

二軸傾斜法による平歯車の X 線残留応力測定

阪府産技研 ○小栗泰造 東大阪支援センター 村田一夫

X-ray Residual Stress Measurement of a Spur Gear using Dual-axis Inclining Method

Taizo OGURI and Kazuo MURATA

1 緒 言

平歯車の歯元や歯面の残留応力は、一般に通常の X 線応力測定法（以下「従来法」という）で測定することが難しい。これは、隣接歯により X 線の経路が遮蔽されるために、X 線の入射角を広範に変化させることができず、また測定しようとする応力成分によっては、測定面法線を含む平面内で ψ 角の走査ができないからである。

著者らは、経路遮蔽が生じる場合に適用可能な測定技術「二軸傾斜法¹⁾」を考案し報告した。これは、側傾法の走査軸を用いて並傾法の走査平面を傾け、その下で並傾法により応力測定を行い、走査平面の傾き角と測定応力値との関係から、実在する平面応力三成分を求めるものである。走査平面を傾けることができるため、経路遮蔽を回避しつつ応力測定を行うことができる。

本稿では、二軸傾斜法を平歯車歯元部に適用した結果と、適用の妥当性を検討した結果について報告する。

2 二軸傾斜法

二軸傾斜法は、側傾法の走査軸を用いて並傾法の走査平面を種々の角度に傾けた上で並傾法の走査を行う X 線応力測定技術である。Fig. 1 において、角度 Ω が側傾法の回転角を、角度 ψ が並傾法の回転角を表す。これにより、X 線の照射および受光を妨げる障害物を避けて、点 O に対する応力測定を行うことができる。実施は以下の手順で行う。

(1) 測定位置がゴニオメーターの回転中心と一致するように、かつ、測定面法線 S_3 軸が並傾法の角度基準軸 Q と平行になるように試料を測定装置にセットする。

(2) 並傾法の走査平面 OQL_3S_1 が周辺物によって遮蔽されないよう、当該走査平面を側傾法の回転により角度 Ω だけ傾ける。

(3) 並傾法による ψ 角走査を $+\psi$ および $-\psi$ の双方向について行い、回折角 $2\theta_{\pm\psi}$ を適宜測定し、 $\sin^2\psi$ 線図を作成

する。このとき、せん断応力成分 σ_{12}^S が 0 でない場合は、測定領域が平面応力状態にあっても、いわゆる ψ スプリットが生じる。

(4) 対応する正負の ψ 角における回折角の和 $2\theta_{+\psi}+2\theta_{-\psi}$ および差 $2\theta_{+\psi}-2\theta_{-\psi}$ を求める。回折角の和については、 $\sin^2\psi$ について直線回帰し、勾配から応力値を算出する。なお、その応力値は、並傾法の走査平面を傾けた状態の下で得たものであるから、実在する応力 σ_{11}^S ではなく「傾斜面みかけ応力 $\sigma_{11}^{S\uparrow}$ 」である。K は応力定数である。

$$K \frac{\partial(2\theta_{+\psi}+2\theta_{-\psi})}{\partial \sin^2\psi} = 2\sigma_{11}^{S\uparrow} \quad (1)$$

(5) 手順(2)から(4)を複数の Ω 角について行う。

(6) 傾斜面みかけ応力と $\sin^2\Omega$ との関係を作図する。また、前記回折角の差と $\sin\Omega\sin|2\psi|$ との関係を作図する。

(7) 両線図をそれぞれ直線回帰する。式(2)より、 $\sin^2\Omega$ 線図の勾配から σ_{22}^S が、外挿して得た y 切片から σ_{11}^S がそれぞれ求められる。また、式(3)より、 $\sin\Omega\sin|2\psi|$ 線図の勾配から σ_{12}^S が求められる。

$$\sigma_{11}^{S\uparrow} = \sigma_{11}^S - \sigma_{22}^S \sin^2\Omega \quad (2)$$

$$K \frac{\partial(2\theta_{+\psi}-2\theta_{-\psi})}{\partial \sin\Omega\sin|2\psi|} = 2\sigma_{12}^S \quad (3)$$

