を諸式により算出すると作図が容易に出来る。

(ii) 向心力

基本弧壁のうち実弧 $\overline{B'_{e2}B'_{r2}}$ の部分のみが内管圧力を受ける。残る直線部弧壁は間隔壁へ張力を伝える役目をする。実弧にかかる外管圧は例の如く実弧弦へ垂直方向に $(1/2) \overline{B'_{e2}B'_{r2}} \times (P_s - P_i)$ の力をつける。実弧端における張力は内弧臨界と同様に間隔壁線方向を採る。それと弦に垂直な方向とは $\theta/2$ の角を成すゆえに張力の大きさ t_{b2} は $t_{b2} \cos(\theta/2) = \frac{1}{2} \overline{B'_{e2}B'_{r2}} \times (P_s - P_i)$ なる関係から求められる。これと隣弧の張力と合して向心力 $C_p = \overline{B'_{e2}B'_{r2}} \times (P_s - P_i) / (\cos(\theta/2))$ [式(26)を入れると] $= 2 \tan(\theta/2) \{2(r_0 - \Delta r_2) - l_b\} (P_s - P_i) / [2 - \{ \tan(\theta/2) \} (\pi - \theta)] \dots (27)$

この力が間隔壁を内側に引いて壁を逆に外へ引く背心力に対抗するのである。そして釣合の位置に向って変形移動する。この域においては内弧の一部は間隔壁とともに直線を成すので実際の内弧は小となる、したがって向心力は減じてくる。

(iii) この域における区画面積のうち弦 $\overline{B_{e2}B_{r2}}$ より内側の面積は梯形 $B_{e2}B_{r2}B'_{r2}B'_{e2}$ と弓形 $\overline{B'_{e2}B'_{r2}}$ との和である、梯形の方は $(1/2) (\overline{B_{e2}B_{r2}} + \overline{B'_{e2}B'_{r2}}) \times \overline{B_{e2}B'_{e2}} \cos(\theta/2)$ であらわされ、弓形の方は $(1/2) r_{b2}^2 \left\{ \pi - \theta - \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \right\}$ であらわされその和が求める面積となる。

内管の流路面積は $\Delta O_{b2}B_{r2}$ の面積 $(r_0 - \Delta r_2)^2 \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2}$ から上記梯形と弓形の和を差し引いたものの n 倍である。

3) 内臨界 第3図(d)参照

前項に述べたように区画が内側に移動して向心力が減ってもなお背心力よりも強いとき区画はさらに内側に進み基本弧壁のうち間隔壁の延長に就く部分が多くなり遂には弧壁の中点が管中心に達し弧壁は頂角 θ なるV型に折れ直線のみとなる。全区画が同じ形を採るから断面中央に集結し、あたかもみかんを水平切りにしたような模様を呈する。これを内臨界形と称することにする。内管流路面積が無くなり管の用をなさなくなる。もっともこのような形では向心力がなくなるので背心力に引かれて管はいくらか拡大する。つまり釣合はこの臨界に達する前に起ると考えられる。はじめに外臨界形では背心力が0であったから向心力に引かれて管面積は縮るように変形してゆくと述べた、それが進行した極限が内臨界形であって、このときは向心力が0である。よってその中間に背心、向心両力が等しくなる所の釣合いの位置があるのである。

4) 外弧臨界 第3図(e)参照

区画が内側へ移動するにつれて外弦は段々短くなるのに対し外弧は一定値 l_a を保つから弧のふくらみが深くなって外弧端が丁度間隔壁に接する形をとる位置がある。これを外弧臨界と呼ぶ事にする。

(i) 外弧臨界における区画形の特徴は弧の中心 O_{ac} と弧端 A_{ec} を結ぶ半径 r_{ac} は間隔壁に直角となることである。

これにより弦の張る中心角は $(\pi-\theta)$ であり、弧の中心角 θ_{ac} は $(\pi+\theta)$ となる。 $r_{ac}=\frac{l_a}{\pi+\theta}$ として r_{ac} が定まる。

