板状鋼鋳物の凝固および冷却*

小 幡 鍊**

Ren Obata: Solidification and Cooling of Steel Plate Castings. Solidification and cooling of steel plate castings in different mould materials were investigated by the temperature measurement. Experiments were carried out on square plates of 200 mm square and 5~25 mm in thickness. The results obtained were as follows: (1) The solidification time of the steel plate castings was proportional to the square of thicknesses, i.e. $t = Kd^2$, the proportionality constant K being 0.23, 0.22 and 0.05 (sec/mm²) for green-sand mould, firebrick mould, and chill-sand mould (of steel shots bonded with 5 % clay), respectively. (2) In green-sand mould, there was scarcely any effect of higher rate of heat extraction from the edges on the solidification of the plates during freezing except in a zone which has a width equal to the plate thickness as measured from the edges. But, after the solidification was completed, the heat extraction from the edges affected the whole parts of the plate and the cooling at the centres of the plates was also accelerated.

(Received October 19, 1962)

I. 緒 言

鋳物の凝固および冷却に関する研究は熱伝導論的⁽¹⁾に、あるいは実験的⁽²⁾に種々なされているが、前報⁽³⁾において

も実例を示したように、鋳物の形状や鋳型条件が凝固および冷却過程に複雑に影響するため、工場における実際作業に従来の研究結果を直ちに应用するにはなお相当の隔たり

** 日本車輛製造株式会社技術研究所 (Technical Research Laboratory, Nippon Sharyō Seizō Kaisha, Ltd., Nagoya)

* 1956年4月本会東京大会に発表; 鋳物の凝固および冷却に関する研究(第2報)

(1) Ruddle: *The Solidification of Castings*, Inst. of Metals, London, (1957), 72.

(2) *ibid*, 177.

(3) 沖, 小幡: 本誌, 19(1955), 303.

が感じられる。また、鋼铸件については、融点が高いため実験の困難さもあつて研究例は比較的少ないようである。

本報では铸件を構成する基本的形状の一つであり、かつ熱伝導がほぼ一方方向にかぎられる板状鋼铸件の凝固、および冷却におよぼす板の厚さおよび铸型材料の影響について冷却曲線の測定により研究した結果を述べる。

II. 実験方法

実験には Fig. 1 に示すような 200 mm × 200 mm の

Fig. 1 Test casting showing positions of the temperature measurements.

正方形で厚さの異なる数種の铸型を作り、これに 6t 塩基性電気炉で溶製した普通铸鋼 (C ≈ 0.2%, Si ≈ 0.3%, Mn ≈ 0.6%, S ≈ 0.01%, P ≈ 0.015%) を铸込み、厚さの中心 A、表面の中心 B、および B から端に至る C, D, E (生型铸物のみ) の各点における冷却曲線を測定した。铸型条件はつぎの 4 種類である。

(1) 生型: Table 1 に示す配合比に混練した砂により造型した。

Table 1 Composition of the green sand.

Silica sand		Bentonite	Moisture
No. 2	No. 5		
27 %	63 %	5.4 %	4.5 %

(2) 煉瓦型: 铸型の一部として耐火度を要求される部分に利用される SK 32 の蠟石煉瓦を用い、Fig. 2 に示すように型込めしたものである。

Fig. 2 Firebrick mould showing the arrangement of bricks.

(3) チル・サンド型: チル・サンドとはショット・ブラスト用のショットに粘土 5%, 水 5% を加えて混練し、造型性を与えた特殊な铸型材料で、普通のブロック・チルとくらべて一層ゆるやかな冷し金効果を望む場合に用いられる。铸型は Fig. 3 に示すように板の両面約 30 mm の厚さにチル・サンドを型込めし、また板の端面における熱放散

の影響を減少させるため、四周をイソライト断熱煉瓦で囲み全体を生型砂で型込めしたものである。

Fig. 3 Chill sand mould showing the thickness of chill sand layers. Isolite bricks were applied for reducing the thermal effect at edges.

(4) 冷し金をあてた場合: 铸型は Fig. 3 に示したチル・サンド型と同様でチル・サンドの部分で鋼板の冷し金で置きかえたものである。冷し金の厚さは 6 mm および 19 mm の 2 種類とした。

つぎに、温度測定には铸件の内部および表面に対してそれぞれ W-Mo 熱電対⁽³⁾および W-Fe 熱電対⁽³⁾を用いた。生型铸物には同一実験を 3 ~ 6 回繰返し、その他の铸型条件については 2 ~ 3 回実験を反復した。繰返し得られた冷却曲線はいずれも 50°C の範囲内で一致した。

III. 実験結果

1. 生型

厚さ 5, 7, 10, 15, 20 および 25 mm の 6 種の板の表面中

Fig. 4 Cooling curves for centres and surfaces of steel plate castings of various thickness cast in green sand moulds.

