グランドパッキンによるシール特性の研究*

(第2報, 組合せパッキンにおける側面圧分布と軸摩擦力の解析)

田代久夫**, 吉田総仁***

Sealing Characteristics of Gland Packing (2nd Report, Analysis of the Distribution of the Contact Pressure and the Frictional Force in Tightened Packing)

by Hisao TASHIRO and Fusahito YOSHIDA

This paper presents a method to calculate the distribution of the contact pressure between some packings and the stem, the change in the height of the piled-up packings and the axial-frictional force, at a given gland pressure for various combinations of asbestoid and graphitic packings. The analytical contact pressure between the graphitic packings and the stem is greater than that compared to using of asbestoid packings, because the value of the normal-to-axial pressure ratio of the graphitic packing is larger than that of the asbestoid one. The contact pressure on the packings tightened initially under the free-stem condition, and at the pushing and pulling of the stem, is larger than that tightened under a fixed-stem condition. The reaction pressure at the opposite side of the gland, the displacement of the packings and the axial-frictional force, under pulling and pushing of the stem, were experimentally obtained. These experimental observations agree fairly well with the analytical results.

Key Words: Friction, Gland Packing, Distribution of the Contact Pressure, Displacement, Asbestoid and Graphitic Packings

1. 緒 言

グランドパッキンによる流体のシールでは、石綿系および黒鉛系のパッキンを多数枚組合せて使用する場合が多くなっている。流体の漏れを少なくし、軸のしゅう動摩擦力を小さくするようなパッキンの組合せと締付け力（グランド圧力）を知ることはきわめて重要である。

ところで、流体の漏れ量は、パッキン締付け時の側面圧（パッキンと軸あるいはスタフィンボックス側壁との接触圧力）と密接に関連している。しかし種々のパッキン組合せに対し、任意の締付け圧（あるいは締付け変位）を与えたときの側面圧分布を解析的に求める方法は確立していない。Denny⁽¹⁾は、石綿系1種類の場合についてのみ側面圧分布を解析的に求めているが、これは、軸固定（締付け時の反力を支え持つ）の場合について、パッキンの摩擦係数および側圧係数が軸方向面圧 P_z に依存しないと仮定したものである。著者らは第1報⁽²⁾で、パッキンの側圧係数、摩擦係数お

よび圧縮ひずみを単一の実験で求める方法を提案し、市販されている6種類の石綿系および黒鉛系パッキンの実験結果を示した。これによれば、ほとんどのパッキンの側圧係数および摩擦係数は定数ではなく、軸方向面圧の関数となる。

本報では、第1報で求めたパッキンの基礎的材料特性値を用いて、各種パッキンの組合せに対し、任意のグランド圧力で締付けた場合の側面圧分布、パッキン高さおよび軸しゅう動時の摩擦力を解析的に求める方法を示す。また、石綿系および黒鉛系パッキンの6枚と9枚の組合せで実験を行い、グランド圧力とパッキンの高さ変化、軸しゅう動時の摩擦力について調べ、解析解と比較検討を行った。なお、パッキンの締付けは、軸固定条件だけでなく軸が締付け反力を支え持たない軸自由条件でも行っている。

2. 解 析

図1(a), (b)は、それぞれパッキンを多数枚重ねてグランド圧力 P_G で締付けた前後の高さ変化を模式的に示したものである。図1中の $H_{(n)}$ および $h_{(n)}$ はそれぞれパッキン n 枚の締付け前後の高さであり、 ε , z はグランド側から測った変形前後の距離を表している。また、 r_i , r_o , $b(=r_o-r_i)$ はそれぞれパッキンの内

