

熔接部断面内の板厚方向残留応力分布についての一考察

A Study of Residual Welding Stress Distribution in the Thickness Direction

渡 辺 寛* 蒲 原 秀 明*
Hiroshi Watanabe Hideaki Kamohara

内 容 梗 概

突合わせ熔接部断面内の板厚方向残留応力分布を熔接部に一様固有ひずみが発生するとして弾性論的解析によって求め、板厚 h と固有ひずみの発生領域 $2a$ との比 $h/2a$ と板厚方向残留応力分布の近似的関係を導いた。さらに板厚方向残留応力値を求める簡易測定法を提案し、本法が熔接部板厚方向残留応力測定的一般的方法である Rosenthal 法より簡単で、原理的に精度も良好であることを提示した。また実際の突合わせ熔接継手に対し、本法を用いて板厚方向残留応力分布の測定を実施した。この結果は板の側面に熔接を行なったモデル試験片における測定結果、ならびに上の計算結果にかなりよく一致した。

1. 緒 言

熔接継手の残留応力の問題については古くより多くの考察が行なわれているが⁽¹⁾、板厚内の応力が一様であるとしたいわば薄板に対し適用されるものが多く、厚板の断面内の応力については若干の測定結果をみるのみで^{(2)~(4)}、ほとんど考察されていない。しかしこれらの測定結果も大半が熔接線方向および直角方向に関するもので、三軸応力という表現が盛んに使用され、板厚方向応力の重要性が強調されているにもかかわらず、板厚方向応力についてはほとんど研究が進んでいない。これは熔接という現象が複雑であると同時に、測定自体もかなり困難なことが一因となっているものと考えられる。

ゆえに本報ではまず板厚方向残留応力分布について弾性論に立脚した解析を試み、その定性的傾向を明らかにしたのち、従来板厚方向残留応力測定法として提案されている Rosenthal 法⁽²⁾より簡単で、原理的に精度も良好と考えられる方法を案出し、その方法を用いて実際の突合わせ熔接継手の応力の測定を行ない考察を加えた。

2. 板厚方向残留応力分布の解析

別報⁽⁵⁾⁽⁶⁾では計算の簡易化のため板厚方向残留応力の発生を無視したが、本報では板厚方向の応力のみに着目して簡単な固有ひずみ論による解析を行なって、その傾向値について考察を試みる。すなわち従来長形状薄板の熔接線方向の残留応力の解析に用いられているように、熔接部に一様固有ひずみが発生するという仮定⁽⁷⁾が本報でも成立すると考える。

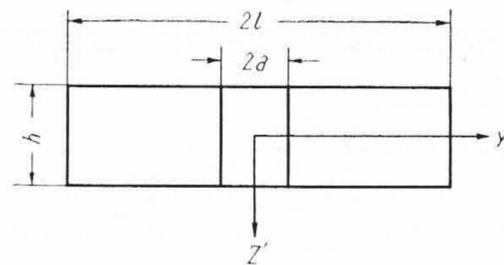
いま第1図のように厚さ h 、幅 $2l$ の板の中央部で突合わせ熔接を実施した際、幅 $2a$ の長形状に一様固有ひずみが発生するものとする。また簡単のため紙面垂直方向の長さは小さく、単位長さとする。

第1図において固有ひずみ発生領域と母材部を切り離したと考えると、熔接部板厚方向に固有ひずみが存在するため、熔接部の高さは切り離す以前とは異なる。しかし切り離さない実際の場合には両部には高さの差がないので、熔接部に第2図(a)のような一様外力を作用させ、板厚を等しくする必要がある。板の表面の垂直応力は0でなければならないので、一体となった板表面に(a)と大きさ同じで方向反対の外力を(b)のように作用させるべきである。このような状態にあるときの板厚方向の応力分布がいま求める板厚方向残留応力となると考えてよい。

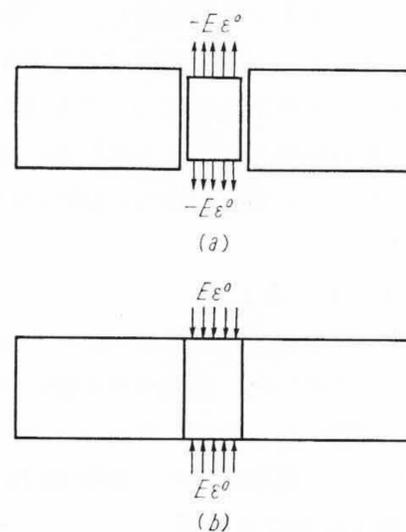
いま

ϵ^0 : 固有ひずみ量

E : 弾性係数



第1図 板厚方向残留応力解析のためのモデル



第2図 残留応力解析のための説明図

y, z' : 第1図の方向の座標

$\sigma_z, \sigma_z', \sigma_z''$: それぞれ z' 方向の残留応力、および第2図(a)、(b)の外力を作用させたときの z' 方向の応力

