アルミニウム円管の引張り・ねじり複合負荷材料試験* (CCD カメラによる塑性ひずみの非接触測定)

高橋 寛^{*1}, 本橋 元^{*1}
高橋 正樹^{*2}, 野中 琢夫^{*3}

Tension-Torsion Combined Loading Tests of Aluminium Tubes (Optical Measurement of Plastic Strain with CCD Camera)

Hiroshi TAKAHASHI, Hajime MOTOHASHI,
Masaki TAKAHASHI and Takuo NONAKA

Optical measurement of plastic strain with CCD camera was applied to tension-torsion combined loading tests of aluminium tube specimens. The axial elongation and the shear strain were successfully measured with the accuracy of 0.5% strain up to 30% strain range, although the change of diameter was detected by another direct method.

Key Words: Combined Stress, Constitutive Equation, Material Testing, Plasticity, Optical Strain Measurement, CCD Camera

1. はじめに

複合負荷材料試験は、これまでも降伏曲面を求める目的で数多くなされてきた。二軸材料試験としての必要条件は、二つの応力成分および二つのひずみ成分がそれぞれ独立に決定できることである。この条件を満たすものとして通常考えられているものは、円管の引張り・内圧試験および円管の引張り・ねじり試験である。

二つのひずみ成分を分離して検出する方法としてこれまでひずみゲージ⁽¹⁾や差動トランスなどを用いた機械式検出法⁽²⁾が利用されてきた。これらはいずれも10%程度までのひずみ検出が可能であり、降伏曲面を求める目的の実験には十分有効な検出法であった。

近年構成方程式に関する研究が盛んになるにつれて、数10%の大ひずみ域までの応力-ひずみ関係を求める研究に関心が移ってきたように思われる⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。10%を越える大ひずみ域に対しては、ひずみゲージは使用できず、機械式検出法が試みられてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しか

し引張り・ねじり試験の場合、直径変化も伴うため伸びひずみ・ねじりひずみを機械的に分離して検出することは非常に困難であった。

そこで、本研究では矢川ら⁽⁸⁾によって提案されたCCDカメラによるひずみの非接触測定を、引張り・ねじり複合負荷材料試験に適用することを試み、その可能性と測定精度等を調べた。

2. 測定原理

2.1 平面上の二次元ひずみ 図1に示すように平板試験片上に3個のマーキングを施す。例えば下地を白くスプレー塗装し、その上に直径2mm程度の黒点を油性インクで印す。

CCDカメラ(ナショナル WV-CD 50)をその光軸が試験片平板に垂直になるように設置する。マーキングと下地のコントラストがはっきりするように照明を均一に当てる。白熱灯が安定してよい。画像のデータは、640×512画素、256階調の明るさとしてフレームメモリーに記憶される。

パーソナルコンピュータ内において、マークは画素の集合と認識される。各画素の明るさの分布の一例を図2に示す。この明るさを重み関数として、マークの重心座標を計算する。各マークの変形前の座標を $(x_i,$

* 平成2年11月29日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成3年5月27日。

^{*1} 正員、山形大学工学部 (〒992 米沢市城南4-3-16)。

^{*2} 学生員、山形大学大学院。

^{*3} 米沢電線(株) (〒992 米沢市東1-10-53)。

y_i) とおく ($i=1, 2, 3$). 次にわずかに変形した時の座標を求め、各マークの変位 (u_i, v_i) を定める。

この時三つのマーク内のひずみは、有限要素法の考え方になって次式で決定できる。

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= (1/A) \sum b_i u_i \\ \epsilon_y &= (1/A) \sum c_i v_i \\ \gamma_{xy} &= (1/A) \sum (c_i u_i + b_i v_i) \quad \dots\dots\dots (1)\end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}A &= \sum a_i, \quad a_i = x_2 y_3 - x_3 y_2 \\ b_i &= y_2 - y_3, \quad c_i = x_3 - x_2\end{aligned}$$

本手法の特徴として次の二点を挙げることができる。

(1) マークの大きさをあえて小さくする必要はない。一樣ひずみならば、大きさに無関係である。

(2) ひずみは、画像面座標の相対値で決定されるので、試験片上の実際の座標を知る必要がない。したがって平板とカメラの距離は任意でよい。

2・2 円筒面上のひずみ 一般に曲面上のひずみを検出するには、試験片とカメラとの距離も問題となるために、三角測量を適用する必要がある⁽⁹⁾。すなわち図3に示すようにA, Bの2箇所から撮影した画像データ (x_a, y_a), (x_b, y_b) を用いて、試験片上点Pの三次元実座標 (X, Y, Z) を決定する。

