(昭和 31 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

はめ込み溶接における收縮及び残留応力

に関する研究 (第2報)

正員	工学博士	木	原		博*
正員	工学士	增	淵	興	**
正員		小	椋		陽**

Radial Contraction and Residual Stresses in Circular

Patch-Weld, Part II

By Hiroshi Kihara, Kogakuhakushi, Member

Ko-ichi Masubuchi, Kogakushi, Member

and Yō Ogura, Member

Abstract

In Part I of this report the investigations on radial contraction and reaction stress occured in the central region due to circular patch-welds were stated. This second part concerns with the studies on residual stress occured in these specimens.

Distribution of measured strain and residual stress are shown in Fig. 2 and 3, respectively. In the region of patch welded plate, the signs of radial stress σ_r and circumferential stress σ_{θ} are both tensile, on the other hand, σ_r is positive and σ_{θ} , negative in the outer ring.

However, the distribution of residual stress does not constitute a fair curve, but a much complicated one along the welding bead. Therefore, it seems to be difficult to control the residual stress along the welding bead by the change of welding procedures.

When the specimen is cut along the weld line, elastic dislocation is produced according to the stress reliese due to slitting. The value of dislocation is fairly smaller than that of radial contraction.

Moreover, some investigations were made concerning with the radial contraction in block welding sequence. The effect of block length in block sequence and that of overlaying bead on radial contraction were studied.

1. はしがき

筆者等はさきに円板をはめ込み溶接した場合の横収縮及び円板中央部の拘束応力について報告を行つたが,そ の後同試験片について残留応力の測定を実施した。またさきの実験結果にもとづいて実験条件を追加し,横収縮 やクイチガイに関する検討を行つたので,これらの結果について報告する。

なお整理上前回その一部を報告した実験を第1系列,以後に行つたものを第2,第3系列と呼んで区別することにする。

2. 実験方法

2.1 試験片の寸法及び溶接方法

- 原稿受付.7月13日
- * 東京大学教授
- ** 運輸技術研究所 溶接部,技官

152

造船協会論文集 第100号

試験片としては円輪に円板を嵌め込む形式のものを採用した。すなわち第1系列の実験では外径 600 mm,内 径 200 mm の円輪に外径 200 mm の円輪を嵌め込み溶接(内1枚はこれと同じ形状の円形溝溶接)した。その 際の溶接方法は第1報で述べた如くであつて,下記3条件について実験を行つた。

1;円形の溝にビード溶接を行つたもの、(試験片 1-1)

2;全長多層法で、はめ込み溶接を行つたもの(試験片 1-2)

3; ブロック法ではめ込み溶接を行つたもの(試験片 1-3)

これらの実験結果をもとにして以下にのべる第2,第3系列の実験を行つた。第2系列はブロック法を採用し た場合のブロック長の影響をしらべたもので、ブロックの数を2,3,4,6 (ブロックの長さ夫々235,157,118 及び79mm)と変化させた。第3系列はブロック法と全長多層法との併用の効果をみるために行つたものであ る。すなわち試験片 3-1 においてはブロック数を2とし、表裏各2層をブロック法で溶接し、その後はビードの 継目の位置を90° ずらし、前のビードの中央に継目がくるような状態で後の2層を全長多層法で溶接した。試験 片 3-2 においてはブロック数を2つとし、表裏3層までブロック法で溶接し、最終層のみを棒の継目をずらし た全長多層法によつた。これは試験片 2-1 の最終層を全長多層法で溶接したことに相当する。試験片 3-3 では 同じく試験片 2-4 において最終層を2つの部分に分けて溶接した。これらの溶接順序には実用に供せられてい るものと程違いものもあるが、次の2つの目的で実施されたものである。すなわち第1系列における実験の結果 ビード上の残留応力が非常に凸凹していることが分つたので、その週期を調査し、またブロック法で溶接した上 にビードの継目をずらした形で溶接した場合どのような変化を生ずるかを調査することによつてビード上の応力 分布の基礎的な傾向を求めようとした。またブロック法と全長多層法とでは収縮の状況が相当異なり、ブロック 法を用いると高次の収縮は著しくなるが平均収縮量は減少し、総体的には見掛けの収縮エネルギが減少すること が分つているが、ブロック数の影響ならびに全長多層法を重畳した場合の効果を検討することによつてこの現象 を調べようとしたためである。

開先形状(対称X型),使用溶接棒,溶着順序の原則(溶接の進行方向としては前進法を採用し,表裏面は1 層毎に交互に溶接する)等は第1系列の場合と同じであるが,試験片の寸法を一部変更し,外径 600 mm,内径 150 mm,の円輪に径 150 mm の円板(板厚はいずれも 19 mm)をはめ込み溶接した。