とすれば、第2図(a)において

$$\left. \begin{aligned} -a \leq y \leq a & \quad \sigma_z' = -E\epsilon^0 \\ |y| > a & \quad \sigma_z' = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

(b)において

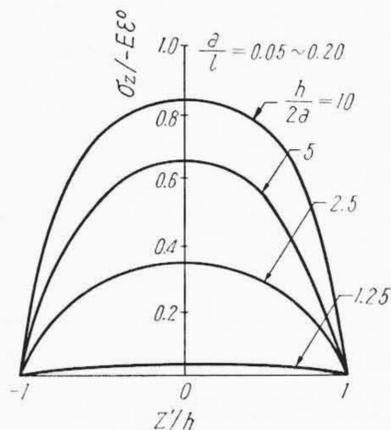
$$\begin{aligned} \sigma_z'' = & \frac{E\epsilon^0 a}{l} + \frac{4E\epsilon^0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi a}{l} \\ & \times \left\{ \left(\frac{n\pi h}{2l} \cosh \frac{n\pi h}{2l} + \sinh \frac{n\pi h}{2l} \right) \right. \\ & \times \cosh \frac{n\pi}{l} z' - \frac{n\pi}{l} z' \sinh \frac{n\pi}{l} z' \sinh \frac{n\pi h}{2l} \left. \right\} \\ & \times \cos \frac{n\pi y}{l} / n \left(\sinh \frac{n\pi h}{l} + \frac{n\pi h}{l} \right) \dots\dots (2) \end{aligned}$$

となる⁽⁸⁾。板厚方向残留応力 σ_z は

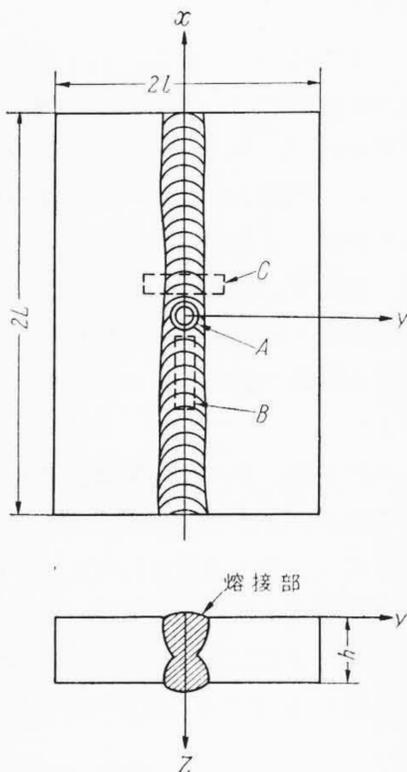
$$\sigma_z = \sigma_z' + \sigma_z'' \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるので上式より σ_z を求めることができる。熔接部中央 $y=0$ では

* 日立製作所笠戸工場



第3図 溶接部板厚方向残留応力傾向値計算結果



第4図 残留応力測定対象試験片

$$\begin{aligned}
 (\sigma_z)_{y=0} = & -E\epsilon^0 \left(1 - \frac{a}{l}\right) + \frac{4E\epsilon^0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi a}{l} \\
 & \times \left\{ \left(\frac{n\pi h}{2l} \cosh \frac{n\pi h}{2l} + \sinh \frac{n\pi h}{2l} \right) \right. \\
 & \times \cosh \frac{n\pi}{l} z' - \frac{n\pi}{l} z' \sinh \frac{n\pi}{l} z' \sinh \frac{n\pi h}{2l} \left. \right\} / n \\
 & \times \left(\sinh \frac{n\pi h}{l} + \frac{n\pi h}{l} \right) \dots \dots \dots (4)
 \end{aligned}$$

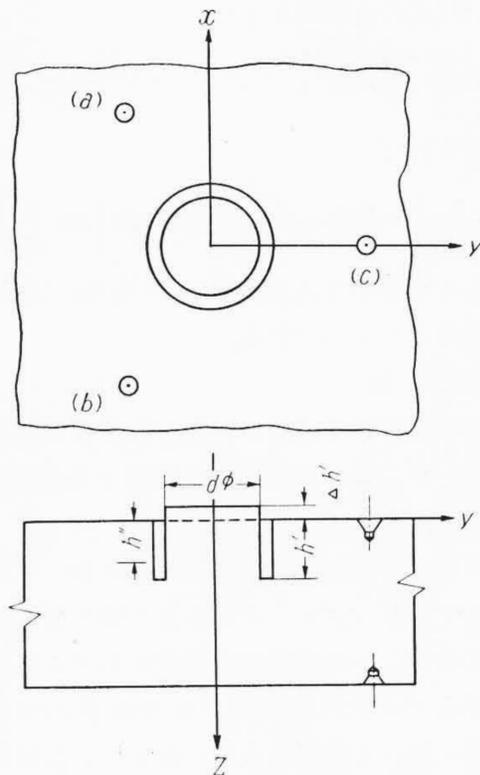
となる。

ϵ^0 , a の大きさをいかに選ぶべきかについては多くの問題があるが、いま $a/l=0.05 \sim 0.20$, $h/2a=10, 5, 2.5, 1.25$ の場合について(4)式の数値計算を実施すれば a/l の影響は小さく、第3図のようになる。いずれも板厚の中心 $z'=0$ において引張応力は最大となり、自由表面では当然のことながら0となっている。また板厚と固有ひずみ発生領域の幅の比 $h/2a$ が増すにつれ残留応力値は大きくなる。 $-E\epsilon^0$ の大きさは第一次近似的には降伏応力と考えてよいので、図示の縦軸の値は降伏応力に対する残留応力の比と考えることができる。

