

# HT40 クラス鋼板の溶接施工性確認

加治屋 直樹\*  
Naoki Kajiya



現在弊社で建造される船舶で使用される鋼種として、軟鋼、高張力鋼(HT32, HT36)といった 3 種類の強度の鋼板を使い分けている。しかし、近年船型の大型化や CSR(Common Structural Rule)の適用に伴い、上記の高張力鋼(HT36)を使用した場合においても、2500RE において Upper Deck で板厚 38mm という厚板を使用している。しかし、板厚が厚くなればなるほど、溶接時に鋼板に与える影響も大きくなり溶接施工時数も増加する。

船級規則にはHT36クラスよりも1ランク強度レベルの高いHT40クラスの鋼板も規定されており、強度の高いHT40クラス鋼板を適用する事で板厚の減少や船殻重量の削減、溶接施工工数の削減が期待されるが、新しい鋼種の適用の場合、船級毎に「溶接施工承認」を取得する必要がある。溶接施工承認取得の為に、HT40 鋼板を用いて弊社で使用されている各種溶接施工方法の試験を行い、十分な品質を満足出来るかの検討が必要となる。

そこで今回、新日鐵住金株式会社殿より試験鋼板の提供を受け、各種溶接施工性の確認を行った。

## 1. 緒言

現在船級規則では、船体用圧延鋼材の強度区分として、軟鋼、HT32 クラス、HT36 クラス、HT40 クラスの4区分に分かれており、降伏点や引張強度に違いがある。さらに HT40 の中でも低温靱性を考慮したE級鋼、一般的なA級鋼、E級鋼とA級鋼の中間のD級鋼の3種類の鋼種を使い分けており、特にE級鋼はUpper Deck の一部やSheer Strake の一部等、非常に重要な箇所に使用されている。(第1表参照)

第1表 NK 船級規則による鋼種区分

鋼種	シャルピー衝撃試験 実施温度(鋼板)	シャルピー衝撃試験 実施温度(溶接部)
KA40	0°C	20°C
KD40	-20°C	0°C
KE40	-40°C	-20°C

現在弊社では HT36 クラス鋼板までの鋼板を使用して船舶を建造しているが、船型の大型化や CSR(Common Structural Rule)の適用により、船体部材の板厚は増加傾向にある。

向にある。

そこで、より強度の高いHT40クラス鋼板を採用する事によって板厚の低減が図れ、船殻重量や溶接施工時数の削減が見込めるが、弊社としては溶接施工性について確認した実績が少なく不透明な部分が多い。

HT40 クラス鋼板を採用するとなった場合、現在弊社で採用されている溶接施工方法について溶接施工試験を行い、溶接部及びその近傍の母材部分の健全性を確認する必要がある。そこで今回の調査研究開発において、弊社で採用されているCO<sub>2</sub>半自動溶接、FCB溶接、FAB溶接、EG溶接、SEG溶接の5種類の溶接施工法について、KA40、KD40、KE40の鋼種で板厚28mm及び40mmの鋼板を用い溶接施工性を確認する事とした。

## 2. 各種溶接施工法について

### 2.1 CO<sub>2</sub>半自動溶接

弊社で最も一般的に使用されている溶接法として、CO<sub>2</sub>半自動溶接が挙げられる。隅肉溶接、突合せ溶接等の溶接方法、

上向き、横向き等の溶接姿勢といったように、CO<sub>2</sub> 半自動溶接の中にも様々な溶接法があり、溶接材料も多種多様となっている。

CO<sub>2</sub> 半自動溶接については、約 20 年前に建造された P&O 社向けコンテナ船において適用実績があり、その際に船級溶接施工承認を取得しているが、近年海外製溶接材料の適用拡大や、その当時と使用している溶接材料が違う事から、溶接条件が厳しい一部の溶接施工方法において、溶接施工性の確認を行う事とした。

