向による熱膨脹性の差異は X 軸方向が他の軸方向に比し僅かに大であるが全体的に著しい方向性は有していない。

18-8 不銹鋼多層熔着金属に於ては X 軸, Y 軸方向に対し明に Z 軸方向の熱膨脹及び線膨脹係数は小である。この原因は柱状結晶周辺におけるクローム炭化物の析出によるものと考えられる。又 X

軸, Y 軸方向の線膨脹係数は大体同じ値を示している。

本研究は文部省科学研究費の援助によつてなされたものであり、試料の作製に御助力下さつた藤永田造船所、酒井鐵工所、太陽鋼業所に厚く御礼申し上げます。

熔 接 熱 應 力 の 圖 式 解 法 (第3報)*

— 薄 板 熔 接 の 歪 取 り —

大 谷 碧** 兼 松 圭 三***

Graphical Solution of Thermal Stresses by Welding (Reprt III)*

— On the removal of distortions in welded thin plate structures —

By M. Otani,** K. Kanematsu***

Abstract

It is usually adopted to spot heat the warped plate by oxyacetylene flame followed by subsequent water cooling, in order to remove distortions in welded thin structures. The purpose of this report is to explain the theoretical foundations of this practice, and at the same time determine the best condition of heating operations.

The experiments were made about the models shown in Fig. 1, and test results analysed theoretically. The thermal stress due to temperature changes were elastically calculated at first, and then corrected by the graphical method considering plastic yieldings around the locally heated part. Using thus determined stress distributions, the displacement δ could be calculated during heating and cooling by trial method taking the minimum strain energy condition, accordingly the amounts of removable distortions were determined. In those calculations, the mean values of mechanical constants (Young's modulus, yielding stress, coefficient of thermal expansion) were adopted for each small temperature intervals to derive the accurate results. As in Figs. 4 and 5, the good coincidences were indicated between the test results and calculated values. Finally, the following conditions were theoretically determined to be most recommendable:

heating temperature	500~550°C
radius of heating	20~25mm
pitch of heated spots	57~70mm

緒 論

薄板構造物では、工作に細心の注意を拂つても、熔接作業により或程度の歪が生ずるのは止むを得ぬことであつて、組立後の歪取り作業を必要とする場合が多い。この歪取り作業の一つとして普通行われているのは、いわゆる「お灸」を据える方法で、適当な箇所を局部的に加熱・水冷することにより板を

緊張せしめて歪をとる。灸据作業にも2種類あり、第1は局部を赤熱状態まで加熱した後、該部を槌打してできるだけ正形に復せしめ、しかる後更に水冷

* 原稿受付 昭和25年12月

** 正員、鐵道技術研究所 Member, Railway Technical Laboratory.

*** 正員、日本車輌株式会社 Member, Nippon Sharyo K.K.

して歪をとる方法で、厚目の板に対しては効果的である。第2は例えば車輛の側板の如く極めて薄い板に対して採用される方法で、加熱温度は比較的低温、又槌打せず單に水冷するのみで歪をとる。本研究はこの第2の歪取り法の理論的根拠を明らかにし、併せて最も好適な作業条件を求めんとして行つたものである。

I 理論式

第1図に示す如く、歪形を半径 R なる球殻の一部と考え、極座標軸 $r\theta$ の原点 O をその中心にとり、又球殻の半径方向に z 軸をとる。今歪量は微小なものと考える。即ち図において A は R, b 等比し極めて小なる量とする。加熱、冷却の

FIG. 1 歪形及び温度分布

要領は、半径 a の範囲を一樣な温度 T に加熱し、かつこの矩形温度分布がくずれない中に直ちに水冷するものと假定して取扱う。

温度変化が生じたため、歪形 POQ が少しく変形して $PO'Q$ になつたとする。 w を微小変位の半径方向成分、 u を r 方向成分とすると、 $PO'Q$ 面内の應力度 σ_r, σ_θ は次式により求められる。

$$\text{應力の平衡式} \quad \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (1)$$