外弦 $\overline{A_{ec}A_{rc}}=2r_{ac}(\cos\theta/2)$ 、同じ弦が $2\overline{A_{ec}O}\sin(\theta/2)$ である所から $A_{ec}O=r_{ac}/(\tan\theta/2)$ となる。間隔壁の移動量を Δr_{ac} と記すと $\overline{A_{ec}O}=(h+r_0-\Delta r_{ac})$ となるから、

$$\Delta r_{ac}=(h+r_0)-r_{ac}/\tan(\theta/2) \quad (28)$$

としてこの臨界の位置が求められる。以上により外弧臨界における管断面が作図される。

(ii) 弦 $\overline{A_{ec}A_{rc}}$ と外弧 $\overline{A_{ec}A_{rc}}$ とで囲む面積は扇形面積と三角形に分けて計算し和を求めるのが便利である。すなわち $r_{ac}^2\{1/2(\pi+\theta)+\sin(\theta/2)\cos(\theta/2)\}$ とあらわされる。

(iii) 弧端における張力 t_{ac} は間隔壁上にあり、その大きさは $t_{ac}/\cos(\theta/2)=\{r_{ac}\cos(\theta/2)\}P_s$ により求められるが隣の弧の張力も同じであるのでこれを加えたと背心力 C_{fc} となる。 $C_{fc}=2r_{ac}P_s\times\cos^2(\theta/2)$ (29)

5) 外弧臨界を超えた域における外弧の図形

この域では外弧はますます短くなるのに外弧長 l_a は一定を保つから弧のふくらみを深くするので弧端 A_{e4} の付近では間隔壁線から隣へふくれ出す部分が出来て、隣の同じような弧壁の部分と干渉してその部分は間隔壁線に沿った直線となり(あたかも間隔壁が外方へ延長したような形となり)残る弧壁が実際の弧形をなし、しかも間隔壁線を離れる点 A'_{e4} 、 A'_{r4} では接点となっている。

(i) そこで本章2)(i)内弧臨界を超えた域の区画図形について述べた所と同じ手法により、

弧壁端直線部 $\overline{A'_{e4}A'_{r4}}=\{l_a-(h+r_0-\Delta r_{a4})(\pi-\theta)\tan(\theta/2)\}/\{2+(\pi+\theta)\tan(\theta/2)\}$ (30)

実弧長 $\overline{A'_{e4}A'_{r4}}=\{l_a+2(h+r_0-\Delta r_{a4})\}(\pi+\theta)\tan(\theta/2)/\{2+(\pi+\theta)\tan(\theta/2)\}$ (31)

実弧半径 $r'_{a4}=\{l_a+2(h+r_0-\Delta r_{a4})\}\tan(\theta/2)/\{2+(\pi+\theta)\tan(\theta/2)\}$ (32)

ただし $(\pi+\theta)$ は実弧の中心角の値である。

実弦長 $A'_{e4}A'_{r4}=2r_{a4}\cos(\theta/2)=2\{l_a+2(h+r_0-\Delta r_{a4})\}\sin(\theta/2)/\{2+(\pi+\theta)\tan(\theta/2)\}$ (33)

などが Δr の各値について算出される。

(ii) 実弧にかかる圧力のうち外弦に垂直な分力を弧の両端で分担したものを垂直力 z_a と言うことにしてある。これの大きさは $1/2$ 弦長 $\times P_s$ kgとあらわされる。弧端の張力の方向はこの場合区分線(間隔壁が乗る線)と一致している。それで弧張力線と垂直力線とは $\theta/2$ の角をなす。垂直力 $\times\cos(\theta/2)$ =弧張力の関係がある。よって:

弧張力 $r_{a4}=\frac{1}{2}$ 弦長 $\times P_s\times\cos(\theta/2)$ となる。隣区画の弧張力も同じくここにかかるから弧張力の2倍が背心力 C_f となる。

$$C_f=2t_{a4}=\text{弦長}\times P_s\times\cos(\theta/2)=2r'_{a4}\{\cos(\theta/2)\}^2P_s \quad (34) \text{ となる。}$$

この式は外弧臨界のときの C_f の式(29)と同様だがこの場合は実弧の半径 r'_{a4} を用いている。(32)式で示された r'_{a4} の値を(34)式に代入すると:-

$$C_f=P_s\sin\theta\{l_a+2(h+r_0-\Delta r_{a4})\}/\{2+(\pi+\theta)\tan(\theta/2)\} \quad (34') \text{ となる。}$$

