

自然歪理論を用いて推定した予変形後の繰り返し荷重下での降伏応力 (引張の予変形後に得られる降伏応力と剪断の予変形後に得られる降伏応力の減衰傾向)

Yield Stress Estimated by Using Natural Strain Theory under Cyclic Load after Pre-deformation

(Decreasing Tendency of Yield Stress Obtained after Pre-deformation of Tension or Pre-deformation of Shear)

○上西 涼介¹, 内田 大樹², 加藤 保之³

*Ryosuke KAMINISHI¹, Hiroki UCHIDA², Yasuyuki KATO³

Abstract: The purpose of this study is to reveal the yield stress under cyclic loads after applying the large pre-deformation on the basis of the Natural Strain theory. The slope of tangent in the deviatoric stress and deviatoric strain diagram is adopted as the method for determining yield stress during the cyclic loads. In the present study, the decreasing tendency of yield stress with an increase of number of cycle is examined when the different type of pre-deformations, i.e., large simple shear or large uniaxial tension, are applied to the test specimens made from tough pitch copper.

1. 緒言

自然歪理論に基づき、大変形下の降伏現象を解明していくことが本研究の目的である。これまで、延性材料の中でも高純度のタフピッチ銅の試験片を使用し、大きな予変形後に一定歪幅で、繰り返し荷重を与える場合に対して、各サイクル内の降伏応力を調べてきた。

大きな予変形を加える過程では、変形の増加に伴い異方性が形成され、降伏曲面の移動や曲面の形状に変化が現れる。そのため、最初に与える予変形の変形履歴が、その後の繰り返し荷重時の降伏応力の減衰傾向に影響を及ぼすことが考えられる。

そこで本研究では、最初に与える予変形として、主軸線素が入れ換わらず剛体回転が生じない単軸引張の場合と主軸線素が入れ換わり剛体回転が伴う単純剪断の2つの場合について検討する。更に、予変形後の繰り返し荷重に関しては、予変形の変形履歴が、その後の繰り返し荷重時の降伏応力の減衰傾向に及ぼす影響を調査するため、予変形と変形様式が異なる場合として、単純剪断後に引張と圧縮の繰り返し荷重を加える場合と、単軸引張後に剪断と逆剪断の繰り返し荷重を加える場合について調査し、繰り返し荷重に伴う降伏応力の減衰傾向を明らかにしていく。

2. 予変形後の繰り返し荷重下の降伏応力

図1は、大きな予変形を加えた試験片に再度、繰り返し荷重を加える際の1サイクル目に着目して偏差主応力-偏差主歪線図を描いたものである。図中の点Bから除荷をし、再び応力を加えて再降伏する過程を図中の緑色の曲線で表している。この時、点Bの応力が明らかであることから、再降伏時の降伏応力値が既に確定しており、それは図中の点Fで表される。この点Fの近傍では、偏差主応力-偏差主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)で示す実験式に仮定する。

