

技術ノート

キーワード

エレクトロガス
アーク溶接
上向き自動溶接

エレクトロガスアーク溶接および 上向き自動溶接の施工条件について

Welding Conditions of Electro-Gas Arc Welding and
Overhead One Side Automatic Welding

早 川 清*
Kiyoshi HAYAKAWA

1. まえがき

近年、橋梁の箱桁・橋脚における大ブロックヤード溶接および現場溶接においては、上フランジを片面裏波サブマージアーク溶接、ウェブを外側からの炭酸ガスシールド片面裏波立向き自動溶接、および、下フランジを内側からの片面裏波自動および半自動溶接で行っていた。

しかし、溶接技術の進歩により、施工性・施工能率を向上させるために、ウェブにはより能率的なエレクトロガスアーク溶接、下フランジには外側からの上向き自動溶接の適用が図られることになった。これらの溶接法を適用すれば、外側からの施工が可能となるため、以下の利点が期待できる。

- ① 内側施工時には縦リブ形状を考慮する必要があるが、外側施工では特に必要ではない。
- ② 目違い調整などは内面縦リブを利用できる。
- ③ 狭い内面へ装置を持ち込む必要がない。
- ④ 閉所での圧迫感、ヒューム、および粉塵や満煙などの心配がない。
- ⑤ 施工が高効率である。

本文では、エレクトロガスアーク溶接および上向き自動溶接を実施工に適用する前に、施工性および継手性能を確認したので、その試験結果を報告する。

2. エレクトロガスアーク溶接

エレクトロガスアーク溶接装置はSEGARC-2Z(神戸製鋼所製)を用い、機械的性質を満足する開先形状の範囲を調べた。エレクトロガスアーク溶接の原理図を図-1に示す。エレクトロガスアーク溶接は、1パス溶接(板厚6~32mm)を基本にしているが、厚板への適用が不可欠であ

り、多層溶接の施工法についても検討した。

(1) 1パス溶接

a) 供試鋼材、試験体形状および溶接条件

供試鋼材を表-1に、試験体形状を図-2に、また溶接材料を表-2に示す。

なお、本装置は、溶接中にワイヤのエクステンション

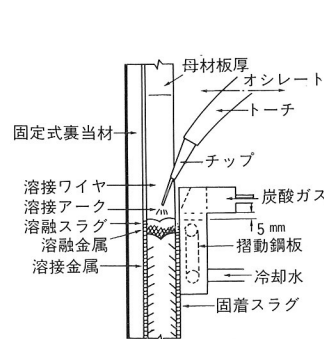


図-1 溶接原理図

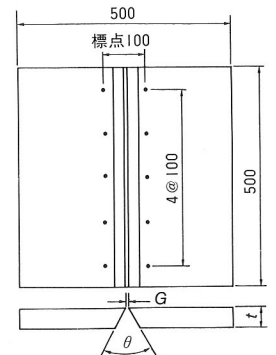


図-2 試験体形状

表-1 供試鋼材

供試鋼材		化 学 成 分 (%)							機 械 的 性 質			
材質	板厚 (mm)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	Nb ×100	Ceq ×100	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	衝撃値 (kgf・m)
SM50B -TMC	32	13	24	121	18	6	0	34	45	56	24	25.4 (0℃)
SM50YB	19	17	38	124	24	8	2	39	41	56	26	14.5 (0℃)

表-2 溶接材料および溶接機器

溶 接 材 料			溶 接 機 器	
ワイヤ	シールドガス	裏当材	溶接装置	溶接電源
DWS-43G (1.6mmφ)	100%CO ₂ (25ℓ/min)	水冷銅板	SEGARC-2Z	Dyna Auto XmarkIII 600H

