

画像解析を用いた有限歪の計測に関する基礎研究 (引張の予変形後の剪断変形下で生じる局部変形について)

Fundamental Study on Finite Strain Measurements using Image Analysis (Local Deformation generated under Shear after Pre-tensile Deformation)

○佐藤 智武¹, 彭 文浩², 加藤 保之³Tomotake SATO¹, Wenhao PENG², Yasuyuki KATO³

Abstract: The purpose of this study is to investigate the development of local deformation by using the image analysis based on Natural strain theory. In our previous study, the local deformations generated under different types of deformations history, which are obtained by applying the simple shear to the reversed direction after the forward direction, have been examined. The developments of local deformation in each infinitesimal element on the surface of the specimens are investigated under the condition that the plastic strain on identical line elements is integrated along each deformation path. In this study, the developments of local deformation in the simple shear after applying the initial tension are examined.

1. 緒言

変位計や歪ゲージを用いた電氣的な一般的な測定方法では、測定範囲に限界が存在する。一方で、画像解析を用いた測定は連続的な測定が可能であり、そのため、大変形の歪の測定には極めて有効であると考えられる。

これまでの研究では、単軸引張と単純剪断を研究対象に選び、局部変形が生じるような大きな変形領域に対して画像解析を行ってきた。その結果、単軸引張では、局部変形の発生以降では、試験片の各場所での断面積に変化が生じ、局部変形の発達が形状効果と密接に関連していることが明らかとなった。一方で、単純剪断では、試験片の各場所の断面積の変化がほとんど生じないことから単軸引張のような局部変形が大きく発生しないが、更に大きな変形を与える場合には試験片の上部画像と中央部画像の歪の値に違いが生じ局部変形の発生が確認されてきた。特に、関連する一連の研究の中では、加工硬化などの材料の性質の変化が局部変形の発達状況に密接に関係することを調査するために、順方向の単純剪断を与えた後に逆方向の単純剪断を与える変形に対し、順方向の単純剪断の変形量を段階的に変えて逆剪断を加えることで、実質上の無変形状態で試験片の上部から中央部にわたる各場所の歪の計測を行い、局部変形の発達状況を調査してきた。

本研究では、材料の性質の変化が局部変形の発達状況に及ぼす影響を更に明らかにするために、断面形状の変化が生じない一様変形場の範囲の引張の予変形を試験片に与え材料に塑性変形を与え、その後、順方向と逆方向の剪断変形を与えて局部変形の発達状況を調査する。

2. 3本の線素の伸び歪と変形勾配の関係

試験片の表面に格子を罫書きその 3 本の線素の伸び歪(ε_o , ε_b , ε_c)を求め、更に自然歪理論に基づき変形勾配を求

めることで、極分解により変形の主値 λ を算出し、また、主歪を求めることができる。なお、式の詳しい誘導過程については紙面の都合上省略する。

3. 実験方法

最初に引張変形を与え、その後、引張を保持したまま大きな剪断変形を与えるために、本研究では軸方向変位と剪断変位を同時に作用させることのできる多軸負荷試験機を用いて実験を行った。実験で採用した試験片は、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(外径 22[mm], 内径 16[mm], 標点間距離 30[mm])を用いた。また、図 1 に示すように試験片の表面には、画像測定のために予め等間隔(1.92[mm])の格子状の罫書き線を描き、試験片を試験機に装着した後に軸方向変位をストレッチ量 $m=1.1[-]$ まで与え、その後除荷をし、伸び変位を保持した状態でトルクを加えながら画像の測定を行う。ここでの画像の測定は、図 1 に示すように、試験片の中央部から 11.52[mm] 離れた上部までの計 7 カ所の微小要素($N=0\sim6$)に対して行う。画像の測定に使用したカメラは、Canon 製の高画素カメラ(最大画素 2110 万画素)であり、同一微小要素の刻々の変化を測定するために、2 台のカメラを治具に装着し引張の過程では、治具を上下に移動させ、また剪断の過程では、回転移動させながら測定を行う。なお、カメラは上下に移動させて各要素の測定を行う。これらの測定した画像から微小要素の 4 点の座標位置 OABC を測定し、前述の 3 本の線素(水平方向 OA、対角線

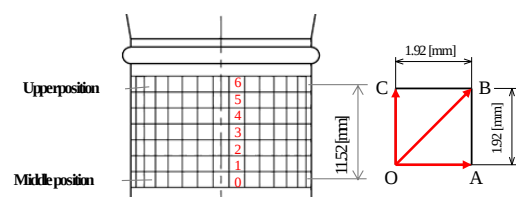


Fig.1 Specimen and position of small elements

に位置する OB, 鉛直方向 OC)のそれぞれの伸び歪を幾何学的に奥行きを修正をしながら自然歪理論に基づき求める。

次に、実験条件について説明する。本研究では、以下の3つの経路の実験を行う。

I 単軸引張($m=1.1$)後、順方向のみの単純剪断 $e_1=1.1[-]$ (剪断変形量 $K=3.2[-]$, 捩れ角 $\varphi=500[\text{deg}]$)

II 単軸引張($m=1.1$)後、順方向の単純剪断 $e_1=0.5[-]$ ($K=1.14[-]$, 捩れ角 $\varphi=217[\text{deg}]$)

⇒ 逆方向の単純剪断 $e_1=-0.6[-]$ ($K=-1.5[-]$)

III 単軸引張($m=1.1$)後、順方向の単純剪断 $e_1=0.3[-]$

($K=0.67[-]$, 捩れ角 $\varphi=127[\text{deg}]$)

