残留応力制御型TMCP鋼板の有効性検証

－ (第3報) FCB板継溶接時の幅収縮に及ぼすTMCP鋼板の残留応力の影響－

正員	谷	徳孝*	小林克壮*
	大江憲一**	正員	宮崎建雄***
正員	中園博***	正員	宗像真一***
正員	野本敏治****	正員	武市祥司****

Effects of “Residual Stress Controlled TMCP Steel Plate” on Accuracy of Ship Blocks

－ (3rd Report) Influence of Residual Stress of TMCP Steel Plate on Precision of FCB Welding －

by Tokutaka Tani, *Member* Yoshitake Kobayashi
 Ken-ichi Ohe Tatsuo Miyazaki, *Member*
 Hiroshi Nakazono, *Member* Shinichi Munakata, *Member*
 Toshiharu Nomoto, *Member* Shoji Takechi, *Member*

Summary

A new TMCP steel plate, called as “Residual stress controlled TMCP steel plate”, was developed for use in fabricating the cargo tank and hull structure, which was expected to build accurately ship blocks and to increase productivity through mechanization/automation effectively. In the previous reports, the effects of residual stress of TMCP steel plate were discussed in slit-slot cutting, in stiffener welding and in inserting transverse panel into skin panel.

In this report, using thermal-elastic-plastic FEM and experiments in fabricating non-curved blocks, the effectiveness of residual stress of TMCP steel plate is quantitatively discussed in FCB butt-welding. The results of this paper are as follows.

- (1) Residual stress of TMCP steel plate has great influence on the transverse shrinkage in the weld end part rather than that in the weld start and in the longitudinal middle.
- (2) Residual stress of TMCP steel plate affects especially the rotational distortion of the weld end part.
- (3) In the FCB butt-welding of VLCC skin plates made of “Residual stress controlled TMCP steel plate”, the deviation of transverse shrinkage is smaller than that made of conventional TMCP steel plate.
- (4) It is expected that the productivity and working accuracy in fabricating ship blocks can be increased by using residual stress controlled TMCP steel plate.

1. 緒言

近年、造船各社ではコストダウンや生産性向上を目的として、溶接作業や切断作業を機械化・自動化している。

例えば大型鋼板の板継溶接においては、四電極片面 FCB 溶接を用いて、高能率な施工を行っている。

機械化や自動化を進めるに際しては、高精度に部材を組み立てることが必要不可欠であり、切断・溶接等の工程において、工作精度の高度化が要求されている。工作精度を向上させるには、施工上の変形や誤差といった製作誤差を極力少なくするか、製作誤差のばらつきを抑えた上で製作に伴う誤差を予め精度良く予測しておき、適切な対策を講じておくことが必要である。実際の切断や

* (株)神戸製鋼所
 ** コベルコ科研 (研究当時 (株)神戸製鋼所)
 *** 九州日立造船(株)
 **** 東京大学 大学院工学系研究科

原稿受理 平成 14 年 1 月 10 日

春季講演会において講演 平成 14 年 5 月 15, 16 日

溶接等の熱加工においては、入熱に伴う変形や誤差を零にすることは困難であるので、高精度に部材を組み立てるためには、熱加工時の変形量を予測し、延べ尺や伸ばしといった手段により補正することが必要となる。特にFCB溶接による大型鋼板の片面板継溶接においては、入熱量が大きく溶接入熱に起因する変形の絶対値が大きいため、高精度な寸法精度の達成には製作誤差のばらつきを抑えた上で適正な補正が重要である。

しかし、実際の建造工程においては、板継溶接時の変形量は、部材ごとにばらつきがあり、さらに必ずしも適正な補正ができていないことが多いため、多くの造船所において、板継溶接後に仕上切断や再マーキング等の追加工程による補正を余儀なくされているものと考えられる¹⁾。

