平歯車の仕上転造における歯形誤差の発生機構

(第2報)*

——圧力角誤差の発生機構——

植 松 整 三** 加 藤 正 名***

Involute Profile Error in Finish Roll Forming of Spur Gears (2nd Report)

—Formation of Pressure Angle Error—

Seizo UEMATSU and Masana KATO

In some cases, the tooth face of the driven side of rolled gear teeth shifts upward by rolling process and it forms plus pressure angle error. To investigate the formation of the error, the tooth profiles of both driven and follower side and the plastic deformations of the center line of teeth are measured and analysed at several stages in the first cycle of rolling. It is revealed that the tooth is plastically elongated and bent to right and left by the applied load during rolling process, and the plastic elongation and deflection remain at addendum. They cause the pressure angle error. The measurements of profiles, elongation and deflection of teeth after 30 cycles of rolling demonstrate that the pressure angle error of gear finished by roll forming is the results of accumulation of the plastic elongation and deflection at each rolling cycle.

Key words: gears, finish roll forming, pressure angle error, plastic, elongation, deflection

1. ま え が き

平歯車を定荷重で仕上転造すると転造特有の誤差として、かみあいピッチ点付近にくぼみが生じたり、圧力角誤差が発生する。これまでは歯形のくぼみが主に注目され、その発生原因は寺内¹⁾、尾崎²⁾によって究明され、くぼみ発生は同時かみあい点数の変化に起因することが明らかになった。これらの研究では仕上転造では転造代はわずかなので、転造中の工具と被加工歯車との中心距離の変化を無視し両者のかみあいにおける作用線上のかみあい長さを求めている。しかし著者³⁾は、かみあい長さの変化を無視するとその長さを実際より短く評価することを実験より見出し、この伸びを考慮して歯形を解析し、歯形のくぼみとその領域を定量的に評価できるようにした。

しかし解析法をこのように改めても圧力角誤差には十分な説明を加えられなかった。ここで指摘する圧力角誤差とはドリブン側の歯末で歯面が転造前よりふくらみ押込み量は見かけ上負となる誤差であり、たとえ

ば転位係数 0.5 程度の歯車を比較的大きい工具押込み力で転造した場合に明確に現れる。前田⁴⁾は歯車にバニシを適用するにあたっての問題として、加工圧を上げると歯が塑性変形し倒れる場合のあることを示唆している。これらのことから仕上転造における圧力角誤差も歯の塑性たわみに関係していると考えられる。

そこで本研究では、仕上転造した歯車の圧力角誤差の発生機構を究明することを目的とし、転造中に作用線上の数箇所歯形の変化と歯の側面に設定した測定点の変位を測定し圧力角誤差の発生過程を実験的に解明した。

2. 実 験 の 構 成

2.1 実験方法と実験装置

仕上転造は一般に比較的低い工具押込み力のもとに繰返し回転して行う。歯形誤差はこの1回ごとのかみあいにおいて発生し累積されるものと考えられる。そこで本研究では第1に歯の変形を観察しやすい転造1回目において工具押込み力を比較的大にして、ある1枚の歯に注目し作用線上の数箇所転造を停止し、その都度歯形の変化と測定点の変位を測定した。次に第2の実験では比較的低い工具押込み力とほぼ実用的な周速のもとで繰返し転造し転造歯形に及ぼす塑性たわ

* 原稿受付 昭和63年10月11日。昭和63年度精密工学会東北支部米沢地方講演会(昭和63年8月26日)にて発表

** 正 会 員 山形大学工学部(米沢市城南4-3-16)

*** 正 会 員 東北大学工学部(仙台市青葉区荒巻字青葉)

みの影響について調べた。

実験に用いた被加工歯車はモジュール5, 圧力角 20° , 歯数22, 転位係数は0と0.52である。また, 転造装置および被加工歯車の形状は前報³⁾に詳細に述べてある。ここで第1の実験では工具はラックを用い, 工具の駆動速度は4.5 mm/min, 工具押込み力は9.8 kN および 14 kN としてある。第2の実験では工具押込み力5 kN とし, ピニオン型工具を用い周速8.3 m/min のもとに繰返し回数30回とした。

