

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法

KK神戸製鋼所溶接棒事業部 福原 和男

1. ま え が き

溶接の自動化、高能率化による鋼構造物の建造費低減は、溶接界における重要課題として注目を集めている。したがって最近ほとんどの工場における下向或いは横向姿勢では溶接はサブマージアーク溶接法、炭酸ガスアーク溶接法が採用されるようになった。いっぽう、近年立向高能率法としてソ連で開発されたエレクトロスラグ溶接法は、各国で次第に実用化され、わが国でも船側外板から重機器構造物の溶接まで実用化されているが、溶接装置の高価なこと、溶接装置のセットに時間を要し溶接線が長い場合には非常に優れた能率を発揮するが、短い場合にはさほど経済的でない、などの理由で適用箇所は狭ばめられていた。しかしエレクトロスラグ溶接法の応用として Paton 電気研究所¹⁾より消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法が紹介されるにおよんで種々の分野に適用されることとなった。

この方法は通常のエレクトロスラグ溶接装置に比べて複雑な昇降機構が不要のため簡単、安価であり、短い溶接長に有効で断面形状にとらわれることが少ない、などの利点がある。

2. 消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法の概要

通常のエレクトロスラグ溶接では、銅或いは銅合金製の通電ノズルからワイヤがしゅう動、送り出され、溶接の進行にともなって溶接装置も上昇して溶接がおこなわれる。

これに対して消耗ノズルエレクトロスラグ溶接は昇降装置がなく、そのかわりとして溶接線全長以上の長さのノズルを用いる。このノズルは鋼できていてワイヤの案内と通電を兼ねながらノズル自体も熔融スラグによって溶かされ、溶着金属の一部を形成する。

ノズル形状としては開先断面形状に適合した板材、角棒、管状(図1)²⁾などが用いられ、一般に広く使用されるのは円形断面の鋼管であり、材質は JIS STKM または STPG³⁾などが用いられている。

熔融した消耗ノズルが全溶着金属中に占める割合は、

*東区北浜三(大阪神鋼ビル)

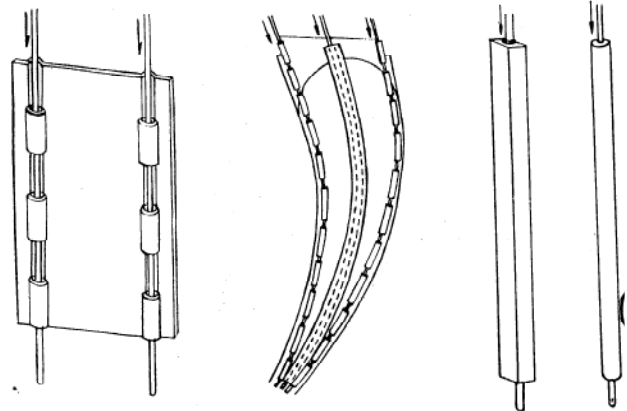


図1 消耗ノズルの形状

おおむね10~20%重量比程度である。

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接に用いられる溶接装置は、エレクトロスラグ溶接法自体、他の溶接法に比較して電源および制御方式に対して敏感でない⁴⁾から既存溶接装置を比較的広い範囲で利用できる。ワイヤ送給機構と電源特性から現在消耗ノズルエレクトロスラグ溶接に用いられているものは⁵⁾、

- 1) 定電圧電源 (AC, DC) 一定速度送給方式
- 2) 交流垂下特性電源—電圧制御方式

であって、サブマージアーク溶接装置や半自動、全自動ガスアーク溶接装置が転用できる。また可搬に便利な専用装置も造られている。

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接で重要な点は、図2の原理図からもわかるように溶け込みを正常に保つためノズルを開先の所定位置にセットし、母材や冷却銅当金に対する絶縁を簡便、確実にすることである。また開先は長尺の水冷銅当金で包囲されているからスラグプールの状態は察知しにくく、溶接の進行と共に銅当金と溶着金属ビード表面間にスラグの膜を形成するため減量して行くスラグプールの深さを常時一定に保つため、フラックスの添加は自動的におこなわれることがのぞましい。

エレクトロスラグ溶接では適正なスラグプールの深さで溶接されない場合、ビードの外観不良や溶込不良を生じる。そのため各方面でノズルの絶縁とフラックスの自

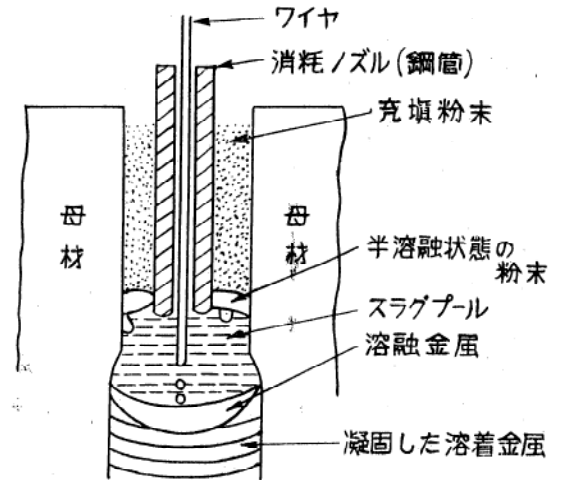
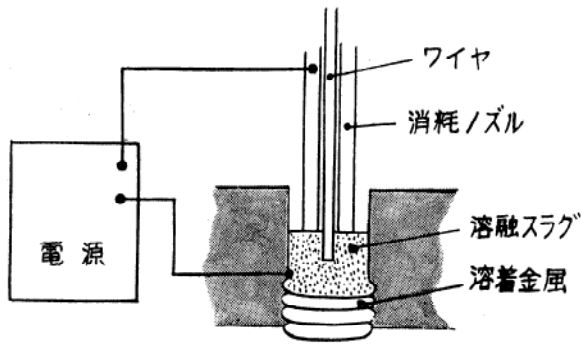