板継溶接時の変形量のばらつきは、溶接条件のばらつきや開先形状の不良に加えて、鋼板が有する初期残留応力状態によって影響を受けることが考えられるため、板継溶接時の変形に及ぼす圧延残留応力の影響を明確にする必要がある。板継溶接時の変形に及ぼす検討例としては、開先形状やギャップ等の初期不整に対する検討例はあるものの^{1)~3)}、圧延残留応力の影響を検討した研究はほとんど見受けられない。

著者らは既報において、熱弾塑性FEM解析および実験、実船への適用により、船体平行ブロック組立の小組立および中組立における工作精度や生産性に及ぼす圧延残留応力の影響を明確にした⁴⁾⁵⁾。しかし、これまでの検討では、板継溶接への影響を検討しておらず、部材の高精度化の観点からは、圧延残留応力の影響を検討することは重要であるものと考えられる。

本報では、船体平行ブロックの中組立工程におけるスキンプレーットの板継溶接を対象に、熱弾塑性FEM解析を用いて、板継溶接時の面内変形、特に幅収縮におよぼす圧延残留応力の影響を検討した。また、船体平行ブロックのスキンプレーットに残留応力制御型TMCP鋼板を適用することにより、本鋼板の工作精度の向上効果を検証した。

2. FCB板継溶接における変形解析

2.1 解析方法

スキンプレーットの板継溶接工程を対象として、汎用コードABAQUS-STANDARDを用いた熱弾塑性FEM解析を行った。スキンプレーットの板継溶接は四電極片面FCB溶接を用いて溶接する場合を対象とした。解析においては、移動熱源を用いて、溶接速度に応じて所定の熱量を順次付与した。材料定数および機械的性質はほぼ既報と同じ値を用いたが⁴⁾、高温での降伏曲面の変化を考

え、加工硬化係数は零とした。

解析は継手形状や部材の対称性を考慮し、溶接線中央を軸とする軸対称の1/2モデルとした。座標系は、溶接方向をx軸、板幅方向をy軸とした。溶接時の変形は面内変形を対象とし、4節点の平面応力要素を用いた。実際のFCB溶接における開先形状はY開先であるが、本解析モデルは、2次元モデルであるためI開先で近似し、板厚中央のデガ幅を溶着金属の幅と仮定して、溶接中心線から6.5mmの範囲を溶着金属部の要素とした。

板継溶接前の仮付け溶接は、仮付け自体の変形や溶融の影響を考慮できるように、仮付け厚さや長さを考慮した弾塑性要素を用いた。仮付け溶接時の入熱に起因する残留応力の影響やギャップ等の初期不整の影響、FCB溶接前の開先切断の影響は無視した。なお、仮付け箇所を除いて未溶接時は剛性のないダミー要素として扱い、アーク通過後は各温度に対応した剛性を与えた。入熱量は、電極数分の合計の入熱量を算出し、電極間距離に相当する長さの領域に均一に熱を加えた。

2.2 FCB溶接時の熱効率

FCB溶接時の熱効率は、小型実験を実施して、溶接時の温度履歴を計測することにより算定した。小型実験は、16^tmm×250^wmm×1000^Lmmの鋼板をTable1の条件で片面FCB溶接を行った。その際、鋼板の長手方向中央において、溶接デガ端部から直角方向に5,10,20,50mm位置の板厚中央位置の温度をCA熱電対により計測した。

温度計測結果をFig.1に示す。この計測結果を基にFCB溶接時の熱効率を0.7として、解析を行った。

Table1 FCB welding conditions for small size test

電極	電流 A	電圧 V	速度 mm/min	電極間 距離 mm	開先 形状
1	900	35	500	35
2	850	45

Fig.1 Temperature measurement by thermocouple

3. 解析モデルの精度検証

本解析モデルの精度を検証するため、小型実験による結果と 2.1 節で提案したモデルによる解析結果を比較した。

3.1 小型実験方法

小型実験では、2.2 節の温度計測を行った試験片に対して、FCB 溶接時の幅収縮量を調べた。

試験片は、YP320MPa 級の TMCP 鋼板であり、仮付けは、溶接棒を用いた手溶接により溶接開始側と終了側は 3 層盛り、長手中央部は 1 層盛りの溶接を行った。溶接の始終端部に付けるタブ板は 100 mm 長さとし、タブ板による拘束の影響を小さくするため試験片とタブ板の溶接は点付け溶接とした。

