パイプ形ひずみゲージを用いた接触圧力の測定*

小 島 之 夫^{*1}Measurement of Contact Pressure Distribution
using Pipe-Type Strain Gage

Yukio KOJIMA

A simple method for measuring contact pressure at a tool-workpiece interface is presented. The strain of the tool near the contact surface is measured using a pipe-type strain gage, and is converted into the pressure. The measured pressure distributions in plastic compression of rectangular blocks almost agreed with those estimated from the strain distribution. The pressure was distributed uniformly over the contact surface in the well-lubricated specimens regardless of the height-to-width ratio of the specimen, H_0/L_0 . Friction hills were observed in the unlubricated specimens with $H_0/L_0 = 0.25$ and 0.5 . A concave pressure distribution was obtained for the specimen with $H_0/L_0 = 1$, where the pressure increased from the center to the periphery of the contact surface. The present method can be applied to measure die pressure in practical metalworking processes.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Contact Problem, Nondestructive Inspection, Plastic Compression, Contact Pressure, Rectangular Block, Strain Gage

1. ま え が き

前報⁽¹⁾では、ボルトの軸応力の測定に使われているパイプ形ひずみゲージを用いて、円柱を塑性圧縮する場合の軸対称圧力分布を測定した。この方法では、工具の表面付近まであけた多数のドリル穴にパイプ形ゲージを接着し、接触圧力によって生じる工具のひずみ分布を測定する。そして、ひずみの測定値全部を用い、数値解析(有限要素法)によって圧力分布を推定する。この方法は、従来用いられてきた圧力ピン⁽²⁾⁽³⁾に比べて、測定装置(工具)の準備が簡単である。また、材料表面に非接触で圧力分布が測定できる。しかし、ひずみ分布から圧力分布を計算するのに手間がかかる。特に、二次元分布した圧力の測定が容易でない。

本報では、パイプ形ひずみゲージを用いて、さらに簡単に接触圧力が測定できるように、ある位置でのひずみの測定値を直接その位置の圧力に換算する方法を示す。この方法を用いて、四角柱を塑性圧縮する場合の二次元圧力分布を測定する。得られた圧力分布を、

前報⁽¹⁾とほぼ同じ方法で推定した圧力分布と比較し、本報の方法の妥当性および問題点について検討する。

2. 測定方法

2-1 ひずみゲージの接着 工具表面付近にパイプ形ひずみゲージ(共和電業(株)SKF-2775)を接着した状態を図1に示す。パイプ形ひずみゲージ(以下ゲージと記す)は、通常のはくひずみゲージを直径2mmの円筒状に丸めた構造である。ゲージ長は3mmであり、電気抵抗は120Ωである。接着用の穴は、φ2.00mmのドリルを用い、工具表面とドリル先端との距離が1mmになるようにあけた。この穴に常温2液硬化型のエポキシ系接着剤を十分に流し、ゲージを挿入する。φ2mmの棒を上から入れ、ゲージが穴の底につかえるまで押し込む。このとき、グリッドの中心は工具表面から4.4mmの位置にくる。その位置を中心にゲージ長の範囲について、穴の内壁周のz軸方向の平均ひずみが測定される。

2-2 測定原理 ゲージを中心にして半径aの範囲に一定圧力pが加わる場合を考える。穴を無視し、工具をヤング率がEの半無限弾性体と仮定する。この場合、弾性理論⁽⁴⁾によって計算した中心軸(z軸)上の垂直ひ

* 原稿受付 平成5年5月14日。

*1 正員, 名古屋工業大学(〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

ずみ ε_z を、図2に実線で示す。縦軸は工具表面からの距離であり、半径 a で無次元化してある。 ε_z は、表面から少し内部で絶対値が最大となり、この付近の変化は急激でない。ゲージの中心位置 ($z_0 = 4.4\text{mm}$) でのひずみに注目すれば、圧力の加わる領域が $a = 5 \sim 50\text{mm}$ ($z_0/a = 0.88 \sim 0.088$) の範囲で変化しても、ひずみの変化は $\varepsilon_z/(p/E) = 0.75 \sim 0.60$ 、すなわち20%程度であることがわかる。このことは、ひずみの大きさがゲージ接着位置近付の圧力によって支配され、そこから離れた部分の圧力によってあまり影響されないことを意味する。したがって、測定されたひずみから、その付近の圧力が直接推定できる。

