

メタル中空Oリングの基礎密封性能評価

1. はじめに

メタル中空Oリング(以下、Oリング)は高圧配管用のフランジ接続部に多く使用され、その変形特性についてのいくつかの研究は行われてきた¹⁾²⁾。しかし実用上重要な密封性能は十分には明らかにされていない。そのため、目標密封基準に対しての指標がなく、設計段階における各種の設計項目は経験的に決定されている。一般のリング状のガスケットでは有効締付圧と基本漏れ量の関係が評価出来る規格³⁾が定められているが、Oリングでは受圧面積の算出が困難であり、簡易的に接触円周長より算出した線圧(単位長さあたりの荷重)を用いている。しかし線圧と密封性能との間に相関性はなく評価指標として実用上有用ではない。このため密封性能評価のためには初期ボルト締付け時のOリングの接触応力状態及び内圧作用時の接触応力と漏れ量の関係を把握する必要がある。

そこで本研究では圧縮荷重を受けるメタル中空Oリングの密封性能を明らかにすることを目的とし、プラテン試験における圧縮時のOリング単体での漏れ量をヘリウムリークディテクターによって測定する。一方で有限要素法解析によって上記プラテン試験での圧縮荷重に対するガスケット接触応力及び変形状態を調べ、Oリングの管径及び管厚がOリングの接触応力と漏れ量との関係に及ぼす影響を検討し、今後の許容漏れ量を満足する締結体設計法に必要な資料を提供することを目指す。

2. 実験方法

Figure1は本研究で用いたプラテン試験装置を示す。材料試験機(島津製作所製 AUTO GRAPH 500KND)、試験体のメタル中空Oリングを挟み込むプラテン(SUS304製、φ150mm×H25mm)、ヘリウムガスボンベ、圧力計、漏れ量計測装置及び変位計測機から構成される。漏れ量計測装置はヘリウムリークディテクター(ULVAC製)を用いており、

漏れ量はおよそ $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を検知出来る。OリングはNo.3640の銀メッキを施したSUS321材とし、管径×管厚がφ3.2×t0.8、φ3.2×t0.5、φ3.2×t0.35、φ3.2×t0.25、φ2.4×t0.5の5種類である。所定の圧縮荷重を負荷した後にヘリウムガスを散布し、漏れ量及びOリング圧縮量を計測する。

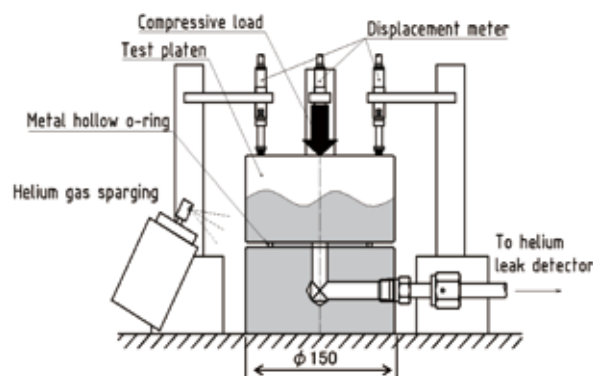


Figure1 Experimental equipment for platen tests

3. 有限要素法解析

2.で述べた実験に対応する有限要素解析を用いた非線形構造解析を行う。有限要素解析には汎用コードABAQUSを用いる。Figure2は有限要素解析で用いたメタル中空Oリング付きプラテン試験装置の解析モデルであり、接触条件及び境界条件を示す。軸対称性を考慮しており、プラテン及びOリングともに弾塑性要素としている。要素モデルは四角形1次要素としており、メッシュ分割数はプラテン14317、Oリングは寸法ごとに異なり30954～78317であり、プラテンとOリングの接触部についてはメッシュサイズを0.01mm、その他は2mmにて分割している。また変形時の断面変化を考慮し大変形解析モードを採用している。Table1は各材料物性値を示す。なおFigure3はOリングの各部寸法名称を示す。

