(昭和 49 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

片面自動溶接法における終端割れ 防止に関する研究 (第3報)

正員 藤 田 譲* 正員 寺 井 清**
正員 松 井 繁 朋** 正員 松 村 裕 之**
正員 野 本 敏 治* 正員 大 塚 守 三*

Studies on Prevention of End Cracking in One Side
Automatic Welding (3rd Report)

by Yuzuru Fujita, *Member* Kiyoshi Terai, *Member*
Shigetomo Matsui, *Member* Hiroyuki Matsumura, *Member*
Toshiharu Nomoto, *Member* Morizo Ohtsuka, *Member*

Summary

One sided automatic welding technique has broadly been prevailed in our shipyards. This technique not only enables omission of turning from side to side but also improves production processes of ship structures. But it is observed that cracking occurs in the center of weld metal near the end of weld joints. So far, complete preventing methods which do not violate production processes seem not to be found.

In this paper a preventing method is proposed. In the process of one sided automatic welding, restraint force (10~30 ton) should be loaded on the two devided tab plate and furthermore the tack weld near the end of weld joints should be removed (extend over 2 m). Experimentally it is confirmed that the end cracking has not appeared and it seems to be very useful preventing method.

In order to analyse this preventing method, authors have proposed calculation technique which differs from the ordinary welding thermal stress analysis such that the conditions of calculation are simulated to be more realistic welding procedures. And special attention is paid to that yield phenomenon of tack weld and strength of electro magnets which sustain welded plates are considered.

1 緒 言

第1報¹⁾では溶接施行法の改良によって割れ防止策を検討した。その結果溶接長が2m程度の比較的短い場合には多電極法を用い、その電極間隔を制御すると施行法的にビード形状を改良することができ、終端割れが生じない程度に溶接金属の変形抵抗を大きくすることができた。しかし現場の板継ぎ溶接長に匹敵する6m程度の溶接長になると、施行法の改良のみによっては、終端割れを防止できないことがわかった。

そこで第2報²⁾では施行法の改良を加えた上に、さらに力学的観点に立って割れ防止策を検討した。終端部仮付けに生ずる引裂力を軽減するために油圧ジャッキを用いて、終端のタブ板に10~30 tonの拘束外力を負荷したが、10~30 tonの拘束外力では終端割れを防止することができなかった。

本論文では、第2報で述べた拘束外力を負荷する方法を用いて終端割れを防止しようとした。拘束外力は第2報と同様10~30 tonを負荷した。さらに試験片は終端部付近の仮付けを除いたもの(終端部2mは仮付けなし)

* 東京大学工学部

** 川崎重工(株)技術研究所

を使用し、終端部の開き量は負荷外力によって拘束した。その結果、終端部2m だけ仮付けのない試験片には終端割れが発生しないことが実験的に確認された。

この現象をシミュレートするために、前報において提案した板継溶接の過渡的な解析法を改良した。

2 大型実験

2.1 実験

本実験では終端部近傍に仮付けを設けない試験片を用い、終端部の開き量は拘束外力によって支えるものとした。Table 1 には実験に用いた試験片のシリーズを示した。試験片の仮付け溶接は 500 mm 間隔に 50 mm の溶接を低水素系溶接棒 (4 mm ϕ) にて 1 層溶接した。

その他供試材料、溶接材料および実験条件などはすべて第2報で述べたものと同一である。ただし試験片を拘束する電磁石は、計22個であり、実験中試験片裏側から試験片を拘束している。この電磁石の直径は、250 mm であり、磁石の位置は Fig.11 に示してある。

Fig.1 終端割れ発生位置 10Y シリーズ
(×印は仮付けに割れが発生した位置)

Table 1 試験片名および割れ発生率

試験片名	終端から最終仮付けまでの距離	試験片数	割れ発生試験片数	割れ発生率
0Y	0 mm	6	5	0.89
5Y	500	2	0	0.00
10Y	1000	6	4	0.67
15Y	1500	2	0	0.00
20Y	2000	6	0	0.00

