充填材入り PTFE ガスケットを用いた管フランジ締結体の性能評価[†]

尾崎 拓也* 高木 知弘** 佐藤 広嗣***

Mechanical Behaviors of Pipe Flange Connection with Filled PTFE Gasket

by

Takuya OZAKI*, Tomohiro TAKAKI** and Kouji SATOU***

Filled PTFE gaskets have been developed to improve a viscosity performance of PTFE which leads to a leak of inner fluid. However, the performance evaluation methods of the gasket in an actual bolted flanged connection are not reported so far. In this study, the mechanical behaviors of the pipe flange connection with the filled PTFE gasket are investigated by the finite element method considering the visco-elastic-plastic properties of the gasket. First, the visco-elastic-plastic properties of the gasket, or stress-strain and creep curves, are obtained by compression tests and those data are identified to be used in the finite element simulations. Next, the bolt load relaxation and the gasket contact stress in the pipe flange connection are estimated by the finite element simulations. Finally, it is concluded that the filled PTFE gasket has much more excellent performance comparing to the pure PTFE gasket in the real pipe flange connection. Furthermore, the important design factors in the gasket development are clarified through systematic simulations.

Key words : PTFE gasket, Visco-elastic-plastic property, Pipe flange connection, Finite element method

1 緒 言

石綿ガスケットの廃止に伴い、非石綿ガスケットへの切り替えが行なわれた。¹⁾代替ガスケットの1つとして PTFE (Polytetrafluoroethylene) ガスケットがその耐薬品性や耐熱性から広く用いられている。²⁾しかしながら、PTFE は粘性特性が顕著であり、³⁾時間の経過と共にガスケット接触応力の低下を生じさせる問題を有している。ガスケットの最も重要な機能である密封性能は、接触応力が支配的な要因であると報告されており、⁴⁾接触応力が規定の値を下回った時点がガスケットの寿命と考えることができる。よって、粘性特性を改善することは内部流体漏洩量の減少およびガスケット使用寿命の長期化を図れ、環境、経済的にも望ましいと考える。そのため、PTFE に充填材を配合することで粘性特性を改善したガスケットが開発されている。しかしながら、実際の締結体を用いた実機レベルでの性能評価を行った研究は報告されていない。

本研究では、充填材入り PTFE ガスケットを用いた管フランジ締結体の性能評価を行い、その結果を考察することで今後のガスケット開発のための知見を得ることを目的としている。まず初めに、ガスケット単体での圧縮試験を行ないガスケットの粘弾塑性特性を評価し、それらの結果を同定することで有限要素シミュレーションで用いる基礎データとする。次いで、充填材入り PTFE ガスケットを用いた管フランジ締結体の有限要素シミュレーション^{5), 6)}

を行い、ボルト軸力およびガスケット接触応力変化を評価する。以上の評価を純 PTFE ガスケットに対しても行い、充填材を入れることによる性能改善性の検討を行った。最後に、ガスケットが具備すべき圧縮特性について考察し、ガスケット開発のための指針を示した。

2 ガスケットの粘弾塑性特性

試験対象とするガスケットは、日本バルカー工業(株)製の純 PTFE ガスケット (V#7010) とクレー系の充填材入り PTFE ガスケット (V#7020) である。ガスケットの粘弾塑性特性は、Fig. 1 のような圧縮試験機を用いて評価した。ガスケットは、厚さ 3mm、内径 22mm、外径

Fig. 1 Compression test equipment.