実験では歯車の転位係数によって同時かみあい点数を変えたが, これによって歯面接触力と歯に作用する曲げの方向の二つの条件が変わる。ここで指摘した曲げの方向とは先にかみあい始める歯面を問題としている。たとえば工具は圧力角 20° のラックとして歯数22の場合, 転位係数0.4以下の歯車ではかみあいのはフォロー側歯面が先にかみあい始め, ドリブン側歯面は遅れて始まる。転位係数0.4以上の歯車ではその逆にドリブン側歯面が先にかみあい始める。この結果, かみあい初期および終了時に歯が受ける曲げの方向は異なってくる。

2.2 作用線上における測定かみあい位置

転造中の歯形の変形および測定点の変位は1枚の歯につき5か所で測定し, これを作用線上の位置で表示した。これらの位置は予備実験として行った被加工歯車のかみあい中の歯先の変位測定を参考にして選定した。予備実験に用いた歯車と測定系を図1(a)に示す。歯先には直径2 mmの鋼棒を取り付け, その変位は歯車のボス部に取り付けた検出部で測定した。

歯先変位測定の一例を同時かみあい点数を表す線図と対応して図2に示す。転位係数は0.52である。変位測定用の歯は工具の F_2 と D_3 の歯とかみあう。測

Fig. 1 Method of tooth deflection measurement

定した結果この歯は $Ad'w$ から $Rf'w$ の区間でかみあっていた。図2の上部に示したかみあい線図において, かみあい長さの実線部分は歯の変形を考慮しない幾何学的な長さであるから, 破線部分 $Ad'Ad$, $RdRd'$ は歯が変形し, かみあい長さが伸びている部分である。これらのことを考慮して5か所の測定位置 $A \sim E$ を定めた。これらの測定位置を以下の本文中では位置 $A \sim E$ として表す。位置 A はかみあい始期の位置, 位置 E はかみあい終了した位置である。位置 B, C, D は同時かみあい点数や前後してかみあう歯の曲げの影響を考慮して定めた。

これらの測定位置は, 工具歯元に取り付けたひずみゲージの出力を同時かみあい点数の変化を表す線図と対照して判定した。本実験における工具の駆動速度は

Fig. 2 Experimental results

秒速で表せば0.08 mm/sであるから、工具はほぼ目的とする位置で停止させることができる。

転造され変化した歯形の押込み量の正負は歯形が転造前歯形より内側に変形する場合を正とし、外側へふくらむ場合を負と定めた。

2.3 歯中心線の変位測定

歯の中心線の転造による変形を測定して歯の塑性たわみと伸びを求める。このため歯の中心線上に図1(b)に示すように測定点を微小硬度計で設定した。座標系の原点は転造による影響を受けないと思われる歯先から30.5 mmの位置とし、測定点のピッチは1 mmとした。ここで中心線に対し直角方向に設定した点は、測定時の位置決め用の点である。

測定点の転造前後の計測にあたり、デジタルマイクロメータ付きのX-Yテーブルを微小硬度計に取り付け、データは計算機で処理した。使用したマイクロメータの最小目盛は1 μm である。微小硬度計に対する歯車の取付けを容易に、測定精度を高めることを考慮した固定用ジグを用いた。

測定点の変位は歯の中心線に直角方向成分を δX 、中心線方向成分を δY として表す。ここで歯の曲げの正負はドリブン側へ曲がる場合を正とした。また、歯の中心線方向の各測定点間の変化からひずみ ϵy は次のように定義した。

$$\epsilon y_i = \frac{(\delta Y_i - \delta Y_{i-1})}{\Delta} \quad (1)$$

ϵy の値は0.2% 以上になればその部分は塑性変形しているとみなした。ただし、 Δ は変形前の測定点間隔で1 mm、 i は定点の原点からの距離である。

3. 歯の変形過程の測定結果

初めに転位係数0.52の歯車について歯形が転造中に変形する過程の一例を図3に示す。この歯車のかみあいはドリブン側歯面の歯先から始まり、かみあい終了時にはフォロワ側歯面の歯先となる。工具押込み力は9.8 kNである。図中の Δ 印は接触点を表す。測定位置A, Bでは工具と接触し転造された部分の変形は正である。位置Cではかみあいがさらに進み、歯形中央部にはくぼみも発生している。ここに現れた特徴的な変化はドリブン側の歯末面の変形がこの時点で正から負に反転していることである。位置D, Eの歯形は位置Cで測定した歯形に比較して特に変化していない。

