(昭和 48 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

片面自動溶接における終端割れ防止に 関する研究 (第 1 報)

正員 藤 田 譲* 正員 寺 井 清**
正員 山 田 桑 太 郎** 須 沢 良 一**
正員 松 村 裕 之**

Prevention of End Cracking in One Side Automatic Welding (1st Report)

by Yuzuru Fujita, *Member* Kiyoshi Terai, *Member*
Sotaro Yamada, *Member* Ryoichi Suzawa
Hiroyuki Matsumura, *Member*

Summary

The application of one side automatic welding has contributed to promotion of conveyor process for assembly stage of ship construction.

In this process of one side automatic welding, however, it is observed that cracking appears in the center of weld metal mainly near the end of weld joints. To prevent this cracking, many experiments and investigations have been done from the viewpoint of dynamics and metallurgy and many useful methods have been developed and put into practice.

Preventing method adopted in actual assembly stage is to restrain the opening displacement of the groove at end of weld joints by sealing bead. In this method, backing bead at end of weld joints is not always complete and has to be repaired.

The authors confirmed formerly that end cracking in one side automatic welding occurred in relation between displacement and its rate at end of weld joints. In this paper, it is discussed on the improvement of deformation capacity of weld metal by changing of welding conditions on the basis of their fundamental experiments and it is clarified that the control of displacement and its rate at end of weld joints by means of special device gives vital effect on prevention of this end cracking.

This preventing method was applied to actual weld joints in assembly stage. It was confirmed that this method was very useful.

1 緒 言

近年船体構造の板継ぎ工程に片面自動溶接法が導入され、これにより鋼板の反転作業を除去することが可能となり、生産工程の流れ作業化を促進するのに大きな寄与をなしている。

この片面自動溶接における工作上の問題として溶接継手の終端部付近にかなりの頻度で割れが生ずることが指摘され、この防止策を確立するため多くの研究が行なわれ^{1,2,3)}、また実際施工面においては実際的な防止策が講ぜられつつある。

片面自動溶接のこの終端割れの防止策の 1 つとして、溶接が終端付近に達するに従い熱応力によって回転変形が生じ、このために割れが生じるという事実より、タブ板を大きくして終端部を拘束し割れを防止することが提

* 東京大学工学部

** 川崎重工業 (株) 技術研究所

案されている。このタブ板拘束法は板厚 12 mm, 溶接長が 500~1,200 mm 程度の比較的小さな試験片により割れを防止しうることが確認されているが, これよりも寸法の大なる実際の継手についてはその効果が疑問視されている。いっぽう溶接線近傍ないし鋼板の端部を冷却あるいは加熱することにより, 溶接熱による変形を相殺し終端割れを防止する方法についても研究が行なわれている⁴⁾。この場合冷却あるいは加熱に微妙な調整があることから, 実験室的には割れ防止の条件が見出されても, 片面自動溶接工程に実用化するためには施工管理上の困難さが伴うことが予想される。

したがって実際の片面自動溶接法に採用されている終端割れ防止策は主として終端部を約 300 mm の長さにとり手溶接あるいは半自動溶接によって開先内にシーリングビードを置き, これにより回転変形を抑制して割れを防止する方法である。この方法ではシーリングビードを置いた終端部は裏ビードが完全に形成されず, 手直し溶接を行なうことが必要であり, 片面自動溶接の工程上の弱点となっており, 本格的な終端割れ防止策の確立が強く望まれている。

著者らは⁵⁾, 以前に終端割れは変形速度と変形量との関係において生ずることを確認したが, 本研究ではこの基礎実験をもとに片面自動溶接の施工条件の改善により溶接金属の耐変形割れ性を改善し, かつ終端部の変形量と変形速度を割れを生じない範囲に制御することを検討した。さらにこの防止方法を実際ブロックの継手に適用し, 終端割れ防止にきわめて有効であることを確認した。これらの実験について二, 三の考察を行なったので, その結果を報告する。

