

硬質塩化ビニル製新型ガスケットレスフランジの シール効果について*

野田 尚 昭*¹, 井上 暁 史*²
名川 政 人*³, 白石 文 隆*³

The Sealing Performance of New Gasketless Flanges Made by Unplasticized Polyvinyl Chloride

Nao-Aki NODA*⁴, Akifumi INOUE,
Masato NAGAWA and Fumitaka SHIRAISHI

*⁴ Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1 Sensui-cho, Tobata, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

This paper deals with a new seal system between flange joints without using gasket. This gasketless flange includes a groove and an annular lip that is machined in one of the flange being in contact with the other flange to form a seal line when the flanges are assembled. In this study, first, fundamental dimensions are examined for PVC-U to obtain the best sealing performance. Then, the effects of material difference and flange nominal size on the sealing performance of new gasketless flange are investigated for two types of materials, 0.25% carbon steel (S25C JIS) and unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U JIS). It is found that the critical internal pressure where leakage appears is mainly controlled by the maximum normal stress at the annular lip for each material even if the flange nominal sizes are different. The gasketless flange made by PVC-U shows the higher critical internal pressure compared with the case of S25C if the same clamping forces are applied. The effect of stress relaxation for PVC-U on the sealing performance is also considered. Then, it may be concluded that this PVC-U gasketless flange also has good sealing performance.

Key Words: Fixing Element, Coupling, Machine Element, Stress Analysis, Finite Element Method, Contact Problem, Pipe Flange, Sealing Performance

1. 緒 言

各種工業プラントの至る所で工業用配管が用いられており、これらの配管の継手において漏れを防ぐために必ずガスケットが使用されている。しかしながら、従来のガスケットは必ず経年劣化が伴うため、特に、継手間からの微量漏れが避けられず、定期的な点検と保守を必要としている。しかし、近年このような漏れを防ぐことが環境問題対策の一つとして重要視されるようになってきている⁽¹⁾。

本研究で取り扱うガスケットレスフランジ(以下GLフランジと記す)は、このような従来のガスケットの欠点を補うために考案された⁽²⁾。これは、図1に示すようにフランジに突起と溝を設けることにより、継手締結時に主として弾性変形を利用して面粗さ等を吸収し、均一の当たり面によるシール効果を発揮するように工夫されている^{(3)・(4)}。また、GLフランジの原理を応用したスーパーシール(図2)も考案され、注目されている。これは従来ガスケットを使用していたところに溶接もいらずに容易に挿入することを可能に

したものである。

これまでのGLフランジの研究では、材料としてS25Cのみを用いてきた^{(5)・(6)}。しかし、例えば、ソーダ、メッキ、紙、パルプなどの産業プラントにおいて腐食性流体を搬送する際には、耐薬品性において特に優れている樹脂製のパイプを用いることが不可欠である。

そこで、本研究では、S25C以外の材料として、まず硬質塩化ビニル(PVC-U)を取り上げ、そのシール機構が有効にはたらく条件を実験と解析により検討す

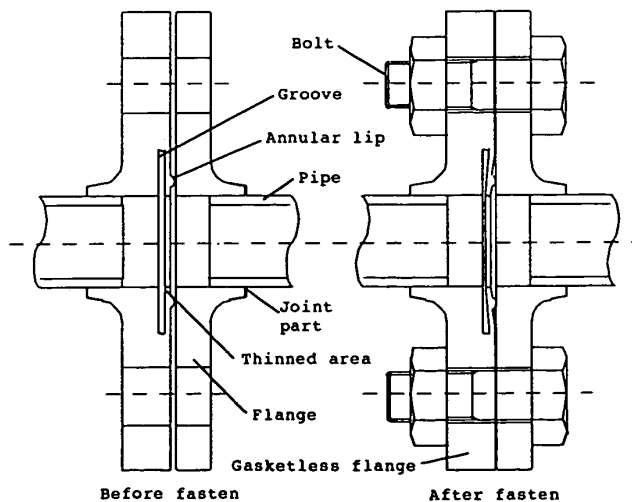


Fig.1 Gasketless flange

* 原稿受付 2002年2月21日。

*¹ 正員, 九州工業大学工学部(☎804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

*² 九州工業大学大学院工学研究科。

*³ (株)大創(☎805-0061 北九州市八幡東区西本町4-5-1)。

E-mail: noda@mech.kyutech.ac.jp

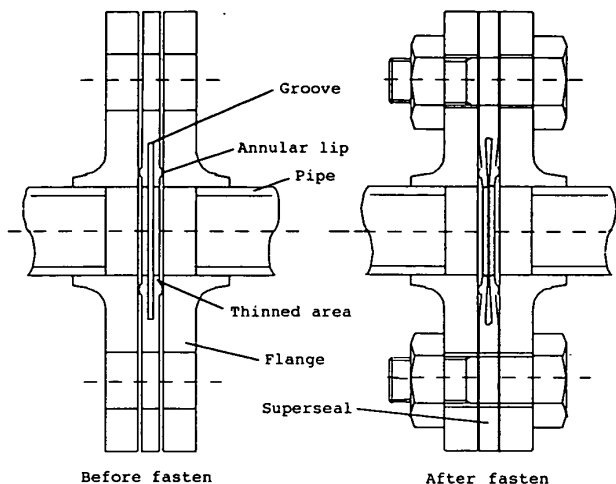


Fig. 2 Superseal

Table 1 (a) Physical properties for PVC-U

	Physical properties		
	Specific weight	Hardness	Coefficient of water absorption (%)
measurement method	JIS K 7112	JIS K 7202	ASTM D 570
PVC-U (HP101)	1.47	R-119	0.03

