ころがり接触による残留応力の変化*

室 博** 対馬全之*** 徳田昌敏***

Changes of Residual Stress due to Rolling Contact

by

Hiroshi MURO, Noriyuki TSUSHIMA and Masatoshi TOKUDA

(The Toyo Bearing Mfg. Co., Kuwana)

The changes in residual stress occurring in hardened steels as a result of rolling contact operation between the cylinder and the ball are described. The relationship of contact load, the number of the loading cycles and the hardness of the specimen (H_{RC} 63-54) to the extent of residual stress alteration have been examined.

The threshold stress exists, below which no marked residual stress change occurs. For H_{RC} 62, 58 specimen, the threshold stress is about $P_{max}=350$ kg/mm², and for H_{RC} 54 specimen, it is about $P_{max}=250$ kg/mm².

With the rise of contact stress, the peak value of compressive residual stress due to the rolling contact becomes larger, and the location of the peak becomes deeper. The peak depth corresponds to the depth of maximum shear stress.

When $P_{max}=600$ kg/mm², the residual compressive stress in the H_{RC} 58, 54 specimen reaches to the saturation within the loading cycle of 10 or so, and the lower the hardness of the specimen is, the lower the saturation value is.

In case of the rolling contact between the cylinder and the ball of the same hardness (H_{RC} 58, 54), the residual stress changes due to the operation are similar in both specimens. On the contrary, the contact between the H_{RC} 62 cylinder and the H_{RC} 63 ball produces a different residual stress distribution in each specimen. The reason for this producing unsimilar distributions is not clear, but it is thought to be due to the difference in hardness or in residual stress distribution of specimens before the operation.

(Received Aug. 19, 1968)

1 緒 言

かたい鋼をころがり接触させるとき、接触面下には微小組織の変化、微小硬度の変化、残留圧縮応力の生成がみられることはよく知られているが、系統的な実験はいまだ行なわれていないようである。微小組織の変化は1946年 A. B. Jones¹⁾ によって報告され、その後 Bush²⁾ ら、黒田³⁾、Martin⁴⁾ らの研究があるが、組織変化の形態や、それに伴う硬度変化についてさえ観察結果が一致しない。K. L. Johnson⁵⁾ は残留応力の生成を理論的に説明したが、残留応力の変化についての定量的な実験は Bush の研究以外にないようである。

筆者らはころがり接触の際の残留応力の生成が、接触応力、負荷回数あるいは試験片硬度によっていかなる影響を受けるかを調査した。

2 試験片および実験方法

試験片は $38\phi \times 22$ 円筒 (SUJ-3) および $\frac{1}{2}$ " 鋼球

(SUJ-2) である。両者に通常の焼入れ焼もどし (円筒: 820°C 油焼入れ, 170°C $\times$ 1 hr 焼もどし。鋼球: 820°C 水焼入れ, 150°C $\times$ 1 hr 焼もどし) を行なった後、さらに通常の研削およびラッピングを行なった。このときの硬度は円筒端面 H_{RC} 62, 鋼球表面 H_{RC} 63 (球面補正なし) である。さらに研削およびラッピング後の試片に適当な焼もどしを追加して、 H_{RC} 58, H_{RC} 54 の円筒および鋼球を作製した。

これらの円筒および鋼球を Fig. 1 のとおりのころがり接触させ、接触荷重を 17.5, 47, 100, 239 kg に変えて試験した。計算したヘルツ最大接触応力 P_{max} はそれぞれ 250, 350, 450, 600 kg/mm² である。

Fig. 1 からわかるように、円筒試片が1回転するとき円筒試片の転走面の任意の1点が負荷される回数は2回であり、円筒試片が1回負荷されると鋼球転走面の任意の1点は1.5回負荷される。負荷回数10および 10^6 回の円筒試片、したがって、負荷回数がそれぞれ 15 および 1.5×10^6 回の鋼球を作製した。残留応力の測定はX線を使用して、転走部を逐次電解研摩した

* 原稿受理 昭和43年8月19日

** 正会員 東洋ベアリング製造(株) 桑名市東方土島

*** 東洋ベアリング製造(株) 桑名市東方土島

Fig. 1. Schematic diagram of the rolling contact between a cylinder and two balls.

