

銅合金コネクタ軽量化のための応力緩和制御技術の開発

機械情報システム課 吉江真太郎、中村陽文

1. 緒言

近年の自動車の電動化、多機能化を背景として、車載電子部品を接続するコネクタの数は増加しており、環境対応や燃費向上のため、コネクタの軽量化が求められている。コネクタはメス端子のばね部分がオス端子を押して導通が維持されるが、時間経過に伴い「ばねのへたリ(応力緩和)」が起これると電気抵抗が上昇するほか、最悪の場合、自動車を誤作動させる危険性を含んでいる。このため、銅合金の応力緩和を正確に制御・向上させながらコネクタの軽量化を実現する技術開発が求められている。しかし、端子が成形時に受ける予ひずみの影響を考慮した銅合金の応力緩和の解析については先行研究が乏しい。

本研究では、応力緩和を、クリープひずみが増加していく現象として捉え、クリープ試験と応力緩和試験の結果から、応力緩和量が小さくなる条件を見出すこと、および応力緩和を予測するための解析モデルを検討した。

2. 応力緩和とクリープの理論

単軸引張における応力緩和試験では、全ひずみは一定に保たれ、全ひずみは以下のように定義される。

$$\varepsilon_p + \varepsilon_e = \text{一定} \quad (1)$$

ここで ε_p は塑性ひずみ、 ε_e は弾性ひずみである。応力緩和による応力変化は、弾性ひずみの緩和として、

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon_e}{dt} \quad (2)$$

で与えられる¹⁾。応力の緩和(減少)に伴い、弾性ひずみ ε_e は減少するが、全ひずみは一定なので、塑性ひずみ ε_p は増加する。つまり、応力緩和が発生しているとき、塑性ひずみが時間とともに増加するクリープが起きているといえる。

3. クリープ試験方法

試験片の材質は無酸素銅板(C1020P)、試験機はインストロン型万能試験機 5567A を用いた。試験片に所定の予ひずみを与えたのち除荷し、再引張で所定の応力に到達した後は応力保持制御とし、ひずみゲージを用いて、保持開始後のクリープひずみの増加を測定した(Fig. 1)。

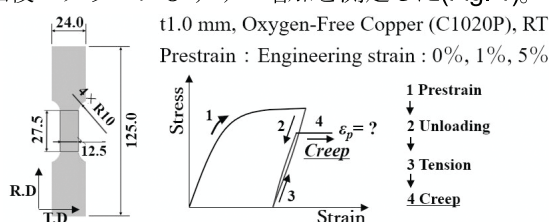


Fig. 1 Method of creep test

4. 実験結果

4.1 予ひずみ後の単軸引張クリープ試験

クリープひずみは曲線的に増加し、10,000 秒後には、予ひずみなしでは、約 1.3×10^{-3} に到達した一方、予ひずみ 1% と予ひずみ 5% では、約 0.5×10^{-3} にとどまった(Fig. 2)。これは予ひずみの付与により、クリープひずみ速度が低減したものとみられた。また、予ひずみ量による影響は 1% と 5% では大きな差がないことが確認された。

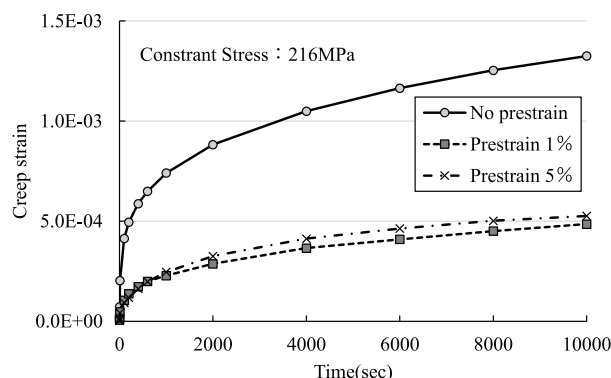


Fig. 2 Result of creep test

4.2 予ひずみ後の単軸引張応力緩和試験

クリープと応力緩和の比較を行うため、クリープ試験と同じ試験片・試験機で、単軸引張における応力緩和試験を行った。試験片に同様の予ひずみを与えた後、再引張で所定の応力に到達した後は、クロスヘッド保持により変位一定とし、応力の時間変化を計測した(Fig. 3)。その結果、予ひずみがあるものは、予ひずみなしよりも緩和量が小さく、また、予ひずみ 1% と 5% では大きな差はみられない、というクリープ試験と同様の結果が確認された。