図3 PPC法の溶接状態

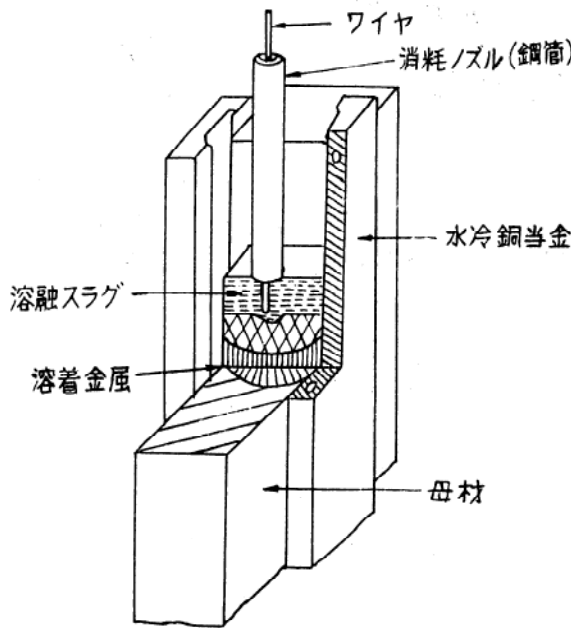


図2 消耗ノズルエレクトスロラグ溶接の原理図

動供給について種々の方法が試られているが、わが国では PPC⁶⁾、BIC⁷⁾、SES⁸⁾ などの方法が開発されている。

次にこれらの溶接法について簡単に紹介する。

2.1. PPC法について

PPC法とは Powder Plug Consumable Nozzle 法の略称で粉末を充填して溶接がおこなわれる。図3に溶接状態を示すが、裸の消耗ノズルを開先内に設置したのち開先間隙へ粉末を投入する。この粉末は造滓剤、脱酸剤、鉄粉などの混物からなっていて絶縁性を保持している。

溶接開始と同時にノズルを通過する溶接電流によって粉末が磁化されて開先内でノズルの周囲に固着するので落下することもなく、ノズルを開先の所定位置に固定する。他方、粉末は溶融スラグからの熱伝導および輻射熱をしゃ蔽するためノズルの過熱が少いから、ノズルの許容電流を増すことが可能となり、あわせて粉末中の鉄粉が溶着金属の一部を形成するので能率が高まる。

溶接開始時は深さ40mm程度のスラグプールを必要とするので、粉末投入前におおむね50~120gr(板厚、開先形状によって異なる)の粒状フラックスを開先底部に入れておく。以後は粉末中の造滓剤がスラグの減少を補ってゆく。

しかしこのような効果は溶接電源として直流を用いるばあいには得られるもので、交流を用いた溶接では溶接が不安定となる。

2.2. BIC法とSES法について

BIC法—Bar Insert Consumable Nozzle法、SES法—Simplified Electro-Slag Welding法ともに交直両電源を用いて溶接することができる。

BIC法は開先内に被覆溶接棒を挿入して溶接する方法で図4に概要を示す。消耗ノズルとして裸の鋼管を用い、前述のPPC法と違って開先間隙には絶縁性の粉末がないため、溶接スタート時にワイヤが母材に突きあたる衝

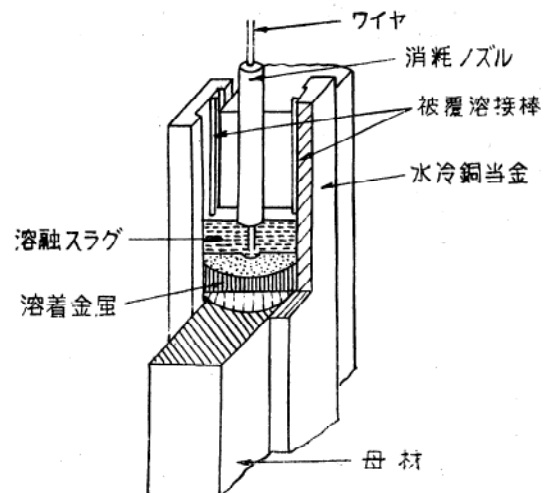


図4 BIC法の概要図

撃や、溶接中に生じる開先間隙の収縮およびノズルセット時のゆがみなどによってノズルが母材や水冷銅当金などへ接触するのを防止するため、ガラス繊維でできたリング（写真1、2）を適当な間隔でノズルにはめる。ガラスリングは熔融スラグ中に溶けこむが溶接に対して悪

