

ガスケットの締付管理について

基幹産業事業本部 基幹製品事業部

1. はじめに

フランジ締結体からの漏えいを防ぐためには、適正な力、適正な方法でボルトを締め付けて、締付荷重をガスケットに均等に負荷すること、シールに必要な締付荷重を運転期間中、維持し続けることが必要である。そのための管理基準がJIS B 8265¹⁾、JIS B 2251²⁾、ASME PCC-1³⁾、JPI-8R-15⁴⁾などの諸規格に規定されている。

本稿では、上記の規格の内容に加えて、当社が推奨する締付管理基準、方法を解説する。

2. シールに必要な締付力

内部流体をシールするために必要な締付力は、JIS B 8265に規定されている W_{m1} 、 W_{m2} という締付力を目安とするのが一般的である。以下にその考え方、計算方法を示し、さらに当社が推奨する締付力についても説明する。

2.1 ガスケットの有効幅 b 、有効径 G

平面座フランジでは、ボルト締付や内部圧力の作用によって、図1のように若干のたわみ（フランジローテーション）が生じる。そのため、内径側のガスケット面圧は低くなり、ガスケット中央部まで内部流体が入り込んできて、ガスケット面圧の高い外周側でシールすると考えられている。

有効幅 b と有効径 G を計算するために、まずはガスケットの基本幅 b_0 を計算する。基本幅 b_0 の計算式は、ガスケット形状と座面形状の組み合

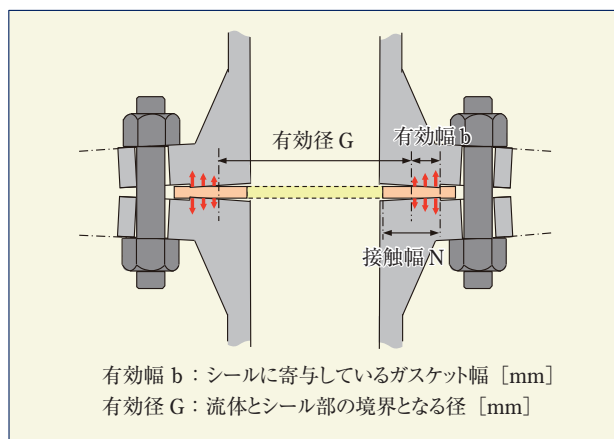


図1 有効幅と有効径

わせにより異なるが、平面座の場合、ガスケット接触幅 N の半分となる。

$$b_0 = N/2$$

基本幅 b_0 の値によって、有効幅 b と有効径 G は、次式で計算される。

$$b_0 \leq 6.35\text{mm} \text{ のとき}$$

$$b = b_0, \quad G = \text{ガスケット接触面の平均径}$$

$$b_0 > 6.35\text{mm} \text{ のとき}$$

$$b = 2.52\sqrt{b_0}, \quad G = \text{ガスケット接触面の外径} - 2b$$

2.2 使用状態で必要な締付力 W_{m1}

内部圧力 P [MPa] によってフランジを開こうとする力（エンドフォース） H と内部圧力 P の流体をシールするためにガスケットを圧縮する力 H_P を足し合わせた力が W_{m1} である。

$$W_{m1} \text{ [N]} = H + H_P$$

エンドフォース H は、内圧が作用している断面積（有効径 G の円）と内部圧力 P の積である。

$$H [N] = \frac{\pi}{4} G^2 \times P$$

シールするためにガスケットを圧縮する力 H_p は、ガスケット有効面積とシールに必要なガスケット面圧の積を2倍して安全を持たせたものである。シールに必要なガスケット面圧は、内部圧力 P とガスケット係数 m [-] の積である。

$$H_p [N] = 2 \times \pi bG \times mP$$

以上をまとめると、使用状態で必要な締付力 W_{m1} は、次式で計算される。

$$W_{m1} [N] = \frac{\pi}{4} G^2 P + 2 \pi bGmP$$

2.3 ガスケット締付時に必要な締付力 W_{m2}

ガスケットを用いて内部流体をシールするためには、ガスケットを圧縮変形させて、ガスケットとフランジの接触面の隙間やガスケット内部の空隙をふさぎ、流体の漏れの経路を断つ必要がある。