面について行なったが(以下, 電解研摩以前の表面の残留応力と区別するために, 逐次電解研摩した面について測定した残留応力を表層(Subsurface)の残留応力と呼ぶ), このとき転走跡(0.5~1.8 mm 幅)以外をビニルテープでおおい, 非転走跡からの回折X線を除去した。

1/2" 鋼球表面のように小さな曲率半径をもった面においての残留応力測定値が信頼できるかどうか疑問であるが, 次の2点を考慮すると, 測定値は信頼できると考えられる。

(1) H_{RC} 58 あるいは H_{RC} 54 鋼球において測定された熱処理残留応力はほぼ零で, H_{RC} 58 あるいは 54 円筒の場合とほぼ同様である (Fig. 2)。

(2) 後述するように, ころがり接触により H_{RC} 58, 54 鋼球に生成される残留応力は相手円筒に生成される残留応力とほぼ等しくなっている (Fig. 4, 5)。

3 結 果

3・1 運転前の試験片の残留応力分布

硬度の異なる各試験片の運転前の残留応力分布を Fig. 2 に示す。通常の焼入焼もどしを受けた H_{RC} 62 円筒の表面には 78 kg/mm^2 の, 表層には 15 kg/mm^2 程度の, また H_{RC} 63 鋼球の表面には 68 kg/mm^2 の,

Fig. 2. Residual stress distributions of cylinders and balls before operation.

表層には 30 kg/mm^2 程度の圧縮応力が認められるが, この表面の大きな圧縮応力は研削(ラッピング)の際に生成された研削応力であり, 表層に認められる圧縮応力は熱処理の際に生成された熱処理応力であろう。従来, 鋼球表面にみられるこの種の残留応力は, ラッピングの際に生成されるものと考えられていた。しかしながら, Fig. 3 からわかるように, 水焼入れされた鋼球にはラッピング以前にすでにかなり大きな残留圧縮応力があり, この残留応力はラッピングによって増加しないようである。これらの表面および表層の残留応力は焼もどしにより減少し, H_{RC} 58, 54 試片においては熱処理応力はほとんど零になっている。

Fig. 3. Residual stress distributions of 3/8" and 3/4" balls before and after lapping, showing that considerably higher compressive residual stress exists in the subsurface of water quenched ball before lapping and it does not increase through lapping.

3・2 H_{RC} 62 円筒と H_{RC} 63 鋼球とのころがり接触 (62/63 のころがり接触)

H_{RC} 62 円筒と H_{RC} 63 鋼球を組み合わせてころがり接触(以下この組合せを 62/63 と書く)させたときの接触面下の残留応力測定結果を Fig. 4 に示す。円筒に生成される残留圧縮応力は P_{max} が 450 kg/mm^2 以上のときは10回程程度の負荷で, P_{max} が 350 kg/mm^2 のときは 10^6 回程程度の負荷で顕著に認められるようになる。 P_{max} の値が大きいほど残留応力のピーク位置は深くなり, ピーク値も大きくなる。

鋼球に生成される残留応力は円筒の場合よりも小さいようである。この差がいかなる理由によるものか明らかでないが, 円筒鋼球両試片の硬度差があるいは熱処理応力の違いによるものと考えられる。

3・3 58/58 のころがり接触

H_{RC} 58 円筒と H_{RC} 58 鋼球を組み合わせてころがり接触させたときの残留応力変化を Fig. 5 に示す。62/63 の場合と同じく, P_{max} が 450 kg/mm^2 以上のときは10回程程度の負荷で, P_{max} が 350 kg/mm^2 のときは 10^6 回程程度の負荷で顕著な残留応力の生成が認め

Fig. 4. Residual stress changes due to rolling contact between H_{RC} 62 cylinder and H_{RC} 63 ball. Fig. 5. Residual stress changes due to rolling contact between H_{RC} 58 cylinder and H_{RC} 58 ball. Fig. 6. Residual stress changes due to rolling contact between H_{RC} 54 cylinder and H_{RC} 54 ball.

