

自然歪理論に基づく剪断の大きな予変形後の繰り返し荷重で垂直歪を引張側に増加させて  
得られるメカニカルラチェット現象

(順方向剪断と逆方向剪断のデッドロードで得られるラチェットのピッチについて)

Mechanical Ratcheting Phenomena Based on Natural Strain Theory after Large Simple Shear Obtained by Increasing  
Normal Strain on the Tension Side  
(Ratchet Pitch under Forward and Reverse Shear Dead Loads)

○紀伊優希<sup>1</sup>, 内山雄貴<sup>2</sup>, 加藤保之<sup>3</sup>

\* Yuki Kii<sup>1</sup>, Yuki Uchiyama<sup>2</sup>, Yasuyuki Kato<sup>3</sup>

Abstract: A lot of studies for the mechanical ratcheting phenomena under an infinitesimal deformation have been conducted, however, the ratcheting phenomena obtained under cyclic loads after applying a large pre-deformation have hardly been revealed yet. This paper describes the mechanical ratcheting phenomena after large simple shear when tension-compression repeated loads are applied to the test specimens with increasing a normal strain toward the tension side while keeping a constant strain amplitude. Since yield surface expands and center of initial core surface move during the process of applying large simple shear, an anisotropy is formed on the forward shear side. In the present study, the ratchet pitches are investigated under the experimental conditions of dead loads on the forward shear side and reverse shear side, which are the same and the opposite to the direction that the anisotropy of yield surface is formed.

1. 緒言

大きな剪断の予変形を試験片に与えた後に、引張と圧縮の繰り返し荷重を加える際に生じるラチェット挙動について調査し、大変形下のラチェット現象の特徴を明らかにすることが本研究の目的である。大きな剪断の予変形を与える過程では、降伏曲面は膨張するだけでなく、曲面の中心位置は剪断を与えた方向に移動し背応力が発生する。そのため、塑性歪の進行方向が Prandtl-Reuss の流動則に従い曲面の中心から放射方向に発生することを考慮すると、この背応力が繰り返し荷重時に生じるラチェット挙動に大きく影響することが予想される。

そこで本研究では、デッドロードを背応力が発生する順方向剪断側と逆方向剪断側に与えて、一定歪幅の下で垂直歪をサイクル毎に引張側に増加させた際に得られるラチェット挙動を調査する。

2. 剪断の予変形量とラチェット挙動の関係

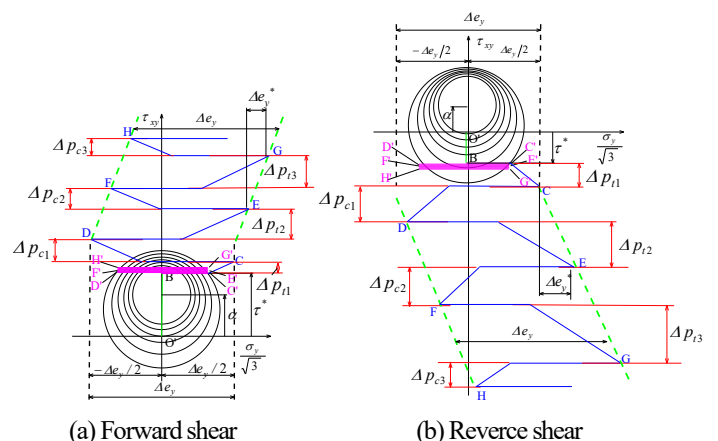
2.1 剪断のデッドロードと背応力  $\alpha$  の関係

大きな単純剪断の予変形を順方向剪断側に与えると、図1に示すように最も内側の純弾性状態を意味するコア円の中心位置は、順方向剪断側に移動して背応力  $\alpha$  が形成される。本研究では、再度、降伏応力以下の剪断のデッドロード  $\tau^*$  を試験片に加え、一定歪幅の下で引張と圧縮の繰り返し荷重を与えてラチェット挙動を調査する。ここで、図1 (a) はデッドロード  $\tau^*$  を背応力  $\alpha$  と同一方向に与えた順方向剪断の場合、図1 (b) はデッドロード  $\tau^*$  を背応力  $\alpha$  とは反対方向に与えた逆方向剪断の場合をそれぞれ表している。

2.2 剪断のデッドロードとラチェットのピッチ

次に、図1 (a) 中のB点に示す様に剪断のデッドロード  $\tau^*$  を一定値に保持したまま、規定値の垂直歪  $\Delta\epsilon_y/2$  まで引