[†] 原稿受理 平成 22 年 6 月 9 日 Received June 9, 2010 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 学生会員 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Graduate School of Sci. and Tech., Kyoto Inst. of Tech., Matugasaki, Sakyou-ku, Kyoto, 606-8585

** 正会員 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎, Graduate School of Sci. and Tech., Kyoto Inst. of Tech., Matugasaki, Sakyou-ku, Kyoto, 606-8585

*** 日本バルカー工業(株) 〒637-0014 五條市住川町テクノパークなら工業団地, Nippon Valqua Industries, LTD., Sugawa-cho, Gojo, 637-0014

58mm の寸法のものを用いた。このガスケットを圧縮ジグの間に挿入し、油圧ポンプ (RIKEN MP-4C) と油圧シリンダ (RIKEN D5-100) を用いてガスケットに圧縮力を負荷した。この際、圧縮力はバルブを手動で開閉することにより調整した。ガスケットの圧縮変位は、ガスケットの周囲に配置した4つの変位計 (KYOWA DTH-A-10) の平均値として測定し、この変位よりガスケットの厚さ方向のひずみを算出した。試験により求めた粘弾塑性特性は、有限要素シミュレーションで用いるために、最小二乗近似により同定を行なった。

2・1 応力-ひずみ関係

ガスケットの応力-ひずみ関係を圧縮試験により測定した。試験はガスケットの応力が 0MPa から 100MPa まで、10MPa ごとに負荷と除荷とを繰り返し行なった。各サイクルにおける除荷は、圧縮応力が 0MPa になるまで行なった。なお、ガスケットの圧縮および除荷速度は、1～2MPa/s としている。荷重負荷速度は、油圧バルブを手動で調整するため、一定にすることができていないが、Fig. 2 の応力-ひずみ関係は、この範囲の応力速度では変化しないことを確認している。Fig. 2 のプロットは、試験により得られた (a) 充填材入り PTFE ガスケット、(b) 純 PTFE ガスケットの応力-ひずみ関係である。ひずみと応力は圧縮方向を正としている。ここで、図を見やすくするために再負荷時の結果は表示していないが、10本の除荷曲線は1枚のガスケットの圧縮試験より得られた結果である。応力-ひずみ関係は強い非線形性を示し、負荷と除荷とで異なった曲線を描くことがわかる。

(a) Filled PTFE gasket

(b) Pure PTFE gasket

Fig. 2 Stress-strain curves.

試験より得た応力-ひずみ関係を有限要素シミュレーションで用いるため、以下の式を用いて同定を行なった^{5), 6)}

[充填材入り PTFE ガスケット]

負荷曲線：

$$\sigma = 209.5\varepsilon - 43.8 \times 10^2 \varepsilon^2 + 46.0 \times 10^4 \varepsilon^3 - 66.0 \times 10^5 \varepsilon^4 + 38.0 \times 10^6 \varepsilon^5 - 81.8 \times 10^6 \varepsilon^6 \quad (1)$$

除荷曲線：

$$\sigma = \alpha \exp(\beta \varepsilon) + \gamma$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \sigma_1 / (\exp(\beta \varepsilon_1) - \exp(\beta \varepsilon_2)) \\ \beta &= \exp(2.78 - 4.45 \cdot \ln \varepsilon_1) \\ \gamma &= -\alpha \exp(\beta \varepsilon_2) \\ \varepsilon_2 &= 27.6 \times 10^{-3} \exp(8.65 \varepsilon_1) - 27.1 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (2)$$

[純 PTFE ガスケット]

負荷曲線：

$$\sigma = 50.4\varepsilon + 55.5 \times 10^2 \varepsilon^2 - 62.3 \times 10^3 \varepsilon^3 + 29.3 \times 10^4 \varepsilon^4 - 62.3 \times 10^4 \varepsilon^5 + 49.9 \times 10^4 \varepsilon^6 \quad (3)$$

除荷曲線：

$$\sigma = \alpha \exp(\beta \varepsilon) + \gamma$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \sigma_1 / (\exp(\beta \varepsilon_1) - \exp(\beta \varepsilon_2)) \\ \beta &= 407.6 \exp(-24.2 \varepsilon_1) + 68.6 \\ \gamma &= -\alpha \exp(\beta \varepsilon_2) \\ \varepsilon_2 &= 0.60 \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで σ_1 , ε_1 , ε_2 は、それぞれ負荷曲線上の除荷開始時の応力とひずみ、除荷が完了したときの残留ひずみを示している。応力の単位は [MPa] である。なお、式 (2) と式 (4) を用いることで、負荷曲線上の応力値に依存した除荷曲線を表すことが可能となる。Fig. 2 内の実線は式 (1)～式 (4) の同定結果を示している。同定結果は試験値をよく再現していることがわかる。