2 実験方法

2.1 供試材料および溶接材料

供試鋼材は板厚が 30 mm の軟鋼で, その化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。溶接材料は, Table 2 に示すものを使用した。

Table 1 供試鋼材の化学成分および機械的性質

Chemical composition (%)					Mechanical properties		
C	Si	Mn	P	S	Y. S (kg/mm ²)	T. S (kg/mm ²)	El (%)
0.21	0.02	0.90	0.013	0.030	26.6	45.5	32

Table 2 溶 接 材 料

Wire	Flux	Backing
US-43	PFI-45	PFI-50 R (FCB)

Table 3 溶 接 条 件

Electrode	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (mm/min)
1	1500	33	500
2	1100	40	
3	1100	50

Fig.1 試験片の寸法および形状(溶接長が短い場合)

2.2 基礎実験

ここでは終端割れ発生条件を明らかにし, 実験的にビード形状に着目した施工法的な防止対策について実験を行なった。

2.2.1 試験片寸法および形状

本実験に採用した試験片の寸法および形状を Fig.1 に示す。試験片幅は, 初期は 2,000 mm であるが試験溶接

後、再び開先加工を行なって実験に供試しているため、そのたびに試験片幅が約 80 mm ずつ短くなっている。しかし、板幅が小さくなったら割れ発生率が増加することが判っているので⁶⁾、試験片幅の影響を考慮して 1,200 mm 程度になったら新しい試験片に取りかえることにした。試験片は実験中裏側から計 12 個の電磁石によって拘束されている。試験片の仮付け溶接は、Fig.1 に示すごとく、500 mm 間隔に 50 mm の溶接を、低水素系溶接棒 (4 mm ϕ) にて 1 層溶接を行なった。終端部側タブ板は、母板と同厚の 300 mm $\times$ 200 mm の二つ割りタブを使用し、母板に完全拘束したのちに、タブ板の開先内全長に 1 層、終端 1/3 の長さに 3 層の拘束ビードをおいた。開先形状は Fig.1 に示すように、上面 45 $^{\circ}$ 、下面 60 $^{\circ}$ の X 型とした。

2.2.2 実験条件

試験溶接は、Table 3 に示す一定の溶接条件で片面自動溶接を行なった。溶接裏当て方式は FCB 法 (フラックス・カップ・バックিং法) を採用し、ガーダー・タイプの 3 電極サブマージド・アーク溶接機にて溶接を行なった。電極の配置は Fig.2 に示すように、第 1 電極の傾斜が 15 $^{\circ}$ 、第 3 電極の傾斜が後方 5 $^{\circ}$ である。

Fig.2 溶接電極の配置

終端割れの特徴として、溶接部の断面マクロ組織によると、ビード中央部の樹枝状品の会合部に沿って板面に垂直に生ずる。この会合部には不純物が集積して融点の低下をきたし溶接金属の変形抵抗を低下させている⁶⁾。したがって、これを改善する方法として、第 1 ビードの変形抵抗がまだ十分大きいうちに第 2・第 3 のビードを後続させて、この後続ビードの熱的影響によって樹枝状品の成長方向を変える方法を採用し、実験は第 1 電極と第 2 電極の極間 l_{12} と第 2 電極と第 3 電極の極間 l_{23} を適当に制御することによって割れ発生状況を調べた。

2.2.3 実験結果

まず、前述した溶接条件、試験片形状および仮付け要領で片面自動溶接を行なった場合、確実に割れが発生することを確認するために、第 1 電極のみによる実験を行なった。その結果は Fig.3 に示してあるごとく、終端部

Fig.3 単電極の場合の実験結果

(a) 電極間の制御が不十分な場合

(b) 電極間の制御が十分な場合

Fig.4 3 電極の場合の実験結果

Fig.5 3 電極の場合の割れ防止領域

のビード中央部に割れが発生している。このときの割れの長さは約 100 mm 程度であった。

つぎに、3 電極片面自動溶接機を用い、溶接条件は一定にして、電極間距離 l_{12} 、 l_{23} を制御して実験を行なった。その結果は Fig.4 および Fig.5 に示してある。Fig.

