

自然歪を用いた大変形弾塑性解析
 (単純剪断後の単軸引張の予変形で生成される降伏曲面の形状と異方性の発達状況について)

Elasto-plastic Analysis for Large Deformation using Natural Strain

(Yield Surface Shape and Development of Anisotropy generated by Pre-deformation of Uniaxial Tension after Simple Shear)

○根岸 勇典¹, 加藤 保之²
 Yusuke NEGISHI¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: This paper describes the estimation-method for the shape of yield surface which is generated after applying the large pre-deformation. In our previous study, using a test piece applying the large pre-deformation of proportional loading of tension and shear, the yield stress has been estimated on the basis of the Natural Strain theory by investigating the tangent modulus of deviatoric stress and deviatoric strain curve, which is obtained by performing the experiments of proportional loading tests of tension and torsion. The anisotropy for the yield surface shape have been revealed from the results that the yield surface becomes the convex curve in the direction of the pre-deformation given. Moreover, in this paper, the shape of yield surface is examined under the different deformation history to the pre-deformation of combined loading of tension and shear, i.e., loading history of uni-axial tension after simple shear.

1. 緒言

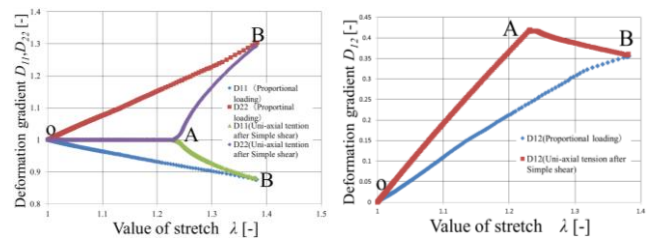
本研究の目的は、延性材料の中でも純度の高いタフピッチ銅の試験片に大きな予変形を与えた後に得られる降伏曲面の形状を調べ異方性の発達のメカニズムを解明していくことである。これまでの研究では、最も基本的な単軸引張や単純剪断、更にはそれらの複合変形の予変形を与えた後に、再度、試験片に引張と剪断を加えて応力空間内の任意の方向に比例負荷実験を行い、その偏差主応力-偏差主歪線図から降伏現象が発生する前後の接線係数を調べることで降伏応力を推定してきた。その結果、降伏曲面の形状は予変形を与えた方向に尖り、また反対方向に扁平となる傾向が表れることが明らかになってきた。また、単純剪断の予変形については単純剪断の予変形を順方向側に与えた後に、途中から逆方向側に剪断を与えて予変形の履歴を変えた実験を行い予変形の最終負荷の方位に異方性が発達することが明らかとなってきた。

本研究では、引張と剪断の複合変形の予変形に着目し、これまでの研究で行ってきた引張と剪断の比例負荷の予変形と最終変形が同一であるが、それとは異なる経路で実験を行い、予変形の履歴の影響を調べていくことにする。特に本報では、その予変形の履歴として、単純剪断を先に与え、その後、単軸引張を与える場合を検討する。

2. 予変形と予変形後の降伏応力の推定方法

上述したように本研究では、最初に単純剪断を与え、その後単軸引張を加える予変形の場合を考える。図1は、本実験の予変形(OAB)とこれまで過去研究で取り挙げた比例負荷の予変形(OB)の変形履歴の違いを変形勾配(垂直成分 D_{11} , D_{22} 並びに剪断成分 D_{12})と変形の主値 λ の関係で表したものである。

予変形の最終応力値より降伏応力は、すでに確定しているので再負荷した際の降伏時の接線係数を推定することができる。本研究では、降伏前後に発生する緩やかな



(a) Deformation gradient D_{11}, D_{22} (b) Deformation gradient D_{12}

Fig.1 Deformation history

曲線領域の偏差主応力を式 (1) に示す実験式で表し、実際の偏差主応力-偏差主歪線図上の実験値に一致するようにこれらの式中の係数 a, b, c, d の値を非線形最小二乗法すなわち LM 方で決定する。

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

更に、上式を微分して接線係数を求めると、

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

となり、ここでは降伏時の接線係数の値と同一の傾きとなったときの応力を持って降伏応力と定義する。

一方で降伏近傍の歪硬化係数 h については、次式のように表すことができる。

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

但し、式 (3) 中の G は、剪断弾性係数である。

同一の歪硬化係数 h の値を通過する点を結ぶことで、降伏曲面ならびにその近傍の h の分布を推定でき、これより異方性の発達状況を確認して行くことにする。

3. 実験方法

本実験では、大きな予変形を与えるために、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%)の

1: 日大理工・学部・機械, 2: 日大理工・教員・機械

焼き鈍し円筒試験片を採用する。また、有限変形の子変形を与える際には、実験装置に取り付けた変位計を用いて標点間の伸びを計測し、一方で、剪断変形については、試験片の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計測を行う。次に実験条件について説明すると、本実験は前節で説明した予変形を与える実験と予変形後の比例負荷実験の2段階から構成されている。最初に予変形について説明すると単純剪断をストレッチ量 $\lambda=1.16$ (剪断変形量 $D_{12}=0.3$) まで与えた後に、単軸引張の予変形を $m=1.28$ 与え、最終予変形がストレッチ量 $\lambda=1.38$ となるまで与える実験を行う。また、予変形後の比例負荷実験については、試験片に3軸ゲージを装着し、引張と捩りを同時に作用させ、応力主軸の方位を基底面から種々 (0,10,25,35,45,55,65,70,80,90,100,110,120,135,145,155,170[deg.]) に固定して実験を行う。そしてそれぞれの実験で得られた3軸ゲージの歪成分から自然歪理論に基づき主歪を求めて偏差主応力-偏差主歪線図を描き、接線係数 (歪硬化係数 h) を調べて降伏応力の値を決定し、応力空間内の降伏曲面の形状を推定する。

