

自然歪を用いた大変形弾塑性解析
(引張と剪断の比例負荷の予変形後に得られる降伏曲面について)

Large Deformation Analysis using Natural Strain

(Yield Surface obtained after Pre-deformation of Proportional Loading for Large Tension and Shear)

○山本 真輝人¹, 大塚 悠司², 風間 晶博², 加藤 保之³

Makito YAMAMOTO¹, Yuji OTSUKA², Akihiro KAZAMA², Yasuyuki KATO³

Abstract: In our previous report, the distribution of strain hardening modulus h around the yield surface has been investigated based on the Natural Strain theory by using the specimens which is given the large pre-deformation of uni-axial tension or simple shear. And, the shape of the yield surface has been estimated by examining the slope of the tangent to the deviatoric stress-deviatoric strain curves. In this report, the shape of the yield surface, which is obtained after giving the pre-deformation of proportional loading for tension and shear, is estimated by examining the tangential modulus in various directions in the stress space.

1. 緒言

物体内の同一の線素に着目した歪表示であり、歪の加法則が成立する自然歪理論を用いて、これまでの研究では、単軸引張または単純剪断の予変形を与えた後に得られる降伏曲面の形状を調べて、異方性の発達状況を明らかにしてきた。しかしながらこれまで、主として単軸状態の予変形に対して研究が行われ、それらの複合変形に関しては、まだ検討を行っていなかった。

そこで本報では、引張と剪断の比例負荷の予変形を与えた試験片に対して降伏曲面の形状を調べることにする。ここでは、予変形を与えた試験片に対して応力空間内の任意の方向に比例負荷を加えて得られる偏差主応力-偏差主歪線図の接線係数から、降伏曲面近傍の歪硬化係数 h の分布を求め、更に降伏応力の値を推定する。

2. 歪硬化係数 h の算出と降伏曲面の推定方法

引張と剪断の比例負荷の予変形を与えた試験片に対し、再度、引張と剪断の比率を種々に変えて比例負荷実験を行い、それらの偏差主応力-偏差主歪線図の接線係数から歪硬化係数 h ならびに、降伏応力の値を決定する方法について述べる。図 1 は、一例として、予変形後の比例負荷実験の中で、応力主軸の方位が 65[deg.] (すなわち、予変形の方位)と、155[deg.] (すなわち、予変形の方位と逆方向) 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。この図のように降伏の直前に偏差主応力-偏差主

歪線図は、緩やかな曲線を描くため、降伏応力を明瞭に決定することはできない。そのため一般には、残留歪(図中の e_{r1}) の値をある値に定めて降伏応力を決定する耐力による方法がとられている。しかし、この降伏応力の決定方法では、予変形の方位と逆方向(応力主軸の方位が 155[deg.] 側では、更に緩やかな曲線となり、図中の C' 点のように降伏応力の推定値が小さな値となってしまう現実の降伏の現象を的確に表現しているとはいえない。

そこで本研究では、上述の緩やかな曲線領域の偏差主応力を式 (1) に示す実験式で定式化し、

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

これを微分して、曲線上の接線係数を求めると、

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

となり、予変形後の比例負荷実験の降伏曲面近傍の歪硬化係数 h は次式のように表すことができる。

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

この歪硬化係数の値が予変形の降伏応力から推定したある値以上になった時の応力をもって、図 2 中の各方位の降伏応力と定義することにする(図中のプロット●)。

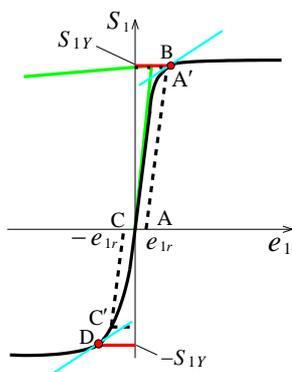


Fig.1 Deviatoric stress-deviatoric strain curve

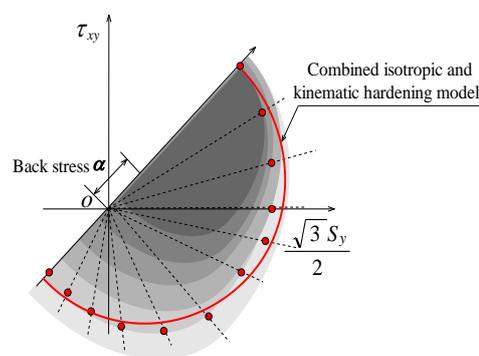


Fig.2 Boundary of the yield locus

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%）の焼き鈍し円筒試験片を採用している。また、予変形を与える際には実験装置に取り付けた変位計から標点間の伸びを計測し、一方で剪断変形の測定に関しては、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。

本実験は、大きく 2 つの実験から構成されている。最初に引張と捩りを同時に作用させて試験片に比例負荷の予変形（応力主軸 65[deg.]）を与える実験を行う。ただし、予変形の大きさはすべて同一であり、変形の主値が $\lambda_1 = 1.39$ （引張変形量 $m = 1.30$, 剪断変形量 $D_{12} = 0.35$ ）となるまで与える。次に予変形を与えた試験片に 3 軸ゲージを装着し、引張と捩りを同時に作用させて、応力主軸の方位を基底面から種々の角度（65,70,80,90,95,100,110,115,120,125,130,135,140,145,150,155[deg.]）に固定して比例負荷実験を行う。これらの方位で測定された 3 軸ゲージの歪成分から自然歪理論に基づいて主歪を求め、偏差主応力-偏差主歪線図を描いて前述の方法に従っ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。更に、その結果を従来の耐力に基づく推定結果と比較する。

