グランドパッキンによるシール特性の研究*

(第5報, 漏えい速度の測定とその評価)

田 代 久 夫^{*1}, 吉 田 総 仁^{*2}

Sealing Characteritsics of Gland Packing (5th Report, Leakage Rate Measurement and Its Evaluation)

Hisao TASHIRO and Fusahito YOSHIDA

Water leakage rate through packed gland was measured to determine how total packing height, packing compressive stress and fluid pressure affect the leakage rate in stuffing-box seals. Two types of packing rings, asbestos and graphite, were tested at room temperature. It was found that the leakage rate can be described by the theory of leakage through porous packing and/or clearance between packing and side walls. An experimental equation to describe the sealing capability of packing has been determined as a function of packing compressive stress and fluid pressure.

Key Words: Mechanical Engineering, Machine Element, Valve, Stuffing-box Seals, Packing, Leakage Rate, Theory of Leakage, Packing Compressive Stress, Fluid Pressure

1. 緒 言

バルブ軸封部からの流体漏えいを防止することは工業上極めて重要な課題である。一般にパッキンを強く締付ければ流体漏えいを小さくすることができるが、締付け力が強いと軸のしゅう動摩擦抵抗も増大するので、最適な締付け力を選択する必要がある。また、パッキン枚数が多すぎると、パッキンと軸およびパッキン箱側壁との間の摩擦によりグランドブッシュからの締付け力はパッキン底部ではかなり小さくなるため、シール性はかならずしも向上しない⁽¹⁾。

バルブ軸封部の漏えい実験結果は、これまでにいくつかの報告^{(1)~(10)}がある。しかし、これらの実験結果からは、パッキン締付け力を大きくすることにより飛躍的にシール性が向上する。流体圧が高いほど漏れが大きくなるといった常識的な結論は得られているものの、何枚のパッキンを用い、どのくらいの締付け力で締付けたら漏れを許容範囲内におさめることができるかといった設計、保守・管理上重要な問題に対する回答は得られていない。

本研究では、グランドパッキンによるシール特性を把握するための第一歩として、室温において石綿系および黒鉛系パッキンを用いてバルブ軸封部の漏えい実験を実施し、漏えい速度に及ぼすパッキン枚数、締付け面圧および流体圧の影響について検討した。

記 号

- P_z : パッキンの軸方向面圧 MPa
- P_G : グランド面圧 MPa
- P_{G0} : パッキン締付け直後のグランド面圧 MPa
- P_R : 底面圧 MPa
- P_f : 流体圧 MPa
- P_{f0} : 給水入口における流体圧 MPa
- $h_{(n)}$: 締付け後のパッキン高さ cm
- Q : 流体漏えい速度 cm^3/min
- z : パッキン底部からの軸方向距離 cm

2. 漏 え い 実 験

2・1 実験方法 実験は室温で水を用いて行った。実験装置は、図1に示すように、軸およびパッキン箱の間にパッキンを挿入した試験部本体、給水系および漏えい速度測定部から構成される。

試験部本体は、軸(直径 20 mm)とパッキン箱(内径

* 原稿受付 平成2年10月1日。

*¹ 正員、(財)電力中央研究所 (●201 狛江市岩戸北2-11-1)。

*² 正員、広島大学工学部 (●724 東広島市鏡山1-4-1)。

図1 実験装置

36 mm)との間にパッキン箱底部の面圧(以下底面圧という)測定用ロードセル、シールリング、ランタンリング(流体加圧用)、パッキン、ランタンリング(漏えい検出用)、グランドブッシュなどが設置されている。パッキンは、万能荷重試験機によりグランドブッシュを介して、所定の荷重まで締付けられ、漏えい実験中その高さを一定に保持する。給水ポンプは、最大吐出圧力 29 MPa、給水量 2 l/h の二連往復動ポンプを使用した。

漏えい速度検出器は、上皿天秤とひずみゲージ式小形荷重変換器とを組合せたもので、漏えい量が連続的に記録されるようになっている。なお、パッキンからの漏れを受けるピーカ中には、あらかじめ流動パラフィンを入れておき、漏れ水の蒸発を防ぐようにした。

実験は、パッキン箱と軸との間にパッキンリングを 1~5 枚挿入し締付け、10 min 後に流体圧を加える。流体圧は $P_{fo}=24.5 \rightarrow 19.6 \rightarrow 9.8$ MPa の順に加えたが、それぞれの流体圧で安定した漏れ量が得られたとき、いったん流体圧 $P_{fo}=0$ として、約 2 h 後に次の流体圧を加えた。供試パッキンは、石綿系パッキン A および黒鉛系パッキン G の二種類であり、パッキンリング 1 個の寸法は内径 20 mm、外径 36 mm、高さ 8 mm である。なお、購入時のパッキンリングは軸への挿入を容易にするため、図 2 に示すような切れ目が設けてあったが、この切れ目からの漏れを防止するため、この部分を接着剤でシールして実験を行った。

