

## 円形はめ込み溶接の残留応力について

正員 吉田 兎 四 郎\*  
 正員 阿 部 武\*  
 正員 尾 上 久 浩\*

### On the Study of Residual Stress of Circular Patch Welding

By Toshiro Yoshida, *Member*  
 Takeshi Abe, *Member*  
 and Hisahiro Onoue, *Member*

#### Abstract

Circular patch welding, one of the typical restrained welding, frequently causes weld cracking. Hitherto, in general, it has been only known that the greater the size of patch is the safer from the cracking.

Furthermore, it is necessary that we should find the range of circular patch diameter will be safe in various thicknesses of plate, and what method should be applied to prevent any cracking and our fear in practice.

For these purposes, the authors measured the residual stresses on the welded parts of various circular patches by application of trepaning method, and then, compared the each measuring results.

Because, we could consider that the cracking on welded part was not always made by the residual stress but had very close relations with it remarkably, i.e. always it seemed the greater the residual stress level contained the more possible of cracking, and the smaller the less.

We thus could summarize the experimental results that the distribution of the residual stress level showed a peak value about 80 or 100 mm D. patch in each thickness of plates and using of "symmetrical block method" was very effective for low stress level.

Also, we find the pre-heating process before welding was not available for reducing of residual stress level, contrary to our expectation.

### 1. 緒 言

円形はめ込み溶接は典型的な拘束溶接の一つであつてその寸法、形状その他溶接条件を適当に選ぶことによつて試験片においても実工事に際しても溶接部に亀裂を生ぜしめることができる。これらの亀裂は冷却過程において入るものが多いが溶接終了後一昼夜以内に亀裂のみられるものも比較的多いようであり、またときたまその溶接製作物の使用中に亀裂の進展を見出すこともあつて、われわれはなるべく実際の工事にはこの形式の溶接々手を採用したくないのであるが構造上あるいは施工上の都合によつて止むを得ず採用しなくてはならない場合が生じてくることもある。前述の各亀裂は本質的にはそれぞれ種類の異つたものであらうと思われるが何れも溶接残留応力値およびその分布状態が亀裂発生の可能性有無に最も大な影響を与えるであらうということはかなり明白のようであつてはめ込み溶接においても Residual stress level の高いものが亀裂の発生並びに進展を生じ易く、またその反対に低いものは比較的安全であるという大雑把な概念によつて亀裂に対して安全か否かの目安とすることはかなり当を得たことと思われる。

従来、一般にはめ込み円板の直径は小さくは危険であつてある程度大きい程よいとするのが通説のようであつたがわれわれはそれ以上に各種の板厚について円板の直径がどの範囲に亀裂の入る危険性があるか、また如何

原稿受付 昭和 34 年 1 月 10 日

\* 三菱日本重工業横浜造船所造船工作部

なる溶接施行法によつてこれが予防できるかを知る必要があると考えた。この目的のために板厚 9~20 mm, 直径 40~300 mm の範囲で円形のはめ込み溶接を試験片によつて製作してそれぞれの残留応力分布を測定した結果各板厚のはめ込み溶接部の残留応力 level は円板の直径が 80~100 mm で極大となることが分つた。

また溶着法としては対称ブロッ法の採用によつて stress level が著しく低くなることを見出したので次に概略の実験内容を報告する。

## 2. 試験材準備および溶接

はめ込み溶接によつて板厚方向の波状の変形あるいは局部挫屈現象を防ぐためと拘束を苛酷にしたいために Fig. 1 に図示するような円輪形の拘束体を製作してこれを試験板の外側にスミ肉溶接で剛着させた。

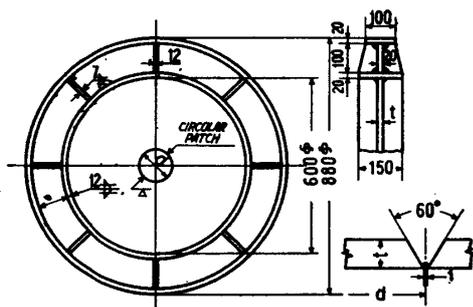


Fig. 1 Specimen of circular patch welding

この試験板の中心部に同心円状に円形のはめ込み溶接を設けた。試験板の直径は 600 mm, はめ込み円板溶接部開先形状は同 Fig. 1 に示してある通り V 型とし root gap はかなり高い精度で 1mm に保つてある。

すべての試験材についてははめ込み溶接以前に 650°C 1 時間保持の応力除去焼鈍を施し, はめ込み溶接以外の溶接による残留応力が本来の測定結果に妨害を与えないように企てた。

材質はすべて造船用軟鋼板とし溶接姿勢は下向き, 溶接棒は溶接ビードに亀裂の入るのを防ぐために軟鋼低水素系溶接棒 (LB-26), 棒径 4 mm を使用した。また溶接工は全試験材について同一人であり溶接電流, アーク電圧および溶接時間は省略するがすべて適切と思われるものであり, 溶接棒の取替はなるべく速やかに行つて直ちに次の溶接に掛るようにした。

## 3. 残留応力計測

残留応力の値はいわゆる trepaning 法で開放ひずみを測定してこの結果から 2 次元の弾性計算によつて求めた。

開放ひずみの測定は電気抵抗線ひずみ測定装置によるもので strain gauge は共和無線製 KR-4, gauge length は 8 mm, gauge factor 2, strain gauge wire の電気抵抗は 120 Ω である。