* 昭和61年4月3日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年4月25日。

** 正員、電力中央研究所 (〒201 柏江市岩戸北2-11-1)。

*** 正員、広島大学工学部 (〒742 東広島市西条町下見)。

外半径および幅である。いま軸固定条件について考えると、摩擦力 ($-\mu P_r$) の向きは図1(b)に示すとおりなので、側圧係数を K とおけば、力の釣り合いより軸方向面圧分布に関する次式が導ける。

$$dP_z/dz = -2\mu KP_z/b \quad (1)$$

ここで、側面圧 P_r は、

$$P_r = KP_z \quad (2)$$

となる。また、軸方向ひずみ ϵ_z は対数ひずみを用いて

$$\epsilon_z = \ln(dz/d\bar{z}) \quad (3)$$

とおける。したがって、力の釣り合い式(1)は、変形前の座標系 $\bar{z}$ を用いて次のように書き改められる。

$$dP_z/d\bar{z} = -2\mu K \exp(\epsilon_z) P_z/b \quad (4)$$

ここで、側圧係数 K 、摩擦係数 μ および圧縮ひずみ ϵ_z は、前報⁽²⁾により軸方向面圧 P_z の関数として次式で与えられている。

$$K = K_0 P_z^a \quad (5)$$

$$\mu = \mu_0 P_z^b \quad (6)$$

$$|\epsilon_z| = E_0 P_z^c \quad (7)$$

ここで K_0, a, μ_0, b, E_0, c は材料定数である。したがって、軸方向面圧 P_z の分布は、境界条件

$$\bar{z}=0 \text{ で } P_z = P_G \quad (8)$$

を用いて、式(4)を数値積分すれば得られる。軸方向面圧 P_z が求まれば、側面圧 P_r は式(2)より求まる。

また、軸摩擦力 F_f は次式より求まる。

$$F_f = -2\pi r_i \int_0^{h(m)} \mu K \exp(\epsilon_z) P_z d\bar{z} \quad (9)$$

締付け後のパッキン高さ $h(m)$ は、式(3)を積分することにより次式で求められる。

$$h(m) = \int_0^{H(m)} \exp(\epsilon_z) d\bar{z} \quad (10)$$

以上の考察はすべて軸固定すなわち締付け反力を軸が支えている条件 ($F_f < 0$) のものであるが、実際のパッキンの締付けあるいは軸しゅう動時には、図

2(a), (b)に模式的に示す二つの異なった条件についても考察しなくてはならない。図2(a)は、軸自由条件、すなわち軸が締付け反力を支えない場合 ($F_f = 0$) である。このときには、軸とパッキンとの摩擦力の作用方向は、図2(a)に示すようにある位置 $z = h_*$ を境に逆転するので、式(1)に相当する釣り合い式は次のようになる。

$$dP_z/dz = \begin{cases} -2\mu KP_z/b & (0 \leq z \leq h_*) \\ -2\mu KP_z/(r_o + r_i) & (h_* \leq z \leq h(m)) \end{cases} \quad (11)$$

式(12)を用いて軸方向面圧 P_z 、側面圧 P_r 、パッキン高さ $h(m)$ を求める方法は、軸固定の場合と全く同じであるが、軸とパッキン間の無すべり点の位置 $z = h_*$ はあらかじめわかっていないので、これは繰返し計算によって求めることになる。すなわち、 h_* の値を適当に仮定し、式(11)を逐次積分する。このとき、軸自由条件 ($F_f = 0$) は式(12)で与えられるので、これを満足するまで h_* の修正を繰返す。

$$\int_0^{h_*} \mu KP_z dz = \int_{h_*}^{h(m)} \mu KP_z dz \quad (12)$$

次に、図2(b)に模式的に示すような軸しゅう動時に、軸を上から下へ引くとき ($F_f > 0$) の場合について考える。このときには、

$$dP_z/dz = -2\mu KP_z/(r_o + r_i) \quad (13)$$

が成り立つ。なお、逆に軸を下から上へ押し上げるときには、軸固定の締付け条件と同じになる。

3. 解析結果と実験結果との比較検討

3.1 実験方法 パッキンは、図3に示すように石綿系および黒鉛系パッキンを6枚と9枚組合せたものを用いた。なお、パッキンの種類は第1報で用いたものと同じ6種類で、石綿系 A_1, A_2, A_3 、黒鉛系 G_1, G_2, G_3 である。

