

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06134

研究課題名(和文) 高温下で複合荷重を受けるガスケット付きフランジ締結体の漏えい防止対策の確立

研究課題名(英文) Establishment of method to suppress leakage from gasketed bolted flange connections subjected to combined load under elevated temperature

研究代表者

小林 隆志 (KOBAYASHI, Takashi)

沼津工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：10161994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温下でのガスケット特性試験、複合荷重を受けるフランジ締結体の漏えい特性試験、フランジ締結体の漏えい開始時のガスケット面圧に関する有限要素解析を行い、温度とともに、配管外力を考慮したフランジ締結体の管理方法について検討した。そして、大規模な漏えいが発生する際のガスケット面圧の条件が明らかにした。フランジ締結体の組立て時に初期の密封性能が得られる十分高いボルト締付け力を与えれば、その後配管に塑性変形が生じるような複合荷重が作用しても、大規模な漏えいが発生する可能性は低いことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化学プラントなど配管系のガスケット付きフランジ締結体は、温度変化による配管の熱膨張・収縮による配管軸方向の荷重に加えて、自重や地震などによる曲げ荷重も考慮する必要がある。本研究により、フランジ締結体の組立て時に初期の密封性能が得られる十分高いボルト締付け力を与えれば、その後配管に塑性変形が生じるような大きな複合荷重が作用しても、大規模な漏えいが発生する可能性は低いことが明らかになった。このことは、現状使用されているフランジ締結体の安全性を裏付ける結果であり、実用上の観点から意義は大きいといえる。

研究成果の概要(英文)：Firstly, the loading conditions that cause large leakage from gasketed flange connections when subjected to combined loads of axial load and bending moment are examined experimentally. The experimental equation that represents the sealing limits is proposed. Secondly, the minimum gasket stress to maintain the tightness of bolted flange connections under the combined loads is analyzed using the finite element method.

Summarizing the experimental and analytical results, it is found that large leakage occurs when the gasket stress at the outer circumference becomes lower than the critical gasket stress. If sufficiently high initial bolt tightening forces are given to obtain high tightness of the flanged connections, the flanged connections is resilient under combined loads that causes yield in the pipes used in the flanged connections.

研究分野：ガスケットの密封特性及びフランジ締結体の設計方法

キーワード：ガスケット フランジ締結体 漏えい 複合荷重 高温

1. 研究開始当初の背景

ガスケット付きフランジ締結体は、石油精製プラント、化学プラントの配管などを中心に多数用いられている。しかし、化学プラントのスタートアップ（運転開始）及びシャットダウン（運転停止）時に大規模な漏洩事故がしばしば発生しており、大きな人的被害及び経済的損失も発生している。世界的に広く用いられているフランジ締結体に関する ASME、JIS などの設計規格は 1920 年代のアメリカの Waters らの研究にその基礎を置くもので、長い実績はあるものの、ガスケット材質などが大きく進歩した現在では、科学的な検討の上に改善が必要である。その他、運転温度条件の影響、地震により作用する外力の影響は十分に考慮されておらず、さらなる検討が必要とされている。

2. 研究の目的

化学プラントなどに使用される配管系のガスケット付きフランジ締結体は、高い内圧と高温の温度条件下で使用される。さらに、フランジ締結体では、温度変化による配管の熱膨張・収縮による配管軸方向の荷重に加えて、自重や地震などによる曲げ荷重も考慮する必要がある。本研究では、温度とともに、配管外力を考慮したフランジ締結体の管理方法の開発により、フランジ締結体の安全性・信頼性向上に寄与することを目的として研究を実施した。主な研究項目は次の点である。

- ・高温下で使用されるふっ素樹脂(PTFE)系ガスケットの変形特性測定
- ・引張り と 曲げの複合荷重を受けるフランジ締結体の漏えい特性の測定
- ・有限要素解析によるガスケット面圧と漏えい開始との関係の解明
- ・漏えい特性に与える温度変動の影響の解明

