鑄鉄のエレクトロスラグ溶接 (第1報)

石井勇五郎** 田村 博** 加藤 昇**
手塚佑司** 村瀬光一*** 森下和浩***

Electroslag Welding of Cast Iron (Report 1)*

by Yugoro Ishii**, Hiroshi Tamura**, Noboru Kato**, Yuji Tezuka**,
Koichi Murase*** and Kazuhiro Morishita***

Abstract

A new method for joining cast iron plates is developed utilizing a consumable electroslag welding. Four types of filler materials such as a mild steel wire, a silicon-containing wire, a cored wire containing white cast iron or gray cast iron powder and a meehanite cast iron rod, are used for comparison.

By using a mild steel wire or a silicon-containing wire, it is possible to join cast iron, but a very hard zone due to formation of cementite is produced in the weld metal, and the strength of welded joint is unsatisfactory.

On the other hand, the weld metal obtained by a cored wire or a cast iron rod process contains 3.05 to 3.38% carbon and 1.73 to 2.58% silicon, and is all satisfactory with respect to hardness, strength, colour tone and damped coefficient.

1. 結 言

最近の工作機械はますます大型化しているが、これらに用いられる架構その他のものは多種少量生産されることが多いので、その鑄造コストはかなり割り高となっている。したがってこれらの大型機械を鋼板あるいは単純な形状の鑄物によって溶接構造化すれば、生産コストをかなり低くすることが可能と思われる。しかし鋼板構造の場合はいわゆる振動吸収性が小さいという点で、このような機械類には全面的には受入れられない点があるので、鑄鉄を溶接構造化して作ることができればきわめて好都合である。ところが鑄鉄の溶接は周知のとおり一般に困難であるため、補修溶接以外のいわゆる組立溶接としてはこれまでほとんど行なわれた例がない。エレクトロスラグ溶接は、厚物の溶接に適している以外に先行スラグによる予熱効果や、大入熱による徐冷効果が大きいことから、鑄鉄の溶接にはきわめて適していると考えられる。しかし鑄鉄のエレクトロスラグ溶接についての研究は、軟鋼板を溶加材とした例が外国ではある¹⁾が、わが国ではこれまでのところこのような報告は見られないようである。本報は、鑄鉄の組立溶接への、エレクトロスラグ溶接の適用の可能性を試みる目的で、消耗ノズル

式エレクトロスラグ溶接機を使用して種々の溶接実験を行なったものである。

2. 実験装置ならびに材料

溶接は消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接機 (八幡溶接棒製 SES) を用いて行なった。開先は I 型を用い、開先面はグラインダー仕上げをし、開先間隙は 17~30 mm とした。当て板には黒鉛板または水冷銅板を用いた。この概略を Fig. 1 に示す。鑄鉄母材には大型機械や原子炉のシールドなどに使用されているミーハナイト鑄鉄 GC (規格引張強さ 28 kg/mm²) の 200×150×30 mm のものを主に用いた。溶接方法は、

- (1) 軟鋼ワイヤによる溶接
- (2) 珪素入りワイヤによる溶接
- (3) 充填ワイヤによる溶接
- (4) 鑄鉄棒による溶接

の 4 通りを行なったが、いずれも予熱はとくに行なわなかった。軟鋼ワイヤおよびフラックスは市販のものを用いたが、他のものは本研究のために特別に試作したものである。使用した母材、ワイヤおよびフラックスの成分を、Table 1 に示す。以上の各種溶接方法に対する溶接ワイヤなどの材料の組合せは、大要 Table 2 のものを用いたが、このうち黒鉛化促進のための接種剤や高炭素の溶加鑄鉄棒は、その溶接方法によって適宜加えた。なお、接種剤には黒鉛化係数の高い Si, Al, Ti の鉄化合

*原稿受付 昭和44年11月10日 (42年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

*** 東京工業大学 Student Member, Tokyo Institute of Technology

Table 1 Chemical analysis of welding materials

wt. %

Welding material	C	Si	Mn	P	S	Cu
Mild steel wire Y-CS 2.4 mm ϕ	0.08	0.30	1.47	0.016	0.009	—
Silicon contained wire 2.8% Si, 2.4 mm ϕ	0.10	2.6~3.0	0.4~0.6	0.020	0.023	0.15
Cored wire (Sheet only)	0.05	0.01	0.33	0.011	0.016	0.03
Meehanite cast iron (Base metal)	3.35	1.75	0.69	—	—	—
Cast iron nozzle or filler metal rod	4.50	1.20	0.17	—	—	—

wt. %

Welding flux	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂
YF-15A	42.5	15.1	24.9	2.17	6.82	—
YF-40	39.4	42.3	6.8	3.00	—	8.0

Table 2 Combinations of welding materials in various electroslog welding processes for cast iron

Welding Process	Welding wire or rod	Nozzle	Flux	Inoculant	Welding source
Mild steel wire	Mild steel wire Y-CS, 2.4 mm ϕ	Mild steel SES-15B	YF-15A	none	AC350~450 Amp,
Silicon contained wire	Silicon contained wire 2.4% Si, 2.4 mm ϕ	Cast iron 4.5% C	YF-15A	C Fe-Si Fe-Al Fe-Ti Ca-Si Al (wire)	
Cored wire	Cored wire 4.5 mm ϕ A: White cast iron Powder B: Grai cast iron powder	Graphite	YF-40	—	DC400~500 Amp. Straight polarity
Meehanite cast iron rod	Meehanite cast iron rod	none	YF-40	none	

* Cast iron rods (4.5%C) are added as filler metals, other than above welding materials.