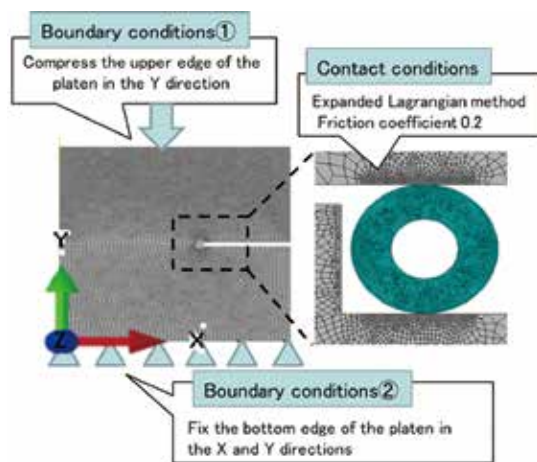


Figure2 A model for FEM simulation

Table1 Material property for each element

SUS321, SUS304				Ag plating			
Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio	Stress [MPa]	Strain [—]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio	Stress [MPa]	Strain [—]
193000	0.3	0	0	83000	0.37	0	0
		205	0.001			205	0.002
		260	0.003			260	0.004
		271	0.004			271	0.005
		278	0.005			278	0.006
		284	0.006			284	0.007
		288	0.007			288	0.008
		350	0.032			350	0.033
		410	0.055			410	0.082
		520	0.099			520	0.302

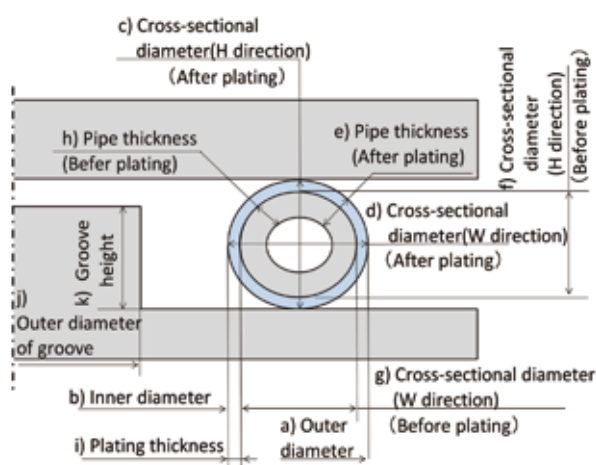


Figure3 Geometry and designations of O-ring

4. 実験結果及び解析結果

Figure4は実験結果とFEM解析結果から得られた線圧-圧縮量の関係を示す。なお線圧 η は、プラテンの圧縮荷重 P

に対して、直径 D のOリングの円周長さ πD より、 $\eta = P / (\pi D)$ で定義される。実線は実験結果、破線はFEM結果を示している。実験結果とFEM解析結果はかなりよく一致しており、FEM解析の妥当性が示されている。

Figure5は実験で得られた漏れ量と線圧の関係を示す。漏れ量はFigure5の線圧×圧縮量線図の線形から非線形への移行区間で急激に小さくなっておりシール開始点となっていることが分かる。これはOリング接触面が塑性変形しフランジ面となじむためである⁴⁾。漏れ量の優劣を比較すると管厚-管径比 k に比例し漏れ量が小さい傾向となっている。

Figure6はFEM解析結果で得られた(a)シール開始点時と(b)締切時の接触応力分布を示す。接触応力及び接触幅は管厚-管径比 k に比例し大きくなっていることが分かる。

また管厚-管径比 k が0.16以下では圧縮過程において漏れ量下限のピークを迎えた後、漏れ量が増加している。これは圧縮過程において接触部中央に座屈が生じ、接触応力の低下により漏れ量が増加するためである。具体的な例で示すため、漏れ量の小さい $\phi 3.2 \times t 0.8$ とより大きい $\phi 3.2 \times t 0.25$ においてシール開始時と締切りの接触応力分布を比較する。 $\phi 3.2 \times t 0.8$ ではシール開始時[Figure6.(a)]の接触応力が高く、締切時[Figure6.(b)]の接触幅域での接触応力の変動幅もより小さく接触幅もより広い。対して $\phi 3.2 \times t 0.25$ はシール開始時の接触応力がより低く、かつ締切りの接触幅域での接触応力の変動幅がより大きく接触幅も狭い。これより漏れ量増加の要因は圧縮過程における接触域中央部の座屈による接触応力低下と推察される。