以上の検討結果をまとめて、フランジ締結体の安全な管理方法について検討する。

3. 研究の方法

研究目的達成のため、以下の方法で研究を進める。

(1) 高温下でのガスケット特性の測定

ふっ素樹脂(PTFE)系ガスケットは 200°C を超える高温域で使用されることが多い。本研究では高温ガスケット試験装置と非接触の透過型レーザ変位計を用いて、約 200°C 程度でのガスケット特性の測定を実施する。具体的には、充てん材入り PTFE シートガスケットを中心に、ガスケットの変形特性、線膨張係数の測定を実施する。

(2) 複合荷重を受けるフランジ締結体の漏えい特性試験

材料試験機などの大がかりな設備を使用することなく、簡易な油圧シリンダを利用した負荷装置により、配管試験体に引張り と 曲げの複合荷重を作用させることができる試験装置を考案し、製作する。複合荷重作用下での試験体からの漏えい開始を、マスフローメータにより高い感度で測定する。漏えいが発生する引張り と 曲げの複合荷重の条件を検討する。

(3) 有限要素法によるガスケット面圧の解析

ガスケット付きフランジ締結体のガスケット面圧を有限要素解析 (ANSYS) により解析する。漏えいが発生する際の引張り と 曲げの複合荷重に対応するガスケット面圧を求め、実験結果との比較により、漏えいが発生するガスケット面圧の条件を明らかにする。その上で、(1) で明らかにした高温におけるガスケットの変形特性を基にして、熱的荷重が作用した際の、大規模漏洩発生 の条件を検討する。

(4) フランジ締結体の安全な管理方法の確立

以上の検討結果を基にして、高温流体を輸送する配管系のフランジ締結体に対して、地震などにより引張り と 曲げの複合荷重が作用した際に、大規模な漏えい事故を発生させないために必要な適切な初期締付け力を決定する方法を検討する。

4. 研究成果

研究の実施項目ごとの研究成果を以下に示す。

(1) 高温下でのガスケット特性の測定

図 1 はステンレス製の一對のプラテン間にガスケットを挿入し、昇温した状態で油圧シリンダによりガスケットを圧縮する試験装置である。ガスケットの圧縮量を透過型レーザ変位計により、非接触で測定する点を特徴としている。常温時の変形量に比べて、昇温時には PTFE ガスケットが軟化してプラテン間を流動することにより、変形量が増大している。このため、温度により軟化しやすい PTFE ガスケットを用いたフランジ締結体では、ボルトの締付け力の低下が問題となるので、温度上昇によるガスケットの変形を考慮したボルトの締付けが必要となることを指摘した。

(2) 複合荷重を受けるフランジ締結体の漏えい特性試験

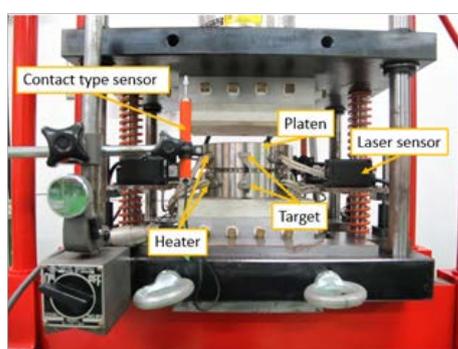
図 2 はフランジ締結体に引張り と 曲げの複合荷重を作用させるための実験装置を示す。全面座フランジ (JIS 10K 50A) に長さ 500mm の配管を溶接した試験体を用いた。配管試験体に 1 対の負荷アームを固定し、油圧シリンダにより、軸方向の引張り と 曲げ荷重を同時に作用させる。