Fig. 1 Schematic view of electroslog welding.

物と, Ca-Si などを用いた.

3. 軟鋼ワイヤによる溶接

3.1 実験方法

鋳鉄のエレクトロスラグ用ワイヤは現在製造されていないので, まず市販の軟鋼ワイヤおよび軟鋼ノズルを用

いて実験した. 溶接条件は Table 3 の通りであったが, 鋳鉄板が本実験に使用した範囲の板厚および大きさでは溶接割れも発生せず, 比較的容易に溶接ができた.

3.2 冷却速度の測定

鋳鉄の溶接では冷却速度をできるだけゆるやかにして溶接金属の白鈍化を防ぐことが必要である. そこで当て板には水冷銅板のほかに黒鉛板を使用して溶接した. 当て板および母材板厚を変えた場合の溶接熱影響部の冷却速度を, 溶接電流 350A, 400A および 450A の場合について測定した. Fig. 2 はそのうちの 400A の場合の測定例である. 冷却速度は当然ではあるが当て板に黒鉛板を用いたものよりも水冷銅板を用いた方が速い. また水冷銅板を用いた場合は, 同じ溶接電流では, 単位体積当りの冷却表面積が大きい板厚 20 mm の方が, 30 mm の場合より急冷された. 一方溶接電流を変えた場合は, 400A と 450A とでは大差なかったが, もっとも電流の低い 350A の場合の方がかえって冷却がゆるやかであった. これは 350A の場合は電流の低下以上にワイヤの送給速度が遅くなったため, 単位溶接長に加えられた熱量がかえって増大したと思われる.

3.3 組織ならびに硬さ

以上のように電流, 電圧, 当て板および板厚を変えて

Table 3 Welding conditions used in mild steel wire process

Plate thickness (mm)	Standard root opening (mm)	Nozzle dia. (mm)	Welding wire (mm)	Welding Current (Amp)	Welding Voltage (Volt)
20	17	8φ	Y-CS	350	35
			2.4φ	400	40
				450	40
30	22	10φ	Y-CS	350	35
			2.4φ	400	40
				450	40

Graphite or Water cooled copper block

Table 4 Results of chemical analyses of weld metals (mild steel wire process)

Specimen	Check position	Chemical analysis (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ceq*
Graphite block 30 mm, 400A, 40V	1	1.91	1.18	1.05	0.032	0.048	0.15	2.30
"	2	1.90	1.08	1.05	0.032	0.048	0.15	2.23
"	3	2.03	1.18	1.05	0.035	0.054	0.15	2.39
Graphite block 20 mm, 400A, 40V	2	1.77	1.08	1.14	0.034	0.047	0.14	2.10
Graphite block 30 mm, 350A, 35V	2	1.79	1.12	1.09	0.032	0.047	0.15	2.14
Graphite block 30 mm, 450A, 40V	2	1.47	0.93	1.06	0.028	0.047	0.13	1.75
Copper block 30 mm, 400A, 40V	2	1.81	1.04	1.04	0.032	0.052	0.15	2.13
Base Metal		3.20	1.40	0.69	—	—	—	3.90

* Ceq (%) = C% + 0.3 (Si% + P%)

Check position in a specimen

Fig. 2 Time-temperature curves.

エレクトロスラグ溶接を行なった場合について、各溶接部の組織および硬さをしらべた。溶接部の硬さはいずれも機械加工が困難なほど高く、冷却速度の差による効果はほとんどみられなかった。

Fig. 3 Micro-hardness of electroslog weld. Mild steel wire process.

エレクトロスラグ溶接部の横断面についての硬さ分布の一例を Fig. 3 に示す。この程度の冷却速度と C および Si 量では、溶融金属が凝固するときに白鉄化し、以後ある程度徐冷してもセメントサイトを分解することができないものと思われる。

溶接金属の分析結果を Table 4 に示す。これらによると C 1.47~2.03%, Si 0.93~1.18% であって、この

程度の C および Si 量では Maurer の組織図などからも知られるように完全に白鋳鉄の領域に入っている。なお、この Maurer の組織図は溶湯を 75 mmφ の乾燥砂型に鋳込んだ場合の組織図であるから、エレクトロslag溶接とはいえ溶接の際の冷却速度より一般にはもちろんゆるやかである。

以上のことから鋳鉄を軟鋼ワイヤでエレクトロslag溶接する場合は、冷却速度を極端におそくするか、かなりの量の C および Si を添加しないかぎり、硬さの低い溶接部は得られないことが知られる。

