ラ ッ ク 状 工 具 の 押 込 み*

竹 増 光 家**, 尾 崎 龍 夫***

Indentation of a Rack-Shaped Punch

by Teruie TAKEMASU and Tatsuo OZAKI

Plane strain indentation of lead specimens of finite thickness is investigated experimentally and theoretically for the purpose of its application to the rough forming of large gear teeth. The metal flow is examined by visioplasticity during indentation. The proposed slip line field solutions and upper bound solutions explain well the observed metal flow and the actual load diagrams. It is found that the teeth can be formed with a precise pitch by successive indentation using a punch with double teeth.

Key Words: Indentation, Rack-Shaped Punch, Lead Specimens, Gear Tooth, Visioplasticity, Slip Line Field, Upper Bound Approach

1. 緒 言

大径大モジュールの歯形部品は現在ほとんど切削加工により製作されているが、その歯形部をラック状工具の押込みにより粗成形できれば材料歩留まりや加工能率の向上が期待できる。くさび形や台形工具の単一押込みに関する研究はすでに多く行われている^{(1)~(3)}が、端面自由の直方体試料に連続的に押込み成形した例は見当たらない。また転造加工⁽⁴⁾を大形歯車に適用するのは難しいと考えられる。本研究では1本歯工具および2本歯工具による平面ひずみ連続押込み実験を行い、等ピッチの歯を成形できることを明らかにした。また格子線解析法により材料の変形挙動を観察するとともに、すべり線場および上界法により解析を行った。

2. 実験 方 法

鋼の熱間加工のモデル材料として、本研究では工業用純鉛を用い実験を行った。図1に円柱状試料($\phi 20 \times 30$)の加工面をテフロンシートで潤滑して、一定速度

で圧縮試験した結果を示す。ひずみが0.2を超えるあたりから応力はほぼ一定となる。またこの程度のひずみ速度の違いでは、応力-ひずみ曲線はほとんど影響

図1 供試材の応力-ひずみ曲線

図2 実験装置

* 昭和60年11月20日 関西支部第245回講演会において講演, 原稿受付 昭和60年4月2日.

** 学生員, 九州大学大学院 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1).

*** 正員, 九州大学工学部.

を受けないと考えられたので、押込み実験では押込み速度 2 mm/min 一定を採用した。実験装置を図 2 に、一本歯工具形状を図 3 に、実験条件を表 1 に各々示す。試料幅方向の変形はコンテナ側壁により拘束され、長手方向は拘束していない。試料側面にけがいた 1 mm 間隔の格子の変位により加工中の材料変位を調べる。試料上下面にはテフロンシートを潤滑剤として用い、側面は無潤滑とした。

3. 実験結果

3.1.a 1本歯の押込み 図 4 に 1 本歯工具で押込んだ場合に得られたみぞ形状と、工具形状がそのままみぞ形状に転写された理想歯形との比較を示すが、両者はよく一致する。押込まれたみぞ上縁にわずかな盛りりは見られるが、試料上面はほぼ平坦で、試料全体に反りはなく、押込まれた材料は水平に流されると予想される。図 5 に押込み量 4 mm から 8 mm まで 4 mm 押込む間の材料変位を示す。各線分が各点の変位量および変位方向を表す。工具底面直下の材料は工具と同速度で押下げられデッドメタルが形成されるが、工具から離れた所では材料は外に向かって水平に変位しているのが観察された。

3.1.b すべり線場解 図 6 に押込み初期のすべり線場とホドグラフを示し、以後すべり線 I と称す。領域①は工具と同速度で押下げられるデッドメタル域

である。領域②は工具側面に沿って流され、これは実験による観察結果と一致する。領域④⑤は斜め上方に運動し試料に盛りりを生じさせるはずであるが、実際には加工当初試料上縁は一度少しだけ込み、その後盛上るため、前述のようにわずかな盛りりしか観察されない。図 7 に塑性変形域が材料底部にまで達したときのすべり線場とホドグラフを示し、以後すべり線 II と称す。これは材料変位をもとに行列演算子法⁽⁶⁾を用いて計算したものである。また工具側面には一定の摩擦せん断応力 $\tau_f = m \cdot k$ (m : せん断摩擦係数, k : 材料のせん断降伏応力) が作用すると仮定した。図 8 に荷重-ストローク関係を示し、実験とすべり線場解とを比較した。すべり線場解ではストローク 5 mm 付近ですべり線 II のほうが I より荷重が低くなり、このあたりで変形モードは I から II へと移行すると思われる。また実験による曲線の傾きは、工具側面の摩擦を考慮

