

## 自然歪を用いた大変形弾塑性解析 (大きな引張の予変形後の引張と剪断の繰り返し負荷挙動について)

### Elasto-plastic Analysis for Large Deformation using Natural Strain

(Behavior of cyclic load with respect to Tension and Compression generated after Pre-deformation of Large Uniaxial Tension)

○羅 富斌<sup>1</sup>, 土屋 貴寛<sup>2</sup>, 加藤 保之<sup>3</sup>

Fuhin RA<sup>1</sup>, Takahiro TSUCHIYA<sup>2</sup>, Yasuyuki KATO<sup>3</sup>

Abstract: Using specimens that is applied the pre-deformation of a large uni-axial tension, the estimation method for the yield stress when the cyclic loads of uni-axial tension and compression are applied with keeping the constant strain amplitude is described in this paper. Based on the Natural Strain theory, the yield stress at the tension side and compression side are estimated by the tangent modulus of the principal deviatoric stress and the principal deviatoric strain curve. Especially, the changes of yield stress with the number of cycles are examined under the different size of the pre-deformation of uni-axial tension.

### 1. 緒言

本研究では、タブピッチ銅の試験片に大きな引張の予変形を与えた後に一定歪幅で、引張と圧縮の繰り返し荷重を加えるときに、各サイクル内で得られる引張と圧縮の降伏応力の推移を調査する。各サイクル内の降伏応力の決定方法としては、サイクルごとに偏差主応力-偏差主歪線図上の接線係数を調べ、予変形から降伏応力がすでに明らかとなっているのでその降伏時の接線係数と同一値となる応力を各サイクル時の降伏応力と推定する方法を採用する。そして、引張の予変形量を変えて実験を実行することで、異なる予変形下で、繰り返し数に伴う降伏応力の変化を調査する。

### 2. 繰り返し荷重での降伏応力の決定方法

最初に、図 1 の様に大きな引張の予変形を与えた後に引張と圧縮の繰り返し荷重を加える際の各サイクル内の引張と圧縮の降伏応力の決定方法について述べる。図 2 は、繰り返し荷重の 1 サイクル目に着目し、それを模式的に描いたものである。予変形の最終応力値より、再降伏時の降伏応力が既に確定していて、それは図中の点 A で表わされることになる。点 A の近傍では、偏差応力-偏差歪線図は緩やかな曲線となるが、本研究では、その曲線を式 (1) で仮定する。ただし、式中の係数  $a, b, c, d$  の値は、LM 法 (非線形最小 2 乗法) で決定する。

$$S_1 = a (1 - \exp(-be_1)) + ce_1 + d \quad (1)$$

更に、上式を微分すると、

$$\frac{dS_1}{de_1} = -ab \exp(-be_1) + c \quad (2)$$

となり、これより点 A 上の再降伏時の接線係数を推定でき、更に、点 A の再降伏時の歪硬化係数  $h$  についても、この接線係数を用いて次式のように表すことができる。

