

# ガスケットの粘弾塑性特性とボルト軸力緩和特性

## Visco-Elastic-Plastic Properties of Gasket and Bolt Load Relaxation Behaviors

学 名護典寛（神戸大・院） 正 高木知弘（神戸大・海科）

正 佐藤広嗣（日本バルカー工業）

Norihiro NAGO, Graduate School of Science and Technology, Kobe University, 5-5-1, Fukaeminami, Higashinada-ku, Kobe

Tomohiro TAKAKI, Faculty of Maritime Sciences, Kobe University

Kouji SATO, Nippon Valqua Industries, LTD.

Key words: Gasket, Creep relaxation, Bolt load reduction, Bolted joint

### 1. 緒言

管フランジ締結体に代表される軟質なガスケットを用いたボルト締結体を長期間使用する場合、ガスケットの粘性特性によりボルト軸力が低下し、ガスケット接触面から内部流体の漏洩事故を引き起こす可能性がある。本研究では、ガスケットの圧縮試験、クリープ試験より段階的に除荷の生じる任意の負荷履歴に対応可能なひずみ-時間関係式を提案し、この式を用いてボルト軸力変化を評価可能な数値モデルを構築する。また、単一ボルト締結体を対象にした軸力緩和試験の実験値と比較することで、その妥当性を評価する。

### 2. ガスケット試験

ジョイントシートガスケット(日本バルカー工業(株)製 No.6500)を対象として試験を行う。試験ガスケットは内径 22 mm, 外径 58 mm, 厚さは 3.0 mm とする。ガスケットの圧縮には圧縮試験装置を用い、ロードセルで荷重を測定する。ガスケットの変位は装置の周囲に取り付けた 4 つの変位計の平均値として測定する。

#### 2-1. 圧縮試験

文献[1]と同様な方法で圧縮試験を行う。ガスケット接触応力を 0 MPa から 100 MPa まで、10 MPa ずつ増加させ、負荷と除荷を繰り返し行う。図 1 に実験結果と、同定結果を示している。図 1 より同定結果が実験値をよく再現していることがわかる。圧縮試験より得た応力-ひずみ関係を次式に示す。

$$\text{負荷時: } \sigma = 17.7 \{ \exp(11.3\varepsilon) - 1 \} \quad (1)$$

$$\text{除荷時: } \sigma = \alpha \exp(\beta\varepsilon) + \gamma \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{\exp(\beta\varepsilon_y) - \exp(\beta\varepsilon_r)}, \quad \beta = 717.6 \exp(-33.6\varepsilon_y) + 26.7,$$

$$\gamma = -\alpha \exp(\beta\varepsilon_r)$$

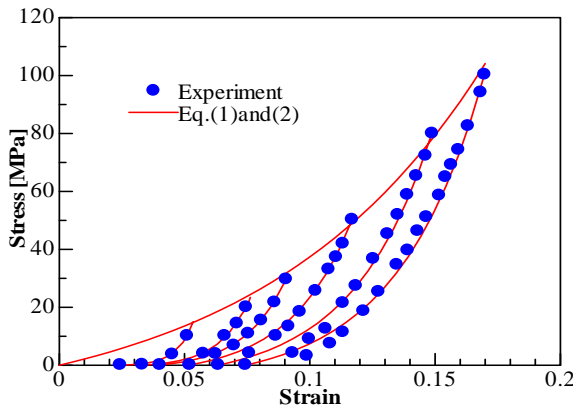


Fig1. Stress-strain relationship

#### 2-2. クリープ試験

ガスケット接触応力 $\sigma_1$ が 20, 30, 40, 50, 60, 70MPa となるように荷重を与え、10 時間放置しガスケットの変位の変化を計測する。図 2 にクリープ試験の結果を示す。横軸は時間、

縦軸は一定応力を負荷した後のひずみの増加である。図 2 よりひずみは応力を与えた直後は大きく増加するが、その後、時間の経過とともに増加量は減少し、緩やかな曲線になることがわかる。

ひずみの増加は負荷した直後と一定時間経過後とで変化の傾向が異なるため、本研究ではガスケットの粘性特性のモデル化に図 3 に示すような弾性ばね要素とダッシュポットを組み合わせた 5 要素 Voigt モデルを用いる。初期応力を $\sigma_1$ 、時間を $t$ とすると、ひずみは次の式で得られる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{R_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R_1 t}{\eta_1}\right) \right\} + \frac{\sigma_1}{R_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{R_2 t}{\eta_2}\right) \right\} + \frac{\sigma_1}{\eta_3} t \quad (3)$$