Figure7は実験で得られた線圧と漏れ量の関係を示す。線圧と漏れ量に相関性はないことが分かる。ただしシール開始点線圧、締切時線圧で分類分けすると強い相関が認められる。

次に、線圧を接触応力で表すことで一意的な指標として表すことが出来ないかを考える。Figure8は実験及びFEM解析で得たシール開始点と締切りの漏れ量と平均接触応力の関係を示す。平均接触応力とは接触幅に分布する各接触応力の平均値を指す。漏れ量と平均接触応力には相関が認められるが、シール開始点時と締切りで分類分けが出来、一意的な指標としては有用ではない。

Figure9は実験及びFEM解析で得たシール開始点と締切りの漏れ量と最大接触応力の関係を示す。最大接触応力とは接触幅に分布する各接触応力値の最大値を指す。開始時と締切りで分類分けせずとも、漏れ量と最大接触応力には非常に強い相関が認められる。よって、漏れ量への寄与度は最大接触応力が一番大きいと考えられる。

Figure10は実験及びFEM解析で得たシール開始点と締切時の漏れ量と接触幅の関係を示す。漏れ量と接触幅に相関はなく、接触幅の閾値として0.15mm以上あれば、後は最大接触応力で漏れ量は決まると考えられる。

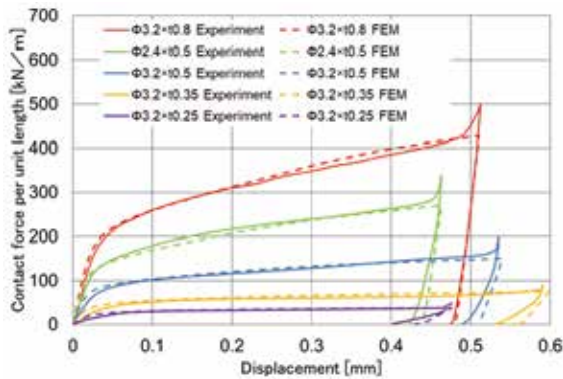


Figure4 Relationship between contact force per unit length for O-ring and displacement

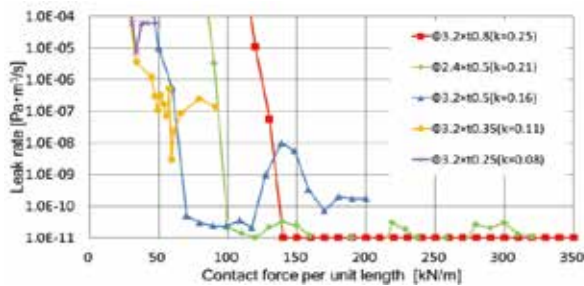


Figure5 Relationship between leak rate and contact force per unit length for O-ring

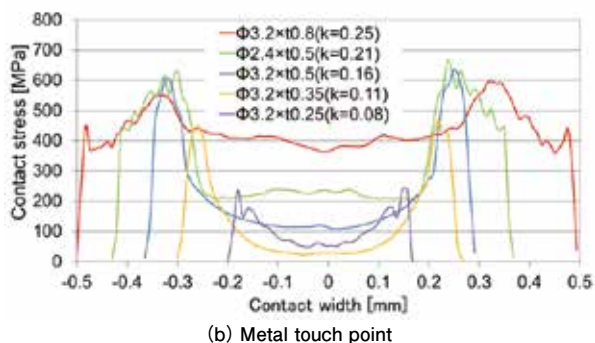
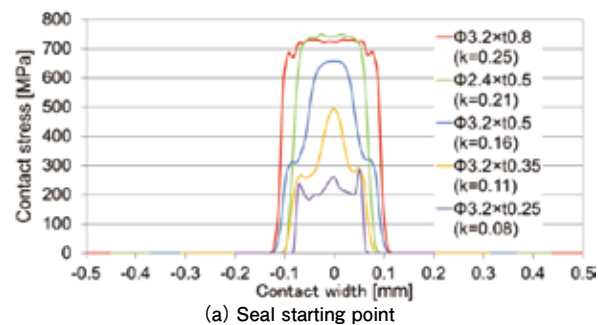