3 実 験

3.1 実験方法 試料には、平歯車（モジュール 5，歯数 24，圧力角 20deg，材質 S45C）を用いた。従来法で残留応力の参照値を測定するため、Fig. 2 に示すように、測定箇所隣接する一歯をワイヤーカット法で切除した。その後、測定箇所となる歯元部を含む領域に均一な表面残留応力を付与すべく、サンドブラスト処理を行った。

試料は、Fig. 2 に示す姿勢で、かつ、歯すじが並傾法の走査平面と平行になるように、測定装置にセットした。測定位置は、歯車の両側面に水平線をけがき、各水平線と歯形線とが接する点を結んだ線の中央付近とした。理論歯形によれば、歯元部の曲率半径は約 2.8mm であり、使用する X 線コリメーターの大きさは、後述するように $\phi 1\text{mm}$ である。この場合、従来法による応力測定値に生じる曲面由来の測定誤差は、真値の 10% 以下であり、無視し得る²⁾。そこで、この結論を二軸傾斜法にも類推適用して、測定領域は平坦であるものとみなした。さらに、理論歯形および目視結果に基づき、測定領域は水平であるものとみなした。これより、その水平面とみなした面の法線 S_3 は、ゴニオメーターの角度基準軸と一致するものとみなした。傾斜角 Ω の取り得る範囲は、隣接歯を切除しない場合は、歯形線図によれば $\Omega \geq 30\text{deg}$ である。よって、 $32\text{deg} \leq \Omega \leq 45\text{deg}$ の範囲で測定を行った。

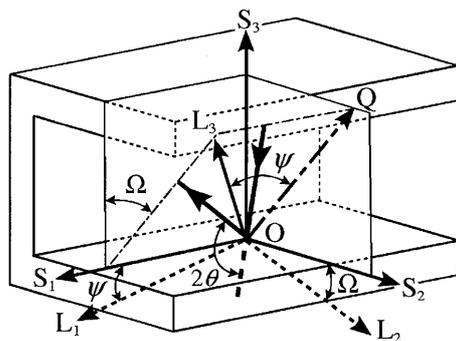


Fig.1 Schematic illustration of X-ray diffraction in the dual-axis inclining measurement for a side-wall of U-groove.

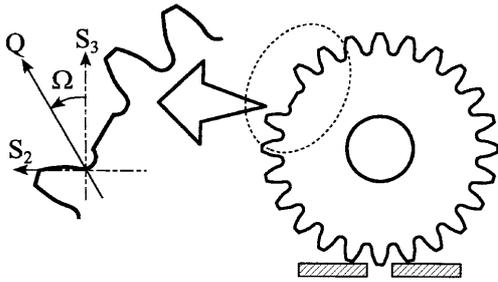


Fig.2 Schematic illustration of the spur gear and the alignment condition of X-ray stress measurement for the tooth root.

Table.I Conditions of X-ray stress measurement.

X-ray tube, filter	Cr, V filter
Tube voltage, current	30 kV, 20 mA
Diffraction	CrK α , α Fe211
Detector	Linear PSPC (Span: 100 mm, 20 deg)
Scanning method	Iso-inclination, fixed ψ_0
Peak determination	Half-value breadth method
Correction	Lorentz, polarity, absorption
ψ angle	0.5, ± 14.5 , ± 21.5 , ± 26.5 , ± 30.5 ± 34.5 , ± 38.5 , ± 42.5 deg
Ω angle	32, 37, 41, 45 deg
Stress constant	-318 MPa/deg
Collimator	1 mm in diameter

従来法による歯元部の応力測定は、Fig.2の設置条件で、かつ、 $\Omega=0\text{deg}$ の下で、並傾法により歯すじ方向応力(σ_{11}^S)を、側傾法により歯たけ方向応力(σ_{22}^S)をそれぞれ測定した。その後、歯すじと並傾法の走査平面とのなす角のみを60degに変更した上で、側傾法で第三の方向の応力(σ_D)を測定した。Table Iに測定条件を示す。

3.2 実験結果 従来法による測定結果は、($\sigma_{11}^S, \sigma_{22}^S, \sigma_D$) = (-417 \pm 6, -415 \pm 6, -396 \pm 9) MPaであった。これより、歯すじ方向と歯たけ方向を基準としたときのせん断応力(σ_{12}^S)は、-24MPaと計算された。