図1 パッキン締付け前後の高さ変化

図2 軸自由条件でのパッキン締付けおよび軸が下へ作動したときにパッキンに作用する摩擦力の方向

実験装置は、前報⁽²⁾で用いたものとほとんど同じであり、前報とはパッキン箱の寸法のみが異なる。すなわち、パッキン箱としては、内径 36 mm、外径 80 mm、高さ 130 mm の厚肉円筒を用いた。なお、軸の表面粗さは約 1.7 μ m であった。

実験では、締付面圧 P_G 、底面圧 P_R 、軸摩擦力 F_f お

よびパッキン高さ $h_{(n)}$ を測定した。

3.2 パッキン締付け時および軸しゅう動時の面圧分布と軸摩擦力 前報で求めたパッキンの材料定数値を用いて、組合せパッキンの締付け時および軸しゅう動時の軸方向面圧分布および側面圧分布を求めた。分布の傾向は、いずれのパッキン組合せとも同じなので、ここではパッキン数 6 枚の場合 A_1G_1-6 と 9 枚の場合 A_3G_3-9 の結果について検討する。

図 4 (a), (b) は、軸固定条件において $P_G=49$ MPa で締付けたとき、およびその後、軸を上下にしゅう動したときの軸方向面圧 P_z の分布の計算結果を示したものである。ここで図 4 中の $\bar{z}$ は下面を基準にした軸方向距離を表している。すなわち、 $\bar{z}=h_{(n)}-z$ である。また、実線は締付け時(あるいは軸を押し上げたとき)の分布を示し、破線は軸を引き下げたときの

図 3 パッキンの組合せ

(a) A_1G_1-6 , $P_G=49$ MPa

(a) A_1G_1-6 , $P_G=49$ MPa

(b) A_3G_3-9 , $P_G=49$ MPa

図 4 軸固定締付けにおける軸方向面圧分布

(b) A_3G_3-9 , $P_G=49$ MPa

図 5 軸自由締付けにおける軸方向面圧分布

ものを示す。図5(a), (b)は、軸自由条件において $P_c=49$ MPa で締付けたとき、およびその後、軸を上

図6 上面圧 P_c と底面圧 P_R との関係

下にしゅう動したときの軸方向面圧分布を示している。図5中、実線は締付け時の分布、破線および一点鎖線はそれぞれ軸を上下にしゅう動したときの面圧分布である。図5(a), (b)から、軸を押し上げたときに上面圧 P_c は最大となり、下面圧 P_R は最小となる。逆に、軸を引き下げたときには上面圧 P_c が最小となり、下面圧 P_R が最大となることがわかる。また、同一の締付け面圧 P_c に対しては、軸自由条件で締付けた場合のほうが、軸しゅう動時の軸方向面圧が、軸固定締付けの場合に比べておよそ A_1G_1-6 で5%, A_3G_3-9 で10%ほど大きくなることわかる。これは、軸自由締付けの場合には、図2(a)に模式的に示すように、軸にかかる摩擦力がある位置 $z=h_*$ で逆転するため、 $h_* \leq z_{h(n)}$ の領域でパッキンに作用する摩擦合力が小さくなるためである。

(a) A_1G_1-6 , $P_c=49$ MPa

(a) A_1G_1-6 , $P_c=49$ MPa

(b) A_3G_3-9 , $P_c=49$ MPa

図7 軸固定締付けにおける側面圧分布

(b) A_3G_3-9 , $P_c=49$ MPa

図8 軸自由締付けにおける側面圧分布

図6は、締付け面圧 P_G と底面圧 P_R との関係について、解析値と実験値とを比較して示したものである。また、図6中の実線は軸固定条件、破線は軸自由条件の解析結果である。実験値と解析値とはほとんど一致している。