図1 平面上のひずみ

図2 画像データ

本研究の円筒引張り・ねじり試験についても、当初三角測量を適用した⁽¹⁰⁾。すなわち図3のX軸に平行に円筒試験片を設置し、試験片表面上に印した4個のマークによって、半径・伸び・ねじれ角を検出した。

この結果、単純引張試験においてはのびひずみ25%まででのびひずみ誤差が0.2%と良好な結果であったが、本来零であるべきねじりひずみが7%にも達した。また単純ねじり試験においてはねじりひずみ16%まででねじりひずみ誤差が2%程度であった。

この原因は曲率半径の測定精度が悪いためと考えられる。すなわち試験片円周方向に印した三点とカメラとの距離を求め、それらのわずかな差から半径を算出するため、Zの測定誤差が大きく半径値に影響し、ねじりひずみの精度を低下させている。

以上の経験から、本研究では直径のみ直接測定することにした。マイクロメータによる測定でも十分であるが、非接触測定にはレーザ外形測定器などが利用できる。直径が分れば三角測量の必要はない。

図4に示すように円筒試験片の軸方向に二つのマーキング P_1, P_2 を施す。このために試験片円筒面に外接する半円筒を加工し、軸方向に20 mm 離して $\phi 2$ mm の孔をあけたものをジグとして用意した。試験片軸方向をX軸、カメラの光軸をZ軸とし、互いに直交しているものと仮定する。カメラの絞りを最大限に絞りいわゆる針穴写真機の状態をつくる。このとき図5から次の幾何学的関係を得ることができる。

図3 三角測量

図4 円筒上のマーク

$$Z = S - R \cdot \cos \theta$$

$$Y = R \cdot \sin \theta$$

$$X = x \cdot Z/s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし

$$Y/Z = y/s$$

すなわち

$$\sin(\theta + \tan^{-1} y/s) = \frac{S \cdot y}{R \sqrt{s^2 + y^2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで s は、レンズ中心すなわち針孔の位置からカメラ画像面までの距離、 S はレンズ中心から試験片中心軸までの距離で、あらかじめ与えられているものとする。 R が与えられれば、上式を用いて画像面座標 (x, y) から実座標 (X, Y, Z) を求めることができる。

二つのマーク間の X 軸上の距離 L と円周方向の角度差 θ を定義する。

$$L = X_2 - X_1, \quad \theta = \theta_2 - \theta_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

時刻 $t = t$ と $t = t + dt$ 間のひずみ増分 $d\varepsilon$ とねじりひずみ増分 $d\gamma$ は次式で定義できる。

$$d\varepsilon = dL/L, \quad d\gamma = Rd\theta/L \quad \dots\dots\dots (5)$$

ε については、積分して対数ひずみで表すことができるが、 γ については数値的に逐次積分しなければならない。

上式中の画像面座標 (x, y) および画像面までの距離 s の単位は実寸法 (mm) であるが、フレームメモリのデータとしては画素数 (pixel) の単位で扱われる。そこで画素数を単位とする画像面座標を改めて ξ, η (pix) と表す。一画素当たりの実寸法を x, y 方向それぞれ p_x, p_y (mm) とおく。

$$x = \xi p_x, \quad y = \eta p_y \quad \dots\dots\dots (6)$$

画像面までの距離 s を画素単位で表し、これを ζ_x, ζ_y (pix) とおく。

$$s = \zeta_x p_x = \zeta_y p_y \quad \dots\dots\dots (7)$$

これを用いると式 (2), (3) は次のように表される。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{S \cdot \eta}{R \sqrt{\eta^2 + \zeta_y^2}} - \tan^{-1} \frac{\eta}{\zeta_y}$$

$$X = (S - R \cdot \cos \theta) \xi / \zeta_x \quad \dots\dots\dots (8)$$

3. 測定方法

3.1 カメラ定数の決定 通常レンズ中心すなわち針穴写真機における針穴がカメラ内のどの位置にあるかが不明である。そこで図 6 に示すようにカメラ前縁 Q を基準面と定義し、レンズ中心までの距離 Z'_0 をいかに定めるかを考える。試験片上軸方向に二つのマーキング P_1, P_2 を用意し、その距離はあらかじめ与えられているものとする。点 Q から試験片までの距離 Z' を変化させたときの画像面座標を求める。この時画像中心 O すなわちレンズ中心から画像面に下した垂線の足の位置が不明で、図 5 の x, y はまだ決定できない。画像面左上端を原点とする仮座標 x', y' が測定データとして得られる。中心 O の座標を x'_0, y'_0 とおくと

$$x = x' - x'_0, \quad y = y' - y'_0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