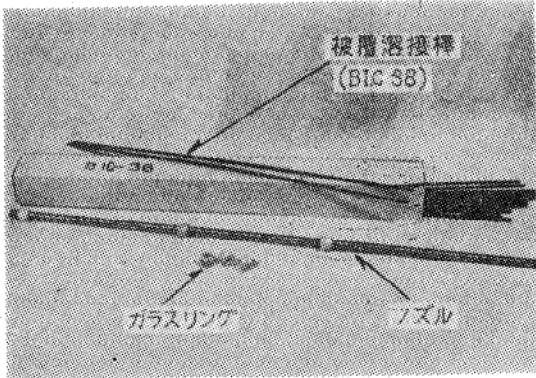


写真1 リング使用状況および被覆溶接棒

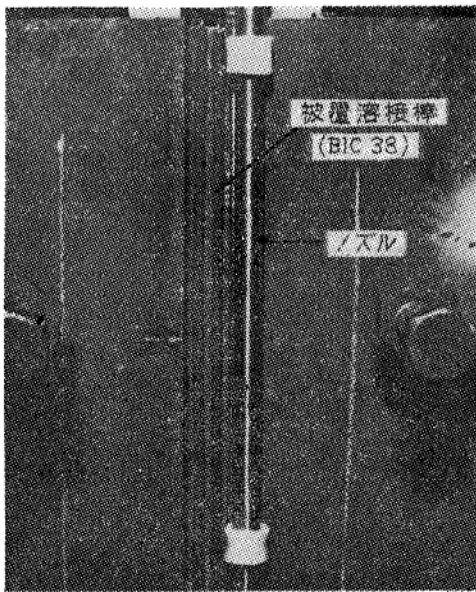


写真2 被覆溶接棒の挿入状況

影響のないものが用いられる。開先に挿入された被覆溶接棒は溶接の進行につれ消耗するスラグ量を自動的に補う目的のものである。

SES法は裸の鋼管の外周に、ちょうど太径の被覆アーク溶接棒のごとくフラックスを塗装したもので、ノズル一体で絶縁とフラックスの自動添加を目的としており米国でもおこなわれている方法である。片面銅当金溶接と両面銅当金溶接に対して被覆厚を変えたノズルを使用する、

3. 消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法の特性

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法は原理的には前記のように通常のエレクトロスラグ溶接法と同様であるが、図1に示したように消耗ノズルはスラグ浴上面に、ほぼ定常的に接触しスラグ浴中にはワイヤのみ送給されている（wet extension）ので通常のエレクトロスラグ溶接に比較した場合、ワイヤのdry extensionがないのでI²R効果によるワイヤの予熱は少く、通常のエレクトロスラグ溶接とは若干異なる特性を示す。

ここでは実験によりその相違点をPPC法とBIC法について検討してみた。

3.1. 溶着速度

エレクトロスラグ溶接は熔融した約40~60mm深さのスラグプールが電導性をもち、ワイヤおよび熔融スラグ中を流れる電流による抵抗熱を利用してワイヤと母材を熔融し鋼材を溶接する。熱量は次式で表わされるよう

$$Q = 0.24VI = 0.24I^2R$$

Q：発生する熱量（cal/sec）

V：ノズルホルダと母材間の電圧降下（volt）

I：溶接電流（Ampere）

R：ノズルとワイヤと熔融スラグの合計した電気抵抗

に溶着速度にもっとも大きく影響するのは溶接電流である。

いっぽうエレクトロスラグ溶接においてスラグプールの発生熱量中、47.8%⁹⁾は母材へ加えられる。PPC法ではこの母材に加えられる熱量の一部とBIC法の場合であれば輻射、対流などで失われてしまう熱量を利用して粉末を熔融することになるのでBIC法に比べて、溶着速度は増加している。それらの関係を図5に示した。BIC法の溶着速度は消耗ノズルとワイヤの熔融量の合計として得られるが、PPC法では添加した粉末中の鉄粉がこれにプラスされるので同一条件のもとで溶熱速度はBIC法に比べて約20~30%程度大きくなる。

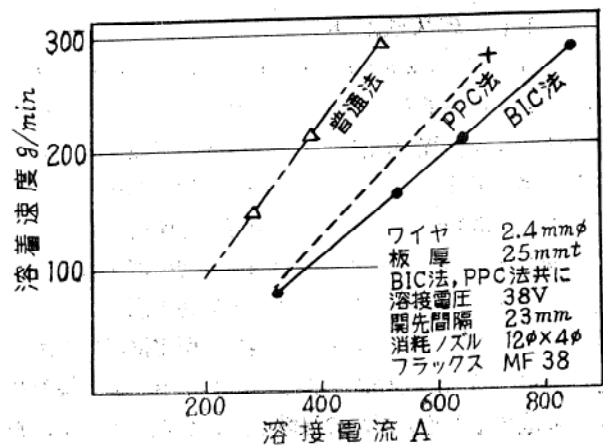


図5 溶接電流と溶着速度

しかし、いずれの場合でも消耗ノズル方式は普通法に比べて溶着速度は低い。

3.2. 溶接条件と溶け込み

通常のスラグ溶接において、溶け込みに影響を与えるものとして溶接電圧、溶接電流、開先間隔、熔融スラグの導電性、スラグ成分、スラグプールの深さ、などがあげられるが溶接電圧、溶接電流と溶け込みについて試験した結果の一例を図6、7に示す。