開放されたブロックは何れも Fig. 2 に図示するような 24×27×t mm の直方体になるようにし, また測定精度を保つために常に strain gauge wire と台紙の間の絶縁抵抗を check して赤外線ランプにより, 1000 MΩ 以上になるように充分乾燥させてから測定した。また trepaning の際の温度上昇は最高 60°C に抑えるように加工は特に慎重に施行した。

以上のようにして計測された strain meter の開放ひずみから残留応力の算出には次式を使用した。

$$\sigma_t = \frac{-E}{1-\nu^2} (\epsilon_t + \nu \epsilon_r) \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{-E}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \nu \epsilon_t) \quad (2)$$

ここで  $\sigma_t$ ; 切線方向の残留応力 kg/mm<sup>2</sup>

$\sigma_r$ ; 半径方向の残留応力 kg/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_t$ ; 切線方向の開放ひずみ

$\epsilon_r$ ; 半径方向の開放ひずみ

$\nu$ ; ポアソン比

$E$ ; ヤング率 kg/mm<sup>2</sup>

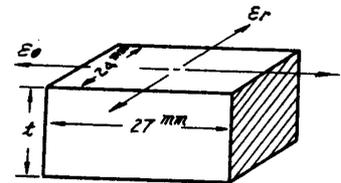


Fig. 2 Size of block trepanned

## 4. はめ込み円板の寸法と残留応力との関係

試験板の板厚は 9, 15 および 20 mm の 3 種類として円板の直径 40, 80, 150 および 300 mm を組合せそれぞれの溶接部の残留応力を計測した。溶接は時計針方向の連続多層盛であつて各板厚, 直径の組合せについて一定

の溶着方法を採用している。

これらの各条件に対する実験結果を次に示す。なお同時に円板の中心部には3方向のローゼット型の gauge を使用して主応力値およびその方向を計測してみた。

Fig. 3 (a), (b), (c) および (d) はそれぞれ板厚 9 mm における円板の直径 40, 80, 150 および 300 mm の場合の溶接線上の残留応力分布を表わし図中の数字は応力値  $\text{kg/cm}^2$  を示す。横軸ははめ込み円周を示し 0 点は

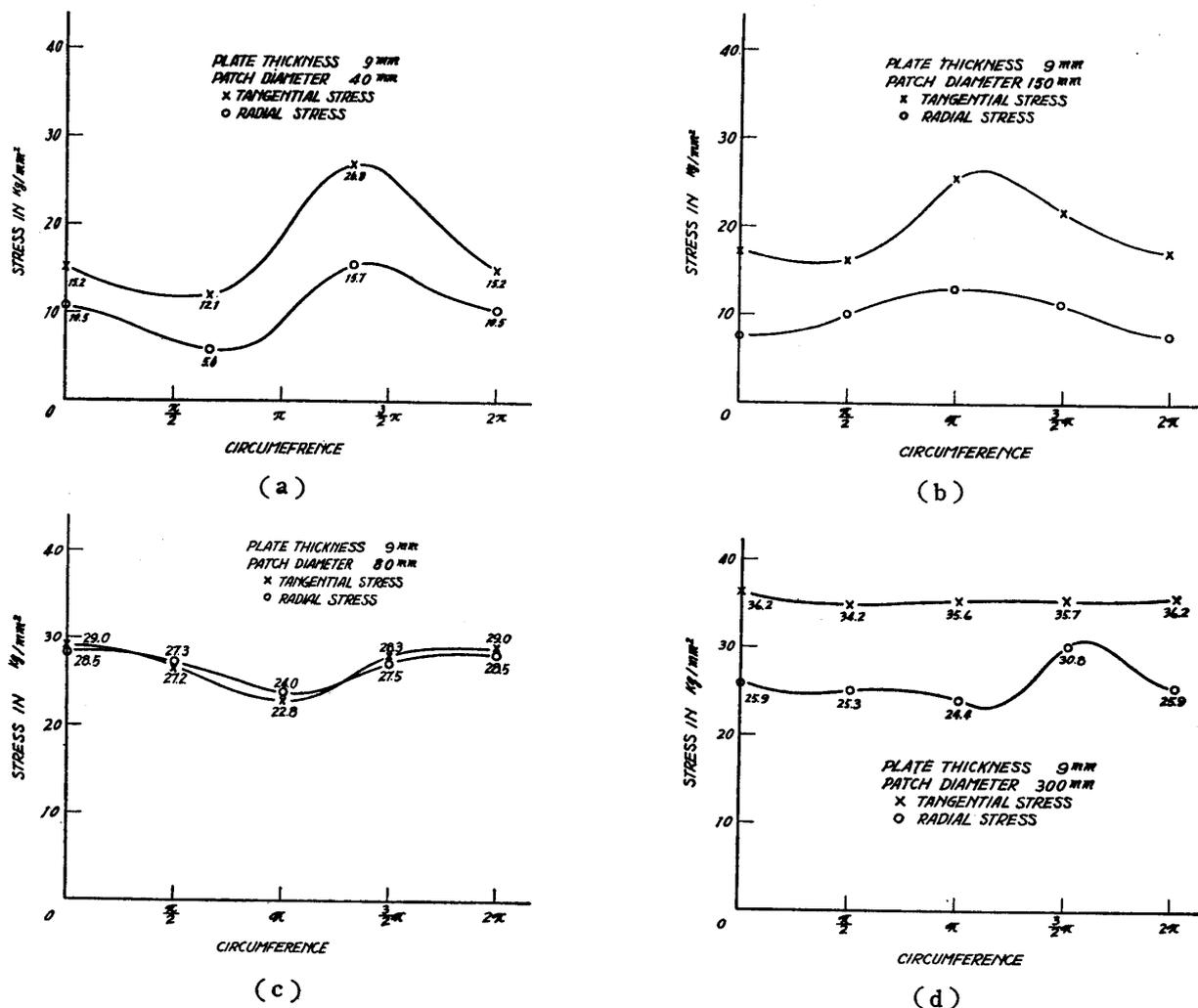
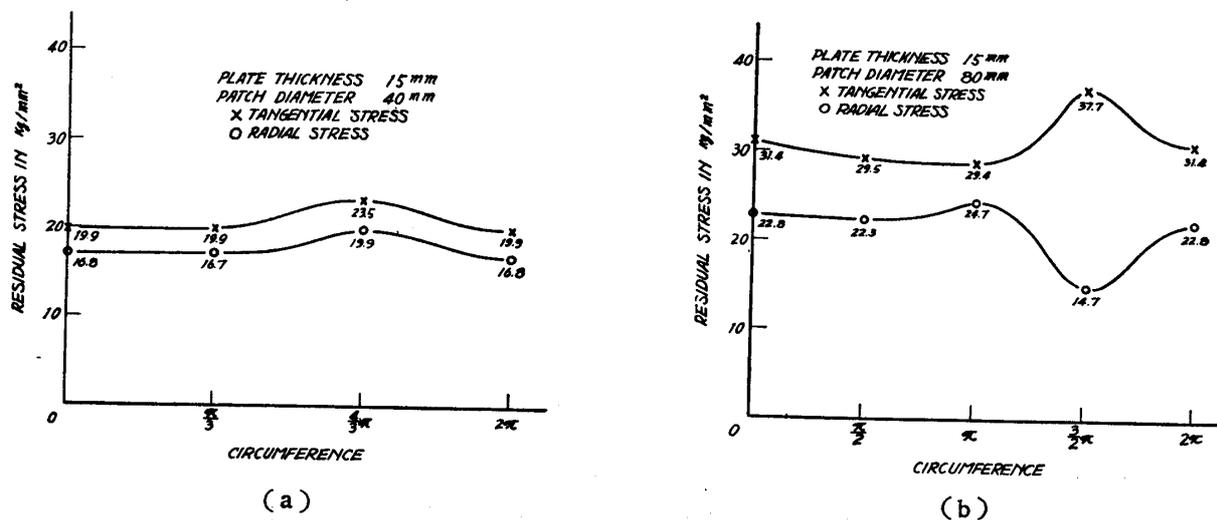


