連載講義

溶接変形の発生とその防止

Weld Distortion and
its Prevention

4. 造船工作における変形防止*

宮 田 隆 文**

Control of Distortion in the Ship Building*

by Takafumi Miyata

概 要

船殻構造は、複雑で大きくしかもその大半が溶接継手にて構成されているために、工作時に発生する溶接変形は多種多様で、その量も膨大なものとなる。そのために、どの造船所においても古くから溶接変形の防止には積極的に取り組み、多くの工夫がなされてきたものの、今もなおその対策に多大の時間を費しているのが現状である。本稿では6万重量トンの撤積船を例に、設計から進水までの各工程に沿って、変形の防止法別にできるだけ多くの対策事例を掲げるとともに、上部構造の歪取りについても簡単に触れてみた。

1. はじめに

造船業においても溶接変形は、古くから最も重要な課題の一つとして取り組まれてきたにも拘らず、未だ完全には克服できず、今もなお技術者達を悩ませ続けているのが現状である。さて、この対策を考えるにあたっては、その構造物が本来要求されている機能を満足させるように方策を講ずべき事は言うまでもないが、それと同時に製作工程や設備、能率、コストおよび安全等をも考慮して総合的に判断せねばならない。ここでは6万重量トンの撤積船を例にとって、造船業における変形対策の一端を紹介する。

2. 造船における溶接施工の特徴

溶接からみた造船工作の主な特徴を挙げると、まず、

(1)部材数が多く、構造が複雑であること、(2)構造が大きくブロック建造法が広く採用されていること、(3)使用される鋼材は中厚板(約 3.2 mm~約 50 mm)の軟鋼または50キロ級高張力鋼が大半で、船尾部に一部鋳鋼が用いられていること、(4)種々の溶接法が適用されていること、等がある。因みに日本鋼管鶴見製作所にて建造されている60,000重量トンの撤積船(船の長さ×巾×深さが214 m×32.2 m×17.7 m)では、部材数が約44,000個、標準ブロック長が13.5 mで搭載するブロック数は約170個、最大ブロック重量が約330 ton、鋼材の平均板厚は14 mm前後で、その溶接長は250~300 kmに達し、このうち突合せ溶接長は1割強である。

3. 変形対策の基本的な考え方

前述のごとく、船殻構造は非常に複雑でかつ大きいために、全ての溶接が完了した後に変形を修正することは非常に困難で、時には歪取りによって新たな変形が生じる場合さえある。よって、変形対策としては、まず第一

*原稿受付 昭和58年6月3日

**正 員 日本鋼管株鶴見製作所 Member, Nippon
Kokan K.K. Tsurumi Works

に変形を出さないことで、次に生じた変形は、できるだけその工程内で修正し次工程へは持ち込まないことである。それでも生じてしまった最終工程での変形は、適用規格や船級、オーナー等の諸要求を考慮して歪取りをすることである。そのためには、検査員の要求の程度を予め把握しておくことも重要なポイントの一つである。造船における精度標準としては、国内の一般商船に広く適用されている JSQS (日本鋼船工作法精度標準) を参考にされたい。

それでは溶接変形を防止するには、どのような方策を講じるべきか、その基本的な考え方について簡単に触れておく。溶接変形に影響を及ぼす要因は種々考えられるが、変形防止策の基本的な考え方としては、次のような事項が挙げられよう。

- (1) 変形に対して剛な構造とする。
- (2) 溶接継手をできるだけ少なくする。
- (3) 変形が小さくなるように溶接継手を配置する。
- (4) 変形の修正が容易な構造あるいは寸法とする。
- (5) 部材精度および取付精度を良くし、適正条件にて溶接施工ができるようにする。
- (6) 変形が生じにくい組立順序および溶接順序を選ぶ。
- (7) 変形が生じにくい溶接法 (特に入熱とパス数の少ない溶接法) を選ぶ。
- (8) 逆歪法や拘束治具などを用いる。
- (9) 変形データを収集し、設計に生かすと同時に常に現場から設計へのフィードバック等に心がける。
- (10) 作業者の技量向上を図るとともに変形に対する認識を深める。