3.4 焼なましの影響

硬化した溶接部の機械加工を容易にするため、焼なましによってどの程度軟化できるかを調べた。Fig. 4 および Photo. 1 は溶接部を 700°C および 900°C で4時間加熱後炉冷したものの硬さならびに組織である。700°C 焼なましでは硬さの低下はほとんど認められなかったが、900°C では溶接部に黒鉛が析出し硬さも300ピッカースまで低下して機械加工も容易になった。しかし 900°C で焼なましたものは、鋳鉄母材の地までフェライト化しており、強度上適当でない。

3.5 溶込み率

鋳鉄は鋼材に比べて融点が低く、また熱伝導率その他の性質が異なるので、溶込み率* が軟鋼などと相異なるものと思われた。しかし実測したところでは溶込み率は 0.46~0.63 程度となり、一般鋼材の溶込み率 0.4~0.7 と

【Fig. 4】 Effect of annealing on hardness of electroslag weld. Mild steel wire process. Graphite block, Plate thickness 30 mm, 40 Amp, 40 Volt.

$$\text{溶込み率} = \frac{A_1 + A_2}{A_1 + A_2 + B}$$

Photo. 1 Micro-structure of electroslag welds by mild steel wire process. Graphite block 40V, 400A.

(A) As welded $\times 100 \times 2/3$

(B) After annealing (900°C x 4hr)

$\times 100 \times 2/3$

同程度に押えることができた。

3.6 引張試験

エレクトロslag溶接部の接手性能を調べるため、板厚 20 mm および 30 mm の鋳鉄板に、当て板に黒鉛板を用い 400 A, 40 V で溶接したままのものと、それを 700°C で焼なましたものについて引張試験を行なった。

その結果を Table 5 に示す。試験片の形状は Table 5 の A 型のほか、溶接部で破断させるため B 型のもも使用した。白鈍化のため硬さが極めて高く加工が困難で、実験数は少ないが、溶接部の強度にはかなりのバラツキが予想される。

なお、700°C 程度の焼なましによっても鋳鉄母材強度 (28 kg/mm) が多少低下するようである。

3.7 総括

軟鋼ワイヤによる鋳鉄のエレクトロslag溶接は、本実験に使用した程度の条件のもとでは、溶接割れも特に発生せず比較的容易であった。ただし溶接金属の成分が C1.47~2.03%, Si0.93~1.18% 程度と低いため、硬さが 400 ピッカース以下に下らず、機械加工はきわめて困難である。

700°C 4 時間程度の焼なましでは有効な硬さの低下は認められない。また 900°C 4 時間の焼なましでは 300 ピッカースまで硬さが低下したが、母材中のパーライトまでフェライト化し適当でなかった。

Table 5 Tensile test results

Plate thickness (mm)	Treatment	Type of specimen	Tensile strength (kg/mm ²)	Position of fracture
30	as welded	A	27.0	Base metal
		B	16.3	Weld metal
30	annealing 700°C×4hr	A	16.4	HAZ
		B	25.1	Base metal
20	as welded	A	33.6	"
		B	51.6	Weld metal
20	annealing 700°C×4hr	A	25.6	HAZ
		B	26.0	Base metal

以上溶接部は、白鈍化のため非常に硬く、脆くなるため機械加工を必要としないもので、強度上あまり重要でない場合とか、圧延ローラー等の肉盛には使用できそうである。

4. 珪素入りワイヤによる溶接

4.1 実験方法

次に溶接部の C および Si 量を高めて黒鉛化を促進させるため、軟鋼ワイヤの代りに高珪素ワイヤ (C0.1% Si2.8%), 軟鋼ノズルの代りに高炭素鑄鉄ノズル (C4.5%, Si 1.2%) を用いた。また高炭素鑄鉄ノズルには 2 本の高炭素鑄鉄棒をいっしょに溶解するように抱き合わせ、さらに黒鉛粉末、Ca-Si、Fe-Si、Fe-Ti、Fe-Al 金属アルミなどの接種剤を、それぞれ水ガラスでフラックスといっしょに塗布したものを使用して、鑄鉄のエレクトロスラグ溶接を行なった*。

Fig. 5 にノズルの断面形状とその溶接状況の概略を示す。ただし、Ca-Si の場合は水ガラス水溶液と反応して分解するので、2 本の溶加鑄鉄棒を中空の鑄鉄ノズルに代え、その筒の中に Ca-Si を充填して溶加した。また金属アルミの場合は、棒状のものをノズルに結びつけ、ノズルと共に溶解した。

溶接材料の組合せと、接種剤の添加の割合、およびそれによる溶接金属の分析値を Table 6 に示す。

Fig. 5 Schematic view of electroslag welding by silicon-containing wire process.