*川田工業㈱技術本部溶接研究室

を検出して一定となるよう台車上昇速度を溶融プール面の上昇に追従できるものであるため、電流や電圧を一定(380A-38V)とした。

b) 溶接施工

良好な裏波を得るため、板厚32mmでは板厚方向にオシレートを行っている。この際、開先角度、ルートギャップが小さくなるとオシレートが難しくなるので、板厚32mmでは、開先角度 $\theta \geq 25^\circ$ 、ルートギャップ $G \geq 4\text{mm}$ がスペース的に限界である。板厚19mmでは、 $\theta = 40^\circ \pm 10^\circ$ 、 $G = 5 \pm 3\text{mm}$ において、オシレートなしで十分対応できた。裏当材(KL-4)を用いても同様に対応するが、裏ビート幅が大きくなりやすいうえに、アンダーカットも生じやすい。

c) 入熱量

開先断面積と入熱量の関係を図-3に示す。板厚19mmと32mmでは傾きがほぼ同じ回帰直線が得られ、両データを含めた回帰式は次のようになる。(図中破線参照)。

$$Q = 0.2994A_w + 7.653 \dots\dots\dots(1)$$

($175 \leq A_w \leq 570$, A_w : 開先断面積)

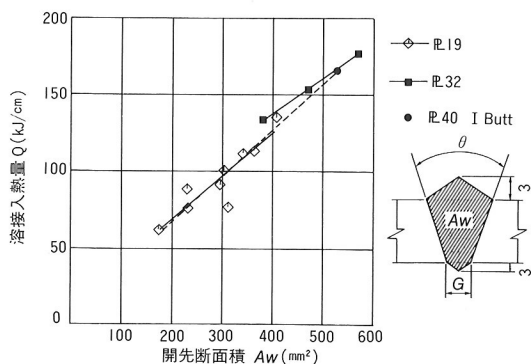


図-3 開先断面積と入熱量の関係(EGW1パス)
(裏当; 固定式水冷銅板使用)

d) 収縮量

溶接収縮量 Sp は, Sparagenの式を用いて比較した。その式を次に示す。

$$Sp = 0.18 \times A_w / T + 0.05G \dots\dots\dots(2)$$

(A_w : 開先断面積, T : 板厚, G : ルートギャップ)

板厚19mmでは、 Sp 値と実測値(S)において次の相関が得られた(図-4参照)。

$$S = 0.2742 \times Sp + 0.3911 \dots\dots\dots(3)$$

裏当材を用いると、収縮量は水冷銅板に比べてやや大きくなる傾向があった。しかし、板厚32mmでは、2点のデータであるが、(3)式と異なった傾向を示した。

e) 引張強さ

突き合わせ溶接継手の引張試験方法(JIS Z3121)による引張強さと入熱量の関係を図-5に示す。引張強さは、入熱量に左右されることなく母材以上の強度を示した。

ただ、板厚32mmのTMCP鋼では、すべて溶接金属で破断しているが、150kJ程度の入熱であれば、低 C_{eq} の母材希釈を考慮しなくても強度が確保できた。

f) 衝撃値

衝撃値と入熱量の関係を図-6, 7に示す。衝撃試験片は、板厚19mmでは表面下2mm, 板厚32mmでは1/4Tを中心

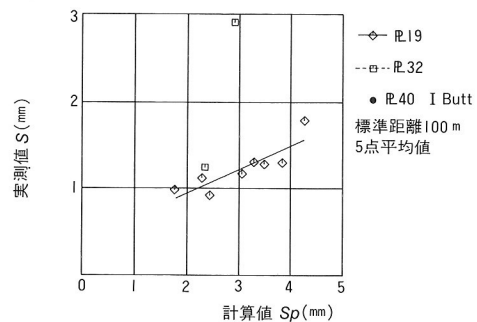


図-4 収縮量の計算値と実測値(EGW1パス)

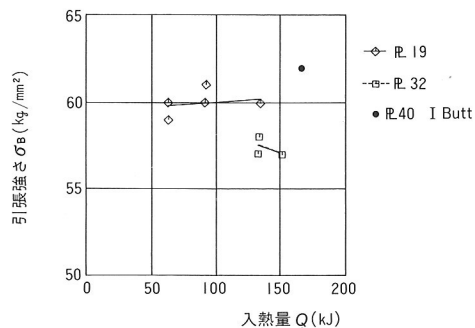


図-5 引張強さと入熱量の関係(EGW1パス)