Fig. 2 (a) と (b) を比較すると、曲線の勾配が異なった値を取ることがわかる。負荷曲線の勾配は、充填材入り PTFE ガスケットの方が高くなっており、原点と、応力 100MPa の点を直線で結ぶと、Fig. 2 (a) の充填材入り PTFE ガスケットで直線の勾配は 730MPa、Fig. 2 (b) の純 PTFE ガスケットで 243MPa となる。除荷曲線の勾配は、応力 20, 40, 60, 80, 100MPa で除荷を開始した瞬間の勾配を式 (2), (4) より求めると、充填材 PTFE ガスケットで 1535MPa, 2404MPa, 3099MPa, 3649MPa, 4064MPa、純 PTFE ガスケットで、2636MPa, 2838MPa, 4130MPa, 5492MPa, 6861MPa と、充填材入り PTFE ガスケットの方が純 PTFE ガスケットよりも低くなる。また完全除荷後の残留ひずみは充填材を入れた方が非常に小さくなっていることがわかる。これらのことから、充填材を配合することによる応力-ひずみ曲線の改善を確認することができる。

Fig. 3 Creep curves.

2・2 クリープ特性

ガasketのクリープ特性を求めた。試験はガasketに一定応力、10、30、50MPaを負荷し、5時間の測定を行った。Fig. 3は、(a)充填材入り PTFE ガasket、(b)純 PTFE ガasketの試験結果である。ここで、図中のクリープひずみは、ガasketの応力が所定の一定値に達した瞬間を0とし、それ以降に生じるガasketの圧縮変位をガasketの初期厚さで除した値として定義している。クリープひずみは、応力負荷直後に大きく増加し、その後、増加量は緩やかになる。また、初期応力が大きいほど、クリープひずみ量も大きいことがわかる。Fig. 3 (a)と(b)を比較すると、充填材入り PTFE ガasketのクリープひずみ量は純 PTFE ガasketよりも明らかに減少している。5時間経過後のクリープひずみ量を比較すると、充填材入り PTFE ガasketは純 PTFE ガasketの22.9% (10MPa)、12.3% (30MPa)、26.8% (50MPa)となっており、おおむね1/4以下となっていることがわかる。中でもガasket応力30MPaの充填材入りガasketのクリープ特性は良好であり、ソフトガasketの使用応力が、一般的に約30MPa程度であることを考えると、非常に良い結果であるといえる。

試験により得られたクリープひずみ ε_c は以下の式により同定を行ない、有限要素シミュレーションで用いる。

$$\varepsilon_c = At^n \quad (5)$$

ここで、 A と n は初期ガasket応力の関数として表され、各ガasketに対して以下の式を用いる。

[充填材入り PTFE ガasket]

$$A = 86.0 \times 10^{-5} - 22.4 \times 10^{-5}\sigma + 18.8 \times 10^{-7}\sigma^2 \quad (6)$$

$$n = 89.1 \times 10^{-3} - 62.0 \times 10^{-4}\sigma + 14.1 \times 10^{-5}\sigma^2 + 11.8 \times 10^{-7}\sigma^3 \quad (7)$$

[純 PTFE ガasket]

$$A = 53.2 \times 10^{-5} + 84.6 \times 10^{-6}\sigma + 13.8 \times 10^{-6}\sigma^2 - 13.7 \times 10^{-8}\sigma^3 \quad (8)$$

$$n = 15.4 \times 10^{-2} - 91.5 \times 10^{-5}\sigma + 33.0 \times 10^{-5}\sigma^2 - 10.6 \times 10^{-6}\sigma^3 + 89.7 \times 10^{-9}\sigma^4 \quad (9)$$