$$h = \frac{2G}{dS_1} - 1 \quad (3)$$

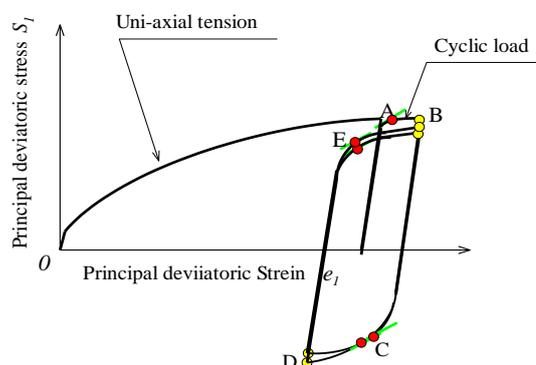


Fig1. Cyclic load after pre-deformation of uni-axial tension

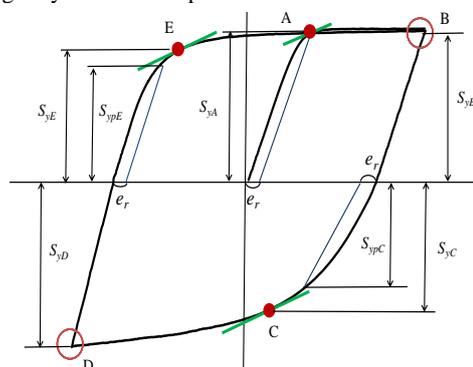


Fig2. Cyclic load for tension and compression

次に、伸び歪を一定歪幅で与えた後に得られる引張側の降伏応力は、点 B の除荷直後の応力  $S_{yB}$  で表される (図中の点 B の○参照)。一方で、圧縮側の降伏応力は、降伏前後の緩やかな曲線領域の偏差応力を再び LM 法により、式 (1) で表し、点 A で求めた接線係数と同一値となったときの応力、即ち図中の点 C を降伏応力  $S_{yC}$  と定めることにする。更に一定歪幅を与えた後に得られる圧縮側の降伏応力は、点 D の除荷直後の応力  $S_{yD}$  で表される (図中の点 D の○参照)。同様に、この状態から引張荷重を加え続けた引張側の降伏応力は、式 (1) を用いて、LM 法により求めることができ、それは点 E の応力  $S_{yE}$  で表される。一方で、一般的に用いられる耐力による降伏応力は点 A で明らかとなっている残留歪  $e_r$  を基準に決定され、それぞれ図中の  $S_{yCP}$  と  $S_{yEP}$  で表される。

### 3. 実験方法

本実験は予変形と予変形後の引張と圧縮の繰り返し荷重を与える実験の2段階から構成されている。最初に単軸引張の予変形として ( $\lambda=1.1, 1.2, 1.3$ ) を与える実験を行う。また、予変形後の引張と圧縮の繰り返し荷重を与える実験については、試験片に歪ゲージを装着し引張と圧縮の繰り返し荷重の歪幅を  $\Delta e_1=0.006$  で与える(ただし、繰り返し数は10回である)。そしてそれぞれの実験で得られた歪成分から偏差応力-偏差歪線図を描き、前述の方法に従って、点B, C, D, Eのそれぞれの降伏応力を求め、繰り返し数 $n$ に伴う降伏応力の推移を測定する。なお、繰り返しの主歪の幅については  $\Delta e_1=0.006$  以外に  $\Delta e_1=0.003$  (ただし、予変形は引張  $\lambda=1.2$ ) も調べる。

### 4. 実験結果と考察

図3(a)は、最も大きな引張の予変形 ( $\lambda=1.3$ ) を与えた試験片に対して、引張と圧縮の繰り返し荷重を歪幅  $\Delta e_1=0.006$  で与えたときに得られる繰り返し数 $n$ と前述の各降伏応力  $S_y$  の関係を表したものである。この図の場合、点Cの降伏応力  $S_{yC}$  と点Eの降伏応力  $S_{yE}$  は、繰り返し数の増加と共に減少傾向となる(図中の青色の破線)。次に、最も小さな予変形である  $\lambda=1.1$  の場合の、繰り返し数 $n$ と降伏応力  $S_y$  の関係を表したものが図3(b)である。この図では、繰り返しの初期の段階では、歪硬化のためにわずかに降伏応力は増加傾向になるが、繰り返し数が増加して行くと共に、減少傾向と増加傾向が互いに打ち消し合い、降伏応力が一定値に停留する傾向となる。また、この場合では、背応力(back stress 図中の緑色の破線)の変化は小さく常に一定となっていることが分かる。その理由として、予変形の値が小さい  $\lambda=1.1$  場合では異方性がほとんど発達せず、まだ等方的な硬化の段階であることが考えられる。最後に、予変形の大きさがこれらの中間である  $\lambda=1.2$  の結果を示したものが、図3(c)である。ただし、歪幅は  $\Delta e_1=0.003$  である。この歪幅が小さい場合では歪幅が大きい  $\Delta e_1=0.006$  場合と比較して、繰り返しの最中に加工硬化の影響が少ないため、降伏応力の減少傾向が大きく出ていることが分かる。また、この場合には背応力(back stress)は、減少する傾向を示す。

