

K5-37

自然歪理論に基づく順方向後の逆方向剪断の予変形で得られる降伏曲面の形状 (逆方向剪断の予変形量の増加に伴う降伏曲面の変遷について)

Shape of Yield Surface Estimated by using Natural Strain Theory under Simple Shear in Reverse Direction after Forward Direction (Transition of Yield Surface with Increase of Value of Shear in Reverse Direction)

○大久保 玲¹, 加藤保之²* Rei OKUBO¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: The purpose of this research is to investigate the shape of yield surface generated under a large deformation on the basis of the Natural Strain theory. In our previous study, using test pieces applying the pre-deformation of simple shear in reverse direction after forward direction, the shape of yield surface has been estimated by investigating the tangent modulus of deviatoric stress and deviatoric strain curve. The transition of anisotropy of yield surface is revealed by investigating the intermediate shape of yield surface with applying the value of pre-deformation of simple shear in the reverse direction small compared with previous experimental condition.

1. 緒 言

本研究の目的は、大変形挙動を記述する上で合理的な歪表示である自然歪理論に基づき、大変形下の降伏曲面の形状を調査し、異方性の発達のメカニズムを解明することである。この一連の研究では、降伏応力の決定方法として、従来から用いられている耐力ではなく、偏差主応力-偏差主歪線図の傾きを基に決定する方法を採用してきた。

これまでの研究では、大きな剪断の予変形を順方向に与えた場合と、順方向後に更に逆方向に剪断の予変形を与える場合に対して降伏曲面の形状を調査してきた。その結果、順方向のみに予変形を与えた場合では、順方向側に異方性が形成され、順方向後に逆方向の剪断の予変形を与えた場合では、予変形最終方向である逆方向側に歪硬化係数の分布が密集するため、逆方向の剪断の予変形を与える過程で新たに異方性が形成されることが明らかとなってきた。

本報では、この逆方向の予変形を与える過程で発生する異方性の発達の變遷を更に詳細に調査するため、逆方向に加える剪断の予変形量をこれまでの研究より小さく与え、降伏曲面の異方性の向きが反転する途中の中間形状を調査する。

2. 剪断の予変形の変形経路と異方性の発達状況

図 1.(a)は、剪断の予変形の変形履歴を偏差主応力 S_i (剪断応力 τ_{xy}) と主歪 e_i で表したものである。この図の経路 (O⇒A⇒B) が順方向にのみ予変形を与える場合であり、図 1.(b)には、この予変形後に得られる降伏曲面の実験結果が示されているが、この時の予変形最終方向である順方向の剪断側 (45[deg.]側) で同一の歪硬化係数を連ねる曲線の間隔は狭くなり密集するのに対して、逆剪断側 (135[deg.]側) ではそれらの曲線の間隔が広くなり、順方向の予変形を与える過程で異方性が形成されたことが確認できる。一方でこの順方向の剪断の予変形に更に逆向き予変形 (B⇒C'⇒D')

を加えたものが前報で調査してきた予変形の経路であり、逆向き剪断の予変形を加える過程 (即ち、B⇒C'⇒D') で図 1.(b)とは、逆向き異方性が形成される。

これに対し、本研究では、図中の (B⇒C⇒D) の様に逆方向に加える剪断の予変形量を前報に比べて小さく与えることで途中の降伏曲面の形状を調査する。

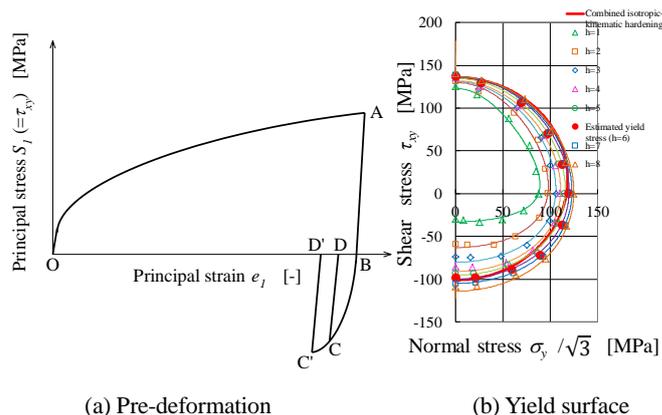


Fig.1. Pre-deformation of shear and shape of yield surface

3. 実験方法

3. 1 試験片及び実験装置について

試験片の形状は円筒形状で、その材質は、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%) であり、焼き鈍しが施されている。実験装置は、引張と剪断を同時に加えることのできる複合負荷試験機を用い、大きな単純剪断の予変形の測定については、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捩れ角の計測を行う。

3. 2 実験条件

本実験は剪断の予変形を与える実験と予変形後の比例負荷実験の 2 段階で構成され、以下にそれらの条件を列記する。
(1) 剪断の予変形の実験条件については、順方向の剪断をストレッチ量 $\lambda = 1.40$ [-] (剪断変形量 $D_{12} = 0.682$ [-]) まで与えた後に、逆方向の剪断を与えて、最終状態がストレッチ量 $\lambda = 1.38$ [-] (剪断変形量 $D_{12} = 0.661$ [-]、剪断

応力の値が $\tau_y^* = -155[\text{MPa}]$ となるまで与え、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 (なお、過去の実験では最終状態がストレッチ量 $\lambda=1.35[-]$ であり本実験に比べ逆方向の剪断変形が大きい)。

(2) 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加えて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.]) に固定して行う。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、降伏曲面の形状を推定する。

4. 実験結果

図 2 は予変形後の比例負荷実験で得られる応力の軌跡を応力空間内に描いたものであり、図 3 は、これらの中から一例として 135, 120, 90, 45 [deg.] に対して偏差主応力-偏差主歪線図を描いたものである。これら