マーク 1, 2 について次式が成立する。

$$(x'_1 - x'_0)/s = X_1/(Z' + Z'_0)$$

$$(x'_2 - x'_0)/s = X_2/(Z' + Z'_0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

二式より

$$Z' + Z'_0 = \Delta X \cdot s / \Delta x = \Delta X \cdot \zeta_x / \Delta \xi \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし

$$\Delta x = x'_2 - x'_1, \quad \Delta X = X_2 - X_1$$

Z' を変えて $\Delta \xi$ を測定する。測定例を図 7 に示す。 $\Delta X = 20$ mm として、横座標に $\Delta X / \Delta \xi$ 、縦座標に Z' をプロットすると直線が得られる。この切片から $Z'_0 = 34$ mm、さらにこう配より $\zeta_x = 1\,222$ pix が得られる。

さらに式 (10) より

$$\xi_i - \xi_0 = \zeta_x \cdot X_i / Z \quad \dots\dots\dots (12)$$

横座標に $1/Z$ 、縦座標に ξ_i をプロットすると、同じように直線が得られる。その切片より $\xi_0 = 307$ が定まる。

図 5 座標の決定

図 6 カメラ定数

以上の操作を y 方向についても行うことにより $\xi_y = 1\,250$, $\eta_y = 225$ が得られる。

最後に式(8)中の試験片中心軸までの距離 S については, Z_0 がすでにわかっているので, カメラ前縁 Q から試験片中心軸までの距離を実測すれば決定できる。カメラが試験片に近い程像が大きくなる。本研究では $S = 187\text{ mm}$ である。

3・2 測定装置 本研究の測定方法を実現するには, 図8に示すようにカメラ光軸を試験片中心軸に直交させることが必要条件である。このためにまずカメラレンズ中心を通り X 軸, Y 軸回りにカメラを回転させる必要がある。

図9に自作したカメラ回転台を示す。ウォームホイールによる回転機構を二組組合せ, ホイールの回転軸を各々 X , Y 軸に一致させたものである。直交させる順序は以下のとおりである。

(1) 試験片中心軸に直交する小孔 ($\phi 0.5\text{ mm}$) を貫通し, これに注射針(長さ 45 mm , 孔内径 $\phi 0.3\text{ mm}$) を挿入する。

(2) カメラ回転台を XY 方向に平行移動させ, 針を通過した光が画像面に写る位置を探す。このとき光はレンズ中心を通っているが, 画像面に直交しているとは限らない。

(3) 回転台によりカメラを X 軸, Y 軸回りに回転させ光が画像中心 (ξ_0, η_0) に当たる姿勢を探す。回転がレンズ中心回りであることが保証されていれば,

図7 Z' と $1/\Delta\xi$ の関係

回転によって光が画像面からはずれることはない。

以上の手順によってレンズ中心と画像面中心を結ぶカメラ光軸が試験片中心軸と直交したことになる。

4. 材料試験

4・1 ひずみの測定範囲および測定精度 試験片は, アルミニウム押出円管 (A 1070 TE) $\phi 16\text{-t } 2$ を長さ 130 mm に切断し, $450\text{ K} \times 1$ 時間焼なまししたものである。CCD カメラによるひずみ計測の信頼度を調べるため, 単純ねじり・単純引張りそれぞれについてダイヤルゲージによるひずみ計測⁽⁴⁾ との比較を行った。

まず, ねじり試験については, カメラの見える面だけでひずみを計測すると, ひずみの測定範囲が狭く上限が 17% であった。マークが円筒画面周辺部に移ると, マーク形状がゆがみ, さらに照明状態が変化してデータのばらつきが発生しやすい。安定したデータが得られるのは, $|\theta| < 30^\circ$ すなわち円筒画面中央 $1/2$ の範囲である。