上記項目のうち大きく分けて(1)が設計、(2)~(4)が工作図(5)以下が現場の施工部署が主として考慮すべき事項と言える。しかし、船殻工事においては、種々の変形が発生するため、これらの状況を正確に把握して事前に対策をたてておくためには、まず、設計部門と施工部門が互いに協力し合って常に情報交換を行うことが肝要である。以下に造船の各工程における具体的な事例を挙げて説明しよう。

4. 各種変形防止例

4.1 剛な構造による変形防止例

これは、溶接変形に対する剛性の大きい構造を採用することによって変形を防止する方法で、最も代表的なものが図1の変形防止用のカーリングである。また、上部構造では変形防止のために強度上必要な板厚以上に厚くすることもあるが、このような構造の変更には必ず設計部門での確認が必要である。例えば、上記の増厚や、後

図1 上部構造の変形防止用カーリング

に述べるカーキャリアの構造変更では、船殻重量や船の重心位置が重要な問題となる。その他に、特に構造を変えなくても、溶接順序や溶接継手の位置を工夫して、既に溶接された部材の剛性を利用する方法もある。

4.2 溶接継手の減少による変形防止例

溶接継手を少なくするには、できるだけ大きな素材を用いればよいが、これには設備や部材の歩留まり等の問題からおおのずと限界がある。例えば、板からリング状のフランジを切り出す時に、2つ割りあるいは3つ割りにすると溶接継手は増えるが、素材を有効に利用できる。逆に一体もので切り出せば、歩留まりは悪くなるが、変形が少なくなり、溶接工数も低減する。いずれを選ぶかは、コスト計算等の事前検討が必要である。また、よく用いられるのがプレスの利用で、図2は上部構造をコルゲートにしてスティフナの隅隅溶接をなくしてしまった例である。その他、鋳鋼の活用やろう付、接着剤の利用も考えられるが、コスト、強度または技術面での問題が残っており、今後の課題であろう。

図2 上部構造におけるコルゲートの採用

4.3 溶接継手の配置による防止例

変形防止の観点から溶接継手の位置を考える場合は、主に次の2点を考慮して選定する。

- (1) 変形が互いに打ち消し合うように配置する。
- (2) 剛性の大きい部材の近傍に配置する。

(1)は、溶接継手があまり偏らず均等に配置することで、特に、溶接線と中立軸の位置に注意する。もし2箇所以上継手がある時は中立軸に対して対称に配置する。1箇所の場合は、一般に中立軸に近い方がたわみが少なくなる。(2)の場合には、あまり部材に近づきすぎると、溶接作業に支障を来すだけでなく、溶接線の近接の問題があるので注意する。図3は、ビルジ外板の継手の位置がトランス間の中央にあったために、突合せ溶接による縦収縮で外板が落ち込んでしまった例である。図4の(a)は、カーキャリアのデッキのスティフナをL形からコ形に変更し、板継をなくして重ね継手としたものである。この場

図3 ビルジ外板の落ち込み

図4 カーキャリアのデッキの構造変更と溶接法

合、左図の板継を先行してからスティフナを取り付けるのに比べて、(1)ビードの縦収縮がスティフナによって拘束されること、(2)溶接線がスティフナの真上に来ること、(3)溶接法の変更に伴う入熱の減少等の効果が挙げられる。(b)は従来の隅肉のタック溶接をアークスポット溶接に変更した例で、大巾に変形が減少したとの報告¹⁾がある。この場合は、継手配置というより、溶接入熱の減少と隅肉溶接をなくして角変形を防止した効果が大きいと言える。