2.2 残留応力の測定

電気抵抗線歪計を用いて残留応力の測定を行つた。第1系列の場合 の歪計の貼布位置は Fig.1 の如くで,ビード上及び円板の中心を通 る十字線上について応力測定を実施した。歪計には1方向ゲージとし て K-22, 2方向ゲージとして KR-4 (いずれも標点距離 9mm, 共 和無線製)を使用した。応力解放の方法としては図の太線で示す如き 8つのプロックにドリルを用いて分割し,その際の歪変化を測定し た。溶接は表裏面交互に行つているので残留応力も大体同じ値を示す ことが予想されたが,数点については裏面にも貼布して両者の差をし らべた。

第2,第3系列の試験片の一部についても残留応力測定を行つたが 良好な結果がえられなかつたので省略する。

Fig.1 Method of Residual stress Measurement 2.3 収縮量の測定

Measurement 第1系列の場合の収縮量の測定方法は第1報に述べた通りである が,第2,第3報の場合にも同様の方法(標点距離 50mm,円間上 24 点)で半径方向の収縮量を測長機によ り測定した。但し測定は溶接完了時についてのみ実施した。

2.4 クイチガイの測定

溶接後ビードに沿つてスリットを入れて解放すればクイチガイを生ずるが、 試験片 2-3 についてクイチガイ の測定を行つた。この場合内側の円板を完全に切取つてしまうとクイチガイの測定がうまく出来ないので、円周 の一部は切らないで残しておく方法をとつた。すなわち先ず $\pi/2 \sim 2\pi$ 間を切断し (切削幅 5 mm), $0 \sim \pi/2$ 間 を残しておいたが、 残部を $0 \sim \pi/4$, $0 \sim \pi/8$, $0 \sim \pi/16$ と少くし、 その極限値として完全に切取つた際のクイチ ガイを推定する方法をとつた。クイチガイの測定は収縮の場合と全く同様である。

3. 実験結果ならびに解析

3.1 残留応力

第1系列の各試験片について8つのプロックに切出した時に解放された歪の分布及びそれをもとにして求めた 応力分布を夫々 Fig.2 及び 3 に示す。

これらの図からは応力分布について次のような傾向がみられる。



(1) Along $0-\pi$ line



(2) Along $\pi/2 \sim 3/2 \pi$ line (a) Spec. No. 1-1, groove bead



(3) Along weld line







(4) [Along $0 \sim \pi$ line (5) Along $\pi/2 \sim 3/2\pi$ line (6) Along weld line (b) Spec. No. 1-2, patch-weld by multilayer sequence





Note.;

- Radial strain at B-surface
 Circumferential strain at B-surface
- $\Delta \qquad " \qquad " \qquad at A-surface$ ---- Radial strain e_r ---- Circumferential strain e_{θ}

先ず半径方向の十字線上での応力の分布状況について述べると、円周方向の応力(以下 σe と略す) にビード 上では高い引張応力であり、はめ込まれた円板内では大体 10 kg/mm³ 前後の引張応力を示しているが、 円輪部

153

造船協会論文集 第100号



(1) Along $0 \sim \pi$ line



(2) Along $\pi/2 \sim 3/2 \pi$ line (a) Spec. No. 1-1, groove bead



(3) Along weld line



(4) Along $0 \sim \pi$ line



(5) Along $\pi/2 \sim 3/2\pi$ line



(6) Along weld line (b) Spec. No. 1-2, patch-weld by multilayer sequence



(7) Along $0 \sim \pi$ line





(8) Along $\pi/2 \sim 3/2 \pi$ line (9) Along weld line (c) Spec. No. 1-3, patch-weld by blok sequence

Fig. 3 Residual Stress Distribution $(\sigma_r: \text{ radial stress}, \sigma_\theta: \text{ circumferential stress})$

分では圧縮応力となつており、外側に行くに伴つて0に近づく。これに対して半径方向の応力(以下 σr と略す) はビード上では高い引張応力を示し、(その値は一般には σ0 より低い)円板内では σ0 と同じく大体 10 kg/mm² 前後であるが、円輪の部分でも引張応力で外側に行くに伴つて0に近づく。これらの応力分布は大体次のような ことから説明することが出来る。

すなわち残留応力の発生にははめ込まれた円板が周囲の板によつて引張られる形式のものと、溶接ビードの縦





. . .