Table 1 (b) Mechanical properties for PVC-U

	Mechanical properties					
	Tensile strength {MPa} {kgf/mm ² }	Elongation (%)	Strength for bending {MPa} {kgf/mm ² }	Elasticity for bending {MPa} {kgf/mm ² }	Young's modulus {MPa} {kgf/mm ² }	Izod impact strength {kJ/m ² } {kgf·cm/m ² }
measurement method	JIS K 6745	JIS K 6745	JIS K 7203	JIS K 7203	ASTM D 638	JIS K 6745
PVC-U (HP101)	57 (5.8)	114	94 (9.6)	3300 (340)	2940 (300)	5.0 (5.1)

Table 2 Dimensions of superseals for PVC-U (mm)

SIZE 50A	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Rj	Rk	l	lb
h=4mm	155.0	120.0	86.5	70.0	60.0	11	3	4	0.2	1.5	3.5	13.25	28
h=8mm	155.0	120.0	86.5	70.0	60.0	19	3	8	0.2	1.5	3.5	13.25	28
h=∞	155.0	120.0	-	70.0	60.0	11	0	∞	0.2	-	3.5	-	28

る。そして先の研究⁽⁵⁾、⁽⁶⁾で得られたS25Cの場合と比較し、材料の違いがGLフランジのシール効果に及ぼす影響を考察する。本研究の内容は、今後他の材料をGLフランジに用いる際にも有用である。

2. 硬質塩化ビニル(PVC-U)製スーパーシールの幾何学的寸法の検討

著者らは先に材料としてS25Cを用いて、GLフランジのシール機構が有効に働くために最も適切と考えられる溝や変形部分(図1, 2参照)の幾何学的寸法を求めた⁽⁵⁾。本研究では、同様に、PVC-Uについて、まず、よく使われる管の呼び径50Aに関して水圧漏れ試験と有限要素法(FEM)解析を行い、スーパーシールの最適な幾何学的寸法を考察する。

2.1 供試材料 表1にPVC-U(商品名:三菱樹脂製HP101)の材料特性を示す。図3に直径10mmの

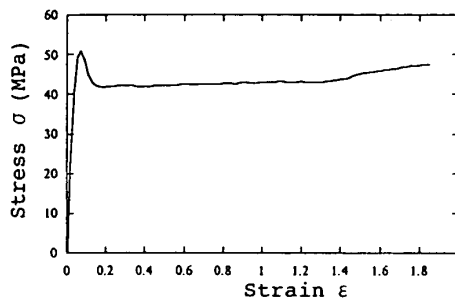
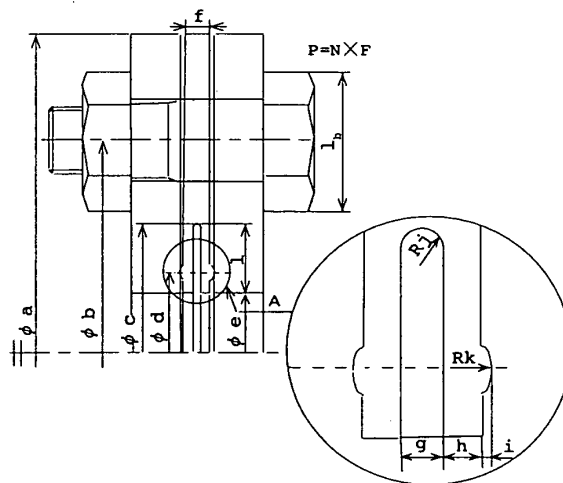
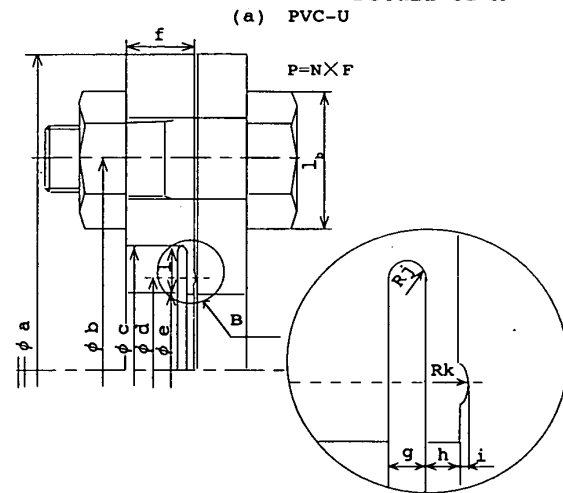


Fig. 3 Stress vs. strain relation for PVC-U



Detail of A



Detail of B

(b) S25C

Fig. 4 Dimensions of models

丸棒試験片により求めたPVC-Uの応力ひずみ関係を示す。表1の縦弾性係数はJIS7113(プラスチックの引張試験方法)に基づいて応力ひずみ曲線の初めの比例部分を用いて求めている。なお、PVC-UではGLフランジ(図1)を既設のパイプラインに設置する際、図1のパイプとフランジの接合部からの漏れが問題となる。従って、既設のフランジをそのまま使用するものとして、その間に図2のスーパーシールをはさんで使用する。

