鑄鐵の焼入硬化に関する研究(第3報)*

鑄鐵の焼入歪と残留應力との関係

岡 林 邦 夫** 砂 原 善 文**

Kunio Okabayashi and Yoshibumi Sunahara : Study on the Hardening of Cast Iron (3rd Report). Relation between Strain and Residual Stress in Cast Iron Treated by Quenching.

Quenching strain and crack have an intimate relation with internal stress originate from quenching. Experiments were carried out to investigate this relation in cast iron treated by ordinary quenching and high frequency induction heating. The specimens used were flake graphite, and spheroidal graphite cast iron, which contain the typical form of graphite in cast iron, and 0.5 %C steel. This relation changes considerably according to the quenching method and the form of graphite in cast iron. Strain and residual stress in specimens treated by ordinary quenching were found passably larger than that in induction heated specimens. Nodular graphite cast iron shows a tendency similar to 0.5 %C steel on the stress distribution and strain, but flake graphite cast-iron shows a different tendency from both of them. As a characteristic in stress distribution and its strain of flake graphite cast iron different from the case of nodular graphite cast iron and steel, the value of compressive stress on the tangential direction near the surface is rather small, in spite of the large value of the expansion of the outer diameter, while that of the inner diameter is small, that is, the relative difference of the two values is larger than in the case of nodular graphite cast iron and steel.

(Received February 6, 1953)

I. 緒 言

鑄鐵は組織中に黒鉛を含むので脆弱であるから、焼入歪が大きく、また焼割れも発生しやすいと考えられているが、鑄鐵中の黒鉛状態によつてその傾向が異なり、焼入組織についても黒鉛組織による影響が認められる⁽¹⁾。焼入歪や焼割れは何れも急冷によつて材料内に発生する内部應力と密接な関係があり、鋼についてはこの問題に関して種々の研究がなされているが^{(2)~(4)}、著者等は鑄鐵の焼入に際しての黒鉛形状の相違による残留應力の變化、ならびに鋼にくらべて如何なる相違があるかを検討し、さらに表面焼入(高周波焼入)と全體焼入(普通焼入)による焼入歪と残留應力との相互関係について考察した。

II. 供試材ならびに實驗方法

供試材の化學組成を Table 1 に示す。本實驗においては黒鉛形状による影響を検討するために、球狀黒鉛鑄鐵(N. G.)と片狀黒鉛鑄鐵(F. G.)をえらび、さらに比較のために黒鉛を含まない材料として0.5 %C鋼(S.)を用いた。以下本文においては供試材を上記の略號にて表わす。試験片は外徑 30 mm φ、内徑 16 mm φ、厚さ 8 mm のリング狀試片を用いた。焼入は普通焼入(850°, 1 hr 水焼入な

Table 1 Chemical Composition of Specimens.

Specimen	Mark	T.C.	C.C.	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
Flake Graphite Cast Iron	F.G.	3.37	0.74	1.74	0.54	0.229	0.104	—	—
Nodular Graphite Cast Iron	N.G.	3.30	0.60	2.76	0.76	0.063	0.023	1.06	0.3add
0.5 %C Steel	S.	—	0.48	0.18	0.72	0.039	0.030	—	—

らびに油焼入)と高周波表面焼入を行い、硬度、組織および外徑と内徑の焼入歪を測定した後、その残留應力を求めた。残留應力の測定には機械的方法、物理的方法、X線による方法など種々の方法が行われているが、ある斷

** 浪速大學工學部

* 1952年4月本會東京大會に發表

(1) 岡林、本誌、投稿中

(2) H. Buchholtz and H. Buhler, Arch Eisenhüttenwess., 6 (1932-33), 247; 335.

(3) G. Sachs, Metallwirtschaft, 8 (1929), 343.

(4) 菅野、日本機械學會論文集, 13 (1947), 43; 鐵と鋼 36 (1950), No. 2, 11.

(5) 高瀬、三谷、本誌, 16 (1952), No. 2, No. 10.