Table 4 試験片終端部の拘束状況

type of test	restraint condition in plate end
A-series
B-series
C-series (no tack weld)

Fig.8 外的拘束を加えた場合の割れ防止実験

採用されている仮付け状態のものである。

B-series は、終端タブ板には拘束ビードをおかずに、変形量を制御するために油圧ジャッキにより各種荷重でタブ板を拘束する。試験片開先内の仮付け溶接は A-series と同様である。

C-series は、試験片終端部より 500 mm の位置に 50 mm 長さの仮付け溶接をし、それより終端側ではタブ板を含めて、開先上にはいっさい拘束ビードをおかず、終端タブ板を油圧ジャッキのみで負荷して、変形を拘束するものである。

なお、終端タブ板の試験片への溶接および他の開先内の仮付け溶接の要領は、前節と同様である。

Fig.8 は外的拘束を加えて割れ防止実験を行なっている状況を示している。

2.3.5 実験結果

A, B, C の 3 series と同溶接電極間隔 l_{12} , l_{23} を変化させて実験を行なった。B, C series については終端タブ板を拘束する油圧ジャッキの荷重を数種変えて実験を行なっている。実験結果を Fig.9 に示す。

(1) A-series 実験結果

外的に割れ防止の対策を行なわなくても、溶接長が 2,000 mm の場合には、電極間距離 l_{12} , l_{23} を操作するだけで、すなわち、樹枝状晶の成長方向を変えるなど施工法的にビード形状を変えて、高温での溶接金属の延性を改善することによって割れを防止できる範囲が存在したが、本実験のように溶接長が 6,000 mm と長くなるとほとんど割れが発生した。これは、溶接長が長くなったため溶接熱源によって生じる引き裂き力が増大し^{8,9)}、単に施工法的にビード形状を改良しただけでは割れは防止できなかったものと考えられる。このとき開先間の開き量は溶接熱源の進

(a) A-series の場合 (b) B-series の場合 (c) C-series の場合

Fig.9 割れ防止実験結果

行にしたがって徐々に増加し、終端部通過時で約 1.0 mm の変形量があった。

(2) B-series 実験結果

A-series の実験結果から、施工法的にビード形状を改良する方法のみでは溶接長が長い場合には、割れは防止できないことが判った。ここでは、Table 4 に示すように、外的拘束を終端部タブ板に加え、電極間隔を種々

に調整して実験を行なっている。結果は Fig.9(b) に示すように、電極間隔 l_{12} が 50 mm 以下、 l_{23} が 100 mm 以下の領域でほとんど完全に割れが防止できた。この領域は 2,000 mm 長さの試験片で得られた割れ防止領域よりもむしろ狭くなっている。この場合、終端部の拘束は完全に rigid でなく、開先間の変形量自体は、A-series のそれと同じ程度もしくは大きい位であった。しかし、変形速度は、A-series に比較してゆるやかであり、このため割れが発生しなかったものと考えられる。

(3) C-series 実験結果

C-series の実験結果は、Fig.9 (c) に示してある。これで見ると、B-series 実験結果に比べて大幅に割れ防止領域が増大している。開先間の変形量は B-series の場合とほとんど同じくらいである。しかし、変形速度は若干おそい。B-series と C-series との相異は、単に試験片端部に仮付け溶接を行なっているか、いないかの違いだけであり、溶接電極が仮付け溶接を溶融したことによる回転変形力（引き裂き力）の解放とこれに伴う急激な変形の発生が終端割れの主因とする説を裏付けるものである。