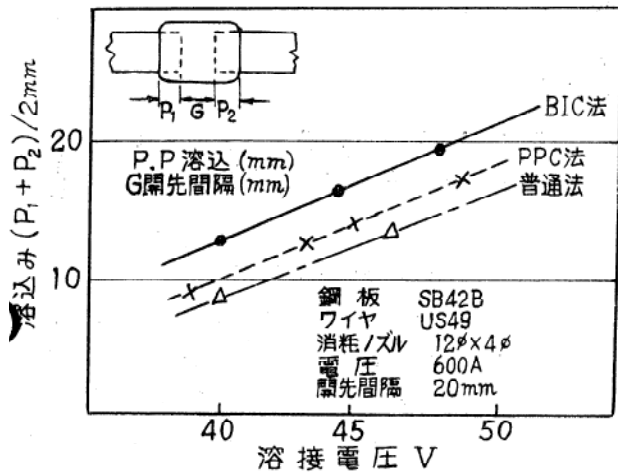


図6 溶接電圧と溶け込み

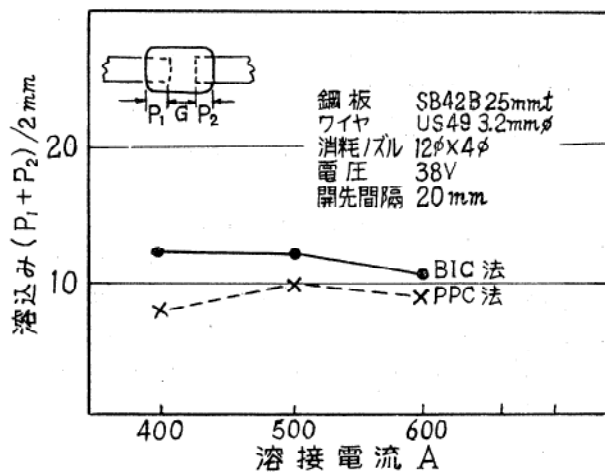


図7 溶接電流と溶け込み

図6は板厚25mmの軟鋼板の溶接において溶接電流とワイヤ径を一定とした時の溶接電圧と溶け込みの関係であるがPPC法、法BICともに、溶接電圧の増加にともなって溶け込みは大になっている。BIC法に比べてPPC法の溶け込みは全般に小さいが、これは溶鋼浴を過熱している熱量の一部が粉末の熔融に使われたためであると考えられる。

溶接電圧、ワイヤ径を一定とした時の溶接電流による溶け込みの変化はほとんど見られず、アーク溶接と異った傾向を示すことがわかる。

3.3. 溶接部の性質

一般に短時間に多量の溶接金属を溶着する溶接法では溶接部の切欠じん性が低下することが多い。この意味でエレクトロスラグ溶接では溶接金属ならびに熱影響部の衝撃値が問題となることがある。しかし最近、40mm以下の鋼材の溶接には適正な溶接材料を使用することによって良好な切欠じん性の溶着金属をうる事が可能¹⁰⁾となった。

図8は板厚32mmの軟鋼をPPC法により溶接した金属の衝撃試験値であるが、もっとも切欠じん性の低いコア部で0℃、2mmVノッチで6Kg-m/cm²以上得られてお

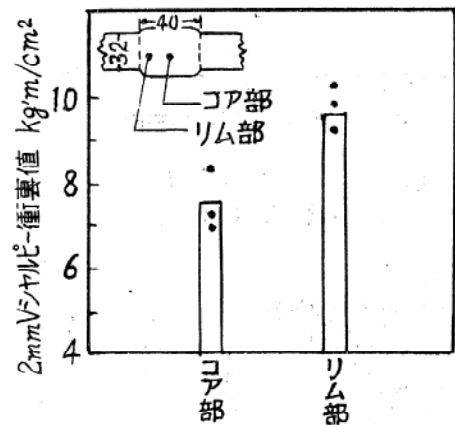


図8 溶着金属のコア部とリム部における衝撃値 (vFo)

り、通常のスラグ溶接と同様にリム部はコア部より高い衝撃値を示している。

また溶接線方向の溶着金属の成分変化について調査した一例を表1に示すが、溶接の始めと終りとは成分に差が認められず、均一な組成であることがわかる。

表1 溶接線方向の成分変化 (%)

スタートからの距離	C	Mn	Si	Mo
95mm	0.11	0.35	1.35	0.05
285	0.12	0.36	1.41	0.05
470	0.11	0.35	1.36	0.06

しかし、前記のように消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法は通常のエレクトロスラグ溶接に比較して入熱が大きいので、30~40mm tの鋼板の溶接施工については熱影響部の切欠じん性などについては特に注意、検討する必要がある¹¹⁾ (図9、10、11参照)

