数値解析による低温流体用管フランジのシール性能の評価*

福岡 俊道** 野村 昌孝** 中田 安美***

Evaluation of Sealing Performance of Pipe Flange Connections for Low Temperature Fluids by Numerical Analysis

By Toshimichi FUKUOKA, Masataka NOMURA and Ami NAKADA

Recently, low temperature fluids are used more commonly, and consequently, leakage related accidents become crucial issues. These accidents are mainly due to significant shrinkage of pipe flange connection elements. It has been reported that leakage accidents often occur when low temperature fluids start to flow, or when the flow rate starts to decrease. This is because under these circumstances, the clamping force in bolts connecting a pair of pipe flanges is presumed to decrease significantly. In the previous paper, a numerical approach based on Finite Element method (FEM) was proposed to simulate a simpler flow condition than those in actual pipelines. In this paper, the numerical approach is applied to more realistic conditions by enabling the surface of low temperature fluids to move up and down. When using liquid nitrogen, the bolt force was reduced to less than 40% of its initial value shortly after the fluid started to flow. When applying the numerical method to an LNG pipeline, it was found that the bolt force momentarily showed a significant reduction as was the case with liquid nitrogen.

1. はじめに

近年液化天然ガス (LNG) や液体窒素 (LN_2) に代表される低温流体の使用量が増加している。各流体の温度はマイナス 163°C とマイナス 196°C である。LNG については、輸送に使用される専用のタンカーや LNG を扱う陸上のエネルギープラントの配管において、管フランジ締結部からの漏洩が問題となることがある。その主な原因は、LNG の流動によって締結部を構成する各要素が収縮するためである。低温流体の漏洩は、高温流体の漏洩と同様、重大な事故につながる可能性がある^{1),2),3)}。以上の点から、低温流体の漏洩が発生するメカニズムを明らかにすることは、配管の安全管理の観点から極めて重要と考えられる。

前報⁴⁾では、管フランジのシール性能を支配する締め付けボルトの温度と軸力変化について、実験用に製作した底蓋付きの管フランジに液体窒素を連続的に注ぐ実験により、基本的な挙動を明らかにした。また、ボルトの軸部温度と軸力の時間変化を三次元有限要素解析によりシミュレーションする手法を提案し、実用的な範囲で実験値と一致することを確認した。一方、

実際の配管における漏洩のトラブルは、低温流体の移送開始から比較的短時間の間と終了時の液面高さが変化するときが発生しやすいといわれている。そこで本研究では、前報⁴⁾で提案した数値解析手法を用いて、配管内の液面高さが変化する過程をシミュレーションすることにより、漏洩が発生する可能性が高い流動条件と時間を推定することを目的としている。

2. ボルト・ナットの等価モデルによる 解析モデルの効率化

前報⁴⁾では、底蓋付きの管フランジに液体窒素を注ぐ過程を対象として、ボルトの軸部温度と軸力の時間変化を求めた。図 1(a)に解析に使用した有限要素モデルを示す。対称性を考慮して締結部の 1/8 をモデル化している。また、ボルト・ナットのはめあいねじ部については、ねじ山の形状を軸対称と仮定してモデル化している。

本研究では、水平に配置された配管を対象として、低温流体の移送開始から移送終了までの過程を解析する。すなわち、流量が少ない状態から管断面全体を流体が流れる定常状態、およびその状態から徐々に液面が低下していく過程を三次元有限要素解析により評価する。そのためには管フランジ締結部の 1/2 の領域をモデル化する必要がある、図 1(a)のようにねじ部の形

*原稿受付 平成 31 年 1 月 7 日。

**正会員 神戸大学 (神戸市東灘区深江南町 5-1-1)。

*** ダイキン工業 (株)

Fig.1 Finite element model of pipe flange connection using equivalent bolt-nut model

Fig.2 Examination of validity of the proposed FE model

状を考慮すると、解析モデルの自由度が非常に大きくなる。そこで、ボルト・ナットのはめあいねじ部を円柱形状に置き換えた「軸方向剛性が等価なモデル」を導入する⁵⁾。等価モデルの有効性については、管フランジを締結する多数のボルトを逐次締め付けていく過程で発生する軸力変化、すなわち弾性相互作用の解析において有効であることを確認している。図 1(b)は、

Fig.3 Finite element model for pipe flange connection installed horizontally

上記の等価モデルを使用した管フランジ締結部の 1/8 モデルである。この解析モデルの有効性を検証するために、前報⁴⁾と同じ解析条件の図 2(a)に示した底蓋付き管フランジに液体窒素を連続的に注ぐ場合を対象として、ボルト軸力の時間変化を求めた。図 2(b)に解析結果を示す。縦軸は軸応力残留率、横軸は液体窒素の流動開始からの経過時間である。ここで軸応力残留率は、ある時間におけるボルト軸応力を初期軸応力で除した値である。図 2(b)より、等価モデルを用いた解析結果は、前報⁴⁾の実験結果と実用的な範囲で一致している。また、はめあいねじ部の形状をモデル化した解析結果とも数値誤差の範囲で一致していることから、等価モデルは有効であると判断できる。