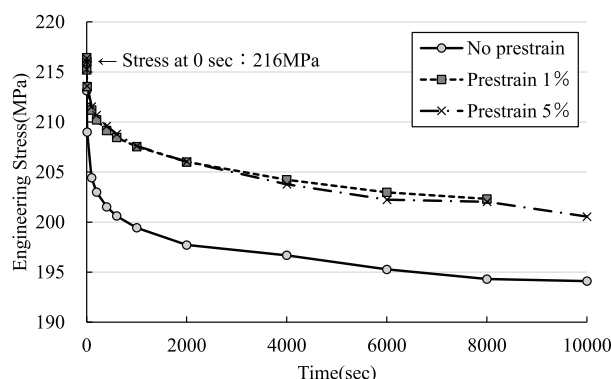


Fig. 3 Result of stress relaxation test

4.3 保持応力の水準を変えた単軸引張クリープ試験

次に、応力の大きさがクリープひずみ速度に与える影響を調べるため、予ひずみ量を一定とし、保持応力の水準を変えた単軸クリープ試験を行った(Fig. 4, 5)。

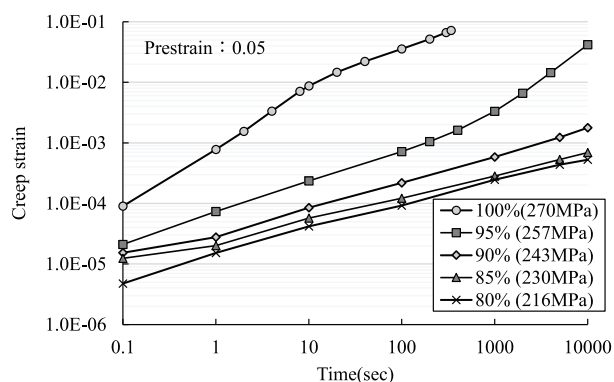


Fig. 4 Logarithmic graph of creep strain and time

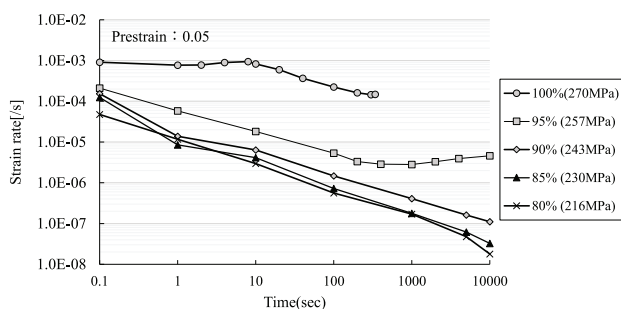


Fig. 5 Logarithmic graph of strain rate and creep strain

Fig. 4 は横軸が時間、縦軸がクリープひずみの両対数グラフである。予ひずみはいずれも 5%で、予ひずみ付与時の最大応力(270MPa)に対するクリープ試験時の保持応力の百分率を凡例に示した。クリープひずみは Fig. 3 と同様に時間とともに増加しており、保持応力が大きいほど、その量は大きい結果となった。

Fig. 5 は横軸が時間、縦軸がクリープひずみの増分から算出したひずみ速度の両対数グラフであり、応力が大きいものほど、ひずみ速度が大きいことがわかる。また、80%、85%、90%では、10,000 秒後までひずみ速度は低下が続けたが、95%では、約 400 秒後から、ひずみ速度が約 $3.0\text{E-}6/\text{s}$ で横ばいになり、その後上昇した。これは 1 次クリープ(ひずみ速度が減少する段階)¹⁾から 2 次クリープ(ひずみ速度がほぼ一定の段階)²⁾への遷移が試験中に発生したものとみられた。

5. クリープの解析および考察

応力がひずみ速度に依存するべき乗型の式として、

$$\sigma = g(\epsilon_p)(\dot{\epsilon}_p)^m \quad (3)$$

を構成則とした結晶塑性モデルを用いて、クリープの解析を行った(Fig. 6)。ここで m はひずみ速度感受性指数と呼ばれるパラメータである。解析条件の詳細は文献²⁾による。

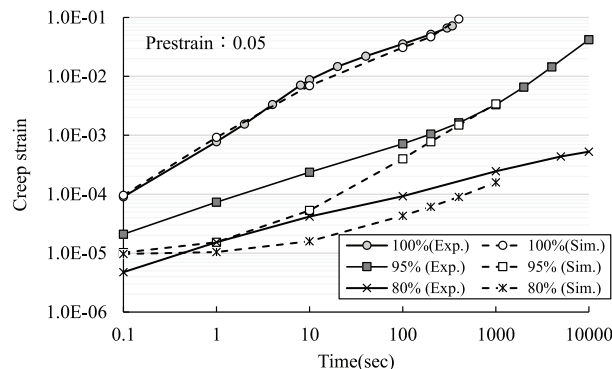


Fig. 6 Experiment and simulation of creep tests

今回の解析では、100%や、95%の約 400 秒後以降では、解析結果と実験値はよく一致したが、80%や、95%の 400 秒以前では、両者に差がみられた。この実験と解析が一致しない範囲は、Fig. 5 において、ひずみ速度が変化(低下)を続けている 1 次クリープの領域であった。

6. 結言

予ひずみがクリープひずみと応力緩和を低減させること、与える予ひずみの量の影響はクリープと応力緩和の両者において 1%と 5%では差がないことが実験で確認された。また、結晶塑性解析により、応力がクリープひずみに与える影響の予測を試みたが、今回の解析モデルでは、ひずみ速度が変化している領域(1 次クリープ)で実験結果と解析結果に差があり、課題が残った。

参考文献

- 1) 足立正雄 訳:金属クリープの基礎 (1968)
- 2) 吉江真太郎, 吉田健吾, 銅合金の応力緩和・クリープ挙動およびひずみ速度依存性, 塑性加工連合講演会講演論文集, **75** (2023) 179-180

キーワード：銅合金、コネクタ端子、応力緩和、クリープ、結晶塑性解析

Development of Stress Relaxation Control Technology for Weight Reduction of Copper Alloy Connectors

Mechanics and Digital Engineering Section; Shintaro YOSHIE and Takafumi NAKAMURA

The experiment confirmed that pre-strain reduces creep strain and stress relaxation of copper thin plate, and that there is no difference in the effect of the amount of pre-strain applied between 1% and 5%. In addition, an attempt was made to predict the effect of stress on creep strain rate using crystal plasticity finite element method, but the analytical model used in this study was unable to adequately predict the region where the creep strain rate changes (primary creep).