応力の単位は [MPa]、時間は [s] である。Fig. 3の実線は式 (6)～式 (9)で表される同定結果である。同定結果は試験結果をよく再現していることがわかる。

3 管フランジ締結体の有限要素シミュレーション

前報^{5), 6)}で構築した、ガasketの粘弾塑性特性を考慮した締結体の力学的特性評価を可能とする簡便な有限要素法を用い、管フランジ締結体のボルト締付け過程と、その後の外力を作用させずガasketの粘性特性のみを考える使用状態のシミュレーションを行なう。Fig. 4は、本研究で用いる管フランジ締結体の有限要素モデルと境界条件である。軸対称4節点アイソパラメトリック要素を用いる。ガasketは、軸対称要素においてポアソン比を零とすることで、厚さ方向のみに剛性を有する1次元ばねとしてモデル化している。また、各接触面の接触状態は完全固着状態としている。

シミュレーションは、ボルトの締付け過程と使用時の2段階で構成される。締付け過程は、Fig. 4の境界条件に示すようにボルト対称面に段階的に強制変位を負荷し、増分解析を行うことで再現する。この際、ガasketのクリープひずみは考慮していない。使用時は、ボルト対称面の変位を拘束し、増分時間間隔に生じるガasketクリープひずみを初期ひずみ増分として与えることで再現する。各増分段階で用いるガasketのヤング率は、式 (1)～式 (4)を ε で微分した各応力点での応力-ひずみ曲線の勾配とする。なお、ガasketに応力が負荷される場合は負荷曲線、除荷される場合は除荷曲線の勾配を用いる。

Fig. 4 Finite element model and boundary conditions.

4 管フランジ締結体の力学的特性評価

管フランジ締結体のボルト締付け完了後の時間経過に伴うボルト軸力とガスケット接触応力の変化を評価する。対象とする管フランジはJPI 150 lb 4 inch 一体型管フランジ⁴⁾であり、8本のボルト (M16) で締付けを行なった。実験で用いる管フランジとボルトの材質はS45Cであり、有限要素シミュレーションで用いるヤング率とポアソン比はそれぞれ200GPaと0.3としている。ガスケットの寸法は厚さ3mm、内径116mm、外径176mmとする。

Fig. 5 (a)は、充填材入りPTFE ガスケットを用いた締結体のボルト軸力変化のシミュレーション結果と実験結果である。ボルトの初期締付け力は、ガスケットの接触応力が20, 30, 40MPaとなるように設定し、5時間の評価を行なった。シミュレーション結果と実験結果を比較すると、締付け完了直後に多少誤差が生じるが、それ以降の変化はおおむね一致しており解析手法の妥当性を確認できる。ボルト軸力変化の傾向を見ると、締付け直後に大きく低下し、その後低下量は時間経過とともに緩やかになる。また、初期締付け力が大きいほどボルト軸力低下量も大きくなることわかる。

Fig. 5 (b)は、純PTFE ガスケットを用いた場合のシミュレーション結果である。充填材入りPTFE ガスケットのシミュレーション結果と比較すると、締付け完了直後の瞬間的なボルト軸力変化、およびその後の軸力変化ともに、充填材入りPTFE ガスケットの方が軸力低下量が小さいことがわかる。

(a) Filled PTFE gasket

(b) Pure PTFE gasket

Fig. 5 Time variations of axial bolt load.