4.4 伸ばし

溶接にはある程度の変形は避けられないので、予め溶接の収縮や取付精度を考慮して、部材を多少長めしておくことがある。これが“伸ばし”である。伸ばし量は、その部材の溶接の収縮代や、開先間隙、取付精度等を考慮して決定される。図5～9は、各部材の伸ばし量の例である。実際にはさらに詳細な伸ばし量が決められておりそれに基づいて、個々の部品図が作製されている。ただ、これらの数値をあまり複雑にすると管理が大変である。また、施工法の変更等に応じて常に見直しする事も重要である。現状では、船台工程での切り合わせを前提として切断代を設けている場合が多いようである。図6は、船側外板に付くビルトアップのウェブフレームで、図のように先端が湾曲して細くなっているとフランジの溶接で引張られるので、予め点線のようにテーパ伸ばし

適用部材	溶接法	伸ばし a	伸ばし b
内構の板継	両面自動溶接	0	—
	手溶接	3	—
内構の隅肉 (骨材が5本以上ある場合)	グラビティ溶接	0	0
		3	0
大板の板継 (1継手当り)	片面自動溶接	1.5	—
大板と骨材 の隅肉	隅肉自動溶接	3	6

図5 平板の伸ばし量

図6 ウェブフレームのテーパ伸ばし

図7 主構溶接後 内構溶接の時の伸ばし量

骨の伸量 = (大板の伸量) - (大板継手の収縮代) + (骨の収縮代)

図7 ブロック継手における皮材と骨材の突合せ溶接

骨の伸量 = (皮板の伸量) - (ルートギャップ)
= 18 - 22 = -4

図8 消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接における骨材の伸ばし量

図9 スキンプレートの伸ばしと仕上げ (平行部ブロックのシーム)

をつけておく。

4.5 部材精度と取付精度

部材精度や取付精度の不良は、開先の修正やギャップの増大、溶接欠陥の補修等による入熱の増加の原因となり溶接変形に著しい影響を及ぼす。内業の加工工程では部材精度を高めるために、フレームプレーナや NC 機器が導入されている。また薄板の切断には、比較の入熱の少ないプラズマ切断が効果的である。図10は、フレームプレーナで帯板を切り出す時に、捨て切りによって両側の入熱の均等化を図り縦曲りを防止するものである。ただ、NC 切断機を用いても火口の形状や素材の残留応力分布が個々に異なるので、全く同じ寸法のものが得られるとは限らない。特に、切断中は、その熱により素材が動く事があるので、通常水冷によってこれらの動きを最小限に抑えている。ただ、鋼種によっては、切断面の硬さが問題になることがあるので注意を要する。

図10 フレームプレーナによる同時切断と捨て切りによる入熱の均等化

取付精度を向上させるには、正確にマーキングし、正確に取り付けることは言うまでもなく、そのための計測機器が多数開発されている。しかし、いかに正確にマーキングしても、その後で変形してしまえば意味がない。それを補うために、(1)各工程での溶接完了後にマーキングする、(2)伸び尺等を用いて収縮分を見込んでマーキングする、(3)開先修正のための溶接待ちを設ける、等の方法が併用されている。図11は、溶接待ちの例である。待ちの長さは、取付の作業性だけでなく拘束割れの防止をも考慮して決められており、通常 150~300 mm が多

図11 各種溶接待ちの例

いようである。

4.6 溶接順序

溶接順序は、基本的には以下の考え方にて選定されている。

- (1) 収縮量の大きい継手から溶接する。
- (2) 対称に溶接する。(できれば同時に溶接する。)
- (3) 中央から周辺(自由端)に向かって溶接する。
- (4) 骨材等の拘束を利用できるような溶接順序を選ぶ。
- (5) 熱の分散を図る。