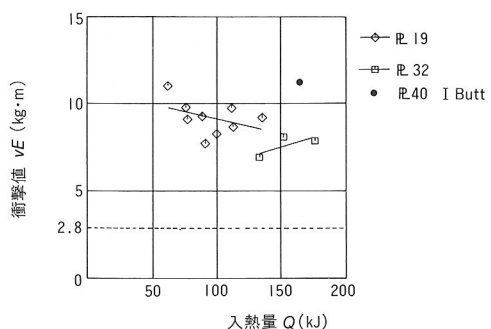


図-6 衝撃値(溶接金属)と入熱量の関係

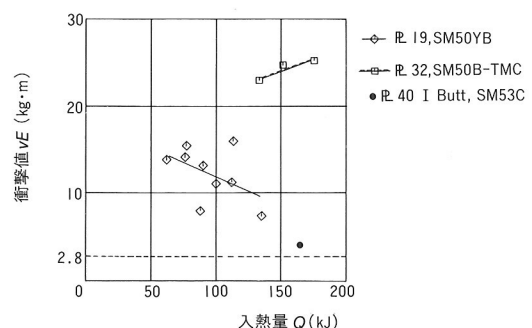


図-7 衝撃値(熱影響部)と入熱量の関係

に採取した。ノッチ位置は、V開先であるため、溶接金属中央および熱影響部中央とした。溶接金属中央部では、入熱量による変化はあまり見られず、規格を十分満足するものであった。熱影響部中央では、板厚19mmにおいて入熱量の増加に伴う低下が見られるが、TMCP鋼ではそれが見られず180kJ程度でも良好な値が得られており、エレクトログラスアーク溶接を厚板に適用するうえで大きなメリットとなると考えられる。

g) 硬さ

溶接部の硬さは、マクロ試験片を用い、ビッカース硬さ(10kgf)を測定した。測定位置は表面下2mm、板厚中央、および裏面下2mmとした。硬さ測定値の最高値および最低値と入熱量の関係を図-8に示す。入熱量の増加に伴って、硬さの最高値と最低値が、ともに低下する傾向が見られた。

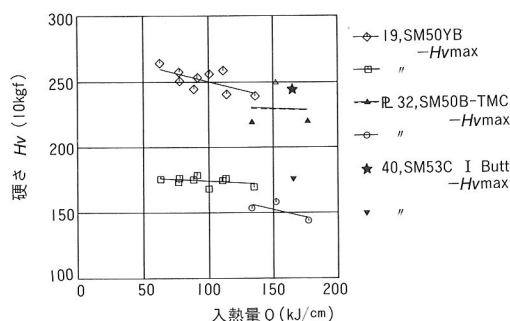


図-8 溶接部の硬さと入熱量の関係

h) その他

溶接部の曲げ試験と、マクロ試験の結果は良好であった。また、X線検査においても欠陥は見られなかった。

(2) 多層溶接

エレクトログラスアーク溶接(EGW)を厚板に適用するにあたり、入熱を抑えたEGW-2pass法およびGMAW+EGW法について検討した。

a) 供試鋼材および溶接材料

供試鋼材を表-3に、溶接材料を表-4に示す。なお、試験体形状は図-2と同じとした。

b) 溶接施工

EGW-2pass法では、初層用銅板として図-9の形状の物を用いた。開先条件に対する適否を図-10に示す。初層用銅板の形状に合った開先形状より小さいと、銅板はつまりを生じて動かなくなる。また大きいと溶け落ちが生じるので、初層用銅板の適用範囲は比較的狭い。

GMAW+EGW法の下盛溶接においては、ルートギャップ3mm、開先角度30°で溶接できたが、スペースとしては下限である。

EGW仕上げ層において、EGW-2pass法では、初層用銅板の形状によって残りの開先断面積が定まるが、

GMAW+EGW法では、EGWの入熱を130kJ程度にするため、(1)式により下盛GMAWの量を調整した。残りの開先寸法比と開先断面積における欠陥の発生状況を図-12に示す。本装置は板厚方向にのみオシレート可であるが、

表-3 供試鋼材

供試鋼材		化 学 成 分 (%)								機 械 的 性 質			
材質	板厚 (mm)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	Nb ×100	Ceq ×100	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	衝撃値 (kgf・m)	
SM580	42	11	27	132	5	2	0	37	61	68	27	30.9	
SM53C	40	16	43	144	20	6	3	42	44	60	26	12.0	

