605 石綿規制に対する管フランジ締結体の設計と国際動向

Design and International Trend for Bolted Pipe Flange Connections after New Asbestos Regulation

○正 沢 俊行 (広島大学大学院)

Toshiyuki SAWA, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima, Hiroshima

Key Words: Non-asbestos, Pipe flange connections, New design method

1. はじめに

ボルト・フランジ締結体は、内部流体の漏えいを防止するという機能を喪失し、ガスケット面からしばしば接合面漏れを発生することがある。もちろん漏えいの根拠はガスケット接合面からの接合面漏れのみではなく、石綿系ガスケットの場合には浸透漏れ、さらに腐食に基づく腐食漏れも考えられる。このような締結体の設計にあたって、1943年にMarkle&Rosseheimにより発表されたガスケット係数(m, y)が用いられてきた。ただし m はガスケット係数、 y は最小設計ガスケット応力である。しかし、この m, y 値を使用した設計法では十分に内部流体の漏えいを把握することができない。現在では気体の場合にはガスケットからは微量でも漏えいが発生することを認めることから出発している。

さらに大きな問題は永い間使用されてきた石綿ガスケットの使用が国内で大方禁止になり、平成20年より基本的に非石綿ガスケットを使用することになっている。従来の石綿ガスケットの性能と非石綿ガスケットがフランジ締結体に使用された時の密封性能の差異を把握する必要がある。

すなわちフランジガスケット締結体において問題となるのは、以下の事項である。①ガスケットからの漏えい、②フランジ強度、③ボルト強度とボルト荷重の設計施工(ボルト締め付け法)。もちろんガスケット、フランジ及びボルト締結の相互作用を考慮すべきであるが、このような最近の技術の習得が実際のフランジガスケット締結体からの漏えいを含めた事故の低減に繋がると期待したい。ここでは、①フランジガスケット締結体の基礎的特性と問題点、②フランジ締結体に関する従来の研究、⑤欧米の動向、⑥STOP委員会で作成中の新設計法と国内の動向、について述べたい。

2. いくつかの事故例

地震時におけるプラントのフランジ締結部からの内部流体漏えい事故

1995年1月17日に発生した阪神淡路大地震によって神戸港近くのLPガス貯蔵施設が液状化によりかなりの被害を受けた。液状化により、地盤が約50cm沈下し、1m程側方流動で移動した。主に沈下によりフランジ締結部に曲げモーメントが発生し、ガスケット面が開口した。このため漏えいに至った。漏えいガスに引火すると大事故につながる可能性があり、関係当局は上記避難勧告を出し、7万人の住民が避難した⁽¹⁾。LPガスは零下約40℃であるため、配管パイプラインは保冷材が巻かれている。このためなかなか漏えい箇所の発見が難しかった。しかし結果的に漏えい箇所がかなり早く発見され、大事に至らなかった。耐震設計がなされているが、液状化により予想できない曲げモーメントがフランジ締結部に発生した。図2-1は漏えいが発生したフランジ締結部である。受払ノズルフランジと受払元弁フランジとの間が漏えい箇所である。

従来このようなガスケット付きフランジ締結体のボルト初期締め付け力の設定はASME(アメリカ機械学会)のコードにより、ボルト材料の降伏応力の30-40%程度に設定されているようである。そこで、図2-2に示すように実際のパイプ管フラン

ジ締結体を作製し、内部流体として水を用いた曲げ実験を行った。漏えいが発生するかは内部圧力の変化で検出した。実験を行った結果、初期締め付け力を90%に設定した場合には、一例を除いて漏洩は発生しなかった。パイプが大きく変形したのみであった。従来の場合には全て漏洩した。本漏えい事故の場合も初期締め付け力をより適切に設定されていれば、液状化による曲げモーメントに対しても対応できたものと考えられる。従ってフランジ締結部からの漏洩発生は防止するためには、関連配管パイプ部には大きな塑性変形を許容し、地震エネルギー吸収を吸収させる設計が必要である。

3. フランジ設計の基礎

図3-1に示すように、 N 本のボルト・ナットにより初期締め付け力 F_f で締結されている管フランジ締結体を考える。内圧 P が作用すると、ボルトには軸力増加分 F_t が追加され、 $F_f + F_t$ となる。他方ガスケット面には当初ボルト1本あたり F_f の圧縮力が作用していたが、内圧作用により接触力 F_c が失われ、 $F_f - F_c$ となる。このようにガスケット面の力が減少し、ガスケット面積 A で割れば、ガスケット平均応力(ボルト1本あたり)