一般には突合わせ溶接の方が隅肉溶接よりも収縮が大きいと考え、図12のような溶接順序で施工される。図中の③は溶接待ちで、これは船台工程での例である。対称に溶接する例として、ジャッキアップリグの脚部の円筒の周溶接で、2~4分割にして同時に溶接したり、同じく脚部のラックのような厚板で片側を最後まで仕上げずに表裏交互に溶接する例などが挙げられる。

図13は、船首または船尾部の曲り外板と骨材の溶接順序を示したもので、この場合、各々の部材はバラで配材されている。溶接の順序は、まず曲り外板を片面CO₂半自動溶接にて下盛りをする。仕上げまで盛ると角変形が生じるので、ここで止めて次に骨材を取付けて溶接する。最後に突合せの仕上げ溶接をするのであるが、骨材の仮付が十分であれば②と③は逆になってもよい。これは骨材の拘束をうまく利用した例であるが、この方法の最も典型的な例が枠組工法で、一般にロング先付工法に比べて歪が少いと言われている。

図12 外板と骨材の溶接順序
(収縮量の大きな継手から溶接する例)

船台継手近傍にB₅やロング等の取付くもの

図13 曲り外板と骨材の溶接順序
(既に溶接された部材の拘束を利用する例)

4.7 溶接法

変形の少ない溶接法の条件として、まず、(1)入熱が少ないこと、(2)パス数が少ないことが挙げられるが、その他に(3)表と裏のビードのバランスが良いことも挙げられよう。造船所で多用されている片面自動溶接やエレクトロガスアーク溶接、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接等は、(2)と(3)は良いが(1)の入熱が大きいため変形も大きく、次項で述べる拘束治具を用いて変形を防いでいる。現在、全国の造船所で普及しつつある CO_2 半自動溶接法は、変形の少ない方法として脚光を浴びている。また、手溶接の下進法は、小さな脚長でも美しい溶接ができるので、入熱を大巾に少くすることができる。特に小型船舶の上部構造の溶接では、枠組工法にてブロックを仮付し、全ての溶接を下進法にて行っている例もある。その他タック溶接の採用等も挙げられるが、まず重要なのは、適正脚長を守ることであろう。

4.8 拘束治具

拘束治具の使用は、最も手軽な変形防止対策の一つで、ストロングバックやステーは、古くから用いられている。溶接変形は、特に初層ビードの影響が著しいので、たとえ小さなピースであっても自由変形させることと比べれば、非常に効果的であると言える。図14～21は造船所で使われている種々の拘束治具を示したものである。図14は、比較的良好に使われるピース類である。図15²⁾は、片面自動溶接の回転変形による終端割れを防止するための拘束方法の一例で、現在最もよく用いられている方法である。通常長さ約 300 mm 前後の拘束ビードをカスケード法にて3層程度盛り、端部には約 150～200 mm 角ぐらいのタブ板を取り付ける。溶接の際は、拘束ビードを溶かしてしまわないのが原則である。図16は、薄板の片面自動溶接で、端部の落ち込みやはねあがり防止するために、溶接線に沿って長さ 500～1000 mm、厚さ 10 mm 程度の板を仮付し、溶接ビードの縦収縮を拘束して座屈変形を軽減させる方法である。図17は同じ

図14 各種のピース

図15 片面自動溶接における終端部の拘束

図16 6前後の薄板の片面自動溶接における端部の拘束

図17 片面自動溶接におけるマグネットによる薄板の拘束

く薄板の片面自動溶接でマグネットを用いて拘束する時に、板厚 15 mm 前後の鉄板を用いて磁束の洩れを防ぎ、

吸着力を増している例である。図18は、端部の角変形を防止する治具で、時には矢を深く打ち込んで逆歪をとることもある。図19は、エレクトログラスアーク溶接の拘束法で、終端部では、回転変形による割れを防止するために、取付ピッチを小さくしている。また、ギャップが大きく収縮力が大きいことと、裏銅板が通過できるように