なお Ca-Si、Fe-Si、Fe-Al、および Fe-Ti 中に Ca、Si、Al、Ti などの各成分が含まれる割合はすべて約 50% である。そのため溶込み率が 0.5 の場合の計算上の各成分増加量は、接種剤添加量の 1/4 程度となる。

4.2 溶接金属中の C ならびに Si 量

Table 6 に示したように、溶接中に接種剤として Ca-Si を添加したものは、接種剤を加えない場合の C 量 (約 1.64%) よりすべて C 量が少ない。これは Ca-Si を加えたものはスラグが土塊状に変化したため、母材を溶解するだけの発熱量が得られなかったためと思われる。また黒鉛粉末を添加した時も同様に、スラグが土塊状に変質したので実験を中止した。

* 全溶加金属に対する鑄鉄ノズルおよび鑄鉄棒を溶加した割合は約 20% である。お 20% 以上溶加した場合は、母材への溶込み不足が生じた。

Table 6 Inoculants contents added in flux and results of chemical analyses of weld metals by silicon contained wire process.

Sign	Inoculant in flux (%)		Chemical composition of weld metals (%)		
			C	Si	Ceq*
C-04	C	0.4			
C-08		0.8			
C-12		1.2			
Ca-02	Ca-Si	0.2	1.51	2.36	2.31
Ca-04		0.4	1.61	2.46	2.43
Ca-06		0.6	1.29	2.61	2.17
Si-05	Fe-Si	0.5	1.60	2.47	2.43
Si-10		1.0	1.92	2.26	2.68
Si-15		1.5	1.92	2.34	2.71
Al-01	Fe-Al	0.1	2.08	2.16	2.81
Al-07		0.7	1.92	2.32	2.72
Al-40		4.0	1.94	2.76	2.47
Ti-01	Fe-Ti	0.1	1.88	2.25	2.64
Ti-02		0.2	1.70	2.25	2.46
Ti-03		0.3	1.78	2.22	2.53
MAI-05	Al (wire)	0.5	1.99	2.21	2.78
C-0	none	none	1.64	2.28	2.41

$$* \text{Ceq} (\%) = \text{C} + \frac{1}{3} \text{Si}$$

Fig. 6 Effect of various inoculants on weld metal hardness.

また Fe-Al 0.1% 添加の Al-01 がもっとも黒鉛量が高い。これはこの場合の溶接部の冷却速度が他のものよりゆるやかであることから、内部でテルミット反応がおこり、その発熱により母材の溶融量が増大したためと考えられる。しかし Fe-Al の添加量をあまり多くすると、やはりスラグを土塊状に変質させ発熱量を低下させた。

4.3 接種添加物による硬さ、ならびに組織変化

以上種々の接種添加物の組合せについて行なった溶接部の硬さ分布の一例を Fig. 6 に示す。接種剤の硬度の低下に対する効果は若干認められるが、まだ、かなり高かった。各溶接部の組織を Photo. 2 に示す。部分的

Photo. 2 Micro-structure of electroslag welds by S-containing wire process.

- (A) MAI-05 ($\times 50 \times 2/5$)
- (B) MAI-05 ($\times 200 \times 2/5$)
- (C) Al-01 ($\times 200 \times 2/5$)
- (D) Ca-04 ($\times 200 \times 2/5$)

に片状、あるいは球状黒鉛の析出がみられるが、母材の黒鉛と比べるとかなり少なく、白鉄、レデライトのような硬い組織も多く見られる。

4.4 総括

高珪素ワイヤ、高炭素鋳鉄棒を溶加することによってエレクトロスラグ溶接金属の C 量は 1.29~2.08%, Si 量は 2.16~2.76% と軟鋼ワイヤの場合よりじゃっかんの

増加を示した。しかし黒鉛の析出は少なく硬さも期待したほど低下していない。接種剤の効果はわずかに認められるが、一部の接種剤は溶解してスラグを土塊状にし、全体としてはマイナスの面が多い。

以上のことから溶接金属中のセメントサイトを黒鉛化して硬さを下げるためには、まだかなりの量の炭素を添加しなくてはならないことが知られた。

5. 充填ワイヤによる溶接

5.1 鑄鉄ノズルによる溶接

以上は主として鑄鉄母材中に含まれている黒鉛の稀釈によって溶接金属中の黒鉛量を高めようと試みたものであるが、この方法では鑄鉄母材と同程度の材質を得るにはきわめて不十分である。そこでリボン状鋼帯を用いてこれを管状に成形し、その内部に

(1) 白鑄鉄粉末

(2) ねずみ鑄鉄粉末

の2種の粉末に、さらに若干の C, Fe-Si, Fe-Al, Fe-Ti などの接種剤を加えたものを充填したいわゆる充填ワイヤを作り、これによってエレクトロスラグ溶接を行った。

以上の各種溶接材料の組合せおよびそれによる溶接金属の分析値を Table 7 に示す。Fe-Si は Si 源として特に大量添加した。なおすべての C を黒鉛の形で添加することも試みたが、溶接金属への歩止りが悪い上に、スラグへの溶解量も増し、スラグが土塊状に変質したので中止した。