Fig.2-1 The pipe flange connection occurring the gas leakage in the accident

Fig.2-2 The pipe flange connection used in the leakage test

Fig.3-1 A pipe flange connection with gasket
subjected to internal pressure

が F_g/A から $(F_g - F_c)/A$ となる。実際のところ、このガスケット面の応力の減少 F_c/A がいくらになるのか、内圧作用時の実際のガスケット応力 $(F_g - F_c)/A$ がいくらになるかが、なかなか正確に推定できないのが現状である。このため、たまたに漏えい事故が発生するのである。力学的には管フランジの内圧作用時の軸方向力 $W (W = \pi a_1^2 P)$ 、なお a_1 はパイプ内半径)とすると、次式が成り立つ。

$$F_b + F_c = W/N \dots \dots \dots (3.1)$$

式(3.1)において、 F_b と F_c が未知数である。未知数2つに対して、与えられる式は式(3.1)の1つだけである。すなわち不静定問題であるので、簡単には F_b と F_c の値は得られない。不静定問題の解法は、式(3.1)の他に変位の釣り合い条件を入れることである。1920年代からドイツでばね定数を用いて、変位の釣り合い条件を満足させる Thum の公式⁽²⁾が長い間用いられてきた。Thum の公式⁽²⁾により、ボルト軸力の増加分 F_b が求められる。しかし最近になりその問題点が明らかになり、その公式の修正が行われて、以下のような式(3.2)によりボルト1本あたりの軸方向外力 W/N に対するボルト軸力の増加分 F_b が求められる⁽³⁾。このボルト軸力の増加分 F_b とボルト1本あたりの軸方向外力 W/N の比が内力係数(Load factor)と呼ばれている。

$$\phi = F_b / (W/N) = K_f / (K_f + K_g) \times K_c / K_{pt} \dots \dots \dots (3.2)$$

ただし、 K_f はボルト・ナット系のばね定数、 K_c はボルト穴付近の被締付け物(ガスケットを含んだフランジ)の圧縮ばね定数、 K_g は被締付け物(ボルト穴を無視した)の圧縮ばね定数、 K_{pt} は被締付け物の引張りばね定数である⁽⁵⁾。これらのばね定数のうち、 K_f と K_c はかなり正確に求められるようになっているが、 K_g と K_{pt} は簡単には求められていない。簡単に求められる方法が確立されることが課題である。ガスケット面の接触応力分布を求める数値的手法の一つは有限要素法などである。ボルト強度の観点から式(3.2)での F_b が分かれば、ボルトが降伏(破損)しないようにボルトの初期締付け力が設定できる。他方、 F_b が分かれば、式(3.1)より、ガスケット面から失われる力 F_c が $F_c = W/N - F_b$ より得られる。そうすれば平均ガスケット応力が推定される。この平均ガスケット応力により、ある程度密封性能を評価できることになる。いずれにせよ、①実際の内圧作用時のガスケット応力をより正確に推定することが課題であり、②与えられたガスケット応力で漏えいが発生するのか、するとすればその漏えい量を推定することが必要となる。③つぎに与えられた許容漏えい量に対してボルト荷重(初期締付け力)をどのように設定するかが、次の問題である。しかし締結体の組立てにあたっては、最初的前提は

ボルト初期締付け力が一様に F_b で締結されていると仮定していることである。実際には、一様に設定したボルト初期締付け力を多数のボルトに与えることはかなり難しい。④最後の大きな課題はボルト締め付け法である。

4. フランジ締結体に関する従来の研究

4.1 非石棉と石棉ガスケット単体の密封性能に関する差異

石棉ガスケット及び非石棉ガスケットの力学特性及び密封性能を JIS B 2490 に規定される試験方法を用いて得られるガスケット応力-圧縮変位量及び基本漏えい量-圧縮変位量の関係を用いて比較し、差異を示す。また、対象としたガスケットは、CSG とした。非石棉 CSG は、主成分にアラミド繊維とバインダーで構成されたものを使用した。

図 4.1 は石棉及び非石棉ガスケットのガスケット応力-圧縮変形量の関係を示している。縦軸はガスケット応力を示し、横軸はガスケット圧縮方向変位量を示している図より、CSG では石棉と非石棉でのガスケット応力-圧縮変位量の関係に関して差異が極めて小さいことが分かった。

図 4.2 は石棉及び非石棉ガスケットの基本漏えい量-圧縮変位量の関係を示している。縦軸は基本漏えい量を示し、横軸はガスケット圧縮方向変位量を示している。図 4.2(a)は CSG に関する比較を示し、CSG では、差異が若干みられるが石棉ガスケットの方が変形しやすい点を考慮すると石棉及び非石棉ガスケットの密封性能に関する差異は極めて小さいことが分かった。

