# K-22

# 大きなサイクル剪断後の逆剪断の予変形下で自然歪理論に基づき推定された降伏応力について

Yield Stress Estimated Based on Natural Strain Theory under Pre-deformation of Reverse Shear

after Applying Large Cycle Shear

○増田 岳<sup>1</sup>, 加藤 保之<sup>2</sup> \* Takeru MASUDA<sup>1</sup>, Yasuyuki KATO<sup>2</sup>

Abstract: In the previous report, it has been revealed that the direction of anisotropy in the yield surface which was formed during the process of applying the large simple shear in the forward direction is formed reverse direction when the simple shear in the reverse direction is applied after that. In the present study, the yield stresses are investigated by using test pieces which are applied the simple shear in the reverse direction after applying a large cycle shear. Then, the change in anisotropy in the yield surface is revealed by conducting the experiments with applying various sizes of reverse shear.

### 1. 緒 言

本研究の目的は、大変形下の有限歪の表示法として きわめて合理的であると考えられ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、変形に伴っ て生じる異方性の発達のメカニズムを解明することで ある.これまでの研究では、順方向に大きな剪断の予 変形を与えると、順方向側で歪硬化曲線の間隔が密に なり異方性が形成され、一方でこの状態から更に逆向 きの剪断の予変形を加えると、逆方向側で歪硬化曲線 の間隔が密になり、異方性主軸の方位が応力空間内で 反転する現象が確認されてきた.そこで前報の研究で は、その反転過程を調べるために、逆方向に加える剪 断の予変形の大きさを種々に変えて実験を行い、降伏 曲面の異方性主軸である順方向剪断側と逆方向剪断側 の降伏応力を調査してきた.

本研究では、予変形の履歴が降伏曲面の異方性の発 達に及ぼす影響を更に解明するために、大きな単純剪 断後に逆向きの大きな単純剪断を与え、再び最初に与 えた単純剪断と同一の変形となるまで順方向側に大き な単純剪断を与えるサイクル剪断について検討する.

# 2. サイクル剪断の予変形と降伏応力の推定方法 2.1 サイクル剪断の予変形について

図1は、本研究で試験片に与える大きなサイクル剪 断の変形履歴を偏差主応力  $S_I$ (剪断応力 $\tau_{xy}$ )と主歪  $e_I$ の関係で表したものである. この図の緑色の経路 (O→A→B) がサイクル剪断の過程であり、青色の経

路  $(B\rightarrow C\rightarrow D)$  が, 逆方向に加える剪断の過程である. また, 図2(i)は, サイクル剪断  $(O\rightarrow A\rightarrow B)$  後の降 伏曲面を模式的に表したものであり, 異方性が形成さ れるため順方向の剪断側 (45[deg.]側) で曲線の間隔が 狭く密集し, 一方で逆剪断側 (135[deg.]側) では, 曲 線の間隔が広くなる. これに対し, サイクル剪断後に 更に逆方向に剪断の予変形  $(B\rightarrow C\rightarrow D)$  を与える過程 で, 逆向きに異方性が形成され図2(ii)のようになる. 本研究では(i)から(ii)までの途中で異方性主軸である 剪断応力の降伏応力値を測定し, 異方性の発達を調査する.

# 2.2 線係数に基づく降伏応力の推定法

図3(a)は、サイクル剪断後に、再度、順方向と逆方 向に剪断応力を加えた際の偏差応力と偏差歪の関係を

1: 日大理工・学部・機械, 2: 日大理工・教員・機械



Fig.2. Change of anisotropy for the shape of yield surface



(a) Reloading process after cycle shear (b) Reverse shear after cycle shear Fig.3. Determination method for yield stress

模式的に表したものである.緑色の実線は、サイクル 剪断の予変形であり、点 A の応力から再負荷した際の 降伏応力値は既に決定しており、点 F で表される.その ため降伏時の接線係数,即ち、図3(a)中の水色の直線 の傾きの値は既に確定している.本研究では、この接線 の傾きと同一となる点の応力、即ち、図中の点 H を降 伏応力と推定する.一方で,耐力による降伏応力は残留 歪より決定され,点G',E'の様に小さく推定される.

次に、図3(b)は、サイクル剪断後に更に逆方向に剪 断の予変形を与える際の偏差応力と偏差歪の関係を表 したものである. 図中の青色の曲線で示した逆方向の剪 断の値 $\tau_v$ \*を種々に変えて順方向と逆方向に剪断を再負 荷した際の降伏応力値を上述の方法に従い調査する.