3. 板厚方向残留応力測定法

3.1 測定原理

いま第4図のように突合わせ溶接を行なった平板の溶接部の板厚方向残留応力を求める問題を考える。まず第4図A、または第5図のように板厚方向の応力を求めようとする箇所に円環状のみぞを掘り、深さ h' まで切り込みをいれた際の円柱部の板厚の変化量を測



第5図 残留応力測定法の説明図

定する(測定法後述)。円柱部は z 方向応力が h' まで解放され、 x 方向、 y 方向は h'' まで解放されるとすれば、板厚の変化量 $\Delta h'$ は

$$\Delta h' = \frac{1}{E} \left\{ -\int_0^{h'} \sigma_z dz + \nu \int_0^{h''} (\sigma_x + \sigma_y) dz \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここに ν : ポアソン比

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x, y, z 方向残留応力

で与えられる。ここに σ_x, σ_y は Rosenthal の方法⁽²⁾で求めうる(実際には別報⁽⁶⁾に示す改良法を用いるほうがよい)。また h'' は

$$h'' > h' - \frac{d}{3} \dots \dots \dots (6)$$

d : 切り出した円柱の径

と考えてよいが⁽⁹⁾, $(h'-d/3)$ と h' 間の応力も若干解放されるので、完全解放部の平均深さとして、その中間をとり

$$h'' = h' - \frac{d}{6} \dots \dots \dots (7)$$

として近似表示してよい。

(7)式を用いれば(5)式は

$$\int_0^{h'} \sigma_z dz = \nu \int_0^{h' - \frac{d}{6}} (\sigma_x + \sigma_y) dz - E\Delta h' \dots \dots \dots (8)$$

となり、 h' をある段階に区切って右辺の計算を行なえば、各区間ごとの σ_z の平均値を求めることができる。ここに $\sigma_x, \sigma_y, \Delta h'$ などに若干の誤差を含み、かつ(7)式の仮定にも若干の問題が残っているので、区切る段階はあまり細かくしないほうがよい。 $h'=h$ (h は板厚)になると切り出した円柱部の未切削部が小さくなるので、 x, y 方向応力もほとんど h' の深さまで解放されるようになり、(4)式の右辺第2項の σ_x, σ_y の値は $z=h'$ の値をとってよい。

σ_z を求める別法として次のように考えても近似法としては有効である。すなわち z 方向残留応力分布は第3図のように近似的には \sin 関数に類似すると考えてよいので

$$\sigma_z = A \sin \frac{z}{h} \pi \dots \dots \dots (9)$$

A : 実験常数

と考えてよく、また(8)式において

$$\Delta h = \frac{1}{E} \left\{ -\int_0^{h'} \sigma_z dz + \nu \int_0^h (\sigma_x + \sigma_y) dz \right\} \dots \dots \dots (10)$$

Δh : 全厚切り込みによる円柱部板厚の変化量

で与えられ、(9)式の近似表示より

$$\int_0^h \sigma_z dz = \frac{2h}{\pi} A$$

なることを考慮すれば

$$\sigma_z = \frac{\pi}{2h} \left\{ -E\Delta h + \nu \int_0^h (\sigma_x + \sigma_y) dz \right\} \sin \frac{z}{h} \pi \dots\dots (11)$$

となる。すなわち全厚切り込みの際の Δh を知れば(11)式より σ_z の断面内の値を求めることができる。

3.2 測定法

第4図のように突合わせ溶接を行なった平板を測定の対象とし、Aを円柱切出部、B、Cを Rosenthal 法による二軸応力 (σ_x, σ_y) 測定用ブロック切抜部とする。

まずB、Cブロック切抜部の上面、下面において長手方向の標点間距離を測定しておき(ブロックを板より切り抜く際のひずみ変化量が必要な量なので、その絶対値は精度をあげる必要はない。たとえば抵抗線ひずみゲージであれば、0点を合わせておくだけでよい)、かつA部において後述する測定器を用いて初期厚さを測定する。次にA部の周辺に第5図のような小さい円環状のみぞを入れ、その深さを徐々に増し、第6図に示す板厚変化量測定器を用いて逐次A部の板厚の変化量を測定する。円環状のみぞの切削には Guntert 法⁽¹⁰⁾に使用されるようなトレパンソーが最適であるが、後述するようにドリルで円環状に小孔を連続してあけ、その深さを逐次深くしてもよい。