4.2 非石棉と石棉ガスケットを用いた締結体の密封性能に関する差異

図 4.3 は非石棉 CSG を用いた管フランジ締結体の漏えい量推定結果及び漏えい量測定実験の実験結果を示す。縦軸は漏えい量 L を示し、横軸にボルト初期締付け時の平均ガスケット接触応力 σ_{zm} を示す。ここで漏えい量の推定は、計算により求めたガスケット接触応力分布と JIS B 2490 より得られたガスケット単体のガスケット接触応力と漏えい量の関係より実施した。

図 4.3 は作用内圧が 3MPa の場合での結果であり、石棉 CSG、非石棉 CSG 共にボルト初期締付け時の平均ガスケット接触応力が大きくなれば、漏えい量が減少する。非石棉 CSG を用いた場合の漏えいに関する実験値と推定値はよく一致を示している。本研究は常温および短期間での実験に限定されるが、同じガスケット接触応力の条件では、非石棉 CSG を用いた締結体は従来使用されていた石棉 CSG を用いた締結体と同等な密封性能を有する。従って、非石棉 CSG 付き管フランジの密封性能は、石棉 CSG 付き管フランジ締結体と同等であることが期待できる。

Fig.4-1 Stress-displacement curves of gasket
(Asbestos CSG VS Non-asbestos CSG)

CSG に関して言えば、常温での力学特性及び密封性能の差異は極めて小さいことが示されたが、その使用温度域に両者で大きな差異があることが最近の研究で言われている。従来の石棉ガスケットでは 250℃~300℃程度まで使用されていたが非石棉 CSG ではせいぜい 100℃程度であると言われている。従って、非石棉ガスケットへの代替化には正しい認識が必要である。

4.3 曲げモーメントを受ける管フランジ締結体

先述したように管フランジ締結体には、地震や風荷重またはミスアライメントのように内圧作用のみではなく曲げモーメントが作用する場合がある。この曲げモーメントが締結体の密封性能に及ぼす影響はほとんどされていない。ここでは曲げモーメント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応力解析を用いて示す。

図 4-4 は内圧及び曲げモーメントが作用する 3 インチ管フランジ締結体のガスケット外半径位置の周方向ガスケット接触応力を示す。縦軸はガスケット接触応力、横軸に角度を示す。①ボルト締付けが完了後②内圧が作用させ③曲げモーメントが作用する。各状態でガスケット接触応力をそれぞれ示している。内圧が作用することでガスケット接触応力は減少し、曲げモーメントが作用すると締結体の圧縮側 ($\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$) ではガスケット接触応力は上昇し、引張側 ($\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$) で大きくガスケット接触応力が減少している。この引張側の大幅な減少が漏れ量の増加を引き起こすことがわかる。またこの引張側と圧縮側でのガスケット接触応力の変化が大きく異なる原因はガスケットのヒステリシスによる影響であることがわかっている。またこのヒステリシスの影響により荷重履歴によってガスケット接触応力分布が変化することも明らかになっている。

4.4 ボルト初期締付け力のばらつきが漏れに及ぼす影響

石油精製、石油化学及び電力プラントの施工現場においてそのフランジ締結体のボルト締付け時にトルクレンチを用いたトルク法が用いられている。しかし、トルク法を用いてボルトを締付けた場合、ボルト初期締付け力がボルト 1 本 1 本で大きくばらつくことが知られている。しかし、ボルト初期締付け力のばらつきがフランジ締結体の力学特性、特に密封性能とかかわりのあるガスケット接触応力分布に及ぼす影響や締結体の密封性能に及ぼす影響に関する研究はほとんどない。

図 4-5 は実際の 1 対の 20 インチ管フランジをトルクレンチを用いてボルト 24 本を締付けた時の締付け開始から締付け完了までのボルト軸力変動を示している。締付け手順は ASME PCC-1 に従い星形対向締付けで行った。縦軸はボルト軸力、横軸は各ラウンドを示す。目標ボルト初期締付け力 F_t は、ボルト締結時の平均ガスケット接触応力が 60MPa となるボルト軸力としている。目標締付けトルク T は $T = kF_t d$ を用いて算出した。ここで k はトルク係数、 d はナット径である。図より、各段階においてボルト軸力は一様とならず、各ボルト軸力はばらつきながら増加し、ボルト締付けが完了時においてもボルト軸力は大きくばらついていることがわかる。またその平均値は目標とするボルト初期締付け力の値よりも小さいことが示されている。

図 4-6 は実際の締結体を用いて得られた各締付け段階のボルト軸力(図 4-6)を用いて有限要素応力解析を行い、得られた周方向ガスケット接触応力分布を示す。縦軸はガスケット応力、横軸は角度を示す。実線は各締付け段階のばらついたボルト軸力を用いた時の結果を示し、破線は一律なボルト軸力を与えた時の結果を示す。ボルト初期締付け力がばらついた場合、ガスケット接触応力が大きく周方向で分布することが分かった。またボルト初期締付け力のばらつきの影響はガス