図1 工具に接着したパイプ形ひずみゲージ

図2 表面付近のひずみ分布

次に、ゲージ接着用の穴がひずみに与える影響について検討する。このため、円柱の中心に図1のドリル穴がある場合を有限要素法によって解析した。円柱の半径および高さは100mmである。圧力の加わる半径は、 $a = 10\text{mm}$ とする。この場合のドリル穴の形状を図2中に示す。ただし、穴先端は円錐形状とせず、平面として解析した。穴の側壁に沿う ε_z を図2中に●で示す。ゲージの中心 ($z_0 = 4.4\text{mm}$) では、穴先端の応力集中によって、ひずみが約10%大きくなることわかる。

2.3 実験方法 実験材料として、焼きなましたアルミニウム (A1050) を用いた。試験片の形状は、正四角柱である。幅を一定 ($L_0 = 36\text{mm}$) として、高さを $H_0 = 9, 18, 36\text{mm}$ ($H_0/L_0 = 0.25, 0.5, 1$) と変化させた。

試験片の圧縮装置を図3に示す。工具として鋼 (S45C) のダイプレートをを用いた。下の工具には、間隔が8mmで 5×5 個のゲージが接着されている。ひずみの測定には、最小測定ひずみが 1×10^{-6} のデジタルひずみ測定器を用いた。

角柱端面を半固形潤滑剤 (牛脂:50%, 黒鉛:50%) で十分潤滑した場合と潤滑しない場合について実験を行った。

図3 測定用工具

3. 実験結果

3.1 圧縮荷重 圧縮率 $R=(H_0-H)/H_0$ の増加に伴う、平均圧縮応力 F/L^2 の変化を図4に示す。ここで、 F はロードセルで測定した圧縮荷重である。また、 H は変形中の高さであり、 L は四角柱が一樣変形したときの幅 $\sqrt{H_0/H} \cdot L_0$ である。潤滑した場合の圧縮応力は、試験片の初期高さ H_0/L_0 が変わってもほとんど変化しない。また、圧縮後の試験片形状はほぼ正四角柱であった。すなわち、試験片がほぼ一樣変形した。

図4 平均圧縮応力 F/L^2

潤滑しない場合の圧縮応力は、潤滑した場合に比べて増加する。その増加量は、試験片の初期高さ H_0/L_0 が小さくなるほど顕著になる。この傾向は、これまでの測定結果⁽³⁾と同じである。

3.2 圧力分布 圧縮率が $R=0.2$ における圧力分布を図5に示す。その際、 $\epsilon_z/(p/E)=0.7$ として、測定値 ϵ_z を圧力 p に換算した。工具のヤング率は $E=206\text{ GPa}$ とした。接触領域は、一辺40mmの正方形とした。そして、圧力は、ひずみ測定位置を中心とした一辺8mmの正方形領域で一定として示した。なお、潤滑しない試験片では、側面にバルジ変形が生じ、実際の接触領域($H_0/L_0=0.25$)は図3中に示すようであった。

潤滑した場合、接触面の圧力分布は、試験片の初期高さ H_0/L_0 によらず、ほぼ一定である。圧力の変動は約10%であった。これは、ひずみの測定値において約 30×10^{-6} であり、一般のひずみゲージでの測定誤差に比べてやや大きい。圧力が大きくなる位置と小さくなる位置は、どの圧力分布でもほぼ同じであった。したがって、ゲージの接着に起因する誤差(接着誤差)と考えられる。パイプ形ひずみゲージでは、ゲージを所定の位置に直接圧下して接着することができない。圧力の測定精度を上げるためには、今後、簡単に信頼性の高い接着方法が必要となる。

図5 圧力分布($R=0.2$)

潤滑しない場合、試験片が高いと($H_0/L_0=1$), 圧力が接触面の中央で低くなる。試験片が低くなるに伴って($H_0/L_0=0.5 \rightarrow 0.25$), 中央が高くなる。これらの分布傾向は、圧力ピンによる測定結果⁽³⁾と同じであり、十分妥当な結果である。この場合にも、ゲージの接着誤差によって、圧力分布が中心に対してやや非対称になった。