図 6 すべり線場解 I

図 3 1本歯工具形状

図 4 理想歯形との比較

図 5 材料変位

図 7 すべり線場解 II

に入れた $\tau_f = 0.2k$ のすべり線場解とよく一致する。

3.2 2本歯の押込み 加工能率を上げるために図9に示すような2本歯を同時に押込む実験を行った。実験結果を図10に示す。押込み深さが増すと両歯の変形域が干渉して、工具下に大きなデッドメタル域が形成され、中央山部が押下げられてしまう。また試料長さに比べ工具幅が広くなった効果が現われ、みぞ縁に大きなだれ込みを生じ、よい結果は得られなかった。

3.3 みぞ付き試料への押込み 歯を連続成形するために1本歯工具でまず1個めのみぞを成形した後、1ピッチだけ離して1本歯工具を押込んだのは、当然ながら、中間の山部はみぞのほうへ倒れ込み

うまく成形できない。そこで図11に示すように、2本歯工具を用いて、中間の山部の倒れを歯①で拘束しながら押込んだ。図12に実験結果を示す。理想歯形とよく一致したみぞ形状が得られ、中央の山高さも当初よりやや高くなり十分である。図14に荷重-ストローク関係を示す。5.5 mm 付近で荷重は急増し始めるが、これはこの時点で歯①に材料が当たり始めることを意味する。図13に材料変位を示す。押込み深さ0 mm から5 mm までは②の加工部左側の材料はみぞへ向かって流れ、変形は中央山部に限られ、大部分の材料は

図8 荷重-ストローク関係

図9 2本歯工具の押込み

図10 理想歯形との比較

図11 みぞ付き試料への押込み

図12 成形された歯形

図13 材料変位

図14 荷重-ストローク関係

図 15 みぞ付き試料への拘束付き押込み

図 17 成形された歯形

Depth of indentation : 8-10 mm

図 16 材料変位

図 18 上界法 velocity 場とホドグラフ

図 19 荷重-ストローク関係

全く変形しない。加工終期は歯①で材料が拘束され、工具近傍の加工初期の材料流れが止められ、ほとんどの材料は紙面右側へ流れる。ところが試料底部ではみぞ左側へもわずかな材料流れが起き、工具とみぞの接触部を支点とする回転が生じる。そのため紙面左部分に上方への反りが発生し、この手法で連続成形を進めていくと反りが蓄積されて問題となる。

3.4 みぞ付き試料への拘束付き押込み 前節で問題となった反りの発生を抑制するために、図 15 のように成形されたみぞに工具をそう入して試料変位を拘束した。図 16 に押込み量 8 mm から 10 mm までの材料変位を示す。拘束したことにより紙面左上方への材料流れはなくなり、紙面左方向への反りは起こらなかった。ただ歯③を支点とする紙面右上方への反りは発生したが、これは今後の連続成形により矯正されたと考え、この手法により連続成形を行った。その実験結果を図 17 に示す。十分な高さの山が等ピッチで連続

的に成形され、右側上方への反りも各段階で矯正されていた。図 19 に荷重-ストローク関係を示す。傾向は拘束なしの場合とよく類似しているが、荷重は拘束したことにより増大する。歯②に材料が当たり山が成形される、押込み量 7 mm から 10 mm までの荷重を見積もるために上界法を用いた。図 18 に速度場とホドグラフを示す。 $\theta\phi\psi$ をパラメータとして荷重が最小となるよう最適化する。図 19 に実験値と計算値を比較しているが、工具側面の摩擦 $0.1k$ を考慮に入れた場合とよく一致する。

4. 結 論

1 本歯工具の押込みにより正しい歯みぞが成形できることを明らかにし、すべり線場解により実験結果をよく説明できた。1 本歯押込み→みぞ付き試料への 2 本歯押込み→みぞ付き試料への拘束付き 2 本歯押込み

という手順でラック状の歯形を連続成形できることを示した。

文 献

- (1) Dodd, B. and Osakada, K., *Int. J. Mech. Sci.*, 16-12 (1974), 931.

- (2) Hill, R., *Phil. Mag.*, (1950), 745.
(3) Johnson, W., ほか 2 名, *Int. J. Mech. Sci.*, 8 (1966), 49.
(4) 成瀬・ほか 名, 歯車の塑性加工, (昭 39), 56, 養賢堂.
(5) Johnson, W., ほか 2 名, *Plane-Strain Slip-line Fields for Metal-deformation Processes*, (1982), 160, Pergamon Press.