

385  
69

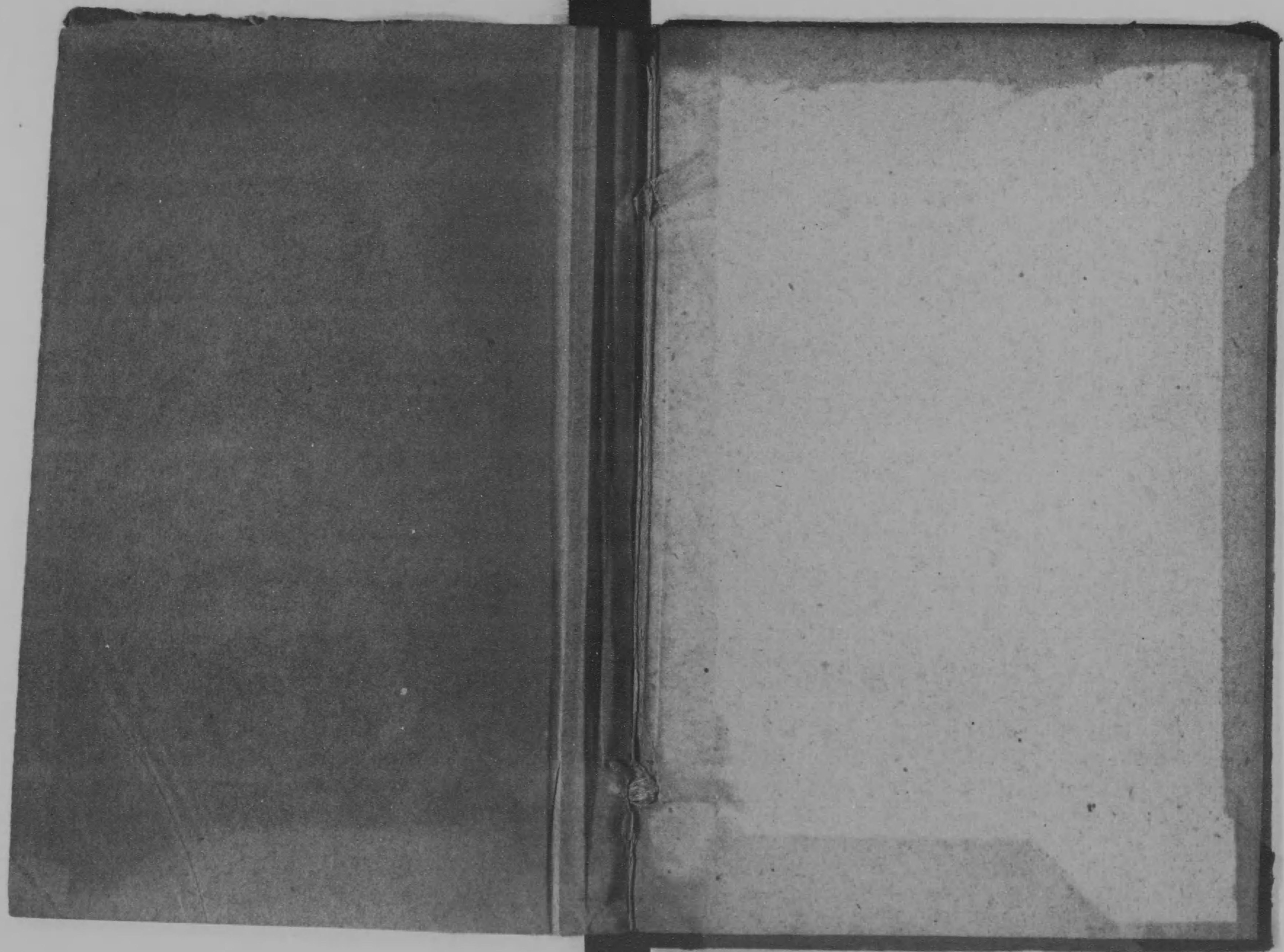
圓  
竹  
筒  
の  
強  
度



始













序文

今や生存競争日々劇しさを加へつゝあるの時、如何なる職業  
 に従事するものも、内に學を修め心を養ひ、外に忠實其職に勵  
 み、以て成績の優秀を期するに非ざれば、一身一家の生存幸福  
 は望み難きのみならず、終に社會の落伍者たらざるを保せず。  
 就中吾等の従事する鐵工業は、世界的事業中最も困難なるもの  
 の一にして、從て其の改良進歩の度も一層急劇なれば、之に従  
 事するものは、牢乎として抜く可らざるの決心を以て、仕事の  
 側ら常に修養に志し、自己の前途を開拓するに勉めて、敢て人  
 後に落ちざらん事を期せざる可らず。況んや世界列國平和の大戦  
 争は益々劇甚にして、事實は正に干戈相見ゆるの實戦よりも寧ろ

正人  
 外交



る猛烈なるものあるに於てをや。然かも鐵工業の如き國家の榮枯盛衰に最も重大なる關係を有する事業に従事する吾等は、夫れ果して如何にして優勝の地歩を占め得べきか。要は吾等一同益々科學的知識を研きて之を實地に應用し、忠實熱心に其の職務に盡し、斷乎として此の平和の戦局に力爭するの外なきを信ず。斯の如くにして始めて、優良の成績を擧げて世界競争場裡に勝者の地歩を占め、國力の充實國運の發展因て以て期し得らるべきなり。而して其の基く所實に各人の修養啓發如何に在り  
と謂ふべし。

余は夙に諸子が職務の餘暇を善用して自ら修養せんことを獎勵したき考あり。或は獎學法を設けて實業補習學校に通學を勸誘

し、或は勞力新聞其の他小冊子を分配して讀書を獎勵しつゝあるは、諸子の知る所の如し。然かも尙之を以て足れりさせず、英國滞在中、各種専門の學理初步及技術に關する小冊子百餘種を選び、携へ歸へりたるゆる、之を各専門學者に頼みて簡易に翻譯し、茲に印刷に附して、各々其の職業に關係あるものを選びて各員に配附すべし。之に要する費用又尠なからずと雖も、敢て之を顧みざるは、諸子が是に依りて益々知識を研き、一方補習學校に於て修め得たる學識と共に、併せて之を實地に應用し、材料、時間、勞力を節約して然かも其出來上りたるものは精巧なるべく、所謂能率の増進に努むるに於ては、其の效果必ずや偉大なるものあり、之が爲めに諸子自身の向上進歩は勿論、



家族の爲めにも幸福を招來し、會社の爲めにも利益となり、將  
 た國家社會の爲めにも貢獻する所あるべく、又一面近時當社の  
 採用せる就業八時間原則が、誤ならずして有利なることを自他  
 共に認むる様になりて、所謂勞働問題の解決にも亦自ら資する  
 所あるべきを信ずるが爲めなり。諸子克く本書刊行の趣旨を了  
 得し、一層研究勉勵以て余の志を空ふせざらんことを、切望の  
 至に堪へざるなり。

大正九年初夏

株式會社 川崎造船所

社長 松方幸次郎

目次

第一章 水壓管—一般解説……………一

第二章 厚い中空圓管の強さに關する公式……………八

第三章 厚い圓管の設計……………三五

第四章 厚い圓管の設計上に用ひる圖表……………四三

第五章 厚い圓管……………五五

    普通に使はれる公式……………五六

    圓管の厚さを支配する條件……………六一

    厚い圓管を設計する場合の計算線圖……………六四

第六章 鑄鐵圓管の破壊強……………七三



# 水 壓 筒

## 第一章 水壓筒—一般解説

水 壓 筒

完全液体  
※少しも  
壓縮する  
ことの出  
来ない液  
体な云ふ

一般に水壓筒 (Hydraulic Cylinder) と謂へば要するに或る萬遍なる壓力が直接に内  
 壁に作用する様な圓筒形の空筒を一括して總稱するのである。此の場合に壓力を傳  
 へる所の申介物は完全液体 (Perfect Fluid) と考へ且つ該壓力は總ての方向に對し  
 て均一であるを見るのである。さて壓力なるものは圓筒内の内壁及兩端に抗して液  
 体が壓搾されるから生ずるのであつて一度液体が壓縮されると其の組成分子をし  
 てお互の間の接觸を一層密接せしめ斯の如くして自然の結果容積の縮小を來すので  
 ある。然るに壓力を傳へる所の媒介物が水である場合には圓筒内に於て壓搾の爲め  
 其の容積が幾らか減るが其の減り方が極めて微小であるから水壓筒では壓力の媒介  
 物即ち水の容積の減少は全く勘定に入れる必要がないのである。圓筒の四壁及兩端



力

部<sup>ぶ</sup>の應力<sup>おうりき</sup> (Stress) の強<sup>つよ</sup>は普通<sup>ふつう</sup>毎平方吋<sup>まいへいばういんち</sup>に對<sup>たい</sup>する封度<sup>ほうど</sup>數<sup>すう</sup>で之<sup>これ</sup>を表<sup>あらわ</sup>はす。

鐵製<sup>てつせい</sup>の圓筒<sup>えんとう</sup>の強<sup>つよ</sup>さを計算<sup>けいさん</sup>する場合には若<sup>も</sup>し厚<sup>あつ</sup>さの厚<sup>あつ</sup>いものであると二つの重要<sup>じゆうやう</sup>なる事項<sup>じこう</sup>を考慮<sup>こうりゆ</sup>しなければならない。第一<sup>だいいち</sup>は鑄物<sup>ちゆうぶつ</sup>を冷却<sup>れいきやう</sup>する場合<sup>ばあひ</sup>に起<sup>おこ</sup>る不規則<sup>ふきそく</sup>と不均<sup>ふきん</sup>一<sup>いつ</sup>とである。此<sup>こ</sup>の不規則<sup>ふきそく</sup>と不均<sup>ふきん</sup>一<sup>いつ</sup>に依<sup>よ</sup>つて圓筒<sup>えんとう</sup>の質<sup>しつ</sup>を不平均<sup>ふへいきん</sup>にし薄<sup>うす</sup>い鑄物<sup>ちゆうぶつ</sup>よりも却<sup>かへ</sup>つて割合<sup>わりあひ</sup>弱<sup>よわ</sup>いものになることがある。厚<sup>あつ</sup>い圓筒<sup>えんとう</sup>にする鐵<sup>てつ</sup>は品質<sup>ひんしつ</sup>の極上<sup>ごくじやう</sup>等<sup>とう</sup>のものでなければならぬ、而<sup>しか</sup>して之<sup>これ</sup>を三四度<sup>さんじゆうど</sup>熔<sup>と</sup>し直<sup>なほ</sup>して其<sup>その</sup>の強<sup>つよ</sup>さを每平方吋<sup>まいへいばういんち</sup>につき二萬五千封<sup>にまんごせんぱん</sup>度<sup>ど</sup>乃至<sup>ないし</sup>三萬封<sup>さんばんぱん</sup>度<sup>ど</sup>位<sup>ぐらゐ</sup>にせねばならぬ。質<sup>しつ</sup>の不規則<sup>ふきそく</sup>は鑄造<sup>ちゆうぞう</sup>の時<sup>とき</sup>の氣泡<sup>きぱう</sup> 砂孔<sup>しゃこう</sup>などから生<sup>せい</sup>じ又<sup>また</sup>砂<sup>すな</sup>を鑄型<sup>ちゆうがた</sup>に撞固<sup>つきた</sup>めることの不<sup>ふ</sup>完全<sup>くわんぜん</sup>からも起<sup>おこ</sup>る。其<sup>その</sup>故此<sup>こゝ</sup>等<sup>ら</sup>の缺<sup>けつ</sup>點<sup>てん</sup>を除<sup>のぞ</sup>く爲<sup>ため</sup>に圓筒<sup>えんとう</sup>の鑄造<sup>ちゆうぞう</sup>は決<sup>けつ</sup>して之<sup>これ</sup>を水平<sup>すゐへい</sup>にして行<sup>おこな</sup>はず、必<sup>かなら</sup>ず垂直<sup>すんちちよく</sup>にして行<sup>おこな</sup>ふのである。第二<sup>だいいち</sup>には或<sup>ある</sup>の限<sup>げん</sup>度<sup>ど</sup>を超<sup>こ</sup>えて圓筒<sup>えんとう</sup>壁<sup>へき</sup>の厚<sup>あつ</sup>みを増<sup>ま</sup>しても其<sup>その</sup>の強<sup>つよ</sup>さは増<sup>ま</sup>さないといふことである。何<sup>なん</sup>となれば壓<sup>あつ</sup>力<sup>りき</sup>が或<sup>ある</sup>の點<sup>てん</sup>に達<sup>たつ</sup>する時<sup>とき</sup>は應<sup>おう</sup>力<sup>りき</sup>が彈<sup>だん</sup>性<sup>せい</sup>限<sup>げん</sup> (Elastic limit) を超<sup>こ</sup>えて圓筒<sup>えんとう</sup>の内<sup>ない</sup>壁<sup>へき</sup>層<sup>そう</sup>を擴<sup>ひろ</sup>げ之<sup>これ</sup>に續<sup>つ</sup>いて材<sup>ざい</sup>質<sup>しつ</sup>を形<sup>かたち</sup>造<sup>つく</sup>る分<sup>ぶん</sup>子<sup>し</sup>を引<sup>ひ</sup>き離<sup>はな</sup>し其<sup>その</sup>結果<sup>けつこ</sup>圓筒<sup>えんとう</sup>を破<sup>やぶ</sup>壊<sup>くわい</sup>するやうになることがあるからである。そこで特<sup>とく</sup>別<sup>べつ</sup>に高<sup>たか</sup>い壓<sup>あつ</sup>力<sup>りき</sup>に對<sup>たい</sup>する圓筒<sup>えんとう</sup>は其<sup>その</sup>の外<sup>そと</sup>を一<sup>いち</sup>層<sup>そう</sup>丈<sup>ぢやう</sup>夫<sup>ふ</sup>

彈性限

水壓機

な物質<sup>ぶつしつ</sup>で環<sup>くわん</sup>を嵌<sup>は</sup>めて内<sup>ない</sup>壁<sup>へき</sup>が未<sup>いま</sup>だ應<sup>おう</sup>力<sup>りき</sup>を受<sup>う</sup>けな<sup>い</sup>先<sup>ま</sup>きに之<sup>これ</sup>を確<sup>し</sup>つかり縮<sup>し</sup>め附<sup>つ</sup>けて置<sup>お</sup>くのである。此<sup>この</sup>環<sup>くわん</sup>は或<sup>ある</sup>は燒<sup>や</sup>燬<sup>くわい</sup>めしてもよし、或<sup>ある</sup>は水壓機<sup>すゐあつぎ</sup> (Hydraulic Press) のやうなもので押<sup>お</sup>し込<sup>こ</sup>むこともある。斯<sup>か</sup>くの如<sup>ごと</sup>き環<sup>くわん</sup>が大<sup>おほ</sup>い圓筒<sup>えんとう</sup>の強<sup>つよ</sup>さを増<sup>ま</sup>す理<sup>り</sup>由<sup>ゆう</sup>は圓筒<sup>えんとう</sup>内<sup>ない</sup>に起<sup>おこ</sup>つた應<sup>おう</sup>力<sup>りき</sup>は先<sup>ま</sup>づ以<sup>もつ</sup>て外<sup>ぐわい</sup>部<sup>ぶ</sup>の環<sup>くわん</sup>の縮<sup>し</sup>め附<sup>つ</sup>ける力<sup>ちから</sup>に打<sup>うち</sup>勝<sup>か</sup>ち然<sup>しか</sup>る後<sup>のち</sup>圓筒<sup>えんとう</sup>自<sup>じ</sup>身<sup>しん</sup>の抗<sup>かう</sup>張<sup>ちやう</sup>力<sup>りき</sup>に打<sup>うち</sup>勝<sup>か</sup>たねばならぬからである。

抗張力

水壓筒<sup>すゐあつとう</sup>の計算<sup>けいさん</sup>に於<sup>お</sup>ては鑄鐵<sup>ちゆうてつ</sup>の抗<sup>かう</sup>張<sup>ちやう</sup>力<sup>りき</sup> (Tensile-Strength) は每平方吋<sup>まいへいばういんち</sup>一萬八千封<sup>いちまんぱんぱん</sup>度<sup>ど</sup>と取<sup>と</sup>り圓筒<sup>えんとう</sup>は七萬封<sup>しちばんぱん</sup>度<sup>ど</sup>と取<sup>と</sup>る。水壓筒<sup>すゐあつとう</sup>に於<sup>お</sup>て直<sup>ちよく</sup>徑<sup>けい</sup>といふ言<sup>ことば</sup>葉<sup>は</sup>は別<sup>べつ</sup>段<sup>だん</sup>の斷<sup>き</sup>りのない限<sup>かぎ</sup>りは其<sup>その</sup>の内<sup>ない</sup>徑<sup>けい</sup>を指<sup>さ</sup>すものと思<sup>おも</sup>ふべきである。それから水壓筒<sup>すゐあつとう</sup>に於<sup>お</sup>ては其<sup>その</sup>の安<sup>あん</sup>全<sup>ぜん</sup>率<sup>りつ</sup> (Factor of Safety) は最高<sup>さいこう</sup>六<sup>ろく</sup>から最低<sup>さいてい</sup>四<sup>し</sup>と取<sup>と</sup>るのが普通<sup>ふつう</sup>である。水壓筒<sup>すゐあつとう</sup>に鋼<sup>はがね</sup>を用<sup>もち</sup>ふる場合に

安全率

は薄<sup>うす</sup>いものには開<sup>か</sup>放<sup>はう</sup>型<sup>けい</sup>塩<sup>えん</sup>基<sup>き</sup>性<sup>せい</sup>爐<sup>ろ</sup>で作<sup>つく</sup>つた引<sup>ひ</sup>拔<sup>へき</sup>鋼<sup>こう</sup>管<sup>くわん</sup>を用<sup>もち</sup>ふるのが普通<sup>ふつう</sup>である。何<sup>なん</sup>んどなれば薄<sup>うす</sup>い鑄鋼<sup>ちゆうこう</sup>は餘<sup>あま</sup>り信<sup>しん</sup>頼<sup>らい</sup>することが出<sup>で</sup>來<sup>き</sup>ないからである。良<sup>れい</sup>質<sup>しつ</sup>の木<sup>もく</sup>炭<sup>たん</sup>吹<sup>ふ</sup>き鐵<sup>てつ</sup>は強<sup>つよ</sup>さに於<sup>お</sup>て鋼<sup>はがね</sup>に匹<sup>ひつ</sup>敵<sup>てき</sup>するものとせられたことが屢<sup>しばしば</sup>々<sup>ず</sup>あつた。併<sup>しか</sup>しながら木<sup>もく</sup>炭<sup>たん</sup>吹<sup>ふ</sup>き鐵<sup>てつ</sup>は到底<sup>さいてい</sup>上<sup>じやう</sup>記<sup>き</sup>の開<sup>か</sup>放<sup>はう</sup>型<sup>けい</sup>爐<sup>ろ</sup>で作<sup>つく</sup>つた鋼<sup>はがね</sup>の如<sup>ごと</sup>き強<sup>けつ</sup>大<sup>たい</sup>なる試<sup>し</sup>験<sup>けん</sup>に耐<sup>た</sup>わ得<sup>わ</sup>られ<sup>る</sup>ものでない



