

自然歪理論を用いて推定した予変形後の繰返し荷重下での降伏応力
 (剪断後に引張の予変形を与える場合の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 in Case of applying Pre-deformation of Tension after shear)

○大澤 侑治¹, 加藤 保之²
 * Yuji OSAWA¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: The subject of this study is to reveal the yield stress when the cyclic loads are applied after giving the large pre-deformation to the test pieces. As for the determination of yield stress in each cycle, the method by using the slope of tangent in the deviatoric stress and deviatoric strain diagram is adopted on the basis of the Natural Strain theory. In the present study, the decreasing tendency of yield stress with an increase of number of cycle is examined when the pre-deformation of tension after simple shear are applied to the test pieces.

1. 緒言

この研究の初期の段階では、高純度のタフピッチ銅の試験片を用い、最も基本的な単軸引張と単純剪断に対して、それらの予変形の変形様式とその後の繰返し荷重時の変形様式が同一の場合について、繰返し荷重の各サイクル内での降伏応力値を一定歪幅の条件下で調査してきた。また、次の研究段階では、予変形とその後の繰返し荷重時の変形様式が異なる場合、即ち、単軸引張の予変形の後に剪断と逆剪断の繰返しを行う場合についてサイクル内での降伏応力値を調査してきた。その結果として、予変形と繰返し荷重の変形様式が同一の場合では、逆方向側の降伏応力の減少傾向が小さく、順方向側の降伏応力の減少傾向は大きくなることが明らかとなり、一方で、予変形と繰返し荷重の変形様式が異なる場合には、順方向側と逆方向側で降伏応力の減衰傾向に偏りが生じないことが明らかとなって来た。

本研究では更に、予変形の履歴が繰返し荷重下の降伏現象に及ぼす影響を解明するために、本研究では、最初に剪断を与えその後引張を与える場合について検討することにする。そしてこの予変形を与えた試験片に対して、順方向と逆方向の剪断または引張と圧縮の繰返し荷重を加えてサイクル数の増加に伴う降伏応力の推移を調査する。

2. 予変形の履歴と繰返し荷重下の降伏応力

予変形を与える過程の後半で降伏曲面の異方性が形成され、その後の繰返し荷重下の降伏応力の減衰傾向に影響を与えることがこれまでの実験結果から明らかとなっている。そこで、本研究では、予変形として、図1に示す最初に引張を与えた後に剪断を加える場合について検討する。これまでの実験結果から変形経路の後半の過程(すなわち、図中の AB 間)で降伏曲面の異方性が大きく発達することが明らかになっていることを考慮すると、本研究の予変形の場合では、後半に引張を加えることを考えると降伏曲面の異方性はよ

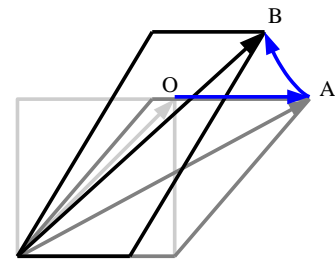


Fig.1. Deformation path for tension after shear

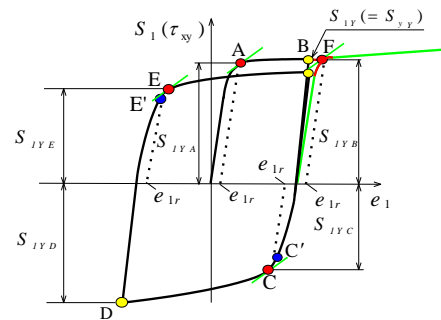


Fig.2. Yield Stress in one Cycle

り引張側に形成されることが予想される。図2は、試験片に剪断後に引張の予変形を加えた後に、引張と圧縮または順方向と逆方向の剪断の繰返し荷重を加える際の1サイクル目の偏差主応力-偏差主歪線図を模式的に描いたものである。図中の緑色の曲線は、再度荷重を加え、再降伏する過程を表している。この時、点Bの応力値が既に明らかになっていることから再負荷時の降伏応力は、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、これを式(1)のように仮定する。ただし、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、式(1)を微分すると、

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

1: 日大理工・学部・機械, 2: 日大理工・教員・機械

となり、これより点 F 上の再降伏時の接線係数が推定できる。本研究では、この接線係数と同一値となる点 C ならびに点 E を降伏応力と定めることにする(図中の●, 即ち S_{YC} , S_{YE} を参照)。

次に、順方向ならび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、除荷直前の点 B と点 D である(図中の●, 即ち S_{YB} , S_{YD} 参照)。

一方で、耐力による降伏応力は、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

本研究においては、引張と剪断を同時に作用させることのできる多軸負荷試験機を用いて実験を行う。実験で採用した試験片の材質は、延性材料の中でも特に純度の高いタフピッチ銅(純度 99.99%)である。なお、試験片には予め焼き鈍しが施されている。

また、標点間の伸びと回転角を計測する際には、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る。

次に、実験条件について説明すると、本実験は、試験片に大きな予変形を与える実験と、予変形後に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。