図 3 は配管外力が作用していないフランジ締結体に対して、ボルト締付け力を変化させてり

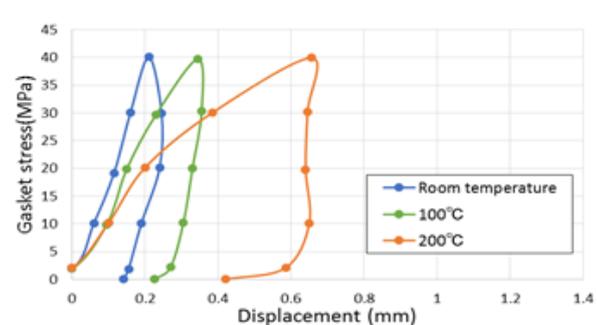
ークチェック液を吹きかけた際の様子を示す。この漏えい発生確認方法は実際に現場でも用いられている。左側の写真では明らかな漏えいが確認され、一般に許容されない漏えい量である。中央の写真はわずかながら漏えいが確認される。そこで、この結果とマスフローメータの漏えい量と比較して、大規模な漏えい発生の閾値を 1 ml/min とした。

図 4 は油圧シリンダにより配管軸方向の引張り荷重を作用させた際の、マスフローメータによる漏えい量測定結果である。荷重が増大すると、ある点から漏えい量が急増することがわかる。図 3 の結果と対比させて、1 ml/min を超えた時点で大規模な漏えいが発生したと判断した。

図 5 は引張り荷重と曲げ荷重の複合荷重を作用させた際の、密封特性線図を示す。ガスケットは広く用いられるジョイントシートガスケットである。本実験においてはフランジ締結体に与える最大の曲げモーメントとして配管が降伏する曲げモーメントを考え、最大曲げモーメントを 1600Nm とした。図中の破線は、図 2 の試験装置において実現可能な複合荷重の軌跡を示す。図中には、各ボルトの初期締付けを与えた際に、複合荷重下で、漏えいが発生した際の複合荷重（曲げモーメント及び軸方向の引張り荷重）の点をプロットしている。プロット点は原点から離れるほど密封性能が高いことを示す。ボルトの初期締付け力を大きくすることにより、大きい複合荷重に対して密封性能を確保できることがわかる。いずれのボルト締付け力においても、軸方向の引張り荷重が大きくなるほど漏えい開始時の曲げモーメントは小さくなっている。これは