Fig. 3 Residual stress distribution on circular patch weld, 9 mm in thickness, where (a) ; shows 40 mm patch diameter, (b) ; 80 mm, (c) ; 150 mm, and (d) ; 300 mm.



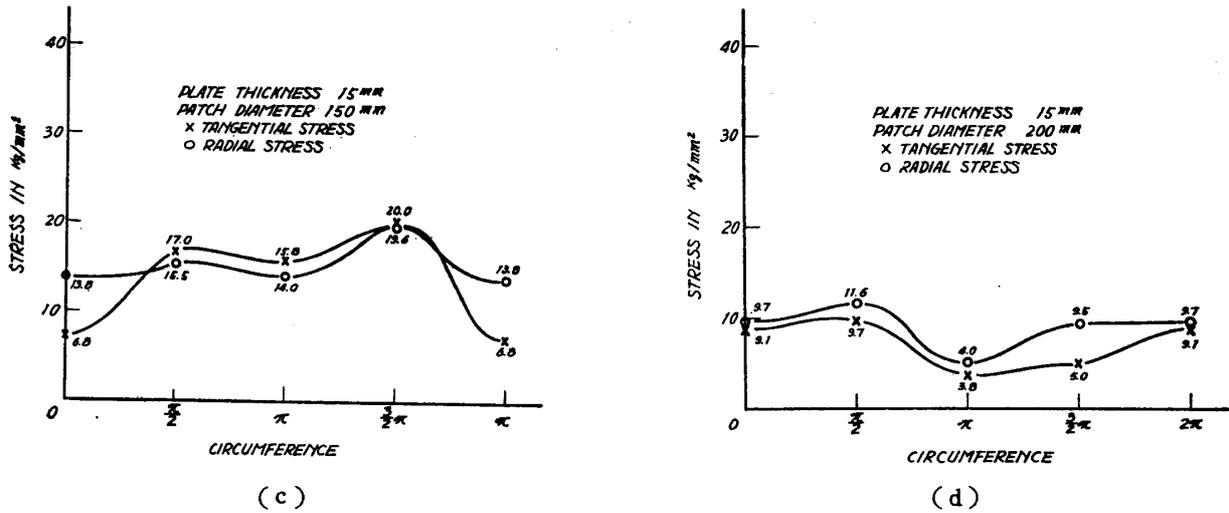


Fig. 4 Residual stress distribution on circular patch weld, 15 mm thickness where (a) ; shows 40 mm patch diameter, (b) ; 80 mm, (c) ; 150 mm and (d) ; 200 mm

