鋼板の圧延による残留応力*

児玉 昭 太 郎** 宮 川 進***

Rolling Residual Stress in High Carbon Steel Plates

by

Shotaro KODAMA and Susumu MIYAKAWA

(Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University, Tokyo)

High carbon steel plates (JIS SK 5, 0.87%C) were cold rolled and their residual stress was measured by X-ray diffraction method.

The plate specimens of $300 \times 190 \times 3.2 \text{ mm}^3$ were annealed at 600°C for 20 min., finished by surface grinder, and then chemically polished to remove the work hardened layers and residual stress. The thickness of the specimens before cold rolling was 2.8 mm, the work roll diameter was 180 mm, and rolling was carried out under various reduction ratios from 0.33% to 2.53%.

The main results obtained are as follows.

- (1) The reduction ratio was linearly proportional to the roll gaps.
- (2) The surface residual stress was tensile when the reduction ratio was under 1.0% but was compressive when the reduction ratio became higher.
- (3) The distribution pattern of the surface residual stress seemed to have a close relation to the rolling pressure.

(Received Aug. 21, 1978)

キー・ワード：冷間圧延，残留応力，X線応力測定

1 緒 言

板材の圧延による残留応力の発生に関する研究は，SPC 低炭素鋼板に関するもの¹⁾²⁾，銅板の冷間圧延における残留応力の実験式を与えるもの³⁾，低炭素鋼板に関するもの⁴⁾，断面内の最大引張残留応力と圧延条件の関係⁵⁾⁶⁾を求めたものなどがあるが，その数はあまり多くない。

本研究は，高炭素工具鋼 SK 5 鋼板を用いて軽度の冷間圧延を施した場合に生ずる残留応力について調べたものである。

2 実 験 方 法

実験に使用した材料は， $300 \times 190 \times 3.2 \text{ mm}^3$ の SK 5 鋼板で，化学成分を Table I に示す。納入素材を， 600°C 20分で焼なましした後，表面の黒皮を除去するために研削を行った。焼なまし後の表面残留応力は $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ 程度であったが，研削後には約 20 kg/mm^2 の圧縮残留応力を生じたので，片面 50μ ずつ化学研削を行って $300 \times 190 \times 2.8 \text{ mm}^3$ の鋼板を圧延用の試験

Table I. Chemical composition (wt. %).

C	Si	Mn	S	O	N
0.87	0.22	0.46	0.004	0.0033	0.0036

Table II. Mechanical properties.

Yield strength (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Elongation(%)	H_{RC}
77.1	111.0	14.4	28

片とした。

焼なまし，研摩後の材料の機械的性質は JIS 5 号試験片を用いた引張試験によって Table II のように求められた。試験片は熱間圧延の方向にとってある。なお，焼なまし前のかたさは $H_{RC} 36$ であった。

上記の圧延用試験片を，Table III に示す仕様の圧延機で，圧下率を 0.33% より 2.5% まで，数種に変えて冷間で圧延した。圧延はすべて 1 回のパスで行っている。圧下率は加工前にけがいた標線間 250 mm の伸びを測定して算出した。

圧延後の残留応力は X 線平行ビーム法により，並傾法を用いて測定した。ピーク位置の決定には，定時計

* 原稿受理 昭和53年8月12日

** 正 会 員 東京都立大学工学部 東京都世田谷区深沢

*** 学生会員 東京都立大学大学院 東京都世田谷区深沢

Table III. Rolling mill and lubrication.

Backup roll	$\phi 400 \times 400$ (mm ²)
Work roll (Straight roll)	$\phi 180 \times 400$ (mm ²)
Lubrication	Multilube AR 15 B 8% aqueous solution

Table IV. Conditions of X-ray stress measurement.

Characteristic X-rays	CrK α
Diffraction plane	(211)
Filter	V foil
Tube voltage	30 kV
Tube current	8 mA
Divergence angle of slit	0.35°
Irradiated area	5×6 (mm ²)
Preset time	10 (sec)

数法による5点放物線近似法を用い、 $\sin^2\psi$ 法(0°, 15°, 30°, 45°)により応力を算出した。X線応力測定条件をTable IVに示す。

3 実験結果および考察

納入素材の焼なまし前における板厚方向の残留応力分布をFig. 1に示す。熱延コイルを冷間で矯正して平板にしたため、片側の表面では引張残留応力が生じ、反対側の表面では、絶対値のほぼ等しい圧縮残留応力が生じている。圧延の条件をTable Vに示す。圧延後、試験片によってはかなりのわん曲を生じた。板の長手方向中央でのわん曲は最大で約10 mmに達したのもあった。したがって、残留応力の測定結果は、表面を凸面と凹面にわけて示す。

Fig. 2はロール間隔と圧下率との関係である。両者にはほぼ直線的な関係がある。なお板厚よりロール間隔が狭くなっても、その差が0.6 mm程度までは、圧延機の弾性変形などのために圧下率はほとんど0である。

Fig. 1. Residual stress distribution of plate specimen as received.

圧下率と表面残留応力の関係をFig. 3に示す。白丸が圧延方向の残留応力を、黒丸が圧延直角方向の残留応力を示している。凸面と凹面の残留応力はほとんど一致するものであるが、10 kg/mm²以上相違しているものもあるので、図中の値は凸面と凹面の平均値をとって整理してある。測定位置は試験の中央部である。この結果によれば、圧延方向の残留応力、圧延直角方向の残留応力の圧下率に対する関係はほぼ同じ傾向を示す。0.33%程度のごく軽度の圧延によって引張りの残留応力を生じ、圧下率1%あたりで残留応力はほぼ0となり、それ以上の圧下率では圧縮残留応力となる。また、引張残留応力が生じている場合には、圧延方向残留応力の絶対値の方が大きく、圧縮残留応力

Table V. Rolling condition.

