K5-10

自然歪理論に基づく大きな単純剪断変形後の繰り返し荷重下の降伏応力
（予変形の大きさと歪幅の影響について）

Yield Stress based on Natural Strain Theory measured under Cyclic Load after applying Pre-deformation of Large Simple Shear

(Effect of values of pre-deformation and strain amplitude)

○加瀬 一世[1], 加藤 保之[2]
Issei KASE [1], Yasuyuki KATO [2]

Abstract: This paper describes the variation of yield stress measured under cyclic load after applying the large simple shear to the specimens. Especially, the change of yield stress with an increase of cycle number is examined under conditions of different size of the pre-deformation of simple shear and the different size of the strain amplitude. Moreover, the experimental results in the present study are compared with the results from the conventional proof stress.

１．緒　言

繰り返し荷重を加える際の降伏現象の研究は，古くから行なわれている．しかし，その多くの研究は微小変形を対象としたものであり，大変形における繰り返し荷重下の降伏応力については，その詳細は必ずしも明らかではない．一般に延性材料では，歪硬化により応力が増加するため，大きな予変形を加えた後の降伏応力（後続降伏応力）は，初期降伏応力に比べてかなり大きな値となる．また，大きな予変形を受けることで，材料内には異方性が形成され，Bauschinger 効果のように，予変形を加えた側の降伏応力の値に比べ，予変形と逆側の降伏応力は小さな値となる．

本研究では，延性材料を研究対象にして，大きな予変形を与えた後に一定歪幅で繰り返し荷重を加える際の各サイクル内の降伏応力を調査する．予変形を与えた直後では上述のように，材料内には異方性が形成されるが，その後，繰り返し荷重を加える過程では，材料は軟化し，サイクル内の降伏応力には，減少傾向が表れる．本研究では，予変形の大きさを種々に変えて，各サイクル内の降伏応力の推移を調査することで，予変形時に形成された降伏応力値の偏りが，その後，繰り返し荷重を加えることで，サイクル数の増加に伴い変化する様子を調べる．

本研究では，延性材料の中でも純度の高いタフピッチ銅の試験片を用い，主軸が回転するだけでなく，主軸線素が入れ換わる単純剪断の予変形に着目し，試験片に大きな予変形を与えた後に一定歪幅で，順方向と逆方向の剪断の繰り返し荷重を加えた時の，各サイクル内の降伏応力を調べる（この降伏応力の決定方法としては，接線係数に基づいて降伏応力を推定する方法を採用する）．そして，剪断の予変形量を種々に変え，またサイクル内の歪幅を変えて実験を行い，異なる予変形量と歪幅の下で，繰り返し数に伴う降伏応力の変化を調査する．

２．繰り返し荷重下の降伏応力の決定方法

図１は，大きな剪断の予変形を与えた後に，再び順方向と逆方向の剪断荷重を繰り返し加えた状態を模式的に示したものである．図２は更に，この図の繰り返し荷重の１サイクル目に着目して偏差主応力－偏差主歪線図を拡大して描いたものである．予変形の最終応力値より，再負荷時の降伏応力はすでに確定されており，図中の点 A(●)で表される．点 A の近傍では偏差主応力-偏差主歪線図は緩やかな曲線を描くが，その緩やかな曲線を式（1）に示す実験式で表す．

$$S_1 = a\left(1 - exp\left(be_1\right)\right) + ce_1 + d \qquad (1)$$

ただし，式中の係数 a，b，c，d の値は，この曲線が実際の実験値に一致するように，レーベンバーグ・マルカート法（LM 法）を用いて決定する．

ここで，式（1）を微分すると，

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

となり，これより点 A 上の再降伏時の接線係数を推定することができる．更に，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．

$$h = \frac{2G}{\frac{dS_1}{de_1}} - 1 \qquad (3)$$

ただし，式（3）中の G は剪断弾性係数である．

次に，剪断歪を一定歪幅で与えた後に得られる順方向側の降伏応力は，点 B の除荷直後の応力 S_{1YB} で表される（図中の点 B の●）．この状態から逆向きの剪断荷重を加え続けた逆剪断側での降伏応力は，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 A で求めた接線係数と同一値となったところの応

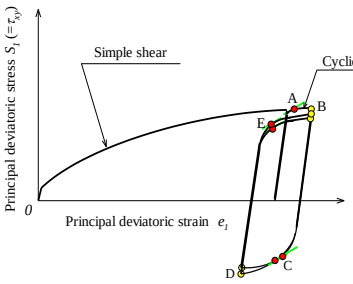


Fig.1 Cyclic load after pre-deformation

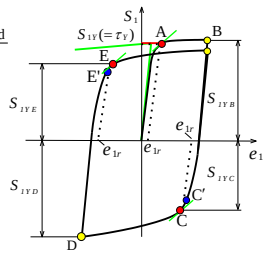


Fig.2 Yield stress in one cycle

1: 日大理工・学部・機械，2: 日大理工・教員・機械

力, 即ち図中の点Cを降伏応力S_{1YC}と定めることにする.

更に逆向きの剪断応力を一定歪幅で与えた後に得られる降伏応力は, 点Dの除荷直後の応力S_{1YD}で表される（図中の点Dの●）．同様に，この状態から順方向に剪断荷重を加え続けて得られる順方向側の降伏応力は，上述の点Cの場合と同様に求めることができ，それは点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Aで明らかとなっている残留歪e_rを基準に決定されるため, 点C', E'の様に小さく推定される.