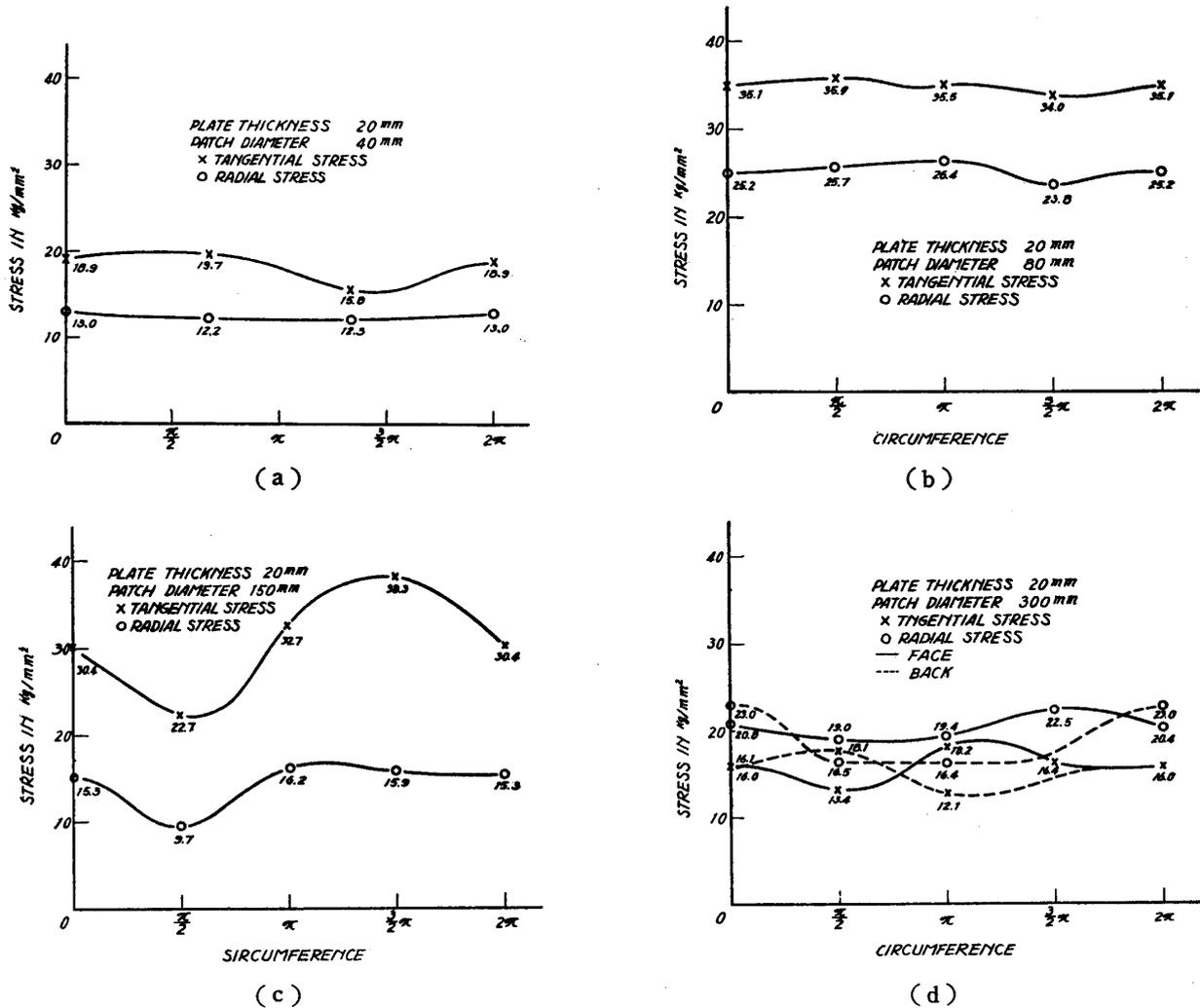


Fig. 5 Residual stress distribution on circular patch weld, 20 mm thickness, where (a) ; 40 mm patch dia, (b) ; 80 mm P.d, (c) ; 150 mm P.d and (d) ; 300 mm P.d.

溶接開始点に該当している。

同様に板厚 15 mm における円板直径 40, 80, 150 および 200 mm のはめ込み溶接線の上の残留応力分布を Fig. 4 (a), (b), (c) および (d) に図示する。Fig. 5 (a), (b), (c) および (d) は板厚 20 mm における円板直

径 40, 80, 150 および 300 mm の場合である。

これらのグラフを見れば中には同程度のももあるが一般に切線方向残留応力の方が半径方向よりも大きいことが云えるようで大きいもので溶着金属の常温における降伏点程度であることが分る。また明瞭ではないが  $\pi \sim 2\pi$  で残留応力値の大きい分布となる傾向のみられるものが散見され、これは第1層目の溶接における後半円周における拘束が効いたためと推定される。

測定は何れも片面溶接の表面だけであるが特に Fig. 5 (c) では板厚 20 mm, 円板直径 300 mm の場合について裏面の残留応力を参考までに計測して図中、点線でこの分布を示すが表面とほとんど同じ程度の数値であり分布も同様にほぼ一定した形となつている。

これらを各板厚ごとに円板の直径をペースにして纏めてみると Fig. 6 および Fig. 7 のようになる。

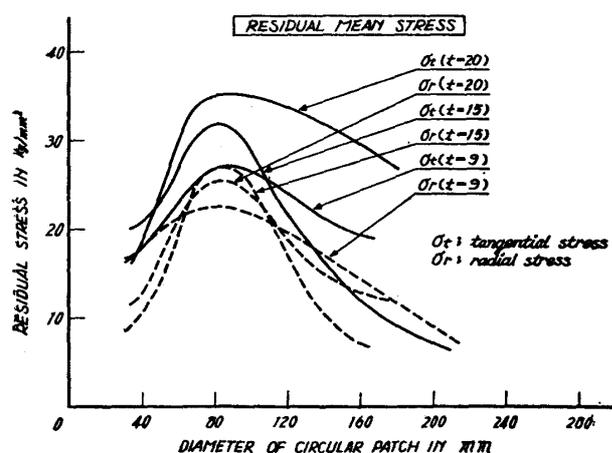


Fig. 6 Relation between magnitude of patch diameter and residual stress level.

