解 説

アルミニウム合金等薄板構造物の溶接変形防止法の
開発—SS, SH, SSH 法の開発—*

松井 繁明**

Development of prevention method of welding
deformation in thin-plate panel structures*
—SS, SH, SSH methods—

Shigetomo MATSUI**

1. 緒 言

薄板パネルを用いた構造物として車両、船舶、建築物などが挙げられる。一般に、これらの薄板構造物の製作において溶接を行うと、パネル外板にベコ付やたわみみが生じる。この溶接変形は製品の寸法精度を低下させ、その外観を著しく損ねたり、その強度にも悪影響を及ぼすことがある。このため溶接においては溶接入熱の制御、拘束治具の使用など、によつて変形の発生を極力減らすと同時に、溶接後、後処理として、ガスバーナー等によるいわゆる“お灸”をすえてこの変形を除去しているが、この変形除去に多大の労力を費やしている。

近年、上記車両、船舶、建築物において、より軽量化するため、あるいは耐食性や美観等からアルミニウム合金が多用されつつある。アルミニウム合金は鋼に比べて熱伝導が良いこと、強度が低いことなどから、鋼に比べて溶接変形が生じやすい上に、変形の矯正が困難であり、変形の防止、除去方法に種々の工夫が必要である。

最近、著者は薄板溶接構造物の溶接施工において、溶接前および溶接中に簡単な操作をすることによつて、溶接変形の発生を効果的に防止しうる方法を開発した。

すでに実用化技術を確立し、現在アルミニウム合金製鉄道車両の製作工程で実用化しており、他の構造物へも適用範囲を拡大しつつある。

本開発研究の成果は昭和56年11月軽金属学会において第16回小山田記念賞を受賞する榮譽に浴した。そこで本稿では開発した技術を会員諸賢にご紹介する意味でその概要について述べる。

2. 溶接変形コントロールのための対策の現状

溶接によつて生じる変形はその発生形態によつて例えば表1に示すように横収縮、縦収縮、回転変形などの面内変形と角変形、縦曲がり変形、座屈変形などの面外変形に大別できる。すなわち

横収縮；溶接線に直角方向の収縮変形

縦収縮；溶接線方向の収縮変形

回転変形；溶接中、溶接部近傍の熱膨張、収縮によつて溶接の開先部が開いたりするような変形

角変形；板厚方向の温度差による板面外への角変形

縦曲がり変形；溶接線が部材の曲げ中立軸より離れている時、溶接方向に生じる曲がり変形

座屈変形；薄板に溶接した場合、板の内部に生じた圧縮残留応力による板の座屈変形

これらの溶接変形は次のような3つの方法によつてコントロールされる。すなわち

(1) 変形の低減対策

変形をできるだけ出さないように

a) 低変形となるような小入熱溶接法の適用

b) 溶接施工において適切な拘束治具の適用

c) 設計上、板の剛性等の変更。

d) 発生機構に立脚した防止法の開発。

(2) 変形許容基準の確立

変形があると例えば座屈強度などには大きな影響が生じる。構造物の使用条件より許容値を決定し許容値内でコントロールする。

* 本論文は、第16回小山田記念賞受賞技術を成文化したものである。

** 川崎重工業株式会社技術研究所 溶接研究室 (神戸市)。Welding laboratory of Technical institute, Kawasaki Heavy Industries Ltd. (Kobe).

DEFORMATION		PREVENTION-BEFORE & DURING	CORRECTION-AFTER WELDING
IN-PLANE	TRANSVERSE SHRINKAGE	DESIGN	NEEDLESS
	LONGITUDINAL SHRINKAGE	NEGLECT	NEGLECT
	ROTATIONAL DISTORTION	RESTRAINT	NEEDLESS
OUT-OF-PLANE	ANGULAR DISTORTION	ELASTIC OR PLASTIC DEFORMATION RESTRAINT	MECHANICAL BENDING OR HEATING
	LONGITUDINAL BENDING	ELASTIC OR PLASTIC DEFORMATION	HEATING BENDING
	BUCKLING	SS-METHOD RESTRAINT SH-METHOD PRE-WELDING SSH-METHOD DESIGN INCREASE THICKNESS LOW HEAT INPUT REDUCE DISTANCE BETWEEN STIFFENERS	PEENING STRETCHING SPOT HEATING