應力と歪 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ の関係式 ($\sigma_z = 0$ とする)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) + \alpha T + \frac{w}{R} \equiv \frac{du}{dr} \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) + \alpha T + \frac{w}{R} \equiv \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに E ……ヤング率 ν ……ポアッソン比
 α ……線膨脹係数

及び適合条件式

$$\epsilon_\theta - \epsilon_r + r \frac{d\epsilon_\theta}{dr} = 0 \quad (3)$$

之等の式をとくには(4)式の如き應力函数 ϕ を導入する。

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} \quad \sigma_\theta = \frac{d^2\phi}{dr^2} \quad (4)$$

然るときは ϕ は(1)式を満足している。そして(2)(3)(4)式より次式を得る。

$$\frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\phi}{dr} \right) \right\} = - \frac{d}{dr} \left\{ E \left(\alpha T + \frac{w}{R} \right) \right\} \quad (5)$$

故に

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} = - \frac{1}{r^2} \left\{ E \left(\alpha T + \frac{w}{R} \right) r dr + C_1 + \frac{C_2}{r^2} \right\} \\ \sigma_\theta &= \frac{d^2\phi}{dr^2} = \frac{1}{r^2} \left\{ E \left(\alpha T + \frac{w}{R} \right) r dr - E \left(\alpha T + \frac{w}{R} \right) \right\} \\ &\quad + C_1 - \frac{C_2}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

1. 板全体が弾性的な場合

$r \rightarrow \infty$ で $\sigma_r, \sigma_\theta \rightarrow 0$ 及び $r \rightarrow 0$ で σ_r, σ_θ が有限な条件から、(6) 式中の $C_1 = C_2 = 0$ となる。又 w は次式の如く近似的に假定して計算を進める。

$$w = \delta \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right) \quad (7)$$

しかるときは

(a) $r \leq a$ に対して

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= - \frac{\alpha E_T T}{2} - \frac{\delta E_T}{2R} \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right) \\ \sigma_\theta &= - \frac{\alpha E_T T}{2} - \frac{\delta E_T}{2R} \left(1 - \frac{3r^2}{2b^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(b) $a < r \leq b$ に対して

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= - \frac{\alpha E_T T}{2} \frac{a^2}{r^2} - \frac{\delta E}{2R} \left(1 - \frac{r^2}{2b^2} \right) \\ &\quad + \frac{\delta(E - E_T)}{2R} \left(1 - \frac{a^2}{2b^2} \right) \frac{a^2}{r^2} \\ \sigma_\theta &= - \frac{\alpha E_T T}{2} \frac{a^2}{r^2} - \frac{\delta E}{2R} \left(1 - \frac{3r^2}{2b^2} \right) \\ &\quad - \frac{\delta(E - E_T)}{2R} \left(1 - \frac{a^2}{2b^2} \right) \frac{a^2}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(c) $b \leq r$ に対して、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= - \frac{\alpha E_T T}{2} \frac{a^2}{r^2} - \frac{\delta E}{4R} \frac{b^2}{r^2} + \frac{\delta(E - E_T)}{2R} \times \\ &\quad \left(1 - \frac{a^2}{2b^2} \right) \frac{a^2}{r^2} \\ \sigma_\theta &= - \sigma_r \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

但し E_T ……加熱域の温度でのヤング率

2. 塑性変形に対する補正—図式解法

(8)~(10) 式は應力がすべて弾性的な場合の理論式であつて、熱應力のため板の一部に塑性変形が生ずると、残余の弾性域應力値もまた異つてくる。か

いる際の應力度分布は、第1報に発表した図式解法を用いて決定する。¹⁾

塑性条件として最大剪断應力説をとり、かつ塑性変形中、歪の増加は應力の増加を伴わないものと假定すると、本計算例では次の如き4通りの塑性状態が存在する。即ち引張降伏点應力値を f 、塑性域内の應力を σ_{rp} $\sigma_{\theta p}$ であらわせば