第6図の測定器は3個の支点でダイヤルゲージ(1/1,000 mm目盛)を支持し、円環みぞの切削による板厚変化の少ない試験片上に支点をおき、その点を基準として切り出し円柱部の厚さの変化量をダイヤルゲージで測定するものである。まず計器の支点に相当する試験片上の点a、b、c(第5図)に大小2個のドリルを用い、第6図に示す(a)、(b)、(c)状の小孔を作製し、これに表面をラップ

仕上げした円すい状のポンチを押し込み、穴の円すい面をなめらかにする。この円すい孔に3個の鋼球を接触させ、鋼球の上に測定器をのせる。測定器の対応する3支点のうち、1点のみは(a)のように鋼球が測定器に固着されており、円すい孔に図イ-イ断面のように接触する。ほかの2点は(b)のようにVみぞを有する平滑面、および(c)のような平滑平面で、それぞれ図のように鋼球と接触する。この際Vみぞ支点は図のようにVみぞ軸が円すい支点の中心を通るように設置されている。このようにすれば3点は計器を試験片より取りはずしてふたたび試験片上のそれぞれ同一の穴の上にもってきた際、前とまったく同一の状態を再現することができる。円柱を切り出す箇所Aの表面のダイヤルゲージ接触箇所を平滑に仕上げしておけば、切り出しによって変化する高さの変化量を3支点を基準として測定することができる。

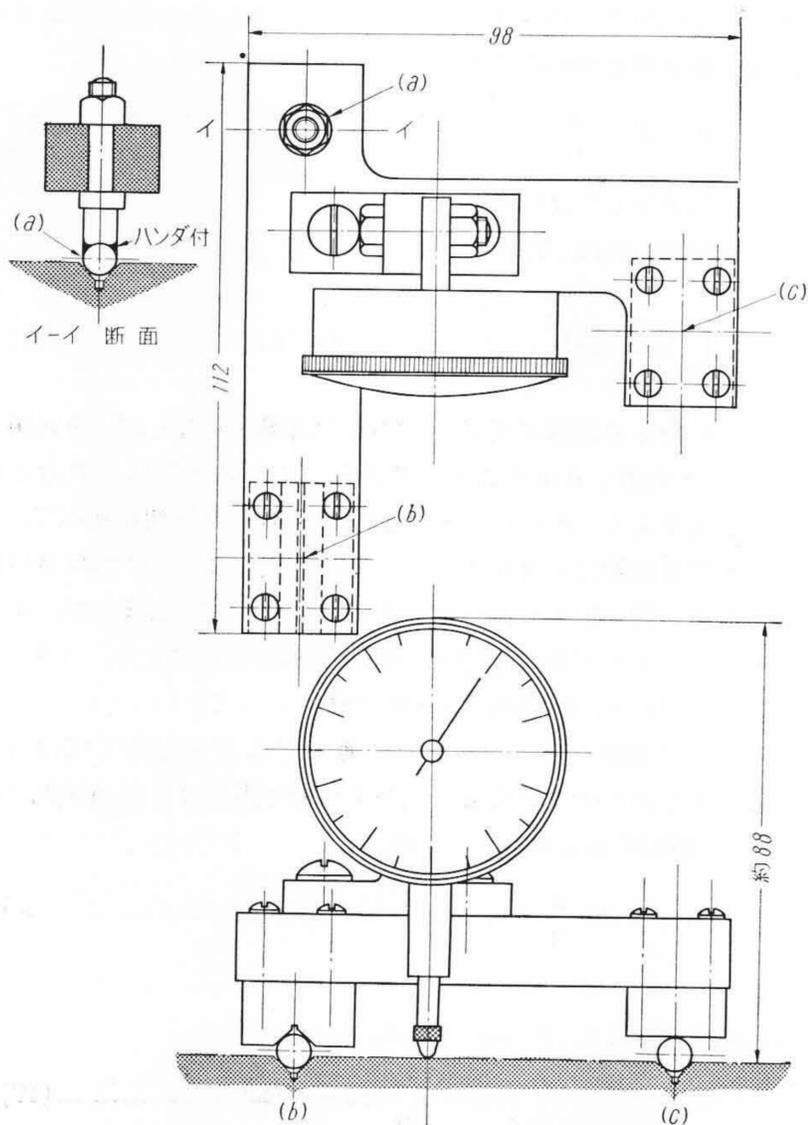
Aの裏面においても同様の3支点孔、および平滑面を作製し、逐次円環みぞ切削のつど裏面についても同様の測定を行ない、表面での変化量との和を求めれば、みぞ作製による板の若干の変形は上面、裏面の測定において相殺され、かつ支点部の板厚の変化量は小さいので、円環みぞ作製による板厚の変化量の測定が可能となる。A円柱は完全に切り抜かず、1~2 mmを残して円柱部を試験片に付着させた状態を最終切り込み状態として板厚の変化量を測定すれば、最終状態の測定も容易である。この際円柱部の応力は完全に解放されたと考えてよい。