2.2 実験結果

実験では、タブ板を拘束する外力を 10, 20, 30 ton と変化させて終端割れの発生の有無および終端部変位量を計測した。

終端割れは、0Y および 10Y シリーズのみに発生しその発生位置は Fig.1 に示すとおりである(0Y の試験片については第2報に示してある)。10Y の試験片では6個のうち4個に割れが発生した。20Y の試験片では割れは発生していない (Table 1)。Table 1 によると、終端部付近約2m にわたって仮付けを設けない試験片に 10~30 ton 程度の拘束外力を負荷すると終端割れ防止に効果があることがわかった。なお、Fig.2 には溶接中の変位の変化の一例を示す。Fig.2 (20Y の試験片) では、アークが最終仮付けの位置にくるまでA点の変位は、ほとんど零であり、最終仮付け溶融後変位が増加している。この傾向は他の5個の試験片について共通にいえる。

3 解析方法

溶接はアークによる溶融、凝固、加熱、冷却の過程であり、開先は溶接によって順次結合されていく現象である。この過程をできるだけ忠実に追跡するために前報においては、境界条件が逐次変化する弾性熱応力解析法について報告した。

溶接による熱変形の問題を解析するには、当然のことながら弾塑性熱応力問題として取扱わなければならない。しかし現場の継手溶接のような大きな試験片の解析には、現在の弾塑性熱応力解析法では計算時間がかかりすぎるという点で適当であるとはいえない。

そこで本論文では、溶接の非線型性を

Fig.2 各点の変位量 (実験値) 20Y (10 ton)

考慮するため主として次の2点に注目し計算を行なった。

- (i) 溶接継手にある仮付けの降伏現象のモデル化。
- (ii) 試験片を裏側から拘束している電磁石をスプリングとしてモデル化し、磁石の最大静止摩擦力について考慮した。

本報告における主な改良点について以下に説明する。

3.1 温度分布について

片面自動溶接における終端割れは板の端部の効果が大きく影響を及ぼすことは異論がない。そのため前報告では、温度分布および熱応力解析とも有限要素法を用い、非定常熱応力問題を解析した。ところが、終端部に割れが発生するまでの熱応力、熱変形には温度分布の有限幅の影響は少ないことが実験によって確かめられている³⁾。そこで本報告では無限平板上を線熱源が一定速度 v で移動する場合の理論解⁴⁾を用いた。

実験は3電極溶接で行なったので電極間隔を実際の溶接条件と一致させるように、 $l_{12}=40\text{ mm}$ (第1, 第2電極間隔), $l_{23}=100\text{ mm}$ (第2, 第3電極間隔), 熱効率 $\eta=0.6$ とした。材料は 900°C で溶融するものと仮定した。本実験における3電極溶接の場合の溶融池長さは、ほぼ 500 mm , 片幅 20 mm となっている。

3.2 仮付けの降伏現象のモデル化

一般に溶接中、アーク前方の仮付けには引張力が作用し、仮付けは伸びる傾向にある。この引張力は大きく、仮付けの引張強さ以上になり、アーク通過前にアーク前方の仮付けが破断する場合さえある。このことはFig.1の×印で示したとおりである。破断に達するような大きな引張力が仮付けに作用すると仮付けは当然降伏現象を起すものと思われる。そこでFig.3に示すように、仮付けの荷重-変位関係を実測した。仮付けの引張強さはほぼ 20 ton であり、降伏後急激に剛性が低下していることがわかる。第2報では仮付けの降伏現象を考慮していないために、仮付けに作用する力は最高 70 ton までに達している(第2報, Fig.15)。

本論文では、仮付けの降伏を次のようにモデル化した。仮付けは弾性状態では $E=E_0$ なるヤング率をもち、仮付けに作用する引張力が限界引張力 P_t を超えると、すなわち塑性状態に入ると $E=\alpha E_0$ とする。

この考え方では、降伏に達しても仮付けの応力は降伏曲面上に載っているという保証はなく、現在行なわれているいわゆる弾塑性解析ではないが、仮付けの降伏現象の1つのモデル化であると考えられる。数値計算例では $E_0=21,000\text{ kg/mm}^2$, $\alpha=0.0015$, $P_t=20\text{ ton}$ とした。