3. 液面上昇過程と下降過程の評価を目的とした有限要素モデル

3.1 解析モデルと境界条件

配管が水平に配置された場合を対象とするため、図 3(a)に示すように管フランジ締結部の 1/2 の領域をモデル化した。管フランジの寸法は、前報⁴⁾と同じく JIS 規格の呼び圧力 20K、呼び径 65 に対応しており、8 組の M16 のボルト・ナットによって締結されている。図 3(b)は管フランジの断面を示している。軸力変化の評価対象となる 4 本のボルトは、配管の底部から順に bolt 1, bolt 2, bolt 3, bolt 4 とナンバリングする。2 枚のフランジの間には低温用のフッ素樹脂ガスケットが挿入されている。ガスケットの外径は 116mm、内径は 65mm、厚さは 3mm である。ガスケットの特徴的な応力-ひずみ関係は、金属材料の弾塑性解析に使用される手法を応用して扱う。詳細については前報⁴⁾で紹介しているので省略する。

Table 1 Material and thermal properties of finite element model

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of linear expansion (1/K)	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kgK)	Density (kg/m ³)
SUS304	200	0.3	17.3×10^{-6}	16	499	7920
gasket		0.45	45.2×10^{-6}	25	1000	2330

Fig.4 Variations of temperatures of bolt cylindrical surface during liquid surface ascending process

管フランジとボルト・ナットの材質はいずれも SUS304 であり、応力解析では線形弾性体と仮定し、ヤング率とポアソン比はそれぞれ 200GPa と 0.3、初期ボルト軸応力は 100MPa とする。接触面の摩擦係数は 0.15、雰囲気温度と締結部の初期温度は 20°C とし、管フランジの表面はすべて熱伝達境界と仮定する。表面熱伝達率の大きさについて、低温流体と接触する配管の内表面部分は、前報⁴⁾と同じく 8000W/m²K、液面より上の空気と接触する部分および管フランジの外表面は 10W/m²K とする。低温流体の温度は液体窒素を想定してマイナス 196°C とする。表 1 に解析に使用した材料定数と熱定数をまとめている。

3.2 解析条件

管内の流動状態について、液面上昇時は液体窒素の流動開始から管断面全体に流体が満たされるまでに要した時間によって変化させる。設定した所要時間は 20 秒、80 秒、320 秒、1280 秒の 4 通りである。この間、管断面の流量は線形で増加するため、液面上昇速度は管断面の中央付近で小さくなる。液体窒素の移送が終了する液面下降時についても、管断面全体を流れる状態から流体がなくなるまでの時間を、液面上昇時と同じく 4 通りに変化させる。ここで、液面の下降開始は液体窒素の流動開始から 36000 秒後とした。以上の

Fig.5 Variations of bolt stress retained rate during liquid surface ascending process

過程を温度場と応力場が連成する非定常熱応力の問題として解析する。

4. 解析結果

4.1 液面上昇時のボルト軸部温度と軸応力残留率

図 3(b) に示した 4 本のボルトについて、図 4 に各ボルトの軸部温度の時間変化を示す。ここで軸部温度とは、ボルト表面とボルトが配置されているピッチ円が交わる 2 点のうち、管の底部寄りの表面温度である。パラメータは管断面全体に流体が満たされるまでに要した時間である。要した時間が短いほど、すなわち液面上昇速度が速いほど軸部温度は短時間で低下して

Fig.6 Temperature distributions around pipe flange connection

Fig.7 Mises stress distributions around pipe flange connection

いるが、全面が液体窒素で満たされた後の定常状態の温度は、いずれの場合も約マイナス 160°C である。図 5(a)は軸応力残留率の時間変化を示している。定常状態における軸応力残留率には液面上昇速度の影響が見られる。また 4 本のボルト間でも差があるが、およそ 60%から 70%を少し超える程度の値である。注目すべきは液体窒素が流動を開始した直後の挙動であり、定常状態よりも大きく軸応力残留率が低下している。図 5(b)はその部分を拡大したものである。液面上昇速度の影響が大きく現れており、4 本のボルト間でかなり挙動が異なることが分かる。その中で、320 秒で流体が管上面に達する場合の bolt 1 では、流動開始から約 250 秒後にボルト軸応力が初期値の 37%程度まで低下している。この軸応力残留率は定常状態に比べて