小型実験は三対の試験片で繰り返し、それぞれについて長手方向に 250 mm ピッチで幅収縮量を計測した。幅収縮は、溶接線から 100 mm 位置にケガキ線を引き、長手方向各位置において、3 次元計測装置を用いて変化量を計測した。また、試験片の全幅の変化量についてもノギスを用いて計測した。

3.2 小型解析モデルの概要

小型実験の解析モデルを Fig.2 に示す。なお、既述したようにこの解析モデルは実際の試験体の対称性を考慮した溶接線を軸とする 1/2 モデルである。溶接部の要素の幅は 6.5 mm、溶接方向の長さは 10 mm であり、小型試験における電極間距離に合わせて、40 mm の長さに 5.84J/sec・mm³ の入熱量を 4.8 秒間付与した。仮付け条件は、Table 2 のように設定した。

Fig.2 FEM mesh division of plate for small size test

Table2 Tuck welding condition for small size test

Tuck Number	Tuck1	Tuck2	Tuck3
Longitudinal position	Start side	Longitudinal center	End side
Thickness mm	13	3	13
Length mm	10	50	10

3.3 入熱量の評価

本解析モデルによる非定常熱伝導解析結果と温度計測結果を比較した。各計測位置におけるピーク温度の比較を Fig.3 に示す。ピーク温度は解析値と実測値でほぼ

一致しており、FCB 溶接時の熱効率率は 0.7 として良いものと考えられる。

Fig.3 Comparison of peak temperature between calculated value and measurement

3.4 幅収縮量の評価

小型実験における FCB 溶接時の幅収縮量の比較を Fig.4 に示す。解析結果は 2 倍にして表記した。三次元計測装置を用いて計測した 100 mm 位置の変化量とノギスを用いて計測した全幅の変化量は、ほぼ同様の値であったため、全幅の変化量を用いて解析値と比較した。

小型実験における幅収縮量は、長手中央部においては約 2.0 mm であるが、溶接の始終端部においては 0.5 ~ +0.5 mm 程度であり、収縮量の絶対値が小さくなっている。小型実験における試験片サイズは、16[#] mm × 250^W mm × 1000^L mm であり、幅収縮は全長にわたって非定常な領域であるといえる。

幅収縮量の解析値と計測値の比較において、計測値に若干のばらつきがあるものの、解析値と計測値は比較的一致しており、本解析モデルを用いて、FCB 溶接時の幅収縮量を高精度に評価できるといえる。

Fig.4 Comparison of transverse shrinkage between calculated value and measurement in small size test of FCB welding

4. VLCC スキンプレートの FCB 溶接を対象とした解析

4.1 解析条件と対象鋼板の明細

実際の VLCC 平行ブロックの板継溶接を想定して、鋼板サイズ $18.5^t \text{ mm} \times 4000^w \text{ mm} \times 20000^L \text{ mm}$ のスキンプレートを一枚突き合わせ溶接する場合を解析対象とした。板継溶接は四電極 FCB 溶接による片面溶接であり、溶接条件は、Table3 の通りである。

解析においては、電極間距離に合わせて 200 mm 長さに $2.58 \text{ J/sec} \cdot \text{mm}^3$ の入熱量を 12.5 秒間付与した。また、仮付けは $3^t \text{ mm} \times 50^L \text{ mm}$ の弾塑性要素を 500 mm ピッチに配置した。溶接始末端部のタブ板の影響は無視した。

Table3 FCB welding conditions

電極	電流 A	電圧 V	速度 mm/min	電極間 距離mm	開先 形状
1	1500	35	950	200
2	1300	40			
3	950	45			
4	950	45			