表1 溶接変形の分類とそのコントロール

(a) 変形矯正前

(b) 歪除去作業

(c) 変形矯正後

写真1 船舶上部構造における溶接変形の発生とその除去作業

(a) 変形矯正前

(b) 歪除去作業

(c) 変形矯正後

写真2 車両構体における溶接変形とその除去作業

(3) 変形除去方法の開発

過大なる変形は溶接後矯正し除去する必要がある。そのためできるだけ効果的な除去方法を開発する必要がある。

これらの対策はもちろん経済性その他を考慮して行う

図1 車両構体製造における歪取り作業の占める割合

図2 座屈変形と溶接残留応力

(a) 残留応力を有する平板の座屈強度 (軟鋼, 板厚 4 mm)

ことが必要である。表1にそれぞれの変形に対する変形防止法, 矯正法の代表例を示す。

上記の変形のうち薄板構造物の溶接で, 板に生じるたわみ変形 (座屈形式の変形) はそのひずみ矯正が大変困難でありまた多大の労力と費用が必要である。一方, 最近構造物は軽量化, 薄肉化の傾向にあり, この変形のコントロールが重要になってきている。

薄板構造物の溶接施工における変形の許容限度は構造物によってそれぞれ基準化されているものがある。例えば鉄道車両においては JIS (日本国有鉄道規格) や, 船舶に対しては JSQS (日本鋼船工作法精度基準), NAVS HIPS (米海軍規格) などがある。しかし鉄道車両や船舶の上部構造などの薄板構造物では, 実施工において許容

図3 平板の周辺溶接による残留応力分布のモデル

(b) 残留応力を有する平板の座屈強度 (アルミニウム合金, 板厚 4 mm)

図4 溶接残留応力を有する平板の座屈強度におよぼす板幅と溶接入熱の影響

図5 溶接入熱、板厚と面外たわみ変形の発生する限界板寸法との関係

値以上の変形が発生する場合が多く、板厚を厚くしたり、歪取り作業などの後処理を行っているのが実状である。

写真1に船舶上部構造において側壁に生じたたわみ変形とガスバーナ加熱・水冷による、いわゆるお灸によって変形を除去している状況を示す。大型船舶では設計上、上部構造の板厚は4～10 mmで許容されるが、溶接変形を低減させるため7～10数 mmと厚くしている。それでも、溶接後、骨間中央部のたわみ量が10～20 mm（許容限界5～6 mm）という大きな変形が生じ、変形除去にかなりの工数をかけている。

写真2は鉄道車両における歪取り作業の例を示す。図1は鉄道車両製作における歪取りの工数割合の一例を示したものであり、組立工数の約20%を歪取りが占め、その歪取りの約50%が外板に生じた横たわみ変形やたるみの処理であつて、薄板溶接における外板の座屈形式の変形防止がいかに重要であるかがわかる。

3. 薄板溶接におけるたわみ変形の発生機構

薄板に溶接をした場合に、板が波をうったように変形する。図2に示すように板の中央に溶接ビードを置いた場合、溶接線方向に、溶接部近傍では引張り、溶接線から離れた板内では圧縮の溶接残留応力が生じる。一方板厚が薄いと剛性が小さく、この圧縮の残留応力だけで板は簡単に座屈し、波状の変形が現れる。

