

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

Finite Element Simulations of Pipe Flange Connections
Taking into Account Visco-Elastic-Plastic Properties of Gasket

正 高木 知弘 (神戸大) 学 名護 典寛 (神戸大)
正 佐藤 広嗣 (日本バルカー工業)

Tomohiro TAKAKI, Faculty of Maritime Sciences, Kobe University, 5-5-1, Fukaeminami, Higashinada, Kobe
Norihito NAGO, Graduate School of Science and Technology, Kobe University
Kouji SATO, Nippon Valqua Industries, LTD.

Key Words : Gasket, Visco-Elastic-Plastic Property, Pipe flange connection, FEM

1. 緒言

これまで長い間、高い信頼性の下に使用されてきた石綿系ガスケットの使用禁止により、代替非石綿ガスケットの開発が急務となっている。ここで重要になるのは、新しく開発されるガスケットの短期間での寿命予測手法の構築である。しかしながら、ガスケットの使用環境は様々であるため、実験的な手法だけでは困難であり、体系的な評価を可能とする数値シミュレーションによる評価が望まれる。さらに、寿命評価にはガスケットの粘性特性を精度良く評価することが必要となる。

本研究では、室温環境下におけるガスケットの粘弾塑性特性を考慮し、管フランジ締結体の時間に依存した力学的特性の評価を可能とする、実用性の高い簡便な有限要素モデルを構築する。また、本手法を用いることで、ボルト軸力およびガスケット接触応力の緩和特性に対する管フランジの呼び径の影響を検討する。

2. 有限要素モデル⁽¹⁾

工業的な実用性の観点から、ガスケットの粘弾塑性特性を考慮することの可能な簡便な有限要素モデルを構築し、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する。

図1は今回用いた有限要素モデルと境界条件を示している。管フランジ、ボルト、ガスケットは接触要素を考慮しない一体軸対称モデルとしている。管フランジとボルトはフランジ表面、管フランジとガスケットはガスケット座面におけるで示す節点を共有させている。いずれもアイソパラメトリック4節点要素を用いている。管フランジとボルトは線形弾性体と仮定し、ボルトは軸方向の剛性をあわせるようにヤング率を変えている。ガスケットはポアソン比を零とすることで、軸方向の剛性のみを考慮している。フランジ呼び径が大きくなると、ガスケット座面内径側で離隔が生じるため、ガスケット要素の積分点における軸方

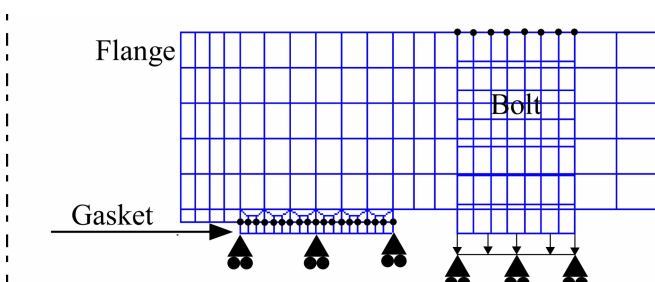


Fig. 1 Finite element mesh and boundary conditions

向応力が零になった時点でガスケットのヤング率を零とすることで、接触問題を考慮している。この場合、再接触も再現可能である。

ここで、ボルトの締付けと使用時(締付け後、放置した状態)を想定した2段階のシミュレーションを行う。ボルト締付け時、ボルト対称面に段階的に強制変位増分を与えることで、ボルト軸力を発生させる。ガスケットのヤング率は、ガスケットの圧縮試験より得られる応力 ひずみ関係より決定する(前の発表原稿の式(1)と式(2))。なお、締付け時においても除荷が生じることがあるので、その際は除荷曲線の応力 ひずみ関係を用いることで、ヤング率を決定する。所定のボルト軸力に達したところで、ボルト対称面の節点の変位を拘束し、使用時の評価を行う。時間とともに生じるガスケットのひずみ増分(前の発表原稿の式(5))は、初期ひずみ増分として導入し、等価な節点力増分に換算する。その際、ガスケットのヤング率は、応力 ひずみ関係から決定する。時間増分は十分に小さな値を用いる。

本有限要素モデルでは、接触面を考慮しないため有限要素メッシュおよび入力データの作成が極めて容易である。また、ガスケットのポアソン比を零とすることで、ガスケット厚さ方向のみ剛性を考慮し、圧縮試験のデータを直接利用することができ、極めて簡便なモデルであるといえる。

