

K5-70

自然歪を用いた大変形弾塑性解析  
(逆剪断の予変形後に得られる降伏曲面と異方性の発達について)

Elasto-plastic Analysis for Large Deformation using Natural Strain

(Yield Surface obtained after Pre-deformation of Reversed Simple Shear and Development of Anisotropy)

○今西 裕之<sup>1</sup>, 山本 真輝人<sup>2</sup>, 加藤 保之<sup>3</sup>

Hiroyuki IMANISHI<sup>1</sup>, Makito YAMAMOTO<sup>2</sup>, Yasuyuki KATO<sup>3</sup>

Abstract: In the previous report, using the Natural Strain theory, the shape of yield surface and the distribution of the strain hardening modulus  $h$  around the yield surface have been examined by conducting the proportional loading tests for tension and torsion after giving the pre-deformation of uni-axial tension. In this paper, the shape of the yield surface, which is obtained after giving the pre-deformation of large simple shear, is estimated by examining the strain hardening modulus  $h$  in the stress space. Especially, the anisotropy of the yield surface is investigated by changing the direction of the pre-deformation of simple shear.

1. 緒言

本研究では、大きな変形を加えた後に形成される降伏曲面の形状を研究テーマに取り上げ、自然歪理論に基づいて、変形に伴って生じる降伏曲面の異方性の発達状況を調べて行くことにする。大きな予変形を与えた試験片に対して、その後、応力空間内の任意の方位に引張と剪断の比率を変えて比例負荷実験を行い、降伏曲面近傍の偏差主応力-偏差主歪線図の接線係数の値を調べる。そして、予変形よりあらかじめ既定されている降伏時の接線係数の値に基づき各方位の降伏応力の値を決定して降伏曲面の形状を推定する。特に、本報では変形に伴い剛体回転が発生する単純剪断の予変形に着目し、単純剪断の予変形を順方向と逆方向に与えて調べることで、予変形の履歴と異方性の発達状況の関係を明らかにする。

2. 単純剪断の予変形

予変形の履歴については、単純剪断の予変形を順方向側に図1中の点Aすなわちストレッチ量 $\lambda=1.16$ (剪断変形量 $D_{12}=0.3$ )まで与えた後、途中から逆方向側に図1中の点Bすなわち $\lambda=1.4$ ( $D_{12}=-0.68$ )まで剪断を与える。これらの予変形を与えた試験片に対して、応力空間内の任意の方位に引張と剪断の比率を変えて比例負荷実験を行い、その降伏曲面近傍の偏差主応力-偏差主歪線図の接線係数の値を調べる。

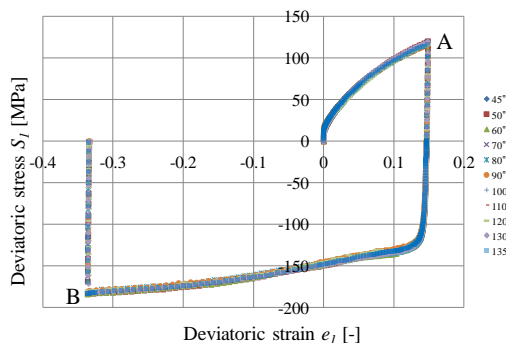


Fig.1 Deviatoric stress - Deviatoric strain diagram

3. 降伏曲面の形状の推定方法

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。そこで本研究では、降伏曲面の形状を決定するために、降伏前後に発生する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。

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

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、これより降伏時の接線係数を推定することができる。一方で歪硬化係数  $h$  についてはこの降伏時の接線係数を用いて式(3)のように表すことができる。

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

図2の実線は従来から降伏条件として採用されている移動と膨張を同時に考慮した修正 Mises 型の降伏条件に基づく曲線であり、引張と剪断の比率を変えて行った比例負荷実験の結果より定めた降伏応力の推定値がこの図のプロット(●)で示されている。真円で表された曲線からのプロット点の偏りの状況を調べることにより降伏曲面の異方性を調べていくことにする。

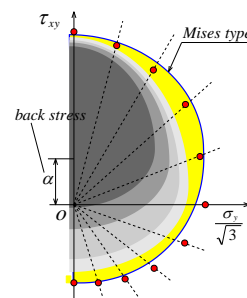


Fig.2 Boundary of the yield locus

### 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している。また、有限変形の単純剪断の予変形を与える際には、実験装置に取り付けた標点間の伸びを計測するための変位計の値が常に 0 となるように実験を行い、一方で剪断変形の測定には、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。本実験は以下の 2 段階の実験から構成されている。最初に、順方向の単純剪断の予変形に関する実験と、剪断の方向を途中で変える逆方向の予変形に関する実験を行う。この実験条件は、順方向側にストレッチ量  $\lambda=1.16$  (剪断変形量  $D_{12}=0.3$ )、逆方向側にストレッチ量  $\lambda=1.4$  ( $D_{12}=-0.68$ ) である。次に、予変形を与えた試験片に 3 軸ゲージを装着し、引張と振りを同時に作用させ、応力主軸の方位を基底面から種々の角度 (45,50,60,70,80,90,100,110,120,130,135[deg.]) に固定して比例負荷実験を行う。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、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。