4. 軟鋼および50キ口高張力鋼の溶接試験

鉄骨建築で一般に使用されている SM50A, SM50B, および各鋼種の軟鋼を用いて突き合せ継手, T継手溶接

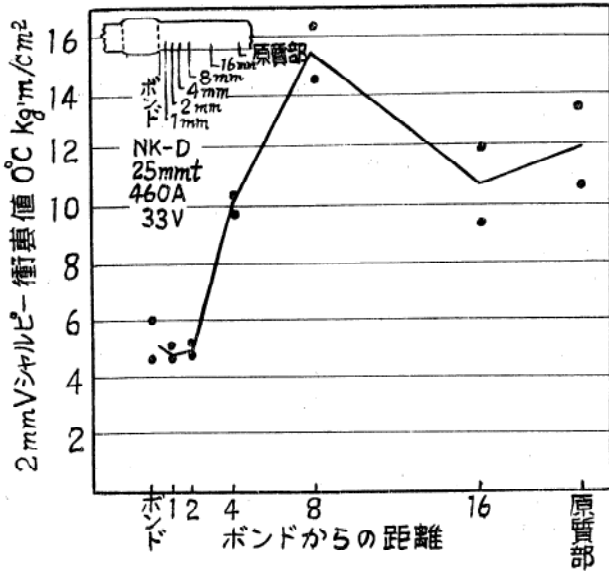


図9 突合せ継手熱影響部の衝撃試験結果 (BIC法)

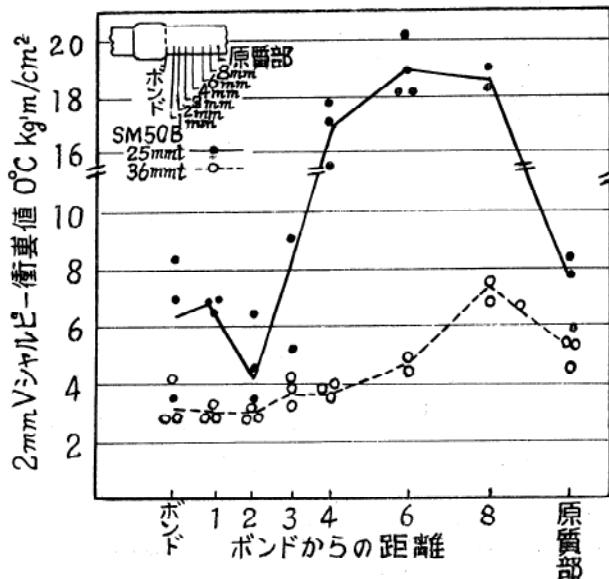


図10 突合せ継手熱影響部の衝撃試験結果 (PPC法)

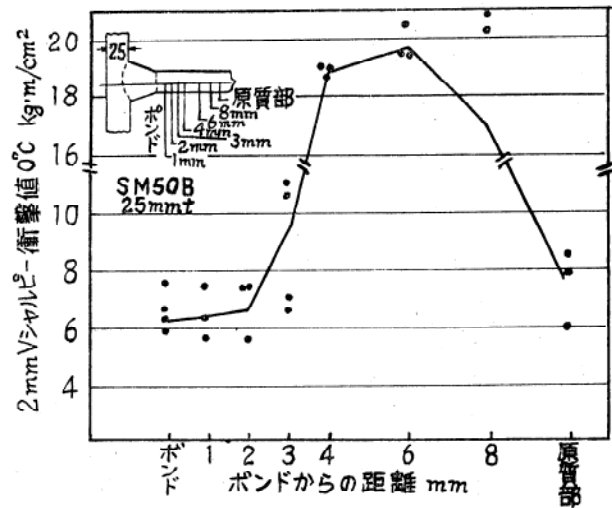


図11 T継手 (25 mm) 熱影響部の衝撃試験結果 (PPC法)

をおこない溶着金属の機械的性質を調査した。溶接条件を表2、表3に、また溶接用材料と溶接材料ならびに溶接金属の化学成分を表4、5、6に示す。溶接用ワイヤはサブマージアーク溶接用のものと薄板のエレクトロスラグ溶接に用いられるものを使用している。

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接によるビード外観は美しく、溶け込みは良好である (写真3、4、5、6 参

表3 溶接条件 (CIC法軟鋼)

開先形状	板厚 mm	ノズル寸法	被覆溶接棒使用状況	電圧 V	電流 A	スラグ深さ mm
	16	10φ×3φ	4.6φ 4本	34	350	35
	20	10φ×3φ	6.3φ 2本	32	450	40
	25	10φ×3φ	6.3R 2本	32	450	40
	32	12φ×4φ	6.3φ 2本	32	510	55

装置 SW-24 潜弧溶接機
電源 KRU-1000 交流アーク溶接機

表2 溶接条件 (BIC法)

開先形状	鋼種	板厚 mm	ワイヤ径	被覆溶接棒使用本数	電圧 V	電流 A
	SM50A	25	US 49 3.2φ	2 (4.6φ×500l)	29~33	480
	SM50A	25	US 49 3.2φ	2 (4.6φ×500l)	30~32	480

|||||||は裏当て帯鋼 ◎はノズル位置を示す

装置: SW-24, 潜弧溶接用

電源: RRU-1000, 交流アーク溶接用

銅当金: 片側

表4 供試材化学成分(%)