$$(a) \quad \sigma_{\theta p} = -f \text{ のとき } \sigma_{rp} = -f + \frac{A}{r} \quad (11)$$

$$(b) \quad \sigma_{rp} = \pm f \text{ のとき } \sigma_{\theta p} = \pm f \quad (12)$$

$$(c) \quad \left. \begin{aligned} \sigma_{rp} &= \mp f(\log r + 1) + B \\ \sigma_{\theta} &= \pm f(\log r + 1) + B \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$(d) \quad \sigma_{rp} \equiv \sigma_{\theta p} = \pm f \quad (14)$$

弾性・塑性両域で σ_r と σ_{rp} が連続な条件、及び板の平衡条件

$$\int \sigma_{\theta} dr + \int \sigma_{\theta p} dr = 0 \quad (15)$$

等から(16)、(11)~(14)式中の諸常数を求めれば、應力値は正確に決定される。

3. 変位量 δ の決定法

以上論じて来た熱應力の計算法は、変位 w を定める δ の値が既知の場合の方法であつて、実際は δ の値はまだ不明なのである。本計算に於ては δ の決定にエネルギー法を用いた。今板の歪エネルギーを V とするとき、 δ は歪形が安定なためには

$$\partial V / \partial \delta = 0 \quad (16)$$

なる条件を満足しなければならない。従つて δ は種々な値に假定して、前述の方法により熱應力値を計算し、之に対する $\partial V / \partial \delta$ を求めておき、試索法により(16)式を満足する δ を決定する。

歪エネルギーの計算に当つては、薄板であるから、曲げ及び捩りに基く歪エネルギーを無視する。先づ弾性域に対しては、(2)式を参照して、見掛けの歪 ϵ_r ϵ_{θ} から $(\alpha T + \frac{w}{R})$ を差引いたものが應力度に基く歪で、之が歪エネルギーを決定していることに注意すれば、

$$\partial T / \partial \delta \equiv 0 \text{ であるから}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = h \iint \left\{ \sigma_r \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\epsilon_r - \frac{w}{R} \right) + \sigma_{\theta} \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\epsilon_{\theta} - \frac{w}{R} \right) \right\} r dr d\theta \quad (17)$$

但し h ……板厚

しかるに σ_r σ_{θ} は平衡の条件式(1)を満足し、か

つ $\epsilon_r = du/dr$ $\epsilon_{\theta} = u/r$ であるから(17)式は

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = |2\pi h r \sigma_r \frac{\partial u}{\partial \delta}| - \frac{h}{R} \iint (\sigma_r + \sigma_{\theta}) \times \frac{\partial w}{\partial \delta} r dr d\theta \quad (18)$$

となる。

塑性域に対しても同様に²⁾

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = |2\pi h r \sigma_{rp} \frac{\partial u}{\partial \delta}| - \frac{h}{R} \iint (\sigma_{rp} + \sigma_{\theta p}) \times \frac{\partial w}{\partial \delta} r dr d\theta \quad (19)$$

σ_r と σ_{rp} は弾性塑性両域の境界において連続であるから、板全体については結局次式が成立する。

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = -\frac{h}{R} \iint (\sigma_r + \sigma_{\theta}) \frac{\partial w}{\partial \delta} r dr d\theta - \frac{h}{R} \iint (\sigma_{rp} + \sigma_{\theta p}) \frac{\partial w}{\partial \delta} r dr d\theta \quad (20)$$