ノズルは、最初はこれまでのように鑄鉄ノズルを用いたが、母材間隙が 30 mm 以下では側面に向かってアークが発生し、溶接不良となった。特に黒鉛粉末の充填量

の多いワイヤを用いた場合は、アークの発生とともにガスの発生も多く、溶融スラグがかなり飛散した。またアークが発生しないようにワイヤの送給速度を大にした場合は、ワイヤ（主に充填粉末）の溶融不良および母材への溶込み不良が生じ、良好な溶接は得られなかった。

これらの主な原因としては Fig. 7 に示すことが考えられる。すなわち充填ワイヤがスラグ中に入った時に電極を兼ねている充填ワイヤは、その外側の被覆金属だけが急速に溶融する。そのため、ワイヤ中の充填金属粉は露出され、未だじゅう分に溶けないうちに溶融金属浴の中に落込んでしまう。その結果充填ワイヤが電極として作用する時間が著しく短くなるので、ワイヤの送給速度を必要以上に上げないとアークが発生する。しかしアークが発生しない程度にワイヤの送給速度を上げて溶接を継続させても熱量が不足してじゅう分な溶け込みが得られないので、結局、鑄鉄ノズルを用いた場合は満足な溶接はできなかった。

Fig. 7 Melting state of cored wire in slag pool under use of consumable nozzle.

Table 7 Filler metal powder contents added in cored wire and results of chemical analyses of weld metals by cored wire process,

Sign	Filler metal powder and inoculant in cored wire			Chemical analysis of weld metal (%)				
				C	Si	Al	Ti	Ceq*
W-C-O	White cast iron powder (42%)	C	0%	3.05	2.08			3.75
W-C-10			1	3.27	2.41			4.08
W-C-20			2	3.38	2.58			4.25
W-Al-02	Fe-Si (2.5%)	Fe-Al	0.2	3.14	2.01	0.01		3.82
W-Al-10			1	3.23	2.00	0.01		3.91
W-Al-40			4	3.15	2.04	0.06		3.84
W-Ti-01	Fe-Si (2.5%)	Fe-Ti	0.1	3.23	2.02		0.034	3.91
W-Ti-04			0.4	3.14	2.05		0.041	3.83
W-Ti-20			2	3.40	2.53		0.19	4.25
G-C-10	Gray cast iron powder (32%)	C	1	3.17	1.73			3.76
Al-10		Fe-Al	1	3.17	2.04	0.01		3.86
Ti-04		Fe-Ti	0.4	3.15	1.89		0.038	3.79

* Ceq(%) = C + $\frac{1}{3}$ Si

5.2 黒鉛ノズルによる溶接

以上の理由のため鑄鉄製ノズルを用いることは止め、Fig. 8 のように黒鉛製ノズルを使って実験した。

ワイヤの送給速度は制御せずに一定とし、黒鉛ノズルと母材間の電圧を 35~40 V と一定に保つように黒鉛ノズルを上下させた。この場合の溶接電流は 500 A 程度であった。電源は黒鉛ノズルの消耗をより少なくするため直流溶接機を正極性にして用いた。

黒鉛ノズルは今までの鑄鉄ノズルと異なって消耗しにくいので、ノズルをスラグ浴の中に入れたまま電極として用いることができる。このように電流をワイヤの他に黒鉛ノズルからも常に供給できるようにしたため、ノズルを通過するワイヤの供給速度を極端に遅くした場合でも、アークが発生することなく常にスラグを適正な溶融状態に保ち溶接することができた。

5.3 エレクトロスラグ溶接部の硬さ

Fig. 9~11 にこのような黒鉛ノズルを用いて鑄鉄をエレクトロスラグ溶接したものの硬さを示す。すなわち、Fig. 9 はベース金属粉中の黒鉛粉末の量、Fig. 10 は Fe-Al の量、Fig. 11 は Fe-Ti の量をそれぞれ変えた時の溶接部の硬さ分布であるが、それぞれ接種剤を多く加えたものほど順次硬くなっている。黒鉛粉末の添加量を変えた場合の溶接金属中に含まれる黒鉛の量は添加量の増加に伴って増しているが、黒鉛の増加に伴って硬度が上昇すると言う一般とは逆の現象が見られた。またねずみ鑄鉄粉充填ワイヤによる溶接も同様に硬度が高かったが、これも鑄鉄粉中の遊離黒鉛によって、あたかも粉末状態の黒鉛の添加量が増加したのと同様な欠陥(黒鉛粉末によるスラグの変質など)が現われたものと思われる。

Fig. 12 は以上の3種の溶接方法によるエレクトロスラグ溶接部の硬さ分布の中から、それぞれのうちで硬さの低下に大きな効果のあったものを選んで、各種溶接方

Fig. 8 Principle of electroslag welding by graphite nozzle.

Fig. 9 Effect of carbon powder contents on weld metal hardness. Cored wire process.

Fig. 10 Effect of Fe-Al powder contents on weld metal hardness. Cored wire process.