Fig.8 Variations of temperatures of bolt cylindrical surface during whole transfer process

かなり低い。また、液面上昇速度が異なる場合でも bolt 1 の軸応力残留率が低くなるケースが多い。以上の結果より、もし漏洩が発生する場合は、低温流体の流動開始から比較的短時間の間に、配管下部から発生する可能性が高いと推察される。

図 6 と図 7 は、320 秒で流体が管上面に達する場合について、軸応力残留率をもっとも低くなる条件に近い液体窒素の流動開始後 320 秒における 4 本のボルトの温度分布とミーゼス応力分布を示している。温度分布については、配管の底部に近い bolt 1, bolt 2 と上部に近い bolt 3, bolt 4 の間で分布パターンが異なっていることが分かる。それに対応して、ミーゼス応力の分布についても bolt 1 の周辺で応力値の変化が大きくなっている。

4.2 液面下降時のボルト軸部温度と軸応力残留率

図 8 は、液体窒素の流動開始から移送が完了するまでの全過程におけるボルト軸部温度の時間変化を示している。移送を開始してやがて管断面全体を流れる定常状態となり、36000 秒の時点から液面の下降が始まり、管内に液体窒素がなくなって締結部の温度が常温に戻っている。したがって、定常状態になるまでの結果は図 4 と同じである。36000 秒以降の挙動に着目すると、液面上昇時と同じく、液体窒素がなくなるまでの時間である液面下降速度の影響とボルト間の差は小さいといえる。図 9(a)に軸応力残留率の解析結果を示す。なお、図では 10000 秒以降の結果を示している。液面が下降し始めると一時的に軸力が低下している。図 9(b)は、その部分を拡大したものである。例えば 1280 秒で管内の液体窒素がなくなる場合、bolt 1 では軸応力残留率は約 60%まで低下している。この値は液

Fig.9 Variations of bolt stress retained rate during liquid surface descending process

面上昇時の37%に比べるとかなり高いが、実際の管フランジではすでに低温負荷を受けた状態から温度が上昇するために、ガスケットの性状変化など数値解析では予測できない現象が生じている可能性がある。その点を考慮すると、図9に示した結果は、低温流体の液面下降開始からしばらくの間、締結部のシール状態に注意しなければならないことを示唆している。

4.3 考察

本節では、軸力の低下が顕著な液面上昇時の温度分布と応力分布について考察する。液体窒素の流動が開始して36000秒後の定常状態では、ボルト軸部温度は約マイナス160℃、配管の内表面はほぼ液体窒素の温度に等しいマイナス195.6℃となっている。応力については、定常状態における最大応力はbolt1で発生し

Table 2 Thermal properties of liquid methane

Temperature (K)	Density (kg/m ³)	Specific heat at constant pressure (J/kgK)	Dynamic viscosity (μPa·s)	Thermal conductivity (W/mK)	Prandtl number
110	424.8	3469	186	186.1	2.255

Fig.10 Variations of temperatures of bolt cylindrical surface during LNG surface ascending process

ており、管断面全体に流体が満たされるまでに要した時間が20秒、80秒、320秒、1280秒の場合、それぞれ342MPa、351MPa、364MPa、373MPaであり、所要時間が長くなるとわずかに増加している。また、定常状態に達するまでの全過程を対象とすると、最大応力はいずれも配管上部に近いbolt4で発生している。具体的な値は、管断面全体に流体が満たされるまでに要した時間が20秒、80秒、320秒、1280秒の場合について、それぞれ流動開始13秒後に576MPa、40秒後に607MPa、96秒後に625MPa、192秒後に619MPaである。以上のように、最大応力の発生箇所と発生時間は複雑な挙動を示しているが、管フランジのシール性能を支配するボルト軸力については、図5に示したように配管の底部に近いbolt1がもっとも低下しやすいといえる。

5. LNGが流動する管フランジ締結部の力学挙動

本章では、内部流体がLNGの場合について、ボルト軸部温度と軸応力残留率の時間変化を求める。LNGの成分割合は産地によって異なるが、主成分はメタンであることから⁶⁾、熱物性値としては表2に示した液体メタンの値を用いる⁷⁾。管内面の表面熱伝達率につ

Fig.11 Variations of bolt stress retained rate during LNG surface ascending process

いては、円管内強制対流の発達した乱流域に対する推定式を用いて計算する⁸⁾。前報⁴⁾では管内流速が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0m/s の場合の表面熱伝達率を求め、その値を参考にして 1000, 2000, 3000 W/m²K と変化させた。本研究では、表面熱伝達率の値を 1000 W/m²K と仮定し、LNG の温度をマイナス 163°C とした。その他の解析条件は液体窒素の場合と同じとする。図 10 は、液面上昇時のボルト軸部温度の時間変化を示している。LNG の流動開始から 4000 秒を超えると、軸部温度は約マイナス 135°C の一定値となっている。軸応力残留率については、図 11(a)に示したように、液面上昇速度の影響とボルト間の差は見られるが、定常温度状態では 72%~76%程度まで低下している。また流体が液体窒素の場合と同様、流動開始直後は一時的に

