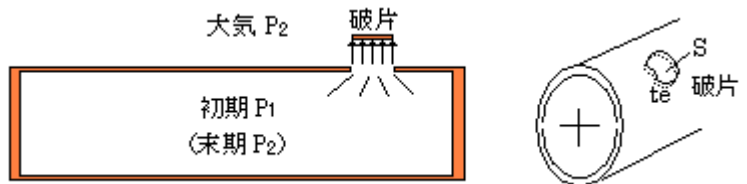


【整番】FE-21-TM-005	【標題】気圧試験による破片の飛距離の推算
分類：流れ(圧力レリーフ)/種別：技術メモ	作成年月：H15.8/改訂：Ver0.1 (H19.5)
	作成者：N.Miyamoto

全3枚

1. 圧力容器/ボイラ/圧力配管類では圧力保持壁が万一破損したとき、その破片がどこまで飛ぶかが問題になることがある。例えば機器/配管の耐圧試験では、破片の飛来を前提にその周辺に禁足区域を設けて試験中に人が立ち入らないようにしている。本 TS では気圧試験時の破片の飛距離につきその推定式を紹介する。



モデルは上図のような密閉円筒構造とし、初期圧力(試験圧力) P_1 の気体が充気された状態で圧力保持壁の一部が破断して表面積 S /厚さ t_e の破片となって飛翔するものとする。

2. 円筒構造物の胴における破損時の飛距離 L は次の簡単な式で見積もることができる。

$$L = f (n / \kappa) \{d_i^2 / (d_o^2 - d_i^2)\} \{(P_1 - P_2) / \gamma\}$$

ここで、 L =飛距離 (m)、 d_i =円筒内径(m)、 d_o =円筒外径 (m)、

f =安全率(通常 2.0 程度)、 n =有効エネルギー比 $=0.05\{\kappa / (\kappa - 1)\}$

κ =試験流体の断熱比(ー)、 γ =金属の比重量(kg/m^3)

P_1 =膨張前の気体圧力(初期圧力)($\text{kg/m}^2\text{A}$)、 P_2 =膨張後の気体圧力(大気圧)($\text{kg/m}^2\text{A}$)

3. 式の背景(導入過程)を示しておく。

まず、試験中に試験圧力まで加圧圧縮された気体は欠陥部の破断で急開放されて膨張し、最終的に大気圧と平衡するまで放出される。この状態は、谷下のテキストの“気体を外気中に排出する場合の変化“(添付参照)に該当する。この場合、添付の式(3.61)において $P_1' = P_2$ 、 $V_1 = V$ とおいて、

$$\text{全放出エネルギー(外部仕事)} = (1 / \kappa) (P_1 - P_2) V \quad (\text{但し } V = \text{容器の容積})$$

このエネルギーの多くは破断孔から周辺の外気に拡散し、破片を動かすエネルギー分もその過程で消耗されるので、実際に破片を飛翔させる有効エネルギー U_o はごく一部分になる。そこで、有効エネルギー比を n とおいて、

$$U_o = n (1 / \kappa) (P_1 - P_2) V = n (1 / \kappa) (P_1 - P_2) (\pi d_i^2 l / 4) \quad (\text{但し } l = \text{容器長さ})$$

内表面積は $\pi d_i l$ であるから、単位表面積当たりの飛翔エネルギー(u)は、

$$u = U_o / S_o = n (1 / \kappa) (P_1 - P_2) (\pi d_i^2 l / 4) / (\pi d_i l) = n (1 / \kappa) (P_1 - P_2) (d_i / 4)$$