図3に示すように、車両や船体構造において板と骨枠とを溶接する場合を想定した場合、1枠内の板の両端部には溶接によって引張、中央部は反対に圧縮の溶接残留応力が生じる。このような初期残留応力を有した板の上下端に圧縮力を作用させた時板の座屈強度 P_{cr} は周辺支持平板の場合では

$$P_{cr} = K\sigma_e - f(b, c) \cdot \sigma_{R1}$$

$$\text{ただし, } K = [m(b/a) + (a/b)/m]^2$$

$$\sigma_e = [E\pi^2/12(1-\nu^2)](t/b)^2$$

$$f(b, c) = \text{Sin}(\pi c/b)/(\pi c/b)$$

1) SS method

2) SH method

3) SSH method

図6 新溶接変形防止法の概念図

写真3 SH装置

で表され、残留応力が平板固有の座屈応力値に及ぼす効果 $f(b, c) \cdot \sigma_{R1}$ は溶接入熱量・材質・板厚 (t)・板幅 (b)が決めれば定量化が可能であり¹⁾、 P_{cr} が負になるとき、平板は溶接残留応力のみで座屈する。

図4は計算結果の一例である。図4(a)は4 mm厚の軟鋼板の場合を示す。平板に投入される溶接入熱量が1,700 cal/cm²のとき、板幅が400 mm以上であれば、た

図7 SS, SH, SSH 法による溶接変形防止効果 (耐候性鋼板, 板厚 1.2 mm, パネルサイズ 480 mm×230 mm)

わみ変形が発生する。一方図4(b)のアルミニウム合金の場合, 同じ板厚でも, 溶接入熱を $1,000 \text{ cal/cm}^2$ と小さくしても, 板幅が 200 mm 以下にしないと変形が生じ, アルミニウム合金は鋼よりも変形が生じやすいことがわかる。図5は上述のような計算から求めた板厚, 溶接入熱と変形が生じる限界板幅 (骨枠の間隔) との関係の一例を示す。この図より与えられた板幅, 板厚, 溶接入熱に対して変形の発生の有無が推定できる。

4. 変形防止法—SS, SH, SSH 法—の開発

3節で述べたように, 薄板の溶接において生じる板の面外へのたわみ変形は溶接によって板内部に誘起される圧縮残留応力と板自身の寸法より決まる座屈強度との大小関係によって発生の有無, すなわち防止の可能性が考えられる。板の寸法は設計より決まり, 必要以上に板厚を増大したり, 骨枠 (スチフナー) の間隔を小さくす

ることは経済性, 重量増に伴う構造物の性能低下の面から採用し難い。したがって板内部に生じる圧縮残留応力を何らかの方法で軽減するか, あるいは積極的に板に張りが生じるような引張りの残留応力を生じるようにすれば変形は防止することができる。

これを具体化する方法として次の3つの方法を考案し種々の基礎実験および解析を行ってきた^{2)~4)}。

すなわち

(1) SS 法⁵⁾: SS 法は図6に示すように, 溶接前に母板のみに適切な引張拘束応力を加え, 母板に弾性引張歪を生じさせた状態で, 母板と骨材とを溶接し, 溶接後引張拘束応力を除荷することによって母板に引張応力を残留させて, 変形の発生を防止する手法である。本法は引張応力を利用することから SS 法 (Straightening by Stretching) と名付けている。

(2) SH 法⁶⁾: SH 法は図6に示すように, 溶接前に母

写真4 SH法の溶接変形防止効果，開口部の有無の影響（鋼板）

図8 SS, SH, SSH法による変形防止適正条件（鋼板）

写真5 アルミニウム合金に対するSH法の変形防止効果（A 5083-0材，230×480×2.5 t）

板のみを適切な温度に加熱し，母板に熱膨張を生じさせた状態で，常温下にある骨材と溶接し，溶接後加熱を止め放冷することによって母板に引張応力を残留させて，変形の発生を防止する手法である。本法は加熱による熱膨張を利用することから **SH法**（Straightening by Heating）と名付けている。

(a) 床構骨枠

(b) 床板に引張拘束力負荷

(c) 床板と骨枠との溶接（アークスポット溶接）

写真6 車両床構の製作工程へのSS法適用状況

(3) SSH法⁷⁾：これはSS法とSH法とを同時に施工し，それらの重畳効果をねらったものである。その概念図を図6に示す。例えば，低い引張拘束応力と低い加熱温度で溶接変形の発生を防止できる。本法は引張応力と加熱による熱膨張の両者を重畳させて溶接歪の防止に利用することから **SSH法**（Straightening by Stretching and Heating）と名付けている。