2.2 水圧漏れ試験方法及び結果 表2にスーパーシールの寸法表、図4に寸法図を示す。ここ

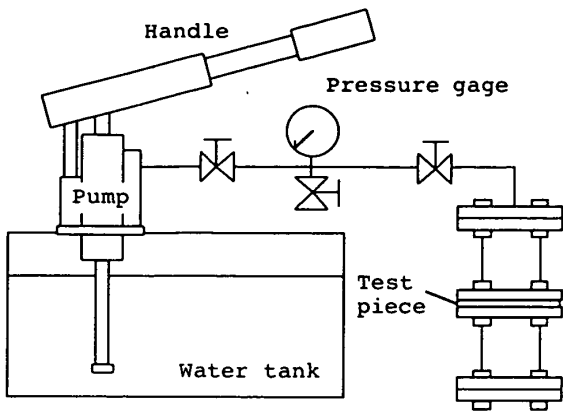


Fig. 5 Experimental equipment

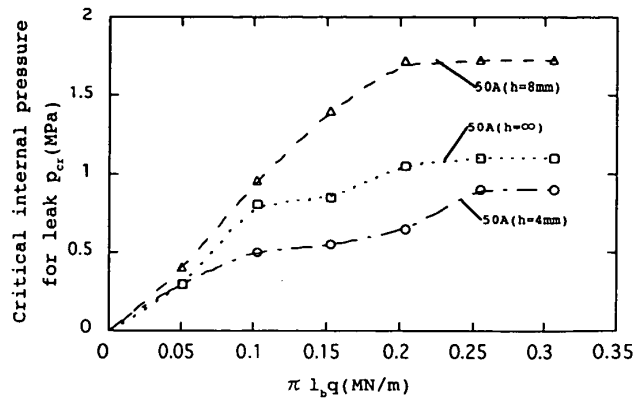


Fig. 6 p_{cr} vs. $\pi l_b q$ relation

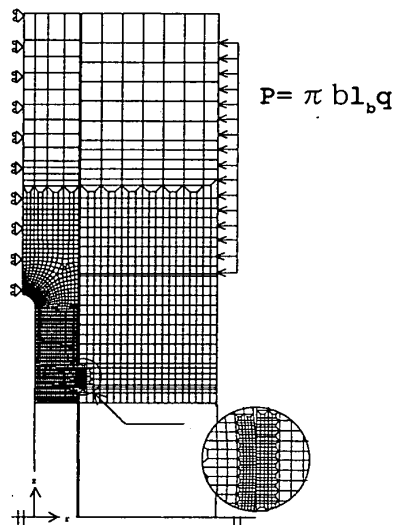


Fig. 7 Finite Element Mesh

ではシール効果を得る上で最も重要な変形部 (図4の詳細図参照) の厚さを $h=4\text{mm}$, $h=8\text{mm}$, そして溝無しに相当する $h=\infty$ の3種類について実験を行う。図5に実験装置を示す。フランジの締付けは、M16のボルト4本をトルクレンチを用いて行った。また水圧は、図5に示す装置[(株)キョウワ製 キョウワテスター]を用いて負荷した。テスト時間は10分で、この間圧力の低下を観察して圧力の低下が生じない場合には水圧を0.05MPaづつ上昇させ、その値を越えると漏れが生じる限界の内圧 p_{cr} を締付け力を変化させて求めた。

図6に実験によって得られた円周方向単位長さ締付け力 $\pi l_b q (=P/b)$ と p_{cr} の関係を示す。図6より変形部厚さ $h=4\text{mm}$, ∞ , 8mm の順にシール効果が良好になっているのがわかる。更に、ボルトを一旦取外した後、再度締結して繰返し $\pi l_b q - p_{cr}$ 関係を求めた。しかし、合計3回測定した結果は全く同じであった。すなわち、PVC-Uにおいては、先のS25Cとは異なり $h=4\sim\infty$ の全てで塑性変形のシール効果への影響はほとんど認められない。実際、次節のFEM解析の結果によれば $h=\infty$ (溝無し) の突起部の極く一部に塑性域が認められたのみ

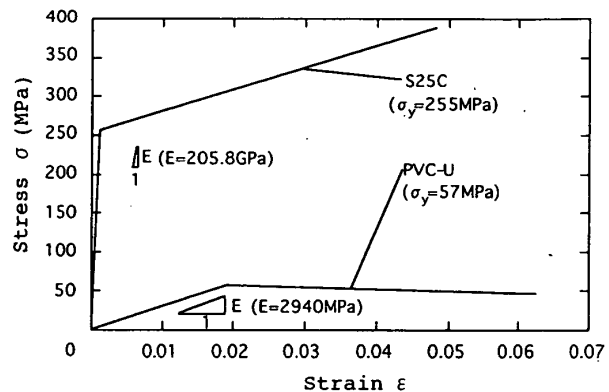


Fig. 8 Stress vs. strain relation for analyses

であった。

2.3 FEM解析方法及び結果

解析は四辺形4節点軸対称要素を用いて、FEMで弾塑性解析した。要素分割の例を図7に示す。溝の底と突起部において応力集中や接触の影響で応力およびひずみに大きな勾配が生じるので、隣接する節点間における応力、ひずみの値が大きく変化しないよう要素の大きさに配慮した。

モデル化にあたり、N本のボルト・ナットの各締付け力をFとした場合、総締付け力 $P=N \times F$ であるが、これを一様分布締付け力 $q (q=P/\pi b l_b)$ が環状に分布するものとする。ボルト締付け力Pは、座面摩擦係数 $\mu=0.2$ 、ボルト強度区分4.8としてトルク法⁽⁷⁾より算出した。また荷重の増分は材料の非線形性を考慮して与えた。