## 2. 2 FCB(Flux Copper Backing)溶接

現在弊社では主に船体中央部の板継溶接施工法として FCB 溶接法を採用している。Submerged Arc Welding(以下 SAW)の一種で、溶接表面及び裏面にフラックスを散布し、4 つの電極から同時にアークを出し厚板の突合溶接を 1 度に行う片面溶接施工法で非常に高能率な施工法(板厚 40 mm、溶接長 20m の溶接を 60 分で施工可能)となっている。現在の船級溶接施工承認として、最大板厚 40 mm、鋼種 EH40 までの溶接施工承認を取得しているが、鋼板に最も大きな影響を与える溶接入熱が、最大で 160kJ/cm+170kJ/cm 程と非常に大きな大入熱溶接施工となる為、鋼板に悪影響を及ぼす可能性がある。

## 2. 3 FAB 溶接

SAW の一種で裏当て材(FAB)を用いた片面での溶接施工となる。以前建造したコンテナ船においては、両面 SAW の溶接施工承認を取得している。両面 SAW と比較し、溶接入熱が大きくなることや、充填材を使用する事等、違いが多数あるので今回試験を行う事とした。1 つの電極で施工を行う単電極溶接施工、2 つの電極で施工を行う 2 電極溶接施工の 2 種類があるが、今回は 2 電極での溶接施工試験を行った。尚、溶接入熱は最大で 130kJ/cm 程となり、大入熱溶接施工に区分される。

## 2. 4 EG(Electro Gas arc)溶接

主に外業の外板 Butt 溶接に用いられる立向上進溶接法で、突合面の表裏面に銅板を当てながら溶接を行う溶接法となっている。比較的大径(3.2 mm φ)の溶接ワイヤを使用し、大電流(最大 650A 程度)での溶接施工となる。従って溶接時の溶接入熱も大きくなり、鋼板に与える影響が非常に大きい溶接法と言える。今回の試験においても、板厚 40 mm での施工は困難との見込みから、板厚 28 mm のみで試験を行

った。

## 2. 5 SEG(Simple Electro Gas)溶接

EG 溶接の一種で、通常のエレクトロガスアーク溶接との違いは、「装置がレールに倣って上昇していく」「裏銅板の代わりに裏当て材を使用する」「細径(1.6 mm φ)ワイヤを使用する」等が挙げられる。最大で 400A 程度の電流となり、EG 溶接と比較すると溶接入熱が少なく鋼板に与える影響は小さいと言える。

## 3. 試験条件

### 3. 1 溶接条件

溶接条件については基本的に現在 HT36 鋼板に適用している溶接条件をベースとした。溶接条件の一例を第 2 表に記す。

第 2 表 溶接条件の一例

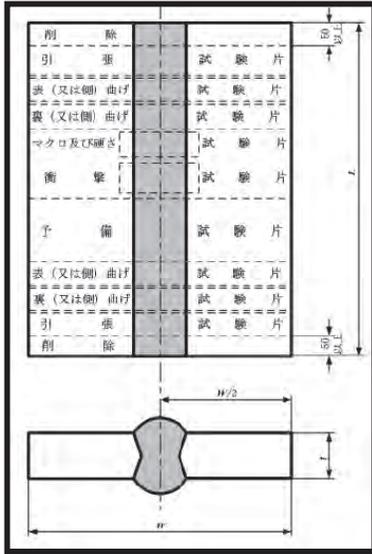
施工法	板厚(mm)	層数	電流(A)	電圧(V)	速度(cpm)	溶接入熱(kJ/cm)
CO <sub>2</sub> 溶接	28	6	220	26	11	30
FCB溶接	40	1	1500~1000	33~46	35	160+180
FAB溶接	40	4	800~1050	35~38	30	120
SEG溶接	40	1	360	40	4	220
EG溶接	28	1	650	37	6	220

CO<sub>2</sub> 半自動溶接においては仕上げビードで 40kJ/cm を超える入熱とし、かなり高めの溶接入熱で施工を行った。また、SEG 溶接及び EG 溶接の比較でわかる通り、板厚 40 mm での SEG 溶接と板厚 28 mm での EG 溶接の溶接入熱はほぼ等しく、EG 溶接の溶接入熱が非常に大きい事が分かる。