図5の圧力分布を積分した荷重 F' と、測定した荷重 F との比較を図6に示す。潤滑した場合には、積分値と測定値とがほとんど一致する。すなわち、今回のゲージ接着条件では、ひずみから圧力への換算係数 $\varepsilon_i/(p/E)=0.7$ がほぼ適当であることがわかる。しかし、この圧力測定法を実用的な問題に適用した場合、換算係数の妥当性を実験的に確認できるとは限らない。今後、いろいろな条件について、換算係数を事前に決める方法が必要である。

潤滑しない場合には、積分荷重 F' が測定値 F より約15%大きくなる。これは、前報⁽¹⁾の円柱圧縮の場合と同様、工具表面の摩擦力によってひずみ ε_i が大きくなったためである。前報では、摩擦力の影響を考慮して、圧力分布を補正することができた。本報の2次元圧力分布では、摩擦力の方向が確定できないため、圧力分布を補正することは容易でない。

4. すべてのひずみから推定した圧力分布

前章では、ゲージのひずみは接着位置近付の圧力によって支配され、そこから離れた部分の圧力によって影響されないと仮定した。その結果、ひずみから圧力が直接換算できた。本章では、この仮定について検討するため、測定した全部のひずみを用いて圧力分布を推定する。そして、前章の圧力分布と比較する。

図6 圧力分布の積分値 F' と測定値 F との比較

4.1 圧力分布の推定方法 有限要素法で用いる形状関数 $N_i(x,y)$ によって、接触面の圧力分布を近似する。すなわち、接触面を要素で分割し、節点 i の圧力を p_i とする。これらを用いて、圧力を

$$p = \sum_{i=1}^{N_p} N_i p_i \quad (1)$$

とする。 N_p は節点数であり、推定する圧力の総数となる。今回の場合では、接触面を一辺40mmの正方形として、この領域を4節点正方形要素で x および y 方向に16等分割した。 $N_p=17 \times 17=289$ である。

式(1)の圧力分布が加わった場合、 i 番目のゲージに生ずるひずみ ε_i は次式のように書ける。

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^{N_p} c_{ij} p_j \quad (2)$$

N_p はひずみの測定点数であり、図3の場合 $N_p=25$ となる。係数 c_{ij} は、ひずみ ε_i に対する圧力 p_j の影響係数であり、形状関数 $N_j(x,y)$ の圧力分布が加わった場合、 i 番目のゲージに生ずるひずみである。前報⁽¹⁾の円柱圧縮では、軸対称の弾性有限要素法によって係数 c_{ij} を計算した。本報では、工具を半無限弾性体として c_{ij} を計算した。すなわち、表面集中荷重によるひずみの解析解⁽⁴⁾を、 $N_i(x,y)$ に従って数値積分した。この方法では、ゲージ接着用のドリル穴が考慮されない。

i 番目のひずみの測定値を $\tilde{\varepsilon}_i$ として、次の関数を最小にするように p_i を決める。

$$\sum_{i=1}^{N_p} (\varepsilon_i - \tilde{\varepsilon}_i)^2 + \gamma \sum_{i=1}^{N_p} \left[\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right)_i^2 + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right)_i^2 + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right)_i^2 \right] \quad (3)$$

ここで、式(3)の第2項は、 N_p を増加していった場合、圧力分布が振動状になるのを防ぐために、文献(5)を参考にして付け加えた。係数 γ は分布を平滑にするためのパラメータであり、 γ を大きくしていくと圧力が線形分布に近づく。圧力 p の2次微分は、差分で評価する。

なお、前報⁽¹⁾では、式(3)の第1項だけを用いて($\gamma=0$)圧力を求めた。この場合には、圧力分布が振動状にならない程度に N_p を小さくする必要があった。

式(3)を圧力 p_j ($j=1, \dots, N_p$) で微分して0とおけば、 p_j に関する N_p 元の連立一次方程式が得られる。この連立方程式を解くことによって圧力分布 p_j が求められる。

4.2 平滑化のパラメータ γ $H_0/L_0=0.25$ の試験片について、 γ を変えた場合の圧力分布を図7に示す。また、この場合について、式(2)の ε_i と測定値 $\tilde{\varepsilon}_i$ との2乗平均差

$$\Delta \varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (\varepsilon_i - \tilde{\varepsilon}_i)^2 / N_p} \quad (4)$$