ガスケット締付時（初期なじみ）に必要な締付力 W_{m2} は、ガスケット有効面積と最小設計締付圧力 y [N/mm²] の積で求める。

$$W_{m2} [N] = \pi bG \times y = \pi bGy$$

2.4 当社が推奨する締付力 W_{m3}

W_{m1} , W_{m2} の計算に用いるガスケット係数 m , 最小設計締付圧力 y は、1943年にRossheimとMarklによって提案されたガスケットの特性値であるが⁵⁾、当時の試験方法、条件が不明確なまま、ガスケット材質の非石綿化後も数値だけが独り歩きしている状態である。

水・油系流体は分子量が大きく、粘性が高いため比較的漏れにくいですが、ガス系流体は分子量が小さく、粘性も低いので微小な隙間を通過しやすく漏れやすい。そのため、ガスケットの特性値 (m , y) は、流体の種類によって異なる値となるはずであるが、当時の試験流体は、比較的漏れにくい水や蒸気であったと推測されている。

1998年に廃止されたASTM F586-79⁶⁾には、 m 値、 y 値の測定方法が規定され、試験流体として水か

窒素ガスを用いることが明記されていたが、その適用や許容漏えい量については不明確なままであった。試験内圧として、 m 値は2.07MPa, y 値は13.8kPaが規定されていた。

13.8kPaという非常に低い内圧をシールするために必要な締付力が W_{m2} であるが、その締付力でフランジローテーションを考慮する必要があるのか疑問である。実際に W_{m2} の締付力では、水・油系流体をシールするには十分であっても、ガス系流体の場合には、締付力が不足する場合があります。フランジ締結後の気密試験で漏れいが検知される場合が多く見られている。

当社では、 W_{m2} の問題点に対して、 W_{m3} という締付力を提案している。 W_{m3} はガスケットの有効面積ではなく、ガスケット接触幅 N の全面積 A_g [mm²] に、シールに必要な平均面圧（最小締付面圧 σ_3 [N/mm²]) を負荷するのに必要な締付力であり、次式で計算される。

$$W_{m3} [N] = A_g \times \sigma_3$$

最小締付面圧 σ_3 は2MPaの流体をシールするのに必要な面圧を実験から求め、水・油系流体とガス系流体に対して、それぞれに設定している。

2.5 締付トルクの計算

W_{m1} , W_{m2} , W_{m3} の最大値をシールに必要な最小締付荷重 W_{min} とし、次式によって最小締付トルク T_{min} を計算する。 K はトルク係数(一般的に0.2とする)、 n はボルトの本数、 D はボルトの外径 [mm] である。

$$T_{min} [N \cdot m] = \frac{1}{1000} \times K \times \frac{W_{min}}{n} \times D$$

一方、ガスケットに過剰な締付力を負荷すると、ガスケットが破壊し、シール性能を発揮しなくなる。そのため、各ガスケットには、締付力の上限の目安として、許容締付面圧 σ_{max} [N/mm²] が設定されている。許容締付力 W_{max} , 許容締付トルク T_{max} は次式で計算される。

$$W_{max} [N] = A_g \times \sigma_{max}$$

$$T_{max} [N \cdot m] = \frac{1}{1000} \times K \times \frac{W_{max}}{n} \times D$$

T_{min} から T_{max} の範囲内で締付を行えばシール可能である。ただし、締付力の上限については、ボルトやフランジの強度面からも考慮が必要である。

3. 締付手順

フランジ締結体において、ガスケットのシール性能を適正に発揮するためには、必要な締付力を全てのボルトに均等に負荷する必要がある。

複数本のボルトを順番に締め付けた場合、締め付けたボルトの両隣のボルトが緩んでしまう弾性相互作用と呼ばれる現象によって、各ボルトの締付力は刻々と変化し、全てのボルトを均等に締め付けることが難しい⁷⁾。弾性相互作用のイメージを図2に示す。ボルト1を締め付けると、フランジの変形によりボルト2は緩み、ボルト3は締付力が增加する。弾性相互作用の影響を最小限に抑えるためには、均等な力での締付を複数回、繰り返す必要がある。