7. 数 値 例

1) 第1例

基本形諸量:-

内管半径	$r_0=40\text{mm}$
間隔壁長さ	$h=20\text{mm}$
したがって基本外円半径	$r_0+h=60\text{mm}$
区画分割数	$n=10$

このものにつき図形上の寸法、背心力、向心力、その差なる不平衡力、流路断面積などを計算し、第1表として表示し、第1~3図を作図した。

第1図には基本形および外臨界形($\Delta r=0$)における管断面を現尺で、第3図(a)には外臨界以内で内弧臨界までの形状の例として $\Delta r=4$ の位置のものを $1/2$ 縮尺で、第2図下半には同じく $\Delta r=6$ の位置のものの半分を現尺で、第3図(b)には内弧臨界($\Delta r=9.23$)におけるものを $1/2$ 縮尺で、第2図上半には内弧臨界以内の例として $\Delta r=12$ におけるものを現尺にて、第3図(c)には $P_s=2$ 、 $P_s=-1$ の条件にて背心力と向心力が釣り合う $\Delta r=12.7$ の位置のものを $1/2$ 縮尺にて、第3図(d)には内臨界形($\Delta r=27.43$)の断面形を $1/2$ 縮尺にて示した。また第3図(e)には後述する第4例の外弧臨界($\Delta r=26.2$)形を、同じく(f)には同じく第4例の平衡位置($\Delta r=21$)の管断面を $1/2$ 縮尺で示した。

これにより:-

(i) 基本諸量が与えられると間隔壁が基本位置から区分線上を移動した距離 Δr の各値について管断面はそ

れぞれ定った形を成すこと、管内圧力 P_i および P_o の関係により背心力と向心力が釣り合って定着する管断面形も上記の形のひとつであることが示された。

(ii) Δr の値が大きくなる程管断面が小さくなるのであるが特に内管の流路断面積が小さくなる事が顕著である。そして内臨界に至って管は閉塞する(第3図(d)参照) 実際の使用に当っては平衡位置断面を保持するのだ

から基本形を相当に大きく製作するものと心得ねばならない。

(iii) 外臨界と内臨界との間に内弧臨界臨界や外弧臨界(第4例に現われる)があるが、これらの中間の臨界では断面形の変化が他の位置と同様に円滑に行われて、不連続になる様子はない。

