大型鋳鋼品のX線による残留応力測定*

蒲 地 一 義** 谷

昇** 木 戸 行 男***

X-Ray Stress Measurement of Large Steel Casting

by

Kazuyoshi KAMACHI, Noboru TANI

(Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube)

and Yukio KIDO

(Central Research Laboratory of Ube Kosan Co., Ltd., Ube)

The residual stress in a large steel casting (1000×1000×400 mm) was measured by means of the photographic X-ray method developed in our laboratory. Since the grain size of the steel casting is large, the obtained diffraction lines on the films were spotty and the spots scattered in the radial direction. The peak positions of the diffraction lines was determined by averaging the distance between each diffracted spot and line of the standard substance arithmetically.

The mean value of the residual stress for the specimen annealed at 940°C for 16 hours was 7.6 kg/mm² in tension on the surface of the feeder head side and 10.5 kg/mm² in tension on the surface of the bottom side. The specimen was then cut 15 mm in depth from the surface of the feeder head side. The mean residual stress on the newly appeared surface was 3.2 kg/mm² in compression and it was 7.1 kg/mm² in tension on the opposite side. When the specimen was annealed at 650°C for 8 hours, the residual stresses on both surface became almost zero. The distribution of the residual stress in the sample were discussed.

(Received Sep. 17, 1973)

1 緒 言

鋳鋼は大型機械部材として、多くの方面に用いられているが、設計時の許容応力に関して、その残留応力が大きな問題となっている。この残留応力はグナート法等によって測定された例はあるが、表面応力の詳細な分布を非破壊的に知ることのできるX線法によって応力測定がなされた例はないように思われる。その理由として、一般に鋳鋼品は大型部材であることが多く、X線測定法は装置的に困難であること。また、鋳鋼の特徴として、結晶粒が大きく、はん点状回折環となっており、X線応力測定ができなかったことなどによる。

本研究は大型鋳鋼部品であるダイキャストマシンのムービングプラテンの疲労過程における応力挙動の研究の一部として、1000×1000×400 mm、約3トンの鋳鋼塊の応力をX線的に測定したので、その結果について報告する。

2 実験方法

2・1 被測定材

被測定材は鋳鋼材 (SC 46) である。その化学成分を Table I に示す。また光学顕微鏡写真を Fig. 1 に示す。試料の寸法は 1000×1000×400 mm のブロックであり、直径 670 mm、高さ 800 mm の押湯を付けて鋳込んだ。注湯温度は 1550°C であり、注湯速度は 74 kg/sec であった。鋳造後押湯を切断した後、試料を 940°C、16時間保持してから炉冷した。測定は押湯があった面 (押湯面) とその反対側の面 (底面) について、それぞれ15点の測定点を選んで行なった。各測定点の位置を Fig. 2 に示す。試料の対称性を考慮して、両面とも中心線を含む 1/2 の面について測定点を選んだ。また測定は、 α 、 γ 2 方向である。各測定点はいずれもエメリー紙で研磨した後、電解研磨を施した。電解研磨深さは 100~150 μ である。測定は(1)高温焼なまし後、(2)押湯面、15 mm 切削後、(3)低温焼なまし (650°C、8時間保持後炉冷) 後の各処理後、押湯面、底面の応力を測定した。

2・2 X線の条件

X線の条件を Table II に示す。装置は東京芝浦電

* 原稿受理 昭和48年9月17日

** 正 会 員 山口大学工学部 宇部市常盤台

*** 宇部興産中央研究所 宇部市小串

Table I. Chemical composition of SC46.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Al	Sn
0.21	0.34	0.62	0.012	0.09	0.08	0.08	0.058	0.011

Fig. 1. Optical microscopic photograph of SC46.
(A) is the surface of feeder head side. (B) is the surface of opposite feeder head side.

Fig. 2. The dimension of the cast steel block and measured points.

Table II. Condition of X-ray stress measurement.