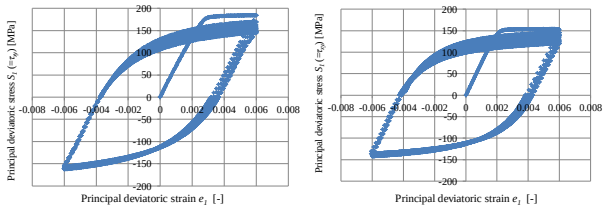
3. 実験方法

3-1 実験装置　本実験では，純度の高いタフピッチ銅（純度 99.99%）の焼き鈍し円筒試験片を採用する．また，剪断の予変形を与える際には，標点部に抱かせた円盤形状の治具に細いワイヤーを張り，ロータリーエンコーダーの回転角から試験片の標点間で発生する捩れ角を測定する.

3-2 実験方法　本実験は，大きな剪断の予変形と，予変形後の繰り返し剪断を与える実験の２段階から構成されている．まず，剪断の予変形の実験では，４通りの異なるストレッチ量λ=1.2，1.3，1.6，1.9[-]を与える．また，予変形後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，順方向と逆方向の繰り返し荷重の歪幅をΔe_1=0.006[-]とΔe_1=0.003[-]（ただし，予変形λ=1.2，1.3[-]）に固定して調べる（ただし，繰り返し数Nは10回である）.

4. 実験結果

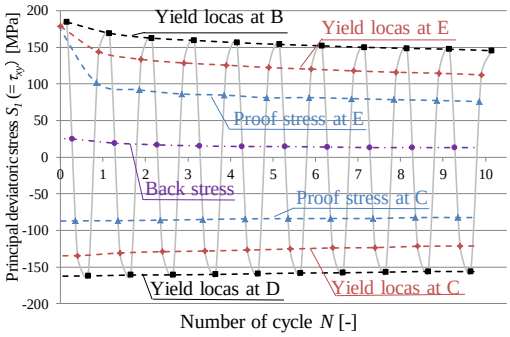
図３は，予変形後に繰り返し荷重を加えて得られる偏差応力-偏差歪線図の一例を示したものある．ここで，図３（a）は，予変形量λ=1.9[-]で歪幅Δe_1=0.006[-]，図３（b）は，予変形量λ=1.3[-]で歪幅Δe_1=0.006[-]を与えた場合の結果をそれぞれ表している．また，図４（a）と（b）は，予変形量λ=1.9とλ=1.3[-]に対して，繰り返し数Nと降伏応力の関係を表したものである．降伏応力S_{1yC}とS_{1yE}は，繰り返し数の増加と共に減少傾向となり（図中の赤色の破線），これらの結果を比較すると予変形量の小さいλ=1.3[-]の条件では，順方向の剪断側の降伏応力の減少傾向がより緩やかに減少し，停留していることが分かる．また，逆方向の剪断側の降伏応力は順方向の剪断側と比較すると減少量は非常に小さいことが確認できる.



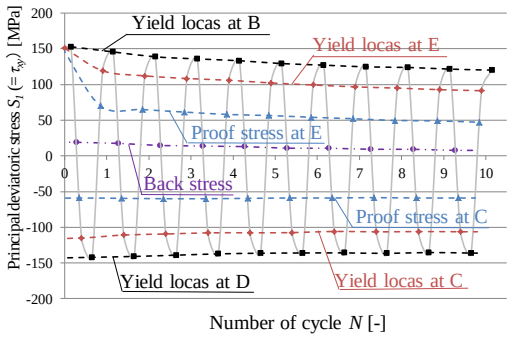
(a) λ=1.9[-]　Δe_1=0.006[-]　　(b) λ=1.3[-]　Δe_1=0.006[-]

Fig.3. Principal deviatoric stress – principal deviatoric strain diagram

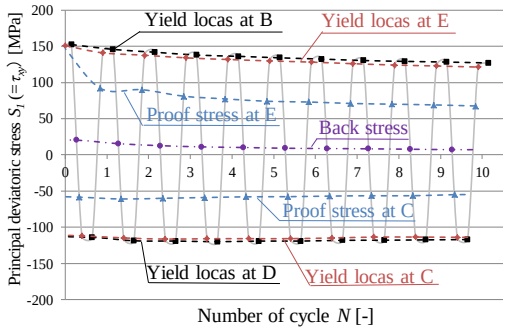
次に，予変形λ=1.3[-]に対して歪幅Δe_1=0.003[-]を与えた結果を図４(c)に示す．この図より，繰り返しの初期の段階において逆方向の剪断側の降伏応力はわずかに増加し，その後停留する傾向が分かる.



(a) λ=1.9[-]，Δe_1=0.006[-]



(b) λ=1.3[-]，Δe_1=0.006[-]



(c) λ=1.3[-]，Δe_1=0.003[-]

Fig.4. Change of yield stress with the cyclic load

6. 結　言

本研究では試験片に大きな剪断の予変形を与えた後に剪断の繰り返し荷重を加える時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) 繰り返し数の増加とともに降伏応力は減少傾向にあり，繰り返し回数が増えるにつれてその減少傾向は小さくなり，最終的に停留する.

(2) 歪幅が小さい場合には，歪幅が大きい場合に比べて，繰り返しの初期の段階において逆方向の剪断側の降伏応力は僅かに増加し，その後停留する傾向を示す.

(3) 残留歪に基づき降伏応力を求める耐力による方法は，接線係数に基づいて推定した降伏応力に比べて低い.