解析モデルのメッシュ分割を Fig.5 に示す。最小の要素サイズは、デボ部近傍の $2^w \text{ mm} \times 50^L \text{ mm}$ である。三枚のスキンプレートを板継溶接する場合、対称性を考えると、鋼板の片側のみを板継溶接する場合 (Type I)、鋼板の両側を同時に溶接する場合 (Type II) の二種類に分類されるので、それぞれについてモデル化を行った。

Fig.5 FEM mesh division of plate

対象鋼板は YP320MPa 級 TMCP 鋼板であり、切断前の残留応力状態は、①残留応力を制御した鋼板 (Plate A)、

②幅端部に圧縮応力を有する鋼板 (Plate B)、③幅中央に圧縮応力を有する鋼板 (Plate C)、の三パターンとした。対象鋼板の明細および残留応力状態を Table4 および Fig.6 に示す。

以下では、残留応力状態が異なる三種類の鋼板について、FCB 板継溶接時の面内変形に及ぼす残留応力の影響について議論した。

Table4 List of cases for FCB welding simulation

No.	Plate size	Stress distribution
Plate A	$18.5^t \times 4000^w \times 20000^L$	Controlled
Plate B	$18.5^t \times 4000^w \times 20000^L$	Uncontrolled
Plate C	$18.5^t \times 4000^w \times 20000^L$	Uncontrolled

Fig.6 Residual stress distribution before welding

4.2 大型モデルにおける鋼板残留応力の影響

(1) FCB 溶接後の鋼板形状

鋼板の片側のみを FCB 板継溶接を行う場合 (Type I) を対象として、溶接後の鋼板形状を評価した。

Fig.7 Plate shapes after FCB butt-welding

FCB 溶接後の鋼板形状を Fig.7 に示す。溶接により長手方向および幅方向の収縮が発生している。いずれの鋼板においても溶接入熱に起因した変形が発生しているが、残留応力を有する鋼板 B,C は、溶接入熱による変形と残留応力に起因した変形が重畳した結果であり、鋼板 B と鋼板 C では変形状態が異なっている。

(2) FCB 溶接後の幅方向変化量

片側溶接(Type I)における鋼板外側の幅方向変位を Fig.8 に示す。残留応力を制御した鋼板 A の幅方向変化量は、溶接の開始側から 15000 mm 位置までは、ほぼ安定しているが、15000 mm 以降の溶接終了側において、絶対値が小さくなっている。これは溶接入熱に起因した回転変形によるものと考えられる。

Fig.8 Transverse displacement after FCB welding (Type I)

Fig.9 Transverse displacement after FCB welding (Type II)

一方、残留応力を有する鋼板 B,C においては、残留応力の分布パターンによって変形状態が異なっている。すなわち、残留応力を制御した鋼板 A の変化量に比べて、

幅端部に圧縮応力を有する鋼板 B は、長手方向中央の定常部において、0.1 mm 小さく、また終了側での変化量も小さいのに対し、幅中央に圧縮応力を有する鋼板 C では、定常部において 0.1 mm 大きく、終了側での変化量も大きくなっている。特に、鋼板 C においては、溶接終了側での回転変形により幅が広がっている。鋼板の残留応力状態により FCB 溶接後の変形状態が異なることがわかる。

両側溶接(Type II)における板幅中央位置の幅方向変位を Fig.9 に示す。片側溶接の場合と異なり、鋼板の両側を同時に溶接するため、溶接入熱は幅方向で対称な分布となり、入熱に起因した回転変形が発生していない。

また、今回対象とした従来鋼板 B,C は、幅方向で対称な残留応力状態を仮定しているため、両側溶接時には回転変形は発生しない。その結果、鋼板残留応力による変形への影響は僅かであり、幅収縮量にほとんど差が出ていない。実際の TMCP 鋼板の残留応力分布は、必ずしも幅方向で対称とは限らないため、両側を同時に溶接する場合でも、残留応力のバランスが崩れることにより変形が発生する場合があるが、片側のみを溶接する場合に比べて、影響は小さいものと考えられる。