ので従來の考へは確かに間違つて居つた。鋼管の材質は完全に均齊であつて又完全に均一である。

水壓筒の壁の厚さを決定する公式に於て多くの學者は銲接(Welding)、鑄造、冷却及び異常の歪み(Strain)等を勘定に入れようと企てた、併し斯の如き公式は實用には餘り勧められぬものである。公式は最も簡單なる形で其の由來を明かに示すものゝ方が尊いので實際に之を使ふ人の手心で自分の經驗からして場合々々に應じた適當の安全率を取るのが最もよい。それで管又は薄い中空圓筒の厚さを勘定する計算式は最も簡單に次の如く表はすことが出来る。

$$t = \frac{PR}{S} \dots\dots\dots (1)$$

但  $t$  = 管壁の材料の厚さ

$R$  = 管の内半径

$P$  = 内部の壓力(毎平方吋につき割度)

$S$  = 材質の抗張力(毎平方吋につき割度)

此の式はベルヌーリ(Bernoulli)、アンワイン(Unwin)、ランキン(Rankine)、クラ  
ンデル(Clandel)、ワイスマン(Weisbach)及びクラーク(Clarke)諸氏の是認する  
所であつて、特殊の場合に用ふる爲にルーロー(Rouleaux)氏やブリックス(Brix)氏  
やバーロー(Barlow)氏やラーメ(Lame)氏やグラスホッフ(Grashof)氏やトラウトウ  
キン(Trautwine)氏及びクラーク(Clarke)氏等の諸氏に依つて多少前式を變形され  
たものもある。併し結局甚だ似た結果に終つて居るのであつて、先づ一般の場合  
には上の式を以て基本の式として如何なる場合にも之を離れてはならぬ。けれども  
特別の場合には勿論之に適合する様な或る量を附け加へる必要がある。

此の式は汽罐(Boiler)の厚さを決める時用ひられる。即ち總て汽罐の検査者などは  
先づ汽罐の厚みが内部の壓力に耐ゆる爲めに有せねばならぬ寸法を之から割り出す  
但し之だけではいけないので之に安全率及び銲綴(Rivet)と固体との強さの割合等  
をも入れねばならぬ。それで汽罐の厚みの公式は

$$t = \frac{PRF}{S(A或はB)}$$



但  $F$  = 安全率(通常5とする)

$A$  = 打抜き板の強さ

$B$  = 鋸鋼の強さ(最小値を取る、何となれば破壊は最弱點より起る故)

右の式に於て  $S$  は若し之を(1)式に於けるが如く單に  $P$  なる壓力に對するものとすれば之は材質の極度抗張強 (Ultimate Tensile Strength) となり又若し  $F$  なる安全率を式に入れたとする時は極度抗張強の四分の一とか五分の一とか乃至は十分の一とかに取る。又綴目のないものでは右式の  $A$  及び  $B$  は之を省くべきである。次に水壓筒の破裂したといふ寧ろ異常な場合に就いて記述して見やう何となれば之は頗る有益なことであるから。破裂した圓筒の厚さは八寸であつて唧子の直徑が十五寸であつた。又圓筒の内徑は十六寸であつて、壓力は毎平方吋約六千封度であつた。そこで前の公式から  $S$  を出せば

$$S = \frac{PR}{t} = \frac{6,000 \times 8}{8} = 6,000$$

即ち圓筒に加はる抗張力は毎平方吋六千封度であつて之で以て圓筒を破裂さすに十

結局抗張

分であつたのである。即ち圓筒は大なる音響を發して破裂してしまつた。然も此の鑄物は最も丈夫な鐵で作られ空氣爐で焙かされたもので、總ての部分を極めて注意して作られたのである。空氣爐は普通の展鐵工場用のロールであつた。破裂した圓筒は同形で今までのよりも軟かい鐵で抗張強も弱いが併し彈性は今までのものよりも大きい材料で新に作り替へられた。

此の場合には材質が内部の歪の影響を受けて其爲破裂したものに相違なく此の歪みは不平均に冷却された事に基因したものである。鑄物の内部は其の表面に近い部分よりも弱くなつて居るといふことはよく知られてある事柄である。八寸の厚みを有する堅固な材質も其内部に不平均の歪みを受ける餘地が充分ある。然し取り別けて注意せねばならぬことは薄い圓筒に關する公式は高壓を受くる所の厚い中空圓筒の場合に適合しないことで後者に關しては次章に述べる積りである。猶吾人は次章に於て本書の既に出版されたものに書かれた多くの著者の如く此問題を實際上と學理上とから述べやうと思ふ。



## 第二章 厚い中空圓筒の強さに

### 關する公式

八

内壓を受ける中空の厚い圓筒に關する法則は多種多様である。薄い圓筒に關する公式は多くの學者の一致して居る所である。何となれば薄いものに於ては圓筒の材質を總て均一と見做し従つて各部が同一の張力を受け其の結果其の實際の斷面積を以て強度を測る尺度とすることが出来ることだからである。所が後に至つて明かになる通り厚い壁の圓筒に於ては其の斷面積の大小を以て強さの大小とすることは適合しない。此の理由は後に説明する所であるが兎に角壁の厚い圓筒に於ては其の厚さの増加は必ずしも其の強さの増加にはならないことは經驗の示す所でも明かである。材料の部分に依る材質の變化に關する法則は元來中空圓筒の一般原則に基くものであるが然し其の公式は多數の學者に依つて多様に作られた。而して或る數種は中々氣の利いた遣り方である。けれども單に代數式を以て材質内部の状態を遺憾無く闡明することは困難なることで嚴格に云へば一々其の材料に依つて實地の試験を施さ

ねばならぬのである。實際どんな場合にも當て嵌まる様な一つの公式といふものは無い筈で不完全なる材質に就ては公式といふものが成り立たないのである。之から後に述べるものは多くの有名なる著者の仕事と其の結果が多い、而して之等を容易に比較し得る様にし又多くの例を示す。多くの法則は眞理の半ばを表はすもので其儘之を應用することは出来ない、故に吾人の要求する所に眞の解決を與へるものではない。即ち此等の法則は所謂無い方がましである。それで吾人は茲に實際に必要な問題を取り實際上の満足なる應用を容易ならしめる様なデータを與へやうとするのである。

先づ吾人は或る厚い中空圓筒の斷面を取るとする。而して此の斷面は幾つかの同心圓の環が互に密に集まり合つて居り各の環は皆な或る一定の等しい彈性率を有して居るものとする。而して今或る均一なる壓力が内部の環に働くものとする、然る時は此の壓力の爲め歪みを受けることの最も大きいのは最内部の環であつて其の外部に隣つて居る環ほど其力を受けることが次第に小になる。即ち内部から外部へ至る



に従つて環の出すべき抵抗力は小さくてよい、此の事は或る固体に或る力が加はつて其方に抵抗する力は其の固体が延びた量を長さで割つたものに依つて表はすことが出来る。斯ういふ理由で外部の環がまだ相當の壓力を受けない前に内部の環は既に其の弾性限を超過した歪みを受けるであらう。其の結果として内部の環は外部の環が未だ充分の餘裕のある時に既に破裂する、而して外部の環は内部のものよりも其の圓周が長いから内部のものより延びる餘地が多い。換言すれば外部の環は内部の環が悉皆參つてしまふ迄は其弾性限に達しないで内部のものが總て參つてしまつて始めて急に破裂するのである。但し此の説明に於ては此の複雑な問題の各部分は唯單一なる物質でないといふことを表はして居ない。

吾人は次に既に發表されて居る法則及公式を取り之につき説明を加へて行かうと思ふ。

ウールウィッチ (Woolwich) の帝國陸軍大學校 (Royal Military Academy) のグラゴリー氏 (Gregory) 『實用數學』 (Mathematics for Practical Men) 一八二五年版及一八

三三年再版の二八九頁の所にバロー氏 (Barlow) の法則として次の様な公式がある。

$$t = \frac{Pr}{S-P}$$

但  $t$  = 厚さ(吋)

$P$  = 水壓(毎平方吋に付封度)

$r$  = 内半径

$S$  = 凝集強(毎平方吋に付封度)

バロー氏は右に就き次の様な實例を擧げて居る。

二個の圓筒があつて各内徑十二吋で、一方の圓筒は内圓周一吋に付一・五噸の壓力を受け、他は同じく三噸の内壓を受ける、而して何れも壁の最大凝集強 (Cohesive Strength) を毎平方吋に付一萬八千封度と取り其の厚さを計算する。

右の解に曰く、毎平方吋一・五噸は毎平方吋四、二七八封度に當り、同三噸は八、五五六封度に當る(一噸は二、二四〇封度)然る時は公式に依り、

最大凝集強



$$\frac{4278 \times 6}{18000 - 4278} = 1.874t$$

$$\frac{8556 \times 6}{18000 - 8556} = 5.444t$$

即ち普通の計算の原理に依る時は後者の厚さは丁度前者の厚さの二倍に相當する。而して之を實際上確める爲抗張力試験を要すと言つた。ターブル (Turnbull) 氏もグレゴリー氏の著書からパーローの法則を引用して居る。今實際の場合の數學を取つて内徑八吋、水壓每平方吋六千封度、圓筒に用ふる鑄鐵の最大抗張強を每平方吋一萬八千封度とし此等の數字を此式に入れるときは

$$t = \frac{6000 \times 8}{18000 - 6000} = 4.44t$$

今パーロー氏の原著『圓筒の抵抗力及び種々の壓力及大さを有する圓筒の厚みの計算』(千八百三十六年ロンドン出版の土木學會報第一卷)並びに『圓筒或は圓環に於ける金屬の厚さに依る抵抗力の性質』によつて吾人は彼の言を藉りて次の如く結論する。今 $t$ を圓筒の内半徑、 $P$ を液に加はる每平方吋の壓力 $\sigma$ を求むる厚さとし

$$c \times \frac{r^2}{r+t}$$

$c$ を金屬の每平方吋の凝集強とすれば内部に於ける壓力に依る全歪力は $\frac{c}{r+t}$ を以て表はすことが出來、圓筒が安全に抵抗し得る最大抵抗力は

故に今歪力と抵抗力とが平衡して居る時は

$$rP = \frac{r^2}{r+t} \times c \quad \text{或は } rP + Pr = cR$$

$$\text{故に } t = \frac{Pr}{c-P} = \text{求むる厚さ}$$

と置くことが出来る。即ち之を言葉で表はせば、每平方吋の壓力に圓筒の内半徑を乗じたものを金屬の每平方吋の凝集強と每平方吋の壓力との差を以て除した商は圓筒の厚さである。そこで此の法則を吾人の場合に應用して

$$t = \frac{6000 \times 8}{18000 - 6000} = 4.44t$$

パーロー氏曰く、吾人は大なる誤差を生ずることなく鑄鐵の凝集強を每平方吋に付一萬八千封度と取ることが出来る。勿論此の法則に従つて計算した厚さは其の壓力



に耐得る最小の壓力であつて實際の場合に於ては圓筒は其の壓力の三分の一以上に耐得るものとしてはならぬ、但し之で計算した鑄鐵の凝集力が相當の大きさとなる場合であつて其値が若し一萬八千封度を超過して居れば之に應じて計算上の厚みより薄くしてもよい。

パーロー氏は彼れの論文の始めに述べて曰く、「余は機械學に關する諸學者が未だ水壓筒内に水壓に依つて生ずる圓周上の歪みの性質及び大きさに就いて研究したことを聞かず」と。實際此の問題に就いて研究し其の法則を立てたのは氏を以て嚆矢とするのである。パーロー氏は更に曰く、「一寸考へると内部の水壓によつて生ずる二つの側に加はる歪力を知る時は其の歪力に反抗するに必要なだけの金屬の厚さを與へさへすればそれで十分な様に見ゆる。併しながら實際に於ては決してかゝる簡單なものではない、先づ鐵が其の内部からの壓力によつて或る伸長を受けたと考へると其の外部に於ける分子は内部に於けるものよりも其の受ける伸長は少ない、而して抗抵抗力といふものは伸長を其の長さで割つたものであるからして同じ圓筒の壁でも

收 縮

其の外部にある部分程内側からの歪みを受けることが少ない道理である」と。  
上の説述によつてパーロー氏は圓筒の内壓によつて其側壁の受ける歪みが夫々遠つて居るといふことを認めて居ることが解る。而して氏は此の歪みは内部より外部に至るに従つて減じて行くものであることを述べて居る。パーロー氏は金屬の凝集強といふものを明らかに知らねばならぬ。又それがどういふ値にせよ公式の中には兎に角之を入れねばならぬといふ事を明瞭に指摘して居る。併しながらパーロー氏は鑄造の際に於ける不均平均の收縮(Shrinkage)に依つて起る内部の弱點に關しては毫も説明せず又水壓機の製造業者にも警告して居ない。所が此の影響の起る事は普通の事であつて然も其の影響は場合に依つて大に差違あることは材料試験に依つて證明することが出来るのである。吾々は茲に彼の有名なるハドキンソン氏(Hadgkinson)の言葉を引用することが出来る。氏は曰く「余は一時平方、二時平方及三時平方の鑄鐵棒につき其の抗張力を試験したが其の結果は夫々一〇〇、八〇及び七七の割合であつた」と、又ゼームス氏(Capt. James)は同じ鐵鑄棒につき試験の結果一〇〇、



六六及び六〇といふ割合を得て居り又二吋及三吋平方の棒から四分の三吋平方の棒を切り取つて試験をして之は一時平方の鑄鐵棒の二分の一の強さしか持つて居ないといふことをいつて居る。此の原因はどこにあるかといふと、鑄物の外皮部の影響と見るの外はない。而して厚さの増加するにつれて内部の海綿状の薄弱部が増すものと見ねばならぬとせられて居る。所が又之に反對の事實がある。即ち約五吋厚の米國鑄鐵製圓筒の側壁から試験片を取つて見るといふと總ての部分に於て其の抗張力が等しく、どの部分でも一樣の組織を有して居ることは唯だ觀察上のみならず實際の試験の結果に依つても確かめられる。猶又前章に於て述べた彼の破裂した八吋厚の圓筒壁に於ても何れの部分を見ても全く健全で別段薄弱な點が見えない。鑄鐵の性質に就いて一つ述べねばならぬことは鑄鐵には殆ど劃然たる測定し得べき弾性限といふものがないといふ事である。オルヂナンス・ノート(Ordinance Notes)には『鑄鐵には判然した弾性限といふものが滅多に現はれない、其の抗張力に對する弾性限は毎平方吋につき一萬五千封度である』云。

粘 韌 性  
衝 撃

荷 重  
\* 恒 久 變 形  
形 起 因  
除 去 後  
元 來 變 形  
な い 形

吾々は經驗上鑄鐵の性質を餘程知つて居るが今ボベー氏(H. T. Bovey)の一八九三年に著した材料強弱(Strength of Materials)なる書物の一節を引用して見ると『鑄鐵なるものは材料中最も不可思議なる性質を有するものであつて之を使用する場合には餘程大なる注意を拂はねばならぬ、鑄鐵は粘韌性(Tenacity)即ち弾性が無く非常に硬くて脆く、衝撃(Shock)或は温度の激變に依つて參つてしまふ。又不平均の冷却に依つて破壊し易い性質を與へ氣孔があると著しく其の性質を弱める。鑄鐵及び之と同様の物質は比較的小さい荷重(Load)に依つても著しい恒久變形(Set)を起し荷重が増せば此の變形も益々甚しくなる』と斯ういふ譯であるから、鑄鐵で水壓機の水壓筒などを作る様な場合には餘程よく氣を注げて凡ての部分の大きさを決めねばならぬ。

ランキン氏は鑄鐵の最大抗張力を一萬二千四百封度乃至二萬九千封度毎平方吋としたが先づ其の範圍のものならば本當のものであらう。然し收縮に依る歪みを受け易い様な鑄物には之を高い値に取つてはならぬ。實際の參考に供せられる一つの例



は一八七四年に著者の注意と監督の下に出来た事である。即ち直径十五吋の唧子を有する數個の水壓機が註文され何れも毎平方吋に付六千封度の水壓を受ける水壓筒であつた。而して圓筒の内徑は唧子の餘隙 (Clearance) を見込んで十六吋で側壁は八吋即ち丁度圓筒の内半徑であつた、其の内第一に作られたものは軋延機 (Rolling Mill) のロールを作る様な硬い緻密な組織の鑄鐵で空氣爐 (Air Furnace) 製のものであつたが試運轉の時に破裂してしまつた。そこで次ぎに前と同一の寸法でもつと軟かい粘性のある鐵で作つて前の物と置換へられた。此のものは試験に合格して今でも用ひられて居り屢々一平方吋に付四噸即ち八千封度の水壓がかけられる。

今既に發表されて居る數種の法則に關して説明するに當り最初の五式に次の様な共通の記法 (Notation) を用ひるゝこととする。

$P$  = 内部の壓力 (毎平方吋に付封度)  
 $S$  = 壓力  $P$  に依つて材料に與へられる抗張應力 (Tensile Stress) (毎平方吋に付封度)

に付封度)

$D$  = 圓筒の内徑 (吋)

$t$  = 金屬の厚さ (吋)

$e$  = 自然對數のベース = 2.71828

而して鑄鐵の極度抗張強を毎平方吋に付一萬八千封度とし水壓筒の内壓を毎平方吋に六千封度、水筒の内徑を十六吋とする。次に種々なる公式に依て得た結果を列擧する、其内第一の式は繼目無しの薄い圓筒に關するものでベルヌーリ、アンウインランキン、クラウデル、ワイズバッハ、ヴァンブーレン (Van Buren) ハスウェル (Haswell) ランキン (Lanza) 及びクラーク氏等の一致する所である。

$$t = \frac{D}{2} \cdot \frac{P}{S} \text{ 或は } t = \frac{Pr}{S} = 2 \frac{2}{3} \text{ 吋} \dots \dots \dots (1)$$