(a) 試験装置



(b) 測定結果

図 1 高温ガスケット試験装置

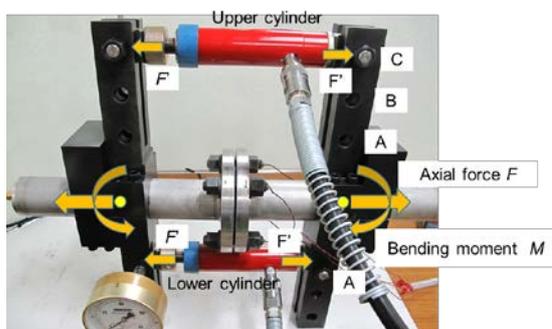


図 2 複合荷重負荷試験装置

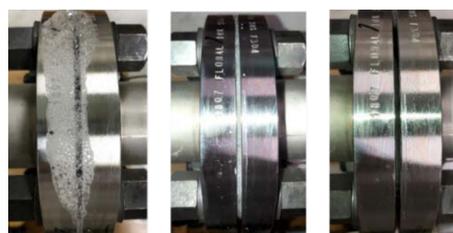


図 3 漏えいの状態

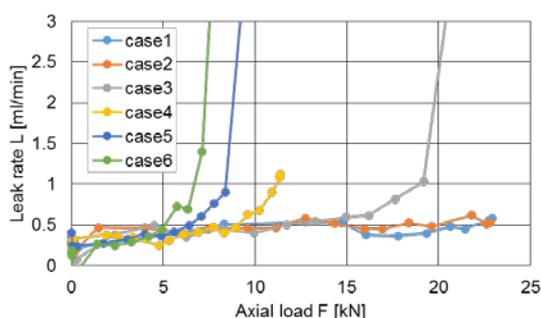


図 4 油圧シリンダによる荷重と漏えい量

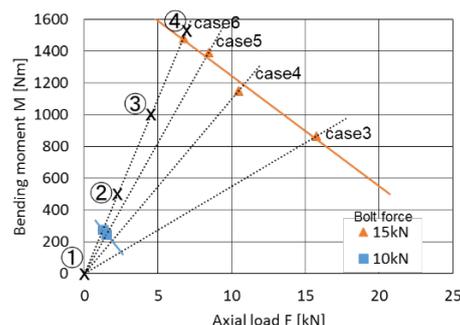


図 5 密封特性線図 (ジョイントシートガスケット)

引張り荷重により、ガスケット面圧が低下するためであると考えられる。大規模な漏えいが発生した条件では、複合荷重によりガスケット面圧が一定程度以下に低下していると考え、有限要素法によるガスケット面圧の解析を行うこととした。

(3) 有限要素法によるガスケット面圧の解析

漏えい開始時のガスケット面圧を検討するために、配管曲げ試験で使用した配管試験体の3次元モデルづくり、有限要素解析コードANSYSを用いてFEM解析を行った。図6は作成したFEMモデルを示す。対称性を考慮して、フランジ締結体の1/4をモデル化した。

図7はFEM解析によって得られたボルト初期締付け力15kNの場合のガスケット面圧である。図5の複合荷重の点①～④に対応するガスケット面圧である。複合荷重の増加に伴い、ガスケットの中心側から上側に低面圧領域が拡大する。ガスケットの内側ではガスケット面圧はほぼ失われ、外周近傍の狭い幅にガスケット面圧がわずかに残留し、この面圧によって密封性能を保っていると考えられる。この部分のガスケット面圧が失われると漏えいが発生すると考えられる。漏えい開始時のガスケット面圧については、より詳細な検討が必要であるが、ガスケット面圧が約5MPa以下となると漏えいが発生するものと考えられる。この解析結果は図5の実験結果ともかなりよく一致するものである。

(4) フランジ締結体の安全な管理方法の確立

図8は図5とは異なるPTFE系ガスケットを用いた場合の密封限界に関する実験結果を示す。ボルトの初期締付け力を大きくすることにより、大きい複合荷重に対して密封性能を確保できることがわかる。そこで、縦軸と横軸をそれぞれ、単位締付け力あたりの曲げモーメント及び軸方向の引張り荷重で表わした結果が図9である。異なる締付け力の結果が1本の直線上にプロットされていることから、密封性能はボルトの締付け力にほぼ比例しているといえる。この結果より、密封限界の点は1次関数で近似できることがわかる。そこで、式(1)に示すような密封限界条件式を提案した。配管に対する軸方向引張り力Fと曲げモーメントMが、次の関数φ<1の条件を満足する範囲内であれば、複合荷重下で漏えいは発生しないこととなる。

$$\varphi = \frac{1}{0.119} \left\{ \left(\frac{M}{F_f} \right) + 2.21 \times 10^{-2} \left(\frac{F}{F_f} \right) \right\} < 1 \quad \dots \dots (1)$$

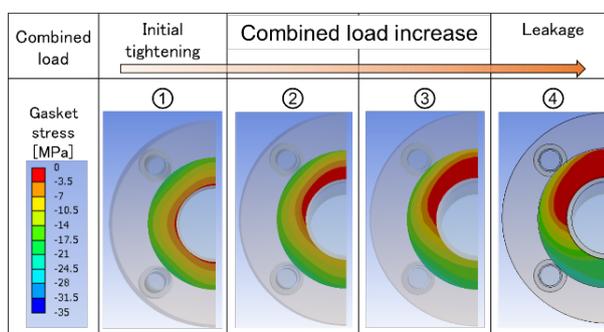
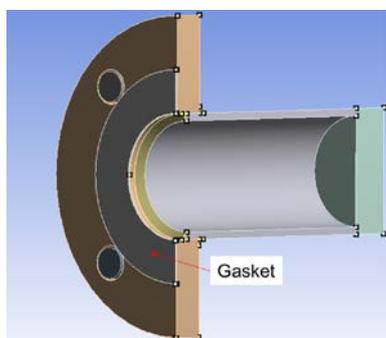