3.3 磁石の効果の導入

実験のところで述べたように、試験片は裏側から合計22個(直径 250 mm)の磁石によって拘束されている。磁石は試験片を固定させるため鋼板をひきつけているが、同時に摩擦力によって面内方向の変位も拘束する。

Fig.3 仮付け強さの実験およびそのモデル化

Fig.4 電磁石の摩擦力の実験およびそのモデル化

ことになる。特に 20 Y の試験片は終端部 2m にわたって仮付けが設けられていないため、終端部における鋼板の剛性は小さく、磁石の摩擦力による拘束は大きいものと考えられる。そこで磁石がどのような働きをするかを知るために Fig. 4 に示す実験を行なった。磁石は剛塑性体としての挙動を示し、限界耐力 P_s 以上の力を受けもつことができない。

磁石の効果を解析に導入するにあたって、磁石をバネに置換した（バネ定数 k ）。さらにこのバネは限界耐力 P_s 以下では有効であるが、限界耐力 P_s を超える力に対しては抗力を受けもつことができないものと仮定した。すなわちバネに P_s の力が作用すると、その後の増分過程（計算は増分法によっている）においては、バネは取り払われているものと考えた。

数値計算に当ってはバネ定数 $k=50 \text{ ton/mm}$ 、バネの限界耐力 $P_s=10 \text{ ton}$ とした。なお、計算を簡単にするためバネは溶接線と直角方向にのみ作用しているものとした。

4 解析手順

解析法は前報と同様変位法を用いた弾性熱応力解析用のプログラムを溶接アークの進行に伴う増分法を用いて解析した。

本計算の主要な点を列挙すると以下ようになる。

- (i) 溶接の溶融・凝固の過程を境界条件の変化として解析に導入した。
- (ii) 仮付けに作用する力が、仮付けの限界強さ P_t を超える場合は、 P_t を超える力について仮付けの剛性を 3.2 により低下させる。
- (iii) 電磁石（本計算ではバネ）に作用する力が、磁石の最大静止摩擦力 P_s を超える場合、 P_s を超える力についてはバネは効果がなくなるものとする。

5 大型試験片の解析結果

これまで述べた解析方法により大型試験片 0 Y, 10 Y, 20 Y についての数値計算例を以下に示す。タブ板に負荷する拘束外力はほぼ 10 ton をかけたが、実験値をできるだけ忠実に追跡するため、試験片によってわずかながら変化させた。

5.1 0 Y 型試験片

終端まで仮付けのある 0 Y 型試験片の A ~ D の各点の変位量を Fig. 5 に示す。終端部 A 点はアークが 4.5m の位置にくるまで変化しない。アーク位置が、5m, 5.5m, 6m のところで、変位の急激な増加が見られるのはアークがそれぞれの位置にある仮付けを溶融することによるためである。この急激な変位量は、6m の位置における A 点の場合が一番大きく、4m の位置における D 点の場合は余り大きくない。後者の場合は、仮付けが解放されてもアーク前方には他の仮付けが存在し、試験片としての剛性が大きいため、変位増加量が小さくなっているものと思われる。この図から、各点の変位はアークが、1.5~2m の距離にくるまで変位の変化を受けることが少ないということがわかる。このことは実験的にもほぼ確かめられている。

Fig. 6 は、仮付けに生じている力をアーク位置と共にプロットしたものである。(a)の左図は $t=75$ 秒（アーク位置：始端部より 0.5m）において仮付けに生じている力であり、(a)の右図は、仮付け T_{12} が溶融し、仮付け T_{12} に作用していた力を解放した場合、他の仮付け $T_1 \sim T_{11}$ に生じている力である。

アークが 1m 進むまでは ((a), (b) の左図より) アーク直前の仮付けには圧縮力が作用している。アークが 1.5m の位置になるとアーク直前の圧縮力は非常に小さくなり (3 ton 程度) 2m よりアークが進むとアーク