但  $r$  = 半徑即ち  $D$  の半分

ルロー氏は厚い圓筒に關して次の式を與へた。

$$t = \frac{D}{2} \cdot \frac{P}{S} \left(1 + \frac{P}{2S}\right) = 3.1 \text{ 吋} \dots \dots \dots (2)$$

トラウトウインは矢張り同様にやつて行つたが唯安全率  $K$  なるものを入れた、此の



Kは通常3と取る。

$$t = \frac{D}{2} \cdot \frac{Pk}{S} \left(1 + \frac{Pk}{2S}\right) = 12 \text{吋} \dots\dots\dots (3)$$

若し此の式からKを省くときは(2)の式と同じ結果即ちt=8.1を得られる。

ブリックス及クラークは次の式を與へた。

$$t = \frac{D}{2} \left(e^{\frac{P}{S}} - 1\right) = 3.16 \text{吋} \dots\dots\dots (4)$$

グラシヨツフは

$$t = \frac{D}{2} \left[-1 + \sqrt{\frac{3S+2P}{3S-4P}}\right] = 3.84 \text{吋} \dots\dots\dots (5)$$

次に薄い圓筒の内壓に對する厚さの公式につゝメリマン教授(Prof. Merriman)の公式がある、即ち

$$PD = 2tS$$

但 P = 圓筒内の水壓(毎平方吋に付封度)

$$D = \text{圓筒の内徑(吋)}$$

$$t = \text{圓筒壁の厚さ(吋)}$$

作用抗張應力

S = 材料の作用抗張應力(Working Tensile Stress) (封度)

此の式を書換へて

$$2t = \frac{PD}{S}$$

而して此の式に半徑を入れて簡單にせば

$$t = \frac{Pr}{S}$$

此の公式は厚い圓筒には應用する爲めのものではないが他の式と比較する爲に今此れに前に擧げた數を當て嵌めて見ると

$$t = \frac{6000 \times 8}{18000} = 2 \frac{2}{3} \text{吋}$$

即ち(1)式の結果と同じことである。此の法則は亦總ての汽罐検査會社が汽罐の厚さを決める時に用ひる公式と一致して居る、メリマン教授は附加して曰く「此の公式は非常に薄い圓筒に對しては唯極大體を與へるのみである」と、ゼー、デイー、フアンブーレン氏の公式は材料の極度抗張強を入れたもので其の安全率は設計者の手



加減によつて適宜に取るべきものとなつて居る、此の遣り方は公式として適當なもので若し材料の彈性限を決めるときごまで材料に應力を與へて安全であるか、解る然るに唯其の安全度につき何も與へずして單に公式を與へたものは何の役にも立たない。

フアンブレン氏は善良なる鑄鐵の極度抗張強として毎平方時に付一萬八千封度をとり安全抗張強として二千五百封度位として安全係數を七乃至八の間に自由に選擇すべしと述べて居る、彼れの公式は前に擧げた(1)の公式と同じことであつて、蒸氣及水等の管の如き比較的薄ものにも適用される。

モレスウオース(Molesworth)氏は其の著『ポケットブック オブ エンヂニアリング フォーミュラズ』(Pocket Book of Engineering Formulas)に於て水壓筒の厚さに関する次の様な公式を與へて居る。

$$t = \frac{1/2 DP}{x - P}$$

但 t = 金屬の厚さ(吋)

D = 圓筒の内徑(吋)

P = 水壓(毎平方吋に付噸)

x = 材料に依り異なる定數(鑄鐵では7 砲金は14 鋼は20)

此の式に依れば吾人の場合に於ては

$$t = \frac{1/2 \times 16 \times 3}{7 - 3} = 6吋$$

同書には此の式に關し何等の條件も又安全なる場合であるか破裂の場合であるか其の邊は何にも斷はつてない。此の式はパーローの式と同じで唯パーローの式では極度抗張強を一萬八千封度としたに對し係數7とした所が違つて居る。

ハースト(Hurst)氏のハンドブックには簡單に次の様な公式がある、之を適用する

$$t = \frac{PR}{7 - P} = \frac{24}{4} = 6吋$$

デイー、ケー、クラーク(D. K. Clark)氏は圓筒の横斷面を同一の厚さを有する幾つかの同心圓の環に分ち此等の環は中心から遠ざかるに従つて其の受ける歪みが少



ないものとした。一つの基線より上に各環が有する應力の大きさを取つて點で表はし此等の點を連ねて一つの雙曲線を得た、それで之を次の様な式に表した。

$$P = S \times \text{hyp. log. } R$$

$$S = \frac{P}{\text{hyp. log. } R}$$

$$\frac{P}{S} = \text{hyp. log. } R$$

但  $P =$  内壓(毎平方吋に付噸或は封度)

$S =$  弾性限内に於ける最大抗張應力(毎平方吋に付噸或は封度)

$R =$  圓筒の外徑を内徑で除した商

右の式は容易に應用することが出来る。そこで之を吾々の場合について應用して見れば表なるごとく  $\text{hyp. log. } 32/16 = 0.693$   $S = 18,000 = 9$ 噸 故に  $P = 9 \times 0.693 = 6.237$  噸毎平方吋  $= 12.474$  封度毎平方吋

故に若し鐵が毎平方吋一八〇〇〇封度以下である時は圓筒は破裂してしまふ。

ラーメ氏の式は次の如きもので主として厚い圓筒に適用されるものである。

$$t = r \left[ \left( \frac{S+P}{S-P} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

但  $t =$  厚さ(吋)

$S =$  抗張強(毎平方吋に付封度)

$P =$  水壓(毎平方吋に付封度)

$r =$  圓筒の内半徑(吋)

之に實際の數を入れる時は

$$t = 8 \left[ \left( \frac{18000 + 6000}{18000 - 6000} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] = 3.312 \text{吋}$$

ラーメの式はランキン、ルーロー、ラインハム (Lineham) 及びバー (Burr) 等の諸氏に依つて引用された。

ルーロー氏は『内壓力  $P$  は如何なる場合に於ても材料の許し得べき應力よりも超過してはならぬ』といつて居る。即ち若し  $P$  を  $S$  に等しくするか或は之よりも大きくせば其の側壁が幾ら厚くても圓筒は破裂する。

ランキン氏は異なつた形の式を出して居るが其の結果はラーメのと同じである、即



$$\frac{R}{r} = \sqrt{\frac{f+P}{f-P}}$$

但 R = 圓筒の外半径

r = 圓筒の内半径

f = 材料の粘滯率

P = 破裂壓力

之を吾々の場合に於てはめて見れば

$$\frac{R}{8} = \sqrt{\frac{18000+6000}{18000-6000}} = 1.414$$

故に R = 11.312

$$r = R - r = 11.312 - 8 = 3.312 = r$$

此の場合には外部からの壓力を省略した、外部からの壓力は即ち大氣壓で之は必要でない。ランキン氏は彼の公式が前節に擧げたルローの公式と同じ重要な結果を與へると云ふことを言つて居る、併し之を説明するには餘程長い式を辿つて行かねばならぬから茲では省略して置く、ランキン氏の公式の解説にはずつと高い程度

の數學を借りねばならぬ。

次表は今迄引用した數個の法則から得た所の壓力に對する圓筒の厚さである、此の表の計算に用ひたデータは圓筒の内徑十六吋、水壓每平方吋六千封度、鑄鐵の極度抗張強一萬八千封度(每平方吋)である。

厚さ(吋)

二・六六六

三・一〇〇

三・一六〇

三・三一二

三・八四〇

四・〇〇〇

六・〇〇〇

モレスウオース及ハーストの公式に依るもの

バーローの公式に依るもの

グラシヨッフの公式に依るもの

ラーメ及ランキンの公式に依るもの

ブリツクスの公式に依るもの

ルローの公式に依るもの

薄い圓筒の公式に依るもの

右の表中最後のものは其の著者は別に斷はつては居ないが恐らく安全率を算入したものだらう。而して特別なものを除外すれば三・一から四吋の間の數を得る、安全



率は其の材料及び用途に應じて設計者に依つて適當に取るべきものである。此の安全率は材料の組織に依つて異なるものであつて其質が幾分粒状をなして居る場合には圓筒の内部に於ける水が壓力を受けると側壁の小孔から浸み出すことになり前の公式は成り立たなくなつて圓筒は破壊するに至る、それで前に挙げた數個の公式も厚い圓筒の材料に於ける抗張力の變化については何も表はして居ないから餘り信頼の價値のないものである。

此の問題を解決する方法の困難なる事柄を讀者に解らせる爲めに茲に一例を擧げると今一本の眞直な金屬棒があつて之が簡單なる抗張力の下に置かれたとすれば、棒の各部分は等しい歪力を受け分離することを防ぐ様に働いて抵抗力が各部一様に起るのである。所がデュー、ケー、クラーク (D. K. Clark) の言つた如く「内壓を受ける圓筒の側壁の抵抗力といふものは其厚みの部分に依つて一樣ではない、即ち圓筒壁の最内部にある部分は最大の抵抗力を出して居るもので内面が其弾性限を超過しない範圍内にある時は抗張應力は内面から外面に至るにつれて段々と一樣に減じて

行き最外部が最小の抵抗力を表はすことになる。鑄鐵に於ては内面が其の抗張力の極限まで歪みを受けた場合には破壊に對する歪抵抗力を以て其の圓筒の破壊強とするのである。』

所で吾々は圓筒の内皮部の厚さ及び鑄物の内部に若し海綿状の部分があるとするれば其の程度はどの位であるかを知ることが困難である。若し此の海綿状の部分が餘り多いときは殆ど其の部分は抵抗力を出さないからして吾々は其の圓筒の厚さに對する強さの三分の一以上に其の抵抗力を勘定することは出来ない。而して壓力の加はる圓筒の失敗といふものは多くは斯様な條件から來るもので殊に其の側壁が均一の密度を有するものとして設計した場合にはこんなことが多いのである。

學理上から割り出した公式に就いては吾々は成る程それは數學的には正しいものであるが併し之を實際の場合に使ふ際には其の公式に入つて來る所の各數量なるものはよく事實と一致して居なくてはならぬといふことそれから圓筒に強さを與へるのは眞に其の材質の部分だけであること又圓筒に加はる應力の性質等を充分注意せね



ばならぬ。  
 猶又圓筒の底を同一の鑄物とする場合にも危険がある、が併し若し底を球形にして其の厚みを側壁と同一にするときは其心配はなくなる。但し若し底の球面の半径を大きくすると其のカーブのつぎ目から破壊が起つて來ることがあるから決して安全なものではない。

ルーローは曰つて居る『伯林のフムメル(Hummel)の使つた方法は圓筒を環とし底を別の板とした、又カルルスルーエのローレンツ(Lorenz)は底を別の板として之を螺ち込んだ』と。斯様な場合に漏水を防ぐには恰度唧子や又はブランジヤーの端に於ける如く盃形の皮革を以てすることが出来る。それで或る荷重を揚げ唧子に依つて之を支持する場合には金屬の抗張力を唧子の直徑を増すことに依つて減ずることが出来る。ルーロー氏の著せ、コンストラクター(The Constructor)に曰く『下表に掲ぐるフムメル水壓機の場合に於て若し唧子の直徑を二十六吋とすれば壓力Pは四〇八七封度に減じSは七九〇〇封度となる。此の數字は實際的のものである、而

して圓筒の斷面積は一から〇・七九に減じ材料に於て二十パーセントの儉約になる

名稱及位置	唧子の直徑	孔徑	厚さ	唧子に加はる荷重(封度)	毎平方吋の壓力(封度)	應力(封度)
コンウェイブリッジ (Conway Bridge)	一八	二〇	八・二五	一四五六〇〇〇	五、九〇〇	一〇、五〇〇
ブリタニヤブリッジ (Britania Bridge)	一八	二〇	八・二五	一四五六、〇〇〇	四、一九一	七、四六〇
同	二〇	二二	一〇	一、〇三三、五二〇	八、四〇〇	一四、五〇〇
同	二七・五六	二八・三三	六・三〇	二、四四〇、〇〇〇	四、四二五	一二、一三四
フムメル(伯林) (Hummel, Berlin)	二三	二四	八・五〇	二、一〇〇、〇〇〇	五、一七四	一〇、〇〇〇



更に吾々はルーロー氏の著せ、コンストラクター(サブリーSupplee氏譯)の一節を引用すれば、「ブリックス(Brix)氏は圓筒の内徑が壓力の爲に變化しないものとして半徑の種々異なる點に於ける應力を計算した、バーロー氏(Barlow)は環狀の切斷面積が減じないで壓力に依る變化を許して居る。ラーメ氏(Lame)は斯ういふ様な假定をしないで各點に於て壓力の爲に起る種々異なる應力の變化を精密に計算し之に依つて材料の分子の實際の性質に關する有益なるデータを得た、總て此等の理論に於ては圓筒壁の内部が最も大なる歪みを受けるものであるからSは此の内部に就て選ばなければならぬ、又ラーメの公式に於ても又バーローの公式に於ても總て或る極限を超ゆる時は其の厚さを幾ら増加しても其の強さを増さないことを示して居る。或る與へられたる力Sに於ては此の極限は $\frac{1}{2}S$ の場合に起る。若し材料の質が不均一であるときは此の極限よりもずつと以内に於て危険なる壓力に達し材料は少しも延びずに破壊する様になる。

そこで材料の種々なる層に對して異なつた張力を與へる様にして厚い圓筒の強さを増す事が工夫された。其の原則とする所は圓筒に輪を嵌めることにある、即ち其の結果内方にある層に緊壓を與へることになる。其故に内部の壓力は先づ以て材質に伸張を生ずる前に此の緊壓力に打ち勝つて之を常態に復さねばならぬ、其の結果唯材料其儘の場合よりもずつと大なる抵抗力を生ずることになる。』と。

輪を嵌めた圓筒の計算は中々面倒である故に讀者は若し深く之を調べようとするには、コンストラクターの第十六頁を参照せられるがよい。同書には圓筒と同じ材料の環を用ひた簡單なる輸入れ法に依つて其の強さを餘程増加することの證明がある。而して若し内部の圓筒に始めから歪力を與へる様な風に何等かの方法で輪を堅く嵌め込む時は一層良好なる結果が得られる。又此の輪を更に其上から別の輪で以て取り巻く時は尙一層よい。此の原理と方法を大砲に應用したならば良い結果を得るであらう。斯の如く高い壓力に耐得る爲には耐得る様な材料を用ひること、又其の構造及び性質に充分の注意を拂はなければならぬ。

吾々は今や最高の權威者から材料及び其の使用法に就て最も注意せねばならぬこと



を知り得た。而して唯だ單なる法則で律して行く様なことは何等の價値もない事も解つた、實際の場合に應用して寸法を決定せしめる様な註釋とか又は補助になる様な數量を與へない漠然たる公式は少しも信賴の出来る様な知識を手取早く讀者に與へるものではない。原理は原理としてどこ迄も尊重して行かねばならぬが併し或る結果に到達する所の途は直線の如く未知から既知に至る最捷徑でなくてはならぬ、克く使はれる言葉に『法則を使ふには常に判斷を以てせよ』といふことがある、併し法則は判斷を與へない。さて判斷といふものは經驗に依つて培はれた所の廣い智識から湧いて來るものである、そこで吾々は幾多の經驗の結果を提呈して判斷の補助としようと思ふのである。所が薄い側壁の圓筒に於ては水壓に依る應力といふものは單に輪に働く張力の如く實際に於て各部一樣と見做し得るものであるから之に就いては論ずる必要はないのである。間違のない簡單なる法則の無いのは厚い圓筒に就てある。猶茲に述べて置かねばならぬ事は一般に強大なる歪力を受ける機械の諸部分の寸法を定める爲めに公式などを使ふ場合には餘程大なる注意を拂はねばならぬことである。著者が種々の公式を蒐め之を比較するの煩を敢てする所以のものは吾々は現に此の問題に關して如何なる法則を持ち又其等の法則が如何なる性質のものであるかを闡明しようとするにあるのである。昔の格言に『總ての事柄は證明せよ』といふことがあるが此の格言は工學上に取つては猶更必要なる事柄である。本章に於ては主として理論的の方面を述べ、吾人の用ふる法則や公式に就いて詳しく研究して來た、以下の諸章に於ては此等の公式を應用して此の方面の設計上の一助としやうと思ふのである。

### 第三章 厚い圓筒の設計

設計上効力のあるデータの少ないものは恐らく毎平方吋一千封度以上の壓力の如く、厚い圓筒であらう。大概の水壓筒は一千封度以上の壓力のものであつて、其の設計に當つては其の強さ並びに金屬の配置に甚大の注意を拂はなければならぬ。ラーメの厚い圓筒に關する公式は第二章に示した如く普通次の形で表はされる。



$$t = r \sqrt{\frac{S+P}{S-P} - 1} \dots\dots\dots (6)$$

三六

此の公式を次の様な種々の形に置き換へると設計者にとつて大變便利である。

$$S = \frac{P R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$R = r \sqrt{\frac{S+P}{S-P}} \dots\dots\dots (8)$$

$$r = R \sqrt{\frac{S-P}{S+P}} \dots\dots\dots (9)$$

$$P = S \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2} \dots\dots\dots (10)$$

但 S = 每平方吋の許し得べき材料の應力

R = 圓筒の外半径(吋)

r = 圓筒の内半径(吋)

P = 圓筒内の水の壓力

t = R-r = 圓筒の厚さ(吋)