A円柱部切り込み終了後、B、Cを第4図点線のようにブロック状に切り抜き、切り抜きによる標点距離の変化量を測定したのち Rosenthal の方法に従って逐次切削を行なえば、板厚内の二軸残留応力 (σ_x, σ_y) を求めることができる。 σ_x, σ_y および円柱の逐次切削による板厚の変化量 $\Delta h'$ (または Δh) が求めれば(8)式または(11)式より板厚方向残留応力 σ_z を求めることができる。

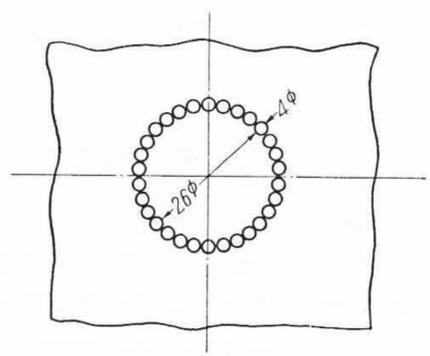
4. 実験の方法

第4図において $h=45, 2l=400, 2L=600$ mm の突合わせ溶接試験片の溶接部について、3の方法を用いて板厚方向残留応力の測定を実施した。この際円環みぞの切り込みは径4φのドリルを用いて円柱径 $d=26\phi$ として第7図のように小円孔を連続してあけて行なった。また念のため第8図に示す板厚変化量測定器を用いて円柱部切削による支点部の板厚の変化の有無を確認した。これは支点(ピボット)の回りに回転しうる可動でこと、支点到固定された固定でこよりなり、両てこの一端に鋼球が固定され、他端にはそれぞれ平面、およびダイヤルゲージ(1/1,000目盛)が取り付けられている。支点はイ視図に示すように可動でこ幅を広くしてピボットに接触させ、この回りにてこは回転できる。

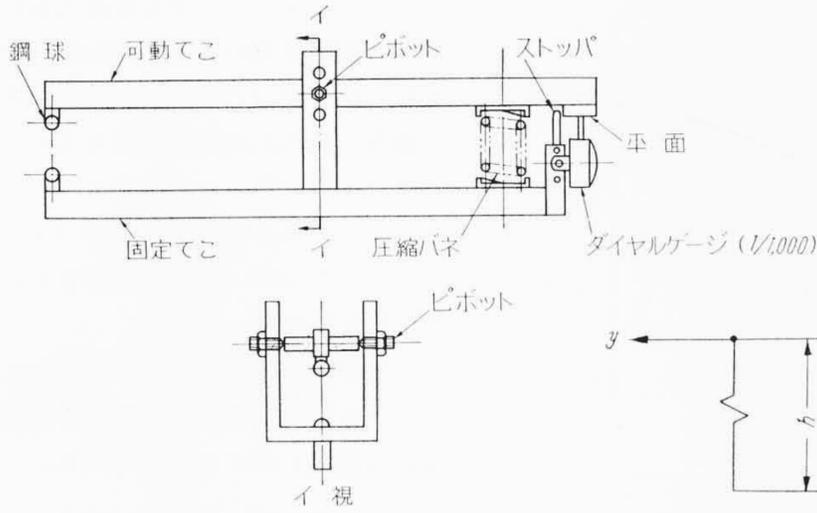
測定は試験片の表裏に作製したなめらかな円すい孔(支点)に上の測定器の鋼球をはさんで接触させ、板厚の変化に伴うダイヤルゲージの読みの変化によって行なう。測定器は若干の重量を有するので、測定器の支点をバネでつり下げ、つり下げ支持位置と試験片の相対位置を換えて測定支点(円すい孔)に測定器の重量などによる板