図4に転造中歯に生ずる塑性たわみを示す。工具押込み力9.8 kNの場合、位置A, Bとかみあいが進んでも塑性たわみは微小である。工具押込み力

Fig. 3 Variation of tooth profile in rolling process

*1 Contact point on both side exist in the same height on tooth center line

Fig. 4 Plastic deflection of tooth

*1 Contact point on both side exist in the same height on tooth center line

Fig. 5 Plastic elongation on tooth center line

14 kN の場合、位置 A ではドリブン側歯先の接触力の影響が大きく歯のたわみは負である。位置 B で歯のたわみは歯元側では正、歯末側では負である。ここに現れた歯末側の塑性たわみは図 3 の位置 B で現れたフォロー側歯面の負の変形に対応している。

位置 C では塑性たわみは歯末側で急に大になる。たわみ発生位置は左右歯面の接触点が作用線上で交差する位置すなわちかみあいピッチ点付近である。歯末側のたわみは位置 B で現れていた方向と異なり、正すなわちドリブン側となっている。位置 B と C 間で生じたたわみ方向の変化も図 3 の位置 C において現れていた歯形の変化に対応している。位置 D にかみあいが進むと塑性たわみはさらに大になる。位置 E では歯末部の塑性たわみは位置 D の場合とほぼ同じである。

次に、図 5、図 6 に転造中に生じた伸びとひずみを示す。位置 A では歯は伸びていなかった。位置 B にかみあいが進むとわずかな伸びが現れ、位置 C では歯末側に伸びが大きく現れている。この場合にも左右歯面の接触点はかみあいピッチ点付近にある。その後かみあいが進んでも位置 D, E では伸びは変わっていない。

一方、この間に生じたひずみは位置 C では最大 0.9% に達し、かみあいピッチ点付近では歯の中心部まで塑性域となっていることを示している。その後、かみあいが進行しても位置 D, E ではひずみは

変わらない。

以上で転位係数 0.4 より大きい歯車について歯形の変形過程を説明した。次に転位係数 0.4 以下の例として標準歯車について変形過程を検討する。この歯車はフォロー側歯面が先にかみあい始める。図 7 に歯形の変形過程を示す。

位置 A, B ではフォロー側歯面が工具と接触し、その部分は正方向に押し込まれている。しかし、位置 B の時点でドリブン側歯面はまだかみあっていないが歯末側が転造前歯形よりふくらみ、歯末側の変形は負となっている。

位置 C ではドリブン側歯面がかみあい始め、位置 B で現れた負の変形は消滅している。この時点で両歯面とも工具と接触した部分は正方向に押し込まれ、フォロー側歯面にはくぼみが発生している。

位置 D では先に位置 C で現れたドリブン側歯面の歯末の正の押込み量は減少し、転造前歯形より外側にふくらんでいる。位置 E の歯形は両歯面ともかみあい終了している。フォロー側歯面では位置 D で現れた押込み量は減少している。

図 8 に転造中に生ずる歯の塑性たわみ、図 9 にその間に生ずる歯丈方向の伸びとひずみを示す。塑性たわみの変化は図 7 に示した歯形によく対応している。位置 A, B のデータに示したように接触点が片方の歯面にある場合、塑性たわみは歯元から生じその間に生ずる伸びは少ない。位置 C, D 間のように接触点がかみあいピッチ点付近で交差するとき、歯末側のたわみと伸びは大になる。この間に生ずるひずみは工具押込み力 9.8 kN の場合 0.2% 以上、工具押込み力 14 kN では 1.2% となる。この結果かみあいピッチ点付近では

*1 Contact point on both side exist in the same height on tooth center line

Fig. 6 Strain distribution on tooth center line

Fig. 7 Variation of tooth profile in rolling process

*1 Contact point on both side exist in the same height on tooth center line

Fig. 8 Plastic deflection of tooth

歯の中心部まで塑性状態となっている。

4. 圧力角誤差の発生機構

3章に述べた実験結果から仕上転造でも歯末部分の

*1 Contact point on both side exist in the same height on tooth center line

Fig. 9 Plastic elongation on tooth center line

塑性たわみと塑性伸びが確認された。歯末側に現れる塑性たわみは歯面上の接触点の移動の影響を受ける。接触点の移動方向は回転方向固有のものであるから、歯車の転位係数、同時かみあい点数の変化に関係なく、たわみの方向は実験で明らかになったようにドリブン側となる。塑性たわみの影響によってドリブン側歯面では歯面の押込みによる変形は減少し、フォロー側歯面では逆に増加する。歯末側に現れる伸びは両歯面の押込み量を減少する。これらのことから歯面の変形量は押込みによる成分 δP 、塑性たわみによる成分 $\delta X \cos \theta$ 、塑性伸びによる成分 $\delta Y \sin \theta$ から成り立つ。ここで θ は圧力角である。ドリブン側歯面、フォロー側歯面について全変形量 Y_d , Y_f を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} Y_d &= \delta P - \delta X \cos \theta - \delta Y \sin \theta \\ Y_f &= \delta P + \delta X \cos \theta - \delta Y \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