図6 有限要素解析モデル

図7 複合荷重によるガスケット試験変化

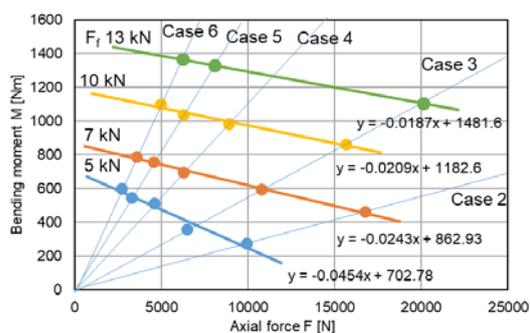


図8 密封特性線図 (PTFE系ガスケット)

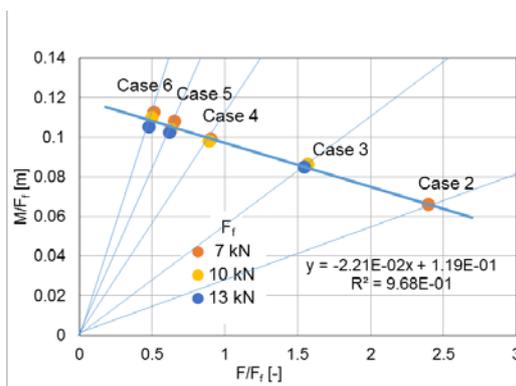


図9 ボルト締付け力で整理した密封限界

フランジ締結体に作用する外荷重である曲げモーメント M 及び軸方向引張り力 F が決まれば、大規模漏えいを発生させないために必要なボルト締付け力 F_f を式(1)により決定できる。フランジ締結体に大規模な漏えいを発生させないためのボルト締付け力を決定するために有用な式であると考えられる。

本実験においてはフランジ締結体に与える最大の曲げモーメントとして、配管の降伏する曲げモーメントに近い値を作用させたことを考えると、フランジ締結体は曲げモーメントに対して高い抵抗力があるともいえる。通常、ガスケットメーカーの推奨するガスケット面圧から計算されるボルト締付け力で初期締結すれば、配管に塑性変形が生じるような極限状態にある複合荷重下であっても、大規模な漏えいが発生する可能性は低いといえる。

今回の研究目的に挙げた、高温下で複合荷重が作用する場合の特性に関しては、適切な昇温方法が見いだせず検討できなかった。この点に関しては、今後さらに検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi KOBAYASHI
2. 発表標題 Consideration on the Minimum Gasket Stress to Maintain Sealability of Bolted Flanged Connections Subjected to External Bending Moment
3. 学会等名 American Society of Mechanical Engineers, PVP 2019 Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林隆志, 野木遼亮
2. 発表標題 曲げモーメントを受けるフランジ締結体のガスケット応力解析
3. 学会等名 日本機械学会 山梨講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林隆志, 野木遼亮, 渡瀬慎之輔
2. 発表標題 曲げと引張りの複合荷重を受けるフランジ締結体の密封特性の簡易推定法
3. 学会等名 日本機械学会 山梨講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林隆志, 佐野笙太郎, 野木遼亮
2. 発表標題 曲げモーメントを受けるフランジ締結体の密封特性（ボルト位置の影響）
3. 学会等名 日本機械学会 山梨講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林隆志, 野木遼亮
2. 発表標題 マスフローメータを用いた配管フランジ締結体の漏えい開始の測定
3. 学会等名 日本機械学会 山梨講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考