図8に解析で使用したPVC-Uの応力ひずみの関係を、先に研究を行った^{(5),(6)} S25Cと比較して示す。突起部での接触に関して摩擦は無視できるものと仮定した。

図9に円周方向単位長さ締付け力 $\pi l_b q$ と突起部に生じる軸方向最大垂直応力 σ_{max} の関係を示す¹⁾。図9より、変形部の厚さが増すにつれ σ_{max} が増加しているのがわかる。これは変形部の厚さが増すことによる変形部の剛性の上昇が原因と考えられる。フランジの応力状態は、突起部の頂点近傍を除いてPVC-Uの降伏応力 $\sigma_y=57\text{MPa}$ 以下である。しかし、突起部の接触面積が締付け

*1 本研究では、内圧を作用させる前のボルト締結時における突起部に生じる σ_{max} に注目している^{(5),(6)}。

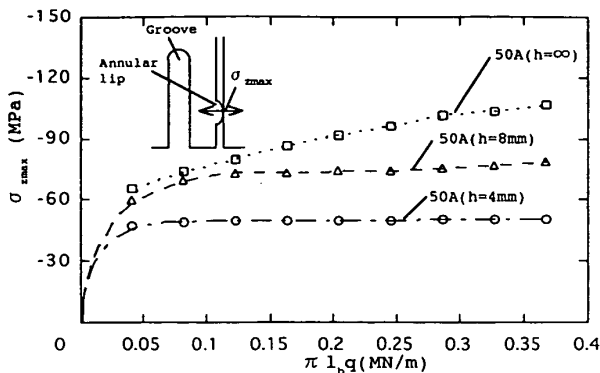


Fig.9 σ_{zmax} vs. $\pi l_b q$ relation

Table 3(a) Dimensions of superseals for PVC-U(mm)

SIZE	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Rj	Rk	l	lb
250A	400.0	355.0	293.5	277.0	267.0	19	3	8	0.2	1.5	3.5	13.25	37
50A	155.0	120.0	86.5	70.0	60.0	19	3	8	0.2	1.5	3.5	13.25	28

Table 3(b) Dimensions of GL flanges for S25C(mm)

SIZE	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Rj	Rk	l	lb
250A	400.0	355.0	295.5	275.5	269.5	36	3	5	0.2	1.5	4	13	37
50A	155.0	120.0	87.1	67.1	61.1	24	3	5	0.2	1.5	4	13	28

力の上昇により増加するため図9のように σ_{zmax} と $\pi l_b q$ の関係は非線形となる。先の研究⁽⁵⁾、⁽⁶⁾でS25Cに関して突起部の σ_{zmax} が大ならば良好なシール効果が得られた。しかし、図9では $h=4 \rightarrow \infty$ となるにつれて σ_{zmax} は増加するにもかかわらず、実験(図6)では $h=\infty$ (溝無し)は $h=8mm$ に比べて良好なシール効果が得られなかった。今回試作したフランジに関しては、 $h=4 \sim \infty$ のいずれも突起部ならびに相手方フランジの表面の最大高さ $R_{max}=6.3 \mu m$ として仕上げている。接触面の平坦度が出しやすい形状なので、加工による影響は比較的小さいと思われる。 $h=\infty$ (溝無し)で良好なシール効果が得られない理由として、実験では4本のボルトで締め付けているので、締付力の分布が不均一であることが $h=\infty$ (溝無し)では大きく影響していることが挙げられる。一方、 $h=4mm$ と $h=8mm$ では、溝の存在によって締付力の不均一が多少緩和されることや、内圧とそれに伴う突起部全体の変形がシール効果に良好に作用すると考えられる。結局、 $h=8mm$ (溝の深さ $l=13.25mm$)が呼び径50AのPVC-Uについて最適な寸法と判断できる。なお、先の研究で、S25Cの管の呼び径50Aについては、 $h=5mm$ (溝の深さ $l=13mm$)が最適であることを確認している⁽⁵⁾。

3. GLフランジのシール効果における異なる材料ならびに呼び径の影響

前章までの議論において、S25Cに加えて新しくPVC-Uを取り上げ、よく使用される管の呼び径50Aについて最適と考えられる寸法を求めた。しかし、実際の使用に際して、管の呼び径が異なることの影響を知

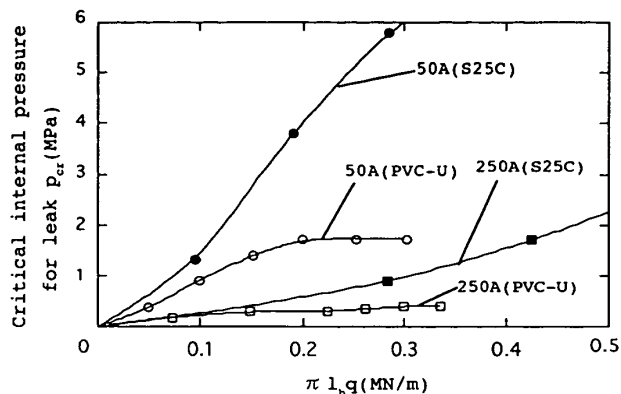


Fig.10 p_{cr} vs. $\pi l_b q$ relation

る必要がある。また、今後GLフランジの材料として、PVC-UやS25C以外を使用する可能性を考慮して、そのシール効果に及ぼす異なる材料の効果を把握しておくことは重要である。ここでは、管の呼び径250AのPVC-U製スーパーシールを準備し水圧漏れ試験を行い、先の管の呼び径50Aの場合、ならびに、先のS25Cの場合と比較する。