測定項目は、グランド側の面圧(以下ではグランド

図2 パッキン切れ目の接着

面圧という) P_G 、底面圧 P_R 、パッキン高さ $h(n)$ 、給水入口における流体圧 P_{fo} および試験部出口側で測定される流体漏えい速度 Q である。

2・2 実験結果 図 3 は、漏えい実験中におけるグランド面圧 P_G と底面圧 P_R の変化の例である。この実験では、石綿系パッキン A を 3 枚用い、グランドブッシュを $P_{co}=39$ MPa で締付けた後 10 min 後に流体圧 $P_{fo}=24.5$ MPa を作用させ (140 h 保持)、その後 $P_{fo}=19.6$ MPa (46 h 保持) とし、その後 $P_{fo}=9.8$ MPa としている。流体圧が作用していない場合には、パッキンと軸およびパッキン箱側壁の間に摩擦があるために、軸方向面圧はグランド部から底部にかけて徐々に小さくなるため、図 3 にみられるように、底面圧 P_R はグランド面圧 P_G より小さくなる。また、締付け後から大きな応力緩和が生じ、 P_G 、 P_R が時間とともに減少している。これらの挙動は前報⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾で報告したとおりである。図 3 にみられる特徴のひとつは、流体圧が作用することにより、グランド面圧 P_G および底面圧

P_R とも上昇することであるが、これはパッキン箱底部とグランドブッシュで上下を拘束されたパッキンに流体による側圧が作用した結果である。また、グランド面圧 P_G と底面圧 P_R の差が流体圧作用によりほとんどなくなることは、軸あるいは側壁とパッキンとの間の摩擦が流体潤滑により低減した結果であると思われる。

図4(a)は、石棉系パッキンAを用いたときの流体漏えい速度 Q と締付け直後のグランド面圧 P_{G0} との関係を示したものである。ここで、パッキンリングは1, 2, 3, 5枚の四つの場合について実験を行い、流体圧はそれぞれの場合に対し $P_{f0}=9.8, 19.6, 24.5$ MPaの3条件とした。この図より、締付け面圧の増大とともに漏えい速度が小さくなる様子がわかる。また、パッキン枚数2, 3, 5枚と増やしても同一締付け面

圧 P_{G0} に対する漏えい速度 Q にあまり差がないこともわかる。これは、パッキン枚数が増えると、側壁摩擦のためグランドブッシュからの締付け力がパッキン箱底部にあるパッキンにまで十分伝達されないためである。図4(b)は黒鉛系パッキンGに対する流体漏えい速度と締付け直後のグランド面圧の関係を示したものである。この結果も、図4(a)に示した石棉系パッキンAに対する結果と同じ傾向を示しているが、黒鉛系パッキンGの場合は $P_{G0} \geq 35$ MPa以上で締付けた場合に漏えいは認められず、石棉系パッキンよりも黒鉛系パッキンのほうが、シール性にすぐれていることがわかる。

3. 漏えい速度に関する考察

3.1 漏えい速度に関する基礎式 流体の漏れは、

図3 シール実験におけるグランド面圧と底面圧の変化

図4 パッキン締付け直後のグランド面圧 P_{G0} と漏えい量 Q との関係

パッキンとパッキン箱あるいは軸との間げきから生じるもの(いわゆる端面漏れ)とパッキン内を透過するもの(いわゆる浸透漏れ)がある。いずれの場合に対しても、層流を仮定すると、漏えい速度 Q は次式で表すことができる。

$$Q = -\frac{C}{\mu} \frac{dP_f}{dz} \quad (1)$$

ここで、 z はパッキン底部からの軸方向距離、 P_f は任意の z 位置における流体圧、 μ は流体の粘性係数、 C はパッキンと金属との端面(軸あるいはパッキン箱側壁)との間げき量あるいはパッキン中の空孔に依存する係数である。境界条件は

$$z=0 \text{ (流体の入口) で } P_f = P_{f0} \quad (2)$$

$$z=h(n) \text{ (流体の出口) で } P_f = 0 \quad (3)$$

となる。ここで問題となるのは流体圧作用時の係数 C である。これはパッキンの軸方向面圧 P_z および流体圧 P_f の関数と考えられるが、これがわかれば、式(1)を境界条件(2)、(3)を用いて積分することにより、流体圧 P_f の分布および漏えい速度 Q を求めることができる。