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2報)

収縮とが基本的な役割を演じているものと考えられる。 前者に基く応力は第1報 Fig.7 に関連して述べた如き ものであつて,その最も基本的な均一収縮の場合には Fig.4 の如き応力分布を示し,円板内では σr,σg 共に引 張外側輪では σr は引張, σg は圧縮である。

後者に基く応力の分布は解析的にはまだよく分らないが概念的には Fig.5 の如くであつて, σe はビード上で は非常に高い引張応力であるがその両側の部分では圧縮応力となる。よつてこれらが合成された結果, Fig.3 の 如き応力分布になるものと考えられる。

母材部分をも含めた応力分布の場合は上述した如くある程度なめらかな分布がえられるが, ビード上の応力分 布については非常に凸凹で殆んど分布傾向がつかめなかつた。

スリット型試験片による実験¹⁾の場合も同様の結果がえられていた。すなわちビードが1つの場合にはビード 上の応力分布もなめらかなものがえられるが、これに対してビードが2つ以上のものではたとえ全長多層法で落 接した場合でも応力分布は非常に凸凹であつた。

今回の実験の場合も同様母材を含めた場合についてはなめらかな分布はえられるがビード上に関してはどの試験片の場合も極めて不規則なものであつた。よつてこれらのことから考えるとビード上では非常に複雑な分布になっていることが言える。この場合円形ビードとはめ込み溶接,ブロック法と全長多層法の別なく3枚の試験片とも同様に複雑な分布を示したことは注目すべきで,スリット型拘束試験片に関する実験結果を合わせて考えると何本か溶接棒を継いだ場合には溶着法の如何にかかわらず非常に複雑な応力分布を生ずるものであると言える。また内部の円板部分の応力など応力分布の状況はこれら3枚の試験片とも大体同じようなものであつた。

第2,第3系列はビード上における応力の変動がどの位の週期になつているかをしらべることを目的として行ったものであるが良好な結果はえられなかつた。



1) 木原・松山・増淵・小椋;造船協会論文集 第100号

156

造船協会論文集 第100号

3.2 半径方向の収縮

第1系列の実験における半径方向の収縮 4r については第1報において述べたが,第2,第3系列の場合についても同様の解析を行つた。

各試験片について最終状態における u_r の分布を示すと Fig.6 の如くであり, この結果を第1報の場合と同様の方法で解析した結果を Table 1 に示す。ここに a_0 (= \bar{u}_r), A, α, U, δ は夫々, 一様な収縮, はめ込まれた

No. of Spec.	$a_0 (=\overline{u_r}) \text{ mm}$	A mm	ø degree	U kg-m	8
2-1	0.303	0.70	91°30′	58.7	0.04
2-2	0.281	0.81	74°06′	53.0	0.07
2-3	0.231	0.90	76°56/	38.9	0.17
2-4	0.243	1.25	72°30′	39.5	0.07
3-1	0.389	0.50	109°06/	97.1	0. 03
3-2	0.389	0.64	91°36′	99.1	0.00
3-3	0.347	0.74	109°54′	77.7	0.03

Table 1Radial Contraction u_r at the Final Stage of Welding,2 nd & 3 rd Series of Experiment

Note:

$$u_r = a_0 + A\cos(\theta - \alpha) + \varphi(\theta)$$

where,

 $a_0 = \bar{u}_r$: mean contraction

 $A\cos(\theta-lpha)$: translational motion of circular patch against outer ring

 $\varphi(\theta) = \sum_{n=2}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$: contraction of higher order

U: apparent shrinkage energy

 δ : unfairness index of contraction

円板の剛体的移動量及びその方向、見掛けの収縮エネルギならびに収縮不整率である。

第2系列においてはプロック数が多くなるほど剛体的移動の量が大となり,一様な収縮が減じ,その結果 U が減少している。これは溶接による収縮が剛体的移動となつて現われ,歪エネルギとして内部に蓄積されること が少なくなるからであると考えられる。

第3系列は途中までプロック法を採用し、最終層或はその前の層から全長多層法を用いた場合の影響をしらべることを目的としたものであるが、この場合はいずれの試験片においても、A が少く、 a が大で、 結局 U が



非常に多くなつている。

従つて途中の層までプロック法を採用し,最後の1層或は2層に全長多層法を用いることによつて収縮の不整 をなめらかにし且つ歪エネルギの少い接手を得ようとしてもうまく行かないと思われる。

3.3 クイチガイ

クイチガイの測定結果を Fig.7(a) に示す。比較のため収縮量 u_r をもプロットしたが、応力とは無関係な剛体的移動項の $A \cos(\theta-\alpha)$ を差引いた残りを同図 (b) に示す。クイチガイは切断量がますと変化するが、残っている量が $0 \sim \pi/4$ (曲線②) 以下では殆んど変化しなくなるので、この量は完全に切断したときの クイチガイに相当するものと考えられる。

図から明らかなようにクイチガイは収縮よりもかなり少くその平均値は平均収縮量の約 40% に過ぎない。また高次の項については収縮とクイチガイとはある程度類似の形をとつているが、高次の項の振幅は小さくなつている。スリット型拘束試験片の場合クイチガイが収縮の約 85% に達し、かつその形状も収縮と極めて類似していたのに較べると相当の差異があるが、これははめ込み溶接の場合は周囲から引張られるため拘束が大きく塑性 変形の量が大きくなつていることを示すものと考えられる。