張変形を与えた状態が図中のC点である。この時の応力点の位置はC'点に存在し降伏曲面上に留まり、歪点の位置は Prandtl-Reuss の塑性流動則に従い、コア円の中心から放射方向に塑性歪が発生し、引張側に垂直歪が増加するだけでなく、剪断歪も順方向剪断側に増加して試験片には振りが生じ、そのため歪の軌跡は鋸刃状に形成される(尚、その1サイクル目のピッチが図中の  $\Delta p_{f1}$  である)。次に、剪断のデッドロードを保持したまま、引張荷重を除荷し垂直歪を減少させて、更に規定値の  $-\Delta\epsilon_y/2$  まで圧縮側に与えた状態が図中のD点である。同様に応力点の位置はD'点に存在し曲面上に留まり、歪点はコア円の中心から放射方向に進行して、剪断歪が増加して試験片には再び振りが生じ、圧縮側でも鋸刃状の歪の軌跡が現れる(尚、圧縮側で発生する1サイクル目のピッチが図中の  $\Delta p_{r1}$  である)。2サイクル目以降も同様であり、サイクル数の増加と共に振りが進行し、剪断歪が増加する事になる。一方で、図1 (b) の様に逆剪断側にデッドロードを与える場合は、引張と圧縮の繰り返し荷重下で剪断歪が逆方向剪断側に増加し、鋸刃状の歪の



(a) Forward shear (b) Reverse shear  
Fig.1. Mechanical ratchet under cyclic tension-compression.

1 : 日大理工・学部・機械、2 : 日大理工・院(前)・機械、3 : 日大理工・教員・機械

軌跡が形成される事になる。本研究では、引張側の歪の増加量 $\Delta e_y^*$ を様々な値に変えて実験を行い、引張側で発生するラチェットのピッチ $\Delta p_t$ と圧縮側のピッチ $\Delta p_c$ を調査し、デッドロードの値 $\tau^*$ を背応力 $\alpha$ と同一側に与えた場合と、逆方向側に与えた場合の結果を比較する。

### 3. 実験方法ならびに実験条件

焼きなましが行われた円筒形状のタフピッチ銅（純度99.9%）の試験片を引張または圧縮と捩じりを同時に加えることのできる多軸負荷試験機に装着し実験を行う。

次に、予変形の実験条件について説明する。すべての実験で剪断変形量は $D_{12}=0.51$  [-]（ストレッチ量 $\lambda=1.30$  [-]）で、同一量である。予変形後のラチェット挙動の実験条件については、剪断のデッドロードの値を $\tau^*=80, -80$  [MPa]の2通りの条件で与え、一定歪幅（ $\Delta e_y^*=4400\mu\epsilon$  [-]）で引張と圧縮の繰り返し荷重を加える。その際に引張側の垂直歪の増加量 $\Delta e_y^*$ をサイクル毎に引張側に増加させ、6通りの条件（即ち、 $\Delta e_y^*=100,200,300,400,500,1000\mu\epsilon$  [-]）で実験を行う。

### 4. 実験結果と考察

実験結果の一例として、剪断のデッドロードの値を $\tau^*=80$  [MPa]に固定して引張側の歪の増加量 $\Delta e_y^*$ を $100\mu\epsilon$ と $1000\mu\epsilon$ に設定した結果を図2 (a) と (b) に示す。ここで、これらの図の横軸は偏差垂直歪を、縦軸は剪断歪である。引張

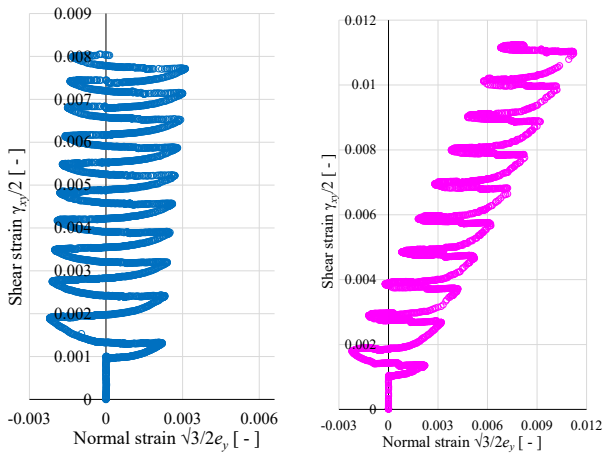


Fig.2. Mechanical Ratcheting Phenomena ( $\tau^* = 80$  MPa)

