

画像解析を用いた大きな捩りを受けるゴム軸の有限歪の計測に関する研究
(二等辺三角形と正三角形断面の剪断歪と伸び歪の歪分布について)

Study on Finite Strain Measurements Using Image Analysis for Rubber Shaft Subjected to Large Torsion
(Shear Strain and Extensional Strain distributions for isosceles triangle and equilateral triangle cross section)

○加賀谷楓¹, 岩佐宣宏², 加藤保之³

* Fuya Kagaya¹, Nobuhiro Iwasa², Yasuyuki Kato³

Abstract: This paper describes the properties of the finite strain distributions in a cross section which is obtained under large torsion by using the image analysis based on the Natural strain theory. In our previous researches, since the properties of strain for general cross-section are more emphasize as the number of sides decrease, the strain distributions in the equilateral triangle-section shaft, which has the fewest number of sides have been investigated, and these strain distributions have been compared with the distributions for the square-section. Moreover, in the present study, both shear strain and extensional strain distributions for isosceles triangle section having different aspect ratio, i.e., acute angle cross section and obtuse angle cross section, will be investigated.

1. 緒言

本研究の目的は、円形断面以外の一般断面形状の軸に対し、断面内の有限歪の分布を本研究で提案する画像解析手法を用いて調査することである。一般断面形状の捩りに関しては、既に Saint-Venant によって提案され、広く採用されている。しかし、この捩り理論は、微小変形下で成立する理論であり、必ずしも大変形下では有効ではない。そのためこの一連の先行研究では、大変形下で有効な自然歪理論に基づく画像解析手法を用いて有限歪の測定を行ってきた。

断面形状としては、辺の数が少ない程、平面保持の仮定が崩れ、より一般断面形状の歪分布の特徴が強く現れることが想定される。そこで、最も辺の数の少ない正三角形に着目して、断面内の歪の分布を測定し、正方形断面のそれらの分布と比較してきた。一方で、長方形断面に関しては、アスペクト比が大きくなるほど、短辺側では剪断歪は小さく大きな伸び歪が発生することが既に明らかになっている。

そこで本研究では、アスペクト比が異なる二等辺三角形の断面内の剪断歪や伸び歪の分布を調査し、正三角形の歪分布と比較することでその特徴を明らかにする。

2. 画像解析手法

図1は、試験片の表面に罫書いた微小要素の変形前後の状態(即ち、(a)無変形の状態、(b)大きな捩りを加えた状態)を表す。本研究では、3本の線素 l_{oa}, l_{ob}, l_{oc} の伸び歪の値 $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ を求め、捩り変形時の変形勾配の垂直成分 D_{11}, D_{22} と剪断成分 D_{12}, D_{21} が求まり、更に、変形勾配の極分解により主軸のストレッチ量ならびに変形前後の主軸

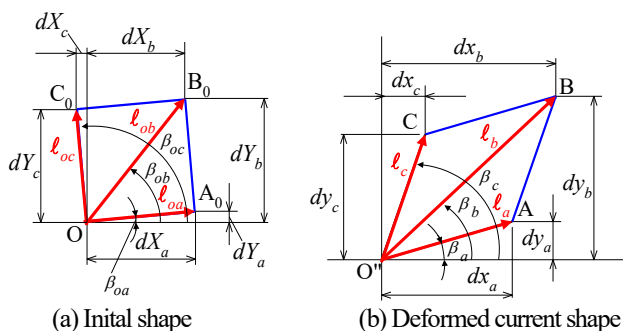


Fig.1. Deformations of three line elements.

の方位と剛体回転 θ_R が導かれる(ただし、それらの誘導過程は、紙面の都合上ここでは省略する)。鉛直方向の線素 l_{oc} の剪断歪 γ は、自然歪理論では変形前後の線素の回転角から剛体回転 θ_R を除去して式(1)の様に表示される。

$$\gamma = \beta_{oc} - \beta_c - \theta_R \quad (1)$$

なお、変形前後の鉛直方向の線素の方位は以下の通りである。

$$\beta_{oc} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left\{ \frac{dX_c}{dY_c} \right\}, \quad \beta_c = \tan^{-1} \left\{ \frac{dy_c}{dx_c} \right\} = \tan^{-1} \left\{ \frac{D_{21} dX_c + D_{22} dY_c}{D_{11} dX_c + D_{12} dY_c} \right\} \quad (2)$$