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

ただし、式(1)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。更に、式(1)を微分すると、

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

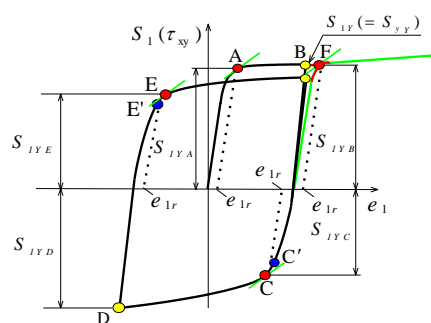


Fig1. Yield Stress in one Cycle

となり、点F上の再降伏時の接線係数が推定できる。

次に、サイクル内の降伏応力について説明する。順方向に歪を与えた直後の再降伏時の応力値については、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)を用いて表し、点Fで求めた接線係数と同一値となったところの応力、即ち図中の点Aを降伏応力 S_{1YA} と定める(図中の点Aの●参照)。次に、順方向に歪を一定歪幅で与えた後に得られる降伏応力は、点Bの除荷直前の応力 S_{1YB} で表される(図中の点Bの●参照)。更に、この状態から逆方向に荷重を加え続けた時の降伏応力は、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)を用いて表し、点Fで求めた接線係数と同一値となったところの応力、即ち図中の点Cを降伏応力 S_{1YC} と定める。更に逆方向に歪を一定幅で与えた後に得られる降伏応力は、点Dの除荷直前の応力 S_{1YD} で表される(図中の点Dの●参照)。同様に、この状態から順方向に荷重を加え続けた時の降伏応力は、点Eの応力 S_{1YE} 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Fで明らかとなっている残留歪 e_r を基準に決定するため、点C', E'の様に小さく推定される。

3. 実験方法

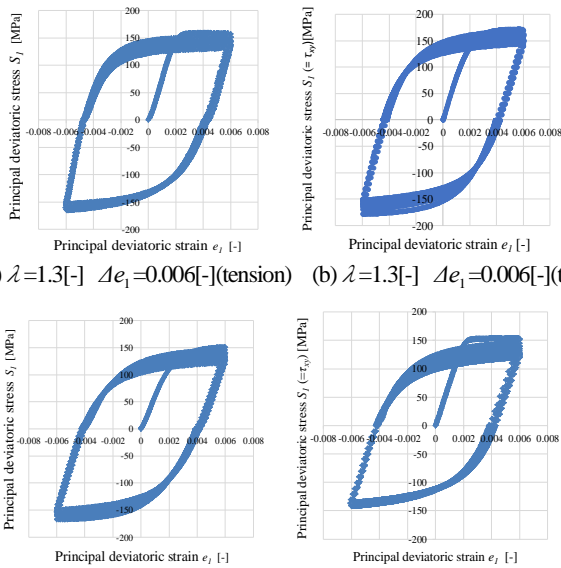
本実験では、タフピッチ銅(純度99.99%)の焼き鈍し円筒試験片を採用する。また、予変形を与える際には、実験装置に取り付けた縦変位計ならびにロータリーエンコーダを用いて標点間の伸びと回転角を計測する。次に実験条件について説明すると、本実験は大きな

予変形と、予変形後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。最初に与える引張の予変形として、ストレッチ量 $\lambda=1.2, 1.3[-]$ 、一方で剪断の予変形として、同様に $\lambda=1.2, 1.3[-]$ を与えて実験を行う。また、予変形後の順方向と逆方向の剪断または、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、歪幅を $\Delta e_1=0.006[-]$ に設定して実験を行う（ただし、繰り返し数 N は 10 回である）。そして偏差主応力-偏差主歪線図を描き、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調べる。