2) 第1～4例

第1表 第1例 $h=20, r_0=40, n=10$

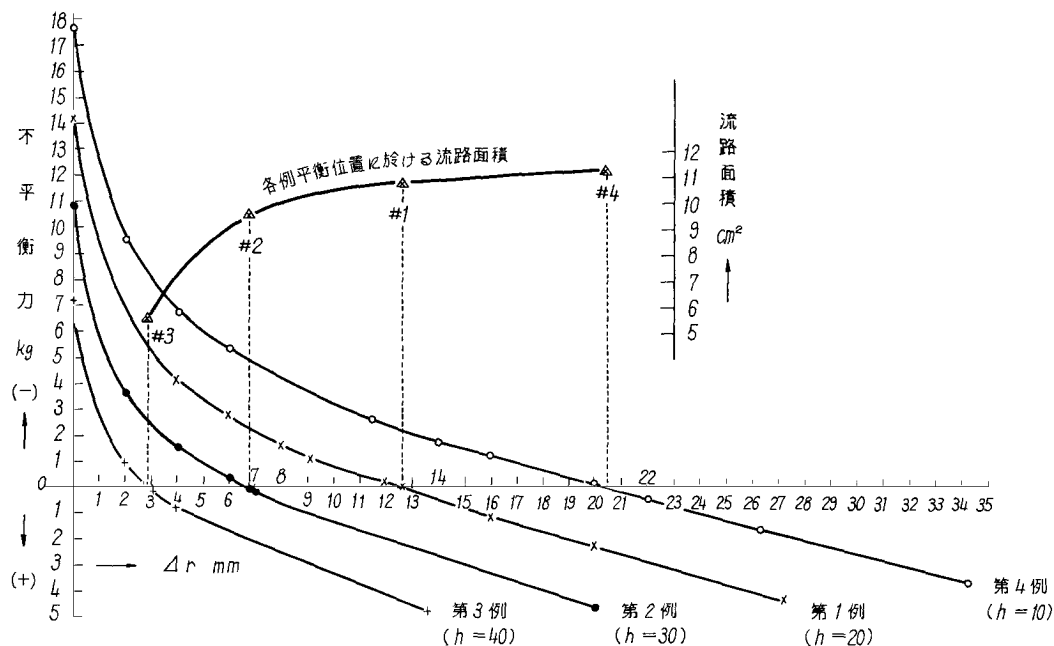
Δr mm	外 弦	内 弦	外 弧		内 弧		ち か ら			区 画	流 路	借 考
	$\overline{A_e A_r}$ mm	$\overline{B_e B_r}$ mm	中心角 θ_a °	半 径 r_a mm	中心角 θ_b °	半 径 r_b mm	背 心 C_f kg	向 心 C_p kg	不平衡 $C_f - C_p$	面 積 cm ²	面 積 cm ²	
0.0	37.1	24.7	36.0	60.0	36.0	40.0	0.00	14.11	-14.11	69.30	43.78	外 臨 界
4.0	34.6	22.3	82.0	26.3	97.0	14.9	4.12	8.18	- 4.06	76.95	30.36	
6.0	33.4	21.0	96.8	22.3	116.7	12.3	4.38	7.23	- 2.85	77.62	25.25	
8.0	32.2	19.8	110.0	19.6	134.2	10.7	4.72	6.41	- 1.69	77.60	19.14	
9.2	31.4	19.0	118.1	18.3	144.0	10.0	4.80	6.00	- 1.20	77.08	17.36	内弧臨界
12.0	29.7	* 16.2	134.4	16.1	144.0	* 8.5	4.87	5.10	- 0.23	75.81	13.15	
12.7	29.2	* 15.4	138.0	15.6	144.0	* 8.1	4.87	4.87	0.00	74.89	11.92	平衡位置
16.0	27.2	* 12.0	155.1	13.9	144.0	* 6.3	4.79	3.79	+ 1.01	71.74	7.18	
20.0	24.7	* 7.8	178.3	12.1	144.0	* 2.4	4.68	2.45	+ 2.23	66.56	3.00	内 臨 界
27.4	20.1	0.0	208.3	10.4	0.0	0.0	4.16	0.00	+ 4.16	53.53	0.00	

第2表 第2例 $h=30, r_0=30, n=10$

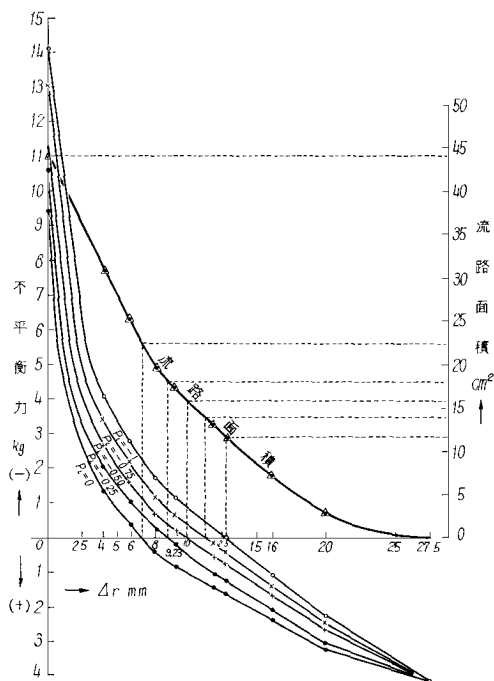
Δr mm	外 弦	内 弦	外 弧		内 弧		ち か ら			区 画	流 路	備 考
	$\overline{A_e A_r}$ mm	$\overline{B_e B_r}$ mm	中心角 θ_a °	半 径 r_a mm	中心角 θ_b °	半 径 r_b mm	背 心 C_f kg	向 心 C_p kg	不平衡 $C_f - C_p$	面 積 cm ²	面 積 cm ²	
0	37.1	18.5	36.0	60	36.0	30.0	0.00	10.86	-10.86		24.62	外臨界
2	35.8	17.3	63.0	34.3	81.3	13.3	3.20	6.83	- 3.63			
4	34.6	16.0	81.2	26.6	110.2	9.8	4.10	5.61	- 1.52			
6	33.4	14.8	96.5	22.3	134.0	8.1	4.52	4.82	- 0.30			
6.7	32.7	14.4	101.4	21.3	141.4	7.6	4.61	4.57	+ 0.04		10.62	平衡位置
7	32.9	14.2	103.5	20.8	144.5	7.5	4.63	4.47	+ 0.16			