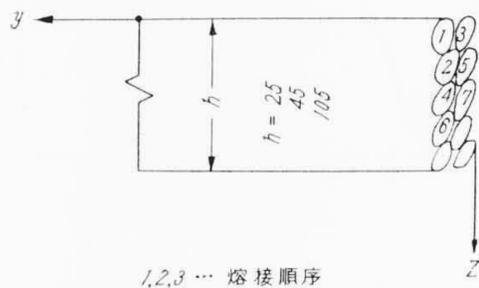
第6図 円柱切り出しによる板厚変化量測定器



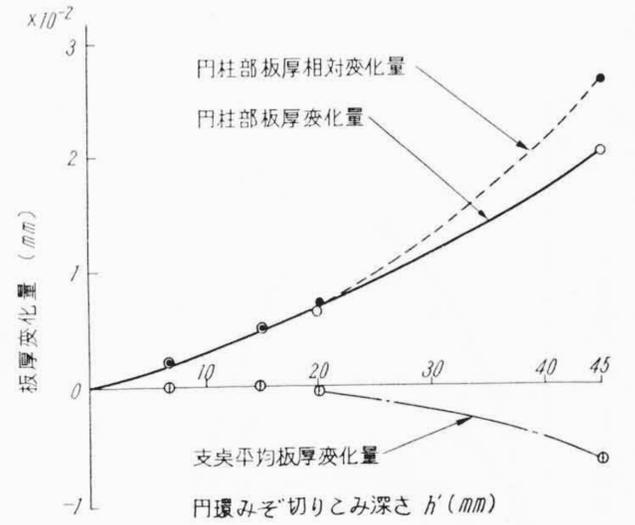
第7図 ドリルによる円環みぞ作成法



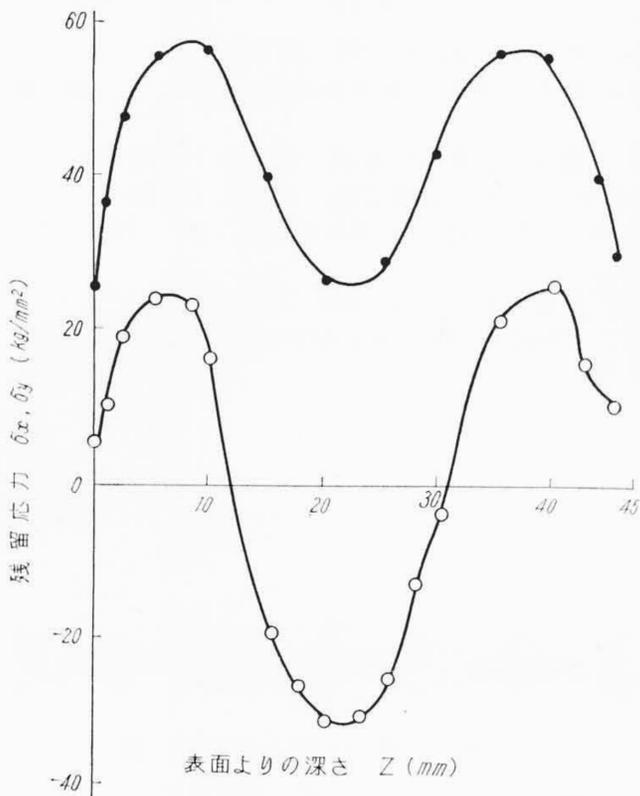
第8図 支点部板厚変化量測定器



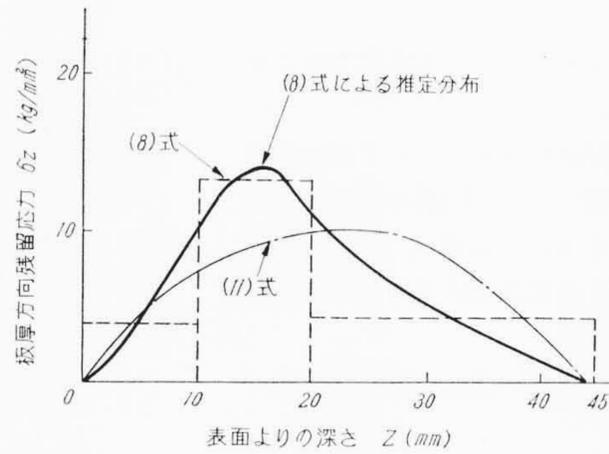
第9図 板厚方向残留応力分布考察のためのモデル試験片



第10図 円環みぞ切り込みによる板厚変化量測定結果



第11図 熔接線方向, 直角方向残留応力測定結果



第12図 板厚方向残留応力測定結果

面方向の分力を極小にし、測定器の圧縮バネの反力による垂直力のみが作用するよう留意して測定を行なった。

板厚方向残留応力 σ_z の絶対値の比較のため第9図のように板の端面に図の順序で熔接ビードをおいたモデル試験片を作製し、その x 方向（紙面に垂直方向、すなわち熔接線方向）と z 方向の応力を Gunnert 法で測定してみた。これは突合わせ熔接部の半分を示すものと考えられ、その z 方向応力は突合わせ熔接の場合とほぼ傾向的に類似するものと考えた。

5. 実験結果とその考察

第10図点線は第4図の軟鋼突合わせ熔接試験片に対して円環みぞを逐次作製した際の板厚の相対変化量の測定結果であり、切削につれ板厚が増加している。念のため3支点の板厚の平均変化量を第8図の器具で測定すると、本実験においては支点部の板厚は円環みぞ切削によって鎖線のように若干変化し、円柱部の真の板厚変化量は実線のようになった。支点の板厚が若干変化したことは測定器の支点の位置が板厚および円柱径に対しみぞに近かったため、本実験においていまま少し遠くへ離す必要があったものと思われるが、こ

の点については今後検討したい。

第11図は別報⁽⁶⁾における熔接線方向、直角方向の断面内の残留応力分布 σ_x, σ_y の測定結果を転載したもので、これと第10図の実線の結果を用い、第12図縦点線のように熔接部厚さを3分割し、(8)式より各ブロック内の平均の σ_z を求めると第12図横点線となる。この平均応力を満足するようになめらかな曲線を引けば図実線となり、板厚中心部近傍で最大値