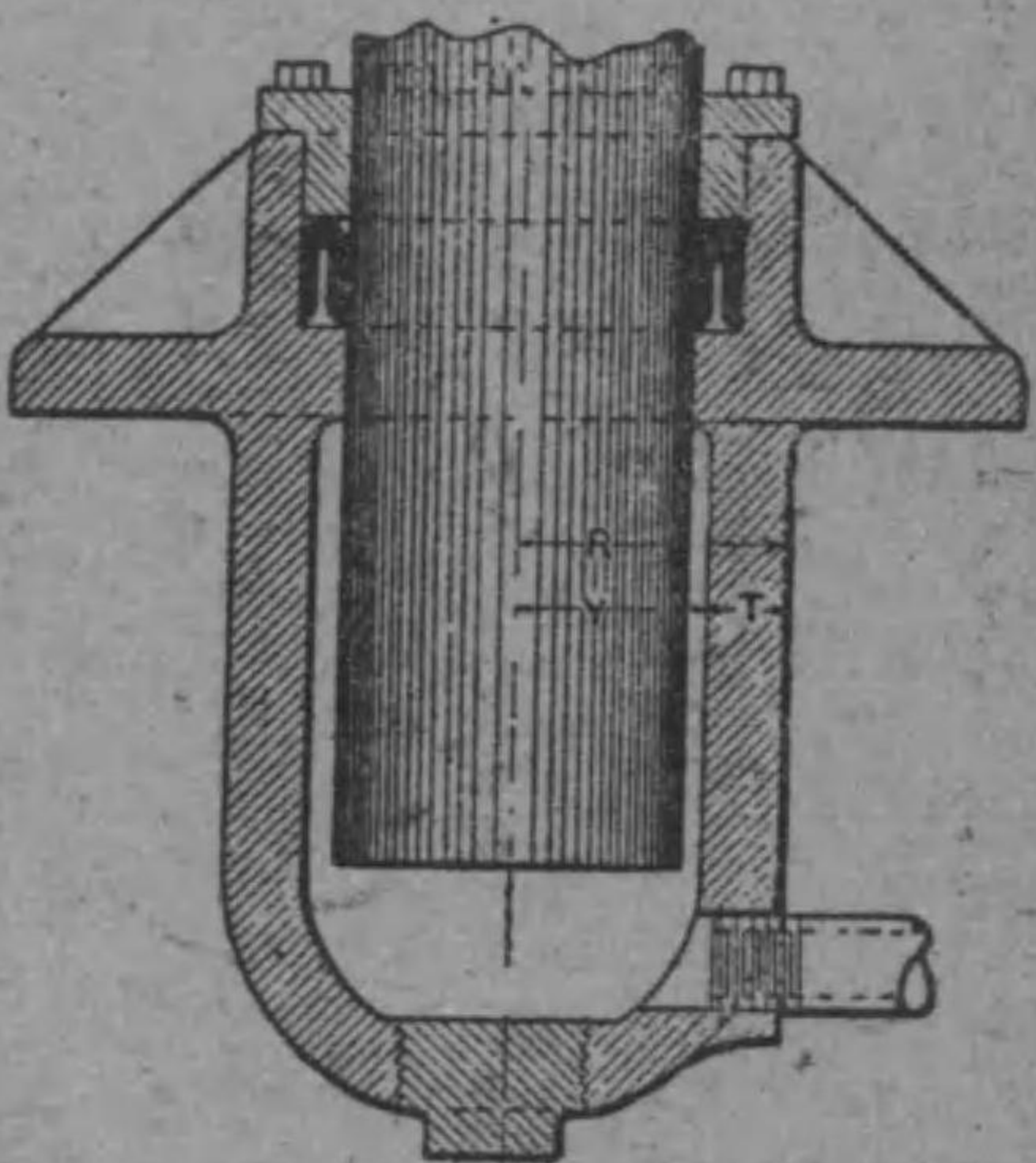
(8)式から次の式を得られる。

$$\frac{R}{r} = \sqrt{\frac{S+P}{S-P}}$$

即ち圓筒の外半径と其の内半径との比は、許し得べき實際の應力と實際の壓力との和を其の差で除した商の平方根に等しいと言ふことが出来る。著者は右式中の實際の壓力Pの價を種々に變じて之に對する外半径と内半径との比を計算して之を表に作つた、之を用ふれば圓筒の厚さを計算に依らずして直ちに決めることが出来る。猶此の式を仔細に調べて見るときは壓力Pが許し得べき應力Sに近づくに従つて比のR-rが非常に速かに増すことが解る、若しPがSに等しくなるとR-rの比は無窮大となり又若しPがSよりも大になるとR-rの比は虚數になることも解る。此等の事柄は實際に於ては各金屬には夫々或る極限の壓力があつて其の極限を超へるといふと安全なる圓筒を作ることが不可能であつて其れよりもつと大なる抗張強を有する金屬を用ひねばならぬことを示して居るのである。猶又各材料には各々圓筒の直徑に對する壓力點(Pressure Point)があつて其點以上にはより以上の材料を用

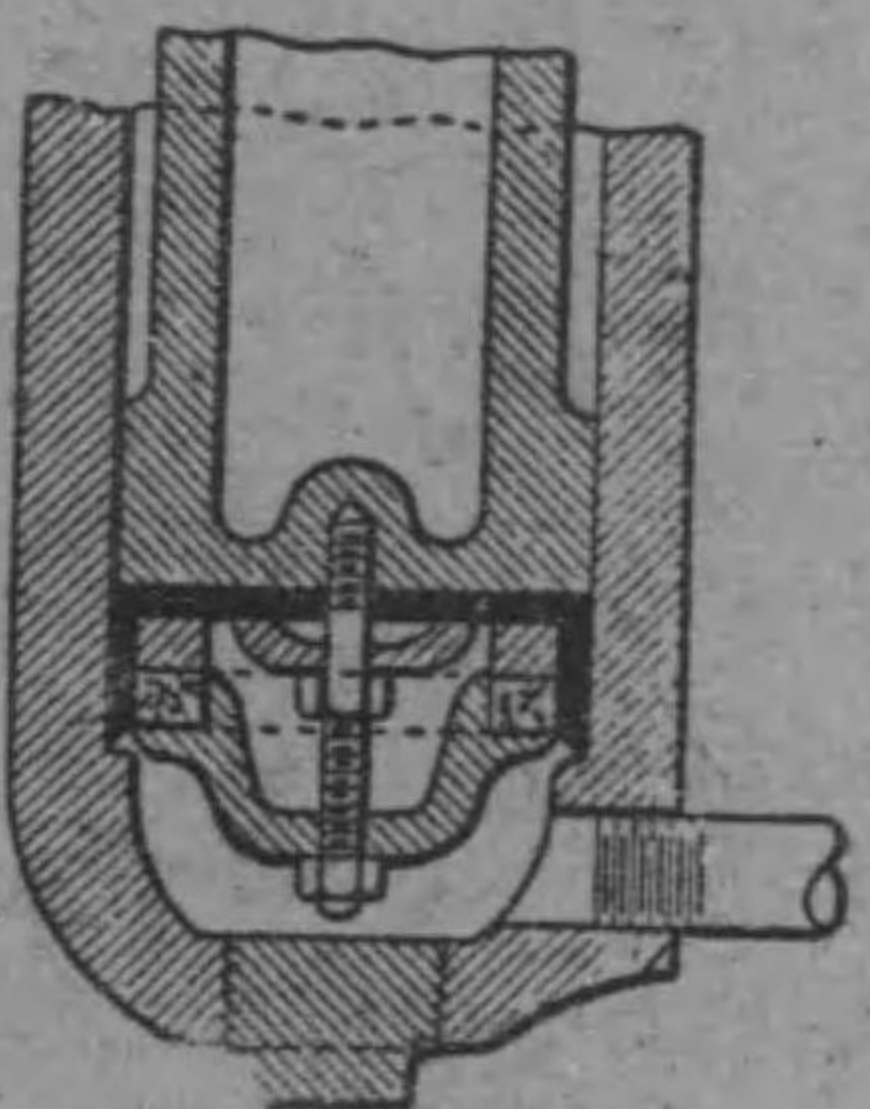


第一圖



填隙材

第二圖



ひた方が經濟上有効であることを示して居る。許し得べき應力といふものは其の材料の弾性限に依るものである。水壓機に於ては材料を其の弾性限の五十パーセント迄に用ふるのが普通である。或る噸數を與へる所の圓筒の設計に當つては次の諸點につき注意せねばならぬ。

- 一、一定の壓力に對し噸數は直徑の二乗に比例して増加する。
- 二、毎平方吋二千五百封度以上の壓力に於ては填隙材(Dacking)が漏り易くなり、バルブが持たなくなり、パイプの附屬品が故障が起り易くなる、それ故に

厚い圓筒の外半徑と内半徑との比

厚い圓筒の外半徑と内半徑との比	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
2000	1.732	2.000	2.236	2.449	2.645	2.828	3.000	3.162	3.316	3.464	3.605	3.741	3.872
2500	1.527	1.732	1.915	2.081	2.236	2.380	2.516	2.645	2.768	2.886	2.998	3.109	3.214
3000	1.414	1.581	1.732	1.871	1.999	2.121	2.236	2.345	2.449	2.549	2.645	2.741	2.828
3500	1.341	1.483	1.612	1.732	1.844	1.949	2.049	2.144	2.236	2.323	2.408	2.489	2.568
4000	1.291	1.414	1.527	1.633	1.732	1.825	1.914	1.999	2.081	2.160	2.236	2.309	2.378
4500	1.253	1.362	1.464	1.558	1.647	1.732	1.813	1.889	1.963	2.035	2.104	2.171	2.236
5000	1.224	1.322	1.414	1.500	1.581	1.657	1.732	1.802	1.871	1.938	2.000	2.061	2.119
5500	1.201	1.291	1.374	1.453	1.527	1.602	1.673	1.732	1.795	1.856	1.915	1.972	2.027
6000	1.183	1.264	1.341	1.414	1.483	1.548	1.612	1.673	1.732	1.789	1.844	1.897	1.949
6500	1.169	1.243	1.314	1.381	1.446	1.507	1.566	1.623	1.678	1.732	1.784	1.834	1.881
7000	1.157	1.224	1.291	1.354	1.414	1.472	1.527	1.581	1.633	1.683	1.732	1.779	1.825
7500	1.146	1.212	1.274	1.331	1.386	1.441	1.493	1.544	1.593	1.640	1.687	1.732	1.775
8000	1.136	1.201	1.260	1.314	1.368	1.421	1.472	1.521	1.568	1.614	1.659	1.704	1.747
8500	1.127	1.193	1.247	1.297	1.350	1.402	1.453	1.502	1.549	1.595	1.640	1.684	1.727
9000	1.119	1.183	1.235	1.284	1.336	1.386	1.435	1.483	1.530	1.576	1.621	1.665	1.708
9500	1.112	1.174	1.224	1.272	1.322	1.371	1.419	1.466	1.512	1.557	1.602	1.646	1.689
10000	1.106	1.166	1.215	1.262	1.311	1.359	1.406	1.453	1.500	1.546	1.591	1.635	1.678
10500	1.100	1.159	1.207	1.254	1.302	1.349	1.396	1.442	1.488	1.534	1.579	1.624	1.667
11000	1.095	1.153	1.200	1.246	1.293	1.339	1.385	1.431	1.477	1.522	1.567	1.612	1.656
11500	1.090	1.147	1.193	1.239	1.285	1.331	1.376	1.422	1.467	1.512	1.557	1.602	1.646
12000	1.086	1.142	1.187	1.232	1.278	1.323	1.368	1.413	1.458	1.503	1.548	1.593	1.637
12500	1.082	1.137	1.182	1.227	1.272	1.317	1.362	1.407	1.452	1.497	1.542	1.587	1.631
13000	1.078	1.132	1.177	1.222	1.267	1.312	1.357	1.402	1.447	1.492	1.537	1.582	1.626
13500	1.074	1.128	1.173	1.218	1.263	1.308	1.353	1.398	1.443	1.488	1.533	1.578	1.622
14000	1.070	1.124	1.169	1.214	1.259	1.304	1.349	1.394	1.439	1.484	1.529	1.574	1.618
14500	1.066	1.120	1.165	1.210	1.255	1.300	1.345	1.390	1.435	1.480	1.525	1.570	1.614
15000	1.062	1.116	1.161	1.206	1.251	1.296	1.341	1.386	1.431	1.476	1.521	1.566	1.610
15500	1.058	1.112	1.157	1.202	1.247	1.292	1.337	1.382	1.427	1.472	1.517	1.562	1.606
16000	1.054	1.108	1.153	1.198	1.243	1.288	1.333	1.378	1.423	1.468	1.513	1.558	1.602



壓力を其れ以下にする方がよい。併しさうすれば大きい圓筒が必要になつて來て其爲値段が嵩まつて來る。今九十五乃至百噸の壓力を出す所の圓筒を要するものとしやう。直徑十一吋の圓筒で毎平方吋二千封度の壓力で働くものは九十五噸の壓力を出し、十吋の圓筒で二千五百封度で働く時は九十八噸を出し九吋の圓筒で三千封度で働くときは九十五噸を出し得る。そこで今計算の爲めに十吋の圓筒が二千五百封度(毎平方吋)の壓力で働くものとし、鑄鐵を使つたとして其の許し得べき應力が毎平方吋六千封度であるとする。之を(6)の式に代入して

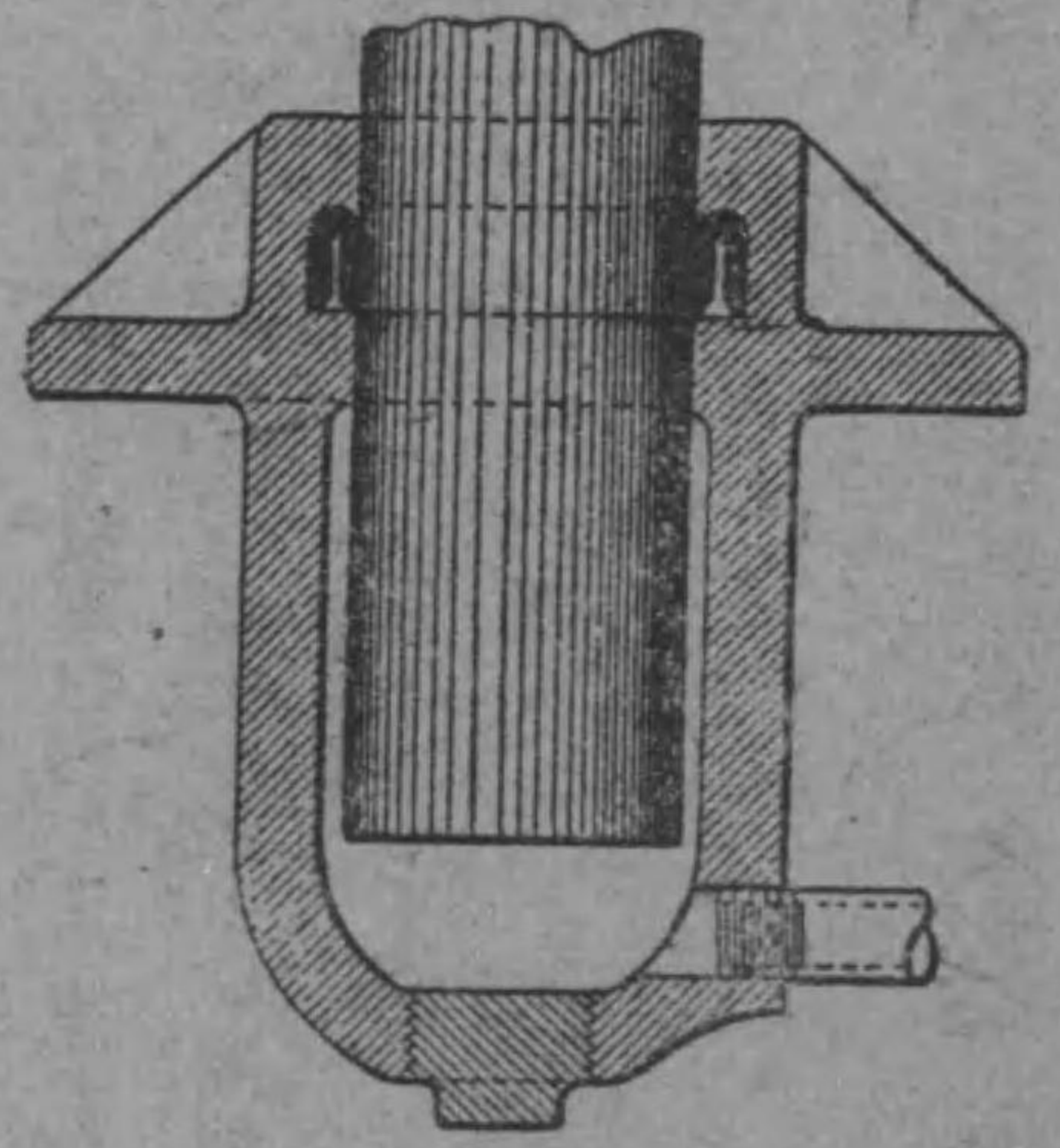
$$t = 5 \sqrt{\frac{6000 + 2500}{6000 - 2500} - 1} = 2.79$$

但  $t$  = 圓筒壁の厚さ(吋)

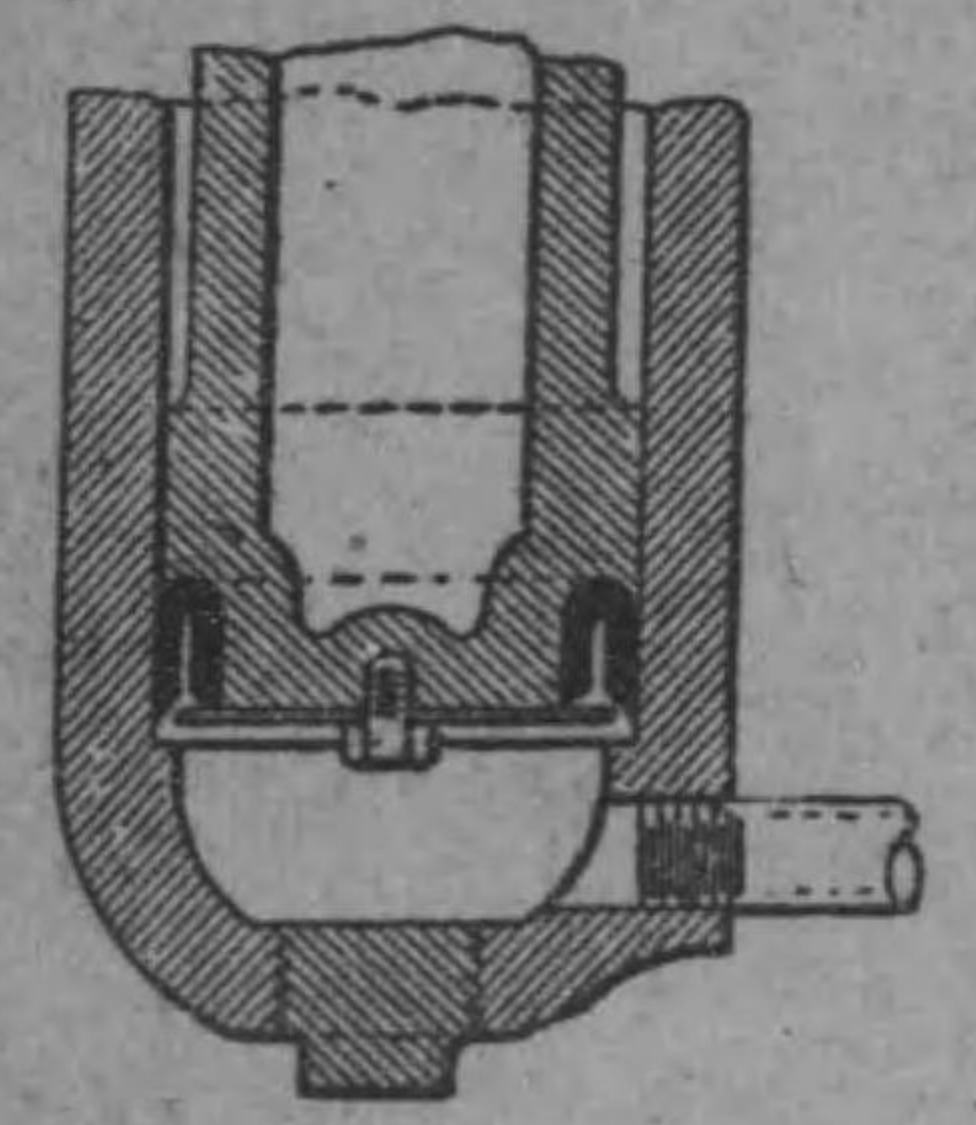
之を表の二千五百封度壓力の行と應力六千封度の列とからして求めると比は一・五五八となる。