(3) 鋼板残留応力に起因する変形発生原因

鋼板の残留応力により FCB 溶接時の変形状態に違いが生じた原因を調べるため、長手方向各位置における幅方向変位の履歴を調査した。溶接開始部、長手方向中央部、溶接終了部における幅方向変位の履歴を Fig.10 に示す。

溶接の開始部および中央部においては、溶接アークの通過とともに幅収縮が発生しているが、残留応力による変形の差はわずかである。一方、溶接終了部側においては、溶接アークが到達前から、開き側の変位が発生している。溶接終了部側の幅方向変位に対する残留応力の影響は大きく、残留応力により 1 mm 程度の変形量の差が発生している。この終端側における変形状態の違いが、溶接後の最終形状に影響しているものと考えられる。

次に、残留応力に起因する溶接終了側の変形状態が異なる理由として、終端部の仮付けに働く幅方向エネルギーの観点から、残留応力の影響を検討した。本来、仮付けに働く力で議論できればよいが³⁾⁶⁾、本解析においては、終端側の仮付けに働く力は降伏応力レベルを超えており、鋼板の残留応力状態による差が明確ではないため、幅方向のエネルギー、すなわち引き裂きエネルギーの観点から議論した。なお、 n 番目の仮付けに働くエネルギー $E_T(n)$ は以下のように定義した。

$$E_T(n) = 1/2E \times \sigma_{yy}^2 + \sigma_{yy} \times \varepsilon_{pyy} \cdots (1)$$

E : ヤング率, σ_{yy} : 幅方向応力, ε_{pyy} : 幅方向塑性歪

1) 溶接開始部

2) 長手方向中央部

3) 溶接終了部

Fig.10 History of transverse displacement

終端部の仮付けに働くエネルギーEの履歴を Fig.11 に示す。溶接が進行して、溶接開始から 1000 秒後、すなわちアークが 16000 mm位置を通過するタイミングから引き裂きエネルギーが発生しており、アーク到達直前にピークの値を示している。このピークの値を鋼板ごとに比較すると、残留応力状態により異なっており、幅端部に圧縮応力を有する鋼板 B はそのエネルギーが小さいのに対して、幅中央部に圧縮応力を有する鋼板 C は、大きなエネルギーとなっている。また、立ち上がりタイミングも残留応力状態により異なっている。

一般に FCB 溶接においては、溶接入熱に起因して終

端側の仮付けに引き裂き力が作用するが³⁾⁶⁾、そのエネルギーは鋼板 A のそれがほぼ相当するものと考えられるので、鋼板 A に対する鋼板 B,C のエネルギーの差は、鋼板残留応力に起因する引き裂きエネルギーと見なすことができる。以上の考察と Fig.11 の結果から残留応力に起因する引き裂きエネルギーは、FCB 溶接時の入熱と同程度のレベルであり、無視できないほど大きいと言える。

Fig.11 History of tearing energy of the last tuck weld

次に、この引き裂きエネルギーの違いを FCB 溶接後の残留応力分布の観点から調べた。長手方向中央における溶接線方向応力の幅方向分布を Fig.12 に示す。ここでは、溶接部近傍を拡大して表記した。

FCB 溶接後において、溶接部近傍の 100 mm 程度の領域は降伏応力相当の引張応力が分布している。初期応力状態の異なる鋼板 A～鋼板 C のいずれにおいても、溶接部近傍は類似の応力状態であり、FCB 溶接により応力状態が大きく変化することがわかる。初期に残留応力を有する鋼板 B,C は、板面内の応力分布の変化に起因するモーメントにより回転変形が発生し、引き裂きエネルギーに違いが出たものと考えられる。