種別	寸法 mm	C	Si	Mn	P	S	Mo	
鋼板	SM50A	※12	0.16	0.40	1.43	0.022	0.023	—
	SM50A	25	0.19	0.38	1.16	0.029	0.015	—
	SM50B	25	0.19	0.39	1.23	0.014	0.017	—
ワイヤ	ES50	2.4	0.06	0.25	1.80	0.016	0.012	0.12
	US49	3.2	0.10	0.03	1.55	0.014	0.011	0.50
ノズル	JIS STKM38	12φ×4φ	0.20	tr	0.47	0.020	0.024	—

表5 供試鋼板の化学成分および供試材料

鋼種	板厚 mm	C	Si	Mn	P	S
SM41B	16	0.16	0.04	0.96	0.010	0.023
ロイドA級鋼	20	0.17	0.05	0.85	0.010	0.021
NK-D級鋼	25	0.12	0.28	0.65	0.020	0.027
SS 41	32	0.19	0.05	0.79	0.015	0.026

供試材料

ノズル…10φ×3φ および 12φ×4φ (JIS STKM 38)

ワイヤ…ES50 2.4φ

フラックス…MF38 (20×D) (スタート時に投入する)

被覆溶接棒…BIC38 (被覆径 4.6φ×500/ および 6.3φ×500/)

表6 溶着金属の化学成分

鋼種	板厚 mm	C	Si	Mn	Mo	P	S	N
SM41B	16	0.10	0.20	1.22	0.09	0.015	0.015	0.006
ロイドA級鋼	20	0.12	0.19	1.18	0.07	0.015	0.016	0.007
NK-D級鋼	25	0.09	0.28	1.20	0.06	0.020	0.016	0.007
SS 41	32	0.15	0.19	1.10	0.07	0.018	0.014	0.006



写真3 突合せ継手ピート外観 (BIC法)



写真4 T継手ピート外観 (PPC法)

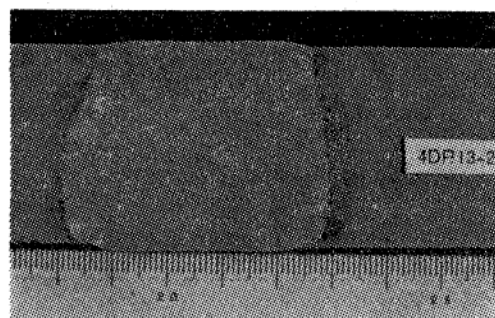


写真5 36mm突合せ (PPC法)

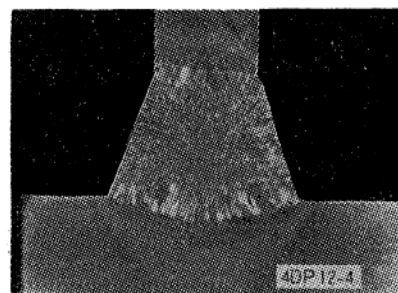


写真6 25mm T継手 (PPC法)

照). 50キロ鋼溶着金属の引張強さは 59~62Kg/mm²で伸びは26%以上得られており、切欠じん性は冷却条件の比較的不利な片側銅当金の溶接で0℃の平均値は6Kg-m/cm²以上を示し良好な性能である。溶接部の硬さ分布に異常は認められない(表7, 8, 図12, 13)。軟鋼溶着金属の機械的性質を表9, 表10に示すがいずれもグレード2の規格を満足する機械的性質が得られている。

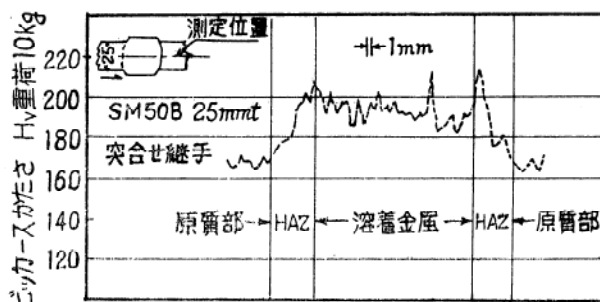


図12 突合せ継手かたさ測定結果

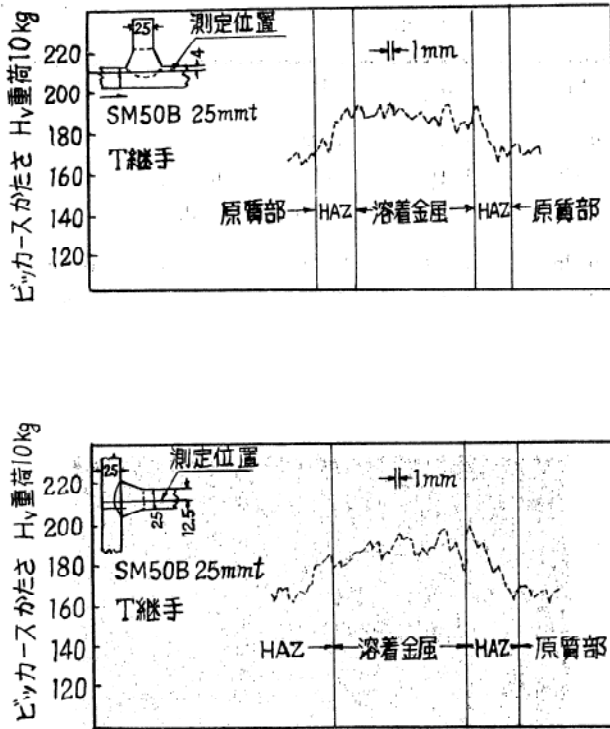


図13 T継手かたさ測定結果

5. 適用

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法は比較的溶接長の短い箇所の溶接の自動化として、鉄骨建築の柱と梁の溶接 (図14, a)¹²⁾、平板継ぎなどに用いられているが以下に示すような適用についても検討が進められている¹³⁾。