3 考 察

3.1 割れの様相

割れは Fig. 4 (a) に示すように、従来から報告されているようにビード中央の樹枝状晶が会合している部分に発生している。これをみると、第1電極のビードと第2電極のビードとの境界が明確にみとめられる。電極間距離を種々調整して、ビードの形状を改良すると、Fig. 4 (b) に示すように、第1、第2および第3電極によるビードの境界があまり明確でなく、これは先行ビードが半溶融の状態に後続ビードがおかれたもので、先行ビードに割れが発生する以前、つまり溶接金属の変形抵抗が非常に大きな間に後続ビードがおかれたものである。

Fig.10 終端割れ発生位置

ち、A-series は試験片の端部から 200 mm 以内のものと約 800 mm の位置であり、B-series は約 300 mm と 1,000 mm の位置である。この割れが 2 群に発生する点については、終端の拘束状態と開先内の仮付け溶接の位置が関係しているようである。

なお、C-series の割れ発生位置は約 1,000 mm の位置の 1 群であり、しかも、この場合条件が悪いときのみが発生している。

3.3 変形量、変形速度と割れ発生の関係

Fig.11 は、終端部近傍の変形量の測定結果の代表例を A, B, C, 各 series 別に示したものである。これをみる

3.2 割れ発生位置

Fig.10 は A, B, C, 各 series 別に割れ発生位置を示したものである。各欄の下部に試験片終端からの距離および仮付け溶接の位置を示してある。図中の数値は割れの長さを示している。A-series および B-series については、割れの発生位置は大まかに 2 群に分けられるが、B-series は A-series に比べていくぶん試験片端部より中央に入った位置に割れが発生している。すなわ

Fig.11 開先間の開き量変化

と、わずかのバラツキはあるが、試験片端部通過時の変形量は A, B, C-series の順に大きくなる傾向にある。これは、B, C-series において、端部を 4~10 ton 程度と比較的小さな荷重で拘束したため、A-series の場合よりも拘束の程度が小さかったためである。終端部での拘束がもっとも強いと考えられる A-series の実験に割れ発生の確率が高いのは、後述するごとく仮付け溶接を溶融解放したときに生ずる変形速度が大きいため、B, C-series においては油圧ジャッキがいわゆるダンパーの役目をしているためと考えられる。この仮付け溶接溶融時の開先間の開き量については、著者の 1 人が有限要素法を用いて数種の小型モデルについて熱弾性応力の計算を行なっている^{10,11)}。その結果によると定性的には本実験結果と同様であるが最大の変形量が 0.8 mm と低くでている。

いっぽう、変形量の急激な立ち上がりは、C-series がもっともはやく、溶接電極が試験片端部より約 1,000 mm の位置に到達した時点で始まる。B および A-series についてはそれぞれ溶接電極が試験片端部より約 700 mm および端部に達したときに始まる。この終端部の変形量の変化の位置的なずれは、終端部の仮付け状態および拘束状態によって影響され、割れ発生状況および割れ発生位置に大きな影響をおよぼす。

Fig. 12 終端割れにおよぼす変形量および変形速度の影響

著者ら⁵⁾が小型試験片を用いて求めた単電極溶接の溶接速度が 300 mm/min の場合の終端割れ発生の限界曲線である。この場合、試験片形状および溶接法が異なるにもかかわらず比較的限界曲線に近いのは興味深いことであり、割れを防止するにはこの限界曲線内に開先間の変形を抑えればよいわけである。

3.4 終端割れ防止方法

以上の実験結果を検討すると、終端割れは冶金学的因子と力学的因子が複雑にかみ合った高温割れであることがわかる。したがって、その防止法にしてもこの両面からの対策を考える必要がある。従来割れ防止に関する研究が種々行われてきたが、いまだ完全に保証される防止対策が見出されていないのは、冶金学的および力学的因子のいずれか一方のみの対策しか行われていなかったためであろう。