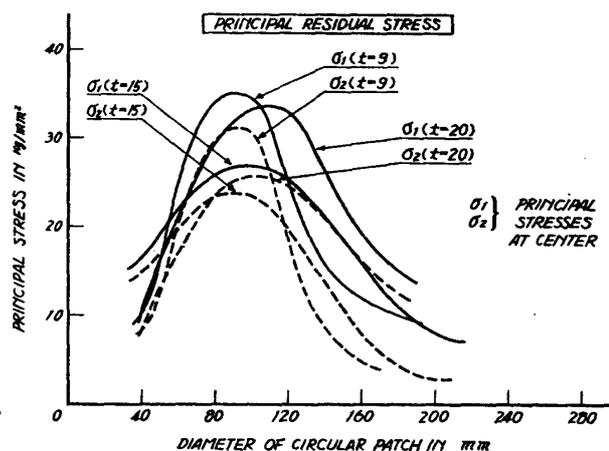


Fig. 7 Relation between magnitude of patch diameter and residual stress on principal direction at central point of patch.

Fig. 6 は円周上の stress level を示すものとして縦軸に残留応力の平均値をとつた。図中実線は切線方向、点線の曲線は半径方向の残留応力の分布を示す。

またはめ込み円板中心部の主応力 ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) を同様にグラフに表わしたのが Fig. 7 である。

これらの図で分るように残留応力 level は円板直径 80~100 mm で極大となることが各板厚について云えるようで円板の直径の相違によつて stress level は2倍位にも変動することが分つた。

板厚についてははつきりした傾向はみられないが、ただピークとなる円板直径 80 mm の場合について切線方向の応力 level は板厚の増加とともに高くなつて来ている。

また従来の通説となつていた直径の小さい程危険という考え方は残留応力の面から推察すれば直径 40 mm あるいはそれ以下程度となれば stress level が低くなつてくると考えられるのであるが溶接がやや難しくなり、このため欠陥の残存によつて亀裂が誘起されるかも知れないことを考えると sound weld が出来る限りにおいては極小直径は安全であると云えるが実工事の常識から云えば概して直径の小さいものは亀裂発生面で不安であるとみて差支えないようである。

## 5. 溶接施行法に対する検討

以上の如くわれわれは各板厚に対する危険な円板直径を見出すことができたがさらにどうしてもこの該当する直径のはめ込み円板を溶接する事態に直面した場合に如何なる手段によつて安全なはめ込み溶接を得るかを見出しておく必要がある。

そこで次に3つの手段を提案してその効果を調べてみることにした。

- (1) 予熱施行
- (2) 対称ブロック溶着法の採用
- (3) 2重はめ込み

予熱はその効果を充分出すために温度を 250°C と高くとつた。この予熱によつて母材の降伏応力を低下させ、

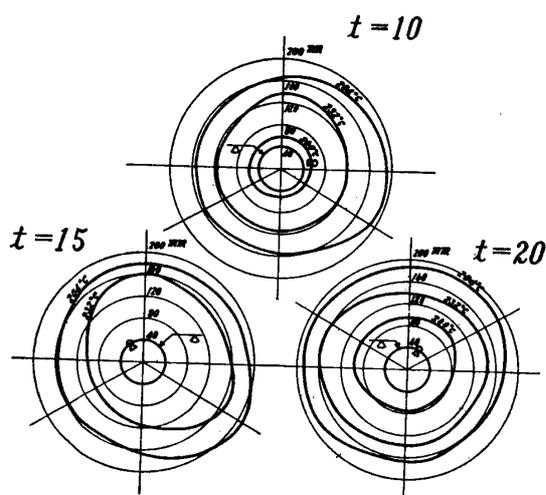


Fig. 8 Pre-heating temperature distribution before welding

またヤング率を下げると同時に加熱，冷却時の温度分布を比較的，均等化させることによつて残留応力をなるべく低くしようという狙いである。

溶接直前の温度分布は温度チョークで測定したがこれを Fig. 8 に図示する。

対称ブロック法は円周の半分を最上層まで盛上げてしまつてからこれを常温まで空冷させて残りの半円周を同様に溶接する方法で一般に現場でよく採用されている方法である。

以上，両者は何れも最も危険な円板直径 80 mm について実験することにした。

次に直径 40 mm のはめ込み溶接の残留応力 level の低いことに着目して直径 100 mm のはめ込み円板の溶接をする際にその円板の中心部に円心円状の直径 40 mm の穴を明けておいて，このドーナツ形の円板を先に溶接し，冷却