Fig.3に、二軸傾斜法による $\sin^2\psi$ 線図の一部を示す。また、Fig.4およびFig.5にそれぞれ、 $\sin^2\Omega$ 線図および $\sin\Omega\sin|2\psi|$ 線図を示す。この測定結果から第2節に記載の方法で応力値を算出すれば、($\sigma_{11}^S, \sigma_{22}^S, \sigma_{12}^S$) = (-407 \pm 4, -374 \pm 23, -1 \pm 3) MPaと求められた。従来法による測定値と比較すると、歯たけ方向応力(σ_{22}^S)に40MPa、せん断応力(σ_{12}^S)に20MPa程度のずれが認められた。なお、 $0\text{deg} \leq \Omega \leq 45\text{deg}$ に測定範囲を広げ、かつ、 Ω 角のバリエーションを8点に増すと、($\sigma_{11}^S, \sigma_{22}^S, \sigma_{12}^S$) = (-415 \pm 2, -393 \pm 11, -1 \pm 2) MPaと求められ、歯たけ方向応力(σ_{22}^S)の精度が20MPa程度向上した。

ずれの原因としては、(1)曲面の影響や目視により定めた Ω 角基準軸の設定誤差の影響が、従来法と二軸傾斜法とで異なる可能性があること、(2) Ω 角のバリエーションが少なかったこと、を挙げ得る。

誤差40MPaという値は必ずしも無視し得るものではないが、隣接歯を除去することなく歯元部残留応力をお

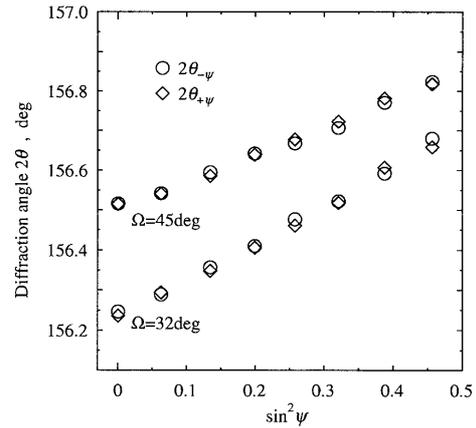


Fig.3 Variation in $\sin^2\psi$ diagram of the dual-axis inclining measurement.

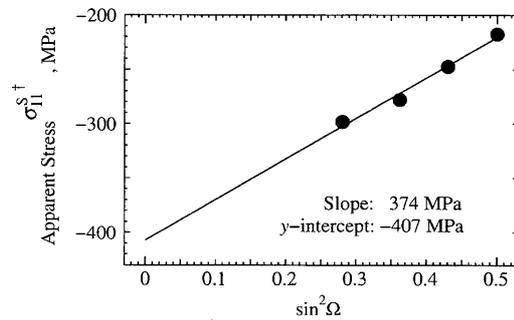


Fig.4 σ_{11}^S versus $\sin^2\Omega$ diagram.

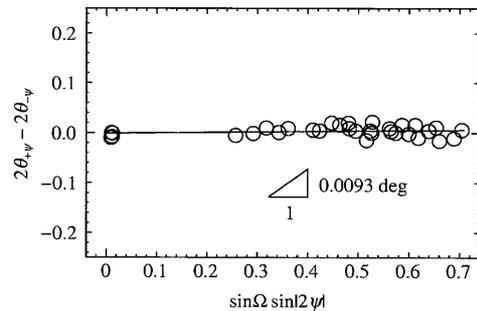


Fig.5 $(2\theta_{\psi} - 2\theta_{\psi_0})$ versus $\sin\Omega \sin|2\psi|$ diagram.

おむね測定し得る、という利益は大きいと考える。また、測定精度は、上記原因を追求することにより改善し得ると考えている。

4 結 論

一歯を切除してサンドブラスト処理した歯車の歯元部に対して、通常のX線応力測定法および二軸傾斜法により応力測定を行ったところ、両手法による測定値はおおむね一致した。よって、二軸傾斜法は、平歯車歯元部の応力測定に適用可能である。

参考文献

- 1) 小栗泰造, 村田一夫, 第44回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 1 (2010).
- 2) 小栗泰造, 村田一夫, 水谷勝己, 材料, 49, 645 (2000).