尚式中の σ_r σ_{θ} には、図式解法により補正を施した値(第1報における σ_{rc} $\sigma_{\theta c}$)を用いるのは勿論である。

(20)式の値は図式積分により、ブラニメーターを用いて計算する。

お灸作業では加熱温度が数百度の高温であるから、 $\alpha f E_T$ 等は加熱冷却中相当変化し、一定値として取扱うことはできない。従つて計算に際しては加熱冷却過程を $0^\circ \sim 200^\circ$, $200^\circ \sim 400^\circ$, $400^\circ \sim 500^\circ$, $500^\circ \sim 600^\circ \text{C}$ 等の平均値を使用して σ の変化量を計算し、之を順次加算して δ を決定して行く。即ち先ず 0°C から出発し、 δ の種々な値を假定し、各々の δ に対して $0 \sim 200^\circ \text{C}$ 間の平均諸常数値を使用して(8)~(10)式により $T=200^\circ \text{C}$ における σ を弾性的に計算する。塑性変形を生じた應力状態が存在すれば先の要領で應力を補正するそして(20)式より假定した各々の δ 値に対して $\partial V / \partial \delta$ を計算し、試索法により(16)式を満足するような δ を決定し、同時に之に対応する σ を求め $T=200^\circ \text{C}$ のときの應力値とする。次に同じ要領で $200^\circ \text{C} \rightarrow 400^\circ \text{C}$ の加熱に相当する應力度変化を、諸常数のこの範囲での平均値を使用して計算して先に求めた $(\sigma)_{200^\circ \text{C}}$ に

脚註① 大谷：熔接熱應力の図式解法（第1報）熔接学会誌17巻10, 11, 12合併号。

脚註② 塑性域における V の値そのものは決定困難であるが V の微小な変化は弾性域と同様に取扱うことができる。

加算し、上と同一要領で加熱温度 400°C における δ を試算法で求め、又 σ をも決定する。この際 $0^{\circ} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ の加熱で生じた δ のため R も変化していることに注意する。加熱温度が更に高い場合も同一要領で進んで行く。冷却の際も取扱いは同様であるが只計算式中の T の符号が負となる点が異つている。この様にして各温度間隔における δ を決定し加算して行けば、灸据作業により除去される歪量が判明する。

II- 実 験

第1図に示す歪形におき、 $h=0.23\text{cm}$ $R=56.5\text{cm}$ $b=7.5\text{cm}$ $A=0.502\text{cm}$ として歪模型を製作し実験を行つた。第2図は実験装置の略図で、熱間加工し

FIG. 2 実験装置

た球殻形彎曲板を支持台に假付熔接し、中心より 1.5cm 離れた位置での加熱・水冷による変位量を測定した。加熱には $100\#$ のトーチを用い、加熱半径 (a) は 1.0cm とし加熱時間を 1.0 1.5 2.0 2.5 秒に変えて加熱後直ちに水冷却し、それぞれ加熱過程冷却過程における変位量をダイヤルゲージで読み、歪除去量を計算した。加熱部中心の $\frac{1}{2}$ 板厚位置に熱電対を銀鉗付して、加熱時間と加熱温度の関係を実測すると第3図の如くなる。この関係から、灸据温度と、歪形が変形後も球殻であると假定して換算した中心における変位量 (δ) の関係を図示すると、第4図の如くなる。

図中の曲線はI項の要領で計算した理論値であつ

第1表 諸 常 数 値

温度範囲 $^{\circ}\text{C}$	α $1/^{\circ}\text{C}$	E kg/cm^2	f kg/cm^2
0	11.3×10^{-6}	2.2×10^6	2700
0~200	12.7	2.17	2530
200~400	14.7	1.96	2220
400~500	15.8	1.57	1710
500~600	16.4	1.19	1400

て、計測値とほぼ一致することを示している。但し計算には諸常数の各温度間隔での平均値として第1表の値³⁾を用いた。

FIG. 3 加熱時間と加熱温度の関係

FIG. 4 加熱温度と変位量の関係 ($a=1.0\text{cm}$)