#### 3. 実験方法

#### 3.1 試験片及び実験装置について

本実験では、焼き鈍しが施されたタフピッチ銅(純度 99.99%)の円筒試験片を用いる.また、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る.

### 3.2 実験条件

本実験は、予変形と予変形後の2段階で構成される. (1)予変形の実験条件については、①順方向の単純剪断を ストレッチ量 $\lambda$ =1.3 [-](剪断変形量  $D_{I2}$ =0.52[-])与え、 逆方向の剪断をストレッチ量 $\lambda$ =0.77 [-](剪断変形量  $D_{I2}$ =-0.52[-])与え、再び順方向の剪断をストレッチ量 $\lambda$ =1.3 [-] まで与えるサイクル剪断のみの条件、②サイクル剪断を① と同一の条件で与えた後に逆方向剪断を $q^*=-130$ [MPa]ま で与える条件、③サイクル剪断後に逆方向剪断を $q^*=-152$ [MPa]まで与える条件、④サイクル剪断後に逆方向 剪断を $q^*=-170$ [MPa]まで与える条件、⑤サイクル剪断後に 逆方向剪断を $q^*=-175$ [MPa]まで与える条件、⑥サイクル剪 断後に逆方向剪断を $tq^*=-185$ [MPa]まで与える条件である. (2)予変形後の順方向および逆方向の剪断の再負荷実験に ついては、試験片に3軸歪ゲージを装着し、応力主軸の方 位を2つの角度(45、135 [deg.])に固定して実験を行う.

# 4. 実験結果と考察

#### 4.1 異方性の主軸上における降伏応力値について

図4は、前述の6つの実験条件に対して、45[deg.]と 135 [deg.]の偏差主応力と偏差主歪の関係を同一グラフ 上に描き、降伏応力を〇で示したものである.この図 から、サイクル剪断のみの予変形(①の条件)は、逆剪断 (即ち135[deg.]側)で、緩やかな曲線になるのに対して、 サイクル剪断後に逆方向の剪断の予変形を与えた場合 (②~⑥の条件)では、逆方向に加える剪断の応力値<sub>6</sub>\*が 増加するほど屈曲する傾向が現れることが確認できる.

次に歪硬化係数 h の値に対応する剪断応力と,逆方 向の剪断の予変形の応力値  $q_{7}$ \*の関係を描いた結果が 図 5 である.サイクル剪断のみの予変形  $q_{7}$ =0 [MPa]の 場合には,h の分布の間隔が順方向の剪断側(45[deg.] 側)で密集し,逆方向剪断側(135[deg.]側)で広くなる.

これに対し、 $\tau_{t}$ \*=-130[MPa]の場合には、歪硬化係数 が小さなh=3の応力に注目すると、45[deg.]と135[deg.] で減少し、逆方向剪断側に移動硬化が進行しているこ とが確認できる.また、hの分布の間隔が45[deg.]側で 広がり、135[deg.]側では間隔が縮まる傾向が表れ、新 たに逆剪断側に異方性が形成される.

次に、図6は、逆方向に与える剪断の予歪の値  $e_l$ を横軸に取って、本手法に基づき求めた降伏応力と耐力の結果を比較して表したものである.サイクル 剪断のみの①の条件の場合には、耐力は、本手法の 降伏応力値に比べ 135[deg.]側で小さい値となる.そ して、逆方向の剪断の予変形の応力値 $r_V$ \*が増加するに 連れて、135[deg.]側では、耐力の値が本手法の降伏応 力に近づき、一方で45[deg.]側では、遠ざかる.また、 逆方向の剪断の予変形の応力値が $r_V$ \*= -170[MPa]の場 合には、135[deg.]側で耐力と本手法の降伏応力は、ほ ぼ同一となる.

#### 5. 結 言

本研究では、大きなサイクル剪断を与えた後に逆方 向に加える剪断の予変形量を種々に変えて異方性主軸 上で降伏応力値を調べ、以下のことが明らかとなった.

- (1) 逆方向の剪断変形の予変形量を大きく与える程,順方 向剪断側の偏差主応力一偏差主歪線図は緩やかになり, また降伏応力値は減少する.一方で逆方向側の降伏応 力値は増加し,応力-歪線図は折れ曲がりの傾向が強 く現れる.
- (2) 逆方向の剪断の予変形の応力値が増加するに連れて、逆方向の剪断側では、耐力の値が本手法の降伏応力に近づき、一方で順方向の剪断側では、遠ざかる傾向が現れる.



Fig.4 Principal stress – principal strain





Fig.5 Relation of *h* and yield stress

Fig.6 Comparison of yield stress