Fig. 6 は、シミュレーションにより得られたガスケットの接触応力の半径方向分布を示している。実線が初期締付け完了時、破線が5時間経過後の接触応力である。締付け完了時では、接触応力はフランジローテーションの影響により、ガスケット外縁部ほど高い応力値を示す。この接触応力の分布傾向は、初期締付け軸力が大きいほど顕著に現れる。5時間経過後では、ガスケット接触応力は、外縁部近傍で低下量が大きく、一様に分布する傾向を示す。Fig. 6 (a)と(b)を比較すると、締付け完了時では、充填材入りPTFE ガスケットの方が接触応力分布が顕著に現れる。これは、充填材入りPTFE ガスケットの負荷曲線の勾配が純PTFE ガスケットよりも大きいことに対応している。5時間経過後では、充填材入りPTFE ガスケットの方が純PTFE ガスケットよりも、全体的に高い値を示す。管フランジ締結体は最大ガスケット接触応力が高いほど密封性能が向上するとされているため⁴⁾、充填材入りガスケットの上記結果は望ましいものである。

以上のシミュレーション結果より、充填材入りPTFE ガスケットの管フランジ締結体における性能は、純PTFE ガスケットに比べて大きく改善されていることが確認できる。

5 ガスケット性能とガスケットの粘弾塑性特性

第2章と第4章の結果より、PTFE ガスケットに充填材を配合することで、ガスケット性能が改善されることを確認した。ガスケット性能の更なる向上のためには、

(a) Filled PTFE gasket

(b) Pure PTFE gasket

Fig. 6 Variations of gasket contact stress in radial direction.

締結体使用時において高いガスケット接触応力を維持することが重要である。⁴⁾ そのため、Fig. 6 で生じたガスケット外縁部での顕著な接触応力緩和を軽減する必要がある。本章では、ガスケットの粘弾塑性特性が管フランジ締結体使用時のガスケット接触応力変化に及ぼす影響を有限要素シミュレーションにより評価し、ガスケットが具備すべき圧縮特性を明らかにすることを試みた。

5・1 応力-ひずみ関係の影響

ガスケットの応力-ひずみ関係がガスケット接触応力に与える影響を評価するために、負荷曲線と除荷曲線の勾配を変化させたシミュレーションを行なった。非線形性を示す応力-ひずみ関係を、Fig. 7 に示すように線形化し、負荷・除荷ともに勾配を一定としている。Fig. 7 に示すモデルに対して、ガスケット平均接触応力が 30MPa となるように初期ボルト軸力を設定し、5 時間の締結体使用状態をシミュレートした。クリープ曲線は、Fig. 3 (a) のガスケット応力 30MPa の曲線を用い、クリープひずみの応力依存性を考えないことにする。

まず、負荷曲線の影響を評価するために、除荷時のヤング率 $E_u = 2000\text{MPa}$ 一定の下で、負荷時のヤング率を $E_l = 400, 800, 1600\text{MPa}$ と変化させた。なお、基準値とする $E_l = 800\text{MPa}$ と $E_u = 2000\text{MPa}$ は、Fig. 2 (a) に示す充填材入り PTFE ガasket の応力-ひずみ曲線より決定している。Fig. 8 (a) は、ガスケット接触応力のシミュレーション結果を示す。この結果より、ボルト締付け時のガスケット外縁部での接触応力は負荷曲線の勾配が大きいほど高い値を示し、時間が経過してもこの傾向は変わらないことが確認できる。

次に、除荷曲線の影響を評価するために、負荷時のヤング率を $E_l = 800\text{MPa}$ 一定とし、除荷時のヤング率を $E_u = 1000, 2000, 3000\text{MPa}$ と変化させた。Fig. 8 (b) に、ガスケット接触応力のシミュレーション結果を示す。結果より、初期締付け時は同じ接触応力を示すが、5 時間経過後は除荷曲線の勾配が小さいほど、ガスケット外縁部に高い接触応力が残っていることがわかる。

以上の結果より、ガスケットの密封性能を向上させるには、ガスケットの応力-ひずみ曲線の、負荷側の勾配を大きく、除荷側の勾配を小さくすれば良いことがわかる。

Fig. 7 Linealized stress-strain curves.

(a) Effects of E_l

(b) Effects of E_u

Fig. 8 Effects of stress-strain relationship on gasket contact stress.