を有し、かつ引張応力となる分布を得た。また(11)式より σ_z を求めると図鎖線のようになり、実線の結果と傾向的には一致している。

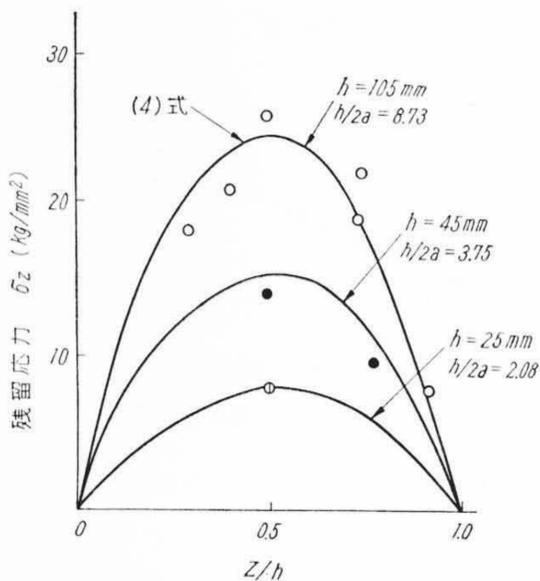
上述の板厚方向残留応力測定値の妥当性の考察のため、第9図に示すモデル試験片の板厚方向の残留応力 σ_z の測定結果を第13図に示す。実線は固有ひずみの発生域の半幅 $a=6$ mm とし、 $-E\varepsilon^0$ を降伏応力 30 kg/mm² に等しいとしたときの(4)式の計算結果であるが、測定結果の傾向をかなりよく表わしている。また板厚 45 mm に対し第12図の測定結果とほぼ一致した。板厚を横軸、板厚方向の最大残留応力を縦軸にとって図示すると第14図のようになり、板厚が増すにつれ板厚方向最大残留応力が大きくなっている。上述の $a, -E\varepsilon^0$ の値を用いて(4)式の計算結果を示すと実線のようになり、実験結果に近似的に一致する。ここで $2a=12$ mm あるいは $a=6$ mm という値は熔接を行なう際に固有ひずみの発生する範囲としてさほど不自然な値ではない。また第12図と第13図が同一の板厚に対し類似の値を示すことにより、ここで提案した板厚方向残留応力測定法は実用的価値を有するものと考えられる。

以上は軟鋼材の熔接についての結果であるが、従来より研究が行なっているステンレスクラッド鋼においても、ステンレス鋼部の厚さが軟鋼に比べてきわめて薄いので、板厚方向の残留応力に対してはほとんど同一の値を示すものと考えてよいと思われる。

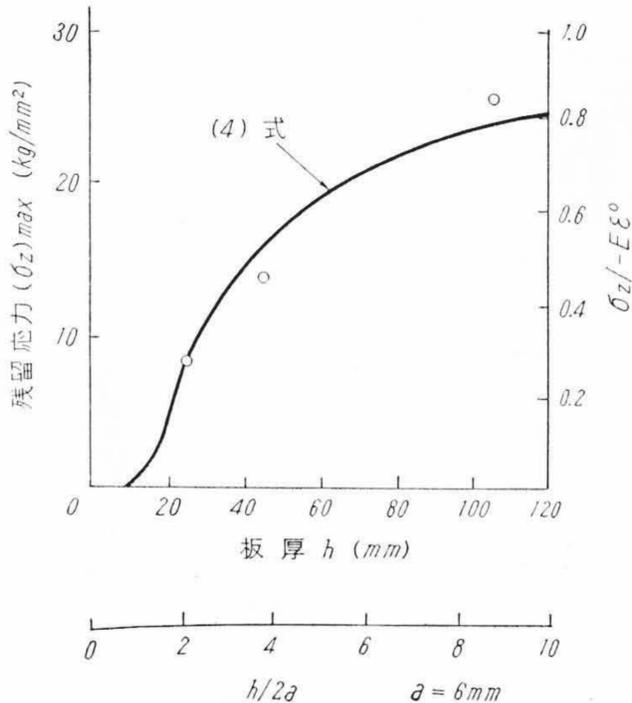
6. 結 言

本報は熔接部板厚方向の残留応力に対して解析的、実験的考察を加えたものであるが、得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 熔接部の板厚方向残留応力に対し固有ひずみ論に基づく解析を実施し、板厚 h と一様固有ひずみの発生領域の大きさの $2a$ との比 $h/2a$ と板厚方向残留応力分布の一般的な関係を導き、板



第13図 モデル試験片による板厚方向
残留応力分布測定結果



第14図 モデル試験片による板厚方向
最大残留応力と板厚の関係

たモデル試験片に対する板厚方向残留応力測定結果の両者は傾向的に一致し、かつ(1)の解析で a の大きさを適当に決めれば解析結果ともかなりよく一致した。 a の値のとり方としてはなお多くの考察が必要であるが、ここで用いた値は実際上不自然な値ではない。