央 B および厚さの中心 A (厚さ 25 mm および 10 mm の板のみ) の冷却曲線を Fig. 4 に示した。

鋳込後、表面の温度はほぼ 1350°C の一定値を示し、各板の厚さに応じて中心部の凝固が始まるまでその温度を保ち、後冷却をはじめめる。10 mm および 25 mm の板では、中心 A の温度は最高 1500°C を示し、中心部の凝固開始とともに温度が下りはじめ、凝固進行中表面 B と中心 A との温度差はほぼ一定値 (約 150°C) に保たれる。

Fig. 5 Temperature distribution present on the surface of a 25 mm thick steel plate casting (green sand mould).

Fig. 6 Temperature distribution present on the surface of a 10 mm thick steel plate casting (green sand mould).

2. 煉瓦型

厚さ 5, 7, 10, 15, 20 および 25 mm の 6 種の板の表面中心の冷却曲線を Fig. 7 に示した。各冷却曲線の形状は生型の場合のそれら (Fig. 4) とほとんど同様であり、凝固時間 t sec と板の厚さ d mm との間には $t = 0.22 d^2$ の関係が得られた。従つて、鋳物の凝固冷却に関して、煉瓦の熱的性質は生型とはほぼ同等である。

3. チル・サンド型

厚さ 10, 15, 20 および 25 mm の 4 種の板の表面中心の冷却曲線を Fig. 8 に示した。

Fig. 7 Cooling curves for surfaces of steel plate castings of various thickness cast in brick moulds.

Fig. 8 Cooling curves for surfaces of steel plate castings of various thickness cast in chill sand moulds.

鋳込み直後の表面温度は意外に高く、生型と同様 1350°C 前後であるが、鋳込後、温度降下開始までの時間は生型の場合より短かく、その後の冷却も急速である。板の凝固時間と厚さとの間には $t = 0.05 d^2$ の関係がみられ、生型にくらべ凝固時間が約 $1/5$ となり充分な急冷効果が認められた。

4. 冷し金を当てた場合

厚さ 10, 15, 20 および 25 mm の 4 種の板について、両面に厚さ 6 mm の冷し金を当てた場合および厚さ 19 mm の冷し金を当てた場合の各冷却曲線を Fig. 9 および 10 に示した。

鋳込後、鋳物表面の温度は $1200^{\circ}\sim 1300^{\circ}\text{C}$ であり、チル・サンド型の場合よりさらに低く、冷却は急速である。

Fig. 9 Cooling curves for surfaces of steel plate castings of various thickness, 6 mm thick plate chills were applied to both surfaces of the castings.

Fig. 10 Cooling curves for surfaces of steel plate castings, 19 mm thick plate chills were applied to both surfaces of the castings.

厚さ 6 mm の冷し金を当てた場合には、初期の冷却は急速であるが、冷し金の熱容量が鋳物の放出する熱量にくらべて小さいため、冷却効果が次第に失われ冷却が緩慢になる。前項のチル・サンド型における 25 mm 板の冷却曲線 (Fig. 9 の中に点線で示した) と比較してみると明瞭にその差異が認められる。

IV. 考 察

1. 板状鋼鋳物の凝固時間

半無限固体の境界平面に相当する鋳型壁から成長する凝

固層の厚さ T と時間 t との間には、熱伝導の理論により、 $T = k\sqrt{t}$ の関係が導かれている⁽⁴⁾。これを無限平板状の鋳物の両面に適用すれば、厚さ d なる板状鋳物の凝固時間 t は $t = Kd^2$ によつて与えられる。本実験においてもこの関係式が成立し、また Fig. 5 に示したように凝固進行中板の端から板の厚さとほぼ等しい巾の範囲を除いて、板面上の温度は均一である。これらの点から、十分広い板 (本実験では一辺の長さは厚さの 8 倍以上) の中央部の凝固に関しては、端部における熱放散の影響を無視し、無限平板と同様と見なし得ると考えられる。