Fig. 11 Effect of Fe-Ti powder contents on weld metal hardness. Cored wire process.

Fig. 12 Effect of various welding processes on weld metal hardness.

法の比較を行なったものである。軟鋼ワイヤと珪素入りワイヤによる溶接部の硬さはそれ程大差はないが、充填ワイヤによるものは著しく硬さが低く、铸铁母材の硬さとほぼ同じになっている。

なお、浸炭した鉄粉を充填したワイヤによっても溶接を行なったが、浸炭鉄粉中の炭素の量が8.7%と最も高い材料でありながら、硬さは350Hv以上であった。

これは、炭素のかかなりの量が浸炭鉄粉の周囲についただけの遊離黒鉛であったこと、およびそのためのスラグの劣化による発熱量の減少が主な原因であると思われる。

5.4 溶接部の組織

各種充填ワイヤを用いて行なったエレクトロスラグ溶接部の組織の代表例を Photo. 3 に示す。

Photo. 3-(A) は白铸铁粉末と Fe-Si だけを充填した W-C-0 によるもので、熱影響部は片状黒鉛であり、急

冷硬化組織は見られない。(B) は (A) の溶接金属の拡大写真である。(C) は (B) に黒鉛粉末を2%添加した W-C-20 の場合である。(B) に比べると黒鉛の大きさは (C) の方が大きい、硬さはかえって高い。(D) は Fe-Ti を0.4%充填した W-Ti-04 のワイヤによるものであるが、Fe-Ti 入りのものはほとんどこのような共晶状黒鉛が析出している。(E) は Fe-Al を1%充填した W-Al-10 で黒鉛は比較的大きなものが多い。

Photo. 4 は同じく溶接金属の細胞(cell)写真の1例を示す。一般に細胞の大きさは铸铁の諸性質、とくに強度と密接な関係がある²⁾といわれている。本実験結果では黒鉛量が増すほど細胞はやや大きくなっているが、強度や硬さとの間にははっきりした関係は見出せなかった。

なお、以上のエレクトロスラグ溶接部はすべて、その境界部が判別できないほど色調に差はなかった。

5.5 溶接部の引張試験

Fig. 13 の上図に引張試験片の採取位置および形状を示す。溶接境界部の断面積を小さくしたB型でも境界部から破断したものは少ない。図13の下図に溶接部および境界部の破断応力と溶接金属の平均硬さを示した。溶接部、境界部ともほとんどのものが母材の平均応力(28 kg/mm²)より高く、優れた接手性能を示している。特に白铸铁粉末に Fe-Si だけを加えた W-C-O が硬さが低く、強度は高く良好であった。

5.6 溶接金属の分析結果

Table 7 に充填ワイヤによる各種エレクトロスラグ溶接金属の分析結果を示した。

Fig. 14 の (A) は純鉄粉と黒鉛粉末をいろいろの割合で添加して試作した充填ワイヤを、黒鉛ノズルを用いて銅ルツボの中で溶解した場合の、黒鉛添加量とその溶

Photo. 3 Shapes of graphite in weld metals by cored wire process.

- (A) W-C-0 ($\times 50 \times 2/5$)
- (B) W-C-0 ($\times 200 \times 2/5$)
- (C) W-C-20 ($\times 200 \times 2/5$)
- (D) W-Ti-04 ($\times 200 \times 2/5$)
- (E) W-Al-10 ($\times 200 \times 2/5$)

Photo. 4 Cell structure of electroslag weld metals of cast iron made by cored wire process.

- (A) W-C-O ($\times 50 \times 2/5$)
 (B) W-C-10 ($\times 50 \times 2/5$)
 (C) W-C-20 ($\times 50 \times 2/5$)

Fig. 13 Results of weld joint strength and hardness when welded by cored wire process.

* broken at weld metal or base metal.

融金属の分析値との関係である。黒鉛粉末の添加量が0のときでも、その溶融凝固金属中の黒鉛量が約2%となっていることは注目に値する。これは電極に黒鉛ノズル

Fig. 14 Relation of C, Al or Ti additions in cored wire and C, Al or Ti analysis in weld metal.
 (A) Melting in crucible filler materials; carbon+mild steel powder.
 (B) Welding filler materials; carbon+white cast iron powder.
 (C) Welding filler materials; carbon+white cast iron powder+Fe-Ti or Fe-Al

を使用したため、ノズルからも黒鉛が溶加されたことを示している。

また充填ワイヤ中に添加した黒鉛粉末の量が増すにつれて、溶融金属中の黒鉛の分析値も増しているが、黒鉛粉末を3.5%添加したものはかえって低下している。これは黒鉛粉末の増大により、スラグが土塊状に変質するなどの悪い面が現れたためと思われる。なお新たに鑄鉄に溶け込むことができる黒鉛の量は、その鑄鉄に先に含まれているC量およびSi量によって左右されるので、黒鉛ノズルから常に約2%のCが溶加されるとは限らない。