Figure6 Contact stress distributions

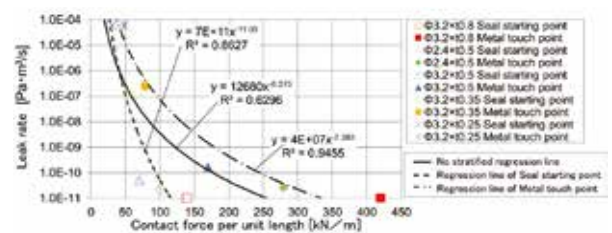


Figure7 Relationship between leak rate and contact force per unit length for O-ring

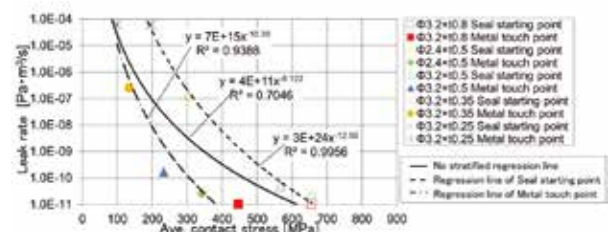


Figure8 Relationship between leak rate and Ave. contact stress

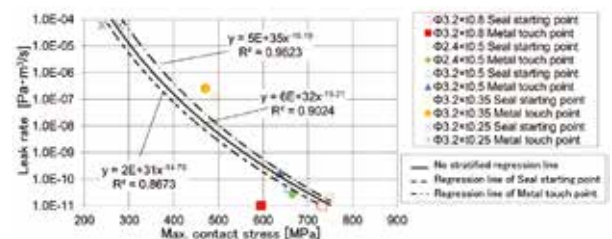


Figure9 Relationship between leak rate and max. contact stress

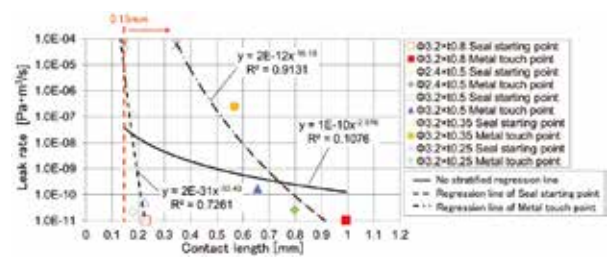


Figure10 Relationship between leak rate and contact length

5. おわりに

本研究ではメタル中空 O リングの圧縮挙動と密封性能の関係を調べ、以下の結論を得た。

- 1) 実験結果より管厚・管径の組合せによって密封性能に差異が出ることが分かった。
- 2) FEM解析結果より管厚・管径の組合せによって接触幅域の接触応力分布が異なることが示された。実験結果から密封性能が良い結果となった管厚・管径の組み合わせ

わせでは接触幅域の最大接触応力が大きく、密封性能がより悪い結果となった管厚-管径の組み合わせでは接触幅域の最大接触応力が小さいことが示された。

- 3) 密封性能がより悪い管厚-管径の組み合わせは圧縮過程において接触中央部に座屈が生じ、接触幅域の接触応力が低下し、一時的な漏れ量の増加が生じることが明らかにされた。ただし、管厚-管径比 k と座屈の明確な相関は得られておらず更なる研究が必要である。
- 4) 実験漏れ量とFEMによる最大接触応力の関係性を評価し相関性があることを示した。これを用いることで設計段階による漏れ量の予測が可能になった。

本研究を行うに当たり終始ご丁寧なご指導・助言をいただきました、株式会社帝国電機製作所 様に心より感謝の意を表します。



澤 俊行
広島大学名誉教授



山本 公平
技術総合研究所

6. 参考文献

- 1) Kobayashi, T., Deformation Characteristics of a Metal Hollow O-ring, PVP1999-382
- 2) Mingxue Shen, Deformation Characteristics and Sealing Performance of Metallic O-rings for a Reactor Pressure Vessel, Nucl. Eng. Technol. 48 (2016),
- 3) JIS B 2490 管ガスケット用ガスケットの密封特性試験方法
- 4) 近藤康治, 椿翔太, 澤俊行, 大宮祐也, “内圧を受けるリングジョイントガスケット付き管フランジ締結体の有限要素法応力解析と密封性能評価”, 機論, 80 卷, 816 号, pp.1-13 (2014)