図18 板端部の角変形防止治具

図19 エレクトログラスアーク溶接における終端部の拘束

図20 円筒の周溶接の拘束治具

図21 抱き合わせによる拘束

通常のピースより大きいものが使われる。図20で、外側のピースは折れと横収縮を防ぐために、内側のリングは、ビードの縦収縮による絞り(鼓状)変形を防ぐためのものである。リングは、縦収縮を拘束する意味からも円筒に仮付することが望ましい。図21は、対称の構造物を抱き合わせて拘束している例である。

4.9 逆歪法

逆歪法には弾性逆歪法と塑性逆歪法があるが、ビルトアップロンジや、小組立の隅肉溶接では前者がよく用いられている。(図22参照) 逆歪の量は、図22のような場合(グラビティ溶接)ならば、表面応力が $15 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ 程度になるようにする。図23は、ブロック搭載時にコッキングダウンを設けて建て付けた例である。これは、船全体を考えると、溶接が下のブロックから始まり、しだいに上へと進むため、ちょうど角変形が生じるよう

図22 小組立における弾性逆ひずみ

図23 コッキングダウンを設けた船台据付けによる船全体の逆ひずみ

図24 ロンジ先付工法における UD ブロックの縦曲りの防止

に船全体がそり上がってしまう。それを防ぐために行うもので、一種の逆歪と言える。

4.10 その他

その他、各造船所で種々の防止法が工夫されている。

図24は、当所のロンジ先付の工程で隅肉溶接機にガストーチをつけて溶接と同時にロンジ上端を焼いて縦曲りを防いでいる例である。

5. 歪 取 り

表1 加熱方法の種類と特徴

呼 び 方	焼 き 方	特 徴
線焼き		○歪取りの基本で背焼きに多く用いられる。
松葉焼き		○各方向に歪取りの効果が働くために均整がとれており仕上がりが美しい。似た方法に十字焼きがある。
格子焼き		○大きな歪を取る時に使う。 ○比較的平均に仕上がる。 ○焼きすぎになり易いので注意する。
点焼き		○収縮力が大きく主に薄板に用いられる。 ○こぶになり易い。
三角焼き		○骨材の曲りの歪取りや、しぼり加工に用いられる。
リング焼き		○非常に効果的な焼き方で、しかも仕上がりが美しい。

最後に上部構造などの薄板のパネル構造の歪取り要領について述べる。表1は、歪取りに用いる種々の加熱方法と特徴について示したものである。線状加熱（線焼き）には900℃以上に加熱して裏面まで焼き通す場合と裏面水冷あるいは低温加熱にて角変形を生じさせる場合の2通りあるが、点加熱（点焼き）や三角焼きでは、焼き通すのが原則である。表2に加熱・冷却条件の一例を示す。点焼きは加熱場所をそれほど限定しなくてもよいが、あまり大きく焼くとふくらみが出るなど外観上好ましくない。一方線焼きの場合は、変形の状態に応じて加熱位置を変える必要がある。残留応力分布や拘束状態、加熱による収縮力等によって多少の差異はあるが、概念的には線焼きを次のように考えればよい。図25に示すように、線焼きによって角変形の生じた板（実線）の端にモーメントを加えて水平に固定したとすると、(a)のように端を焼いたものは浮き上がり（破線）中央を焼いたものは逆に沈み込む。よって、(a)は凹パネルに、(b)は凸パネルに用いられる。ただ、実際に焼く位置については、拘束状態や残留応力分布等を考慮して選ぶ必要がある。例えば、図26の(a)で同じ背焼きでもスティフナの真上では900℃以上の高温加熱であり、横近傍では逆（裏面）水冷の

図25 線状加熱の考え方

表2 加熱冷却条件

加熱・冷却条件	ガス・バーナーの移動速度	加熱位置
900℃ 裏側水冷	450	ビード裏面
600℃ 空 冷	800	ビード裏面
900℃ 表面水冷	450	スティフナー裏面
部分的線状加熱 (300~400℃ 表面水冷)	5 秒間 (100~120 mm)	—