Fig.12 Residual stress distribution after FCB welding

(4) 終端部のシーリングビード溶接の影響

実施工においては、特に終端割れ防止の観点から、終端側に予めシーリングビード溶接することがある。ここでは、終端側にシーリングビード溶接を行う場合について、溶接後の幅収縮に及ぼす残留応力の影響を検討した。シーリングビードは終端部に $10^t\text{mm} \times 250^L\text{mm}$ の仮付け要素を配置した。シーリングビード溶接を行う場合の片側溶接における鋼板外側の幅方向変位を Fig.13 に示す。

シーリングビード溶接を行うことによって、終端側の回転変形が少なくなっており、鋼板 A～鋼板 C のいずれにおいても、溶接の開始側から終了側にかけての幅収縮のばらつきが小さくなっている。中でも残留応力を制御した鋼板 A の溶接開始側から終了側にかけての幅収縮量が安定しており、FCB 溶接後に高精度な工作精度を達成するためには、残留応力を制御した鋼板にシーリングビード溶接を行うことが有効であることがわかる。

Fig.13 Transverse displacement in FCB welding with sealing bead

5. 実船への適用による工作精度向上効果の検証

5.1 適用部位および評価方法

VLCC 平行ブロックのスキンプレートに対して、残留応力を制御した残留応力制御型 TMCP 鋼板と従来の TMCP 鋼板をそれぞれ五つのブロックに適用して工作精度への影響を評価した。

工作精度の評価に際しては、タンクトップ部のスキンプレートの板継溶接(3 枚継ぎ溶接)を対象として、a～f の各トランス引き込み位置において幅収縮量を計測し、溶接開始側から終了側にかけての変形量のばらつきを評価した。対象鋼板の明細および計測位置をそれぞれ、Table 5、Fig.14 に示す。変形量の計測は、鋼製巻尺(張力 2kg/mm^2)を用いて、仮付け溶接後と FCB 溶接後において、各ロンジ位置のマーキング線間の距離(a～f にお

ける①～②、①～③・・・①～⑬距離)を計測することにより変化量を算出した。なお、FCB 板継溶接は、Table 3 の条件で行い、終端側の仮付けはシーリングビード溶接を実施した。

Table5 List of skin plate

Plate	Plate size	Number
Developed steel	$18.5^t \times 4000^W \times 20000^L$	15
Conventional steel	$18.5^t \times 4000^W \times 20000^L$	15

Fig.14 Measuring position of transverse shrinkage

5.2 適用結果

3 枚のスキンプレートを FCB 板継溶接した際の幅収縮量計測結果の一例を Fig.15 に示す。期待値を併記するが、これは、残留応力を制御した鋼板をシーリングビード溶接した場合を対象に解析を行った結果から算出した。

残留応力制御型 TMCP 鋼板は、終端側で幅収縮量が若干少なくなっているものの、溶接の開始から終了にかけての幅収縮量は、約 3.2 mm と安定している。それに対し、従来鋼板の幅収縮量は、溶接の開始側が 4.5 mm、溶接終了側が 2.0 mm であり、2.5 mm 変形量がばらついている。

Fig.15 Measuring result of transverse shrinkage of skin plate butt-welding

同一のブロックに対して、FCB 板継溶接によるロンジマーキング位置の幅方向変化量を計測した。No.1 ロンジマーキング位置を基準としたロンジマーキング位置の幅方向変化量を Fig.16 に示す。この図により、FCB 溶接時の幅収縮が、長手/幅方向のどの領域において発生するのかを概ね知ることができる。

すなわち、残留応力制御型 TMCP 鋼板および従来の TMCP 鋼板とも、FCB 溶接時の幅収縮は、ほぼ板継部近傍に集中しており、板継一ヶ所当たり約 1.6 mm 程度である。

溶接開始側 a から溶接終了側 f にかけての幅収縮量の長手方向分布に関して、残留応力制御型 TMCP 鋼板の変形量のばらつきは小さいのに対し、従来の TMCP 鋼板の変形のばらつきは大きい。