2. 凝固後の冷却

無限平板状鋳物の温度を求める理論式として、従来引用されている式はつぎの通りである⁽⁴⁾。

$$\theta = \frac{\sigma \theta_0}{1 + \sigma} \sum_{n=0}^{\infty} y^n \left\{ \Phi \left(\frac{(2n+1)d/2+x}{2\sqrt{\kappa_1 t}} \right) + \Phi \left(\frac{(2n+1)d/2-x}{2\sqrt{\kappa_1 t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ただし $\sigma = \sqrt{K_2 C_2 \rho_2 / K_1 C_1 \rho_1}$

$$y = (1 - \sigma) / (1 + \sigma)$$

$$\Phi(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^q e^{-\beta^2} d\beta$$

$$\kappa_1 = K_1 / C_1 \rho_1$$

θ : 温度, θ_0 : 板の初期温度, K_1, K_2 : 鋳物および鋳型の熱伝導率, C_1, C_2 : 鋳物および鋳型の比熱, ρ_1, ρ_2 : 鋳物および鋳型の密度, d : 板の厚さ, t : 時間, x : 位置座標 (板面に垂直に x 軸をとり、厚さの中心を原点とする)

(1) 式によれば板の表面温度は (t/d^2) の関数であるから、冷却曲線の時間軸 t の代りに t/d^2 を用いることにすれば、厚さの異なる板の表面の冷却曲線は同一曲線に重なる。

Fig. 11 Plot of θ/θ_0 against t/d^2 for steel plates cast in green sand moulds.

り、冷却曲線を一般的に表示できる。

そこで Fig. 4 および Fig. 7~10 の各冷却曲線について温

(4) 川下: 熱伝導論, 河出書房, (1944), 120.

度軸は初期温度との比 θ/θ_0 、時間軸は t/d^2 としてプロットし直し Fig.11~14 に示した。生型、煉瓦型およびチル・サンド型における各曲線は同一曲線に重なることなく、板の厚さの増加とともに低温側へずれ、すなわち、比較的急冷になつており、また時間の経過とともに各曲線の離散が甚だしくなつていく。これは板の一边の長さを一定にし厚さのみを変えて実験しているからであり、Fig.5 および Fig.6 の温度分布にみられるように厚い板ほど、板の端部における熱放散の影響が大きく、一層急冷になつたのである。

凝固後の冷却においては、時間の経過とともに中央部の熱は周辺部にも移動し、厚さの割に広い板の中央部でも無限平板の冷却と同様と見なすことはできない。この点凝固時間を対象とした前の場合と様相を異にする。

Fig.12 Plot of θ/θ_0 against t/d^2 for steel plates cast in brick moulds.

Fig.13 Plot of θ/θ_0 against t/d^2 for steel plates cast in chill sand moulds.

チル・サンド型では Fig.13 に示したように各曲線の離散の程度は生型の場合にくらべて少ない。これは板の四周

Fig.14 Plot of θ/θ_0 against t/d^2 for chilled steel plate castings.

をインサイトで断熱してあり、またチル・サンドの冷却能が大きく、熱流のほとんどは板面に垂直に流れ、端面の影響が少ないからである。厚さ 6 mm の冷し金を当てた場合には Fig.14 に示したように板の厚さ d と冷し金の厚さ T との比 d/T が大きいほど冷し金の熱吸収容量が小さくなり、曲線は順次高温側へずれる。厚さ 19 mm の冷し金を当てた場合には ($d/T \leq 1.3$) チル・サンド型の場合と同様の理由で各曲線は比較的良好に一致している。

V. 総 括

以上を総括するとつぎのとおりである。

(1) 生型、煉瓦型、チル・サンド型および冷し金を当てた場合の各鋳型条件における板状鋼鋳物の冷却曲線を多数測定した。

(2) 板状鋼鋳物の凝固時間 t sec と板の厚さ d mm との間に $t = Kd^2$ の関係が認められ、 K の値として、生型、煉瓦型およびチル・サンド型に対しそれぞれ、0.23, 0.22 および 0.05 sec/mm² を得た。

(3) 板の端面における熱放散による急冷の効果のおよぶ範囲は凝固進行中板の端から板の厚さとはほぼ同じ巾の範囲にすぎないが、凝固後この端面における熱放散の影響は次第に板全体におよび、中心における冷却も促進されるようになる。

終りに本研究の発表を許可された日本車輛製造株式会社、終始御指導を賜った横浜国立大学教授 沖 進博士、実験に御協力下さった当社技術研究所並びに鋳鍛部関係各位に感謝の意を表する。