(6) 多賀谷、足立、本誌, 16 (1952), 218.

面内の残留應力分布を求める方法としては G. Sachs⁽⁷⁾ が材料の表面を層狀に除去したときの變形を測定することに

Fig. 1 Quench Hardness Treated by Ind. Heat and Ordinary Quenching.

西原, 遠藤⁽⁸⁾の計算式により次式を用いて動徑方向と切線方向の 2 軸應力を求めた。

試料の外半径を r_a , 内半径を r_b として, 外周より半径 r まで削り去つた時, これに對應する内半径を r_0 とすれば,

$f_a = \pi r_a^2$, $f_b = \pi r_b^2$, $f = \pi r^2$ また内徑歪 $\theta = r_0 - r_a / r_0$, 半径 r の位置における内部應力は, 動徑方向 $\sigma_r = E \cdot f_b - f / 2f \cdot \theta$, 切線方向 $\sigma_t = E [(f_b - f) d\theta / df - f_b + f / 2f \cdot \theta]$ で與えられる。

なお弾性係数 E の値は $S. = 2.1 \times 10^4$, $N. G. = 17 \times 10^4$, $F. G. = 1.0 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ として計算した。

III. 實驗結果とその考察

(a) N. G.

(b) 0.5 % S. C.

(c) F. G.

Photo. 1 Structure of Induction Heating (20 kW 2sec Water Quench).

(a) N. G.

(b) 0.5% C. S.

(c) F. G.

Photo. 2 Structure of Ordinary Quenching (850°C 1hr Water Quench).

Fig. 2

變化をパシメーターによつて 1/1000 mm まで測定し,

よつて計算し, さらにこの結果は西原, 遠藤氏⁽⁸⁾によつて適切な近似計算法として示されている。本實驗においては焼入リング狀試験片の外周を仕上グラインダーで同心に水冷しつつ徐々に薄層を削落し, その都度外徑變化を測長器により, 内徑

供試材の普通焼入による硬度と高周波焼入による硬度分布を Fig. 1 に示し, その焼入組織を Photo. 1~2 に示す。高周波焼入組織は微細 Martensite 組織で, その中 F. G. は焼入層狀組織⁽¹⁾を呈し, 何れも superhardness を示す。油焼入によるものは硬度がやゝ低く, S. はほとんど焼が入らなかつた。また水焼入 (850°C 1hr 焼入) と高周波焼入 (20kW 2sec) による外徑および内徑の寸法變化にもつて計算した外徑歪ならびに内徑歪を Fig. 2 に示す。高周波焼入は表面焼入であるから, 全體焼入である普通焼入にくらべて焼入歪はかなり小さい。しかし鑄鐵中の黒鉛形狀によつてその大きさと傾向が異なり, N. G. は S. と同様に外徑歪と内徑歪の差が小さいが, これに對して

(7) G. Sachs, Z. Metallk., 19(1927), 352.

(8) 西原, 遠藤, 日本機械學會論文集, 15(1949), 50.

Fig. 3 Stress Distribution on Radial Direction.

何れも引張応力であるが、普通焼入は高周波焼入よりもかなり大きい値を示し、また最高値を示す点がより内部に位置する。切線応力は表面に圧縮応力が存在し、内部に行くにつれて引張力に變ずるが、焼入方法によつてその傾向が異なり、高周波焼入では表面層近くに応力反轉點が存在するが、焼入深度が増すにつれて内部に移行し、またそれとともに内部の引張応力の大きさが増加する。このように応力反轉點の位置はその焼入深度と關連があり、普通焼入ではその位置がかなり内部に存在する。また材料によつてその応力分布状態が異なり、N.G. は S とほぼ同様な傾向を示すのに對し、F.G. は相當その傾向を異にし、殊に切線応力に關しては何れの焼入方法によつても、表面の圧縮応力の大きさはきわめて小さく、しかも応力反轉點がほとんど表面層近くに存在し、焼入深度が増してもその大きさが殆んど増加せず、また反轉點の位置も内部へ移行しがたい。これに對して内部の引張応力はかなりの値を呈し、その応力分