### 3. 2 評価方法

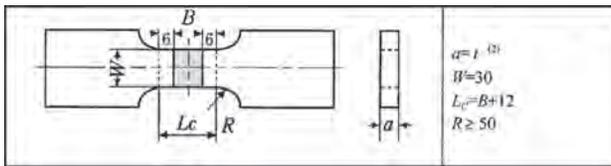
各溶接施工方法の評価方法は、NK 船級規則<sup>1)</sup>に準ずる形とした。評価方法としては溶接部の外観検査、非破壊検査(X線透過試験)、機械試験が規定されている。機械試験は、引張試験、曲げ試験、マクロ試験、硬さ試験、シャルピー衝撃試験の 5 種類の試験を行う事となっており、今回試験においても同様の試験を行った。

機械試験片は NK 船級規則に倣い、第 1 図の位置から採取した。



第1図 試験片採取位置

引張試験はNK船級規則によるU2A号試験片(第2図)を用いて行い、HT40の規格値である引張強さ510N/mm<sup>2</sup>以上を合格値とした。

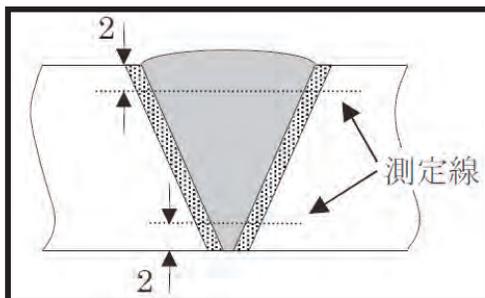


第2図 U2A号試験片

曲げ試験は180°ローラー曲げ試験を行い、溶接金属の曲げ表面部に有害な欠陥の有無を確認した。

マクロ試験は溶接部及びその近傍の母材部に有害な欠陥の有無を確認し、また、溶接金属部の形状を確認し、異常がないか確認した。

硬さ試験はビッカース硬さ試験(Hv10)を行い、350以下を合格値とした。計測地点はNK船級規則に倣い、以下第3図の測定線から、溶接金属部、溶接熱影響部、母材部の各3点ずつ計測する事とした。

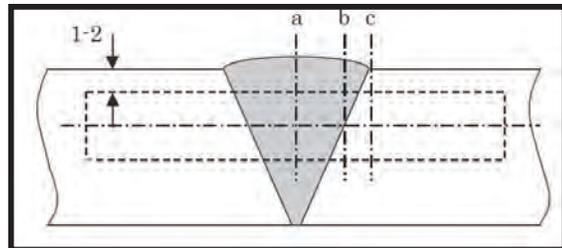


第3図 ビッカース硬さ計測地点

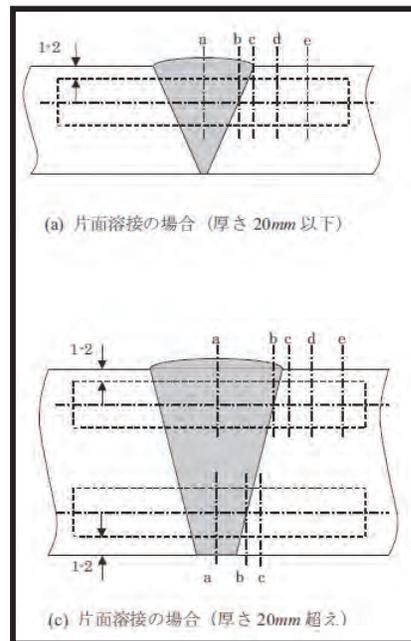
シャルピー衝撃試験の規格値は溶接方法により異なるが、今回試験を行った溶接施工法についてはいずれも3つの試験片の平均値が39J未満、3つの試験片のうち2つ以上が39J未満、1つ以上の試験片が27以下の試験片が不合格となる。

また、大入熱溶接(溶接入熱 $\geq 50$ kJ/cm)の場合と試験材の板厚により試験片採取位置が異なる。以下第4図及び第5図に通常の溶接の場合の試験片採取位置、大入熱溶接の場合の試験片採取位置を示す。各記号の内容は下記の通り。

- a: 溶接金属中央部(W. M)
- b: 境界部(F. L)
- c: 境界部+2 mm (F. L+2)
- d: 境界部+5 mm (F. L+5)
- e: 境界部+10 mm (F. L+10)