なお今回の実験においては溶接中の拘束応力の変化,溶接後の残留応力測定をも実施しているのでこれらとの 比較を行つてみると次のごとくである。すなわち Fig.3 と第1報の Fig.10 との比較からわかるように両方の 測定結果とも大体中央部で 10 kg/mm² 程度の応力となつているが,一方収縮をクイチガイと考えて応力の推定 を行うとかなり高い値を示す。例えば最も簡単な比較として平均収縮量をとりこれをクイチガイと想定した時の 円板内での応力を求めると試験片 1-1, 1-2, 1-3 について夫々 32.2, 34.8 及び 20.7 kg/mm² となり実測値 よりかなり高い。これは Fig.5 に関連して述べたようにビードの縦収縮の影響もあろうが,クイチガイと考え られるのは収縮の一部(約 40%)でしかないことにも起因すると解釈される。

4. 結論および考察

今回の実験においてえられた結論は大要下記の如くである。

先ずはめ込み溶接における応力分布の傾向であるが、全体的には半径方向の収縮とビードの縦方向(円周方向) の収縮との合成されたものと考えられる。すなわちビード部分では一般に σ_r (半径方向応力)、 σ_{θ} (円周方向応 力)ともに高い引張応力を示し、概して σ_{θ} の方が値が大きい。内部の円板の部分の応力は σ_r , σ_{θ} ともに引張で あるが、その値はビード上にくらべると少く大体 10 kg/mm² 前後であつた。また外側の円輪部では σ_r は引張 σ_{θ} は圧縮でいずれも溶接部から遠ざかるに従つて減少する。この場合母材を含めた切口については滑らかな分 布が求められたが、ビード上では著しく不均一な分布となつていた。同様のことがスリット型拘束試験片の場合 にもあらわれていたことを考えると、いくつかのビードを置いた場合にビード上で著しく不規則な応力分布を示 すということは本質的な現象であると考えられる。

横収縮に関しては第1報において述べたが、一部実測を追加した結果プロック法を用いる場合はブロック長を 短くし、初期の溶接による収縮を出来るだけ剛体的移動の形として内部にエネルギが蓄積しないようにした方が 歪エネルギが少くなることが分つた。またプロック法を用いている場合途中で棒の継目の位置をずらすと歪エネ ルギの値が急激に増加することが分つた。

溶接後ビードの所を切断した際のクイチガイを測定し収縮と比較したところこの量は収縮よりかなり少なかつ た(約40%)。これははめ込み溶接においては周囲から拘束されるため拘束が強く。塑性変形の量が大きいこと を示すものと考えられる。例えば今回の実験では溶接中の拘束応力及び溶接後の残留応力についての計測を行つ ているので、収縮をクイチガイと考えた場合の応力とこれらとを比較してみると、前2者は大体一致しているが 第3番目の値はこれらより大分高い値をとる。これには Fig.4 に関連して述べたようなビードの縦収縮も寄与 しているであろうか、収縮のうちの弾性部分がその一部分(約40%)にすぎないことに由来するものと考えら れる。

これだけの実験結果からははめ込み溶接における残留応力を減少させるためには如何なる溶接順序を採用すべ きかを結論することは困難であるが,スリット型拘束試験片に関する実験結果をも綜合して考えるとこの問題に ついて次のようなことが言える。

判定の基準としては先ず第1にビード上の応力の最高値,応力の多軸性などが問題になるが,全長多層法で円

158

造船協会論文集 第100号

形の溝にビードを置いた場合ですらビード上の応力は著しく変動するものであることを考えるとビード上の応力 を溶接施工法によつて control しようと試みても殆んど意味がないと思う。

これに対して歪エネルギー U の方は control 出来るように思われる。そしてこの見地からすればブロック法 を採用した場合の方が歪エネルギーは少く、ブロックの長さを短くすると歪エネルギが減少する。これは溶接に よる収縮が剛体的移動といつた形であらわれ歪エネルギーが内部に蓄積されることが少いからであると解釈され る。なお歪エネルギー U はビードに沿つて亀裂が入つた時に解放される歪エネルギーに関係した量と考えられ る。

5. あとがき

本研究の実施に当つては矢田敏夫,大島士郎,木村 勗氏らの協力をうけた。また井口常雄博士の御好意によ り京極健生,山下研一氏らの協力をうけることも出来た。日本鋼管鶴見造船所,神戸製鋼及び石川島重工からは 夫々試験片及び溶接棒の準備ならびに溶接工の派遣について好意ある協力をうけた。ここにこれら関係各位なら びに機関に厚く感謝する。