破片の内表面積 S に作用する飛翔エネルギー U は

$$U = u S = n (1 / \kappa) (P_1 - P_2) (d_i / 4) S$$

また、破片厚さ $t_e \doteq (\pi / 4) (d_o^2 - d_i^2) / (\pi d_i) = (d_o^2 - d_i^2) / (4 d_i)$ であるから、破片の重量 W は

$$W = \gamma \cdot S \cdot t_e = \gamma S (d_o^2 - d_i^2) / (4 d_i)$$

初等物理より、有効エネルギー(仕事量) $U = \text{移動物重量 } M \times \text{移動距離 } L$ であるから、

$$L = U/M = n (1/\kappa) (P_1 - P_2)(d_i/4)S / \{ \gamma S(d_o^2 - d_i^2)/(4d_i) \} = (n/\kappa) \{ d_i^2/(d_o^2 - d_i^2) \} \{ (P_1 - P_2)/\gamma \}$$

安全率 f を考慮すると

$$L = f(n/\kappa) \{ d_i^2/(d_o^2 - d_i^2) \} \{ (P_1 - P_2)/\gamma \}$$

有効エネルギー比(=破片を飛翔させる有効エネルギー/全放出エネルギー) n に関してストレートなデータはない。わずかに、**H** 社の試験データによれば、

$$\text{破片を飛翔させる有効エネルギー: } U_o = 0.05 \{ 1/(\kappa - 1) \} (P_1 - P_2)V$$

となっているので、これを変形して

$$U_o = 0.05 \{ \kappa/(\kappa - 1) \} (1/\kappa) (P_1 - P_2)V = (n/\kappa) \quad \text{即ち} \quad \boxed{n = 0.05 \{ \kappa/(\kappa - 1) \}}$$

が得られる。

H 社殿の実験は空気試験であったと思われるが試験の詳細は不明。 n 値を確定させるにはもっとデータがほしい。あるいは破孔から噴き出しや破片の飛翔状況をモデル化して理論計算あるいは **CFD** で解くことが考えられる。今後の課題にしておきたい。

4. 前項で得られた飛距離の式は次のように変形できる。但し $(d_o - d_i) = t$ 、 $d_o + d_i = 2d_i$ とする。

$$\begin{aligned} L &= (n/\kappa) \{ d_i^2/(d_o^2 - d_i^2) \} \{ (P_1 - P_2)/\gamma \} = (n/\kappa) (1/\gamma) \{ d_i^2/(d_o - d_i)/(d_o + d_i) \} (P_1 - P_2) \\ &= (n/\kappa) (1/\gamma) (P_1 - P_2) d_i/(2t) \end{aligned}$$

通常 P_2 は大気圧なので $(P_1 - P_2)$ は、容器内圧(ゲージ圧) P_i にあたる。故に

$$L = (n/\kappa) (1/\gamma) \{ P_i d_i/(2t) \}$$

$P_i d_i/(2t)$ は容器のフープ応力である。従って

$$\boxed{\text{フープ応力が大きな設備ほど破片の飛ぶ距離は大きくなる。}}$$

(径/肉厚)比が大きい薄肉シェルになるほど、フープ応力が高く飛距離がでる。また配管に比べ圧力容器はフープ応力を許容応力までとる傾向があるので飛距離がでる。

なお、この飛距離の式には破片のサイズは含まれないことに注目のこと。また **PV** 値が直接的に飛距離に影響しないことにも注目すべき。容器や配管が長くなったからといって飛距離が増加することはない。

ここで紹介した飛距離の式は、あくまでの簡易式である。破損や飛翔のプロセスを巨細にみれば、こんな簡単な式では収まらないだろう。安全率として **2.0** 程度見込んで運用すべきである。