および平均圧力 p_m に対する圧力 p_i の 2 乗平均差

$$\Delta p = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (p_i - p_m)^2 / N_p} \quad \text{----- (5)}$$

を図 8 に示す。

γ が大きくなると、 $\Delta \varepsilon$ が一定値に近づき、 Δp が非常に小さい値になる。これは、圧力が平滑化されすぎて接触面で一定となるためである。 γ が小さくなり、 $10^{-10} \sim 10^{-17}$ の範囲では、圧力分布 (Δp) が γ によって変化せず同じになる。この範囲では、 $\Delta \varepsilon$ も 1×10^{-6}

以下となる。なお、図 7 には結果を示していないが、 γ がさらに小さく 10^{-18} 以下になると、平滑化の効果が数値的になくなり、圧力分布が振動状になる。このため、 Δp が大きくなる。

以上により、 γ を $10^{-10} \sim 10^{-17}$ の範囲にとれば、圧力分布が振動状にならず、 $\Delta \varepsilon$ もひずみの測定精度 (1×10^{-6}) 以下となる。すなわち、測定したひずみ分布に対応する圧力分布が安定に計算できる。

4.3 圧力分布 $\gamma = 10^{-11}$ として推定した圧力分布を図 9 に示す。また、潤滑しない場合について、中央断面 ($y/L = 0.5$) の圧力分布を図 10 に示し、第 3 章の結果と比較する。

図 8 γ による $\Delta \varepsilon$ と Δp の変化

図 7 平滑化のパラメータ γ の影響

図 9 すべてのひずみから推定した圧力分布 ($\gamma = 10^{-11}$)

ひずみの測定値から直接換算した圧力は、すべてのひずみから推定した圧力分布とよく一致する。すなわち、直接換算した圧力を滑らかな曲線で結んだ分布が、本章の圧力分布となる。したがって、今回のような圧力分布については、本報で示した簡単な測定法が妥当であることがわかる。

N_p を増加して圧力を求めても、分布曲線がより滑らかになるだけで、分布形は変化しない。接触面の外縁付近では、フォールディングによって圧力が高くなると考えられるが、 N_p を増やしてもこの圧力上昇は測定できない。

本章の圧力分布を積分した圧縮荷重は、第3章の圧力分布の積分値(図6)とほとんど同じであった。すなわち、潤滑した場合には、積分値と測定値とがほぼ一致する。しかし、ドリル穴の応力集中を考えた場合、積分値が測定値より約10%大きくなるはずである。この原因については十分説明できない。

図10 中央断面の圧力分布

4.4 ひずみの測定誤差の平滑化 3.2節で述べたように、ゲージの接着に基づいてひずみが約 30×10^{-6} 変動する。この誤差は、平滑化のパラメータ γ を大きくすることによって取り除くことができる。図8によれば、 $\gamma = 10^{-8}$ とすれば、潤滑しない場合に約 30×10^{-6} のひずみが平滑化される。このときの圧力分布を図11に示す。これらの圧力分布は、図9に比べてより対称な分布になる。

5. 結 言

パイプ形ひずみゲージを用いて接触面付近のひずみを測定すれば、この測定値からその位置の接触圧力が推定できることを示した。この方法を四角柱の塑性圧縮に適用し、妥当な圧力分布を得た。この圧力分布は、すべてのひずみ測定値を用いて推定した圧力分布とほぼ同じになった。

また、ひずみゲージの接着状態に起因して、10%程度の誤差を生じた。圧力の測定精度を上げるためには、今後、簡単で信頼性の高い接着方法が必要となる。さらに、ひずみから圧力への換算係数の決定法も必要である。

文 献

- (1) Kojima, Y. and Mizuno, T., JSME Int. J., 32-4 (1989), 567.
- (2) Rooyen, G. T. and Backofen, W. A., Int. J. Mech. Sci., 1-1(1960), 1.
- (3) 長松, 塑性と加工, 14-144(1973), 49.
- (4) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd Ed., (1970), 398, McGraw-Hill.
- (5) Schnur, D. S. and Zabaras, N., Int. J. Numer. Methods Eng., 30(1990), 57.

図11 接着誤差を平滑化した圧力分布($\gamma = 10^{-8}$)