F.G. は外徑歪がかなり大きいにかゝらず内徑歪は小さく、兩者の相對的な差が大きく生じ、黒鉛状態による相違が顯著に認められる。このような現象は焼入による内部應力と密接な關係があると考えられるので、焼入状態の適切と思われる試料をえらんでその残留應力を求めた。たゞし本實驗ではその比較的影響が大きいと考えられる試料の表面附近における残留應力のみを對象とした。Fig. 3 は動徑方向、Fig. 4 は切線方向の残留應力分布状態を示し、(a) F.G. (b) S、(c) N.G. を表わす。動徑應力は

布状態は著しい特徴を示す。

このように残留應力分布状態が鑄鐵の黒鉛状態の相違によつて著しく變化することは上記の焼入歪における傾向と密接な關係が認められ、各試料の焼入歪の傾向はそれぞれ

Fig. 4 Stress Distribution on Tangential Direction.

應力分布状態との關係によつて容易に説明し得る。また焼割れに關しては、リング状または中空圓筒狀試料を焼入したとき、F.G. については軸方向の毛割れが發生しやすいが、N.G. や S にはこの種の割れはほとんど發生

の應力分布状態の特徴によつて容易に説明される。またこの關係は鑄鐵の應力-歪曲線⁽⁹⁾においては F.G. 彈性係数が小さく、低い荷重でも大きな伸を示すが、N.G. は鋼に近い大きい彈性係數を示すという事實ともよく一致するものである

さらに前報⁽¹⁾にて報告した鑄鐵の高周波焼入による片狀黒鉛の異常膨脹という現象も焼入層において、片狀黒鉛部に應力が集中して引張られた結果、發生したもので、主として焼入層が局部的膨脹を起した現象であり、前記の F.G. の焼入歪の特徴とよく合致し、その切線

しない。この現象についても切線 應力分布状態の特徴から、その原因が明らかであろう。

IV. 結 言

鑄鐵の焼入によつて發生する焼入歪とその残留應力との關係について検討した結果、兩者の間に密接な相互關係が認められた。この關係は表面焼入(高周波焼入)と全體焼入(普通焼入)によつてそれぞれ趣を異にし、また鑄鐵中の黒鉛状態の相違によつて變化し、片狀黒鉛鑄鐵は炭素鋼にくらべてその残留應力分布状態がかなり異り、切線應力については表面層附近の壓縮應力がきわめて小さいが、内部にはかなりの大きさの引張應力が存在し、その焼入歪については外徑膨脹が大きいのに反して内徑膨脹は小さく、兩者の相對的な差が大きい。また鑄鐵の高周波焼入の場合に認められる焼入層における片狀黒鉛の異常膨脹もこの焼入歪と残留應力の關係によつて説明することが出來ると考えられる。また片狀黒鉛鑄鐵において發生しやすい軸方向の

毛割れの原因もその切線應力分布状態の特徴から明らかであろう。しかるに黒鉛形狀が片狀から球狀になると、炭素鋼の場合と同様な残留應力分布状態を示すようになり、切線應力は表面に大きな壓縮應力を生じ、焼入歪については内徑と外徑の焼入歪の相對的な差は小さくなり、焼入歪と残留應力との關係は炭素鋼のそれに類似して來る。またこのような鑄鐵の焼入歪と残留應力との關係は鑄鐵の應力-歪曲線におよぼす黒鉛形狀の影響ともよく一致するものである。

終りに臨み、本研究を行うにあつて、御教示と御助言を賜つた大阪府工業獎勵館第5部長若本洋之助博士ならびに浪速大學工學部三谷裕康氏に御禮申し上げるとともに試料の高周波焼入に御協力下さつた大阪府工業獎勵館廣瀬泰弘技師に厚く感謝致します。なお本研究については文部省科學試驗研究費の一部の補助をうけたことを附記して感謝の意を表する次第である。