

論文の要旨

題目 非石綿ガスケットを用いた配管フランジ締結体の応力解析と力学特性に関する研究

(A Study on Stress Analysis and Mechanical Characteristics of Bolted Pipe Flange Connections with Non-asbestos Gaskets)

氏名 高木 愛 夫

圧力容器と配管及び配管と配管との接続部のガスケットを用いた管フランジ締結体は、石油精製および石油化学などの大型プラントで多用されている。原子力・火力発電プラントでは発電用タービンを駆動させる高温高圧の蒸気配管に使用され、構造強度と高圧蒸気の密封機能が要求される。配管フランジ締結体は、原子力発電プラントでは放射性物質の漏えい防止のために十分な密封機能が必要であり、火力発電プラントでは可燃性の燃料の密封機能を担うため、安全性の観点から重要な接合部である。現在まで、ガスケット付き管フランジ締結体は多くの使用実績があり、多くの学術的研究も行われている。しかし、内圧および外荷重が作用する管フランジ締結体挙動の複雑さのため、今までに力学的な管フランジ締結体特性が十分解明されていない。さらに最近になり、人体への健康被害から石綿製品の使用が禁止になり、非石綿ガスケットの使用に移行している。しかし非石綿ガスケット自体の力学的特性の解明も十分ではなく、非石綿ガスケット付き管フランジ締結体としての力学特性および密封性能評価もほとんどなされていない。このため非石綿ガスケット付き管フランジ締結体の力学特性解明が必要とされ、さらにこの締結体の密封性能が従来の石綿ガスケット付き管フランジ締結体のそれに対する優劣が重要な問題とされている。

本論文では、非石綿ガスケット付き管フランジ締結体のガスケット接触応力、ハブ応力およびボルト軸力変動などの力学特性と密封性能に関して、有限要素法と弾性論を用いた解析により検討し、実験により妥当性を検証し、漏えい事故防止のための設計指針を提案することを目的としている。本論文で得られた成果を以下に示す。

第1章「緒論」では、ガスケット付き管フランジ締結体に関する従来の研究を展望し問題点を明確にしている。さらに必要な研究項目を述べ、本論文の目的と意義を述べている。すなわち、非石綿ガスケットに対する基礎的力学特性の解明と、非石綿ガスケットを用いた管フランジ締結体の力学特性解明および密封性能評価が必要であることを指摘し、さらに曲げモーメント、ボルト初期締付け力のばらつき、管フランジ呼び径、および内部流体の温度の影響と長期使用が締結体の力学特性と密封性能に及ぼす影響の解明が研究課題である、と述べている。

第2章「ガスケット特性が管フランジ締結体の力学特性および密封性能に及ぼす影響」では、内圧を受ける非石綿 CSG(ジョイントシートガスケット) 付き管フランジ締結体に関して、軸対称三次元弾性論および三次元有限要素法 (FEM) 解析を用いてガスケット接触応力分布、ハブ応力およびボルト軸力変動 (内力係数) を解析している。この結果、CSG 単体での変形特性および密封性能は石綿 CSG と非石綿 CSG の間で差異が小さいことを示している。また弾性論および FEM 解析により、石綿 CSG と非石綿 CSG を用いた管フランジ締結体のハブ応力の大きさは同等であること、および両者の内力係数の差異が小さいことを示し、実験結果と解析結果がかなりよく一致していることを示している。この結果より、CSG の非石綿化に伴う管フランジ締結体のボルト軸力とハブ応力への影響は小さく、非石綿 CSG 付き管フランジ締結体の密封性能は石綿 CSG 付き管フランジ締結体のそれに比べ同等以上であることを明らかにしている。

第3章「管フランジ呼び径が内圧を受ける管フランジ締結体の力学特性および密封性能に及ぼす影響」

では、有限要素法 (FEM)を用いて非石綿うず巻き形ガスケット (SWG)付き管フランジ締結体の力学特性および密封性能に及ぼす各フランジ呼び径 (3 インチから 24 インチ)の影響について調べている。実際の締結体の密封性能、ハブ応力および内力係数に関する実験を行い、FEM 解析の妥当性を検証している。FEM 解析結果より、半径方向のガスケット接触応力分布は、小口径管フランジ締結体では、より一様であり、呼び径が大きくなるに従いより大きく分布することを示している。ASME 規格に基づいて求めたハブ応力は FEM 解析とは大きな差異が認められ、ASME の計算ではハブ応力を過大に評価し、このためボルト初期締付け力が大きく設定できないことおよび危険側の漏えい設計になることを指摘している。大口径フランジ締結体の密封性能は劣り、大口径フランジ締結体ではボルト初期締付け力をより大きく設定することが漏えい防止策であるとしている。