水壓筒の底部は設計上の計算から出た厚さよりもずつと多く肉を附けて置く必要がある、其の譯は圓筒の内部を仕上げる爲めに底に或る大さの孔を穿け、後で以て其

第三圖



第四圖



の孔をねぢ栓のやうなもので埋めるのであつて其の部分はごうしても弱みとなるからである、第一圖、第二圖、第三圖及び第四圖に示すフレンヂの附いた圓筒は普通に水壓作業に使はれる型で此の圓筒は管に破裂に對する強度を有せねばならぬのみならず圓筒を支持する爲め何かに取附けるから丁度梁の様な力を受ける其の力にも耐ねねばならぬ、フレンヂと圓筒とのつぎ目からしてよく故障が起るものである。又此のつぎ目の部分は鑄造の時にフレンヂの部分はごうしても早く冷めるから其の爲に金屬の内部に應力が起



り易く從つて危険を惹き起し易いのである。それであるから厚い部分からいきなり薄い部分を出す様なことを避けねばならぬ。

木型は必ずフレンヂの真上で別ける様にせねばならぬ又總て圓筒は其の口の方を上にして鑄造して若し鐵の中の不純物がある時は成るべく之を口の方の餘り害にならぬ所へやる様にせねばならぬ。短かい圓筒では湯口はフレンヂ及び圓筒の上端から出て来る様にせねばならぬ。長い圓筒になると湯口をもつと下の方にする必要がある。而して湯口を抜き取つた所の海綿狀の部分に栓をしなければならぬ事が屢々起つて来る。多孔質の鑄物は種々の處理法がある、例へば濃厚なる鹽化アンモニヤは食鹽と同様極めて普通に使はれる、又壓力の下に残つて居る澱粉又は木質バルブも屢々有効である。

填隙材の普通に用ひられる形は先づ第一圖に示す如くUパツキングと稱して之を挿へる取外し得べき挿へ金物を持つたU字形のもの、それから第二圖に示す様な唧子の端にある梳狀の填隙材、其他第三圖の如き圓筒の頸部に於ける室にあるUパツキ

ングや第四圖の如き唧子の一端にあるUパツキングなどがある。右の内取外しの出来る挿へ金物を有するUパツキングは機械的に最も有効であつて如何なる壓力の下に在つても最も結果がよい。填隙材に關しては水壓機の製造業者の間に色々の論争があるが併し著者の見る所では良好なる填隙材と其の細工が完全であれば填隙材其物の形はどんなものでも大した變りはない、唯之を容易に取外すことが出来るか出来るかの點が重要な點であると思ふ。

### 第四章 厚い圓筒の設計上に用ひる圖表

本章に於ては厚い圓筒の設計者に便宜を與へる目的で三つの圖表を擧げる。此等圖表の基く所の公式は既に第二章に示した、併し本章は本章だけで完結する様に總ての必要事項を擧げるから勢ひ前の章と重複を免れない。

高い壓力に對する圓筒壁の厚さは一部分經驗上から決定すべきものである、又總ての場合に於て金屬内の不完全な事や又は外部から来る歪力を見込んで安全係數は成



る可く大きく取つて置く必要がある。此の安全係数を定める場合に設計者は成る可く成功した前例を参考するがよい。

圓筒の壁の厚さの計算に最も普通に用ひられる公式はラーメの式で即ち次の通りである。

$$t = \frac{D}{2} \left( \sqrt{\frac{S+P}{S-P}} - 1 \right) \dots\dots\dots (II)$$

但 t = 圓筒壁の厚さ(吋)

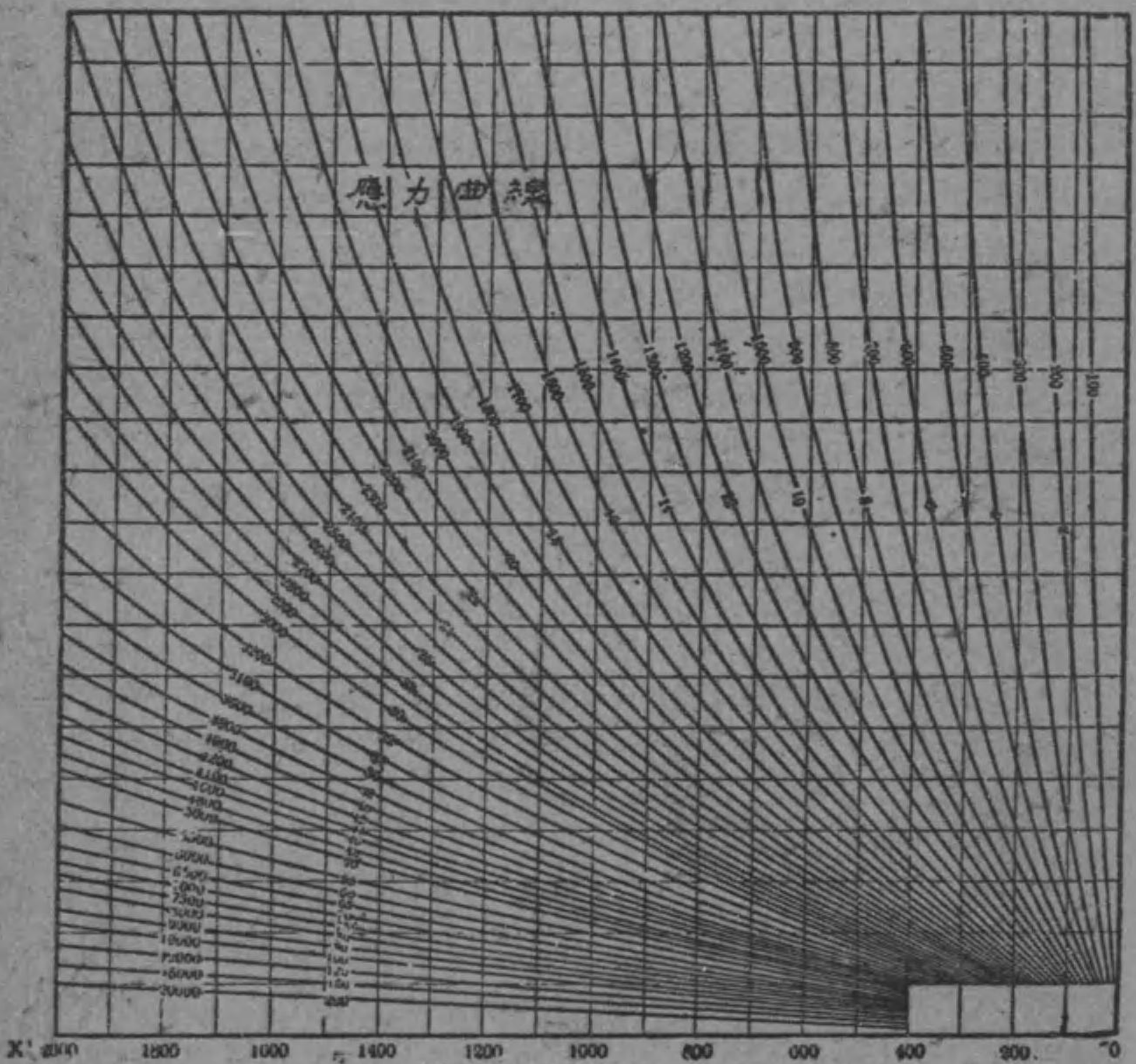
D = 圓筒の内徑(吋)

P = 每平方吋に働く内壓(封度)

S = 圓筒壁に於ける應力(每平方吋封度)

【ラーメ氏の公式から變化した公式に就いてはサーヌトン(Thurston)氏の著『鐵と鋼』(Iron and Steel)第四五二頁、ランキン(Rankine)氏の『應用力學』(Applied Mechanics)第二九〇頁或はバー(Bar)氏の『工作材料の彈性及抵抗』(The Elasticity and Resistance of the Materials of Engineering)第一九頁及第八九五頁を参照せよ。】

第五圖



圓筒内の圧力  
厚壁圓筒設計上用ひる應力曲線の圖

今 S を材料の極度抗張強とする時は之から計算した厚さは圓筒の内徑に依つて丁度破壊する時の厚さになる。それで實際の厚さを見出すには極度抗張強を安全率で以て除せねばならぬ。第五圖及び第六圖に示す諸曲線はラーメの公式か



ら計算するの勞を省く爲めに作つたものである。此等の曲線からして四つの量の内三つの量を知る時は一量を知ることが出来る。曲線を作る爲め公式を次の形に書き換へる、

$$\frac{R}{r} = \sqrt{\frac{S+P}{S-P}} \dots \dots \dots (12)$$

R = 但圓筒の外半径

r = 圓筒の内半径

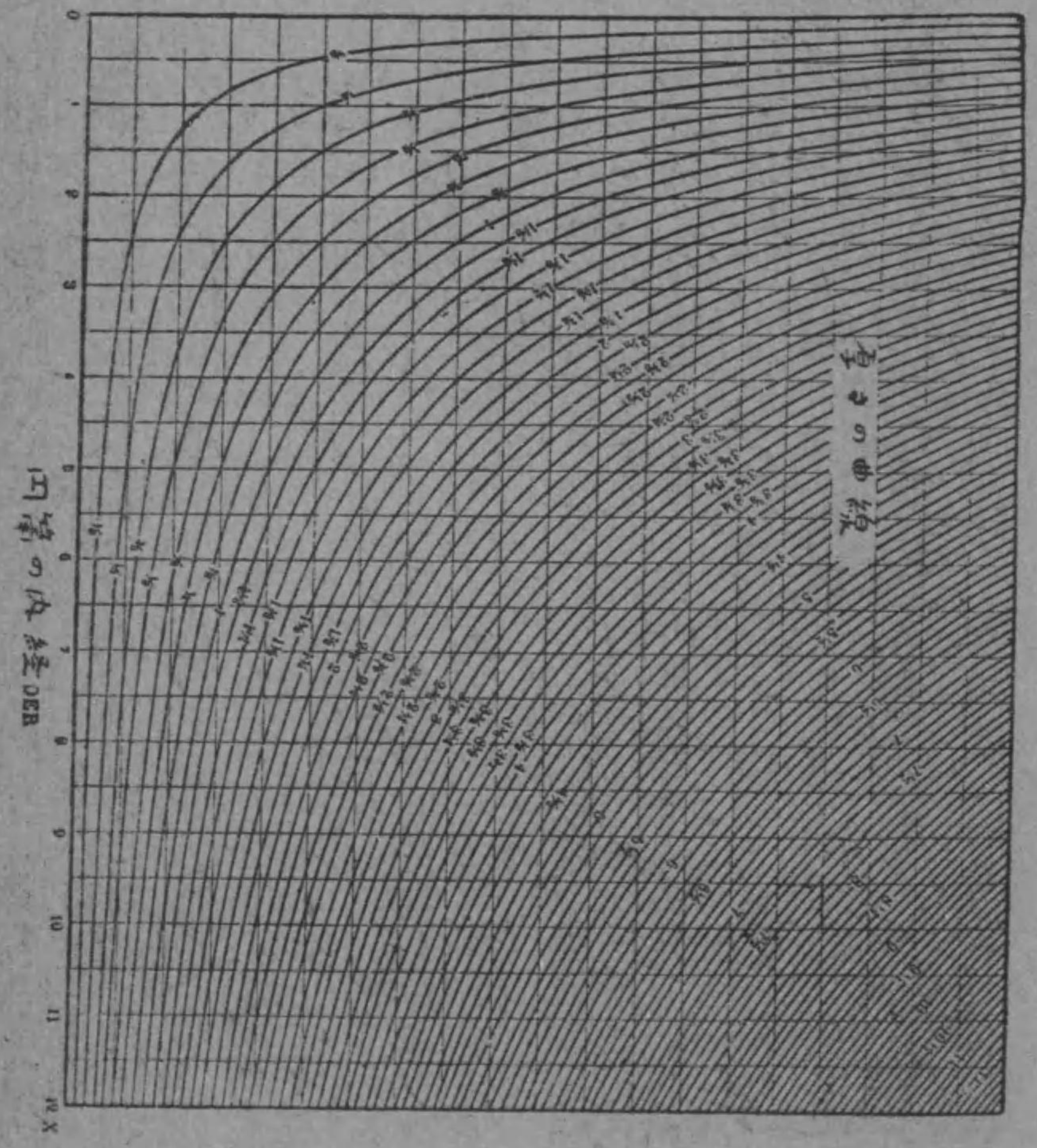
(12)の公式を導き出すには前の公式中のD/2をrで置き換へ、又rの代りにR-rを置き換へ、而して之をrで除し得られる)

R-rなる値は直径の大きさに無關係なることが解るであらう。今便宜の爲めに此の比をKで置き換へれば公式は次の如くなる。

$$K = \sqrt{\frac{S+P}{S-P}} \dots \dots \dots (13)$$

第六圖は内径Dの値を表はし第五圖には圓筒内の壓力Pを表はしてある。R-rなる比の値は第五圖に於ては右手の垂直線上に取つてあり第六圖に於ては下の水平線上

第六圖



厚壁圓筒設計上に用ひる厚さの曲線の圖



に取つてあり何れも零點から始まつて居る。又100とか200とかの數は公式(13)のSに當て箝めた値でそれから得た色々の點を第五圖に於ては曲線にしたのである。即ち斯くの如くして得た所の曲線は圓筒の壁に於ける應力を表はすのである。而して

$$t = R - r \quad R = Kr$$

であるから

$$t = Kr - r = r(K - 1)$$

故に  $2t = d(K - 1)$

此の式はぎゞの形である。それで今 $r$ 等の値を $t$ の値に入れて其の結果を曲線で表はせば第六圖の曲線が得られる。此の曲線は圓筒の壁の厚さを表はすのである次に此等の曲線を使用する例を示さう。

【例】  $D = 5$ 吋  $S = 1,600$  封度每平方吋  $P = 700$  封度每平方吋  $t$  を求む。

【解】 第五圖に於て700の點から眞つ直ぐに上の方へ辿つて應力曲線の1600に至る。それから水平に右の方へ行つて圖の垂直外廓に至る。次に第六圖に於て右下

端の零から左へ第五圖に於て垂直外廓上に得た零點からの距離に等しく取つて其の點から眞つ直ぐに上つて5の點からの水平線と交はる點を求め、さうすると之は殆んど1.1吋の曲線に近い、故に圓筒の厚さを1.1吋と決めるのである。

茲に擧げた線圖は參考の爲に書いたものであつて實際に水壓筒の設計に當つては今一層之を擴大したものを書かねばならぬ、すると一層正確に近い値を求められる。又實地の場合には便利の爲め第五圖の右端の垂直線を第六圖の下端の水平線と一致せしめる、言ひ換ふれば第五圖のXの線を第六圖のOの線と一致せしめると都合がよい。斯の如くして置くと一々第五圖から得た點を第六圖の上に持つて行かずして應力曲線から直ちに厚さの曲線に移ることが出来る。

若し厚さ、直徑及び應力が與へられて應力を求めるには此の線圖を逆に使へばよいことは明かである。又例へば厚さと壓力と直徑とが與へられて應力を見出すには二箇所から線圖に入ることが出来る。即ち直徑或は壓力とから入つて夫々垂直或は水平線に沿ふて進み厚さを見それから應力の曲線に到達するのである。以上の如



五〇  
 く此等の曲線を用ひるときは少しも數學上の計算に依らずして、直徑、應力、壓力及厚さの四量の内三量を與へて任意に他の一量を求めることが出来る。又他の著者は第七圖の如き線圖と次の様な説明を與へて居る。  
 今種々なる壓力形狀及び材料に對する圓筒の厚さを計算しやうとするに少しも接ぎ目のない薄い圓筒に於ては次の公式を用ひる。

$$t = \frac{pd}{2s}$$

但  $t$  = 圓筒の厚さ(吋)

$p$  = 壓力(毎平方吋に付き封度)

$d$  = 圓筒の内徑

$s$  = 許し得べき實際の壓力

厚い圓筒に於ては(既に第二章に示した如く)パー氏は其著「材料の弾性及抵抗」第三十六頁に

$$t = r \left[ \left( \frac{h+p}{h-p} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

但  $r$  = 内半徑

$h$  = 圓筒の内部に於ける許し得べき最大の周張力(Hoop Tension)

$t$  = 圓筒壁の厚さ(吋)

$p$  = 毎平方吋に加はる内壓(封度)

ランキン氏は次の式を與へた。

$$R = r \sqrt{\frac{s+p}{s-p}}$$

但  $R$  = 外半徑

$r$  = 内半徑

$s$  = 許し得べき内應力

$p$  = 圓筒の壓力(毎平方吋に付封度)

之と同じ記號を用ひてラーメ氏は

$$t = r \left( \sqrt{\frac{s+p}{s-p}} - 1 \right)$$

を與へた、又メリマン氏は

$$t = \frac{rp}{s-p}$$

周張力



なる式を興へて居る。必要に応じて記號を變じて吾人は厚い圓筒に就いてランキン氏、ラーメ氏及びバー氏の公式を次の形に纏めることが出来る。

$$s = r \left( \sqrt{\frac{s+p}{s-p}} - 1 \right) \quad \text{或は}$$

$$\frac{p}{s} = \frac{\left( \frac{r}{s} + 1 \right)^2 + 1}{\left( \frac{r}{s} + 1 \right)^2 - 1}$$