第4図 試験片採取位置



第5図 大入熱溶接の場合の試験片採取位置

大入熱溶接の場合、板厚20mmを超える場合は溶接裏面(ルート面)及び、溶接金属部と母材部の境界部からより離れた距離での試験片採取が必要となる。

#### 4. 溶接施工試験

##### 4. 1 CO<sub>2</sub>半自動溶接(写真1)

CO<sub>2</sub>半自動溶接施工試験は、板厚 28 mmのみで試験を行った。溶接材料は国内製及び海外製の材料を用い、EH40 については国内製の溶接材料のみで試験を行った。



写真1 CO<sub>2</sub>半自動溶接試験施工状況

##### 4. 2 FCB 溶接(写真2)

FCB 溶接施工試験は板厚 40 mm及び 28 mmの 2 種類の板厚で試験を行った。弊社の FCB 溶接装置では板厚 40 mmの施工は困難ではあるが、HT36 での船級溶接施工承認試験に準じた形で試験を行った。



写真2 FCB 溶接装置

##### 4. 3 FAB 溶接(写真3)

FAB 溶接施工試験は板厚 40 mm及び 28 mmの 2 種類の板厚で試験を行った。板厚 40 mmは 4 層 4 パス、28 mmは 2 層 2 パスで試験を行った。いずれも 2 電極溶接装置を用い溶接施工を行うが、特に梨型割れに注意した溶接条件の選定が必要となる。



写真3 FAB 溶接施工試験状況

##### 4. 4 EG 溶接(写真4)

EG 溶接施工試験においては事前検討の段階で、板厚 40 mmにおける施工は困難と判断し、板厚 28 mmにおいてのみ施工試験を行った。



写真4 EG 溶接施工試験状況

##### 4. 5 SEG 溶接(写真5)

SEG 溶接施工試験は板厚 40 mm及び 28 mmの 2 種類の板厚で試験を行った。EH40 のみ溶接材料を変更し、溶接施工試験を行っている。



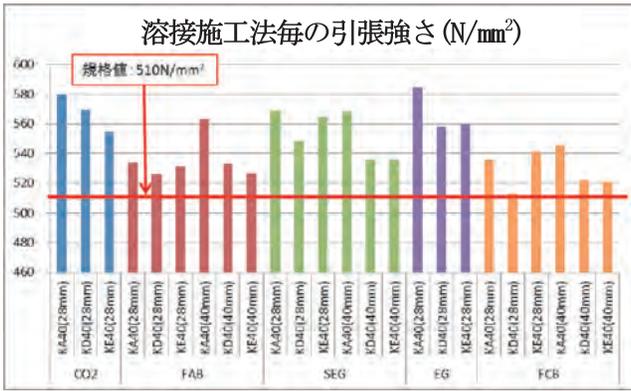
写真5 SEG 溶接施工試験状況

#### 5. 機械試験結果

##### 5. 1 引張試験結果

各溶接施工試験において行った引張試験結果を第6図に示す。CO<sub>2</sub>半自動溶接については規格値 510N/mm<sup>2</sup>を大幅に上回る結果となり良好な試験結果だった。しかし、その他の大入熱溶接においては鋼種や板厚により引張強さが低下している。その中でも FCB 溶接試験結果においては、KD40(板厚 28 mm)やKD40(板厚 40 mm)、KE40(板厚 40 mm)等において引張強さが大幅に低下しており、特にKD40(板厚 28 mm)においては規格値 510N/mm<sup>2</sup>以上に対して、試験結果 511N/mm<sup>2</sup>と規格値ぎりぎりでの合格結果となっている。

本試験施工前に、ミルメーカーより大入熱溶接において引張強度の低下が懸念される旨を伺っていたが、その通りの結果となった。



第6図 溶接施工法毎の引張試験結果

5. 2 曲げ試験結果 (写真6, 7)

試験を行った各種溶接施工方法について、各4本ずつ曲げ試験片を採取し、それぞれに曲げ試験を行った。目視での確認で、いずれの試験片においても有害とみられる欠陥等は見受けられず、すべての試験片で合格判定とした。