Fig. 14の(B)は白鑄鉄粉にFe-Siを2.5%加えたもの(Table 7のW-C-O)を基本にして、これに黒鉛粉末を1%および2%添加した充填ワイヤを作り、これと黒鉛ノズルを用いて実際に鑄鉄を溶接した場合の溶接金属の分析値である。黒鉛粉末の添加量が0の場合は、充填ワイヤの中の白鑄鉄粉末に含まれる黒鉛、および母材からの黒鉛の移動を考慮して(溶込み率を0.5として)、歩止りを100%と仮定しても計算上は2.6%C以上にはならないが、黒鉛分析値は3%以上になっている。したがって、このような高炭素、高珪素の溶融金属に対してもなお黒鉛ノズルからかなりの量の黒鉛が溶加されることが知られる。

なおこの場合も黒鉛粉末の添加量が増すにつれて、溶接金属中の黒鉛量もわずかながら増加している。Fig. 14の(C)は(B)と同様に実際に鑄鉄をエレクトロスラ

グ溶接した場合の Al と Ti の添加量と溶接金属の分析値を示す。Al と比べると Ti の歩止りがかなり良いことが知られる。

5.7 黒鉛ノズルを用いたエレクトロスラグ溶接のスタート法

一般のエレクトロスラグ溶接の大きな欠点の一つにスタート時の母材の融合不良があるが、その主な原因の一つに消耗ワイヤが主電極を兼ねていることがあげられる。すなわち、スタート時に母材の温度が未だ低く、スラグが溶けていない状態にある時でも続けてワイヤを送給しなければ溶接が継続できないことにある。

しかし黒鉛ノズルを用いた場合黒鉛ノズルが電極となるので、ワイヤの送給は、スラグが溶融し母材の温度が十分高くなってからスタートさせることが可能なため、スタート部の溶込みは大きい。Photo. 5 はスタート部の下当金への溶込みを示す。なお、黒鉛のかわりにタンゲステン電極を用いても同様な効果が期待できる。

5.8 溶接電流、スラグ深さ等の影響

黒鉛ノズルを用いたエレクトロスラグ溶接では、電流、スラグ深さ、およびワイヤ送給速度などを変化させることによって、予熱効果および溶込み巾が目立って変化することが観察されている。

すなわち Fig. 15-(A) はスラグを深くして電流を小さくした場合で、いくら長時間電流を流してもスラグ中の熱の発生と母材への熱移動とが釣り合ってなかなか融点に達しない。そのまま電流を大きくすると (B) のように母材が溶けるようになるが、電流のかんりの量がノズルの側面から予熱源として流れるので、電流の大きな割には溶込みは小さい。(C) はスラグ量を少なくした場合で一般のエレクトロスラグ溶接に一番近いが、この場合でもワイヤの送給速度を遅くすることによって、予熱効果をあげることができる。ただし、この場合は電流を幾分小さくしないと、溶込み巾が次第に大きくなるので注

Photo. 5 Good penetration appearing at the start of electroslog welds by cored wire process with graphite nozzle.

Fig. 15 Relation between slag depth and welding current when welded by graphite nozzle.
C, current—Moderate, slag depth—Low
A, current—Low, slag depth—High
B, current—High, slag depth—High
C, current—Moderate, slag depth—Low

意が必要である。なおこの方法によると、30 mm の板厚のものを溶接するのに $15 \sim 65 \text{ cm/h}$ ($5,000 \times 10^3 \sim 1,000 \times 10^3 \text{ Joul/cm}$) の速度で溶接することができたが、これは一般のエレクトロスラグ溶接の速度 150 cm/h ($480 \times 10^3 \text{ Joul/cm}$) の数倍の入熱に相当する*。

5.9 溶接金属の減衰能の測定

鋳造性、油の吸収性とともには鉄の重要な特性である減衰能を溶接金属について測定した。

溶接金属から削り出した $3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ の板状の試料の片端を支持台に固定してから周囲を真空にし、試料の他端に打撃を与えた時の減衰振動を板の中央部の裏表に貼った抵抗線歪ゲージによって検出し、オシシログラフに記録した。

この場合記録された振動の最初の振巾を A_0 , n 番目の振巾を A_n , 対数減衰率を Δ とすると、

$$A_n = A_0 e^{-n\Delta} \quad \therefore \Delta = -\frac{1}{n} \ln \frac{A_n}{A_0}$$

と表わされる。

以上の各種溶接方法により得られた溶接金属の減衰能、およびこれによって求めた対数減衰率 Δ は Fig. 16 のようになる。軟鋼ワイヤによる溶接金属はミーハナイト鉄母材よりもむしろ軟鋼材に近い減衰率を示したが、充填ワイヤによる溶接金属はミーハナイト鉄母材とほとんど同じ値で、振動吸収性の点でも十分満足できる結果が得られた。

5.10 総括

試作した充填ワイヤを一般の消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接機を使って溶接した場合は、アークが発生してエレクトロスラグ溶接が不可能であった。特にワイヤ中に黒鉛粉末を多く充填したものでは、ガスおよびアークが発生してスラグが飛散し溶接ができなかった。

* 現在の溶接機の電流が 500A に制限されているので、電流をさらに上げることができれば溶接速度をこれ以上にすることが可能である。その後の実験では 700A で 100 cm/h の溶接ができた。

Fig. 16 Damped oscillation of base metal, weld metal and mild steel plate.