そこで次に、押込みを主体として計算した歯形³⁾に式(2)に基づく圧力角誤差の検討をしてみる。結果は図10に示す。破線、一点鎖線、実線は転造前、実測、押込みによる計算の各歯形を示す。式(2)に基づく押込み量の補正値は黒丸印で示した。

補正した歯形は両歯面とも実測歯形と $1\sim 2\ \mu\text{m}$ の精度で一致する。したがって押込みを主体とした計算で転造歯形について明解にされていなかったドリブン側歯末面のふくらみ、またはドリブン側歯面とフォローワ側歯面で押込み量が一致しない理由は式(2)によって明らかになった。

この結果歯の中心部まで塑性域に達した場合、転造歯形は式(2)の右辺第2項、第3項に基づく圧力角誤差を必然的に伴う。

5. 低押込み力で繰返し転造する場合の歯形誤差

第3章では工具押込み力を比較的大にして実験し、歯に変形が現れやすいようにして圧力角誤差が発生する機構について検討した。しかし、この実験で得た結論は工具押込み力が比較的小である転造の場合にも適用できるとは言いきれない。

次に工具押込み力を小にし転造した結果の一例を図11に示す。実験条件は工具押込み力 5 kN 、工具周速 8.3 m/min 、転造の繰返し数30回である。

図11(a)に中心線の塑性たわみを示す。このたわみはかみあいピッチ点付近から発生し歯先で $7\ \mu\text{m}$ となる。また、中心線の歯丈方向への変位は同じくピッチ点付近から発生し歯先で $3\ \mu\text{m}$ となる。この変形によって生じた中心線のひずみは、歯末側で 0.2% の伸び、歯元側で 0.2% の圧縮となり歯は中心部まで塑性域となっていることを示している。

図11(b)に転造歯形を示す。ドリブン側の歯形は前加工歯形に沿ってほぼ一様に変形し押込み量は $2\sim 8\ \mu\text{m}$ である。フォローワ側の歯形は歯形中央部に約 $30\ \mu\text{m}$ のくぼみが発生している。

この実験で得た歯形は、一般に行われる低荷重転造の場合にも第3章で示した歯の塑性変形を含む変形過程をたどり、微小な変形が累積され圧力角誤差が発生することを示している。

Fig. 11 Tooth profile error and plastic deflection under the low load rolling

6. 結 論

仕上転造における歯形誤差の発生機構解明の一環として、圧力角誤差の発生について検討した。

仕上転造した歯車の歯末側に現れる圧力角誤差は歯末側の塑性たわみと伸びによる変形が歯面の押込みによる変形と重なり合って発生する。歯末側のたわみはドリブン側歯面の押込みによる変形を見かけ上減少し、フォローワ側では逆に増加する。歯末側の伸びは両歯面の押込みによる変形を見かけ上減少する。

このたわみと伸びはかみあいピッチ点付近において左右歯面上の接触点が交差する時に発生する。たわみの方向は歯面上の接触点の移動の方向によって決まり歯数、転位係数などに関係なく歯はドリブン側へ傾く。

終わりに、本研究を遂行するにあたり精度の高い工具を製作し提供して頂いた日立製作所佐和工場第一エンジン機器製造部長前田陽利氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 寺内喜男ほか：歯車の仕上げ転造に関する研究，日本機械学会論文集，43，375 (1977) 4327.
- 尾崎龍夫ほか：バニ転造の歯形解析，日本機械学会論文集，43，365 (1977) 359.
- 植松整三：平歯車の仕上げ転造における歯形誤差の発生機構(第1報)——歯形のくぼみ発生機構，精密工学会誌，54，1 (1988) 139.
- 前田陽利ほか：最近の歯車製作技術(2)，機械設計，22，2 (1978) 109.