Fig. 5 各点の変位量（計算値） 0 Y (10 ton)

Fig. 6 仮付けに生じる力 0 Y (10 ton)

前方の仮付けには正の力(引張力)が生じている。 T_1 に働いている圧縮力は負荷外力(10 ton)によって生じているものである。どの仮付けにも最高 20 ton~30 ton 程度の力が作用しているだけで前報で示したように 70 ton にも及ぶ大きな引張力は生じていない。これは仮付けの降伏現象を考慮したためにできた結果である。

Fig. 7 アーク直前の仮付けに生じる力

Fig. 7 はアークのすぐ前である仮付けに生じる力を表わしている。アークの温度上昇の影響を直接受けない $A' \sim K'$ についてみるとアークが 2m 程度進むとアーク前方の仮付けに生じる力は 20 ton であり、ほぼ定常状態に入る。終端部の影響はアークが終端部から 1.5m 程度の位置にくるまであらわれていないことがわかる。

5.2 20 Y 型試験片

実験で終端割れを防止することができた 20 Y 型

試験片に関する計算例を示す。各点の変位量を Fig. 8 に示す。終端部 A 点の変位に着目しよう。アークが 3m の位置にまでくると、アーク前方には仮付けが 2 つ (T_6 , T_8) あるだけであり A 点は少しずつ開きだす。さらにアークが進み 4m の位置になると変位量も大きくなるが、その量は極くわずかである。その後仮付けが溶融されると、A 点の変位は大きくなり溶接終了時(6m の位置)の変位は、ほぼ 2.4 mm である。なおアーク位置が 4m のとき A 点の変位が 0.2 mm 程度に小さな値をとっているのはパネに置換した電磁石の効果で

Fig. 8 各点の変位量(計算値) 20 Y (10 ton)

あることをここに記しておく。

6 考 察

0Y, 10Y, 20Y 型の大型試験片について終端割れ発生の有無, および開先の開き量を測定し, 実験値を説明するために継手の溶接モデルを解析した。ここでは, 主として数値計算結果から見た考察を行ないたい。

Fig.9-1 0Y 型試験片の終端における変位量の比較

Fig.9-2 20Y 型試験片の終端における変位量の比較

融池直後の移動点とは5.5mの位置になる。

0Y の試験片では溶接が2mも進むとほぼ定常状態に達するが, 4m 以後になると終端部に近づくため端部の影響を受け仮付けが溶かされた場合の変位増加が大きくなる。10Yについてもほぼ同様のことがいえる。ところが, 20Y の試験片では4mの位置にある最終仮付けが溶かされた場合でも溶融池直後の点の変位増分は, 0Y, 10Y のほぼ半分である。このことは, 20Y の試験片では終端割れが発生しにくいことを意味しているものと思われる (Fig.10)。

それでは何故 20Y では, 0Y, 10Y の場合より変位増分が半分も小さくなっているのだろうか。まず第1に考えられるのは, 20Y の最終仮付けが解放されるとき受けもっていた力は約25 tonであり, 0Y では約35 tonとなっている。この解放する力の大小が変位増分に差をもたらすものと考えられる。そのほかに磁石の効果も考慮されなければならない。

6.3 電磁石の効果について

まず, 磁石 (パネ) の降伏現象について見ることにしよう (Fig.11)。 $S_1 \sim S_{11}$ は磁石であり, ○印の中の数字はパネが降伏したときのアークの位置を表わしている。数字の右下の一および+は, 仮付けの溶融前および溶

6.1 終端部変位について

0Y, 20Y 型試験片の終端部変位について, 実験値と計算値との比較を Fig.9 に示す。

0Y 型では6mの位置で約1.6倍だけ計算値の方が大きくなっている。一方 20Y 型では非常によい一致を示していることがわかる。したがって以後は計算結果に基づいて考察をすすめる。