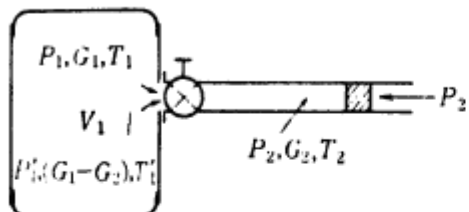
5. 例題 : 設計圧力 **10k** の配管(**200Asch40**)の空気による **1.2** 倍気密試験を行う。禁足区域は？

$$\begin{aligned} d_o &= 0.2163\text{m}, d_i = 0.1999, \kappa = 1.402, \gamma = 7850 \text{ kg/m}^3, P_1 = (1.2 \times 10 + 1.033) \times 10^4 \text{ kg/m}^2, \\ P_2 &= 1.033 \times 10^4 \text{ kg/m}^2, n = 0.05 \times (1.402/0.402) = 0.1744, \text{安全率 } f = 1.5 \text{ とする。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= 1.5 \times (0.1744/1.402) \{ 0.2163^2/(0.2163^2 - 0.1999^2) \} \{ (130330 - 10330)/7850 \} \\ &= 0.187 \times 6.854 \times 15.29 = \mathbf{19.6} \text{ m} \end{aligned}$$

禁足区域を **20m** とする。

(3) 気体を容器から外気中に排出する場合の変化 この一つの例として 3-15 図に示



すような状態 P_1, T_1 なる気体 $G_1 \text{ kg}$ を含んでいる容積 V_1 の容器から栓を開いて $G_2 \text{ kg}$ の気体を圧力 P_2 なる外気中へ排出する場合を考える。容器から出た気体は図のように摩擦のないピストンによって外気と隔離するものとし、かつその状態を P_2, V_2, T_2 とす

れば、外部に対してなした仕事は $P_2 V_2$ となり、また変化後の容器内の気体の状態を P_1', T_1' とする。3-14 図の場合と同じく、容器をよく保温し、かつ栓の開きを非常に小さくして変化が極めてゆるやかに起るものとすれば、容器内の気体は可逆断熱膨張をなし、したがって、その温度 T_1 は式 (3.37b) あるいは式 (3.56) に類似な次式にしたがって降下する。

$$\frac{T_1'}{P_1'^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = \frac{T_1}{P_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (3.60)$$

また、容器内外の気体の変化の前後の内部エネルギーの差は、外部仕事 $AP_2 V_2$ に等しいから

$$G_1 u_1 - (G_1 - G_2) u_1' - G_2 u_2 = AP_2 V_2$$

この両辺に R を乗じ、かつ

$$\begin{aligned} u &= c_v T, & G_1 R T_1 &= P_1 V_1, & (G_1 - G_2) R T_1' &= P_1' V_1, \\ G_2 R T_2 &= P_2 V_2, & AR &= c_v (\kappa - 1) \end{aligned}$$

なる関係を代入すれば、

$$P_1 V_1 - P_1' V_1 - P_2 V_2 = (\kappa - 1) P_2 V_2$$

となり、したがって

$$P_2 V_2 = (P_1 - P_1') V_1 / \kappa \quad (3.61)$$

これは、 V_2 と P_1' との関係式である。もし、 V_2 と T_2 との関係を求めるには、式 (3.61) に P_1' を次のように V_2 と T_2 との関数として表わして代入すればよい。すなわち

$$G_1 R = P_1 V_1 / T_1, \quad G_2 R = P_2 V_2 / T_2$$

および、式 (3.60) の関係から

$$P_1' V_1 = (G_1 - G_2) R T_1' = (P_1 V_1 / T_1 - P_2 V_2 / T_2) P_1'^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 / P_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

これから

$$P_1'^{\frac{1}{\kappa}} = (1 - P_2 V_2 T_1 / P_1 V_1 T_2) P_1^{\frac{1}{\kappa}}$$

をえ、したがって、次のようになる。

$$P_1' V_1 = P_1 V_1 \left(1 - \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 V_1 T_2} \right)^\kappa \quad (3.62)$$

これを式 (3.61) に代入すれば、 V_2 と T_2 との関係がえられる。また排出された気体の量は

$$G_2 = G_1 - (G_1 - G_2)$$

であるから、前式の関係から

$$G_2 = \frac{P_1 V_1}{R T_1} - \frac{P_1' V_1}{R T_1'}$$

あるいは

$$G_2 = \frac{V_1}{R} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_1'}{T_1'} \right) \quad (3.63)$$