5.1. 傾斜溶接

エレクトロスラグ溶接法は一定深さのスラグ浴保持を必要とするため必然的に上進溶接法となるが、溶接線が傾斜している場合もこれに含まれる。

表9 全溶着金属引張試験結果

鋼種	板厚 mm	0.2% 耐力 Kg/mm ²	引張強さ Kg/mm ²	伸び %	絞り %
SM41B	16	37.8	54.8	26	71
ロイドA級鋼	20	37.8	54.8	24	63
NK-D級鋼	25	35.4	56.1	26	67
SS41	32	35.4	55.4	25	67

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接で傾斜溶接をおこなう場合、実験結果によれば水平に対して 40°傾斜の場合まで適用することができる。40°~30°の間では、スタート時に投入するフラックスが溶接線上部から溶接開始部まで落下しないので問題となるが、これを解決する手段としては粒状焼結型フラックスの使用などが考えられる。このような何らかの改善法を用いることにより 20°までの傾斜溶接が可能となる。

ただし板面が垂直、溶接線が傾斜の場合、水平に対して 60°以下の傾斜溶接をおこなうとビード上側にアンダカットを生ずるから補修する必要がある。

5.2. Bottom longi, Deck longi の溶接

船殻構造の溶接作業において高能率化をはかるために Bottom longi, Deck longi b¹⁴⁾の消耗ノズルエレクトロスラグ溶接 (図14, b)¹⁴⁾の採用が検討されはじめている。しかし Bottom longi においてはスタートからの完全溶け込みの問題、Deck longi においては Deck longi から Ceck に至る場合の工作法が確立されずに残っており、現在各所で研究されている。

5.3. 不規則断面のスラグ溶接

ソ連では従来から消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法は溶接線方向に板厚が変化する (たとえば発電用水車翼)

表7 全溶着金属引張試験結果 (BIB法)

鋼種	開先形状	板厚 mm	平行部直径 mm	ゲージ長さ mm	0.2% 耐力 (kg·m/cm ²)	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %
SM50A	突合せ	25	12.49	50	43.2	62.3	26	63
"	T継手	25	12.50	50	38.9	59.8	28	60

表8 衝撃試験結果 (BIC法)

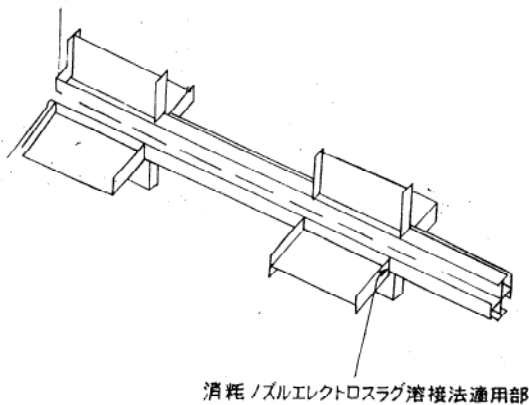
鋼種	板厚 mm	開先形状	採取位置	2mm V シャルピー (kg/mm ²) 0°C					
				1	2	3	4	5	平均
SM 50 A	25	突合せ	溶接線下部*	7.27	7.99	5.87	7.99	9.09	7.6
			溶接線上部*	7.99	5.87	6.22	9.83	9.09	7.8
		T継手	溶接線下部*	6.92	6.92	5.87	6.92	5.87	6.4
			溶接線上部*	5.87	5.53	6.22	6.22	6.92	6.2

*溶接部下部では、スタートから50~150mm、溶接部上部ではスタートから、350~450mmの間で試片を採取

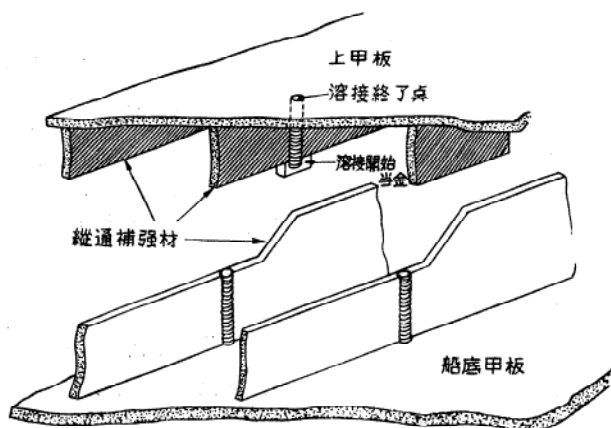
表10 衝撃試験結果 (2 Vサイドkg・m/cm²)