第4章「ボルト初期締付け力が管フランジ締結体の密封性能に及ぼす影響」では、1) JIS B 2251 および ASME PCC-1 の 2 方法のボルト締付け手順、2) 小口径 (3") および大口径 (20") の 2 種の管フランジ締結体について、管フランジ締結体の①ボルト初期締付け力のばらつき、②ガスケット接触応力分布、③密封性能、に及ぼす影響を FEM 解析と実験により評価している。2 方法の締付け方法に基づくトルク法によりボルト締付けを行った結果、両者のボルト初期締付け力のばらつきの差異は極めて小さいこと、ボルト初期締付け力のばらつきの程度は管フランジ呼び径によらないことを示している。さらに米国 PVRC (圧力容器研究委員会) の提案するタイトネスパラメータ T_p を用いて管フランジ締結体の密封性能を評価し、上述の 2 方法の締付け手順により締結された締結体の密封性能に大きな差異は認められないこと、およびボルト初期締付け力のばらつきが密封性能に及ぼす影響は大口径管フランジ締結体の方が大きいことを明らかにしている。漏えい量基準の締付け効率 η を新たに提案し、管フランジ締結体に対する新たな締付け効率 η の値は呼び径に依存し、小口径管フランジ締結体では 0.8 程度、大口径管フランジ締結体では 0.65 程度にすべきであるとし、PVRC の提案する $\eta=0.85$ は漏えい量基準の管フランジ締結体設計では危険側になることを指摘している。

第5章「曲げモーメントと内圧を受ける管フランジ締結体の応力解析と密封性能評価」では、内圧と曲げモーメントが作用する管フランジ締結体の漏えい量の予測を FEM 解析および実験により検討している。その結果、基本漏えい試験で得られたガスケット接触応力と漏えい量の関係、および FEM 解析で得られたガスケット接触応力分布を用いて管フランジ締結体の漏えい量を精度よく予測できること、管フランジ締結体の密封性能は内圧よりも曲げモーメントの影響が大きいことを示している。曲げモーメントはガスケットの非線形な復元特性に起因して非線形なガスケット接触応力分布を誘引し、負荷履歴 (曲げモーメントと内圧の作用順序) が締結体の密封性能に影響を及ぼすことを示している。設計においては曲げモーメントの影響を十分に考慮すべきであることを指摘し、ハブ応力は重要な設計因子であることを示している。

第6章「高温での管フランジ締結体の密封性能評価」では、うず巻き形ガスケット (SWG) を用いて、その力学特性および物性を高温下で測定し、管フランジ締結体の長期健全性に関する考察を行い、温度変動サイクルが管フランジ締結体の密封性能に及ぼす影響も評価している。その結果、300℃までの試験において、ガスケットの応力-ひずみ線図に有意な差異はなく、負荷と除荷を繰り返しても力学的な特性にほとんど変化がないことを示している。さらに20日間の熱サイクル試験を行い、管フランジ締結体の密封性能に変化は生じないことを示し、応力緩和試験結果から長期間の密封性能を予測している。

第7章「漏えい量基準の非石綿ガスケット付き管フランジ締結体設計の考え方」では、第6章までの検討結果に基づき、漏えい量基準の管フランジ締結体の設計に必要な項目を整理し、設計手順を提案している。提案した設計法では、最初に許容漏えい量を満足するために必要なガスケット接触応力を決定し、さらにガスケット接触応力に影響を与える因子およびその影響、および経年的な要素も加味した設計方法を示している。

第8章「結論」では、本研究で得られた成果を要約し述べている。すなわち以下のようなになる。

- 1) 非石綿ガスケットと石綿ガスケットの単体での力学特性の差異が小さいことを示し、管フランジ締結体に用いた時の密封性能は非石綿ガスケットを用いた場合の方が良好であることを示した。
- 2) 管フランジ呼び径の影響が管フランジ締結体の力学特性に及ぼす影響は大であること、非石綿ガスケットと石綿ガスケットを用いた管フランジ締結体の内力係数およびハブ応力に関しては両者の差異が小さいことを示した。さらに米国機械学会（ASME）のハブ応力評価は適切でなく、これに従うと危険側の密封設計になることを指摘した。
- 3) ボルト初期締付け力のばらつきが締結体の密封性能に及ぼす影響が大であることを示し、従来のボルト初期締付け力に基づく締付け効率に対して漏えい量基準の締付け効率 η を定義し、小口径管フランジ締結体の場合は $\eta=0.8$ 、大口径管フランジ締結体の場合には $\eta=0.65$ であるとした。
- 4) 曲げモーメントと内圧を受ける管フランジ締結体の密封性能は著しく低下し、曲げモーメントの影響が大きいこと、および曲げモーメント作用と内圧作用の順序が締結体の密封性能に影響を及ぼすことを示した。
- 5) 内部流体温度の影響を明らかにし、高温になるに従い非石綿ガスケットを用いた締結体の密封性能は向上することおよび応力緩和率も示した。さらに非石綿ガスケットの長期温度環境下でも密封性能が維持されることを示した。
- 6) 以上得られた結果に基づき、漏えい量基準の管フランジ締結体の設計指針を提案した。
最後に、今後さらに検討が必要な研究課題についても述べている。