3.1 水圧漏れ試験結果 表3にPVC-UとS25Cの寸法を示す(図4参照)。ここでは呼び径50Aに対して求めたそれぞれの材料の最適寸法 $h=8$ と $h=5$ を250Aにも使用し、呼び径の影響を調べた。図5に実験装置を示す。フランジの締付けは、それぞれの材料に関して、50AではM16のボルト4本、250AではM22のボルト12本をトルクレンチを用いて行った。実験方法は2.2と同様である。

図10に実験によって得られた円周方向単位長さ締付力 $\pi l_b q$ と漏洩が生じる限界内圧 p_{cr} の関係を示す。S25C、PVC-Uともに同じ円周方向単位長さ締付力では管の呼び径が小さい方が高い水圧までシール効果が得られる。また、同じ単位長さ締付力で比べるとPVC-Uでは漏れが生じる限界内圧はS25Cより低い。PVC-Uでは、50Aについて $\pi l_b q \geq 0.2MN/m$ で $p_{cr}=1.7MPa$ =一定となり、250Aでは $\pi l_b q \geq 0.3MN/m$ で $p_{cr}=0.4MPa$ =一定となる。これは、変形部がボルト締結によって十分変形した後は、シール効果に締結力の影響がなくなること示している。

3.2 FEM解析結果 図11に円周方向単位長さ締付力 $\pi l_b q$ と突起部に生じる軸方向最大垂直応力 σ_{zmax} の関係をPVC-UとS25Cを比較して示す。図11(a)、(b)から、同じ円周方向単位長さ締付力に対して、同一のフランジ材料では、呼び径の小さい方が高い σ_{zmax} が得られる。これは同じ円周方向単位長さ締付力では、呼び径が小さいほど曲率の影響のため

*1 この結果は50Aで求めた、最適形状 $h=8mm$ 、 $l=13.25mm$ を250Aにも適用した場合の結論である。250Aでは $h \rightarrow 大$ などとして、高い限界内圧を得ることのできる可能性がある。

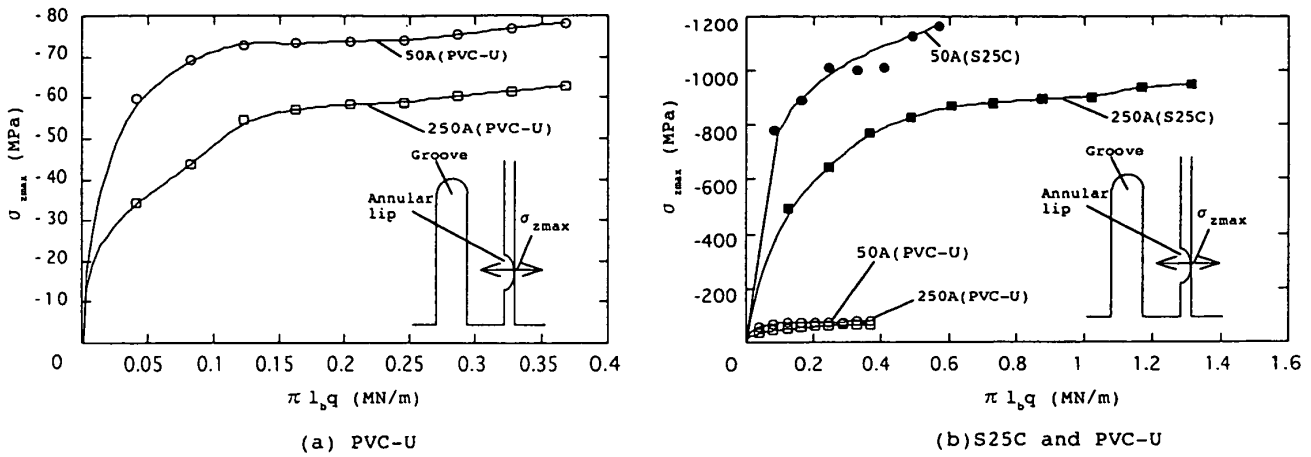


Fig.11 σ_{zmax} vs. $\pi l_0 q$ relation

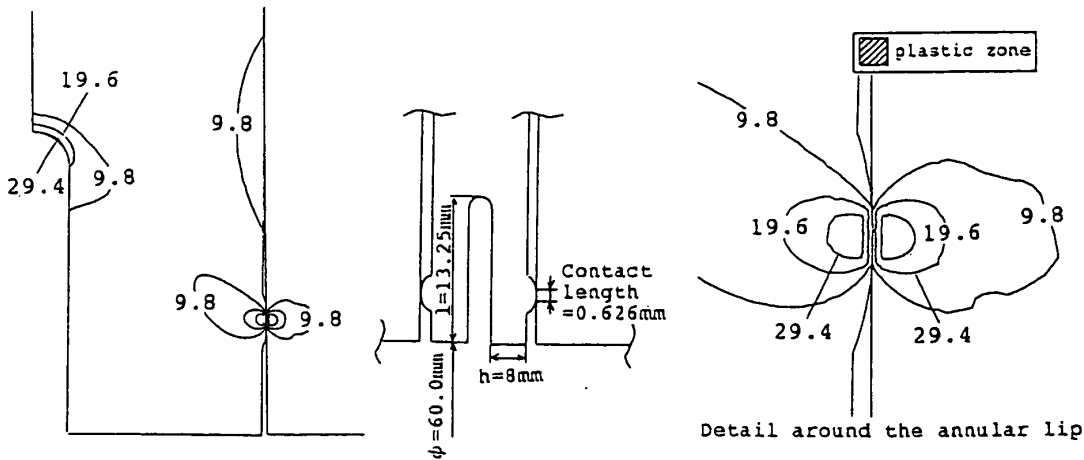


Fig.12(a) Equivalent Mises stress σ_{eq} for PVC-U, 50A (clamping force $\pi l_0 q=0.30MN/m$)