本実験においては、施工法の攻究として、ビード形状の改善および溶接金属の変形抵抗の増大を考慮して、多電極溶接法を用いその電極間隔を調整した。A-series 実験において、最良と考えられる溶接施工条件においても割れが発生していることは、この施工法の対策のみでは終端割れの問題は解決されず、むしろこれは割れを防止するための必要条件になっているものと考えられる。この施工法の対策に加えて、力学的対策として、終端部を単に拘束するだけでなくむしろ積極的に外的な拘束力を加えて溶接熱源による開先間の開き量を制御する方法を採用した。したがって、これは終端割れ防止のための十分条件であるといえる。

終端部での拘束状態、仮付け溶接要領およびその位置などにより、同一溶接施工条件であっても終端部近傍の変形過程が異なり、これが直接割れに影響するのでこの点についても留意する必要がある。

4 本防止方法の現場板継ぎ溶接への適用

4.1 適用ブロック寸法

以上の実験から求められた終端割れ防止方法の実際現場板継ぎにおいての有効性を確認するために、実物ブロックに適用実験を行なった。適用材料は Fig. 13 に示すように板厚 17~30.5 mm、溶接長 12.750~16.500 mm

Fig. 13. 適用ブロック寸法

の軟鋼および50キロ高張力鋼であり、2本および3本のシームを有している。Fig. 14 は、拘束治具を据付けたときの状況を示したものである。

4.2 実験方法

溶接材料は、前節の実験の場合 (Table 2) と同一である。試験片の仮付け要領は C-series とし、電極間隔は $l_{12}=40$ mm, $l_{23}=100$ mm の最良の条件で溶接を行なった。溶接条件および開先形状は、板厚が異なるため前節の実験とは多少異なっている。拘束荷重については、板厚によって 8~30 ton の範囲で変化させた。

終端割れの検出については、鋼板端部より 1,500mm の位置まで X 線および超音波探傷によって行なった。

4.3 実験結果および考察

Fig. 15 は実物ブロックの終端部近傍の開先間の開き量の変化と拘束荷重の変化の代表的なものを示している。この場合の適用ブロックの寸法は、板厚 30.5 mm, 板幅 2,780 mm, 溶接長 13,350 mm で 2 本シームを有するものである。開先間の開き量は溶接電極が適用ブロックの終端から約 2,500 mm の位置に達したときに変化し始め、同図に示すごとく徐々に増加する。したがって、本実験で採用した溶接施工条件では、溶接の前方 2,500 mm では引き裂き力はほとんど働いていないと言える。また、仮付け溶接を溶融した時点ではわずかながら変化がみられた。この開先間の開き量の変化については、実験室で行なった溶接長が 6,000 mm の場合とあまりかわりない。これは溶接長が 6,000 mm 程度になると、溶接熱源による引き裂き力はある程度飽和するものと考えられる。

いっぽう、拘束荷重については、初期の設定は 10 ton であったが、実際にロードセルで計測された値は 10.5 ton であった。荷重についても、開先間の開き量と同様に終端から 2,500 mm の位置附近から荷重が増加し始める。これは終端の拘束が定変位に近い拘束であるため、引き裂き力が增大するに伴って拘束荷重が大きくなるためである。

Table 5 は適用実験の結果を示したものである。同表には、比較のため本防止方法を適用しなかった実験結果も合わせて示してある。防止対策を施さなかったものは、シーム数にして 63% の割れ率を示している。割れ防止対策を行なったものは、明らかに終端割れと判定されるものは検出されなかった。なお欠陥が発生したもの

Fig. 14 現場板継ぎ溶接への適用状況

Fig. 15 実物ブロックの開先間の開き量の変化の代表例

が8シームあったが、これは断面マクロによるビード形状の観察により検討した結果、溶接施工上の管理が原因であることがわかった。その後、引続いてこの適用実験を行なっているが、現在のところ順調に割れは防止できているようである。

Table 5 適用実験結果

Restraint condition	No. of seams	No cracking	Cracking or other defects	Cracking percentage (%)
Restraint	235	221	8	3.4
No restraint	70	26	44	62.8