第3表 第3例 $h=40, r_0=20, n=10$

Δr mm	外 弧	内 弦	外 弧		内 弧		ち か ら			区 画	流 路	備 考
	$\overline{A_e A_r}$ mm	$\overline{B_e B_r}$ mm	中心角 θ_a °	半 径 r_a mm	中心角 θ_b °	半 径 r_b mm	背 心 C_f kg	向 心 C_p kg	不平衡 $C_f - C_p$	面 積 cm ²	面 積 cm ²	
0	37.1	12.4	36.0	60.0	36.0	20.	0.00	7.05	- 7.05		10.65	平衡位置
2	35.8	11.1	60.5	34.4	96.4	7.5	3.14	4.09	- 0.95 ^p			
2.8	35.4	10.6	70.4	30.6	112.5	6.4	3.64	3.69	- 0.05 ^p		6.56	
2.9	35.3	10.6	71.4	30.1	114.5	6.3	3.70	3.64	+ 0.06 ^f			
3	35.2	10.5	72.4	29.8	116.4	6.2	3.73	3.62	+ 0.11 ^f			
4	34.6	9.9	81.2	26.6	134.5	5.4	4.09	3.21	+ 0.88 ^f			



線図Ⅰ 第1～第4例 不平衡力と平衡位置ならびに流路面積
 $P_s=2$, $P_t=-1$, kg/cm^2 ゲイジにて



線 図Ⅱ 管内圧力変化の影響

第4表 第4例 $h=10$, $r_0=50$, $n=10$

Δr mm	外 弦	内 弦	外 弧		内 弧		ち か ら			区 画	流 路	備 考
	$\overline{A_e A_r}$ mm	$\overline{B_e B_r}$ mm	中心角 θ_a °	半 径 r_a mm	中心角 θ_b °	半 径 r_b mm	背 心 C_f kg	向 心 C_p kg	不平衡 $C_f - C_p$	面 積 cm ²	面 積 cm ²	
0	37.1	30.9	36.0	60.0	66.5	50.0	0.00	17.63	-17.63		68.42	外 臨 界
2	35.9	29.7	63.5	33.8	66.5	27.0	3.13	12.63	- 9.50			
4	34.6	28.4	82.3	26.2	87.4	20.5	4.14	10.85	- 6.71			
6	33.3	27.2	96.4	22.3	103.6	17.3	4.51	9.74	- 5.23			
11.5	30.0	23.8	131.2	16.5	144.0	12.5	4.86	7.50	- 2.64			
14	28.4	実21.2	145.2	14.9	144.0	実11.1	4.86	6.68	- 1.82	12.32	$\Delta r=20.7$ が平衡位置	内弧臨界
16	26.5	実19.1	155.7	13.9	144.0	実10.0	4.68	6.03	- 1.35			
20	24.7	実15.5	174.3	14.7	144.0	実 8.1	4.63	4.87	- 0.25			
22	23.5	実12.8	183.5	11.8	144.0	実 6.8	4.51	4.05	+ 0.46			
26.2	20.8	実 8.5	216.0	10.9	144.0	実 4.4	4.36	2.67	+ 1.69			
34.29	実16.4 (15.7)	9.7	216.0	実 8.6	0.0	0.0	3.60	0.00	+ 3.60	55.78	3.60	外弧臨界
										27.53	0.00	内 臨 界