表-4 溶接材料および溶接機器

溶 接 材 料				溶 接 機 器	
ワイヤ		シールドガス	裏当材	溶接装置	溶接電源
SM53C	SM58				
DWS-43G (1.6mmφ)	DWS-60G-2 (1.6mmφ)	100%CO ₂ (25ℓ/min)	水冷銅板	SEGARC-2Z	Dyna Auto XmarkIII 600H
YM-28 (1.2mmφ)	YM-18 (1.2mmφ)	100%CO ₂ (25ℓ/min)	FBB-3	PICOMAX-2	センサーク SP-500

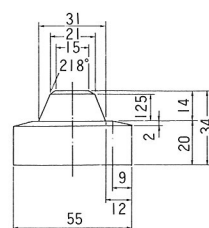


図-9 初層用銅板

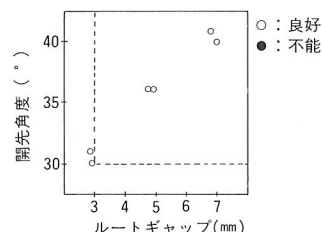


図-11 GMAW初層開先条件

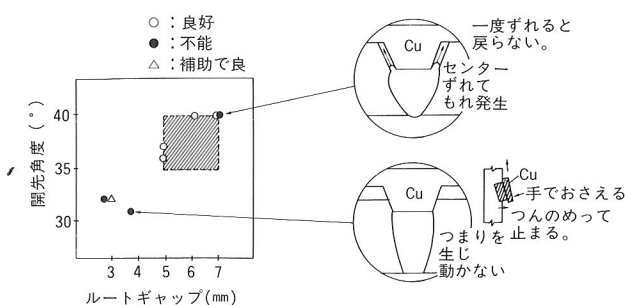


図-10 EGW-2pass初層開先条件

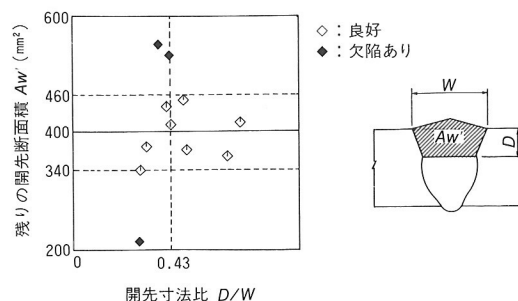


図-12 開先寸法比と開先断面積における欠陥の発生状況

欠陥の発生傾向からみて、開先寸法比より開先断面積に支配される傾向があり、開先断面積が400mm²前後となるよう考慮することが望ましく、また、開先寸法比0.43以上がより安全と思われる。

c) 入熱量

開先断面積と入熱量の関係を図-13に示す。EGW-2 pass法とGMAW+EGW法は同様な傾向を示しており、(1)式とほぼ同じ傾きの回帰式が得られた。

$$\Sigma Q_{EGW-2pass} = 0.3120 A_w - 5.795 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\Sigma Q_{GMAW+EGW} = 0.2794 A_w + 33.29 \quad \dots\dots\dots(5)$$

(650 ≤ A_w ≤ 1050)

d) 面外変形・収縮量

面外変形量と入熱量の関係を図-14に示す。EGW-2 pass法とGMAW(5～6 pass)+EGW(1 pass)法との比較では、EGW-2pass法が変形が小さく、GMAW+EGW法の1/4程度しか生じていない。

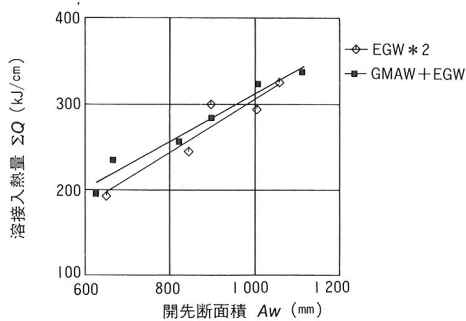


図-13 開先断面積と入熱量との関係(多層)

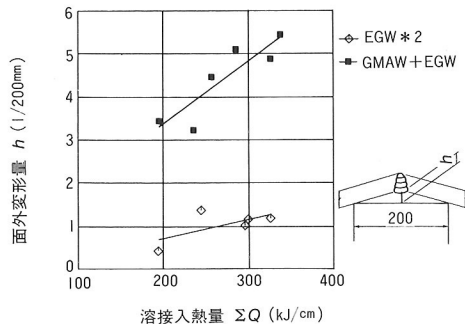


図-14 溶接入熱量と面外変形量の関係(多層)