3. 実験結果との比較

構築した有限要素モデルの妥当性を検討するため、実機による実験を行い、シミュレーション結果との比較を行う。対象とするのは、JPI 150 lb 4 inch 一体型管フランジ⁽²⁾であり、厚さ 3mm のジョイントシートガスケット(日本バル

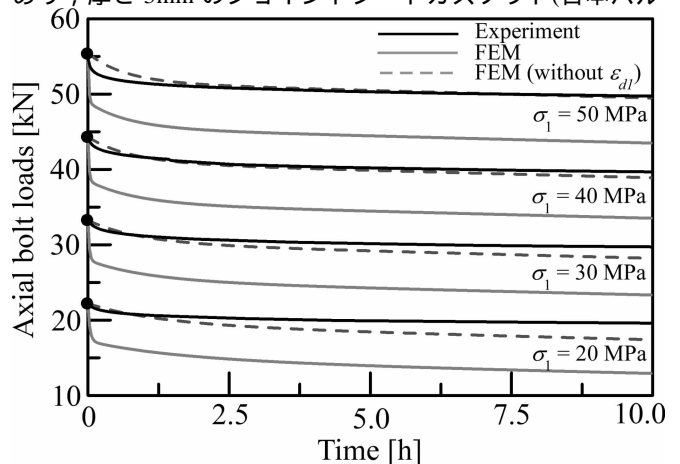


Fig. 2 Time variations of axial bolt load

カー工業(株)製 No. 6500)を挟み、M16の8本のボルトで締付けを行っている。初期ボルト軸力は初期ガスケット接触応力が20, 30, 40, 50 MPaとなるように設定している。

図2はボルト軸力の時間変化をシミュレーション結果と併に示している。実験結果(黒実線)をみると、初期締付け後約1時間間の軸力低下量が大きく、その後はほぼ直線的に緩やかに減少していることが分かる。有限要素シミュレーションの結果(グレー実線)は、初期の瞬間的な軸力低下が実験値よりも顕著に現れている。実験におけるボルトの締付け作業はできる限り速く行っているが(約3分間)、その間にもガスケット接触応力の緩和が生じている。シミュレーションは瞬間的なボルト締付けを想定して行っているため、このような結果の違いが現れたと考えられる。そこで、図3に示すように、ガスケットクリープ曲線に現れる瞬間的な遅延弾性ひずみ ε_{d1} を考慮せずにシミュレーションを試みる。その結果をグレーの破線で図2に示している。この結果は実験値と比較的良く一致しており、実験において瞬時に生じる遅延弾性ひずみ ε_{d1} がボルト締付け時に緩和された可能性が高いことを示唆している。

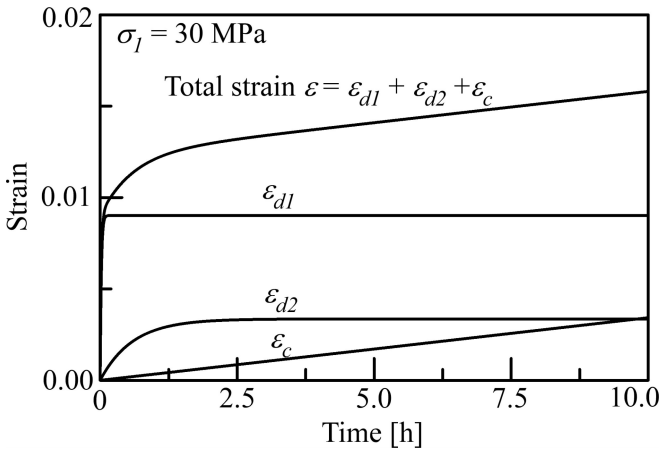


Fig. 3 Creep curve and components for $\sigma_1 = 30$ MPa

4. フランジ呼び径の影響

管フランジの呼び径が異なると、ガスケット接触応力の半径方向分布傾向が大きく変化することが知られている⁽³⁾。本章では、ガスケット接触応力分布の違いが、ボルト軸力とガスケット接触応力の時間変化に及ぼす影響を有限要素シミュレーションにより考察する。

対象とする管フランジはJPI class 150 lb 4, 8, 12, 16 inchで、図1に示すようにフランジ部のみを解析対象としている。初期ボルト締付け力は、ガスケット接触応力が30 MPaとなるように設定している。