第5表 負圧変化の影響

Δr	$P_i=2$	$P_i=-1$		$P_i=-0.75$		$P_i=-0.50$		$P_i=-0.25$		$P_i=0$	
	C_f	C_p	不平衡力	C_p	不平衡力	C_p	不平衡力	C_p	不平衡力	C_p	不平衡力
0	0.00	14.11	-14.11	12.95	-12.95	11.35	-11.35	10.50	-10.59	9.44	- 9.44
4	4.12	8.18	- 4.06	7.50	- 3.38	6.81	- 2.69	6.13	- 2.01	5.45	- 1.33
6	4.38	7.23	- 2.85	6.63	- 2.28	6.03	- 1.75	5.43	- 1.05	4.82	- 0.44
8	4.72	6.41	- 1.69	5.89	- 1.17	5.34	- 0.62	4.81	- 0.09	4.27	+ 0.45
9.23	4.80	6.00	- 1.20	5.49	- 0.69	5.00	- 0.20	4.50	+ 0.20	4.00	+ 0.80
12	4.87	5.10	- 0.23	4.68	+ 0.19	4.25	+ 0.62	3.82	+ 1.04	3.40	+ 1.47
12.70	4.87	4.87	0.00	4.47	+ 0.40	4.06	+ 0.81	3.65	+ 1.22	3.25	+ 1.62
16	4.79	3.79	+ 1.00	3.48	+ 1.31	3.16	+ 1.63	2.84	+ 1.95	2.52	+ 2.27
20	4.68	2.23	+ 2.45	2.04	+ 2.64	1.86	+ 2.62	1.67	+ 3.01	1.49	+ 3.19
27.43	4.16	0.00	+ 4.16	0.00	+ 4.16	0.00	+ 4.16	0.00	+ 4.16	0.00	+ 4.16

基本形の外周円半径と区画分割数 n は第1例と同じく $r_0+h=60$, $n=10$ であるが間隔壁の長さ h が, 第2例では $h=30$, したがって, $r_0=30$, 第3例では $h=40$, したがって, $r_0=20$, 第4例では $h=10$, したがって, $r_0=50$, と与えられ各例について $P_i=2$, $P_i=-1$ のもとに第1例と同じ計算をしてそれぞれ第2表, 第3表, 第4表に記入した。そのうち第4例に関し第3図(e)(f)に断面を示した。

第1～4表により『線図Ⅰ』に各例の不平衡力 ($C_f - C_p$) と Δr の関係をプロットした。

(i) 線図Ⅰ ではたて軸に不平衡力を取り, よこ軸には Δr 値を取り各例の不平衡力と Δr との関係曲線を描いた。各曲線がよこ軸と交る点は不平衡力が0, すなわち平衡の位置を示す。各例の平衡位置の点上にその流

路面積をたて長さにとってそれぞれの点をつなぐ事により流路面積曲線を追加記入した。

(ii) h 値の小なる程外臨界 ($\Delta r=0$) の不平衡力値が大きくそれが各例同じように Δr 値とともに減少するので平衡位置の流路面積は h が小な程大きいことが認められるこれを #1 Δ と #4 Δ の2点で見ると Δr 値は 20mm 中の 8mm の差 (40%) があるのに流路面積については 11cm² 中の 0.4cm² の差 (3.6%) で甚だ小さい。

3) 二重壁中に詰める圧力 P_e と内管負圧値 P_i の影響
第1例について $P_e=2$ を保ちつつ P_i 負圧を -1 , -0.75 , -0.50 , -0.25 , 0 の5種とした各場合の背心力, 向心力, 両者の差たる不平衡力をそれぞれ計算し第5表に記し, また『線図Ⅱ』に負圧各値について不平衡力曲線ならびに平衡位置の流路面積線を描いた。

第6表 区画分割数の影響

分割数 n	6								10				12			
	0	2	4	10	11	12	14	0	4	6	12.7	0	2	6	10.14	12
θ°				60						36				30		
l_a mm				62.832						37.7				31.416		
l_b mm				41.888						31.42				20.942		
Δr mm	0	2	4													
外 弦 mm	60.00	58.00	56.00	50.00	49.00	48.00	46.00	37.08	34.61	33.37	29.23	31.06	30.02	27.950	25.80	24.85
内 弦 mm	40.00	38.00	36.00	30.00	29.00	28.00	26.00	30.90	22.25	21.01	15.43	20.70	19.67	17.599	15.44	14.49
外弧中心角 $^\circ$	60.00	79.07	94.00	130.93	136.58	138.81	151.80	36.00	82.00	96.7	13.8	30.00	59.74	95.08	122.43	132.55
外弧半径 mm	60.00	45.53	38.30	27.50	27.07	25.90	23.76	60.00	26.34	22.32	15.60	60.00	30.13	18.93	14.70	13.58
内弧中心角 $^\circ$	60.00	86.77	107.1	*120.00	*120.00	*120.00	*120.00	36.00	97.00	116.40	14.4	30.00	69.96	114.65	150.00	*150.00
内弧半径 mm	40.00	27.66	22.41	*13.22	*11.77	*9.01	*7.39	40.00	14.86	12.34	8.11	40.00	17.15	10.47	8.00	*7.24
C_f 背心力 kg	0	3.018	4.478	6.392	6.536	6.500	6.812	0	4.12	4.38	4.87	0	3.093	4.074	4.252	4.750
C_p 向心力 kg	20.78	16.180	13.342	7.933	6.963	6.576	4.426	14.11	8.18	7.23	4.87	12.01	7.884	5.977	4.800	4.393
$C_f - C_p$ kg	-20.78	-13.162	-8.864	-1.541	-0.427	-0.076	+2.386	-14.11	-4.06	-2.85	0	-12.01	-4.791	-1.903	-0.548	+0.357
外臨界 cm^2																
流路面積	32.94															
平衡位置																
流路面積								43.78			11.92	45.74				4.09 (Δr 11.3)