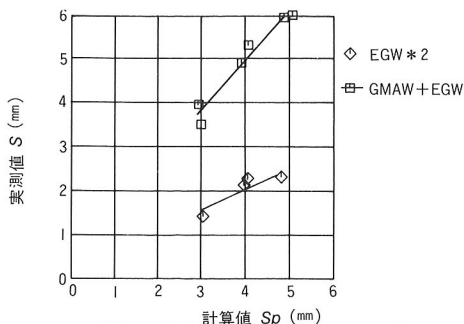


図-15 収縮量の実測値と計算値の関係(多層)

収縮量の実測値と計算値の関係を図-15に示す。収縮については、EGW-2pass法がGMAW+EGW法の2/5程度であった。

面外変形量、収縮量ともに、EGW-2pass法が小さく、形状管理上有利である。

e) 引張強さ

引張強さと入熱量の関係を図-16に示す。1パス溶接と同様に、多層溶接においても入熱量による変動は見られなかったが、施工法別に見ると、GMAW+EGW法に比べEGW-2pass法では、継手強度が低下する傾向があった。

f) 衝撃値

溶接金属中央部における衝撃値と入熱量の関係を図-17に、熱影響部中央における関係を図-18に示す。

溶接金属中央部では、入熱量による変動は見られず、ほぼ一定の値が得られているが、下盛GMAWにおいて規格を下回る値が得られた。この部分は仕上げEGWによって再熱され若干の脆化を生じていると考えられるため、Cクラス以上の溶接に対しては、溶接材料の選定に注意を要する。

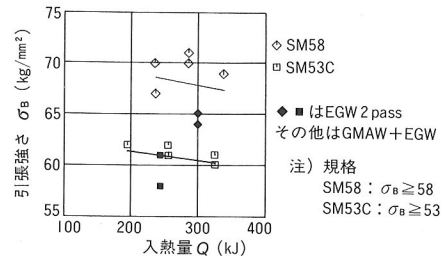


図-16 引張強さと入熱量との関係(多層)

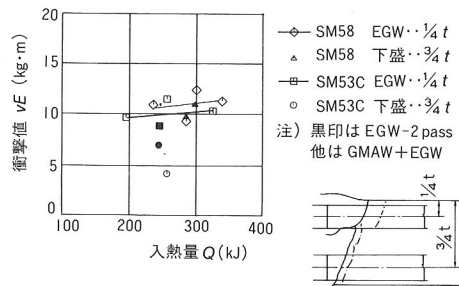


図-17 衝撃値と入熱量との関係(溶接金属)

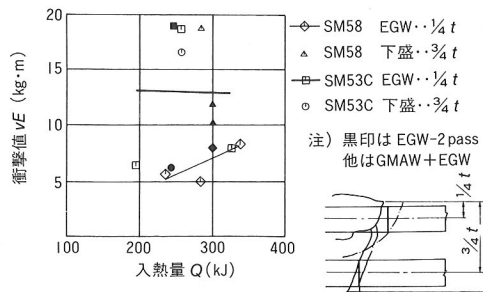


図-18 衝撃値と入熱量の関係(熱影響部)

熱影響部中央部では、V開先で開先角度を変えているため、バラツキが大きい³⁾、SM58においても、良好な値が得られている。

g) 硬さ

硬さ測定値の最高値および最低値と入熱量の関係を図-19, 20に示す。入熱量の増加に伴って硬さの最高値、最低値が低下する傾向は、EGW-2pass法がより顕著に見られるが、最低値に着目すれば、大きな低下は見られない。

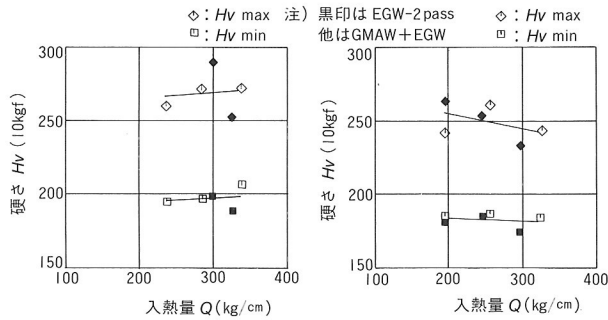


図-19 入熱量と硬さ (SM58)