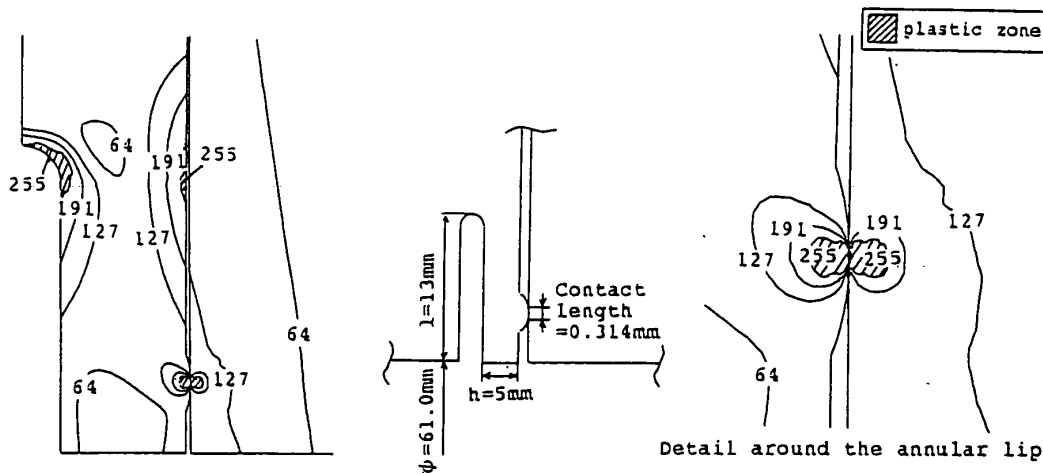


Fig.12(b) Equivalent Mises stress σ_{eq} for S25C, 50A (clamping force $\pi l_0 q=0.30MN/m$)

変形部の剛性が高くなっているためであると考えられる⁽⁶⁾。図 1 1 (b) に示すように、同じ円周方向単位長さ締付力で比較した場合に、PVC-U は剛性が低いので、PVC-U の σ_{zmax} は S25C に比べてかなり低い。

図 1 2 に呼び径 50A のフランジに円周方向単位長さ締付力 $\pi l_0 q=0.3$ (MN/m) を与えた時の PVC-U と S25C

のミーゼス応力状態を示す。図 1 2 (a) に示すように、PVC-U では塑性変形が生じていない。これに対して、図 1 2 (b) から、S25C では突起部である程度の塑性域をもっている。すなわち、フランジ材料が PVC-U のように柔軟性を有する場合、塑性変形無しで良好なシール効果を発揮すると考えられる。