図4は、ボルト軸力 F_b の時間変化を初期ボルト締付け力 F_t で除して無次元化して示している。いずれも締付け直後に軸力の低下が大きく、その後緩やかに減少していることが分かる。ボルト軸力の低下量は、締付け直後およびその後の緩やかな変化とともに、管フランジの呼び径が小さいほど大きくなっていることがわかる。

図5は、ボルト締付け時、1 h 経過時、10 h 経過時のガスケット接触応力の半径方向分布を示している。初期締付け時、いずれもガスケット外径側で接触応力が高くなっており、この傾向は管フランジの呼び径が大きいほど顕著である。12 inch と 16 inch のフランジでは、ガスケット内径側で接触応力が零となり、離隔が生じていることが分かる。時間が経過すると、ガスケット外径側の接触応力の高い領域の値が大きく減少しており、内径側では逆に接触応力が高くなっていることが分かる。12 inch と 16 inch のフラン

ジでは、初期締付け時に離隔していた部分が再度接触していることが確認できる。また、1 h と 10 h の結果を比較すると、特に呼び径の大きな管フランジにおいて大きな違いは見られないことが分かる。

図4のボルト軸力変化のフランジ呼び径依存性は、図5で示すガスケット接触応力分布の違いが大きく寄与していることが考えられる。つまり、フランジ呼び径が小さいとガスケット接触応力が比較的均一であるため、全体的な応力緩和が生じるが、呼び径が大きいとガスケット外径部の高い応力値が局部的に緩和し、そこで支持できなくなった荷重がガスケット内径側に再負荷する。このため、ガスケット全体の緩和と局部的な緩和という違いが生じ、ボルト軸力変化がフランジ呼び径によって異なることが示唆される。本結果は実験による確認が必要であるが、管フランジの力学的特性として非常に興味深い結果であると言える。

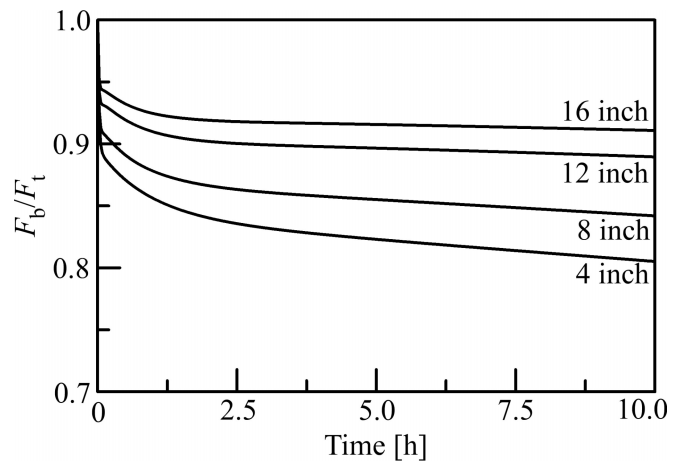


Fig. 4 Effects of flange nominal diameter on bolt load variation

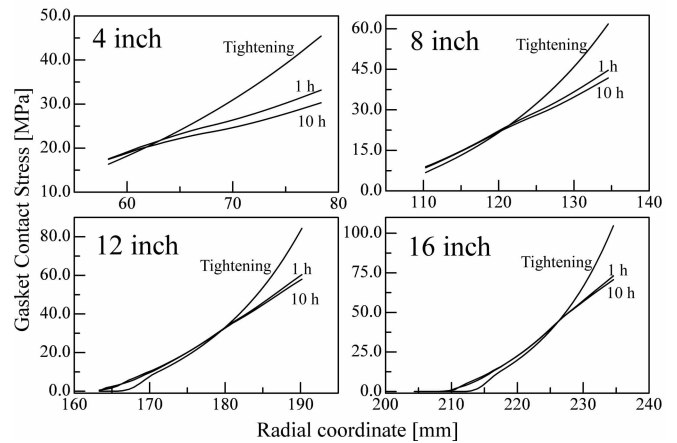


Fig. 5 Effects of flange nominal diameter on gasket contact stress

5. 結言

ガスケットの粘弾塑性特性を考慮することの可能な簡便な有限要素モデルを構築し、実験結果と比較することにより、本手法の妥当性を検討した。また、呼び径の異なる管フランジ締結体を解析対象とし、ボルト軸力とガスケット接触応力の時間変化に対する呼び径の影響を考察した。

6. 参考文献

- (1)高木・他3名, 機論(A), (2006), 投稿中.
- (2)高木・他3名, 機論(A), 71(2005), 74.
- (3)永田・他2名, 機論(A), 70(2005), 1595.