### 5. 実験結果と考察

図 3 は、応力空間内に、単純剪断の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る。①は 45 [deg.]、(順方向の単純剪断) ②は 50 [deg.]、③は 60 [deg.]、④は 70 [deg.]、⑤は 80 [deg.]、⑥は 90 [deg.]、⑦は 100 [deg.]、⑧は 110 [deg.]、⑨は 120 [deg.]、⑩は 130 [deg.]、⑪は 135 [deg.] (逆方向の単純剪断) のそれぞれの方向の実験結果である。

次にこれらの中から一例として、①、⑥、⑧、⑪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 (プロット●) ならびに、135 [deg.] の接線 (緑色の直線) を描いたものが図 4 の (a), (b), (c), (d) である。予変形時に逆方向の単純剪断を与えていることから、⑪ (135 [deg.]) の方位である (d) のグラフの降伏時の曲線が切り立ち、⑪、⑧、⑥、①の順に降伏の直前に緩や

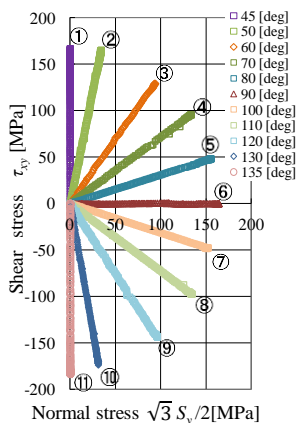


Fig.3. Stresses in each direction

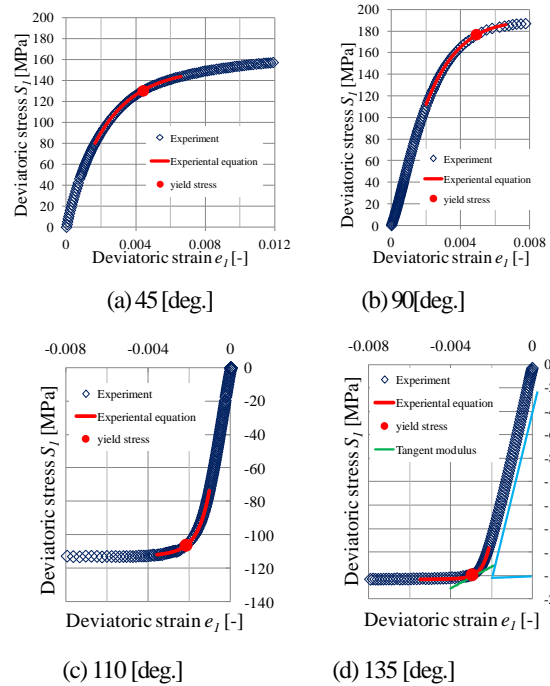
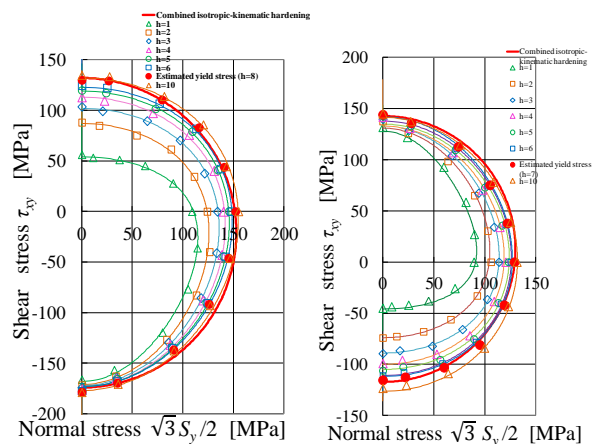


Fig.4. Principal stress - principal strain diagram



(1) In case of  $D_{12}=-0.68$  (2) In case of  $D_{12}=0.3$

Fig.5 Estimation of yield surface and distributions of  $h$

かな曲線を描く傾向が大きくなる事が分かる。更に歪硬化係数を求め、①から⑪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 5 に示す。予変形の最終状態が逆方向の単純剪断であることから、135 [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、45 [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。また曲面の形状が、予変形の最終方向側でとがり、その逆方向側では扁平の形状となっていることから、異方硬化の傾向が表れており、降伏曲面の形状に異方性が形成されていることがわかる。

### 6. 結言

本報では単純剪断の予変形を順方向と逆方向に与えて降伏曲面の形状を調べた。今後は、引張と剪断の予変形の経路を変えた場合に対して検討していく予定である。