Specimen No.	Before rolling			Roll gap (mm)	After rolling	
	Thickness (mm)	Gage length (mm)	σ_R^* (kg/mm ²)		Gage length (mm)	Reduction ratio (%)
1	2.788	199.97	0.1	1.80	201.7	0.86
2	2.805	199.995	0.3	1.60	202.7	1.33
3	2.803	199.20	-0.1	1.85	200.9	0.85
4	2.791	198.74	0.3	1.32	203.9	2.53
5	2.796	198.48	0.2	1.50	202.1	1.79
6	2.766	205.23	0.3	1.66	207.0	0.86
7	2.803	205.125	0.8	2.05	205.8	0.33
8	2.804	199.94	1.6	1.95	201.2	0.63
9	2.810	200.005	0.9	1.80	202.1	1.04

* σ_R Surface residual stress at the center of specimens.

Fig. 2. Relation between reduction ratio and roll gap.

Fig. 3. Relation between surface residual stress and reduction ratio.

が生じている場合には、圧延直角方向残留応力の絶対値の方が大きくなる傾向があるように思われる。

試験片凸表面の圧延方向残留応力の分布の例を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。No. 7 試験片は圧下率が 0.33 % でもっとも軽度の圧延を行ったものであるが、9 枚の試験片中最高の引張残留応力を生じている。No. 2 試験片は圧下率 1.33 % であり圧縮残留応力を生じた場合である。これらの結果より、試験片の表面の各部で残留応力値にはかなりの相違があることがわかる。

Fig. 6 と Fig. 7 は圧延直角方向の凸表面残留応力の分布の例である。圧延方向と同様に試験片表面の各部でやはり残留応力値は相違している。

このほかの試験片においてそれぞれ 9 点ずつ測定を

Fig. 4. Distribution of surface residual stress parallel to the rolling direction (No. 7 specimen).

Fig. 5. Distribution of surface residual stress parallel to the rolling direction (No. 2 specimen).

Fig. 6. (Left) Distribution of surface residual stresses perpendicular to the rolling direction (No. 7 specimen).

Fig. 7. (Right) Distribution of surface residual stresses perpendicular to the rolling direction (No. 2 specimen).

行ったが、いずれも同じような結果が得られている。

Fig. 8 と Fig. 9 は Fig. 4 と Fig. 5 の測定結果を立体的に表したものである。いずれも板幅中央部が高くなっている。いしかえれば、板幅中央部の残留応力は引張側になり、山型になっている。

他の試験片の圧延方向の凸表面残留応力の結果をま

とめて Fig. 10 に示す。

これらより、表面残留応力分布はロールの圧延圧力分布に対応しているものと思われる。

Fig. 11 は No. 7 試験片の中央部から $90 \times 30 \text{ mm}^2$ の試験片を切出し、化学研摩により試験片中央位置における板厚方向の残留応力分布を測定した結果である。

Fig. 8. Topography of surface residual stress distribution (No. 7 specimen).

Fig. 9. Topography of surface residual stress distribution (No. 2 specimen).

Fig. 10. Topographies of surface residual stress distributions.

Fig. 11. Residual stress distribution of thickness direction (No. 7 specimen).

白丸は圧延方向の残留応力であり、黒丸は圧延直角方向の残留応力である。切出し以前の残留応力値を深さ0の線上に大きな丸印で示した。切出したことにより、圧延方向残留応力は減少し、圧延直角方向残留応力は変化しなかった。したがって、深さ0の線上において、小さな黒丸と大きな黒丸は重なっている。

図には、片側のみを示しているが、両表面からの測定結果はよく一致した。各測定結果は表層の残留応力除去による影響を補正したものである。なお半価幅の板厚方向の変化は 0.1° 以内であった。

4 結 言

本実験により得られたおもな結果は以下のとおりである。

- (1) ロール間隔と圧下率との間にはほぼ直線的な関係があった。
- (2) 圧下率が1%以下では表面残留応力は引張りになり、圧下率1%以上では圧縮になった。
- (3) 表面残留応力分布はロールの圧延圧力分布に対

応していると思われる。

終りに、本実験に用いた材料は、川崎製鉄株式会社より提供されたものであり、また圧延についても同社研究所の方々の多大のご協力を預いた。厚くお礼申し上げます。また実験に協力された当時の本学学生、依田一郎君（現ヤマハ発動機）に感謝します。

（昭和53年7月21日 日本材料学会第15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) 神崎文晁, 縄田 望, 北川 孟, 材料, **13**, 978 (1964).
- 2) 神崎文晁, 縄田 望, 北川 孟, 材料, **14**, 1014(1965).
- 3) 米谷 茂, “残留応力の発生と対策”, p.190 (1975) 養賢堂
- 4) Hundy, B.B., J. Iron and Steel Inst., **178**, 127(1954).
- 5) Hsiano, C.C., Proc. Exp. Stress Analysis, **6**, No. 2, 141 (1948).
- 6) Baldwin, W.M., Proc. ASTM, **49**, 539 (1949).