ケット内半径よりガスケット外半径ほど大きく、ガスケット外半径のガスケット接触応力が内半径位置に比べ大きく分布していることがわかる。

5. 欧米の動向

PVRC の BFC ではタイトネスパラメータ T_p や新ガスケット係数を ASME、Boiler&Pressure Vessel Codes の Appendix に入れる事を計画して久しい。当初予定は 1995 年であった。与えられたタイトネスクラスを実現するためのボルト初期締付

Fig.4-2 The relationships between leak rate and gasket displacement (Asbestos CSG VS Non-asbestos CSG)

Fig.4-3 Estimated leak rate of pipe flange connections (Asbestos CSG VS Non-asbestos CSG)

Fig.4-4 The contact gasket stress of the pipe flange connection under internal pressure and bending moment

Fig.4-5 Variations in tightened bolt loads of the pipe

flange connection with sheet gasket

Fig.4-6 Contact gasket stress distributions of

the 20 inch pipe flange connection with the sheet gasket

け力の決定にも問題はありますが、PVRCのBFCグループの意向として、さらし上部委員会においてもNon-mandatoryとしてAppendixに入れることが最終決定されていると言われているので、実現の可能性は高いと考えられる(最近の動向としては、かなり怪しい雲行きである)。ただし、気体中心の設計であるため、フランジが大きくなることが多いので、アメリカのガスケットメーカーなどの抵抗も依然強いようである。現在PVRCのBFCはSRC(Warren Brown委員長)に代わっている。

他方、ヨーロッパではCEN(ヨーロッパ規格委員会)TC74委員会において、ガスケットテスト、フランジ設計法、ボルト締結法などの基本的問題が長い間研究され、議論され、CENの規格として登場してくるのは間近いと推測される(登場しだしている)。ヨーロッパはアメリカに対しては上述の規格のISO化でASME規格に対抗しようとしており、厳しい戦いになっている。今後の規格に関する動向には日本としても十分注意を払い、かつ、日本も規格制定にそれなりの貢献と寄与が望まれる。

6. 今後の国内動向

6.1 微小漏えいを考慮した新フランジ設計法(常温)

日本高圧力技術協会圧力設備シーリングテクノロジー専門技術委員会において圧力容器及び配管に用いられるフランジ締結体の接合部からの微小漏えいを考慮した合理的設計法が確立されつつあります。図6-1はその新設計法の設計フローチャートを示す。

設計に手順は大きく分けて密封性能設計と強度設計に2ステップを経て実施される。最初に所定の密封性能を満足するようにフランジ・ボルト・ガスケット各部の緒元とボ

ルト締付け力を決定することで密封性能設計を行い、続いて、その締付け条件の下で計算した締付け時及び使用時の各部の応力が制限値を満足するかを確認する。いずれのステップにおいても締付け時と使用時の力学状態を荷重変位解析により関連付ける。荷重変位解析には解析精度に応じてレベル1:内力係数法、レベル2:大山法及びレベル3:有限要素法の3つの解析法を規定しており、目的に応じて選択可能としている。

6.2 高温問題

管フランジ締結体は内圧作用のみではなく日常的に温度変動が特に高温作用下で使用されることが多いがそれに関する研究は十分ではない。特に高温条件下でのガスケット特性評価方法の確立、ガスケットのクリープ及び応力緩和を考慮したフランジ締結体の寿命予測、現在では高温時に増締め(Hot Bolting)が行われているが、この高温作用時のボルト軸力を変動を考慮したボルト初期締付けを決定法及び締付け法の検討等が必要とされている。また、シートガスケットや渦巻き形ガスケットに関する研究は行われているが、これらの適用範囲外のより高温では金属で作られたリングジョイントガスケットを使用するが、このガスケットを使用した研究はまだない。

7. おわりに

今後石綿代替ガスケットの高温での試験法から管フランジ締結体への体系的な設計法の確立へ向かうものと推測している。たかが管フランジ締結体であるが、一昔前のこのような技術から環境を考慮した新しくも厳しい技術へ脱皮する必要性に迫られ、技術競争の時代への変遷期に入っていると思われる。それなりの準備と対応が必要であろう。特に石綿代替ガスケットと高温ガスケット漏えい問題ではアメリカPVRCは20年前に完了していると言われており、確立されていない日本は今後新しい技術の確立を目指すことになる。

8. 参考文献

- (1) 安藤, バルブ技報, 40(1998), 36
- (2) 吉本・他3名, 機論(A), 42-359(1976), 2174.
- (3) 沢・丸山, 機論(A), 44-383(1978), 2516.

Fig.6-1 The flowchart of

new flange connection design method