5 結 言

片面自動溶接における終端割れ防止に関して、施工法および力学的観点から、特に溶接金属が受ける変形速度および変形量の関係から基礎的な考察を行ない、実験により割れ防止のための基礎条件を設定し、現場の板継ぎ溶接施工時にこの方法を適用しその有効性について検討を行なった。その結果を総括すると次のようになる。

(1) 溶接長が比較的短い場合(約2,000 mm程度)には、多電極溶接法を用い、その電極間隔を制御して、施工法的にビード形状を改良し溶接金属の変形抵抗を大きくすることのみで割れは防止できる。

(2) 溶接長が6,000 mm位になると、施工法的方法のみでは終端割れは防止できず、終端部の仮付け要領およびその位置が割れの発生に微妙な影響を与える事実をつかんだ。そして、片面自動溶接の終端割れは、溶接金属が受ける変形量および変形速度が大きく影響していることを実物に近い実験においても確認した。

(3) 試験片終端部の拘束状態と仮付け位置を変えたA,B,C,3種類の実験を行なった結果、C-seriesの割れ防止領域がもっとも広く、外的に終端部を拘束する力学的方法との併用によって完全に割れは防止できる。

(4) 溶接長が6,000 mm位になれば、溶接熱源による開先間の開き量の変化は実際現場の板継ぎ溶接の場合とほとんど同じである。したがって、溶接長6,000 mmの試験片において確立された割れ防止方法はそのまま現場においても適用できる。そして、ここでは片面自動溶接における終端割れを完全に防止できる方法を提案し、これが現場の板継ぎ溶接においても有効であることを確認した。

最後に、本研究を遂行するにあたり、有益なご助言、ご討論を賜った大阪大学溶接工学研究所木原教授、佐藤教授に対し厚くお礼を申し上げます。また、本実験を実施するに当って、ご理解とご援助をいただいた川崎重工業(株)坂出工場金谷課長および溶接研究室の各位に対し厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 奥田：片面自動溶接継手の残留応力と終端割れの発生および防止法，溶接学会講概集，Vol.2, 1, (1968).
- 2) 安藤，仲田：片面自動溶接における終端割れの発生機構とその割れ防止対策，溶接学会第2回シンポジウム，(1969).
- 3) 山路，大槻：片面自動溶接における端部割れの実験的考察，溶接学会講概集，Vol. 4, 21, (1969).
- 4) 前田，矢田，神近，中村：片面溶接の終端部割れ防止に関する研究(第一報)，日本造船学会論文集第129号，(1971).
- 5) 寺井，豊岡，山田，松村：片面自動溶接の終端割れに関する一考察，溶接学会誌，Vol. 40, No. 12(1971)およびK. Terai, T. Toyooka, S. Yamada, R. Suzawa and H. Matsumura: "END CRACKING AND ITS PREVENTION IN ONE SIDE AUTOMATIC WELDING PROCESS", THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, (1971).
- 6) 土屋，大西：片面自動溶接の終端割れに関する研究(1)一割れ長さに対する一考察一，日本造船学会溶接研究委員会第2分科会資料，W2-73-69 (1969).
- 7) 前田：ユニオンメルト溶接時に発生する熱応力について，造船協会電気溶接研究委員会第7分科会資料，7-7-65 (1965).
- 8) 佐藤：移動熱源によって熱源の前方に生じる引きさき力と片面自動溶接の端部割れの問題への応用，日本造船学会溶接研究委員会第2分科会資料，(1969).
- 9) 佐藤，岩崎：移動熱源による弾性熱応力，日本造船学会溶接研究委員会第2分科会資料，(1970).
- 10) 藤田，武子，野本：溶接拘束応力に関する研究一その1一溶接終端割れについて，溶接学会講概集，Vol. 7, 314, (1970).
- 11) 藤田，武子，野本：溶接拘束応力に関する研究一その2一終端割れについて，溶接学会講概集，Vol. 11, 439, (1972).