Apparatus	Toshiba MDP 103
X-ray	CrK α_1 (V filter)
Voltage, current	30 kV 8 mA
Diffraction plane	{211}
Comparative substance	Cr powder
Camera length	50 mm
Collimator	1 mm ϕ double pinhole
Incident angle	0°, 45°

気製 MDP 103 を使用した。X線はVフィルタを透過した CrK α 線であり、回折面は {211} である。標準物質は材料学会仕様の Cr 粉末を用いた。露出時間は1時間である。試料は固定したままであるが、入射角を ψ_0 に対して $\pm 2.5^\circ$ 不連続的に変動して撮影した。入射角は、多くの測定点について測定するため、 0° - 45° 法を用いた。フィルムはフジ K α 医療用を使用した。

2.3 ピーク位置の決定

以上のような条件で撮影したフィルムの一例を Fig. 3 に示す。写真からわかるようなはん点状回折環が得られた。このフィルムの測定方向を 0-0 で示し、

0-0 から円周方向に $\pm 10^\circ$ の範囲にある K α_1 線によって回折した n 個のはん点について、標準物質回折線からの距離を、フィルムの中心を通る直径線上で測定した。測定はコンパレータによって、バーニアスケールで読んだ。個々のはん点から標準物質までの距離を $\Delta\psi_i$ とすると、ピーク位置 $\overline{\Delta\psi}$ は次式で決まる。

$$\overline{\Delta\psi} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta\psi_i}{n}$$

Fig. 3. Spotty X-ray ring.

3 実験結果

(1) Fig. 4, 5 に高温焼なまし後の、押湯面および底面の応力分布を示す。○は試料の縁から 50 mm の x 方向の列を示す。◎は試料の縁から 275 mm, また ●は 500 mm の測定線上の測定値を示す。これらの記号は Fig. 2 における測定点の記号に準じている。以下同様の記号で応力分布を示してある。Fig. 4 において、高温焼なまし後の押湯面の応力は各測定点でいずれも引張応力である。応力値の分布については、測定値は局部的応力を意味しており、連続した応力の分布は不明確であるが、中央部の応力値は周辺部のそれと比較して高い引張応力が存在する傾向にある。Fig. 5 は高温焼なまし後の底面の応力分布を示しているが、押湯

Fig. 4. Distribution of residual stress on the surface of feeder head side after the annealing treatment at 940°C for 16 hours. A: x direction B: y direction.

Fig. 5. Distribution of residual stress on the surface of bottom side on the case of annealed at 940°C for 16 hours. A: x direction B: y direction.

面と同様の傾向を示している。

(2) 押湯面を 15 mm 切削除去した後の応力測定を行なうため、切削加工による加工ひずみの影響を調べた。その結果を Fig. 6 に示す。横軸は電解研磨深さであって、切削面には 36 kg/mm² 程度の引張応力があり、得られた回折線も連続回折環である。電解研磨深さの値が大きくなるにつれて、応力は減少して、表面から 80 μ 程度より深くなるとほぼ一定値に落ち着いた。また回折線の状況も焼なまし後の写真と同様なのは点状となった。したがって、切削加工は表面から約 80 μ までその影響が及ぶと判断して、電解研磨深さは 100 μ 以上とした。Fig. 7 は切削された押湯面についての残留応力分布である。この図と切削前の Fig. 4 を比べると、押湯面を 15 mm 切削除去することによって全体的に引張応力から圧縮応力に変化した。すなわち表面から 15 mm 深さの間に 10 kg/mm² 程度の応力こう配が存在する。Fig. 8 にその時の底面側の応力分布を示す。底面側は切削前と同様に全体としては引張応力であるが、押湯面を切削することによって、試料中央部の応力は増加して、周辺部では減少する傾向にある。切削前、切削後の底面の応力を平均値と比較すると、応力は 3.4 kg/mm² 低下した。

(3) 試料を 650°C、8 時間の低温応力除去焼なましを行なった後に測定した応力値を押湯面、底面についてそれぞれ Fig. 9, 10 に示す。この処理によって、表面の残留応力は大幅に除去され、押湯面 x 方向でその平均値は -0.6 kg/mm²、y 方向は +0.5 kg/mm² で

Fig. 6. Effect of the cutting at point No. 3.

Fig. 7. Distribution of residual stress on the surface of feeder head side after cutting 15 mm in depth. A: x direction B: y direction.

Fig. 8. Distribution of residual stress on the surface of bottom side which is another surface of cutting. A: x direction B: y direction.

あった。底面側は平均値で、x 方向は +1.5 kg/mm²、y 方向は +3.7 kg/mm² の値を得た。

4 考 察

4・1 はん点の分布

Fig. 9. Distribution of residual stress on the surface of feeder head side on the case of annealed at 650°C for 8 hours. A: x direction B: y direction.

Fig. 10. Distribution of residual stress on the surface of bottom side on the case of annealed at 650°C for 8 hours. A: x direction B: y direction.