- A, Mild steel plate
B, Weld metal by mild steel wire (as welded)
C, Weld metal by mild steel wire (annealed 700°C×4hr)
D, Weld metal by cored wire (W-C-O)
E, Meehanite cast iron

しかし鋳鉄製消耗ノズルの代りに黒鉛製ノズルを用いた場合は、黒鉛粉末を比較的多く含む場合でも溶接が可能であった。得られた溶接金属中の黒鉛量は3%以上で、溶接金属および境界部の硬さ、引張強さ、色調、減衰率などもミーハナイト鋳鉄母材と同程度であった。特に白鋳鉄粉末に Fe-Si だけを添加したものは高強度で、硬さが低かった。しかしその他の接種剤を多く入れたものはその効果は認められず、かえって硬化した。

充填ワイヤを黒鉛ノズルを用いて溶接したものは炭素、珪素を多く含むので、黒鉛化促進剤としての接種剤は特に必要ないと思われる。

また黒鉛ノズルを用いるとスタート部の溶込みが良くなり、予熱効果や徐冷効果も大きいなどの利点がある。

6.1 鋳鉄棒による溶接

鉄の溶接の最も単純な方法としては、鋳鉄のワイヤをそのまま溶加する方法がある。しかし、これまでは鋳鉄のワイヤを作ることがむずかしいので、前記の充填ワイヤを用いて溶接してきた。

しかしあまり大きくない欠陥部の補修とか、溶接長の短いものについては、短い鋳鉄棒を用いても十分目的を達することができるはずである。溶接中に鋳鉄棒を順次つなげていくことも可能である。

そこで 20φ×350 mm の鋳鉄棒をそのまま溶加する溶接を試みた。溶接は、溶加鋳鉄棒と母材との間の電圧が一定になるように鋳鉄棒の下降速度を制御した。

黒鉛ノズルによる方法とちがって、スタート部の溶込

みは悪く、また入熱があまり大きくないため熱影響部に多少硬化部ができていたが、溶接は可能であった。

6. 結論

以上、鋳鉄のエレクトロスラグ溶接を行なうための基礎的な実験の結果、大要以下のことがわかった。

1) 軟鋼ワイヤによる溶接はきわめて容易であるが、白鋳化のため溶接金属が非常に硬く、また溶接境界部の強度が低下する。したがって機械加工を必要とせず、強度をあまり重要視しない場合とか、ローラーなどの表面肉盛り用としては使用可能である。

2) 珪素ワイヤに高炭素鋳鉄棒を用いた溶接では、軟鋼ワイヤの場合に比べて C, Si とも増し、溶接金属の硬さも幾分低下した。しかし添加した種々の接種剤の効果は少なく、機械加工その他の点で満足な結果を得るためにはなお一層の炭素添加などの工夫が必要である。

3) 充填ワイヤと黒鉛ノズルによる溶接のうち、白鋳鉄粉に Fe-Si のみを加えた W-C-O は黒鉛も3%以上含み、溶接部および境界部の硬さ、引張強さ、色調、減衰率なども母材と同程度で、鋳鉄のエレクトロスラグ溶接としてはほぼ満足な結果が得られた。しかしその他の接種剤を多く添加したものは、強度、硬度の点でじゅう分とはいえない。

4) 鋳鉄棒による溶接は、一般のエレクトロスラグと同様にスタート部の溶込みは悪いが溶接可能である。ただし溶接長の長い場合は一考を要する。

なお以上の実験は比較的限られた大きさの鋳鉄板について行ったものであるから、これらの実験結果を実際の鋳鉄の溶接組立にまで発展させるためには、試験片の形状、大きさによる拘束、冷却速度の増大による残留応力や割れへの影響を検討する必要がある。

また、市販のフラックスの融点は鋳鉄の融点より数 10°C 低いだけなので、溶接がわずかに不安定になっただけでもスラグを巻き込みやすい。これをなくすには、もっと低融点のスラグを開発する必要があるが、これらについてはひき続いて実験を進めているので、結果が得られ次第報告する予定である。

本実験を行なうにあたり、鋳鉄材料そのほかについては東芝機械KK取締役兼材料事業部長佐藤薫氏、また溶接材料の試作については八幡溶接棒KK研究部長岡田寛氏ならびに熊谷良平主任研究員などからそれぞれ御援助をお受けした。関係者各位に厚くお礼を申上げる次第です。

文 献

- 1) V.I. Svetlopol'yanskii, "The Electroslog Welding of Cast Iron", Aut. Svarka, 1962, No. 10 pp. 66~67
- 2) 日本鋳物工業会編「鋳鉄の材質」28~33 コロナ社,