図-20 入熱量と硬さ (SM53C)

h) その他

多層溶接部の側曲げ試験、マクロ試験の結果は良好であった。

EGWを適用する場合、1パス溶接では、150kJ程度を上限と考え、開先形状を定めることが望ましく、TMCP鋼を用いると、適用範囲は広がる。多層溶接では、EGW-2pass法が能率、変形の面で有利であるが開先の適用範囲が狭く実用的とはいえず、現状ではGMAW+EGW法が優位である。

3. 上向き自動溶接

上向き自動溶接装置はOH-AUTO(神戸製鋼所製)を用いた。本装置は、フラックス入ワイヤとインバータ制御型電源の組み合わせにより、上向きショートアーク溶接を安定させており、適正な裏波を得るための溶接速度自動制御、アークセンサによる左右開先揃いおよび機械式上下揃いなどの機能を有している。

(1) 供試鋼材および溶接材料

供試鋼材は表-1のSM50YB; 19mmを用いた。溶接材料を表-5に示す。なお、試験体形状は図-2と同じとした。

表-5 溶接材料および溶接機器

ワイヤ	シールドガス		裏当材	溶接機器	
	一次	二次		溶接装置	溶接電源
DWA-50 (1.2φ)	80%Ar+20%CO ₂ (25ℓ/min)	100%CO ₂ (25ℓ/min)	FBB-3T (I=600)	OH-AUTO	センサーク SP-500

(2) 溶接施工

裏波溶接を行う場合、開先形状に対する適用範囲を明確にする必要がある。図-21は、今回行った開先条件における初層溶接の可否を示したものである。ルートギャップが狭いとビード表面が凸になりやすく、広すぎると裏波の余盛が低くなるため、ルートギャップの標準を7mm±2mmとする。開先角度については、広いほど初層において施工性は有利であるが、中間・仕上げ層では施工性が劣ることより、標準を40°±5°とする。

(3) 入熱量

図-21の○印における開先断面積(板厚19mm)と、総入熱量の関係を図-22に示す。入熱量と断面積との関係は、フラックス入ワイヤを用いているEGWとほぼ同じ傾きの回帰式が得られた。

