1309 圧子押し込みによるショットピーニング材の残留応力評価の試み

Residual Stress Evaluation by Indentation for Shot-Peened Specimen

○正 小笠原 永久, 正 山田 浩之 (防衛大)

Nagahisa OGASAWARA, National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa
Hiroyuki YAMADA, National Defense Academy

Key Words : Residual Stress, Shot-Peening, Indentation, X-ray Stress Measurement Method, Finite Element Method.

1. 緒言

自動車のギアやクランクシャフト等は, ショットピーニング(以下 SP) 処理により疲労強度を向上させている。現在, SP 処理により付与された残留応力の評価は, X 線応力測定法を用いることが一般的であるが, この手法は表面近傍に分布する残留応力の平均値しか測定できない。内部の残留応力を測定するためには, 電解液等で表面を除去し, 新たな測定窓を作成した後に X 線照射を行なう必要がある。繰り返し測定窓を作成することは, 時間と手間を要するだけでなく, 新表面近傍の応力が解法され残留応力の分布に変化を与える可能性がある。

本研究では, SP 処理による残留応力分布を有限要素法を用いて数値モデル上に再現し, 測定窓の残留応力分布への影響を探るとともに, 微小押し込み試験による残留応力評価手法の確立を試みる。

2. SP 処理シミュレーション

測定窓を作成する以前の正確な残留応力分布を把握するために, 陽解法有限要素プログラム LS-DYNA を用いて SP 処理のシミュレーションを行う。

SP 処理の有限要素解析については, 被加工材のモデル形状と付与境界条件, 投射材の数, 投射材の変形考慮の有無などにより多くのモデルが検討されてきた。本研究では, 投射材をなるべく不規則に投射できるモデルとして, 図 1 に示す 60 度周期形状を採用した。被加工材および投射材は, ともに弾塑性材料とした。投射材には初期速度を与え, 被加工材からの初期距離を変えることで, 接触タイミングをずらしている。

図 2~図 4 に, 投射材の個数, 投射順番, 投射密度(投射材中心間の距離: R は投射材半径)を変化させたときの, 半径方向残留応力の深さ方向分布を示した。これら結果から以下の知見を得た。

- ・投射材の個数が増すにつれ, 表面付近の圧縮残留応力が増加する。
- ・6 個の投射材が同時に被加工材に接触すると, 個々に接触した場合と応力分布が大きく異なる。
- ・投射密度が低いと投射材 1 個に近い応力分布となる。

Fig. 1 FEM model for shot-peening simulation

Fig. 2 Residual stress distribution for different shot number

Fig. 3 Residual stress distribution for different shot order

Fig. 4 Residual stress distribution for different shot density

3. 測定窓の残留応力分布への影響

深さ方向の残留応力を測定する際には、電解研磨等の手段を利用して表面層を除去し、測定窓を作製する。この時、新たに自由表面となった面付近では応力が解放されるため、残留応力の分布に変化が生じると考えられる。本節では、陰解法有限要素プログラムANSYSを利用し、測定窓作製による残留応力分布への影響について調べた。図5は、要素除去の様子を示した概念図である。

Fig. 5 Schematic view of specimen for X-ray stress measurement

前節の解析により、SP処理の残留応力分布を数値モデル上に再現することができた。しかし、プログラム間の応力-ひずみ関係伝達に問題があったため、本報では、残留応力を図6の赤線のように仮定して、検討を行なった。SP処理で生じた残留応力分布および加工硬化分布を考慮した測定窓の残留応力分布への影響については、次報までに解決すべき課題とする。

段階的に要素除去（測定窓作製）を行なった際の新表面における残留応力の値を、図6に■で示す。また、要素除去前の残留応力分布の値との誤差について、図7に示す。除去深さが増すにつれ、誤差が大きくなっていることが示された。また、測定窓を作製した場合、残留応力値自身だけでなく、残留応力が圧縮から引張に転じる深さについても過剰に判断されることが分かった。

Fig. 6 Window influence to residual stress distribution

4. 微小押込試験による残留応力評価の試み

4・1 微小押込試験 鋭い圧子を対象材料に押し込み、その際に得た荷重 P と押し込み深さ h との関係から、材料の応力-ひずみ曲線を求める手法が確立している。この際に利用するのは、荷重値を押し込み深さの二乗で割った負荷曲率 C (loading curvature: 式(1)) である。Kickの法則によりバルク材への押し込みでは負荷曲率は一定値となる。しかし、基板上に生成した薄膜に対し押し込み試験を行なった際には、負荷曲率が押し込み深さに依存し変化する。この現象と同様に、残留応力が深さ方向に異なる分布をしている材料への押し込みでも、押し込み深さの変化に伴い負荷曲率が変化するはずである。すなわち、負荷曲率の変化から、逆解析的に残留応力分布を求めることが本研究の狙いである。

$$C(h) = \frac{P}{h^2} \quad (1)$$

4・2 残留応力分布の負荷曲率への影響 微小押込試験の再現は、陰解法有限要素プログラムANSYSを利用する。2節の解析で得た応力分布が利用できないため、球型圧子を静的に押し込んだ際の残留応力分布を利用した。図2に示したLS-DYNA（動解析）の残留応力分布と定性的には大きな違いはないことを確認している。

負荷曲率の押し込み深さに対する変化を図8に示す。残留応力を有する試験片に対する押し込みでは、いずれも押し込み深さが小さいときに大きな負荷曲率の値を示し、押し込み深さが増すにつれ負荷曲率が減少している。また、圧縮残留応力の大きさを反映し、投射数1個の場合の負荷曲率が投射数3個の場合より大きな値を示している。

押し込み初期の負荷曲率が大きく振動しているが、これは接触判定に用いられる要素数が少ないことに起因すると思われる。薄膜材への押し込みの解析で用いられたブーミング手法などを利用すれば、その影響を減じることができる。今後は、SP処理で生じた残留応力分布および加工硬化分布を考慮した材料に対する押し込みのシミュレーション手法を確立し、負荷曲率変化と残留応力分布の関係について検討する。

Fig. 7 Error caused by window

Fig. 8 Loading curvature-indentation depth curves