メリマン氏は次の如く解いた。

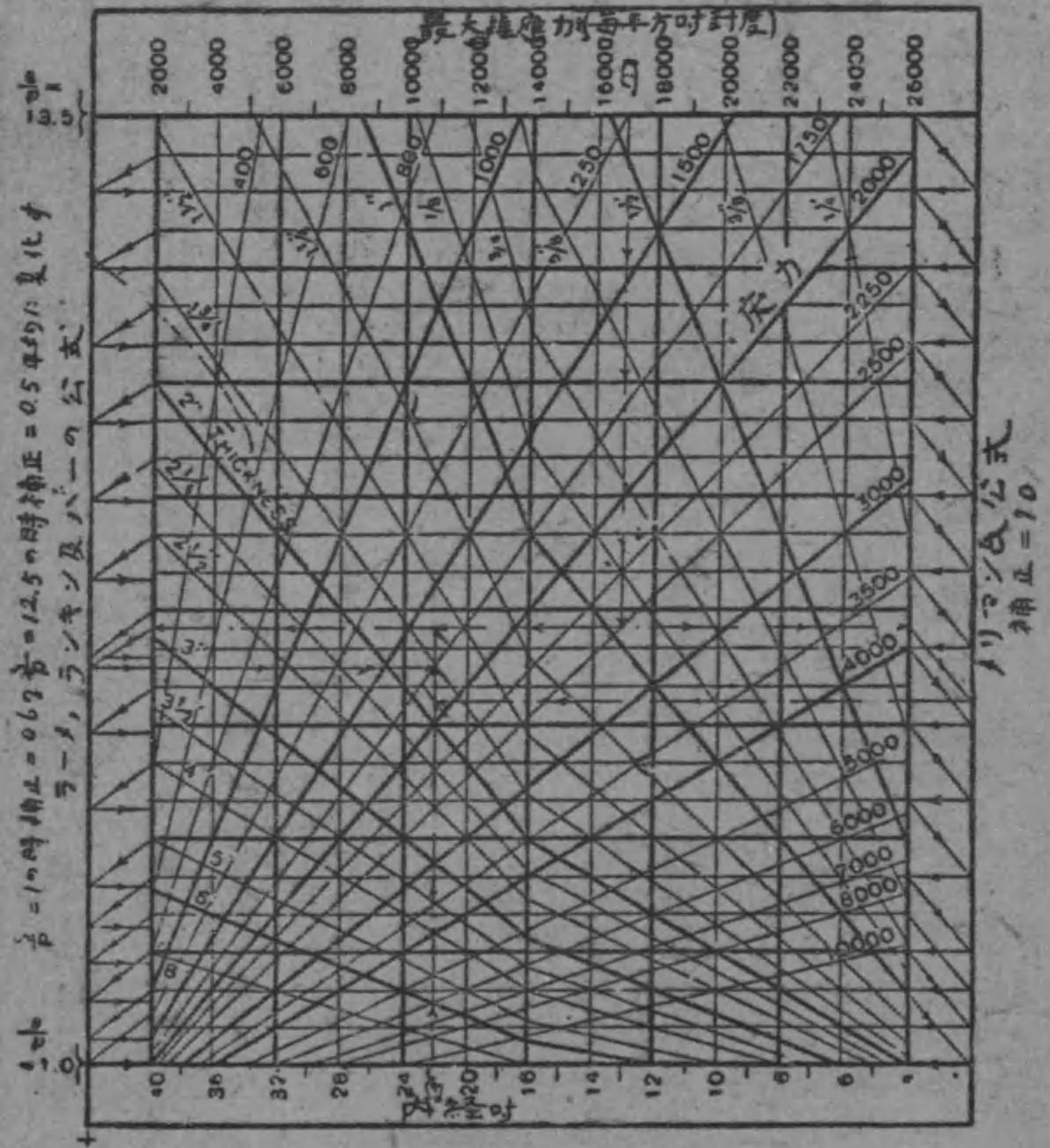
$$\frac{p}{s} = \frac{r}{s} + 1$$

薄い圓筒に於て吾人は次の如く書くことが出来る。

$$\frac{p}{s} = \frac{r}{s}$$

パー、ランキン及ラーメの公式に $r$ の値を入れて之に應ずる $s$ の値を計算することが出来る。今薄い圓筒に對し線圖に於て先づ第一に始めの數字 $s$ を線圖の頂上に於て選び次に第二の數字 $1$ を遊ぶ。此の二つの積 $s \cdot r$ は一側に於て均一の尺度

第七圖



厚壁圓筒設計の線圖

で表はされて居る。(第七圖を見よ)而して最小の讀みは1で最大の讀みは13.5であつて各小部分は0.5である。又同線圖の底部は $r$ の値を2時から20吋まで取り之を二倍して直徑を表はしたものである。此



の半徑は線圖の底部から始める第一の項で第二の項は1-1である。而して其の二項の積 $r^2$ は $s^2$ に等しくして之は一側に同じ尺度で表はされて居る。それで應力からして壓力に辿つて行きそれから線圖の一侧に至る時は直徑から厚さに辿つてそれから一侧に至るものと同一値に於て落ち合ふもので兩者共求める厚さで交はるものである。破線で表はした所の實例は應力一七、〇〇〇壓力二、五〇〇直徑二三吋で其の交點は1-1で薄圓筒の公式に依つて出したものと同じことである。メリマンの公式に於ては $s/r = 1/2 + 1$ である。依つて各0.5の二目だけ補正として右側に設けて置く故に上の例に於ては交點は1-1/2を表はすことになる。又左側に於てはバー、ランキン及びラーメの公式に對する補正を計算値からして記した。此の公式に従へば前に擧げた例の場合は13/4吋の厚さとなる。而して此の數字は殆んど完全なる理論に基づいて居るので最も信頼の出来るものであらう。尙ラーメ、ランキン及びバーの公式に對する補正值を計算する場合に箝め込んだ値は1-1であつた。然るに線圖の左側に於ける尺度は $r^2$ である、此は補正值を曲線にする時に逆

數の表を使つて變化すればよい。厚圓筒に對する種々なる式を上繰り返し述べて來たが之れは各著者が問題解決に當り各々其の所信を表はせる様にする爲であつたのである。

### 第五章 厚圓筒

厚圓筒の設計に當り或る與へられたる壓力に對する厚さの計算式を多數上に擧げた、其内或るものは理論上から出たもので又或るものは實驗上から出たものであつた、故に茲に何等附け加へる必要がない様に見える。併しながら此の問題に關しては一般にあまり良く了解されて居ないで、經驗のある技術家は専ら其の經驗を基礎として少しも公式といふ様なものに據らない様だし公式に依るとすれば先づ比例公式位なものである、此の比例公式は或る範圍内の壓力及び圓筒の大きさには適用されるけれども總ての場合に適用することは出来ないものである。又可成り有名なる工學用のポケットブックにある公式も實際役に立つものがない。又或る種の公式は



高壓力に對しては役に立つが低壓力には値打のないものもあり低壓に役に立つが高壓には役に立たぬものもある。

普通に使はれる公式

低壓力のものに對する一般の計算としては次の様にするのが普通である。即ち

金屬の厚さ = 直徑 × 單位壓 + 材料に許し得る壓力の2倍 + 鑄物の不完全或は其他

未知の壓力に對する係數

即ち之を式で表はせば次の如くなる。

$$t = \frac{DP}{2S} + a \dots \dots \dots (14)$$

但 t = 厚さ(吋)

D = 直徑(吋)

P = 壓力(封度每平方吋)

S = 許し得べき抗張應力(封度每平方吋)

a = 變化し得べき量

a の値は圓筒の大きさ及び壓力に依つて變化する量であつて尙圓筒の働く條件に依つ

ても變るものである。

次に高い壓力の圓筒に對してはラーメの公式が普通に使はれて居つて又信頼し得べき結果を與へるやうである。此の公式は實際に適用する様に次の様な形で表はされる。

$$t = r \left[ \sqrt{\frac{S+P}{S-P}} - 1 \right] \dots \dots \dots (15)$$

但 t = 厚さ(吋)

S = 許し得べき應力(每平方吋封度)

P = 壓力(每平方吋封度)

r = 内半徑

此の公式は理論上から割り出したものであつて彈性体の抗張應力と壓力との間の關係を正確に表はすものである、但し應力を受ける物体の横の收縮は考に入れてない併し之は考にこる必要はない、何となればそれよりも寧ろ材質の變化、不完全なる鑄造及び働きの状態等の方が遙かに有力なる事項になるからである。

今横の方向に於ける收縮を鑄鐵及鋼に就いて考に入れてラーメの公式との比較を



鑄鐵に對する式  $t = r \left[ \sqrt{\frac{4S+P}{4S-4P}} - 1 \right] \dots\dots\dots (16)$

鋼に對する式  $t = r \left[ \sqrt{\frac{3S+P}{3S-4P}} - 1 \right] \dots\dots\dots (17)$

然るにラーメの公式は總ての物体に就て同様である、若し横の收縮を考へにござるときは前式の如く鑄鐵に對しては鋼に對しては之をよと取る。普通の水壓機に於ける様な尋常壓力に對しては公式(16)及び(17)を用ふる時は公式(15)を用ひるよりも厚みの薄いものを得る。併しながら大砲とか集中器(Intensifier)の様な極めて高い壓力のものに於ては公式(16)及び(17)に依る方は公式(15)に依るよりも厚い圓筒が得られる。材料が非常に善良で且つ鑄造が完全であるといふ確信のない以上鑄鐵では毎平方吋につき二千封度以上の壓力に使つてはいけない。(15)及び(17)の公式は圓筒の内層が先づ破壊するものとの假定から引き出した結果である、而して實際に此の假定の如く圓筒の内層が先づ壞はれるといふと圓筒の内徑が増加して來て圓筒に加はる壓力が

集中器

増加し漸次破壊は外層に及ぼし遂に圓筒全部が破裂する様になるものである、それ故公式は壓力に依つて圓筒の内部に材料が耐わられない様な應力を起さない様な厚さを與へるのである。

此等の諸公式は上の様な假定に基いて出したものであるから各々の許し得べき抗張應力に對し或る限られたる壓力があらねばならぬ、而して若し壓力が此の限度を超ゐると側壁を幾ら厚くして置いても圓筒の内層に許し得べき抗張應力以上の應力を生するのである。そこで吾人は此の壓力の制限を見出す爲めに再びラーメの公式を調べて見よう。今  $P=S$  とするとき

$$t = r \left[ \sqrt{\frac{S+S}{S-S}} - 1 \right] \text{即ち } t = \infty$$

それ故に理論上からは  $S$  は即ち作用壓力の限度である。但し實際には經濟上の理由からして之より遙かに以下である。著者は厚さを半径に等しくすることが實際上の限度と取る、若しより以上の厚さを要するときは  $S$  により以上の値を用ひ従つて一



層低い安全率を取る、換言すれば一層上等の材料を用ふるのである。今公式(17)に於て  $P = \frac{3}{4} S$  を置けば

$$l = \sqrt{\left[ \frac{\sqrt{3S+0.75S}}{3S-3S} - 1 \right]} \text{ 即ち } l = \infty$$

即ち此の公式に於ては作用壓力の限度は無限であつて、(15)式に於けるよりも壓力に應じて厚さの増加する割合が多いことを示して居る。次に公式(16)に於て  $P = S$  とすれば再び  $l = 8$  となる。

次に屢々用ひらるれ公式は

$$l = \frac{P}{S} \left( 1 + \frac{P}{S} \right) \dots\dots\dots (18)$$

此の式は實驗式であるが、(15)式に於て壓力を限定したる場合と甚だ近似の結果を得る、又此の式は  $S$  と  $P$  との間の實際上の關係を表はさないもので單に(14)式の  $a$  の値に係數  $\left( 1 + \frac{P}{S} \right)$  を入れたものである、此の係數は壓力及應力の増加と共にさう正確に變化しない。今  $P = S$  を置くときは

$$l = \frac{S}{S} \left( 1 + \frac{S}{S} \right) = 2$$

となり厚さは2倍となる。それで譬ひ若し  $P = 2S$  としてもそれで見掛上では充分厚い側壁が得られる、併しながら此の壓力に對して實際にどれ位な應力が起るかを見附けるには(15)の公式に依らねばならぬ、公式(18)は理論上からも實際上からも間違つて居る。

圓筒の厚さを支配する條件

以上に於て吾人は圓筒の厚さを計算する種々なる公式を調べ又適當なる實際上の事柄を與へたから次に進んで圓筒の厚さを支配する色々な條件を調べて見よう。

- 一、同一の鑄鐵から取つた鑄物でも其の化學的及び物理的性質並に鑄造の完否は取つた部分や又鑄型の状態に依つて違ふ、異なる鑄鐵から取つたものは尙一層違ふ
- 二、鑄物には厚さに限度があつて其れよりも薄いものは作ることが出来ない、此の限度は金屬の種類と其の性質並びに技術者の熟練の程度に依つて違ふ。



三、不熟練の起重機運轉者に取扱はれると鑄物は非常に激しい衝撃及び打撃を受け其の結果屢々實際運轉上起る應力以上の應力を受けることがある。

四、水壓機に於て圓筒は衝撃を受けるが其の衝撃の大きさは水壓機の設計に由ることが多く又使用の状態或は構造及び弁の取扱法に由ることも多い。

以上の内化學的及び物理的性質に關するものは安全率に就いて注意を拂はなければならぬ。また鑄造の完否に依るものはより多くの金屬を加へるやうにして加減して行くべきもので此の手加減は材料の種類に依つて異なる譯である、列へば鑄鐵では真鍮よりも割合に餘計の金屬を附け加へるが如くである。又此の附け加へる金屬の量は直徑の増加と共に或る割合で増加し鑄造の時の壓力の増加と共に或る割合で減少するものである。壓力が増加すれば金屬は其容積に比し實質が多くなるからして鑄物は健全になつて餘計の金屬を附加へる必要がなくなる、實際に於て壓力がある程度以上になると少しも餘計の金屬を附加する必要がなくなるものである、又附加する金屬の量は金屬の性質及び金屬に許し得べき抗張應力に依るもので之は設計

者の手心に俟たねばならぬ、金屬の性質の善良なるものは鑄物は比較的薄くして然かも健全である。比較的大なる許し得べき抗張應力に於ては鑄物は一定の壓力に對して抗張應力の小なるものよりも薄い、従つて健全な又信頼し得べき鑄物を作るには一層多量の金屬を附け加へねばならぬ。鑄物の薄さの制限は其金屬の性質に依つて異なるもので之は設計者の經驗と判斷に俟つべきものである。

上に列擧した四箇條の條件からして著者は理論と實際とに一致し又高低何れの壓力にも又如何なる許し得べき抗張應力にも適應する所の一つの公式を導き出した。而して壓力に對する第一次に出す厚さは公式(15)に依つた。そして之に二つの量を加へた、其内一つは直徑の増加と共に増加するもので一つは直徑の増加に従つて減少するものである(但し前のものと同比例ではない)而して二者何れも毎平方吋の壓力が増加するにつれて減するものである、そこで其の公式は

$$t = \sqrt[3]{\left[ \frac{S+P}{S-P} - 1 \right] + \frac{S-P}{S} (0.452 - 0.0061D)} + \left( \frac{S+P}{S+P} \right)^6 0.023D \dots \dots \dots (19)$$



記號は總て前に與へたものと同一である。

今右の公式について調べて見よう。今  $P=S$  とすれば  $t=8+0+0$  となつて理論上正しいものとなる。又若し  $P=0$  とすれば  $t=0+(0.452-0.0061D)+0.023D$  となり最小の厚さを得る。故に直径二吋の圓筒に對しては、此の値は  $t=0.4398+0.046=0.4858$  吋となり、三十吋の圓筒では  $t=0.269+0.69=0.959$  吋となり又直径六十吋の圓筒では  $t=0.086+1.38=1.466$  吋となる。此等の厚さは鑄造の出來得る限界内にあるから右の公式は實際上の立場から正しいものである。

厚い圓筒を設計する場合の計算線圖

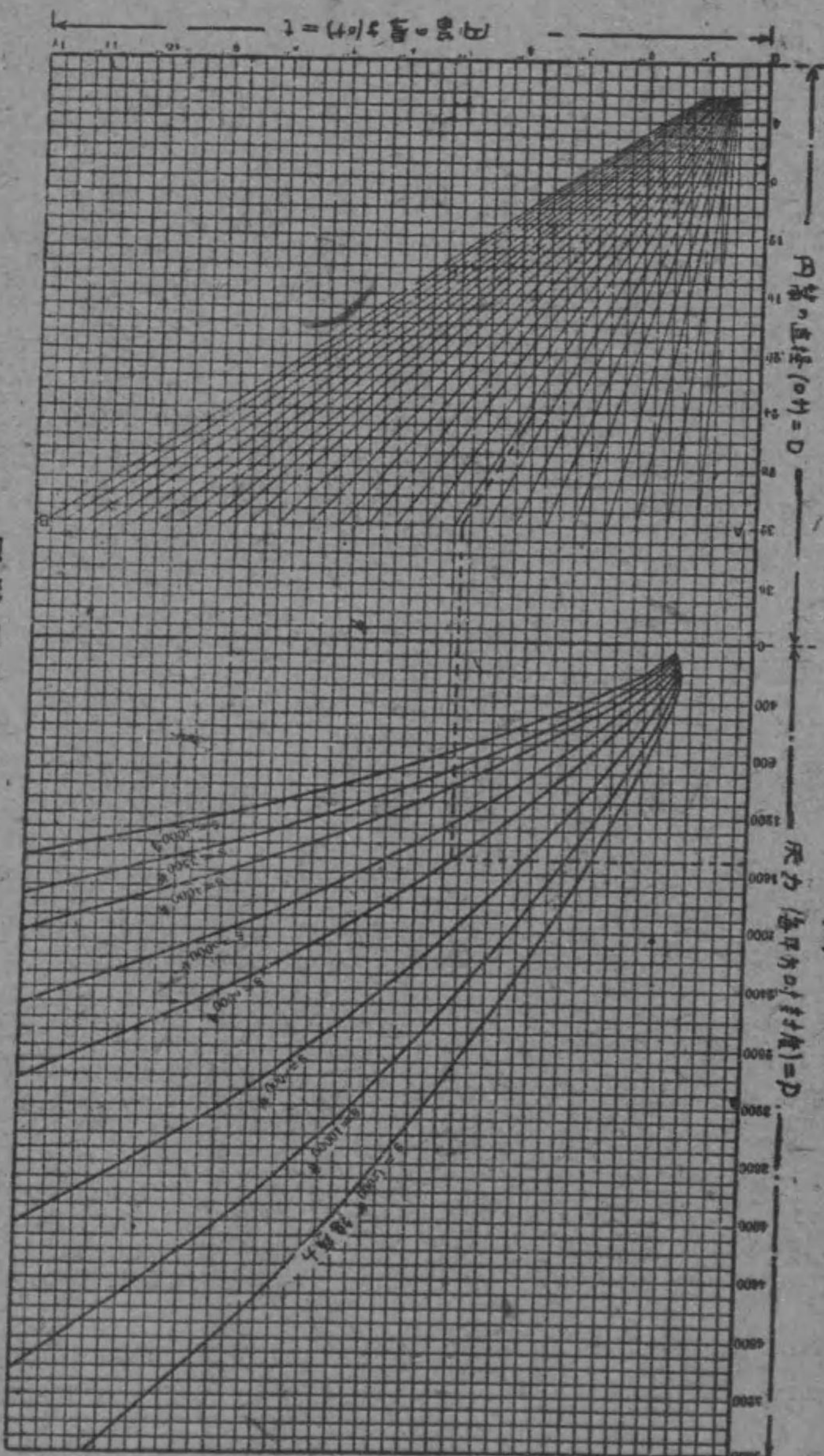
第八圖に示す線圖からして毎平方吋五千六百封度までの壓力及び普通の纖維應力に對する圓筒の厚さを直ちに求めることが出来る。此の線圖の基く公式は

$$t = r \left[ \sqrt{\frac{S+P}{S-P}} - 1 \right] + \frac{S-P}{S} (0.452 - 0.0061D) + \left( \frac{S-P}{S+P} \right)^6 0.023D$$