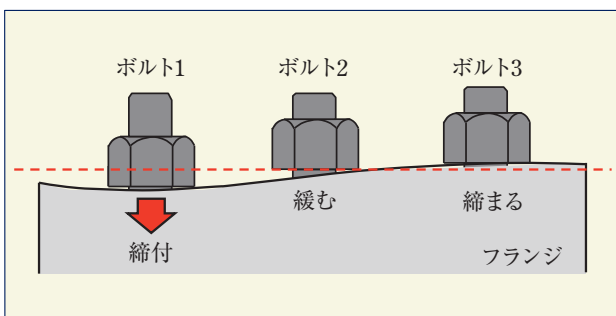


図2 弾性相互作用

弾性相互作用の影響を考慮した締付方法として、ASME PCC-1に対角（星形）に締め付けた後、周回締付けを繰り返す手順が規定されている。しかしながら、ASME PCC-1の手順では、全てのボルトを対角（星形）に締め付けるので、ボルト本数が多い場合、締付順序が複雑となり、締め忘れなどの作業ミス懸念がある。また、周回締付けをナットが回らなくなるまで繰り返すことを定めており、周回数に上限がなく、作業時間や労力が増加するといった課題がある。

これらの課題を改善する方法として、2008年にJIS B 2251が制定された。JIS B 2251は、日本高圧力技術協会（HPI）に設置された「圧力設備

のシーリング技術研究委員会」の研究成果⁸⁾に基づいている。この研究では、全てのボルトを対角（星形）締めする必要がなく、対象ボルトを減少できること、規定回数の周回締付けを行えば、均一な締付状態が得られることを有限要素解析と検証実験によって示し、信頼性と作業性を両立した締付方法を提案している。

以下にその締付手順を紹介する。適用対象は、ジョイントシートガスケットとうず巻形ガスケットである。

①目標締付トルクの設定

ボルト本数が8本以下の場合には、締付計算で得られた締付トルクの100%を目標締付トルクとする。ボルト本数が12本以上の場合には、弾性相互作用による締付力の低下を補償するため、締付計算で得られた締付トルクの110%を目標締付トルクとする。

②仮締付け

ボルト本数が8本以下の場合には、全てのボルトを締め付ける。ボルト本数が12本以上の場合には、締め付けの対象となるボルトを選択する（表1）。

対角（星形）の順に締め付け、締付トルクを段階的に増加させる（例えば、目標締付トルクの10%→20%→60%→100%）。各段階でフランジ面間距離が均等であることを確認する。

うず巻形ガスケットの場合は、片締めになりやすいので、仮締付けの最後に、目標締付トルクの50%で全ボルトの周回締付けを1回行う。

表1 仮締付けの対象ボルト

ボルト本数	締付対象ボルト
8本以下	全ボルト
24本以下	90° 間隔の4本
28本以上	45° 間隔の8本

③本締付け

全てのボルトを目標締付トルクの100%で締め付ける。ボルト本数が4本の場合には、対角（星形）締めとし、ボルト本数が8本以上の場合には、周回締めとする。フランジの呼び径が250Aより小さい場合は、周回数を4周とし、250A以上の場合には6周とする。

④増締め

応力緩和による締付力の低下を補償する必要がある場合は、本締付け終了から4時間以上経過した後、本締付けと同じ手順で1～2周締め付ける。

4. 運転中の締付力の維持

4.1 応力緩和による締付力の低下

初期締付で圧縮されたガスケットには、反発力が発生し、シール可能な状態を維持している。時間経過によってガスケットの反発力が、徐々に低下していく現象を応力緩和という。応力緩和で反発力が低下するとボルトが緩み、シールに必要な締付力を下回ると漏えいが発生する。