られる。 P_{max} の値が大きいくほどピーク値は大きく、ピーク位置は深くなっている。 $P_{max}=600 \text{ kg/mm}^2$ のときは負荷回数が10あるいはそれ以上で、生成される残留応力はほぼ飽和に達するものと思われる。そして、

その飽和値 (-75 kg/mm^2) は 62/63 の組合せのときのピーク値 (-105 kg/mm^2) よりも小さい。

さらに 62/63 の場合と異なり、この場合は円筒に生成される残留応力と鋼球に生成される残留応力とはほ

ば等しい。

3・4 54/54 のころがり接触

54/54 のころがり接触における 残留応力 の変化を Fig. 6 に示す。 $P_{\max}$ が 350 kg/mm^2 以上のときは 10 回程度の 負荷で, $P_{\max}$ が 250 kg/mm^2 のときは 10⁶ 回の 負荷で 顕著な 残留応力 の変化が認められるようになり, 残留応力 生成に必要な $P_{\max}$ は 62/63, 58/58 の場合よりも小さいようである。 $P_{\max}$ が 600 kg/mm^2 のときは 10 回の 負荷で 残留応力 は飽和に達し, この飽和値は 58/58 の場合よりも小さい。

58/58 の場合と同様に 鋼球 に生成される 残留応力 は 円筒 に生成される 残留応力 に等しくなっている。

3・5 接触面下の硬度変化

それぞれの組合せでころがり接触させたときの円筒接触面下の硬度測定結果の一例を Fig. 7 に示す。 62/63 の組合せの場合, 硬度上昇は $P_{\max}=450 \text{ kg/mm}^2$ 以上, 負荷回数が 10⁶ 回のときに現われており, 10 回程度の負荷では硬度上昇は認められないが, これは 58/58, 54/54 の組合せの場合も同様であった。 顕著な 残留応力 の変化は $P_{\max}=450 \text{ kg/mm}^2$ 以上のとき, 10 回程度の負荷で現われることを考慮すると, 残留圧縮応力の生成と硬度上昇とは 1 対 1 に対応していないことがわかる。 顕著な 硬度上昇に必要な $P_{\max}$ は 62/63, 58/58 の場合は 450 kg/mm^2 , 54/54 の場合は 350 kg/mm^2 以上である。

また, これらの試片について接触面下の組織変化を観察した。 $P_{\max}=600 \text{ kg/mm}^2$ で 10⁶ 回負荷された試片の転走面下はやや腐食されやすくなっているが, 光学顕微鏡では特別の様子は認められなかった。 他の試片の転走面下には組織変化はまったく認められなかった。

Fig. 7. Microhardness changes in cylinder due to rolling contact between H_{RC} 62 cylinder and H_{RC} 63 ball.

4 考 察

4・1 残留応力のピーク深さ

ころがり接触においては, 接触面下に働く 2 種類のせん断応力 τ_{45° および τ_0 が問題である。一つは 2 物体を静的に接触させたときにも生ずるもので, ころがり面に対して 45° 傾いた面に平行なせん断応力で τ_{45° と呼ばれている。他の一つはころがり面に平行なせん断応力で 転動体の進行につれて正負逆の方向をとり τ_0 と呼ばれている。そしてこれらのせん断応力はそれぞれの接触面の形状で決定される特定の深さの所で最大となる。 $P_{\max}$ がそれぞれの値のときの弾性理論より求めた τ_{45° 最大 ($\tau_{45^\circ \max}$), τ_0 最大 ($\tau_{0 \max}$) の位置を Fig. 8 に示した。また, Fig. 8 には Fig. 4~6 よ

Fig. 8. Calculated depths of maximum shear stress ($\tau_{45^\circ \max}$) and maximum reversed orthogonal shear stress ($\tau_{0 \max}$), and observed residual stress peak depths obtained from Figs. 4~6, which are plotted against $P_{\max}$. When $P_{\max}$ is higher than 450 kg/mm^2 residual compressive stress saturates as a plateau, so that the stress peak is not expressed by a single point but have a width.