図7(a), (b)は、軸固定条件において $P_G=49$ MPaで締付けたとき、およびその後軸を上下にしゅう動したときの側面圧 P_r の分布を示したものである。図8(a), (b)は、軸自由条件の結果である。側面圧 P_r の大きさは、石綿系に比較して黒鉛系パッキンのほうが明らかに大きい。これは、前報で述べたように、黒鉛系パッキンの側圧係数 K が石綿系のそれよりも大きいためである。軸自由締付け後の軸しゅう動における側面圧のほうが軸固定の締付け後のそれよりも A_1G_1-6 で5%, A_3G_3-9 で10%程度大きくなることおよびその理由は、軸方向面圧の場合と同じである。

3.3 締付け面圧とパッキン高さ 図9は、締付け面圧 P_G とパッキン高さの変化 $h_{(n)}/H_{(n)}$ との関係を解析値と実験値とを比較して示したものである。図9からわかるようにパッキンの高さは、締付け面圧の増加によって初期に大きく減少し、次第に漸減する傾向である。解析値と実験値とはよく一致している。また、軸固定条件と軸自由条件との差は比較的小さい。

3.4 締付け面圧と軸摩擦力 図10は、軸固定条件における締付け面圧 P_G と軸摩擦力 F_f との関係を解析値と実験値とを比較して示したものである。図10からわかるように軸摩擦力 F_f は、締付け面圧 P_G の増加によって直線的に増大する。解析値と実験値とはよく一致している。

図11は、パッキン組合せ A_1G_1-6 に対し軸自由条件において $P_G=40$ MPaで締付け、その後軸を上下にしゅう動させたときのパッキンの上下面圧 P_G, P_R お

よび軸摩擦力 F_f の変化の実験結果を示したものである。図11からわかるように軸が下から上にしゅう動したとき、上面圧 P_G は増加し下面圧 P_R は減少する。軸が上から下へしゅう動すると、上面圧は減少し下面圧は上昇する。この傾向は、図5(a), (b)に示した軸方向面圧分布の解析解と一致している。また、図11中に解析より求めた軸しゅう動時の摩擦力 F_f を破線で示したが、これは実験結果とよく一致している。

4. 結 言

各種パッキンの組合せに対し、任意のグラウンド圧力で締付けたときおよび、その後の軸しゅう動時の軸方向面圧分布、側面圧分布、パッキン高さおよび摩擦力を解析的に求める方法を示した。また、石綿系および黒鉛系パッキンの6枚と9枚の組合せで軸固定と軸自

図10 軸固定締付けにおける軸摩擦力

図9 締付け面圧 P_G とパッキン高さの変化割合 $h_{(n)}/H_{(n)}$ との関係

図11 軸しゅう動時の上下面圧 P_G, P_R および軸摩擦力 (A_1G_1-6)

由の場合について実験を行い、締付け面圧 P_G に対するパッキン下面圧、パッキンの高さおよび摩擦力について調べ、本解析方法により求めた結果と比較検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 軸自由条件で締付けた場合には、軸固定条件で締付けた場合に比べ、軸方向面圧および側面圧は大きくなる。

(2) 軸をグランド側へ押し上げた場合に、上面圧 P_G は最大となり、下面圧 P_R は最小となる。また、軸を引き下げたときには、上面圧 P_G が最小、下面圧 P_R

が最大となり、 P_G と P_R との差は小さくなる。

(3) 黒鉛系パッキンの側面圧は、石綿系のそれよりも大きくなる。

(4) 面圧 P_G, P_R , パッキン高さの変化および軸摩擦力の解析結果は実験結果と良く一致した。

文 献

- (1) Denny, D. F. and Turnbull, D. E., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 174-6 (1960), 271.
- (2) 田代・吉田, 本論文集 1637 ページ.