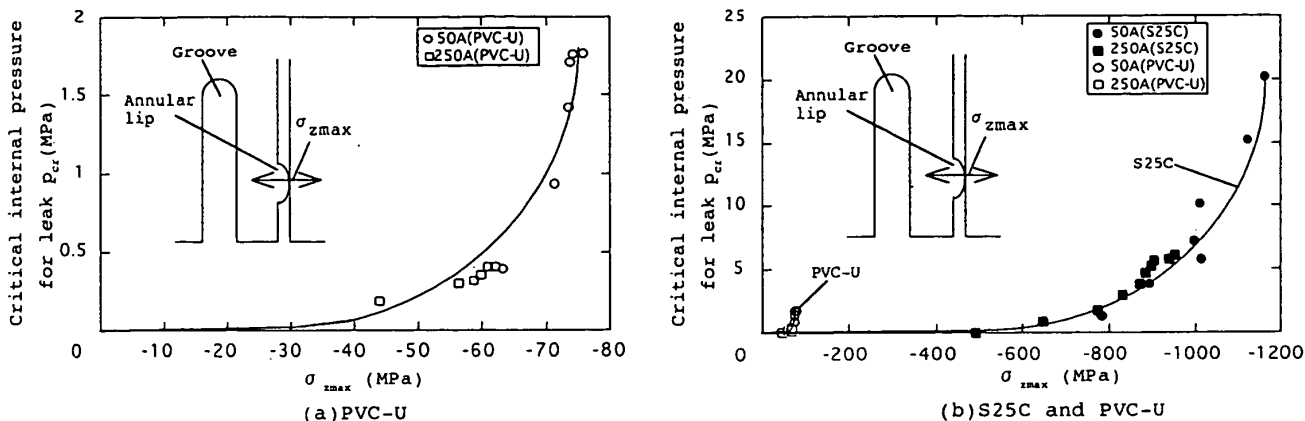


Fig. 13 p_{cr} vs. σ_{zmax} relation

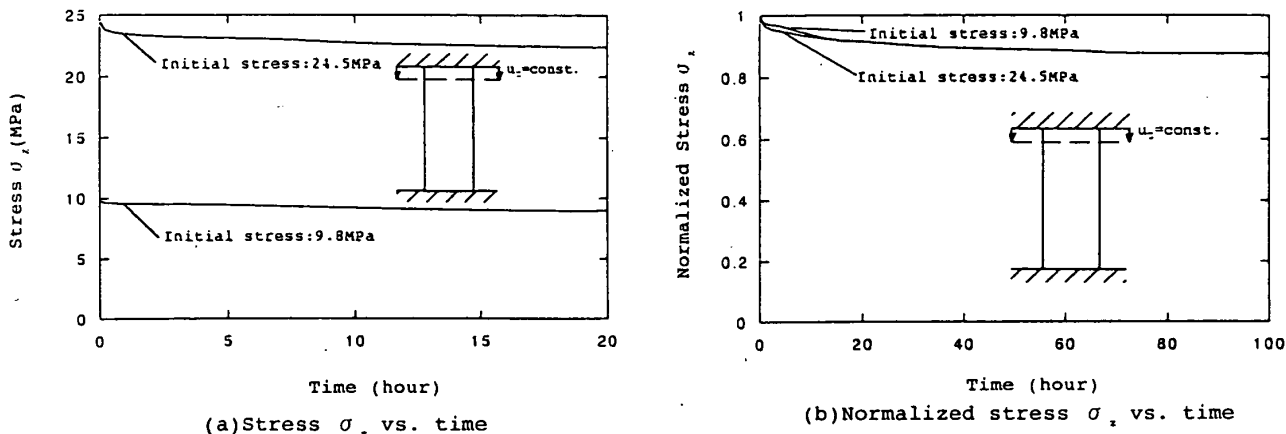


Fig. 14 Results of relaxation stress experiment

3.3 限界内圧 p_{cr} と σ_{zmax} の関係 図 1 3 に水圧漏れ試験及びFEM弾塑性解析から得られた軸方向最大垂直応力 σ_{zmax} と漏洩が生じる水圧 p_{cr} の関係を PVC-U と S25C を比較して示す. 図 1 3 より管の呼び径が異なっても各材料で p_{cr} はほぼ σ_{zmax} によって支配されていることがわかる. 図 1 1 (b), 図 1 3 (b) より, PVC-U では締付力を大きくしても σ_{zmax} を大きくすることは難しいけれども, 比較的小さい σ_{zmax} で高い限界内圧を示すことがわかる. 結局, PVC-U では, 継手締結時に弾性変形が容易であることから面粗さ等を吸収し易く, 比較的小さい接触応力で均一の当たり面によるシール効果を発揮していると考えられる.

4. 応力緩和現象のシール効果への影響

本研究で取扱う PVC-U は, 一定の荷重を作用させた場合, 変形が時間とともに進行するクリープ現象を生じることが知られている. そのため, 図 1 3 で注目している σ_{zmax} が時間経過により低下し, 良好なシール効果が得られなくなる恐れがある. そこで, このような応力緩和がシール効果に及ぼす影響を考察する.

まず, PVC-U の応力緩和特性の把握のため, 呼び径 50A のフランジを締結した際の, ミーゼス応力分布図 1 2 (a) を考慮して, 初期応力の値として 9.8MPa と

24.5MPa を選んで変位を固定して与え, 緩和する応力を測定する. 具体的には, 試験機は, 島津製作所製オートグラフを使用し, 円柱状試験片 (直径 $d=25\text{mm}$ × 高さ $h=50\text{mm}$) を用いて, 試験片に圧縮応力 9.8, 24.5MPa に相当する変位を与えてクロスヘッドを固定し, その後時間経過に伴う応力値をロードセルで測定する. 得られる応力緩和の時間変化曲線は, 初期状態を設定するまでの履歴によって大きく変化することが指摘されている⁽⁸⁾ ので, ボルトでフランジを締結する場合を模擬して, 歪み速度 $200 \mu\text{m}/\text{min}$ で初期応力を設定した. 図 1 4 に応力緩和試験結果を示す.

図 1 4 (a) に示すように, 初期応力 24.5MPa と 9.8MPa のいずれも 20 時間経過後応力が 8.5% 程度低下する. 両者を初期応力で無次元化したものを図 1 4 (b) に示す. 初期応力 24.5MPa については 100 時間まで応力緩和試験を行ったが, 70 時間までに 12% 程度低下した後は応力低下は認められず, ほぼ一定となっている.

次に, このような応力緩和がシール効果へ及ぼす影響を調べた. 先の研究^{(5), (6)} と本研究では, 漏れが生じ始める限界内圧 p_{cr} を試験水圧を 10 分間作用させ, その間圧力低下が生じないならば, 水圧を