後，中心部の直径 40 mm のはめ込み溶接を行う方法でこれを 2 重はめ込みと称して同様に残留応力を測定することにした。

溶接棒種，棒径，溶接電流等，残留応力測定方法も前と全く同様である。また板厚は何れも 10, 15 および 20 mm の 3 種類とした。

以上の条件に対するそれぞれの実験結果として予熱したものゝ残留応力分布を Fig. 9 に示し，対称ブロック溶着法を採用したものを Fig. 10 に図示する。同様に 2 重はめ込みの場合の残留応力分布を Fig. 11 に示す。これら溶接線上の残留応力 level を比較するために実測の平均値をとつて棒グラフで示したのが Fig. 12 である。

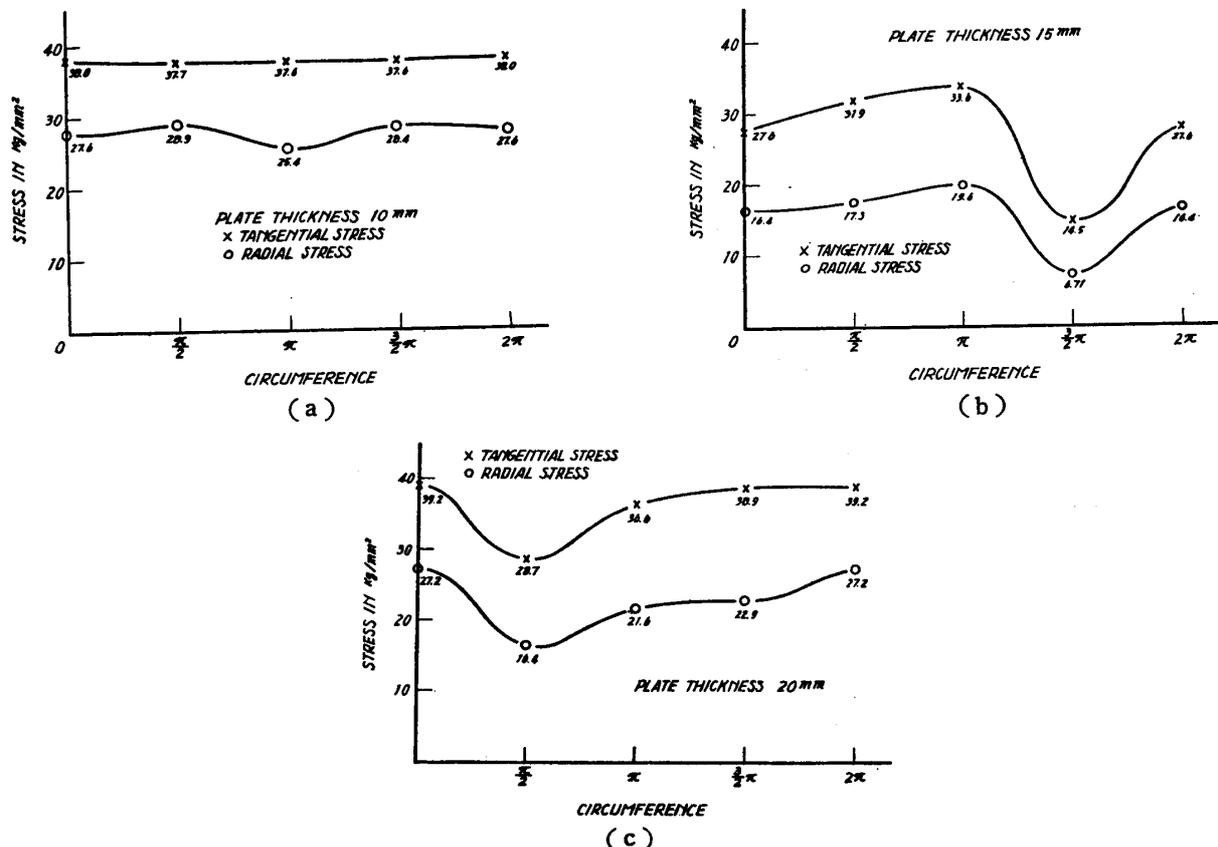


Fig. 9 Residual stress distribution on 80 mm d. circular patch weld, pre-heated at 250°C. where (a); 10 mm thickness, (b); 15 mm and (c); 20 mm.