フィルム上に現われるはん点の個数とはん点の分布について調べたところ、測定方向に対して $\pm 10^\circ$ の範囲にある $K\alpha_1$ 線によって回折したはん点の個数は10個から23個であった。すべてのフィルムを平均すれば13.6個である。これらはん点の半径方向の分布は正規分布であるべきであって、その個数分布の一例をFig. 11に示す。それらの分布曲線のピークから得られた $\sin^2\psi - \Delta\psi$ 線図はFig. 12のようであった。余程の粗結晶等に遭遇した場合を除いては大略Fig. 12 (B), (C)に示す程度であって、大略の応力値の推定は可能である。鋳鋼等設計時の許容応力値が低いこと、およびこの方法の性格から高精度の測定は困難ではあったが、以上の程度のバラツキで、 $\sin^2\psi - \Delta\psi$ 線図の傾斜から考えて、およそその値は測定できたと考える。

4・2 応力の分布

大型鋳鋼品の冷却過程においては、外周部の方が中心部に比べて当然早く冷却するので、外周部は中心部に対して引張りの応力となる。(Fig. 13 (A)) この応力

Fig. 11. (A), (B), and (C). Examples of distribution of spots.

が大きいときには、降伏点は高温では低いので塑性変形を起こし、Fig. 13 (B)のようになると考えられる。さらに温度が低下すると、試料は全体として冷却するため、外周部に対して相対的に中心部が伸びた状態にあるので、室温に冷却した場合も外周には引張応力がかかる。(Fig. 13 (C)) なお、hot ingotの応力測定例として、室温におけるingotの外周に圧縮応力が残る例があるが、鋳造応力は試験体の形状、大きさ、および冷却条件等によって簡単にきまるものではないと考える。

また表面を15 mm 切削したため、応力値が零に近く、Fig. 7のように(一部圧縮側に入る)なるのは、15 mmの切削深さがFig. 13 (C)のP点付近にあると想像される。片面15 mmの切削で他面の応力が変化するのは応力の再配分が起こったためであり、Fig. 8の結果は妥当な変化であるといえる。

650°Cにおける低温応力除去焼なましは応力の軽減に有効であることがFig. 9, 10の結果から明らかとな

Fig. 12. (A), (B) and (C). Examples of $\sin^2\psi$ - $\Delta\psi$ diagram.

Fig. 13. Development of residual stresses during cooling.

った。

測定値に関して、高温焼なまし後の押湯面の測定値を平均すると x 方向に 7.8 kg/mm^2 、 y 方向に 7.4 kg/mm^2 の引張応力があった。また底面側では x 方向に 10.4 kg/mm^2 、 y 方向に 10.5 kg/mm^2 の平均引張応力を得た。押湯面を 15 mm 切削除去すると、この面に x 方向で 2.4 kg/mm^2 、 y 方向に 4.0 kg/mm^2 の平均圧縮応力があり、その時の底面側の平均応力は、 x 方向に 7.5 kg/mm^2 、 y 方向に 6.7 kg/mm^2 の引張応力であった。測定面の形状が正方形であるため、 x 方向、 y 方向の平均応力がほぼ同様な値になったと考えられる。

5 結 言

本研究の意義は、次の諸点にあると考えられる。

- (1) $1000 \times 1000 \times 400 \text{ mm}$ の大型鋳鋼品の応力を測定した。測定ははん点法によって有効に行なわれた。
- (2) 鋳造応力分布はほぼ理論どおりであると考えられる。
- (3) 低温応力除去焼なましが有効であることがわかった。すなわち応力軽減の目的を達していると考えられる。

なお現在、 $300 \times 300 \times 100 \text{ mm}$ の直方体鋳造品について同様の測定を繰り返して、本研究の成果を追試しつつあるが、ほぼ満足できると考えている。また、現時点では、フィルム上のはん点と標準物質回折線間の距離 $\Delta\psi$ を一つ一つコンパレータを用いて測定しているが、自動的にこの距離を測定することのできるマイクロフォトメータの使用によって、この読み取りの手間が省かれる。このマイクロフォトメータについて開発したいと考えている。

(昭和48年8月22日 第1回材料の力学的挙動に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会, “鉄鋼製造法”, 第4分冊, p. 69 (1972) 丸善
- 2) 蒲地一義, 谷 昇, 材料, **21**, 1112 (1972).
- 3) Dieter, G. E., “Mechanical Metallurgy”, p. 395 (1961) McGraw-Hill

*1 Point 4 除外の平均値