$$\Sigma Q = 0.3112A_w + 14.86 \quad \dots\dots\dots(6)$$

(4) 収縮量

収縮量の実測値と計算値の関係を図-23に示す。板厚19mmにおける S_p 値と実測値 S において次の相関が得られて

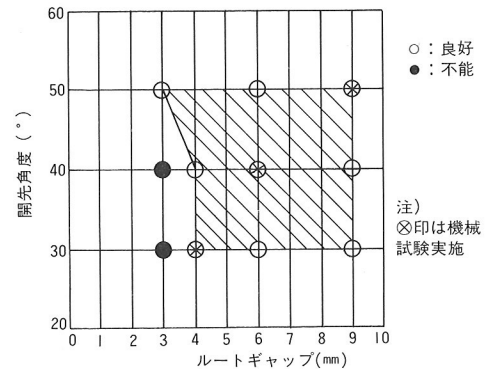


図-21 開先による適用範囲

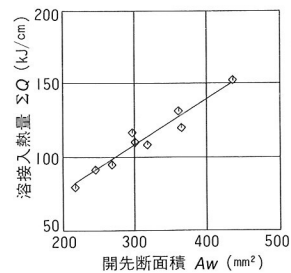


図-22 開先断面積と入熱量

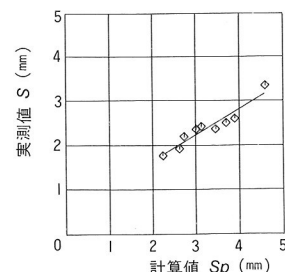


図-23 収縮量の実測値と計算値

おり、1パスのEGWに比べ約2倍の傾きとなっている。

$$S = 0.5795S_p + 0.4944 \dots\dots\dots(7)$$

(5) 引張強さ

開先断面積と引張強さの関係を図-24に示す。引張試験結果は良好であったが次の傾向が見うけられた。

- ① 開先断面積を大きくすると、若干ではあるが引張強さが低下する。
- ② 開先断面積を大きくすると、溶接金属中央部で破断した。

ただし、引張試験を行った開先形状は図-21の⊗印(3体)より各2本採取しており、溶接施工はすべて1層1パスで仕上げている。

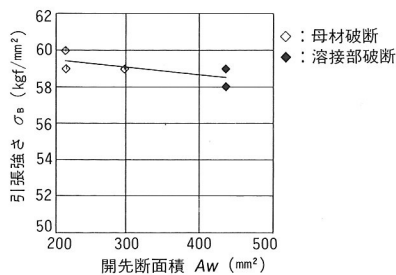


図-24 開先断面積と引張強さの関係

(6) 衝撃値

開先断面積と衝撃値との関係を図-25に示す。融合部、熱影響部におけるノッチは近傍で採取している。融合部、溶接金属中央部では、開先断面積が大きくなると衝撃値が低下する傾向があった。衝撃試験片は、表面下2mmより採取しており、仕上げパスの影響を大きく受けている。開先角度、ルートギャップを大きくすると、開先表面幅が大きくなり、仕上げパスの入熱は増大する。本実験における仕上げパスの最大入熱量は35kJであり、これ以下にならない時は1層2パスおよび3パスとすることが望ましく、施工時の目安としては前層ビード幅(25mm)を基準とする。

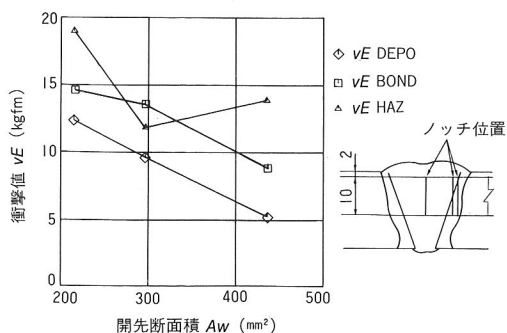


図-25 開先断面積と衝撃値との関係

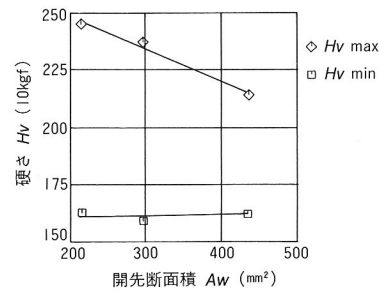


図-26 開先断面積と硬さの関係

硬さ試験における硬さの最高値、最低値と開先断面積との関係を図-26に示す。開先断面積を大きくすると硬さの最高値は減少する傾向にあるが、最低値は変化していない。

(8) その他

X線検査、側曲げ試験、マクロ試験の結果は良好であった。

また、表-3のSM58材(板厚42mm)を用いて施工試験を行い良好な結果が得られており、60キロ鋼への適用が十分可能であることも確認している。

(9) まとめ

上向き溶接は1パスあたりの入熱量が下向き溶接とはほぼ同程度であり、機械的性質には問題ないことを確認した。ただし本溶接法は、撓動部が多く、特に初層時にアークを安定に行うには熟練を要する溶接法である。

4. あとがき

エレクトログラスアーク溶接および上向き自動溶接を実施施工に適用するうえで、開先の適用範囲、機械的性質を調べ、それぞれの傾向をつかめたものと思われる。

現在、本試験結果を踏まえた実工事への適用を既に終えており、今後の工事への適用も計画中である。エレクトログラスアーク溶接および上向き自動溶接は高能率であり、全断面溶接工法ばかりではなく、その他の溶接への適用について今後検討していく計画である。

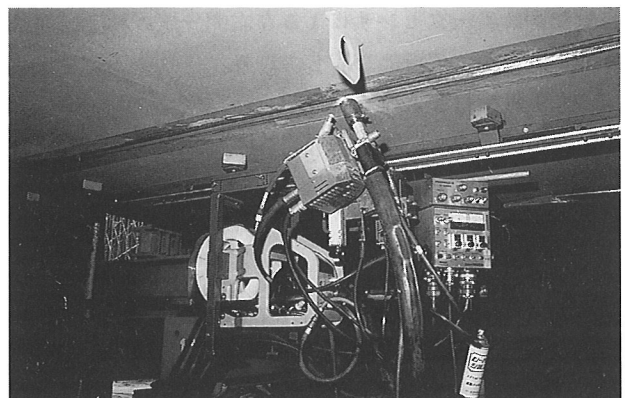


写真-1 上向き自動溶接適用状況

(7) 硬さ