なお 20Y 型では拘束外力も実験値に合うよう計算を行なっている (Fig.9.2)。

6.2 割れ発生について

終端割れの発生の原因について著者らは次のように考えている。

一般に溶接中には, アーク前方の仮付けには引張力が働いているが, アークは仮付けを溶かしながら前進するため, 仮付けが溶かされるごとに仮付けに作用していた力は再配分される。アークが進み最終仮付けを溶融すると, それまで最終仮付けに働いていた引張力はすべてアーク後方の溶着金属が受けもたなければならない。その力の大きさと溶着金属の変形能との関係が割れ発生の有無を支配する。

そこで, 溶接中仮付けが溶かされるごとに生じる溶融池直後の移動点の溶接線と直角方向の変位増分をプロットしてみた (Fig.10)。

0Y の試験片では最終仮付けが6mの位置にあるから, 最終仮付けが溶融した場合, 溶

Fig. 10 仮付けの溶融による溶融池直後の移動点の変位増分

融後を意味している。例えば、0Y の試験片の S_7 のパネはアーク先端が 4m の位置にきたとき降伏し、 S_8 のパネは T_5 の仮付けに働く力を解放したときに降伏したものと読むことができる。

0Y の試験片では、アークが 5m の位置に達すると S_{10} を除いてすべて降伏している。また、10Y の試験片でもアークが 4.5m のところにあるうちにパネは降伏している。ところが、20Y の試験片ではアークが最後の仮付けの位置に達した後、仮付けに作用していた力を再配分する際にも未だパネとしての剛性は残り、6.2 で述べた 25 ton のうちのいくらかはパネによって吸収されたものと考えることができる。これも 20Y では割れが発生しにくい理由の 1 つとなり得る。

Fig. 11 パネとしての効果が消滅するアーク位置

7 結 論

終端割れを防止する方法の 1 つとして、2 つ割れタブ板に拘束外力を負荷する方法を提案し、実験的に終端割れが防止できることを確かめた。以下に結論を述べる。

1) 第 2 報で報告したように溶接長 6m の大型試験片では 10~30 ton の拘束外力を 2 つ割れタブ板に負荷しても終端割れを防止することはできなかった。ところが終端部 2m にわたって仮付けを設けない 20Y の試験片では 10~30 ton の拘束外力によって終端割れを防止することができた。

2) 板継溶接の仮付けには、始端部では圧縮力が作用するが、一般には引張力が働き、本実験の場合 (仮付け長さ 50 mm の一層溶接) 仮付けの引張強さは約 20 ton である。仮付けの引張力が 20 ton を超えると仮付けは降伏し、剛性は急激に低下し、弾性状態におけるヤング率のほぼ 0.0015 倍にまで減少する。

3) 試験片を裏側から拘束している電磁石の強度を実測したところ、磁石は剛塑性体としての挙動を示し、最大静止摩擦力は磁石の直径が 250 mm の場合 (鋼の板厚 24 mm)、約 1.3 ton であった。この磁石の摩擦力は、試験片の面内剛性の弱いところ (例えば 20Y の終端部) は、変形に対する大きな拘束力となり得るものと思われる。

4) 2) および 3) を解析に導入したところ、0Y および 10Y の最終仮付けの反力が解放されたときの溶融池直後の点の溶接線と直角方向の変位はほぼ同一の値を示すが、20Y の場合は約半分の値となっており、20Y では終端割れが発生しにくいという実験結果を説明することができた。ただし本計算では、磁石の最大静止摩擦力を 10 ton であるとしている。この点は今後に残している。

参 考 文 献

- 1) 藤田 譲, 寺井 清, 山田桑太郎, 須沢良一, 松村裕之: 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), 造船学会論文集第 133 号 (1973) pp. 267~275.
- 2) 藤田 譲, 寺井 清, 松村裕之, 野本敏治: 片面自動溶接における終端割れ防止に関する研究 (第 2 報), 造船学会論文集第 135 号 (1974) pp. 379~391.
- 3) 山路昌一, 大規 悟: 片面自動溶接における端部割れの実験的考察, 溶接学会講義集 Vol. 14 (1969).
- 4) 渡辺正紀, 佐藤邦彦: 溶接力学とその応用, 朝倉書店.