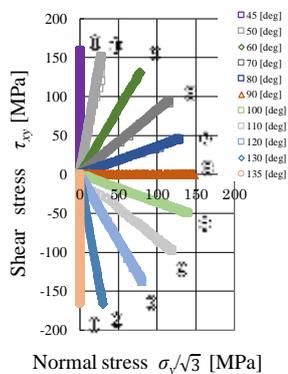
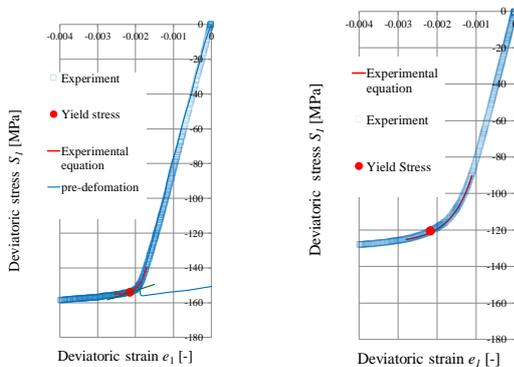
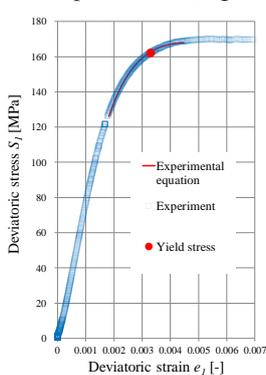


Fig.2. Stresses in each direction in a stress space

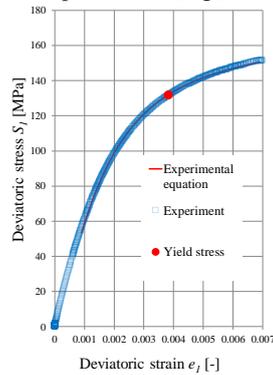


(a) Principal axis 135 [deg.]

(b) Principal axis 120[deg.]



(c) Principal axis 90[deg.]

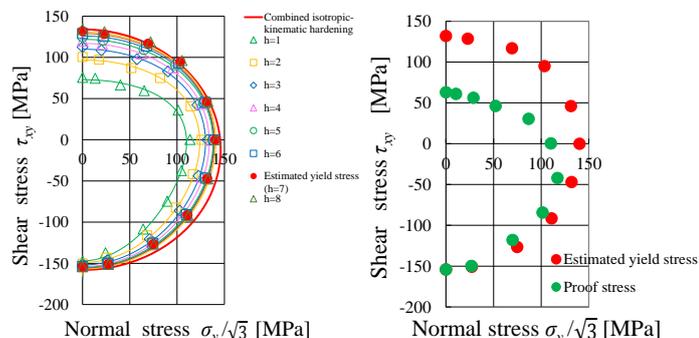


(d) Principal axis 45[deg.]

Fig.3. Principal deviatoric stress - Principal deviatoric strain diagram

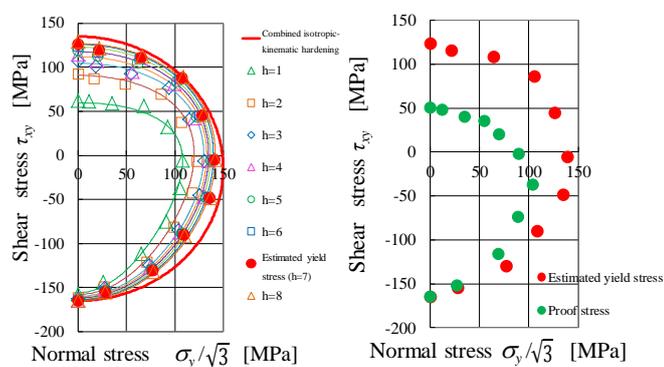
の図中には、各方位の降伏応力 (●) が示されており、135[deg.] (逆方向剪断) に対しては降伏点上の接線 (—) が描かれている。更に歪硬化係数 h を求め、①から⑩迄の、すべての方位の降伏応力を推定した結果を図 4 (a) に示す。また、この図には、同一の h の値を連ねて描いた曲線が示されている。予変形の最終方向の逆剪断(135[deg.]側)では、 h の分布曲線は密集し、切り立った分布になるのに対し、45[deg.]側では、その間隔は広くなり緩やかな分布となる。図 4 (b) は、本手法で決定した降伏曲面の実験結果を従来の耐力による結果と比較したものである。従来の耐力による結果は、予変形の最終方向とは逆側で降伏応力の値を低く推定してしまい、降伏曲面は、より扁平の傾向を示すことがわかる。

次に、最終状態がストレッチ量 $\lambda=1.35[-]$ である過去の実験結果を、図 4 (c) と (d) に示す。135[deg.] 側の降伏応力値は最終状態が $\lambda=1.38 [-]$ まで加えた本実験結果に比べて大きいことが確認できる。また、過去の結果は、45[deg.] 側で間隔が広がっているのに対して、本実験の結果は $h=5$ 以上では間隔が狭くなる傾向を示すことが確認できる。



(a) Distribution of Yield Surface

(b) Comparison with proof stress



(c) Distribution of Yield Surface

(d) Comparison with proof stress

Fig.4. Comparison of shape of yield surface

5. 結言

逆方向の剪断の予変形量を前報より小さく与えて降伏曲面の形状を調査し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 逆剪断側の降伏応力値については、逆向きの剪断の過程で歪硬化が進行するため、前報の結果は、本実験結果に比べて僅かに大きくなる。
- (2) 歪硬化係数 h の分布曲線の間隔は予変形の最終方向である逆方向の剪断側で狭くなり、順方向側では広くなる。しかしながら、本報の結果は、 $h=5$ 以上では、順方向側で狭くなる傾向を示す。