3. 実験方法

3.1 実験装置

本研究では軸力と捩りを同時に加えることができる多軸負荷試験機を用いる。また、最大有効画素5060万画素のカメラに65[mm](微小要素の撮影)と100[mm](試験片全体の撮影)のレンズを装着して画像の撮影を行う。

3.2 試験片ならびに実験条件

底面の長さが異なる二等辺三角形の断面を有する天然ゴム製の試験片(硬度 $H_s = 60$, 等辺の長さ22[mm], 標点間距離40[mm])を用いる(図2参照)。この試験片を試験機に装着し、大きな捩りを最大捩り角 $\phi_{avg} = 270[\text{deg}]$ まで加える。なお、

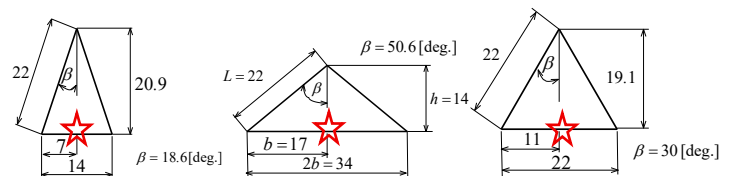


Fig.2. Isosceles triangle section and equilateral triangular section.

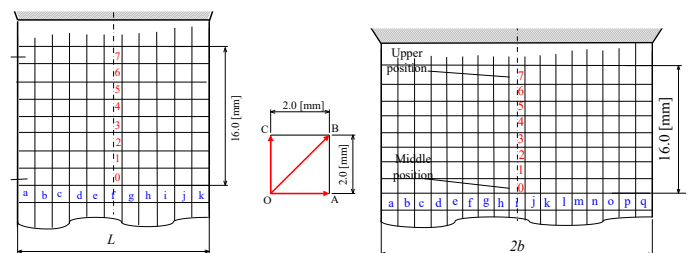


Fig.3. Scribed line in cross-section.

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

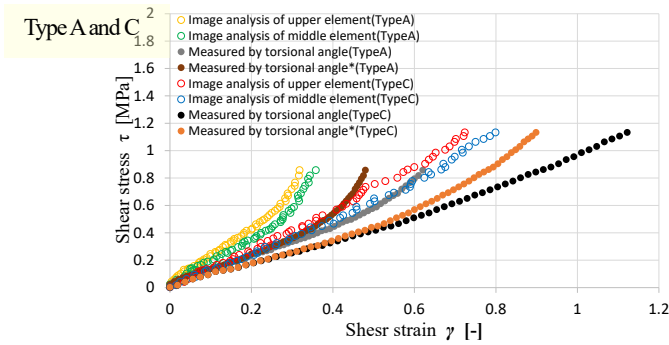


Fig.4. Shear stress-shear strain diagram (comparison at bottom sides).

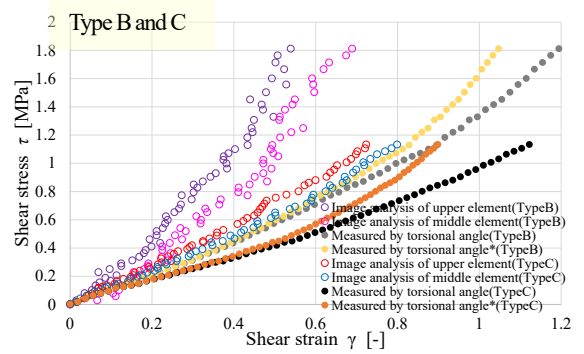


Fig.5. Shear stress-shear strain diagram (comparison at equal sides).