写真6 曲げ試験片

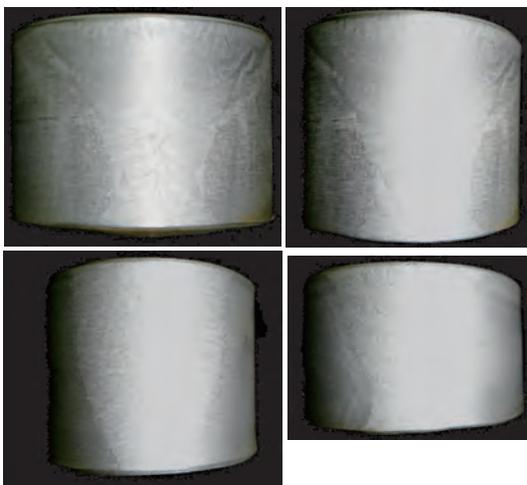


写真7 曲げ試験片曲げ面状況

5. 3 マクロ試験

各溶接施工法について、各1個ずつマクロ試験片を作成

しマクロ観察を行った。全てのマクロ試験片において有害な欠陥や異常な溶接金属形状は見受けられず、すべての試験片を合格判定とした。以下にマクロ試験片の一例を写真8, 9に示す。

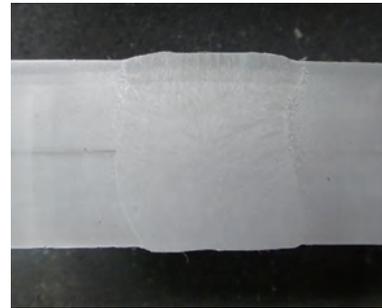


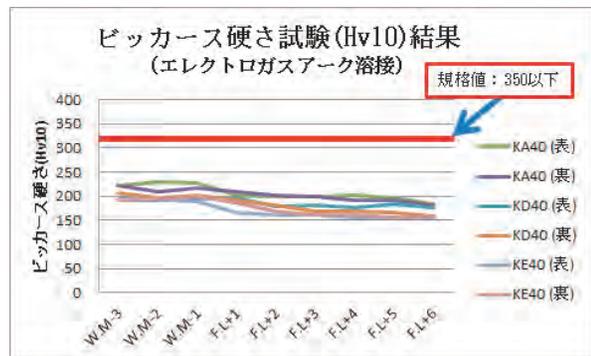
写真8 EG溶接マクロ



写真9 FCB溶接マクロ

5. 4 硬さ試験

各溶接施工法についてビッカース硬さ試験(Hv10)を行った。試験結果の一部を第7図に示す。規格値350以下に対して全ての試験片で最大硬さ250程度となっており、問題は見受けられなかった。写真10に試験片を示す。



第7図 ビッカース硬さ試験結果(EG溶接)

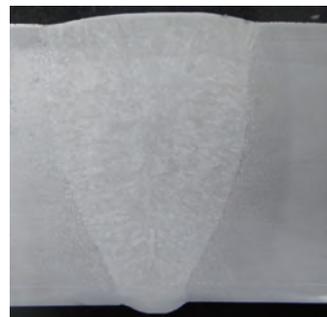
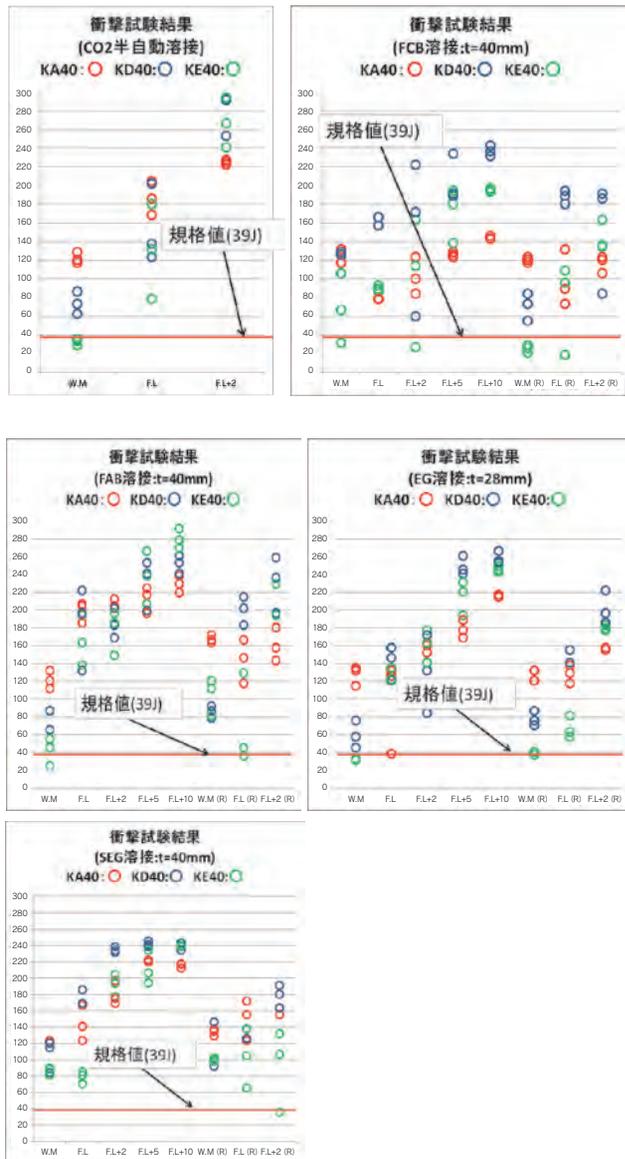


