

自然歪を用いた大変形弾塑性解析
(単軸引張後の剪断の予変形で生成される降伏曲面の形状について)
Elasto-plastic Analysis for Large Deformation using Natural Strain
(Yield Surface Shape generated by Pre-deformation of Shear after Uniaxial Tension)

○今井 功一郎¹, 加藤 保之²
 Koichiro IMAI¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: The shape of the yield surface generated under a large deformation is investigated based on the Natural Strain theory. In our previous study, using a test piece applying the large pre-deformation of tension after shear, the shape of yield surface has been estimated by investigating the tangent modulus of deviatoric stress and deviatoric strain curve. Since the yield surface becomes the convex near the tension side, which the pre-deformation is lastly applied, it has been confirmed that the development of anisotropy in the yield surface is dependent on the loading history of pre-deformation. Moreover, the shape of yield surface, which is generated under the different type of pre-deformation, i.e., loading-history of shear after uni-axial tension, is estimated in this paper.

1. 緒言

本研究の目的は、自然歪理論に基づき大変形下の降伏曲面の形状を調べ、変形と共に発達する異方性のメカニズムを解明することである。これまで最も基本的な単軸引張や単純剪断、そしてそれらの複合変形の予変形を純銅の試験片に与えた後に再度引張と剪断を試験片に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前後の接線係数を調べ降伏応力の値を推定してきた。特に前報の研究では、予変形の履歴が降伏応力の形状に及ぼす影響を明らかにするために、引張と剪断を同時に加える比例変形の予変形と最終変形状態が同一となる条件で、最初に単純剪断を与え、その後、引張を与える予変形に対して降伏曲面の形状を調べ異方性の発達を調査してきた。

本研究では更に、予変形の剪断と引張の順序を変えて、最初に単軸引張を与えた後に途中から剪断を与える予変形の場合に着目し、負荷の履歴の異なる予変形の条件下で降伏曲面の形状を調べることにする。そして、前報の研究で既に明らかにしてきた単純剪断後に引張を与える予変形で得られる降伏曲面の形状と比較することで異方性の発達状況を考察する。

2. 予変形の変形経路について

図 1 は、予変形の変形履歴の違いを変形勾配と変形の主値 λ の関係で表したものである。図 1 (a) は、変形勾配の垂直成分 D_{11} , D_{22} を、また、図 1 (b) は、変形勾配

の剪断成分 D_{12} をそれぞれ表している。ここで、それぞれの図中で、変形経路 (O→B) が引張と剪断を同時に加える複合変形の予変形の経路を、(O→A→B) が、単純剪断の後に引張を与えた予変形の経路を、そして、(O→C→B) が、本実験の予変形の変形経路、即ち、単軸引張後に剪断の予変形を表している。

3. 接線係数に基づく降伏応力の推定法

予変形の最終応力値より、降伏応力を決定することが可能であり、その点を通過する偏差主応力-偏差主歪線図の接線係数もまた決定することができる。そこで、本研究では、降伏曲面の形状を決定するために予変形後に行う比例負荷実験の偏差主応力-偏差主歪線図の降伏前後の緩やかな曲線領域の偏差主応力を式 (1) に示す実験式で表すことにする。ただし、係数 a , b , c , d は LM 法 (非線形最小二乗法) を用いて決定する。

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

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、この値が予変形から既定された降伏時の接線係数と一致するときの応力を降伏応力と定義する。

一方で降伏近傍の歪硬化係数 h は、式 (3) となる。

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

但し、式中の 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 の分布が推定できる。

4. 実験方法

本実験で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%) の焼き鈍し円筒試験片を採用する。また、有限変形の予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

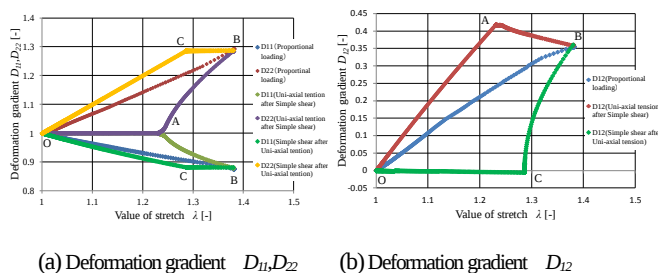


Fig.1 Deformation history

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、本実験は以下の予変形と予変形後の比例負荷の2段階の実験から構成されている。まず予変形については、単軸引張の予変形をストレッチ量 $\lambda=1.28$ まで与えた後に、剪断変形を最終状態がストレッチ量 $\lambda=1.38$ (剪断変形量 $D_{12}=0.36$) となるまで与える実験条件であり、それらの最終変形がすべての試験片に対して同一値となる様に予変形を与える。次に、予変形後の比例負荷実験については、3軸ゲージを試験片に装着し、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) を調べて降伏応力を決定し、降伏曲面の形状を推定する。

5. 実験結果と考察

図2は、引張 ($\lambda=1.28$) からストレッチ量が $\lambda=1.38$ まで剪断 ($D_{12}=0.36$) の予変形を与えた後の比例負荷実験で得られる応力を応力空間内に描いた実験結果である。