二つのマークの位置をこの範囲におさめながら, なおかつひずみの測定範囲を広げるために, 円周方向に

図8 カメラ光軸と試験片中心軸の直交

図9 カメラ回転台

約 30° の間隔で複数対のマークを施した。初めのマーク対が $|\theta| < 30^\circ$ の範囲におさまらなくなると、次のマーク対に乗り換えるという方法で、ひずみの測定範囲を広げることができる。この時の画像面の様子を図 10 に示す。またダイヤルゲージ⁽⁴⁾ による検定結果を表 1 に示す。6 対のマークを用いることによってひずみの測定範囲を 30% に広げることができた。マークを乗り換えても特に誤差が累積されるということはなく、ひずみ誤差 0.5% 以下とみなすことができる。

直径 16 mm の試験片で評点距離 20 mm の場合、ねじりひずみが 30% を越えると、一対のマークをともに $|\theta| < 30^\circ$ の範囲におさめるのが困難になる。したがって、さらにひずみの測定範囲を広げるには、標点距離を小さくする必要がある。

引張試験については、伸びひずみ 30% まで特に測定上の支障はなく、ひずみ誤差 0.5% である。

4.2 比例負荷試験 $\sqrt{3}\tau - \sigma$ の応力平面において、応力方向 ϕ を一定とした比例負荷試験を行う。

$$\phi = \tan^{-1}(\sqrt{3}\tau/\sigma) \dots\dots\dots (13)$$

図 10 マーク画像

相当応力および相当ひずみは次式で定義される。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \quad d\bar{\epsilon} = \sqrt{d\epsilon^2 + d\gamma^2}/3 \dots\dots\dots (14)$$

図 11 に $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合の応力ひずみ曲線を示す。また表 2 に実験最終時の軸方向ひずみ ϵ_x 、円周方向ひずみ ϵ_t およびねじりひずみ γ の値を示す。例えば $\phi = 30^\circ$ の場合、12% の直径変化のもとで、27% のねじりひずみの検出が可能であった。

表 1 ねじりひずみの検定

検定 歪%	マーク毎の歪誤差%					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
2	0.2					
4	0.2					
6		0.1				
8		0.1				
10		0.5				
12		0.5				
14			0.5			
16			0.3			
18			0.3			
20			0.4			
22				0.4		
24				0.1		
26				-0.4		
28				0.	0.3	
30					0.1	
32					0.1	0.5
34						0.1

表 2 実験最終時のひずみ成分 (%)

ϕ	ϵ_x	ϵ_t	γ
0°	36.9	-24.3	0.3
30°	23.2	-11.9	27.0
60°	10.8	-4.5	43.1
90°	0.3	-0.3	38.0

図 11 応力ひずみ曲線

5. 結 論

引張り・ねじり複合負荷試験において, CCD カメラによるひずみの非接触測定を試み, のびひずみ・ねじりひずみともに 30% まで, ひずみ誤差 0.5% の精度で測定可能であることを確かめた。本測定法はひずみ誤差がひずみの大小に無関係に一定であることが特徴である。

これによって今後, 大ひずみ域の複雑な負荷経路における複合負荷試験が可能になった。現在のところマーク重心座標のデータとりこみが手作業のため, その都度負荷を止める必要がある。ひずみ速度一定の試験をするために, データの自動採取が今後の課題であ

る。

文 献

- (1) 白鳥・池上・金子, 機論 (第 1 部), **39** (1973), 485.
- (2) 大橋・川島・徳田, 文献 (1) の 434 ページ.
- (3) Khan A. S. and Parikh, Y., *Int. J. Plasticity*, **2** (1986), 379.
- (4) 高橋・塩野・千田・遠藤, 機論, 50-450, A (1984), 184.
- (5) Stout, M. G. and Rollett, A. D., *Met. Trans.*, A, **21** (1991), 3201.
- (6) 金子・有山・丸山, 機論, 52-480, A (1986), 2079.
- (7) Wu, H. C. and Xu, Z., *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, **112** (1990), 330.
- (8) 矢川・松浦・安藤, 機論, 49-447, A (1983), 1435.
- (9) 矢川・三好・吉岡・曾根田, 機論, 53-491, A (1987), 1408.
- (10) 高橋 (正)・高橋 (寛), 機論, No. 901-2 (1990-5), 133.