これらの溶接変形防止法の効果を確認するために，小型薄鋼板パネル（骨枠の長さ480 mm，幅230 mm，外板は板厚1.2 mmの耐候性鋼板）を用いて行つた。SS法は特別に設計した平板引張装置を用いて，板に引張応力を与えた状態で，その上に骨枠を重ね両者を溶接し，溶接後板の引張応力を除荷する。SH法は写真3に示すよ

(a) 外板の引張拘束状況

(b) 骨枠を重ねる

(c) 外板と骨枠との溶接 (MIG)

写真7 アルミニウム合金車両の側構製作工程への SS 法の適用状況

うに加熱ヒーター板と油圧プレスを組み合わせた装置で、ヒーターの温度は設定温度一定に保たれるように自動コントロールされる。実験結果の代表例を図7に示す。変形状態をモアレ縞法によって観察したが、図に示すように防止法を適用し、SS法では引張応力がある値 (25 kg/mm^2) 以上、SH法では加熱温度がある値 (100°C) 以上になると縞の乱れがなく変形の発生はない。さらにダイヤルゲージを用いて基準面からのたわみ変形量を計測した。単に溶接する従来法の場合には約 $5 \sim 7 \text{ mm}$ のたわみと板のたるみが生じるが、上述の防止法を適用した場合、いずれの方法においてもたわみ変形はほとんど発生せず、しかも板に十分な「張り」を生じさせることができた。これらの材料を用いた大型パネル実験、実構造物試験においても、小型パネルと同様、十分に変形の発

写真8 車両妻構の製作工程への SH 法の適用例

写真9 新幹線用車両, アルミニウム合金製車両 (左) 鋼製車両 (右)

生を防止できることを確認し、本法の実用性並びに汎用性が非常に高いことを示した (写真4参照)。

本法の実用適正条件の例を示すと、最近よく使用される耐候性鋼板 (SPA-H, 板厚 1.2 mm) を用いた車両などの薄板構造物の場合には小型、中型パネル実験並びに実構造物試験の結果から、図8のように求められる。

SS法の場合は引張拘束応力 (σ_s) を 25 kg/mm^2 以上として適用すれば変形の発生は完全に防止できる。SH法の場合は加熱温度 (T_h) を 100°C 以上として適用すればよい。また、SSH法は引張拘束応力と加熱温度とが重畳して変形防止効果を発揮し、図中の破線が限界条件である。SSH法の場合は、例えば引張拘束応力 $\sigma_s = 15 \text{ kg/mm}^2$ と加熱温度 $T_h = 50^\circ\text{C}$ の組み合わせで変形が完全に防止でき、低い引張拘束応力と低い加熱温度の組み合わせで十分であるという特徴がある。

なお、図8で示した適正条件で本法を適用した薄鋼板構造物の残留応力を測定すると、 $4 \sim 8 \text{ kg/mm}^2$ の引張応力であった。この残留応力値は、従来のお灸によってひずみ取りを行い、適切な「張り」をもたせる場合のそれとほぼ一致している。

実験は耐候性鋼板板厚 1.2 mm のみならず、アルミニウム合金並びにステンレス鋼板についても行い同様の結果を得た。写真5はアルミニウム合金板 (板厚 2.5 t) パネルの溶接に SH法を適用した一例で約 100°C に加熱す

図9 大型溶接パネル製造用 SH 装置

写真10 船舶上部構造用大型パネル製造装置 (SH法)

図10 船舶上部構造用 SH 装置による確性実験結果, SH 温度と板の変形の関係 (軟鋼材, 4.5 mm)

写真11 大型パネル

写真12 アルミニウム合金製高速船 (2000 ton Surface Effect Ship SES, 速度80ノット)