鋼種	-20℃	0℃	20℃
SM41B (16 t)	3.20	6.56	7.99
	4.17	6.92	8.73
	3.84	5.87	9.83
	(3.7)	(6.4)	(8.8)
ロイドA級鋼 (20 t)	3.20	4.85	6.56
	2.57	4.50	8.73
	4.50	5.53	7.99
	(3.4)	(5.0)	(7.7)
NK-D級鋼 (25 t)	3.84	7.99	10.21
	5.19	8.73	9.83
	4.50	8.36	9.83
	(4.5)	(8.3)	(9.6)
SS 41 (32 t)	2.27	4.85	5.53
	3.84	5.53	5.53
	3.84	4.85	6.56
	(3.3)	(5.1)	(5.9)

表中の () 内は平均値



鉄骨柱の溶接



b, ボトム, デッキロンジの溶接

図14 消耗ノズルエレクトロスラグ溶接の適用例

溶接に多用されているようである¹⁵⁾。この場合、銅当金を摺動する必要のない消耗ノズル法の利点が100%発揮できる。

5.4. その他

鋳物の補修溶接や厚肉円筒の円周方向の突き合せ溶接スタート時の溶接などに使用されている。

6. 経済性

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法の最大の利点は上進の被覆アーク溶接に比較してかなりの経済性を期待できる点にある。

表12は鉄骨建築の柱と梁の溶接について継手寸法、開先形状を図15、16とし表11に示す仮定のもとに経済性を

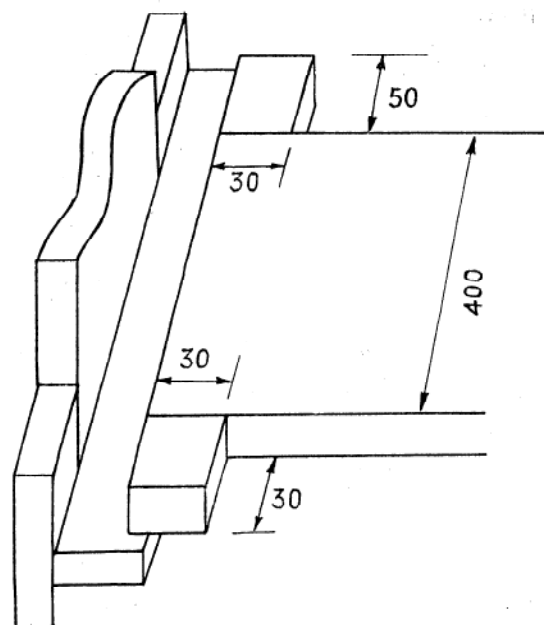


図15 経済性比較計算に用いた継手の例

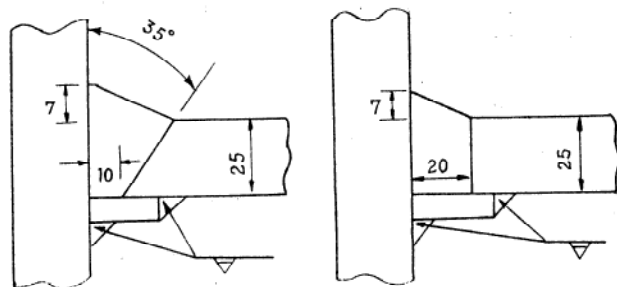


図16 開先形状

表11 経済性比較計算上の仮定

	被覆アーク溶接	消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法
姿勢	上進溶接	上進溶接
板厚	25mm	25mm
溶接用材料	低水素溶接棒 (LB 52 4.0 φ)	ノズル 10φ 被覆溶接棒 (BIC-38) 6.3φ ガラスリング10φ用 ワイヤ 2.4φ フラックス
アーク発生率	40%	30%
人件費	1500-/MAN.H	1500-/MAN.H
溶接工	1人	2人(1組)
電力費	10-/KWH	10-/KWH
設備費	計算外とする	計算外とする
電流×電圧	160A×29V	450A×33V
溶接長	440mm (タブ板を含む)	450mm (タブ板を含む)
溶接量	25g/min	135g/min

比較した一例¹⁶⁾である。

比較的板厚の小さい場合で被覆アーク溶接のX開先の開先断面積と消耗ノズルエレクトロスラグ溶接のI開先断面積とでは、消耗ノズルエレクトロスラグ溶接の経済

表12 経済性の比較

板厚	25 t	
溶接方法	被覆アーク	消耗ノズルスラブ
開先断面積	555mm ²	570mm ²
溶加金属重量	1.93Kg	2.02kg
アーク発生時間	78.5分	15分
溶接時間	196分	50分
溶接材料費	450—	560—
電力費	60—	40—
人件費	4890—	2500—
Total	5400—	3100—

性を期待できぬ場合もあるが、この場合においてもV開先の消耗ノズルエレクトロスラグ溶接の採用、開先準備の単純化、角変形の点など総合的な見地から消耗ノズルエレクトロスラグ溶接法が経済的である場合が多い。

7. あとがき

消耗ノズルエレクトロスラグ溶接は通常のエレクトロスラグ溶接ではあまりメリットのない比較的溶接長が短かく、板厚の薄い場合(溶接長:約1.5m以下、板厚40mm程度以下)に効果的であり、溶接部の性能も良好であることから各方面で検討、実用されはじめ今後、建築、橋梁、造船、造機部門において広く使用されることと思われる。