但  $t$  = 圓筒の厚さ(吋)

$S$  = 許し得べき纖維應力(毎平方吋封度)

第八圖



厚壁圓筒の計算線圖

$P$  = 作用壓力(毎平方吋封度)

$r$  = 圓筒の内半徑(吋)



D = 圓筒の内徑(吋)

【線圖の用例】 D = 24吋 P = 1,500 封度 S = 6,000 封度 圓筒の厚さを求む。

【解】 水平線の上に P = 1,500 から六〇〇〇封度の曲線まで行き、然る後垂直線を基線 A まで下り、然る後對角線狀に直徑二四吋の處まで辿り、それから又垂直に最底の尺度まで下るときは、求むる厚さ三吋四分の三を得る。

第八圖の線圖に於て AB は基線であつて其の上に纖維應力の曲線を書いた、此の曲線に於て圓筒の直徑三十二吋を以て最大とした、但し對角線を延長することに依り直徑四十吋まで讀むことが出来る、但し纖維應力の曲線は何時も基線 AB に關するものとするのである。又圖に於て對角線を纖維應力曲線の圖中に侵入せしめる場合には其の限度は纖維應力曲線の圖の境界で限られるので例へば五六〇〇の線は最大の直徑九十六吋に當るのである。公式は圓筒の最大直徑として七十四吋まであつて其以上になると右手の頂は負値となる。

纖維應力曲線のお互の間の位置は縦軸上に測つた各纖維應力の値に比例する。例へ

ば若し毎平方吋につき S = 7,000 封度の曲線を求める場合には六〇〇〇封度と八〇〇

〇封度との間を二等して其の所に直徑を引けばそれでよろしい。又若し S = 6,500 封度を求めるには六〇〇〇封度の上に六、〇〇〇と八、〇〇〇との四分の一を取り直線を引けばよい。斯の如く幾つでも簡單に引くことが出来るのである。

蒸氣或は水壓用の圓筒の如き間歇的の應力に對するものは鑄鐵では S = 3,000 封度普通の眞鍮では S = 5,000 封度鑄鋼では S = 10,000 封度と著者は何時も取つて居る。又管道の附屬具、鑄管又は空氣筒の様に徐々に一定の割合で加はる所の應力に對しては鑄鐵に對しては S = 3,500 封度、眞鍮に於ては S = 6,000 封度、鑄鋼に於ては S = 12,000 封度毎平方吋位に取る。

若し圓筒の側部に孔を穿つて外へ通する様にする場合には前の線圖に示した厚さは五千封度までの壓力に對して餘り厚過ぎる、それで厚さは次に示した値だけを減じて安全である。今 T を求むる厚さとし T を線圖から得た厚さとすれば

$$T = t \frac{500 - P}{500} (0.31 + 0.0146D)$$



但 D = 圓筒の直徑

之で計算すると五千封度の壓力に對し「」なる。

二千封度以上の壓力に對しては鑄鐵は使ふことは出来ない、殊に若し外力によつて彎曲及張力が之に加はる時の安全率過小となり厚さは許し得べからざるものとなる、若し譬ひ砲鐵の如き特別に良質の鑄鐵を使ふとしても二千封度は安全の限度である。何となれば衝擊に依る最大壓力を決定することは大抵の場合に不可能であるからである。又譬ひ衝擊に依る壓力が許し得る限度内に在るとしても鑄鐵といふものは到底度重なる衝擊に耐るものではないのである。

低壓力の圓筒に在つては金屬の厚みは作用壓力が要求する所の厚さよりもすつと大きい。但し充分堅固なる鑄物を得られる様なものでなければならぬので斯の如き圓筒に其の材料の許し得る抗張應力を超過しないで加へる壓力といふものは次の公式から得られる。

$$P = S \frac{R^2 - r^2}{R^2 + r^2} \dots\dots\dots (20)$$

但 R = 外半徑

右式中Rを除く他の記號は總て前のものと同意味である。

或る與へられたる壓力が生ずる所の張力を求めるには單に上の公式を變形してSに就て解けばよろしい、即ち

$$S = P \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \dots\dots\dots (21)$$

公式(19)に與へた所の厚さは仕上げた仕上げないに關はらず圓筒の眞の厚さである。若し水壓筒に於けるが如く唧子が不収縮液に働く時は、圓筒の仕上げない場合の厚さである。それで若し圓筒を仕上げた時は、仕上げた時の厚みと見る。若し圓筒の内部を削ぐる場合には、削ぐつた圓筒の厚さこそせねばならないので此の削ぐつた量に對するだけのものをよしや原内徑にする爲めに鋼管を中へ押し込んだ場合に於ても内部に附け加へなければならぬ。又圓筒が衝擊を受けるものである時は、之も其内に入れて考へねばならぬ。水壓機に於ては其の衝擊の量は略々計算すること



管系 静圧

が出来る。此の計算は衝撃の實効値の如何に關はらず其の最大の影響を勘定すれば  
 よろしい。良く設計された所の管系(Pipes)に於ては高壓に於ける衝撃の影響は一  
 般の人の考へて居る所と反對に低壓に於けるよりも同じ仕事に於いて少ない。静壓  
 に(Static Pressure)對する厚さを計算し其の大きさが作業状態に於ける最大の衝撃か  
 ら生ずる所の張力に對し充分の厚さかどうかを調べて見て若し其の應力が許し得べ  
 き限度内にある時は圓筒はそれで充分である。鑄鐵に於ては衝撃に依る最大抗張應  
 力は衝撃が度々起るものでは毎平方吋四千封度を超過してはならない、衝撃が遇に  
 起るものでは毎平方吋四千五百封度を越さない様にする。又上の場合に直線では六  
 千封度から七千封度鋼鐵では一萬五千封度から一萬七千封度が平均の値である。水  
 壓試験用のポンプ殊に管の試験に使用するものでは先づ試験壓を加へる前に管に低  
 壓の水を填充する。故に其の場合には幾ら急激に壓力を加へても水は此の場合に靜  
 止して居るから材料に壓力の二倍に對する應力を起すことはない。所が唧子を圓筒  
 中で働かせる場合に於ては運動して居る水が急激に靜止せしめられる爲に其の水の

慣性

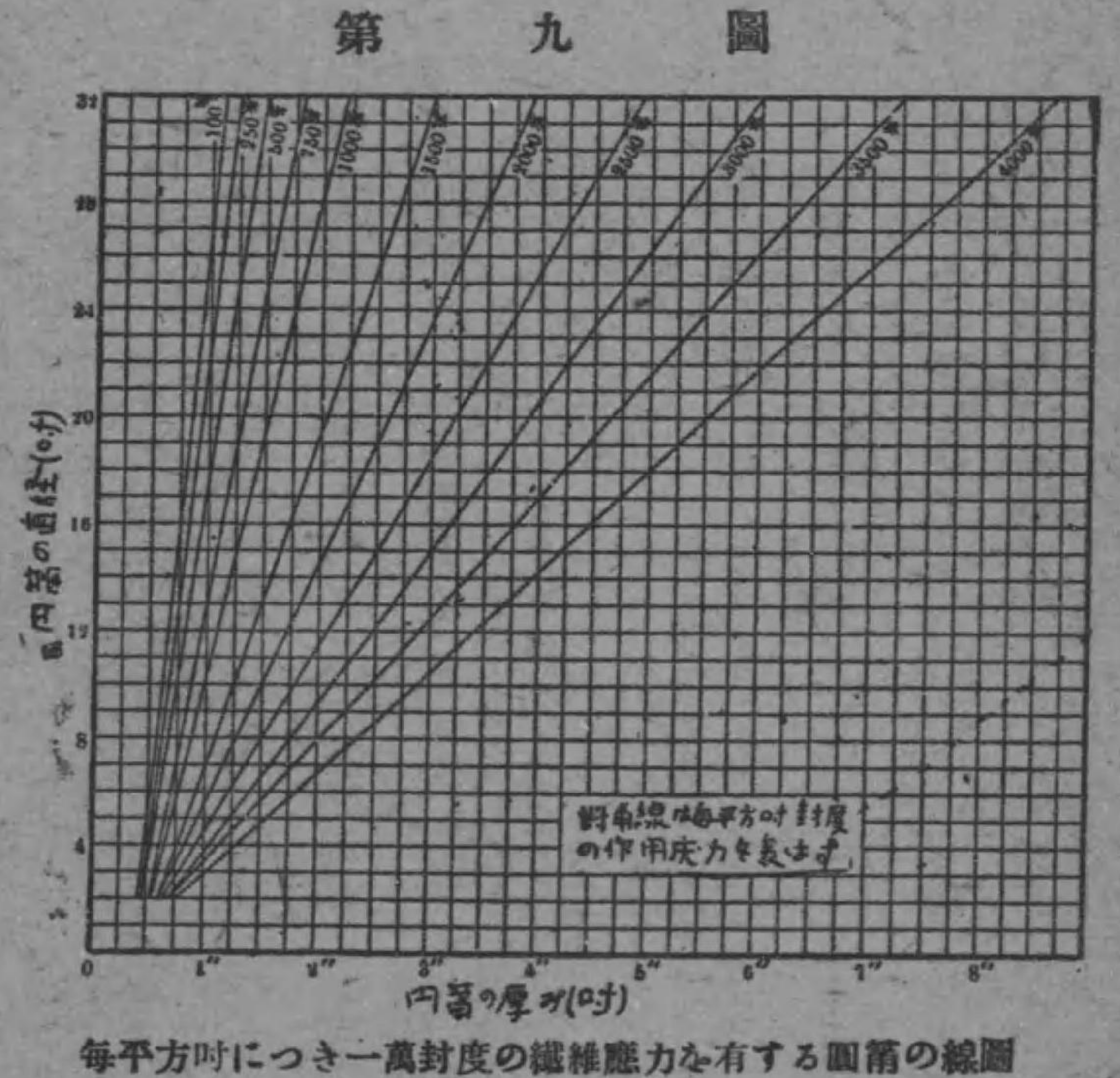
蓄力槽

慣性(Inertia)の爲に内部の静水壓に對するものよりも數倍の應力が起つて來るもの  
 である。又圓筒が一つの支持物として働く時は其壓縮應力が殆んど許し得べき抗  
 張應力と等しい場合に於ても其の厚さは増加することは要らない、此の場合は蓄力  
 槽(Hydraulic Accumulator)の様なものであつて此のものでは唧子は靜止して居つて  
 圓筒は平衡重錘を持つて居つて同時に内部の破裂壓力に抵抗するものである。然し  
 ながら數學的には重錘に依る壓縮應力の自乗と壓力に依る張力の自乗との和の平  
 方根は材料の許し得べき抗張應力を超過しないことが必要である。それで若し圓筒  
 が重錘を支持する場合に抗張應力を生ずるときは圓筒内部の破裂壓に依る抵抗力の  
 外に今少しの金屬を附け加へねばならぬのである。此の附加金屬は肋材(Ribs)の形  
 で加へてもよい、而して肋材として加へるときは不平均の冷却、或は收縮に依る應  
 力を防ぐ爲に其の厚さは圓筒の厚さと同一にせねばならない。又若し圓筒が彎曲さ  
 れる様に働く場合には別に幾らかの金屬を附加せねばならぬ。而して其の附加金屬  
 の圓筒の中心軸に對する慣性能率(Moment of Inertia)が彎曲應力に抵抗するに充

肋材

慣性能率





分なものでなければならぬ。第八圖の線圖に加へて一萬封度の纖維應力のみに対する線圖は第九圖の如きものである。此の線圖にカーブの引き方及び作用壓力の増加と共に厚さが如何に増加するものであるかを示して居る。尙此の線圖は公式(19)は直線式であることを示し讀者をして厚さの増加の割合をよく了解せしめることは第八圖の一般線圖よりも優つて居る。

### 第六章 鑄鐵圓筒の破壊強

數年以前であつたが著者は鑄鐵圓筒の破壊強に就いて米國機械工程師會 (American Society of Mechanical Engineers) に報告をしたことがあつた。該報告中に圓筒の厚さにつぎ次の公式を與へた。

$$t = \frac{pd}{4S} + \sqrt{\frac{pd^2}{S} + \frac{p^2 d^2}{16S^2}}$$

但 t = 圓筒の厚さ(吋)

d = 内徑(吋)

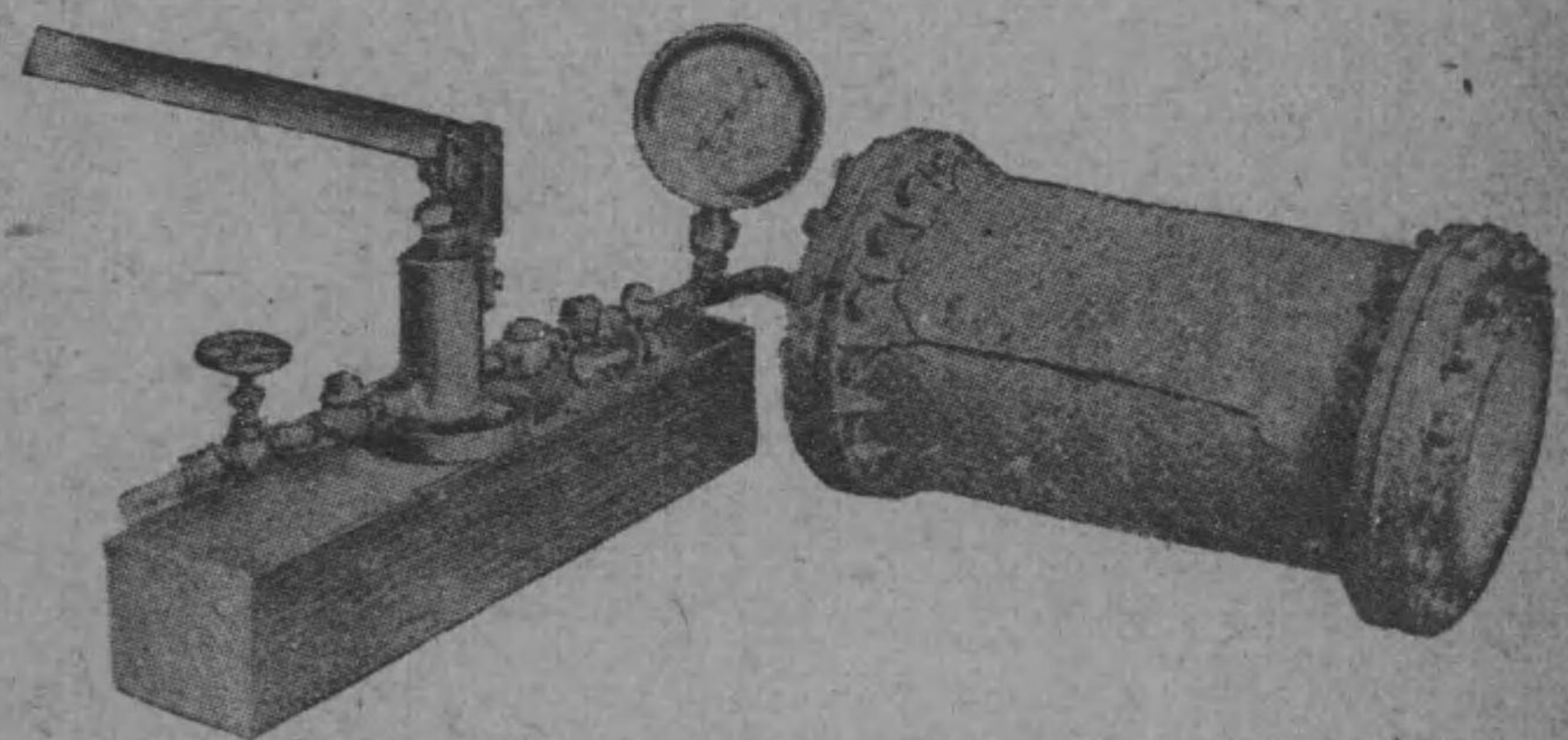
p = 内壓(毎平方吋につき封度)

S = 金屬の抗張強(毎平方吋につき封度)

右の公式に於て平方根の中の第一項は圓筒の厚さ或は強度に於ける或る缺點に基づく圓筒の曲り或は變形に對する補正であつて其の内の定數は實驗に依つて決められるものである。それで若し S の値をすれば式は