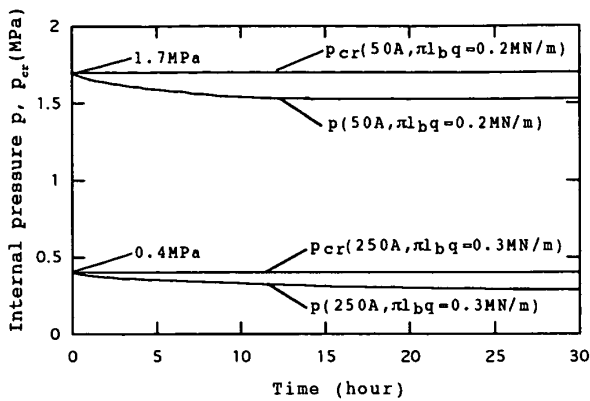


Fig. 15 Internal pressure vs. time relation

0.05MPa上昇させる方法によって求めている。そこで10分間の試験時間を延長した場合の圧力の低下を、スーパーシールが耐えうる最大の内圧で実験して調べた。その結果を図15の p の曲線で示す。呼び径50Aでは15時間まで次第に低下するが、その後一定となる。また250Aでは、23時間から一定となり、図示していないが、その後100時間まで延長して調べた結果、さらなる低下は認められなかった。このような圧力 p の低下は、パイプ及びフランジがクリープ現象によって時間経過に伴い体積が膨張したことによると考えられる。すなわち、この圧力低下が生じた場合にも漏れは認められず、 $p > p_{cr}$ を作用させた場合の漏れによる内圧低下とは明確に区別できる。

次に、時間経過後の前述の方法（試験時間10分）によって求めた p_{cr} の値を図15の p_{cr} 曲線で示す。100時間まで繰返し実験を行ったが、図示するように p_{cr} には応力緩和の影響は全く認められない。結局、図14に示すようなPVC-Uが1割程度応力緩和することがシール効果へ及ぼす影響はほとんど無いと結論できる^{*1}。

以上の検討とともに、実際に三菱化学（株）黒崎事業所において以下の条件で管の呼び径50AのPVC-U製スーパーシールを試験的に使用した結果、使用圧力が常に作用した状態で1年半以上継手間から漏れが生じていないことを確認している。

- ①総締付力：12KN ($\pi l_b q = 0.1MN/m$)
- ②使用流体：塩酸
- ③流体温度：常温
- ④使用圧力：0.49MPa

5. 結言

本研究では、GLフランジの材料として、先に取り扱ったS25C以外の使用が期待されていることを考慮して、まず硬質塩化ビニル（PVC-U）を取り上げ、GLフランジのシール効果に及ぼす異なる材料ならびに呼び径の影響

について考察した。実験とFEM解析によって得られた結論を以下に示す。

(1) PVC-U製スーパーシールの変形部の最適な幾何学的寸法を、実験と解析より検討した。変形部の厚さ $h \rightarrow$ 大、溝の深さ $l \rightarrow$ 小などとして、突起部を含む変形部の剛性を大きくすると、円周方向の平均的な接触応力は大きくなるが、一様な接触状態が得られにくくなる。その結果、管の呼び径50Aの場合、S25Cの最適変形部厚さ $h=5mm$ に対して、PVC-Uでは $h=8mm$ 程度（溝の深さ $l=13.25mm$ の場合）が最適と判断できる。

(2) PVC-UもS25Cと同様、その限界内圧 p_{cr} は、ともに管の呼び径にかかわらず主として突起部に生じる軸方向最大垂直応力 σ_{zmax} により支配される。PVC-Uでは、変形し易いためS25Cに比べて大きい σ_{zmax} を得ることは難しいが、比較的小さい σ_{zmax} で高い限界内圧 p_{cr} を得ることができる。これはPVC-Uがその柔軟性によりフランジ接触面の面粗さ等を容易に吸収し、均一の当たり面を形成するためと考えられる。

(3) PVC-Uに一定ひずみを与えて、応力緩和試験を行った結果から考えれば、フランジ締結時では20～35MPaある突起部付近でのミーゼス応力が、時間経過に伴う応力緩和により1割程度低下する可能性がある。しかし、長時間経過後も限界内圧 p_{cr} は不変であり、シール効果を支配する突起部の σ_{zmax} が多少低下しても、そのシール効果への影響はほとんど認められない^{*2}。

PVC-Uの緩和特性とその実験に関して、前九州工大教授荒井貞夫先生の熱心で暖かい御指導を頂いた。また、論文校閲時に校閲委員からのたいへん有益な助言を賜った。深くお礼申し上げます。本研究の一部はものづくり強化支援事業（日本商工会議所）ならびに中部電力基礎技術研究所研究助成の援助を受けた。田中洋征氏、尾辻啓志氏には実験上種々の援助を賜った。また、研究の一部は武内健一郎氏、高瀬康氏の助力を得た。

文献

- (1) Clean Air Act Amendment of 1990 (USA).
- (2) 例えば、日刊工業新聞、(1998, 12, 2) 37.
- (3) 尾辻啓志、名川政人、管継手、特許番号2849345.
- (4) 例えば、山根一真、メタルカラーの時代vol.1.5, 74-81, 小学館.
- (5) 野田尚昭・武内健一郎・高瀬康・尾辻啓志、新型ガスケットレスフランジおよび弾性変形を利用するガスケットに関する基礎的研究、機論、66-643, C (2000), 966-971.
- (6) 野田尚昭・武内健一郎・名川政人・白石文隆、新型ガスケットレスフランジのシール効果における限界内圧ならびに異なる呼び径の影響について、機論、66-650, C (2000), 3469-3474.
- (7) JIS B 1083 (1990).
- (8) 荒井貞夫、プラスチック材料による機械設計、(2002, 1, 17), 1-14, 設計工房アエオロ.

*1, *2 σ_{zmax} が1割程度低下しても p_{cr} が変化しない理由として、ボルト締結時の σ_{zmax} で突起部と相手側フランジが十分変形して密着していることがシール効果に重要な因子となっていることが考えられる。