本研究を実施するにあたり有益なご注意をいただいた九州大学石橋正教授に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 木原博, 増淵興一: 熔接変形と残留応力 (昭30, 熔接ニュース出版局)
- (2) D. Rosenthal, J. T. Norton: Weld. J. 24, 295* (May. 1945)
- (3) 高木: 非破壊検査, 8, 231 (昭34-10)
- (4) 武井, 大手: 非破壊検査, 9, 276 (昭35-10)
- (5) 渡辺, 渡辺: 第4回材料試験連合講演会前刷, I, 17 (昭35-9)
- (6) 渡辺, 渡辺: 機械学会講演会前刷, 50, 33 (昭36-10)
- (7) 渡辺, 大西ほか: 機械学会論文集, 19, 91 (昭28-7)
- (8) S. Timoshenko: Theory of Elasticity, 46 (1951, McGraw-Hill)
- (9) 渡辺, 渡辺: 熔接学会誌, 31, 143 (昭37-2)
- (10) R. Gunnert: Residual Welding Stresses (1955, IIW 資料)

厚中心で引張応力が最大となり、 $h/2a$ が大きくなるにつれてその最大値が大きくなることを示した。

(2) 板厚方向の残留応力の簡易測定法を提案した。すなわち測定箇所小さい円環状のみぞを逐次切り込み、円環みぞ内部の円柱部の厚さの変化量を考案した計器を用いて測定し、別報⁽⁶⁾に示した方法により断面内の熔接線方向、直角方向応力を求めれば計算により板厚方向応力を求めうる。

(3) 上の方法による実測結果ならびに板の側面に熔接を行なっ



特 許 と 新 案



特許 第284680号

平井善一郎・中野修一

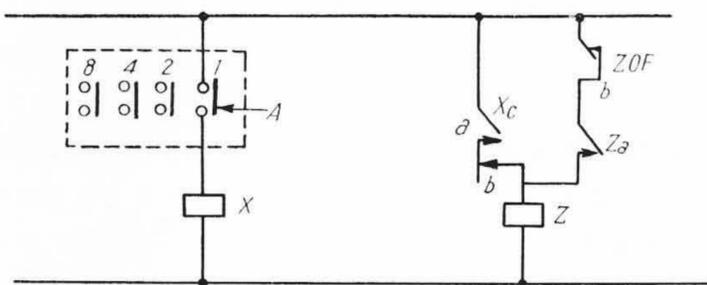
デジタル形テレメータの送信装置

この発明はデジタル形テレメータにおいて、被測定量の単位変化 (たとえば測定値の最下位けたの変位) で送信装置を自動起動させ、変位けたのみを受信側に送るようにしたものである。したがって被測定量の変化が比較的小さい場合は、回路素子 (たとえば継電器) の動作回数は激減し、装置の寿命を延ばし、信号電送の所要時間を短縮することができる。

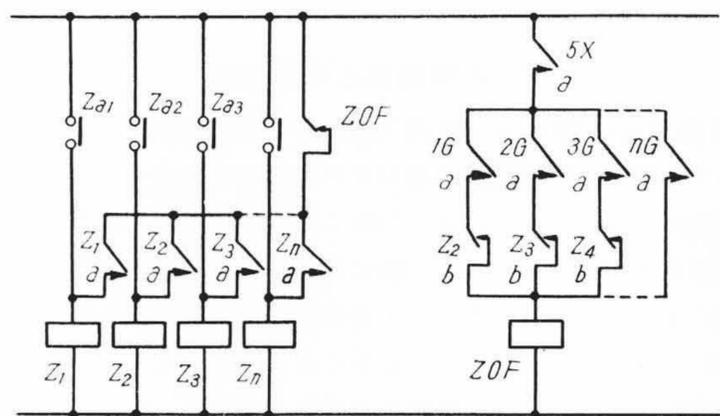
図は実施例を示し、第1図は変位けた自動検出起動装置、第2図は変位けた送信装置である。起動装置の接点Aは数値1で閉、数値0で開となる。従って測定値が変化して数値0から1になったときは、リレーXが動作しそのa, b接点を閉、開とするが、Xcには両者がラップして閉成する時間があり、リレーZは付勢され同時に自己保持される。Zの付勢は装置の起動を意味する。被測定値の第1位けたの検出起動が行なわれたときを説明すると、これに

Zの接点Za₁を閉成しZ₁を付勢する。Z₁は自己保持され、1位けたの符号を順次送信する。送信を完了すれば別の計数回路により5Xa₁, 1Gaが閉成され、リレーZOFが動作し、Z, Z₁を復帰させ送信を停止させる。第1, 2位けたが変化したときは起動装置のリレーZが同時に動作し、これに対応するZa₁, Za₂を閉成してリレーZ₁, Z₂を付勢し、1位けたのみの場合と同様下位の側の符号より順次送信する。

このように本発明は、デジタル符号に変換された測定値の変位けたを、デジタル符号の変化によって検出し、送信装置を自動起動し、この変位けたを最下位より送信し、送信完了とともに送信装置を停止するようにしたものである。 (福 島)



第1図



第2図