900℃加熱か600℃加熱が効果的となる。図27³⁾は、スティフナの無い側でのパネル表面の残留応力分布で、凹と凸では分布の状態が異っている。特に線焼きで角変形によって歪を取る場合は、表面が圧縮応力となっている領域を加熱するのが効果的である。しかし、スティフナ近

図26 パネルの線焼きと点焼き

(a) 連続3パネル型試験板における残留応力の分布

(b) 凸型歪をもった1パネル型試験板における残留応力の分布

図27 スティフナの隅肉溶接による残留応力分布

傍の圧縮領域を線焼きした場合、溶接線に沿った折れが発生することがあるので注意する必要がある。図28³⁾は、連続パネルの標準的な歪取りの手順を示したもので、およそ次のようなことが言える。

(1) 凹の歪取りは、背焼きにて行う。この場合、スティフナ近傍の逆水冷900℃加熱が効果的である。

(2) 凹パネルが連続している場合は、最も歪の大きい所または中央のパネルから背焼きにて歪取りをする。

(3) 凹と凸が連続している場合は、まず凸の部分を松葉焼き等の局部線状加熱にて歪取りをし、次に凹部を背焼きする。

(a)

①～④ 背焼き

(b)

①～④ 松葉焼き

⑤～⑧ 背焼き

図28 連続パネルの歪取り

上記手順でもまだ歪が残る場合は、点焼き等を併用する。図29は、板端部の折れの歪取り要領である。図30は、折れの著しい場合の方法で、骨間に貫差しを渡し、これをまたぐようにピースを取り付けて背焼き①をした後に矢を打ち込んで引き上げる。戻りにくい時は、②または③を加熱する。図31は、ライトニングホール（軽目孔）周辺の歪取り要領で、背焼きの後孔の縁を三角焼きで縮める。

①, ② 線焼き

図29 板継端部の折れ

- ① 線焼き
- ② 骨間を点及び線焼き（空冷）
（または③を線焼き）
- ④ 矢を打ち込む

図30 折れの著しい場合

図31 軽目孔の周辺

以上、歪取り要領について簡単に触れてみたが、あまり焼き過ぎると、構造物全体が歪んでしまい修正不可能になることがある。特に、薄板のパネル構造などでステイフナが弱い場合は注意を要する。船の上部構造などでは最後にまとめて歪取りをすることが多いが、ハッチカバーなどの精度を要求されるものは小組から大組まで、各工程で必ず歪取りをする必要がある。

6. おわりに

以上、造船業の主として船殻における変形防止と歪取りについて説明してきたが、今回特に強調したいのは、「変形防止は、設計から施工に至る全工程で対処しなければならない」と言うことである。そのためには、互いに情報交換をし協力しあうとともに、常に次の工程を考えながら作業に取り組んで頂きたい。

本報告が、読者諸兄の参考となれば幸甚である。

参考文献

- 1) 中西ら他4名：自動車運搬船における車輻鋼板加工組方法，住友重機械工業技報，Vol.29，No.86.
- 2) 日本溶接協会，溶接施工委員会編，「溶接施工管理標準」昭54年5月.
- 3) 造船研究協会，SR 127，報告書.

《出版案内》

「溶接工学の基礎」

溶接学会編 丸善(株)出版
A5判 256ページ 定価 3,000円

溶接学会溶接教育委員会が溶接工学の基礎としての学習の指針を検討し、それにもとづいて大学、高専あるいは生産技術者のための学習書として編纂されたものです。

全国書店で購入できます。

内容項目：1. 溶接構造物の特徴，2. 溶接法概論，3. 溶接熱伝導論，4. 溶接力学，
5. 溶接冶金概論，6. 材料と溶接性，7. 溶接設計，8. 溶接施工と管理
9. 溶接試験法概論，参考図書