次に図3は、これらの中から一例として0, 45, 90, 135 [deg.] に対しての偏差主応力-偏差主歪線図を描き、各方位の降伏応力 (●), また45 [deg.] に対しては降伏点の接線 (—) を示したものである。

更に、歪硬化係数 h を求め、①から⑱迄のすべての方位の降伏応力を推定した結果を図4 (a) に示す。また、この図には、降伏曲面の内部の接線係数を調べて、同一の h の値を連ねて描いた曲線が示されている。45 [deg.] 側では、分布曲線は密集し、 h は切り立った分布になるのに対し、135 [deg.] 側では、分布曲線の間隔は広くなり緩やかな分布となっている。特に h の値が低い領域でその傾向が顕著に表れていることから、異方性が形成されていることがわかる。また、図4 (b) に示すように本手法で推定した降伏応力 (●) は移動と膨張を考慮した修正Mises型の真円 (図中の赤の線) の形状に近いのに対し、耐力 (●) に基づく推定方法では予変形の最終負荷と逆方向側 (135 [deg.] 側) で降伏応力の値を低く推定してしまい、降伏曲面の形状が予変形の負荷と逆方向でやや扁平の傾向を示す。

前報の単純剪断の後に単軸引張を与える予変形の経路で得られる降伏曲面の結果は、予変形の最終状態が引張であるため、引張側の近くで分布曲線は密集し、圧縮側では、分布曲線の間隔は広くなり緩やかな分布になった。したがって、本実験の結果と前報の結果から、歪硬化が急激に増大する初期の1段階目の予変形の過程では、まだ等方的な性質であり異方性があまり発達していないのに対して、既に歪硬化が進行した2段階目の予変形の過程で、異方性が大きく発達することが明らかとなった。

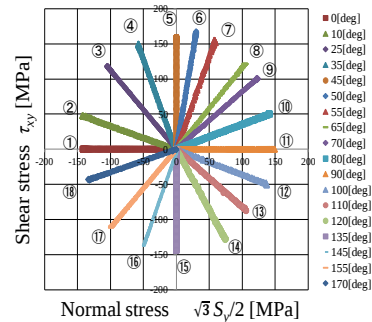
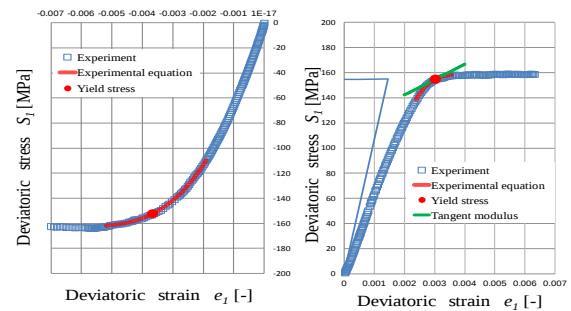
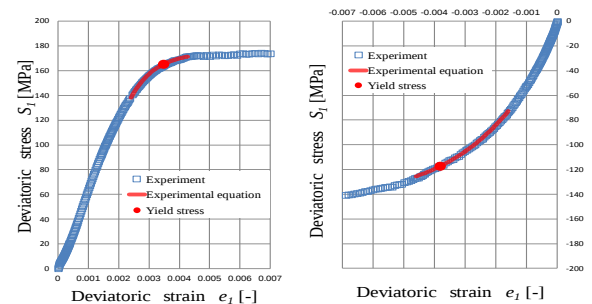


Fig.2 Stresses in each direction



(a) Principal axis 0 [deg.]

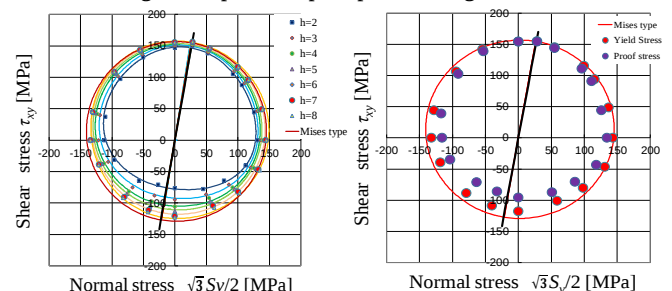
(b) Principal axis 45 [deg.]



(c) Principal axis 90 [deg.]

(d) Principal axis 135 [deg.]

Fig.3 Principal stress-principal strain diagram



(a) Distribution of h and Yield Surface

(b) Comparison of Yield Surface

Fig.4. Shape of Yield Surface

6. 結 言

単軸引張後に剪断の予変形を与えて得られる降伏曲面の形状を調べ、以下のことが明らかとなった。

- (1) 予変形の最終負荷方向である剪断方向に異方性が表れたことから、最終変形の履歴に依存して異方性が発達する。
- (2) 残留歪に基づく従来の耐力による決定方法は、予変形の最終負荷方向側では本手法の結果とあまり差異が認められないが、逆方向側では、耐力の結果が本手法の結果に比べて低い値となり降伏曲面の扁平化の傾向がより大きく表れる。