ここで、 $R_1, R_2, \eta_1, \eta_2, \eta_3$  は、実験結果を最小二乗近似することで得ることができる。図 2 に近似結果を破線で示している。図 2 より、式(3)はガスケットのクリープ特性を精度よく表現できていることが分かる。

$R_1, R_2, \eta_3$  を応力によって評価すると次の式を得ることができる。

$$R_1 = -0.935 \sigma_1^2 + 138898 \sigma_1 \quad (4)$$

$$R_2 = -1.796 \sigma_1^2 + 244784 \sigma_1$$

$$\eta_3 = 1.051 \times 10^7 \sigma_1$$

$\eta_1, \eta_2$  は一定とし、 $\eta_1 = 2.5 \times 10^5$ ,  $\eta_2 = 1.9 \times 10^7$  である。

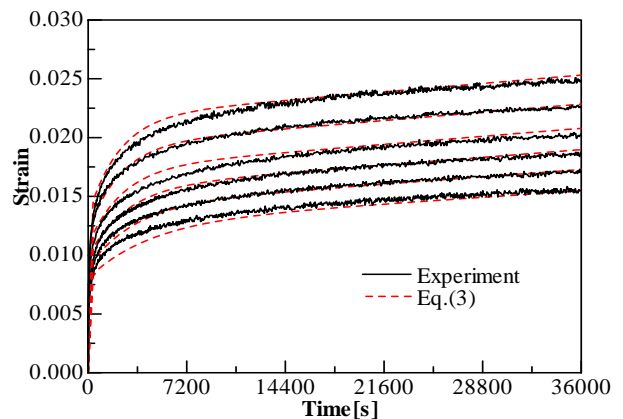


Fig2. Creep curves for compression strain

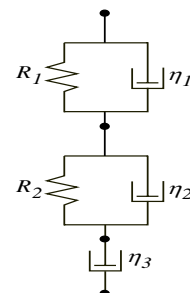


Fig3. Five elements Voigt model

### 2-3. 時間-ひずみ関係式

ガスケット試験の結果を用いて、初期応力状態 $\sigma_2^1$ から段階的に応力を除荷する際にひずみ変化を予測する式を提案する。図4に示すように、応力が段階的に除荷される場合、除荷が生じた後のクリープ曲線は、除荷後の応力を一定として与えた場合のクリープ曲線上の同じ時間履歴を辿ると考える。例えば、図4の $\varepsilon_t^2$ は、一定応力 $\sigma_2^2$ を負荷したクリープ曲線上の $t_r^1$ から $dt$ が経過した $t_r^2$ までのひずみの増加である。任意の時間 $t$ から時間増分 $dt$ が経過した $t_r^i$ までのひずみの増加は、式(3)より得た次の式で表すことができる。

$$\varepsilon_t^i = \frac{\sigma_2^i}{R_1} \left\{ \exp\left(\frac{-R_1 t_r^i}{\eta_1}\right) - \exp\left(\frac{-R_1 t}{\eta_1}\right) \right\} + \frac{\sigma_2^i}{R_2} \left\{ \exp\left(\frac{-R_2 t_r^i}{\eta_2}\right) - \exp\left(\frac{-R_2 t}{\eta_2}\right) \right\} + \frac{\sigma_2^i}{\eta_3} (t - t_r^i) \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_2^i$ は時間 $t$ の時の応力、 $R_1, R_2, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ は式(4)に $\sigma_2^i$ を代入して求めた値である。ガスケット試験の結果と式(5)より、段階的に応力を除荷する際に生じるひずみを予測する時間-ひずみ関係式を次のように表す。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \sum_{i=1}^n [\varepsilon_t^i - d\varepsilon_2^i] \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon_1$ は初期応力を与えた時に生じる瞬間的なひずみであり、式(1)より得られる。 $\varepsilon_t^i$ は時間増分 $dt$ に生ずるひずみの増加であり、式(5)より得られる。 $d\varepsilon_2^i$ は $\varepsilon_t^i$ の増加に伴って回復するひずみであり、式(2)より得られる。