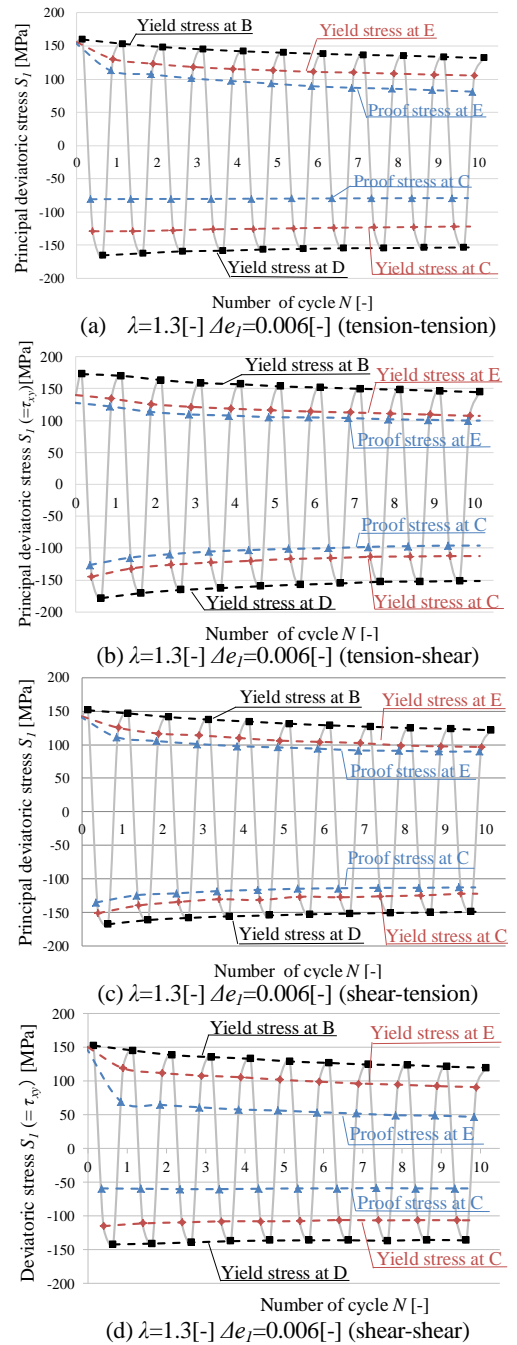
4. 実験結果と考察

図 2 (a)は、引張の予変形後に引張と圧縮の繰り返し荷重を、図 2 (d)は、剪断の予変形後に順方向と逆方向の剪断の繰り返し荷重を与えた時の偏差主応力-偏差主歪線図をそれぞれ $\lambda=1.3[-]$ の場合について表したものである。また、図 3 (a)と図 3 (d)は、繰り返し数 N と降伏応力の関係をそれぞれ表したものである。一方で、最初に与える予変形とその後の繰り返し荷重の変形様式が異なる場合について説明すると、図 2 (b)は、引張の予変形後に順方向と逆方向の剪断の繰り返し荷重を、図 2 (c)は、剪断の予変形後に引張と圧縮の繰り返し荷重を与えた時の偏差主応力-偏差主歪線図を表し、また、図 3 (b)と図 3 (c)は、それらの繰り返し数 N と降伏応力の関係を表したものである。降伏応力は繰り返し数の増加と共に減少傾向となり、その減少傾向は繰り返しの初期の段階で現れる。なお、残留歪に基づく耐力の結果は、青色の破線で描かれ、本研究で推定した接線係数を用いて求めた降伏応力 S_{lyc} と S_{lye} （図中の赤色の破線）に比べてすべての条件において小さい結果となる。

予変形と繰り返し荷重の変形様式が異なる図 3 (b)と図 3 (c)の場合では、変形様式が同一の図 3 (a)と図 3 (d)の結果と比べると、点 D の降伏応力の減少傾向が小さく、点 B の減少傾向が大きいことがわ



(a) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (tension) (b) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (tension)
(c) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (shear) (d) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (shear)
Fig.2. Principal deviatoric stress – principal deviatoric strain diagram



(a) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (tension-tension)
(b) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (tension-shear)
(c) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (shear-tension)
(d) $\lambda=1.3[-]$ $\Delta e_1=0.006[-]$ (shear-shear)
Fig.3. Change of yield stress with the cyclic load

かる。この現象は、予変形時に形成される異方性主軸の向きと、その後の繰り返し荷重の向きが同一であることに起因していると考えられる。

5. 結言

- 本研究では予変形と繰り返し荷重の変形様式が異なる場合の降伏応力を調べ、以下のことが明らかとなった。
- (1) 繰り返し数の増加とともに降伏応力は減少していく傾向にあり、繰り返しの初期にその傾向が大きく表れる。
 - (2) 残留歪に基づく耐力による方法は、接線係数に基づき推定した本手法の降伏応力に比べて小さい。
 - (3) 予変形と繰り返し荷重の変形様式が同一の場合には、順方向側の降伏応力の減少傾向が大きい。
 - (4) それらの変形様式が異なる場合には、順方向側と逆方向側の降伏応力の減少傾向は、ほぼ等しくなる。