軸応力残留率が 66%程度まで低下している。図 11(b)はその部分を拡大した図である。管断面全体に流体が満たされるまで要した時間が 320 秒と 1280 秒の場合に低い値を示し、いずれも bolt 1 の軸応力残留率がもっとも低くなっている。この結果は定性的に液体窒素の場合と同様である。それに比べて軸応力残留率が高くなっている原因は、流体温度と表面熱伝達率の違いと考えられる。また、図には示していないが、LNG の移送が完了する液面が下降する過程を解析したところ、この場合も液体窒素の場合と同様の傾向を示した。軸応力残留率がもっとも低くなったのは、1280 秒の場合の bolt 1 で約 72%であった。

以上の結果より、流体が LNG の場合についても、漏洩が発生する可能性が高いのは流動開始後の比較的短い時間の間であり、それに続いて移送が完了する前の液面下降開始時である。本研究における解析ではさまざまな仮定をおいている。したがって、実際の管フランジ締結部の軸応力残留率はさらに低くなる可能性があるので、上記のタイミングにおけるシール状態にはとくに注意を払う必要がある。

6. 結 言

低温流体が流れる配管における漏洩事故防止を目的として、シール性能に対する支配的な因子である締め付けボルトの軸力変化を中心に、三次元有限要素法により水平に配置された管フランジ締結部の熱・力学挙動を解析した結果、以下の結論を得た。

(1) 管フランジを締結するボルトの軸力は、低温流体の流動開始後の液面上昇時にもっとも低くなる。また、移送が完了する前の液面下降時にも、管断面全体を流れている定常状態に比べて軸力が低下するので、締結部のシール状態に注意する必要がある。

(2) ある時間におけるボルト軸応力を初期軸応力で除した値として定義した軸応力残留率は、流体の種類、流速、液面の上昇あるいは下降速度によって変わってくるが、配管の底部に一番近いボルトの軸力がもっとも低下する傾向がある。

(3) 本研究で設定した解析条件では、低温流体が液体窒素の場合、軸応力残留率は液面上昇時には約 37%まで低下した。LNG が流れる配管では、表面熱伝達率の値を液体窒素の場合に比べて小さく設定したが、約 66%まで低下した。これに対して、液面下降時の軸応力残留率はそれよりも高く、それぞれ約 60%と 72%であった。

(4) 軸応力残留率の値から判断すると、液面上昇時がもっとも危険と考えられるが、ガasketの非線形・ヒステリシス特性を考慮すると、管フランジ締結

部周辺の温度場と応力場が定常状態から再び変化する液面下降時のシール状態についても注意を払う必要がある。

管フランジからの内部流体の漏洩は、ガスケット面圧がある値以上であれば防ぐことができるといわれている。仮にあるボルトの軸力が低下しても、隣接するボルトの軸力の作用により、ガスケット面圧が安全な範囲にとどまるケースも多い。一方、本研究では考慮していない管フランジ締結用ボルトの初期軸力のばらつき、あるいは配管のミスアライメントの影響によって、本研究で得られた結果よりさらに軸応力残留率が低下する可能性がある。以上の点から、実際の配管における低温流体の漏洩は、上述の複数の因子が同時に影響したときに発生する可能性が高いと推察される。

References

- 1) T. Fukuoka, M. Nomura and T. Nishikawa, Transactions of JSME Series C, 75-759 (2009), 3069-3075.
- 2) Nechache, A. and Bouzid, A.H., ASME PVP Conference (Cleveland), Vol.457, (2003), 139-148.
- 3) Sawa, T. and Maezaki, W., ASME PVP Conference (San Diego), Vol.478, (2004), 61-68.
- 4) T. Fukuoka and Y. Yao, J. JIME, 50-5 (2015), 671-677.
- 5) T. Fukuoka and T. Takaki, Transactions of JSME Series A, 64-625 (1998), 2402-2407.
- 6) Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, Handbook of Superconductivity and Cryogenics, (1993), 13-18, Ohmsha Ltd.
- 7) Japan Society of Mechanical Engineers, JSME Data Book: Heat Transfer 5th Ed., (2009), Maruzen, 281-290.
- 8) K. Katayama, M. Iwai, H. Maki and A. Saito, Exercises of Heat Transfer Engineering, Jitugyotosho Ltd., 79-82.