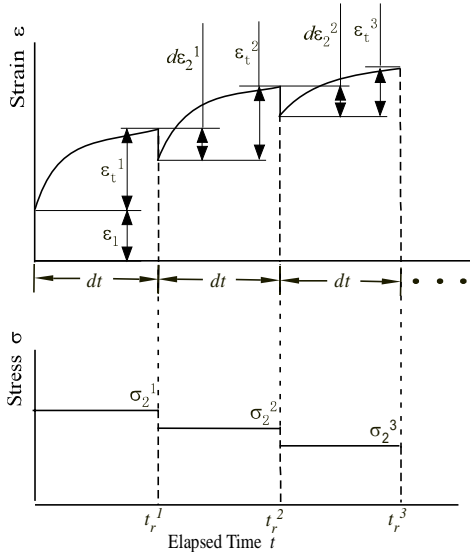


Fig4. Stress-time and strain-time relationships under unloading

### 3. 軸力緩和特性

#### 3-1. ボルト軸力緩和試験

単一ボルト締結体を対象に、ガスケットの粘性特性によるボルト軸力変化を計測する。図5に実験装置の模式図を示す。一对の円筒型の被締結体の間にガスケットを挿入し、締付けを行ってから10時間放置し、その間のボルト軸力の変化を計測する。締付け時の軸力はガスケット接触応力が20, 30, 40, 50MPaとなるように設定する。ガスケットはガスケット試験と同じものを使用する。M16のボルトを使用し、ボルト軸力はボルト円筒部に貼り付けたひずみゲージにより測定する。図6に単一ボルト締結体のボルト軸力変化を実線で示す。ボルト軸力は締付け直後に軸力が大きく減少し、その後、緩やかな曲線になることがわかる。初期軸力が大きいほど緩和が大きいことも確認できる。

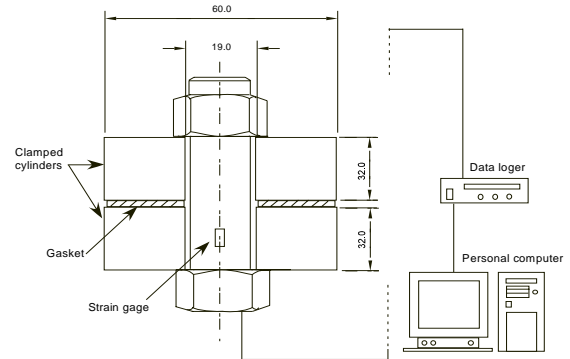


Fig5. Test equipment

#### 3-2. 数値モデル

ガスケット試験より得られた時間-ひずみ関係式を用いて、単一ボルト締結体のボルト軸力緩和を予測する。ボルト軸力の緩和が、図4に示すように短い時間増分 $dt$ で段階的に除荷が生じているとすると、ガスケットに生じるひずみの変化は式(6)の右辺第2項から得ることができる。これより、一定時間後のボルト軸力 $P(t)$ は次の式で算出する。

$$P(t) = P_0 - K_b l_0 \sum_{i=1}^n [\varepsilon_t^i - d\varepsilon_2^i] \quad (7)$$

ここで、 $K_b$ はボルト被締結体の合成ばね定数、 $l_0$ はガスケットの初期厚さ、 $P_0$ はボルトの初期軸力である。図6に、式(7)より予測したボルト軸力の緩和を点線で示す。図6より、予測値は実験値よりやや低い値を示しているが、全体的によく一致していることがわかる。この結果より、今回作成した時間-ひずみ関係式の妥当性が確認できる。また、次の講演で説明する有限要素法を用いた結果も同時に示している。式(7)の予測結果と有限要素法の解析結果は、20MPaでは解析結果がやや低い値をとっているが、全体的にはほぼ一致している。また、式(7)が有限要素解析に反映できていることがわかる。また、段階的に応力を低下させたさいに回復するひずみの扱いが妥当であることも確認できる。

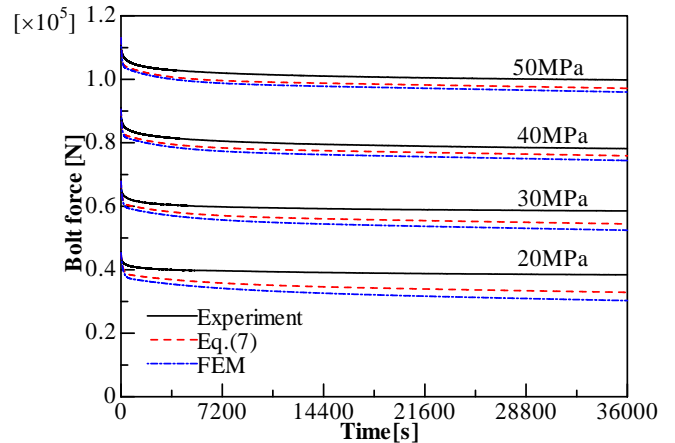


Fig6. Time variations of axial bolt load for simple bolted joint tightened by single bolt

### 5. 結言

圧縮試験とクリープ試験からボルト軸力の緩和を予測するひずみ-時間関係式を提案し、数値モデルと有限要素解析の結果を実験値と比較することによりその妥当性を示した。

### 参考文献

- (1) 高木・福岡, 機論(A), 68(2002), 8.