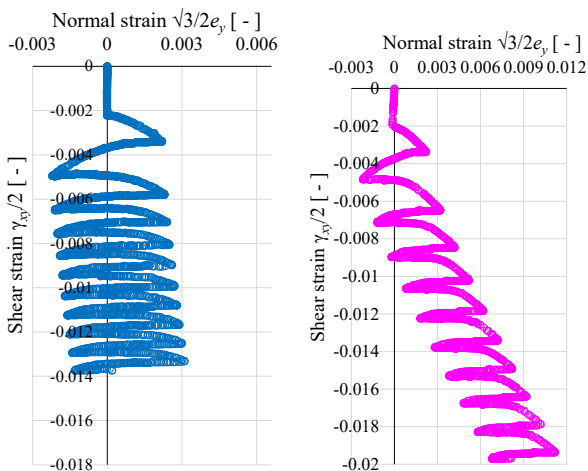
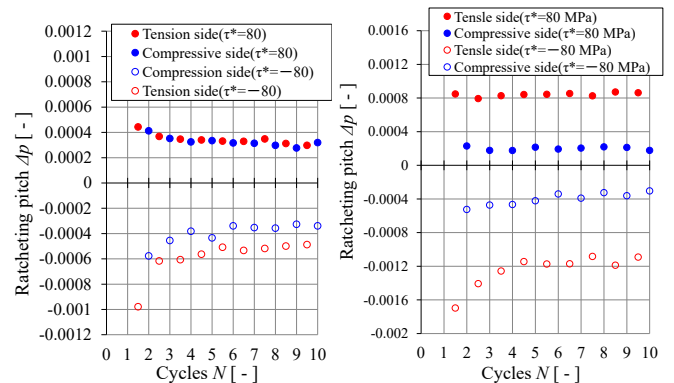


Fig.3. Mechanical Ratcheting Phenomena ( $\tau^* = -80$  MPa)

側の歪の増加量 $\Delta e_y^*$ が最も大きい $1000\mu\epsilon$ の条件では、サイクルの初期から引張側のラチェットのピッチ $\Delta p_t$ が圧縮側のピッチ $\Delta p_c$ に比べて大きく発生している事が確認できる。

次に、剪断のデッドロードの値を $\tau^*=-80$  [MPa]に固定して行った逆剪断側の実験結果を図3 (a) と (b) に示す。この図より順方向剪断側に比べて逆方向剪断側にデッドロードを与える方が、ラチェット量が大きいことが確認できる。

次に図4は、上述の図2及び図3に対して、横軸にサイクル数 $N$ を、縦軸に引張側と圧縮側で発生するラチェットのピッチ、即ち、 $\Delta p_t$ と $\Delta p_c$ を取り、サイクルの進行に伴うラチェットのピッチの発生状況を示したものである。尚、赤のプロットが引張側で、青のプロットが圧縮側で発生するラチェットのピッチ $\Delta p_t$ と $\Delta p_c$ をそれぞれ表している。又、順方向剪断側のデッドロードを与える場合を塗りつぶされたプロット（●, ●）で、逆剪断側のデッドロードを与える場合を白抜きのプロット（○, ○）で表している。この図から、デッドロードを順方向剪断側に $\tau^*=80$  [MPa]で与えた場合に比べて、逆方向剪断側に $\tau^*=-80$  [MPa]で与えた場合のピッチの減衰傾向はより大きく現れている事が確認できる。また、順方向剪断側に比べ逆方向剪断側の方がピッチが大きい。ここで、図4 (b) に着目すると、順方向側にデッドロードを与える場合でも、サイクルの初期から引張側のピッチと圧縮側のピッチに差が生じ、また、引張側のピッチも圧縮側のピッチもほぼ一定値になることが確認できる。一方で、逆剪断側にデッドロードを与える場合では、4サイクル目で引張側と圧縮側のピッチが一定値に収束し、順方向剪断側に比べ遅れて収束する。



(a)  $\Delta e_y^*=100\mu\epsilon$  [-] (b)  $\Delta e_y^*=1000\mu\epsilon$  [-]

Fig.4. Relation between ratcheting pitch and number of cycles.

### 5. 結言

- (1) 引張側の歪の増加量 $\Delta e_y^*$ が大きい程、サイクルの初期から引張側のラチェットのピッチ $\Delta p_t$ が圧縮側のピッチ $\Delta p_c$ に比べて大きく発生する。
- (2) 順方向剪断側に比べて逆方向剪断側にデッドロードを与える方が、ラチェット量が大きく、また延べの剪断歪も大きい。
- (3) 逆方向剪断側にデッドロードを加える場合のラチェットのピッチは、順方向剪断側に加える場合のピッチに比べて遅れて収束する。