第十圖

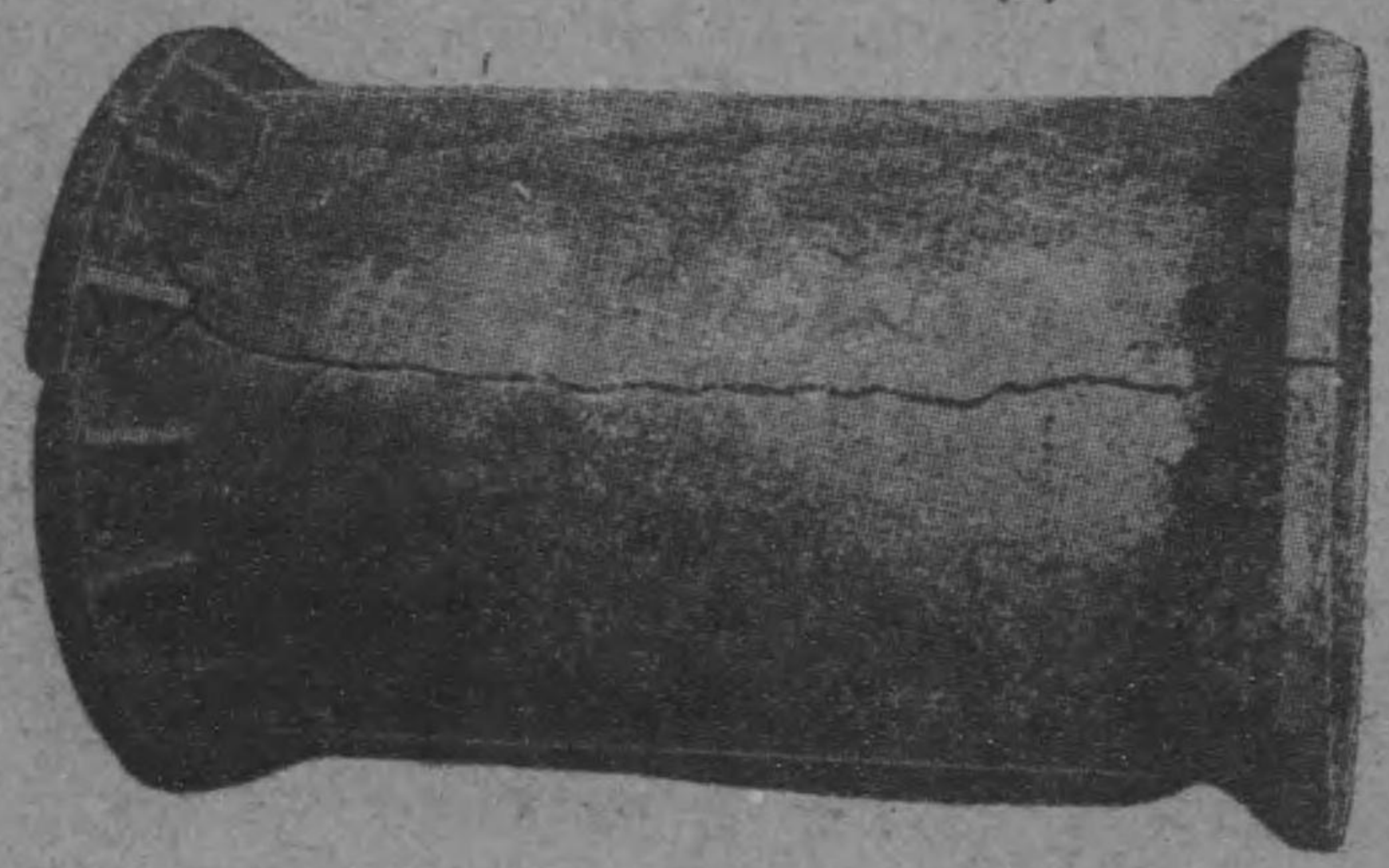


となる、之れ即ち圓筒の公式の通常形である  
 色々の變つた機關の氣管に就いて試験した結果  
 に依れば、の値は〇・〇三から〇・一〇の間にあ  
 つて其の平均値は〇・〇六となつて居る。又六  
 時から十二時までの間に於ける種々の直径の圓  
 筒に就いて試験した所に依ると、の値は殆んど  
 平均に變つて行くもので其の平均値は〇・〇五  
 であつた。試験に用ひた圓筒の金屬は非常に目  
 のつまつたもので鑄造も極く堅固で毎平方時に  
 つゝ二萬四千封度の抗張力を持つたものであつ  
 た。而して例の

$$S = \frac{pd}{2t}$$

の公式から計算した抗張應力は平均約實際のもの、三分の一であつた、之に依つて  
 斯様な公式は鑄鐵には應用することの出來ぬも  
 のだといふことを知ることが出来る。

第十一圖



逆止瓣

したものを表はす、此の實驗に於て四個の圓筒を水壓を以て破壊するまで試験した

千九百三年から四年にかけてオーヌチン(A.H. Austin) 氏及びブラウン(R. A. Brown) 氏等は  
 オハイオ州クリーヴランドの工業學校の實驗室  
 に於て此の性質に就き一つの連續的の實驗をや  
 つたが其の結果は此の問題に新しい光明を與へ  
 た。

此の實驗に使用した装置は第十圖に示した様な  
 もので即ちポンプ、水管、逆止瓣(Check valve)  
 水壓計及び圓筒等で圖は試験すべき位置に配列  
 したものを表はす、此の實驗に於て四個の圓筒を水壓を以て破壊するまで試験した

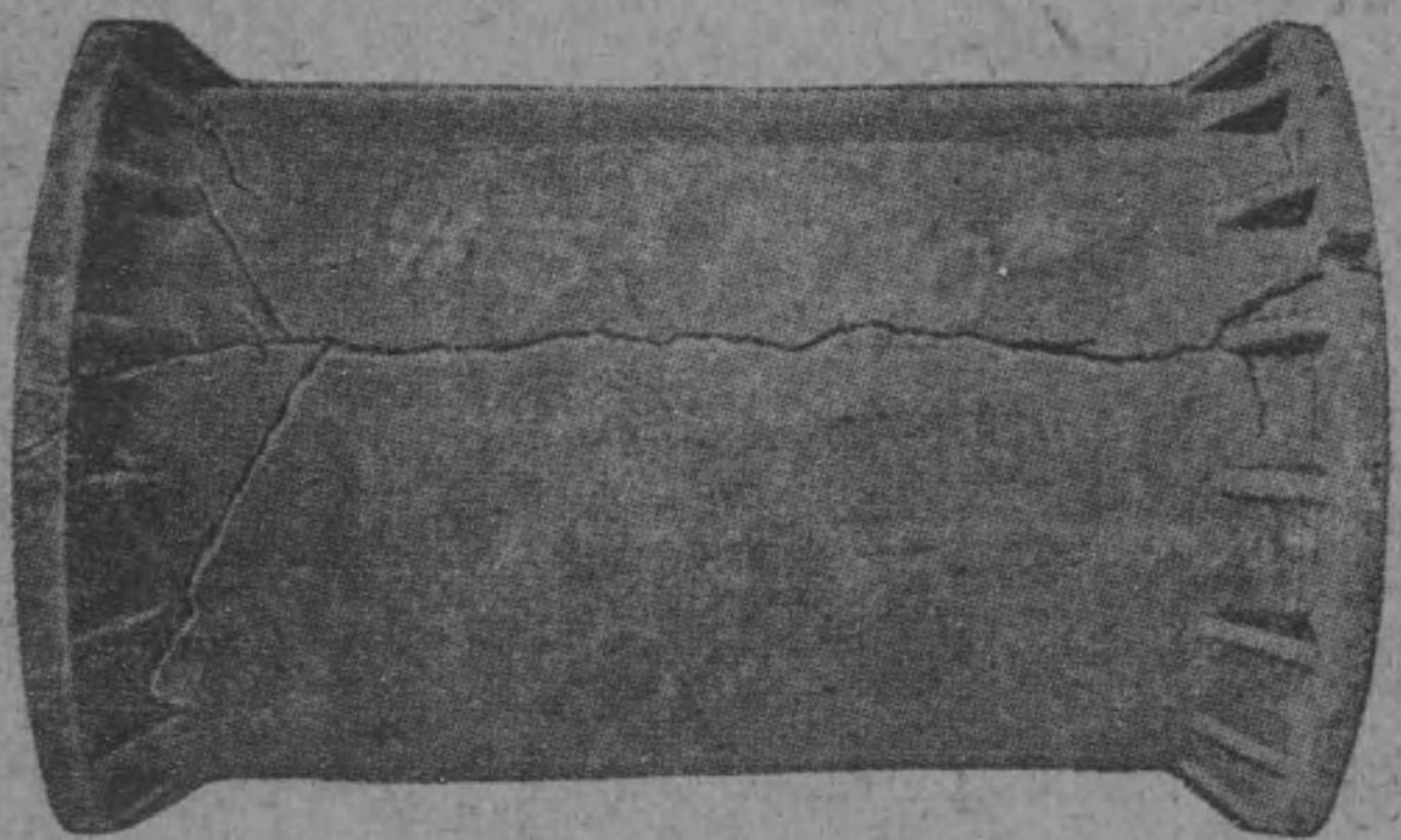


七六  
 が各圓筒は長さ二十吋、内徑八分の一、側壁の厚さ四分の三吋を有して居た。又各圓筒のフレンヂは側壁と同じ厚さを有し第十圖に示す如く十六個の三角形のブラツケットを有して居る。而して圓筒の蓋は十六本の軟鋼製のボルトを以てフレンヂに取附けられ各ボルトは直徑八分の五吋、每平方吋の抗張強八萬封度を有して居る。而して各ボルトの頭の側を切り取つて成るべくボルトを圓筒の側壁に近寄せせる様にした、之れはフレンヂに成る可く彎曲を起させない爲である。又漏洩を防ぐ爲めに亞麻仁油に浸した藁板製の填隙環(Gasket)を淺い溝に嵌め込んだ。尙又同一の目的を以て圓筒の内側をすつかりパラフィンで塗つた。此の實驗以前にやつた幾多の實驗に於て高壓では水は非常に小なる孔からでも漏れ出るものであることを確めた。

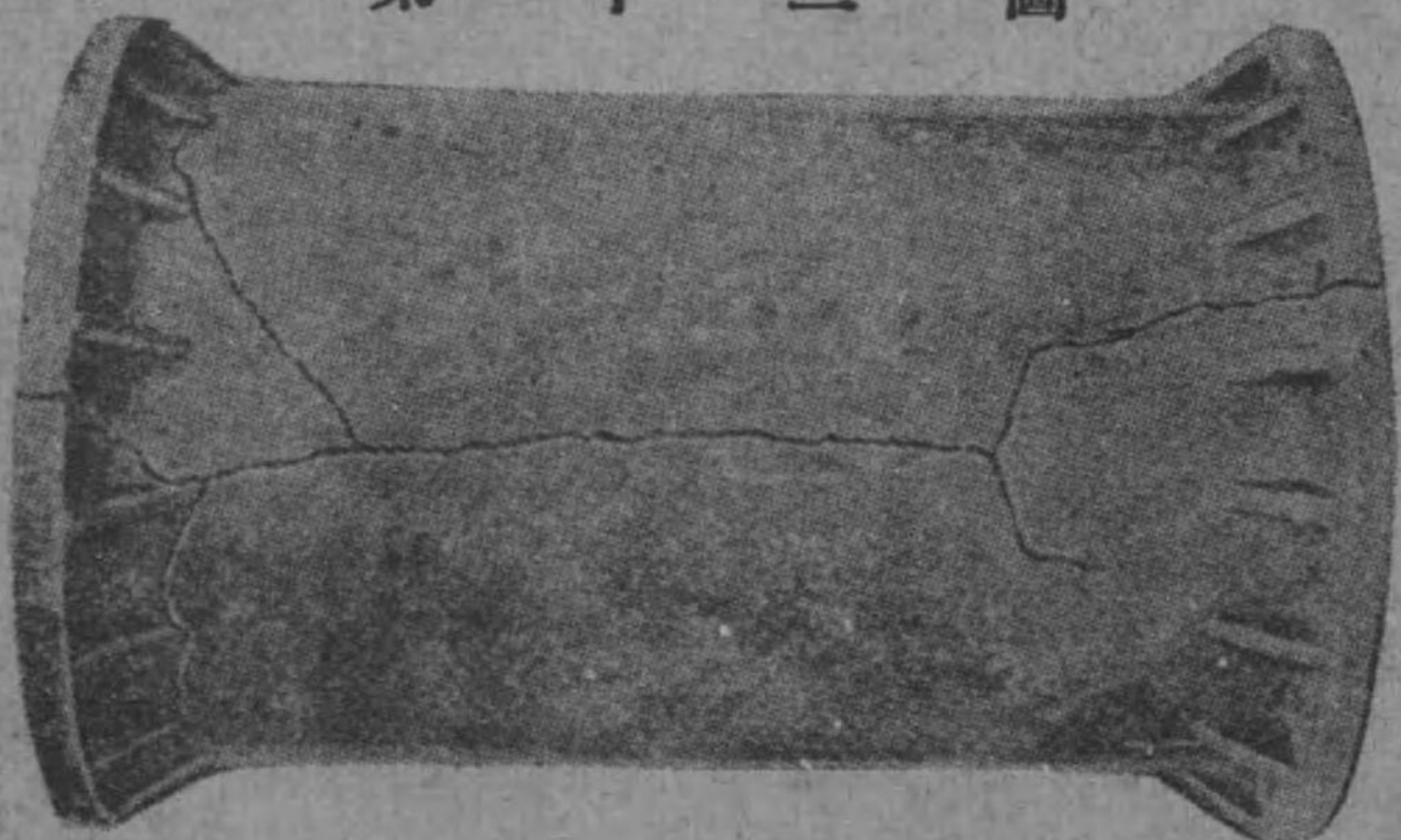
最初に使つた圓筒の頭部は厚さ一時八分の一であつて其外側を八個の放射狀の肋材で強めた。然るに此の方法は結果が悪かつて僅か每平方吋六百五十封度の壓力で破壊した。第二に作つたものは八百五十封度で破壊した。肋材は外側にあるので頭部

の反りの爲に張力を受け何の價値もないものであつた。所が肋材は之を内側に設けることは實際

第十二圖



第十三圖



つた。第十圖から第十三圖に至る四つの圖は破壊した圓筒を示し其の上を書いた數

上出来ないことであるから第十圖に示す如く頭部を其の中央に於て二吋八分の一の厚さにしたさうすると少しの故障も起らない様にな



字は破壊の瞬間に於ける毎平方吋の壓力である。此等の圖を見ると破壊は殆んど凡そ縦の方向に起つて居つてフレンヂの下の部分には破壊が極少ないことが解るであらう。此の事は他の幾多の實驗に於ても同様の結果を示して居る。フレンヂを唯だ單に厚くしても効力がないので其の代りにブラケットを設けたが之が効力があつたことも圖を見れば解る。此等の圓筒に使用した金屬は寧ろ割合に小さい抗張力を有つた軟かい鼠鑄鐵であつた。即ち圓筒の側壁から取つた試験片を取つて之を試験機にかけて抗張力Sを見たのは僅かに一萬四千封度の平均であつた。一般に鑄鐵の抗張力は試験片を取つて試験をすると實際に使用する際に於ける強さより幾分小さい之は彎曲作用に由るものであつて實際の強さは試験の際の強さよりも幾分多い。又此の圓筒から取つた試験片につき其の切斷(Cross Breaking)の強さを試験せるに僅か三萬封度であつて之も實際のものよりも少ない。次表は試験した種々なる圓筒の寸法及び試験壓を示すものである。而して前に述べた如く凡ての圓筒は同一直徑十吋八分の一、同一長さ二十吋である。

切斷

此の表に依つてcの平均値は肋材を使はなご。

鑄鐵製圓筒の破壊壓

番號	厚さ			破壊壓	cの値	S = $\frac{pd}{2t}$
	最大	最小	平均			
1	.775	.757	.766	1350	.0213	9040
2	.783	.697	.740	1400	.0152	10200
3	.740	.703	.721	1350	.0126	9735
4	.770	.670	.720	1200	.0177	9080

cの平均値 = .0167

フレンヂの圓筒の僅々三分の一であることを見ることが出来る。又上の表中最後の欄にあるSの値は薄い圓筒に就いて公式から勘定した應力を與へて居つて彎曲に依る應力は譬ひ肋材を使つたフレンヂの場合に於ても決して省略することが出来ぬことを示して居る。此事は本章の最初に與へた公式をSにつき解か

$$S = \frac{pd}{2t} + \frac{cpd^2}{t^2}$$



とすれば最も明白に示すことが出来る。而して右の式に於て第一項は直接の張力に依る應力で第二項は彎曲に依る應力である、今試験機から決められたSの平均値を一萬四千封度と假定すれば四つの圓筒に對して次の結果を得る。

番號	S	$\frac{pd}{2t}$		$\frac{cpd^2}{r^3}$	
		2t	pd	r <sup>3</sup>	cpd <sup>2</sup>
1	14,000	9,040	4,960		
2	14,000	10,200	3,800		
3	14,000	9,735	4,265		
4	14,000	9,080	4,920		

偶然の應力

偶然の應力 (Accidental Stress) とも稱すべしものは全体の約三分の一と見られる。總ての圓筒に於て破壊は先づ最初中央に近い或る弱い點に起りそれがすつと長手方向に擴がつて行き二三のボルト孔に於て横に枝が出るのを常とする様である。此の點に關して前に言つたクリーヴランドの工業學校の實驗室に於てピアレス自動車ガソリン機關の圓筒に就いて最近行つた實驗は頗る興味あるものである。此の圓筒は之に毎平方吋につき一千六百封度の水壓をかけたのに丁度下部のフレンド

の上の所で圓周的に破壊した。該圓筒の直徑は四吋四分の一、厚さは十六分の五吋であつた。又フレンドは十六分の九吋の厚さであつた。破片を檢べて見ると奇麗な極目のつまつた鐵であることが解つた。それで今抗張強を毎平方吋につき一萬八千封度と假定して此の値を代入すれば、 $\approx 0.024$ を得る。此等の實驗の結果から引出した結果は次の通りである。第一に若し圓筒のフレンドを用ひない場合には次の公式から決定した壓力よりもすつと小なる壓力に於てフレンドに近く圓周的に破壊するものである。

$$P = \frac{2tS}{d}$$

第二に若しフレンドを肋材を入れて充分強くし長手方向に破壊することを期する時は彎曲及其他の偶然の應力に對し非常に大なる餘裕を設けなければならぬ。



大正九年五月廿五日印刷  
大正九年五月三十日發行

譯者 恒川 潔

發行者 和 田 規 矩 夫  
神戸市東川崎町二丁目十四番地  
株式會社川崎造船所

印刷者 松 島 興 三 郎  
神戸市相生町三丁目五十六番屋敷









385

69



終