3.2 実験結果の評価 先に述べたように、パッキンの面圧は摩擦の影響やパッキン自体の応力緩和、流体圧作用のために時間とともに大きく変化する。しかし、式(1)中の係数 C はパッキンと側壁との間げき量あるいはパッキン中の空孔に依存する係数である

ので、軸方向面圧 P_z の単調減少関数であると仮定することは無理なことではない。また、流体圧が作用すれば間げきあるいはパッキンの空孔は押し広げられるので、二次的には、係数 C は流体圧 P_f の単調増加関数となると思われる。

以上の考察に基づき、前節で示した漏えい実験結果を整理してみる。いま、簡単のために、係数 C に及ぼす流体圧 P_f の影響は軸方向面圧 P_z の大きさとは独立に P_f のべき乗であると仮定すると、係数 C は次のような一般形をもつ。

$$C = \mu P_f^\alpha \cdot f(P_z) \quad (4)$$

先に、実験結果に対する考察で述べたように、流体圧作用時の軸方向面圧 P_z 分布は z 方向に一様と仮定できるので、式(4)を用いて、式(1)を境界条件(2)、(3)のもとに積分することにより次式が得られる。

$$f(P_z) = \frac{(\alpha+1)Q \cdot h(n)}{P_{f0}^{\alpha+1}} \quad (5)$$

ここで、 $h(n)$ は締付け後のパッキン高さである。式(5)における係数 α の値および関数 $f(P_z)$ の形について、実験結果をもとに検討してみる。図5(a)は、石棉系パッキン A による実験結果の P_z と $f(P_z)$ の関係を示したものである。これより多少のばらつきはあるもののこの関係は片対数紙上でほぼ直線となるので

$$C/\mu = C_f P_f^\alpha \exp(-mP_z) \quad (6)$$

で近似できることがわかる。ここで C_f , m , α はパッキ

(a) Asbestos packing A

(b) Graphite packing G

図5 $f(P_z) = (\alpha+1)Q \cdot h(n) / P_{f0}^{\alpha+1}$ と流体加圧時の軸方向平均面圧 p_z との関係

ンの材料定数である。図中の実線は式(6)の最小二乗法による決定結果を表している。破線はそれに対する Factor of 3 (3倍あるいは1/3倍のばらつき範囲)を表しているが、ほとんどの実験データはこの範囲に入っている。図5(b)は、黒鉛系パッキン G に対する結果を表しているが、この結果も式(6)で表すことができ、実験結果のばらつきは図5(a)に示す石綿系パッキン A に比べて小さい。なお、黒鉛系パッキン G では $P_c \geq 35$ MPa において漏えいが認められなかった。

4. 結 言

石綿系および黒鉛系パッキンを用いたバルブ軸封部の漏えい実験を実施し、漏えい速度に及ぼすパッキン枚数、締付け面圧および流体圧の影響について検討した。その結果、漏えい速度は、パッキン中あるいは軸(あるいはパッキン箱側壁)とパッキンの間げきを流れる層流を仮定した漏えい理論により表現できることがわかった。また、この理論におけるパッキンのシール性を表す係数をパッキン軸方向面圧と作用する流体圧の関数として定式化した。なお、流体漏えい速度を大きく左右する流体圧作用時のパッキン軸方向面圧は、

初期のグランド締付け面圧、パッキンの種類とその枚数、流体圧などにより大きく変化することも実験より明らかとなったが、この面圧を解析的に予測することが今後の課題となろう。

文 献

- (1) 田代, 火力原子力発電, **33**-2 (1982), 71.
- (2) 田代・ほか2名, 火力原子力発電, **36**-11 (1985), 33.
- (3) 田代・ほか2名, 火力原子力発電, **36**-12 (1985), 45.
- (4) 田代・ほか2名, 火力原子力発電, **37**-1 (1986), 45.
- (5) Denny, D. F. and Turnbull, D. E., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, **174**-6 (1960), 271.
- (6) Velan, A. K., *Power*, **117**-12 (1973), 54.
- (7) Doubt, G. L., *Atomic Energy of Canada, Rep. No. AECL-5120* (1976).
- (8) Dixon, D. F., ほか2名, *Atomic Energy of Canada, Rep. No. AECL-6183* (1978).
- (9) Wilson, R. T., *Advances in Instrumentation*, **31** (1976), 840.
- (10) Ruggieri, S. K., *Electric Power Research Institute, USA, Rep. NP-4255* (1986).
- (11) 田代・吉田, 機論, **52**-477, C(1986), 1637.
- (12) 文献(11)の1643ページ.
- (13) 田代・吉田, 機論, **55**-509, C(1989), 210.
- (14) 田代・吉田, 機論, **55**-514, C(1989), 1500.