4. 実験結果と考察

図 3 は、予変形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ものである。①は 65[deg.]（予変形の方位）、②は 70[deg.]、③は 80[deg.]、④は 90[deg.]（単軸引張）、⑤は 95[deg.]、⑥は 100[deg.]、⑦は 110[deg.]、⑧は 115[deg.]、⑨は 120[deg.]、⑩は 125[deg.]、⑪は 130[deg.]、⑫は 135[deg.]（単純剪断）、⑬は 140[deg.]、⑭は 145[deg.]、⑮は 150[deg.]、⑯は 155[deg.]（予変形と逆方向）のそれぞれ方位の予変形の実験結果を示している。次に一例として、これらの中から①,④,⑯の偏差主応力-偏差主歪線図を描いたものが図 4(a),(b),(c)である。なお、図中のプロット（●）が 2 章の方法で求めた降伏応力の推定値である。

次に、歪硬化係数を式(3)より求め、①から⑯迄のすべての方位に対して降伏応力を推定した結果を図 5 内のプロット（●）で示す。また、この図には、歪硬化係数を調べて、同一の h の値を連ねて描いた曲線が示されている。①の方位、すなわち 65[deg.]側では、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、⑯の方位、すなわち 155[deg.] 側では、分布曲線の間隔は広く緩やかな分布となり応力空間内で異方性が形成されていることがわかる。更に、従来の耐力の推定結果と比較したものを図 6 に示す。この図から h の値が逆方向の 155[deg.] 側に近づくにつれて、耐力を用いた推定値が本手法の結果よりも低い値となり、両推定結果に差異が表れる。

5. 結言

本報では引張と剪断の複合変形の予変形に対して降伏曲面の形状を調べてきたが、今後は、予変形の経路を変えた場合に対しても更に解明していく予定である。

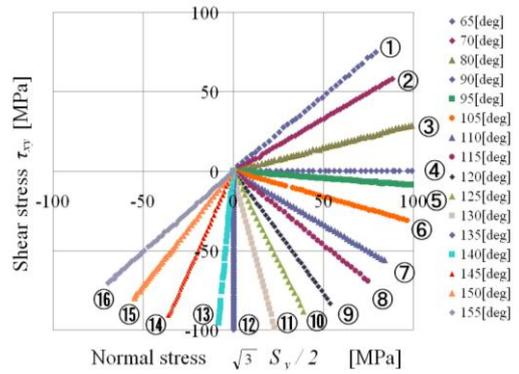
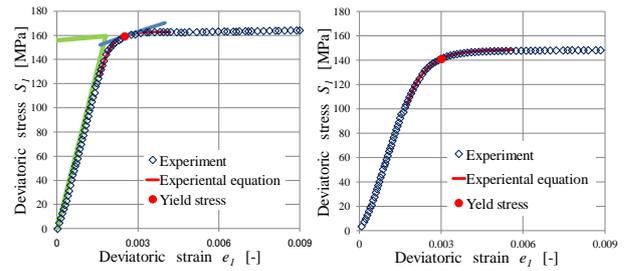
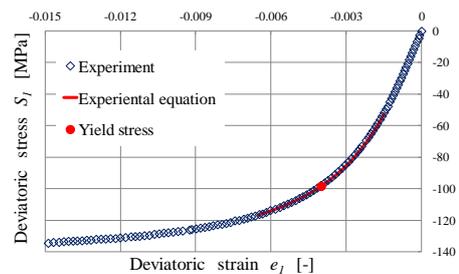


Fig.3. Stresses in each direction



(a) 65[deg.]

(b) 90[deg.]



(c) 155[deg.]

Fig.4. Principal stress – principal strain diagram

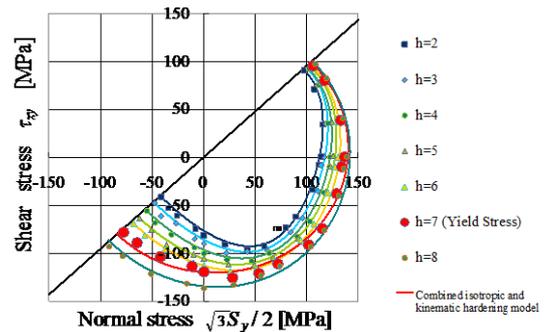


Fig.5 Estimation of yield surface and distributions of h

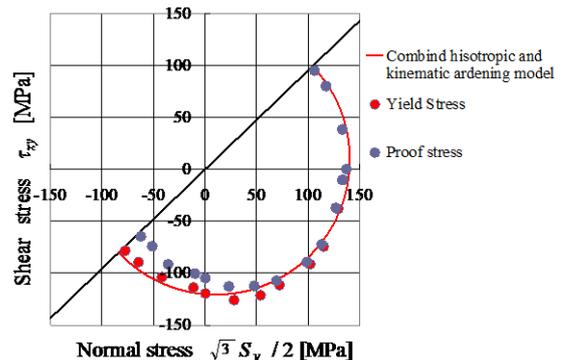


Fig.6 Comparison of estimated yield stress