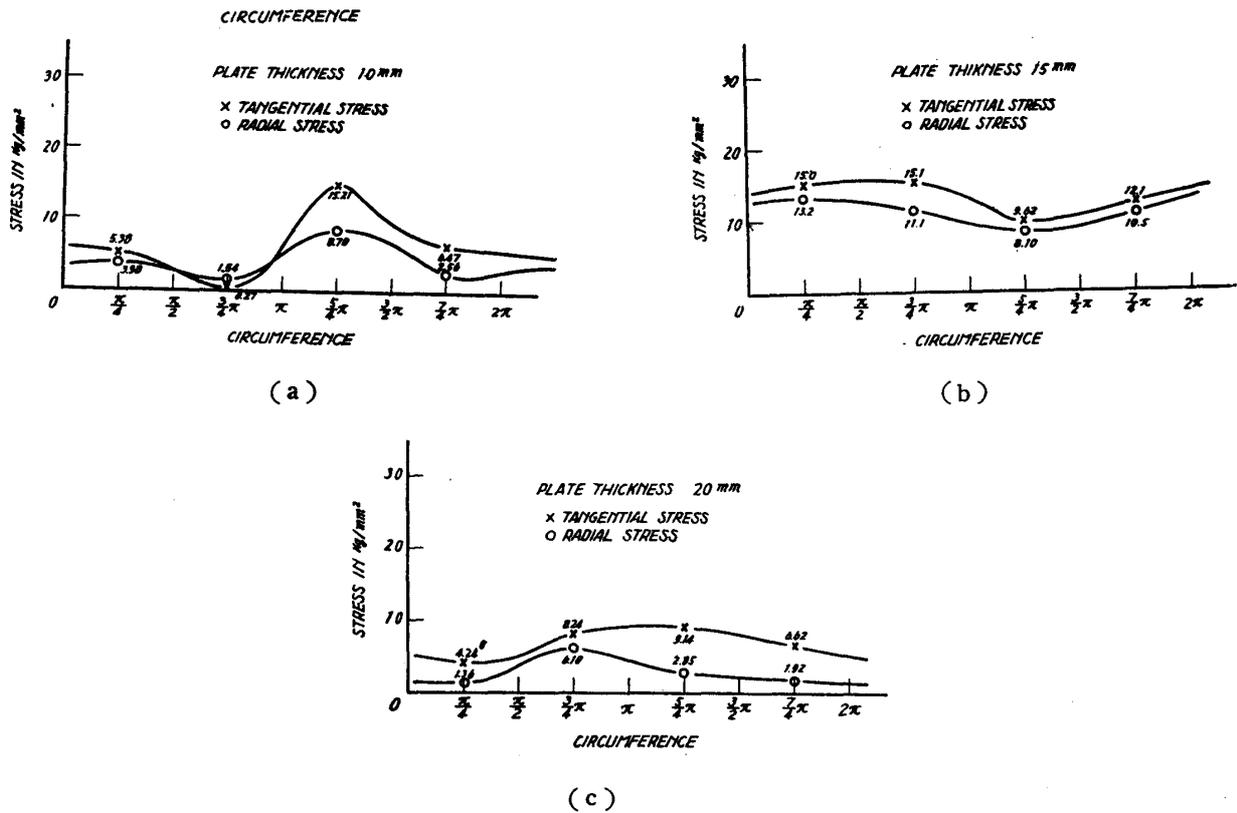


Fig. 10 Residual stress distribution on 80 mm D. circular patch weld applied welding method of symmetrical "block", where (a); 10 mm *t*, (b); 15 mm *t* and (c); 20 mm *t*.

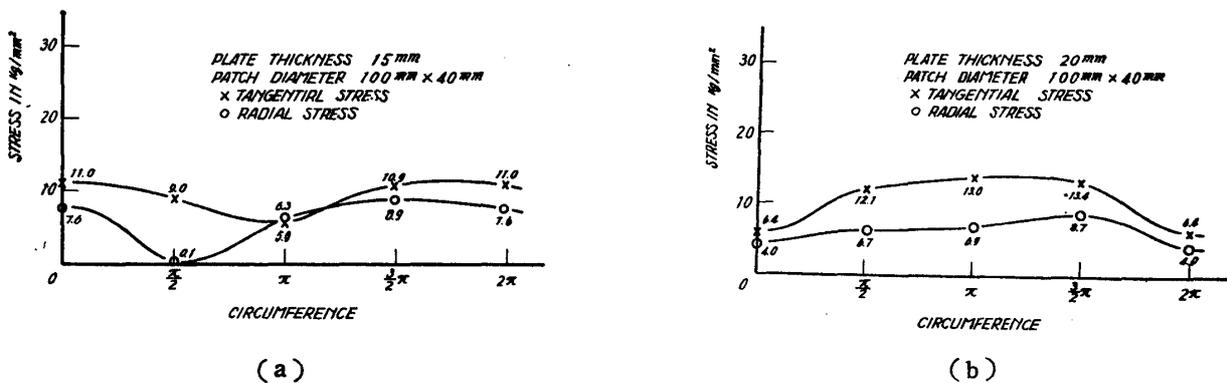


Fig. 11 Residual stress distribution on 100 mm and 40 mm circular patch weld where (a); shows 15 mm *t* and (b); 20 mm *t*.

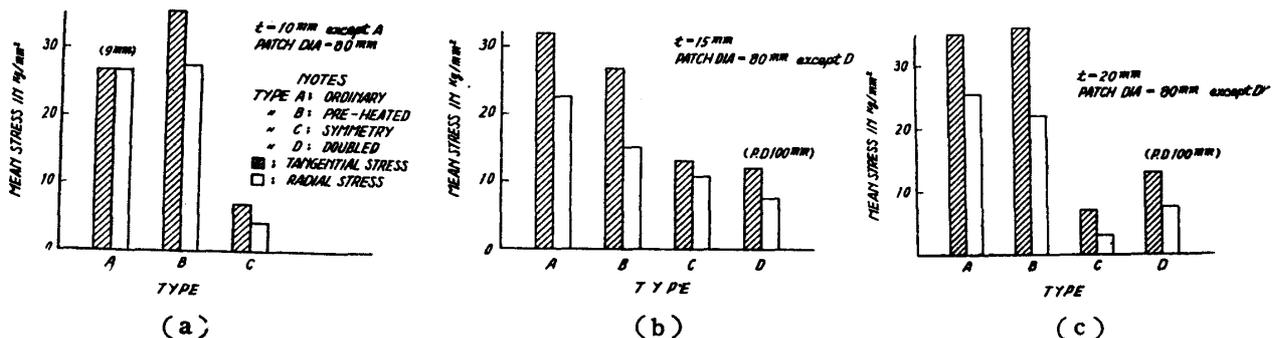


Fig. 12 Comparing of residual stress level between each processes, where (a); 10 mm *t*, (b); 15 mm *t* and (c); 20 mm *t*,