Fig.16 Transverse change of longi-marking line

残留応力制御型 TMCP 鋼板は、変形のばらつきが小さく、板継部に変形が集中していることから、FCB 板継溶接時の幅収縮に対しては、板継部に伸ばしを設定することにより高い工作精度を達成することができるものと考えられる。このことは、板継溶接後の修正マーキングや仕上切断を省略できる可能性があることを示唆している。

従来の TMCP 鋼板については、同様の伸ばしを設定

したとしても、溶接の開始側から終了側にかけての変形量のばらつきが大きく、約 2 mm 程度の誤差が生じる可能性があるものと考えられる。この誤差により、修正マーキング等を行わない場合、次工程以降において、例えば、ロンジ溶接後のトランス引き込みやブロック搭載時に工作精度の低下に起因するトラブルが発生する可能性があるものと考えられる。

溶接の開始側 a から終了側 f にかけての 6 ヶ所の幅収縮計測結果に対して、収縮量の最大値から最小値を引くことにより幅収縮量のばらつきを算出した。残留応力制御型 TMCP 鋼板および従来の TMCP 鋼板に対して、それぞれ五つのブロックの計測値から幅収縮量のばらつきを算出した結果を Fig.17 に示す。

残留応力制御型 TMCP 鋼板の変形量のばらつきは 1.0 mm 以下であり、いずれのブロックにおいても溶接全長にわたって幅収縮量が安定しているのに対し、従来の TMCP 鋼板のばらつきは 1.0 mm ~ 3.5 mm であり、ブロックによっては溶接開始側から終了側にかけての幅収縮量のばらつきが大きいことがわかる。

Fig.17 The deviation of transverse shrinkage

6. 結 言

板継溶接を対象として、熱弾塑性 FEM 解析を用いた検討および実船 VLCC 平行ブロックのスキムプレートに残留応力制御型 TMCP 鋼板を適用することにより、本鋼板の工作精度に対する有効性を検討した。

(1) FCB 溶接による大型鋼板の板継溶接時の変形に対する残留応力の影響として、長手方向中央部の定常部においては影響が小さいものの、溶接終了側においては 1 mm 程度の誤差を生じる。

(2) 鋼板残留応力は、溶接終了側の引き裂きエネルギーに作用することにより、溶接終了側の回転変形に影響を与える。

- (3)実船への適用結果として、従来鋼板では、溶接開始側から終了側にかけて 2.5 mm の幅収縮量のばらつきが発生する場合があるが、残留応力制御型 TMCP 鋼板では 1 mm 以下であり、幅収縮量が安定している。
- (4)残留応力制御型 TMCP 鋼板を用いることにより、工作精度が向上し、その結果、修正マーキング省略、仕上切断省略等の生産性向上効果が期待できる。

参考文献

- (1) 上田, 村川, 顧, 奥本, 神近: 高精度組立のための溶接変形シミュレーション 日本造船学会論文集 第 171 号(1992), pp.395~404
- (2) 上田, 村川, 奥本, 顧, 中村: 高精度組立のための溶接変形シミュレーション 日本造船学会論文集 第 172 号(1992), pp.559~566
- (3) 藤田, 寺井, 松村, 野本: 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) 日本造船学会論文集 第 135 号(1974), pp.379~391
- (4) 谷, 岡田, 大江, 宮崎: 残留応力制御型 TMCP 鋼板の有効性検証 日本造船学会論文集 第 189 号(2001), pp.299~307
- (5) 谷, 上田, 大江, 宮崎, 中島: 宮崎: 残留応力制御型 TMCP 鋼板の有効性検証 日本造船学会論文集 第 190 号(2001), pp.599~606
- (6) 辻, 吉村: 薄い軟鋼板の突き合せ溶接時の過渡応力と開先の変位挙動に関する研究(第 3 報) 日本造船学会論文集 第 151 号(1982), pp.278~284
- (7) 奥田, 田中: 片面サブマージアーク溶接で発生する終端割れの発生機構と防止方法の検討(第 1 報) 溶接学会誌 第 51 巻(1982)第 4 号, pp.343~348