ると変形は十分に防止できる。

5. 実構造物の溶接施工への適用

実構造物への適用例を示すと次のとおりである。

車両構体への SS 法および SH 法の適用

SS 法は現在、車両構体のうち屋根構、床構および側構の製作工程に適用している。写真6は床構への適用状

況を示す。(a)床構の骨枠, (b)骨枠上に床板を重ね引張拘束力を負荷している。(c)引張拘束の状態で床板と骨枠をアークスポット溶接している。溶接後, 引張力を除荷すると全く変形のない, しかも張りのある床構が製作できる。写真7は東北, 上越新幹線用アルミニウム合金製車両の側構の製作にSS法を適用している状況を示す。開口部のある部材でSS法の適用し難い部分とか, 外板周端部を把持できない部材にSH法を適用している。その一例として車両の妻構への適用例として写真8に示す。また, 在来新幹線と東北, 上越新幹線を写真9に示す。

船舶上部構造製作工程へのSH法の適用

船舶の上部構造は大型船で, 板厚が数mm~10mm程度となつていますが, スティフナー間隔が約1m, 高さが約3mとなり, 溶接をすると板は面外へ大きなたわみ変形が生じる。このため板厚を必要以上に増やしたり, またひずみ取りに苦労している。そこで上部構造を鉄道車両構体のようにパネル化し, これをSH法によつて製造し, 最終的に各パネルを溶接組立することによつて溶接変形の発生を防止するとの考えから, 図9および写真10に示すようなSH用の加熱ヒーター, 油圧プレスおよび多点同時自動溶接装置から構成される大型パネル製作装置を開発した。写真11に示すような実用サイズの鋼製パネル(板厚4.5mm, 高さ2,800mm, スティフナー間隔800mm)を用い確実実験を行い, 図10に示すように面外のたわみ変形はSH温度(T_h)が高くなると減少し, 100℃以上になると板に張りも出てきて十分満足なパネルを製造することができる。本装置は実用装置としての一つの基本装置⁸⁾であつて, ニーズによつて応用改造ができる。最近船舶も高速化のためアルミニウム合金の利用が増加してきており, 米国では2,000ton級のアルミニウム合金製高速船(写真12参照)の建造が計画されており, このプロトタイプ100ton級の高速船建造時には溶接変形の除去に大変苦労した。日本においてもアル

ミニウム合金製船舶の建造が増えており, これら建造時の変形防止に本技術の適用が考えられる。

6. 結 言

溶接変形の問題は構造物を溶接施工する場合の最も困る問題の一つで, その矯正は困難でかつ労力を要する。特に薄板構造物における板のたわみ変形は問題である。著者はその発生機構は溶接によつて板に発生する圧縮残留応力によつて誘起されるものであることを明らかにし, 変形を防止するためには溶接前あるいは溶接中に何らかの処置をほどこすことによつて, 板内部に生じる溶接残留応力を軽減するか, 積極的に板に引張りの残留応力を生じようようにすることを指摘し, これを具体化してSS, SH, SSH法なる変形防止法を開発した。その効果は鉄道車両や船舶その他薄板構造物の溶接施工に適用し実証した。特に最近では東北・上越新幹線用アルミニウム合金製車両に適用し, 製品の品質向上と工数の低減に寄与している。本技術は薄板溶接の合理化と品質の向上に役立つものであり, 今後多くの製品に適用されていくことを期待する。特に溶接変形のために溶接の適用を回避している構造物への適用を期待したい。

参 考 文 献

- 1) 藤田, 松井, 野本: 日本造船学会論文集, 第142号 (1977)。
- 2) 寺井, 松井他: 溶接学会全国大会講演予稿集, Vol. 16, 17, 18, 19, (1975, 1976)。
- 3) 寺井, 松井, 木下: 軽金属溶接構造協会第1回研究発表会講演概要 (1977)。
- 4) 松井, 木下: 溶接学会誌, Vol. 50, No. 1 (1981)。
- 5)~7): 車両, 船舶および建築等の薄板構造物におけるパネル製作方法, SS法, SH法, SSH法, 日本特許。
- 8) 無歪溶接装置, 日本特許。