脚註③ 岡田：熔接工学 p.80を参照した。

Ⅲ 好適な灸据諸元の決定

1. 加熱温度

第4図の曲線①②の絶対値の差をとれば、加熱温度と歪除去量の関係が求められる(第5図)。第5図より明かな如く、最も好適な加熱温度は500~550°Cであつて、之より温度が低くは歪取りの効率悪く又之より高温では材料に過熱の悪影響が與えられる割に歪取りの効果が上らず、共に不適当と判定される。又第4, 5図から明らかなことは、灸据え作業に際し通常用いられる当板を強く締めつけることの重要性である。即ちもし何等かの方法で加熱中の変

位を少しも許さない様に締めつけたとすれば、第4図②曲線の示す量だけ歪を除去し得るのであつて之を第5図の自由な状態で加熱冷却した場合に比べると、遙かに能率的である。なお第6図は一例として加熱温度550°Cの場合の加熱冷却中の応力変化状態を、第7図は各加熱温度に対する冷却後の残留応力値を示す。

2. 加熱半径の影響

加熱温度を一定に550°Cとし加熱半径を種々変えた場合の歪除去量の計算値を第8図に示す。図より明かな如く最も好適な加熱半径は1.0~1.25cm(直径で2.0~2.5cm)である。

FIG. 5 加熱温度と歪除去量の関係 ($a=1.0$ cm)

FIG. 6 加熱冷却中の応力変化
(加熱温度=550°C)

FIG. 7 加熱温度と残留応力の関係
($a=1.0$ cm)

FIG. 8. 加熱半径と歪除去量の関係
(加熱温度 = 550°C)

3. 塑性域半径と歪除去量の関係

第9図は加熱半径 $a=1.0\text{cm}$ のときの加熱冷却後の最大塑性域半径と加熱温度との関係を、第10図は加熱温度 550°C のときの同じく最大塑性域半径と加熱半径との関係を示している。之等と第5・8図を比較して見ると、なるべく廣い塑性域が効果的に生ずる如き灸据法が歪除去量の方からいつでも好ま

FIG. 9 加熱温度と塑性域半径の関係
($a = 1.0\text{ cm}$)

FIG. 10 加熱半径と塑性域半径の関係
(加熱温度 = 550°C)

しいことが分る。このことは加熱冷却により塑性変形を生ずることが歪の取れるのに必要な条件であることから予期し得る事柄でもある。今、適当な灸据間隔とは、お灸の周辺の塑性域が互に接する如きものであると考えるならば、お灸周辺の塑性域半径は主として加熱条件に支配されるものであるから、灸据間隔の決定に第9・10図を使用し得て、加熱温度 500~550°C 加熱半径 1.0~1.25cm のときは、間隔約 5.7~7.0cm が適当と予想される。この値は現場において好んで用いられる作業条件とほぼ一致する。

結 論

以上を要約すれば次の如くなる。

1 第1図に示す歪形の中心部に、一様な温度変化を生ずる如く加熱・冷却する場合の熱応力は、(6)式で與えられる。式中変位 w の形を(7)式の如く假定し、 w の量を決定する。 δ は試索法により(20)式で求められる $\partial V/\partial \delta$ を零ならしむる条件より決定する。熱応力により板の一部に塑性変形を生じた際は図式解法により応力値を補正し、弾性塑性両域に於ける応力値を正確に決定して $\partial V/\partial \delta$ を計算する。

2 加熱冷却過程を適当な小温度間隔に細分し、各温度間隔での諸常数の平均値を使用して1の要領で σ の増減量を計算し、之を加算して δ を決定して行く。かくして計算した δ 値は実験結果と略々一致する。

3 計算結果から、好適な灸据条件としては、加熱温度は 500~550°C 加熱直径は 2.0~2.5cm と決定された。又この場合灸据間隔は約 5.7~7.0cm が好適と予想される。更に当板を十分しめつけて加熱中の変位を成るべく阻止することは、歪取り能率を増進せしむる上に極めて効果的なことが指摘された。

尙本報告は熔接協会車輛部会でとりあげられた「灸据作業による歪取りの研究」の成果の一部であつて、実験は日本車輛で行ひ、その結果を鐵道技研に於て解析したものであることを附記する。