まず、予変形を与える実験については、剪断変形を $D_{12}=0.19[-]$ ($\varphi=34.1[\text{deg.}]$) で与えた後に、引張を $m=1.1[-]$ で与えて複合変形状態のストレッチ量が $\lambda=1.2[-]$ まで与える条件と、剪断変形を $D_{12}=0.3[-]$ ($\varphi=54.3[\text{deg.}]$) で与えた後に、引張を $m=1.14[-]$ で与えて複合変形状態のストレッチ量が $\lambda=1.3[-]$ まで与える条件の 2 通りである。

また、予変形後の引張と圧縮、または順方向と逆方向の剪断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 $\Delta e_1=0.006[-]$ に設定して繰り返し数が $N=10$ まで実験を行う。前述の方法に従って、繰り返し数 N の増加に伴う図 2 中の点 B, C, D, E の降伏応力の推移を調べる。

4. 実験結果と考察

図 3 は、剪断後に引張の予変形(図 1 の経路)を $\lambda=1.3[-]$ まで与えた後に、繰り返し荷重を加えた際に得られる偏差主応力-偏差主歪線図ならびに偏差主応力と繰り返し数 N の関係を示している。ここで、図 3 (a) が、順方向と逆方向の剪断の繰り返し荷重を歪幅 $\Delta e_1=0.006[-]$ で与えた場合の結果を、一方で図 3 (b) が、引張と圧縮の繰り返し荷重を歪幅 $\Delta e_1=0.006[-]$ で与えた場合の結果をそれぞれ示している。これらの図の黒のプロットが点 B と点 D の降伏応力、赤のプロットが接線係数を用いて推定した点 C と点 E の降伏応力、青のプロットが残留歪に基づく耐力による点 C' と点 E' 降伏応力をそれぞれ示している。それぞれの降伏応力の傾向として、繰り返しの初期に減少傾向が大きく表れ、繰り返し数の増加と共に降伏応力は一定値に停留することが分かる。

また、青のプロットの残留歪に基づく耐力による降伏応力は、赤のプロットの接線係数を用いて推定した本研究の降伏応力に比べて小さい結果となる。

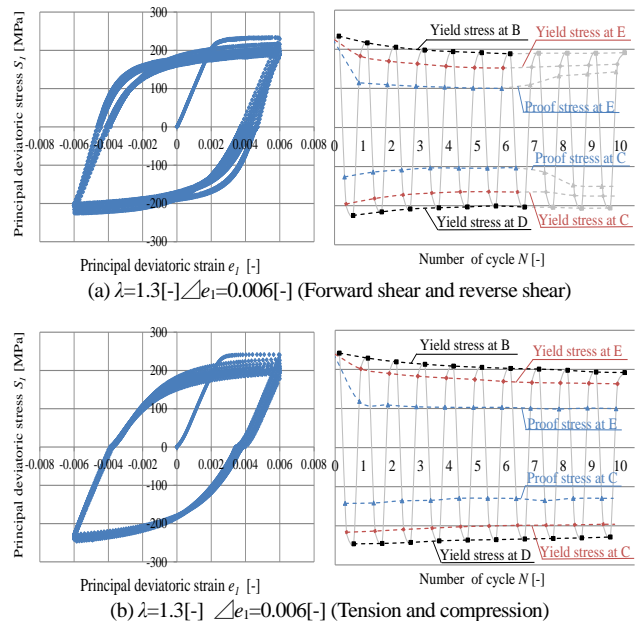


Fig.3. Yield stress under cyclic loads (Pre-deformation of tension after shear)

図 3 (a) の順方向と逆方向の剪断の繰り返し荷重を与える場合では、点 B と点 D の降伏応力(図 3 参照)の減少量がほぼ同じであり、減少傾向に偏りが生じていないことがわかる。一方で、図 3 (b) の引張と圧縮の繰り返し荷重を与える場合では、点 D の降伏応力の減少傾向は、点 B の減少傾向に比べて小さいことが分かる。これらの実験では、予変形の後半で引張を与える場合であり、その引張を与える過程で降伏曲面の異方性が大きく形成されたため、これらの点 D の降伏応力の減少傾向に差異が生じたと考えられる。なお、予変形の後半の変形様式と、繰り返し荷重の変形様式が異なる図 3 (a) の場合では、7 サイクル以降で座屈が生じ、減衰傾向が評価できないためこの図では灰色の線で表示している。

5. 結言

本研究では試験片に剪断後に引張の予変形を与えた後に、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加えた際のサイクル内の降伏応力を調査し、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が、繰り返し数の増加と共に降伏応力は、一定値に停留する。
- (2) 予変形を与える過程の後半の変形様式と繰り返し荷重の変形様式が同一の引張と圧縮の繰り返し荷重を与える場合には、サイクル内の点 D の降伏応力の減少傾向が点 B のそれに比べて小さくなり、一方で変形様式が異なる順方向と逆方向の剪断の繰り返し荷重を与える場合には、点 D と点 B の降伏応力がほぼ同じ減少傾向となる。
- (3) 予変形の後半の変形様式と、繰り返し荷重の変形様式が異なる場合では、7 サイクル以降で座屈が生じる。
- (4) 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。