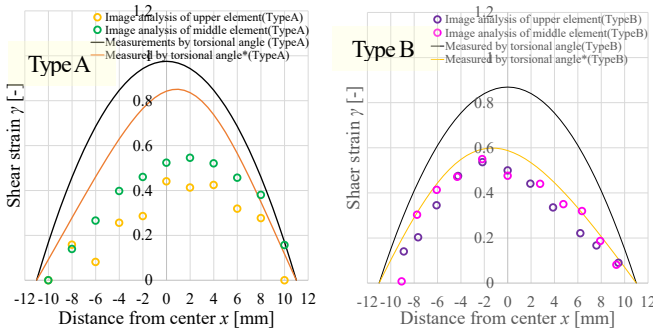


Fig.6. Distributions of shear strain

Fig.7. Distributions of shear strain

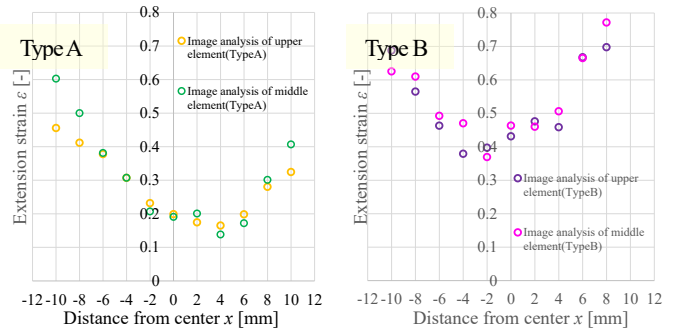


Fig.8. Distributions of extensional

Fig.9. Distributions of extensional

図3に示すように試験片の表面には、予め等間隔 (2.0[mm]) に格子状の罫書線が描かれ、画像の撮影箇所としては、標点間の中央部 (0) と上部 (7) の要素に対して行う。また、断面内の歪やワーピングの分布の撮影には、中央部と上部の水平方向の微小要素に対して行う。

4. 実験結果と考察

鋭角二等辺三角形と正三角形 (図2 (A) と (C)) の底辺の中央要素の★の位置の剪断応力-剪断歪線図を比較したものが図4である。この図でオレンジ色のプロット○と緑色のプロット○は試験片上部 (7)、中央部 (0) の鋭角二等辺三角形の結果を、一方で、赤色のプロット○と青色のプロット○が上部と中央部の正三角形の結果を表している。振り変形の増加と共に上部が中央部に比べ剪断歪が小さくなる事が確認できる。なお、図中の中実のプロット(●, ●)がそれぞれ、(A)と(C)の Saint Venant の振り理論の剪断応力と剪断歪を表し、更にプロット(●, ●)が試験片の標点間の伸びの修正を施した結果である。これらは本画像解析の結果に比べ剪断歪は大きく、振り変形の進行と共に差異が広がる事が確認できる。一方で、図5は、鈍角二等辺三角形と正三角形 (図2 (B) と (C)) の底辺の中央要素★の位置の剪断応力-剪断歪線図を比較したものである。この図で紫色のプロット○とピンク色のプロット○は試験片上部と中央部の鈍角二等辺三角形の結果を表している。また、中実のプロット(●, ●)が Saint Venant の結果である。なお、鈍角三角形のタイプ B は、正三角形のタイプ C より、剪断応力は大きく剪断歪は小さいことがわかる。

次に、図6ならびに図7は、振り角 $\theta_{leg}=270[deg]$ における図2中の(A)ならび(B)の側面 ($L=22[mm]$) の剪断歪の分布を比較した図である。(A)の分布は、底辺側に剪断歪の最大値が存在するのに対して、(B)の分布の最大値は、頂点側に存在していることが分かる。次に、図8ならびに図9は、振り角

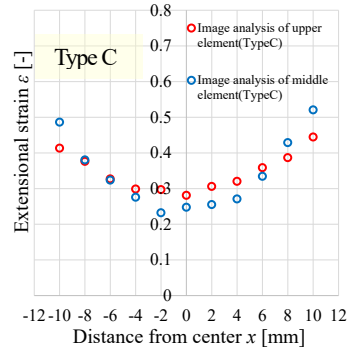


Fig.10. Distributions of extensional strain (type C).

$\theta_{leg}=270[deg]$ における(A)ならび(B)の側面の伸び歪の分布を比較したものである。伸び歪は、三角形の頂点に近づく程、大きく、断面の図心では低くなるが、図8の(A)の場合には、伸び歪の分布の最小値は、底辺側に存在し、また、図9の(B)の場合には、その最小値は、頂点側に存在し、底辺側で最も大きくなっていることが確認できる。一方で、図10は、図2(C)の正三角形断面における伸び歪の分布であり、振りの回転中心軸から表面までの距離が最も小さい辺の midpoint で最小値となっていることがわかる。

5. 結言

- 二等辺三角形の歪分布を調べ、以下のことが明らかとなった。
- (1) 剪断歪の分布は、鋭角断面では最大値が断面の底辺側に偏り、鈍角断面では逆に頂点側に偏る。
 - (2) 鋭角断面では頂点の近傍で伸び歪が最も大きく、再び底辺側で増加し、また、鈍角断面では底辺の近傍で最も大きく、再び頂点側で増加することから、伸び歪の分布は振りの回転中心から表面までの距離に依存する。