⇒ 逆方向の単純剪断 $e_1=-1.0[-]$ ($K=-2.7[-]$)

4. 実験結果と考察

前述の実験条件の3つの経路の中で、引張を $m=1.1$ 与えた後に順方向に単純剪断を主歪 $e_1=0.5$ ($K=1.14[-]$)加えた後に逆剪断を与えた経路IIと、引張を与えずに経路IIと同一の剪断変形を与えた経路の偏差主歪力と偏差主歪を比較した結果が図2である。この図中の点pは変位計で測定した剪断成分のみを抽出して表した塑性歪 $e_1=1.1$ となる点を示している。図中のo, a, b, c, dは変形状態を表し、無変形(o), 引張の終了(a), 順方向剪断の終了(b), 順方向の剪断を与えた後に逆方向の剪断を与えて無変形の状態(c), 最終変形の状態(d)をそれぞれ示している。ここで、引張を与えた後に剪断を与えた経路の画像の測定結果と引張を与えない経路の測定結果に差異が表れていることが確認できる。

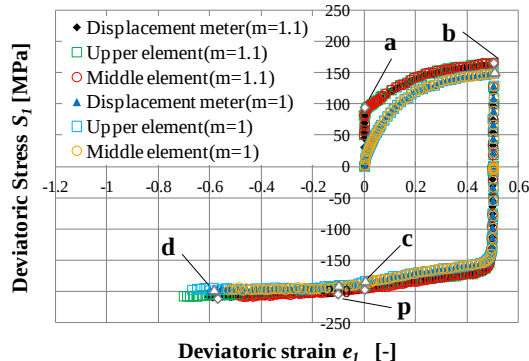


Fig.2 Principal deviatoric stress and strain diagram (case of deformation path II)

次に、試験片の各場所の局部変形の発達状況を調べるために、順方向と逆方向の剪断変形量が同一で、試験片の標点間の剪断変形が0となる点cに着目し、上述の経路IIと経路IIIに対して、上部から中央部までの画像の中で上部(6)と中央部(6)の画像の測定結果を比較したものが図3である。この図で、II-(a)とIII-(a)の画像の測定結果から、上部(6)と中央部(6)の画像がほぼ一致していることから、この引張の予変形を与える過程ではまだ一様変形であることがわかる。しかし、この図のII-(c)の画像の結果から明らかなように剪断変形量が0となる点cにおいて、上部画像は逆剪断側に変形し、中央部では順方向の剪断側の変形が残っていることから局部変形が発生していることが確認でき、一方で、III-(c)の画像の結果から明らかなように上部と中央部の画像に差異が生じていないことが確認できる。

次に、局部変形の発達状況を定量的に確認するために、横

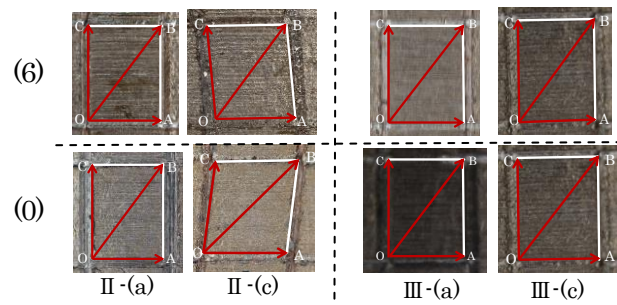


Fig.3 Photograph in each location (image of point a and c)

軸に上部から中央の微小要素の番号 N (但し、等間隔であるので中央からの距離に相当する)をとり、縦軸に各要素の画像データから得られる偏差主歪 e_{li} と変位計の偏差主歪 e_{ld} との差分を Δe_1 とすることで局部変形発達の傾向を確認する。

$$\Delta e_1 = e_{li} - e_{ld} \quad (1)$$

図4は、引張の予変形を与えた後に順方向の剪断を加え、その後逆方向の剪断を加える経路IIの局部変形の発達状況と、引張を与えずに経路IIと同一の剪断を加えた経路の Δe_1 の結果を比較したものである。

この図で、引張の予変形を与えた場合(●)では剪断変形量が0となる点cにおいて、画像と変位計の主歪の差がプラスからマイナスに変化していることから、局部変形が生じていることがわかる。しかし、引張を与えていない場合(○)では画像と変位計の主歪にあまり差異が見られないため、局部変形がまだあまり発達していないことが確認できる。

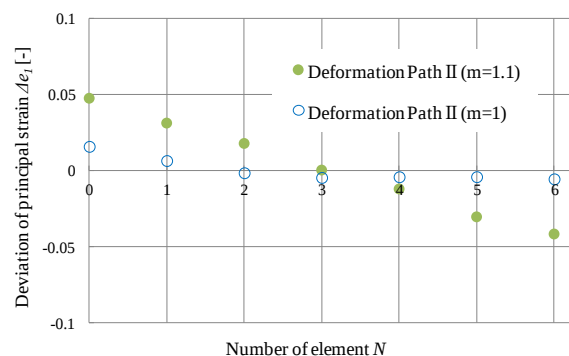


Fig.4 Local deformation measured at the point c (case of deformation path II)

5. 結 言

引張の予変形を与えた場合と与えていない場合を比較した結果、引張を与えた場合には引張を与えていない場合に比べて、剪断変形下の局部変形の発達が早まることが明らかとなった。このことから、試験片の各場所で断面積の変化が生じない一様変形場内の大きさの引張の予変形であっても、予変形の過程で発生した塑性歪がその後の剪断の局部変形の発達に影響を与えることが確認できた。今後の展望としては、先に剪断の予変形を与えた後に引張の変形を加える場合についても局部変形の発達の状況を調査する必要があると考えられる。