5・2 クリープ特性の影響

ガスケットのクリープひずみ量が小さいほどガスケット接触応力低下が緩和されるのは明らかである。ここでは、Fig. 3 に示すような、ガスケット接触応力が大きいほどクリープひずみ量が大きくなるクリープひずみの応力依存性が、ガスケット接触応力分布に与える影響を評価した。Fig. 9 はクリープ特性を変化させたガスケット接触応力のシミュレーション結果である。実線は式 (5)~式 (7) の充填材入り PTFE ガasket のクリープ曲線を用いた結

Fig. 9 Effects of stress dependent creep strain on gasket contact stress.

果, 破線で示す $\sigma_c = 20, 30, 40\text{MPa}$ は, それぞれ各ガスケット応力 σ_c のクリープ曲線のみを用いた結果である. ここで, 応力-ひずみ曲線は Fig. 7 に示す線形化されたものを用い, $E_l = 800\text{MPa}$, $E_u = 2000\text{MPa}$ としている. Fig. 9 より, クリープひずみがガスケット応力に依存しないモデルでは, ガスケット接触応力分布が一様に低下する傾向があり, ガスケット外縁部での顕著な応力低下が軽減されていることがわかった.

以上の結果より, ガスケットの密封性能を向上させるには, ガスケットのクリープひずみ量を少なくするだけでなく, ガスケットのクリープ特性の応力依存性を小さくすれば良いことがわかる.

6 結 言

充填材入り PTFE ガスケットの実機レベルでの性能評価とガスケット開発のための知見を得ることを目的として研究を行い以下に示す結論を得た.

(1) 充填材入り PTFE ガスケットの圧縮試験を行ない, ガスケットの応力-ひずみ関係とクリープ特性を明らかにした. そして, 充填材を配合することで, ガスケットの応力-ひずみ関係の負荷曲線の勾配は高く, 除荷曲線の勾配は低くなり, クリープひずみ量が減少することを確認した.

(2) ガスケットの粘弾塑性特性を考慮した管フランジ締結体の有限要素シミュレーションにより, ボルト軸力およびガスケット接触応力の時間変化を評価し, 充填材入り PTFE ガスケットを用いた性能が, 純 PTFE ガスケットを用いた場合よりも改善されていることを確認した.

(3) ガスケットの粘弾塑性特性が, 管フランジ締結体のガスケット接触応力分布に及ぼす影響を有限要素シミュレーションにより評価した. この結果, ガスケットの密封性能は, ガスケットのクリープひずみ量を少なくするだ

けでなく, 応力-ひずみ曲線の負荷曲線の勾配を大きく, 除荷曲線の勾配を小さく, クリープひずみの応力依存性を小さくすることで更なる向上が図れることを示した.

参 考 文 献

- 1) Ministry of Health, Labour and Welfare, (2008) (<http://www.mhlw.go.jp/houdou/2008/04/dl/h0428-1a.pdf>).
- 2) S. Ebata, "Current problem of asbestos substitute gaskets", The Piping Engineering, Vol.51, 10, pp.17-24 (2009).
- 3) P. J. Rae and D. M. Dattelbaum, "The properties of poly (tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression", Polymer, Vol.45, Issue 22, pp.7615-7625 (2004).
- 4) T. Takaki, K. Satou, Y. Yamanak and T. Fukuoka, "Sealing performance of pipe flange connections", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, PartC, Vol.71, No.702, pp.745-752 (2005).
- 5) T. Takaki, N. Nago, K. Satou and Y. Yamanaka, "Mechanical behaviors of bolted joints considering visco-elastic-plastic properties of gasket : in case of using PTFE gasket (machine elements and manufacturing)", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, PartC, Vol.73, No.728, pp.1245-1257 (2007).
- 6) N. Nago, T. Takaki and K. Satou, "Visco-elastic-plastic properties of gasket and bolt load relaxation in bolted joint", Journal of High Pressure Institute of Japan, Vol.45, No.4, pp.195-204 (2007).
- 7) T. Takaki and T. Fukuoka, "Bolt-up guideline for pipe flange connections", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, Vol.70, No.696, pp.2492-2499 (2004).