応力緩和の挙動は、ガスケットの材質によって異なり、ジョイントシートガスケットやふっ素樹脂系ガスケットなどの軟質系シートガスケットは、比較的応力緩和が大きく、うず巻形ガスケットなどのセミメタル系ガスケットやメタル系ガスケットは、応力緩和が小さい傾向にある。各種ガスケットの応力緩和挙動のイメージを図3に示す。

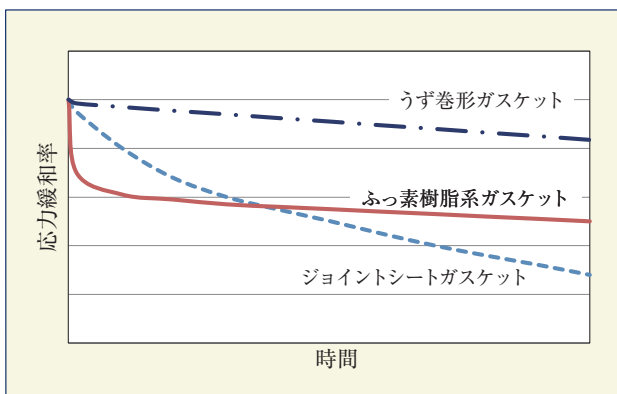


図3 各種ガスケットの応力緩和挙動

4.2 増締め（ホットボルティング）の注意点

運転初期の昇温状態は、内圧や温度の影響で締付力の低下が大きいため、増締め（ホットボルティング）は、締付力を回復させる有効な手段である。

しかしながら、運転条件はプラントごとに様々であり、ホットボルティングの方法や時期を明確に規定したものはない。経験などに基づいてプラントごとに独自の基準で実施している一例が、

JPI-8R-15に紹介されている程度である。

増締め（ホットボルティング）を実施する場合のガスケットごとの注意点を以下に挙げる。

- ・ジョイントシートガスケットは、昇温後、時間経過すると硬化するので、増締めできない。
- ・ふっ素樹脂系ガスケットは、昇温に伴い軟化して変形量が多くなる。ホットボルティングを実施する場合は、変形を抑制できる溝形フランジが好ましく、定量的な締付管理を行い、初期締付と同じ締付力とする。
- ・セミメタル系、メタル系のガスケットは、締付力による破損の心配は少ないが、軟質系と同様に定量的な締付管理は必要である。

当社としては、ホットボルティングを実施しなくてもシール性能を維持できるように、締付力の低下を見越して、初期締付力を高くすることを推奨する。

5. おわりに

当社では、各種プラントで使用されたガスケットを多数評価した結果、フランジ締結体から漏えいが見られたガスケットの大半からは、締付不足や片締めといった施工不良の痕跡が確認されている。本稿で紹介したガスケットの締付管理方法を参考にいただき、フランジ締結体からの漏えい事故の減少に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本工業規格, JIS B 8265 : 2010, 圧力容器の構造—一般事項
- 2) 日本工業規格, JIS B 2251 : 2008, フランジ継手締付け方法
- 3) ASME Standard, ASME PCC-1-2013, Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly
- 4) 石油学会規格, JPI-8R-15-2008, フランジ・ボルト締付管理
- 5) Rossheim, D.B., Markl, A.R.C., Gasket-Loading Constants, *Mechanical Engineering*, Vol.65, No.9, p647-650 (1943)
- 6) ASTM Standard, ASTM F568-79, Standard Test Method for Leak Rates Versus σ Stresses and m Factors for Gaskets
- 7) Bickford, J. H., Nassar, S., Handbook of Bolts and Bolted Joints, Marcel Dekker, p451-477 (1998)
- 8) 日本高圧力技術協会規格, HPIS Z 103 フランジ継手締付け指針

*本稿は日本工業出版株式会社刊 配管技術2018年2月増刊「配管技術者が知っておくべき工学知識」に掲載の記事に加筆修正を加えたものです。