(i) 内管負圧値が大きい程外臨界における不平衡力が大であるが各曲線ともだいたい同様に降下するので平衡位置値は負圧値が大きい程大きい。そして各平衡位置の流路面積は負圧値が小なる程大きい。

(ii) 上記は負圧値を減じてゆく影響を考えたものであるがその効果は二重壁間への圧力をあげたときも同じ傾向をもつ。すなわち二重壁間の圧力を増加させると平衡位置の流路面積が大きくなる。

4) 区画分割数の影響

基本形外管の半径は60mmと定めこれを6分割($n=6$)したときおよび12分割($n=12$)したときの諸値を計算しそれと第1例(10分割)の諸値(第1表)を加えて第6表に示す。この表について区画分割数の変化の影響を見ると:—

(i) 外臨界形の流路面積は $n=6$ のとき 32.94cm^2 , $n=10$ のとき 43.78cm^2 , $n=12$ のとき 45.74cm^2 であるに対し平衡位置におけるそれはそれぞれ 4.09cm^2 , 11.92cm^2 , 4.09cm^2 である。これによれば n 数が小の時並に大のときは本面積は小で中間の値が大であるので最大値が存在すると察せられる。

(ii) 前記外臨界における各流路面積からそれぞれ平衡位置の流路面積を差引いた量を、その平衡位置の Δr の長さで割った値は n が 6, 10, 12 の順にそれぞれ $(32.94 - 4.09)/12 = 2.41$, $(43.78 - 11.92)/12.7 = 2.51$, $(45.74 - 4.09)/11.3 = 3.69$ と算出された。これは Δr の増加とともに縮小してゆく流路面積の平均縮小率が分割数の増加とともに増大する事を示す。

む す び

1) 着想された二重管は合理的なものと認められる。

2) 簡単な条件のもとにおける本管の形態, 行状が理論的に予測され, 数値例により図, 表に現らわされ, それについて若干の性能も推定された。これは本管を実物化しようとする際の基礎的資料となるものである。(横置, 曲り部の場合についても予測検討すべきであるが時間の都合で後にゆずる。)

3) 本管実施について最大の問題は材料にある。あまり厚くない膜で撓性が大で高強度で特に摩耗損傷に強い事が要求される。本管は荒らい取扱いが予想されるのに, 一箇所でも孔があくとか破れるとかすると二重壁間のガス体が漏れ出て圧力が下り管形が収縮して流路面積がなくなり使用不能となるからおそろしいのである。基本材料のみならず縫合接着の材料も重要である。これらの材質が良好でかつあまり高価でなく多量に入手できなくては実用に向かない。

4) 本筋からやや離れた事かもしれないが, 第1表の『区画面積』の欄を見ると $\Delta r=0$ の位置から Δr が増すにつれて区画面積は増加するが, しばらくすると減じだして内臨界に至るまで減小を続ける。 $\Delta r=6$ の付近に区画面積最大の位置があると判断される。今仮りに区画内(二重壁間)へ非圧縮性の水を注入するとすれば区画面積最大の形で満腹しそれ以上入らぬであろう。そこで詰栓をほどこせば, いかなる力がかかっても他の形へは変移しないから管形が完全に保たれるであろう。これを例へばキャンプ用等のキャンパス製バケツに応用したら一寸便利ではなかろうか。ただしこの様式のものには力を加えすぎると二重壁や間隔壁が破裂することを警戒せねばなるまい。

(本文受付 昭和42年9月30日)