り求めた 残留圧縮応力 のピーク位置も示した。図からわかるように, ころがり接触により生成される 残留圧縮応力 のピーク位置は $\tau_{45^\circ \max}$ の位置にほぼ等しくなっている ($P_{\max}=600 \text{ kg/mm}^2$ のときは, 残留応力のピーク位置は理論式より求めた $\tau_{45^\circ \max}$ の位置より深くになっているが, この場合は塑性変形量が大きく接触面積が理論値よりも大きくなっているから, 実際上の $\tau_{45^\circ \max}$ の位置も理論値よりも深くなっているものと考えられる)。K. L. Johnson はころがり接触による 残留応力 の変化を理論的に解析し, 数値計算を行ない, $\tau_{45^\circ \max}$ の位置に 残留応力 のピークが現われるとしている。今回の実験においては接触面の 残留応力 にも変化 (圧縮応力の生成) が認められたが, これを除いては今回の実験結果はかれの理論と合っている。接触面における 残留圧縮応力 の生成は接触面上の微小突起がつぶれたためであると思われる。

4・2 残留応力のピーク値と試験片硬度

$P_{\max}$ が 600 kg/mm^2 のとき, 負荷回数が 10 ないし 10⁶ 程度で 残留応力 は飽和し, その飽和値は試験片硬

度が低いほど小さいようである。試験片硬度（残留応力ピーク位置の硬度）と残留応力の飽和値との関係を図示すると Fig. 9 のようになる。Fig. 9 には以前、井本^{*1}によって行なわれた S45C 鋼における実験結果も示した。残留応力の飽和値と試験片硬度の関係はなめらかな曲線になっている。

Fig. 9. Relation between the hardness of specimen and the saturated residual stress.

Table I. Compressive elastic limits of ball bearing steel (SUJ-2) of various hardnesses.

Heat treatment	Hardness H_{RC}	Compressive elastic limit (kg/mm²)
Conventional	62	200
Tempered at 230°C	60	240
Tempered at 260°C	58	250
Tempered at 350°C	54	250

^{*2} 石丸によれば焼もどしによって硬度を変えた H_{RC} 62~54 軸受鋼の圧縮弾性限は Table I のようになっている。 H_{RC} 62~54 の範囲では硬度の低いほうが圧縮弾性限は大きくなっている。したがって、ころがり接触によって生成される残留応力の飽和値は、その試験片の弾性限によって決定されるものでなく、硬度すなわち完全塑性域における降伏応力に依存するもので

あることがわかる。

5 ま と め

今回の実験結果は次のように要約される。

(1) 接触応力が臨界値以上であればころがり接触面下には残留圧縮応力が生成する。その臨界値は 62/63, 58/58 の場合は $P_{max}=350 \text{ kg/mm}^2$ であり, 54/54 の場合は $P_{max}=250 \text{ kg/mm}^2$ である。

(2) 生成される残留圧縮応力のピーク位置はせん断応力最大 ($\tau_{45^\circ max}$) の位置に相当する。

(3) P_{max} が 600 kg/mm^2 のときは, $10 \sim 10^6$ 程度の負荷回数で残留応力の変化は飽和に達し, その飽和値は試験片硬度によって決定される。

(4) 58/58, 54/54 のころがり接触に際しては, 円筒および鋼球に生成される残留応力は等しいが, 62/63 の組合せの場合は等しくなく, 鋼球に生成される残留圧縮応力は円筒のそれよりも小さい。この理由は明らかでないが, 両試片の硬度差によるものかあるいは熱処理応力の違いによるものと考えられる。

終わりに, 本実験にあたり, 運転試験等にご協力いただいた伊藤重男ら諸氏に厚く感謝する。

(昭和43年7月19日 第7回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Jones, A. B., ASTM Symposium on Testing of Bearings (1946).
- 2) Bush, J. J., W. L. Grube, and G. H. Robinson, Trans. ASM, **54**, 390 (1961).
- 3) 黒田昌夫, 日本機械学会論文集, **26**, 1 258 (1960).
- 4) Martin, J. A., S. F. Borgess, and A. D. Eberhardt, J. of Basic Eng., Trans. ASME, Series D, **89**, 932 (1967).
- 5) Johnson, K. L., and J. E. Merwin, Proc. Instn. Mech. Engrs, **177**, 676 (1963).
- 6) たとえば曾田範宗, “軸受”, p. 92 (1964) 岩波全書

*1 井本充哉, 未発刊

*2 石丸路芳, 未発刊