写真10 硬さ試験片(SEG溶接)

### 5.5 シャルピー衝撃試験

各溶接施工法でシャルピー衝撃試験を行ったが、それぞれの溶接施工法において、EH40 での試験結果（第8図）に一部規格値を下回る結果となった。

CO<sub>2</sub>半自動溶接及びFCB溶接、FAB溶接、EG溶接において、溶接金属中央部で規格値を下回り不合格となり、FCB溶接では溶接金属部と母材部の境界部でも不合格となる試験結果が得られた。



第8図 シャルピー衝撃試験結果

### 6. 考察

各溶接施工法について、船級溶接施工承認試験に準じた試験を行いHT40クラス鋼板の溶接施工性を確認した結果、引張試験の一部とシャルピー衝撃試験の一部について規格値を満たさないあるいは規格値をぎりぎりクリアすると

いう結果が得られた。

引張強度については、大入熱溶接全般で元の母材の引張強度を下回る結果が得られたが、特にFCB溶接における引張強度の下落幅が大きくなる結果となった。これはFCB溶接の溶接熱影響範囲が広くまた溶接入熱が大きい事に起因する材料的な問題と考えられる。

また、シャルピー衝撃試験についてE級鋼において各溶接施工法で規格値を下回る結果が得られたが、溶接条件、溶接材料、母材面のそれぞれの要因が重なってシャルピー衝撃値の低下を招いたものと考えられる。

CO<sub>2</sub>半自動溶接の場合は、溶接入熱が高めの溶接条件とした事に起因すると考えられ、溶接層数やパス数を増やす等、今以上の溶接施工管理が必要になると考えられる。

FCB溶接やFAB溶接については溶接金属部及びその周辺の溶接熱影響部でのシャルピー衝撃値の低下が見られることから、溶接条件や母材面からの改善が必要と考えられる。

EG溶接については溶接金属部のシャルピー衝撃値が低下しているが、母材の希釈率(溶接金属と母材が混ざり合う割合)が高く、溶接条件だけでなく母材面からの改善も必要と考えられる。

### 7. 今後の課題・展開

今回の調査研究開発において、弊社で適用している各種溶接施工法のHT40溶接施工性確認を行ったが、材料面だけでなく、溶接条件面においても改善の必要がある事が判明した。

今後の課題としては、鋼材を各種大入熱溶接に適用させる為の改善が必要となる。ミルメーカーとの協議及びさらなる社内確認試験を行い、鋼材の大入熱対策鋼化を進めていく、あるいは低入熱なCO<sub>2</sub>半自動溶接での施工を検討する必要がある。

また、CO<sub>2</sub>半自動溶接における溶接施工管理の強化やFCB溶接、FAB溶接の施工範囲及び溶接条件の再検討を行い、十分な溶接品質を確保する事が必要となる。

今後の展開としては、材料面、施工面における上記の様な問題点をクリアした後、各船級の溶接施工承認を取得し実船に適用していく事を目標に実験を進めていく。

### 参考文献

- 1)NK 船級規則 K編 及び M編