4. 実験結果と考察

図2は、応力空間内に予変形を与えた後に比例負荷実験を行って得られる応力を描いたものであり、①は0 (圧縮)、

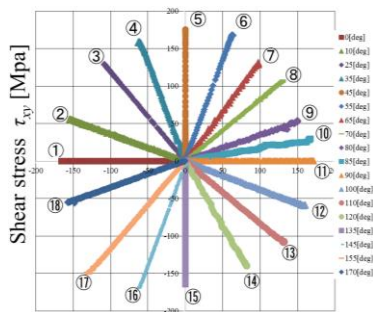
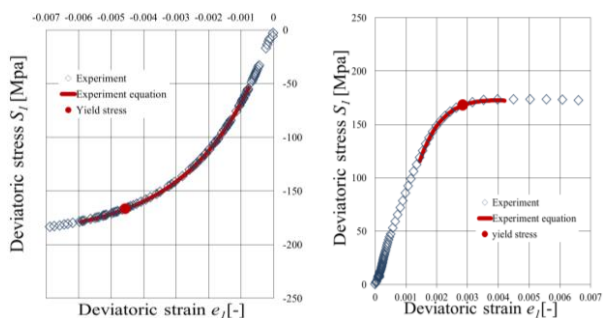


Fig 2 Stresses in each direction

②は 10, ③は 25, ④は 35, ⑤は 45 (順方向剪断), ⑥は 55, ⑦は 65, ⑧は 70, ⑨は 80, ⑩は 85, ⑪は 90 (引張), ⑫は 100, ⑬は 110, ⑭は 120, ⑮は 135 (逆方向剪断), ⑯は 145, ⑰は 155, ⑱は 170 [deg.] である。

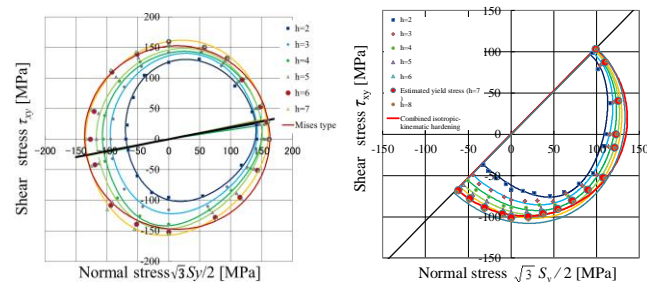
次に図3の (a), (b), (c), (d) は、これらの中から一例として①, ⑤, ⑪, ⑮に対して偏差主応力-偏差主歪線図を描き、各方位の降伏応力の推定結果 (プロット●) を描いたものである。予変形の最終状態で引張を与えていることから、⑩ (90 [deg.]) の方位である (c) のグラフの降伏時の曲線が切り立ち、⑤ (45 [deg.]), ⑮ (135 [deg.]), ① (0 [deg.]) の順に降伏の直前に緩やかな曲線を描く傾向が大きくなるのがこれらの図より分かる。更に歪硬化係数を求め、①から⑱迄のすべての方位の降伏応力を推定し、同一の h の値を連ねて描いた曲線の結果を図4 (a) に示す。この図より 90 [deg.] の近傍では分布曲線は密集し、 h は切り立った分布になっているのに対し、0 [deg.] 側に近づくほど、分布曲線の間隔は広くなり緩やかな分布となっていることから、異方性の発達が確認できる。一方で順方向の剪断である 45 [deg.] に比べ、逆方向の剪断である 135 [deg.] 側の降伏応力は小さな値になることから、最初の剪断の予変形の段階でも異方性が発達していることが確認できる。なお、図中の赤のプロット (●) が接線係数に基づき、決定した降伏曲面の推定形状を表している。

図4 (b) は、これまでの研究で行ってきた引張と剪断の比例負荷の予変形の結果であり、65 [deg.] 方向に尖りが出るのに対して変形履歴を変えた本実験の結果 (図4 (a)) は上述したように尖りの傾向が予変形の最終方向である 90 [deg.] 側に生じていることから降伏曲面の形状の異方性は予変形の履歴に依存することが確認できる。



(a) Principal axis 0 [deg.] (b) Principal axis 45 [deg.] (c) Principal axis 90 [deg.] (d) Principal axis 135 [deg.]

Fig.3 Principal stress- principal strain diagram



(a) Tension after shear (b) Proportional loading

Fig.4 Distribution of h and Yield Surface

5. 結言

本研究では、変形履歴が降伏曲面の形状の異方性に及ぼす影響を調べるために単純剪断の後に単軸引張の予変形を与えて降伏曲面の形状を調べ、2 段階目の引張の予変形の方に異方性の傾向が大きくあらわれたことから、降伏曲面の形状の異方性は変形の履歴に依存していることが明らかとなった。

今後の展望としては、引張と剪断の変形の履歴を逆にした単軸引張の後、単純剪断の予変形の場合に対しても更に検討して行く予定である。