以上の説明が、接線係数に基づく本実験の降伏応力の推定結果の傾向であるが、最後に点C, 点Eの応力に対して、従来から知られている残留歪から降伏応力を決定する耐力の結果との比較を説明する。図3(a),(b),(c)中のそれぞれの紫色のプロット点が耐力の結果を表していて、これらの図より、耐力の結果は接線係数に基づく降伏応力の結果に比べ、降伏応力値を小さく見積もってしまう傾向にあることが分かる。特に、図3(c)で、その傾向が顕著に表れる。

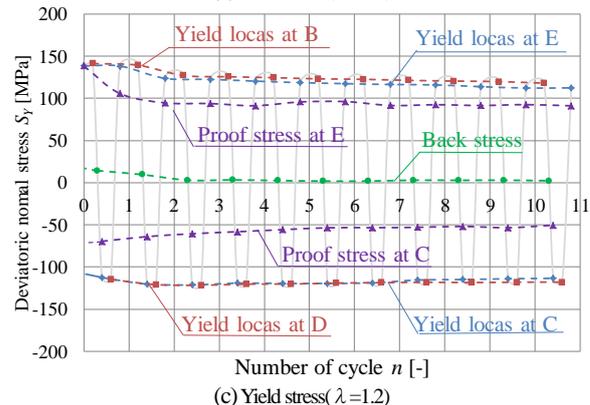
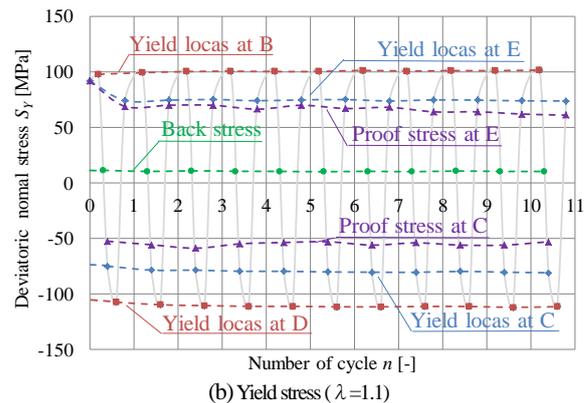
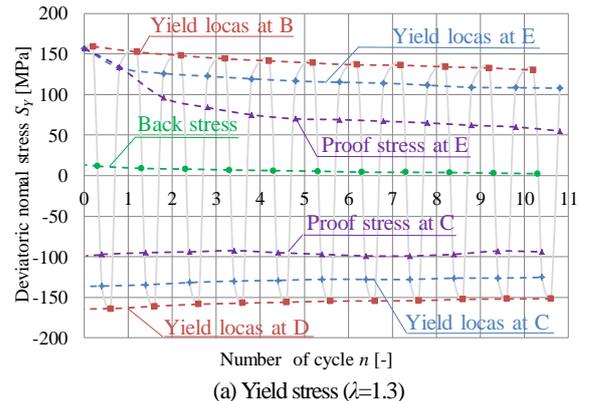


Fig.3 Relation of yield stress and the number of cycle

### 5. 結言

本研究では、試験片に大きな引張の予変形を与えた後に引張と圧縮の繰り返し荷重を加える際の各サイクルで得られる降伏応力を調べ、以下のことが明らかとなった。

- (1) 降伏応力は繰り返し数の増加と共に減少する傾向にあり、回数が多くなるにつれてこの減少傾向は小さくなり、一定値に停留していくことが明らかとなった。
- (2) 予変形量が小さい場合は、繰り返し荷重下において新たな加工硬化が起こるため、繰り返しの初期の段階でわずかに降伏応力が増加傾向にある。
- (3) 接線係数に基づく本手法の各降伏応力の結果を耐力の結果と比較することで、耐力に基づく手法では降伏応力を小さく推定してしまう傾向が明らかとなった。