図中ハッチした棒は切線方向、白棒は半径方向の残留応力を示す。またAは普通の時計針回り渦巻状の連続溶接、Bは予熱施行、Cは対称ブロック法、Dは2重はめ込みを行つたものを示す。

これらの結果から明瞭に分ることは stress level は予熱によつて低下しないこと、対称ブロック法の採用、2重はめ込みの採用によつて著しく減少することで、各板厚について同様の傾向があるようである。

また何れの場合についても切線方向の残留応力の方が半径方向より平均値は大きいようである。(中には同程度のものもあるが)

また溶着法による応力分布にその特徴を期待したが見られなかつた。

## 6. 考 察

新造船あるいは修繕船工事に於いて小さなはめ込み溶接はときたま生じるものであつて、たとえば貫通パイプの無駄穴の塞ぎ、軽目穴の塞ぎ溶接、その他設計変更の際に直面することが多い。

円形のはめ込み溶接では一般に直径の小さい程、亀裂が入り易いとされていたが今回の実験によれば極大値があり小さくなつてもある程度以下となると残留応力は低下してくることが分つた。すなわち直径 40 mm 程度では溶接部さえ完全であれば安全であるようであるが一方溶接欠陥の生じ易くなる欠点があり sound weld が得られる限り安全であると云えるが実工事ではまず避けた方がよいと思われ、少くとも直径 200 mm 以上を採用した方が安全である。

また渦巻状に多層盛溶接するよりブロックで盛上げた方がよいだろうという事は現場において経験的に知られたことであるが今回の実験によつて残留応力 level の低くなることから実証された。

予熱施行はこのような典型的な拘束溶接においてはその予熱による局部加熱の影響も考えられて必ずしも有効ではないのではないかと推察される。(ただ溶接熱影響部よび特に第1層目のビードの硬化を柔らげる効果は充分あると考えられるが)

ブロック溶着法が残留応力軽減に有効であつた実験結果は既に木原、増淵氏等<sup>(1)</sup>によつても報告されておりこれが円形はめ込み溶接においても成立することが認められた。またはめ込み溶接の残留応力を調べた 2, 3 の文献<sup>(2)(3)</sup>にもあるが何れも半径方向よりも切線方向の残留応力の方が大きい値を示しているようであるが両方向とも共にかなり高 level の引張り応力を示している。このため多軸性応力下の危険性によつて脆性破壊を誘起し得る恐れは充分含まれており特に溶接部に欠陥の存在する場合には可能性が大きいと思われる。従つて溶接施行としては云うまでもないが充分 notch tough な低水素系溶接棒を使用してかつ欠陥のできるだけ少いことを期さねばならない。

## 7. 結 論

以上の実験によつてこれを要約すると次のような結論を得ることができる。

- 1) 一般に円形はめ込み溶接部の残留応力は高い引張り応力であり切線方向の残留応力の方が半径方向より大きい傾向がある。
- 2) はめ込み円板の直径と残留応力とはかなりはつきりした関係がみられこの実験の範囲内では直径 80~100 mm で残留応力値が極大となることが各板厚について認められた。
- 3) 実際の工事に当つては極めて小さいはめ込みは残留応力が低いにもかかわらず溶接技術のより高度なことが要求され、すなわち欠陥の残存する危険を考えれば直径 200 mm 以上を選ぶべきであろう。
- 4) 残留応力のピークを生じる直径 80 mm に対する溶接施行法として予熱することは応力軽減に効果はなかつた。
- 5) 同様の目的で対称ブロックの溶着法を採用することによつて著しく残留応力が軽減することが分つた。
- 6) 最も危険な直径のはめ込み溶接をする際直径 40 mm の中心孔を明けておいてはめ込み溶接完了後、中心孔をはめ込み溶接で塞ぐ方法も少々残留応力軽減に効果があつた。

## 後 記

本実験に当時横浜大学工学部造船工学科昭和 31 年度卒手塚 功、大場一郎両君および同昭和 32 年度卒日高正孝、山下三郎両君の御協力を受け研究の成果に及ぼすところ極めて大であつたことを感謝します。

また本実験結果は本協会電気溶接委員会第7分科あるいは日本溶接協会造船部会溶接施行法委員会において報告し委員各位の御助言を賜りましたことを誌上で深甚の謝意を表する次第です。

なお本、小論に関連のある研究として拘束状態と残留応力との関係、拘束下における近接せる溶接々手の残留応力について実験を施行中でありこの結果との関係が見出されましたら再び報告する予定ですが、本、小論の結果が実際の溶接施行に対して何らかの参考に供されれば幸甚と考えてここに不備ながら報告する次第です。

#### 参 考 文 献

- (1) 木原, 増淵, 小椋, はめ込み溶接における収縮及び残留応力に関する研究 (第一報), 造船協会論文集, 第 99 号 (昭和 31 年 7 月)
  - (2) Alan. V. Louy & Hany. E. Kennedy, "Stresses in Circular Patch Weld-Test Specimens" W. JI 402 S, Sept 1952.
  - (3) Spraragen W & Cordovi MA., "Shrinkage stresses in Welding" W. JI 23(5)209-S to 246-S 1944.
-