溶接工を常時配置し、溶接時における充分な予熱と工程ごとにカラーチェックを充分行なうことが必要である。また組立て溶接中に2~3回の中間応力除去焼鈍も行なわれる。

5. 結 言

以上主として鋳鋼と圧延鋼材を組合せた溶接構造物について問題点の概要を述べた。複雑でしかも巨大な構造物でも一部分に鋳鋼品鍛鋼品の部材を組合せることによって総体的にすぐれた鋼構造物が製作出来る。しかしいずれの鋼構造物においても

- 1) 目的に応じた斯進で、しかも充分な設計がなされる必要がある。
- 2) 使用材料の特性を生かし、しかもその歩留りに注意して原価の低減と工期の短縮に心掛けること。
- 3) 合理的な組立て溶接方法の採用と適正な溶接開先形状および溶接条件の選定。
- 4) 溶接変形と溶接欠陥の防止に留意すること。
- 5) 各工程ごとに完全な非破壊検査の実施、および計画通り行なわれているかの充分な管理点検。

のごとき諸点についてそれが具体化されなくてはならない。

溶接技術は常に進歩しつつあり現在の作業についても細心の注意と共に新しい方法に対する不断の努力と研究が必要であろう。

また設計、粗材製作、溶接組立て、検査研究の各分野についての相互の理解と協同が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 中井, 安藤, 山根: 船体用大型鋳鋼の溶接について, 日立造船技報, Vol. 22 (1961) No. 4, 301-311.
- 2) 渡辺, 安藤: 大型鋳鋼の溶接脆化域に関する研究IIW Document No. IX-410-64 (1964).
- 3) 宮野, 進藤: 鋳鋼の溶接性能と鋼板との溶接継手について (未発表), 日本製鋼所室蘭製作所研究報告, 報告 第42-48号 (1967).
- 4) 宮野, 進藤, 新田: 船体用大型鋳鋼の溶接脆化と被覆アーク溶接部の性質の統括, (未発表), 日本製鋼所室蘭製作所研究報告, 報告 第42-106号 (1967).
- 5) 岡田, 中条, 及川: 鋼板製大型構造物の製作について, 日本製鋼技報, No. 7 (1961) 726-737.
- 6) 中村, 山下: 高張力鋳鋼の製造について, 日本製鋼技報, No. 13 (1963) 1392-1399.
- 7) 岡田, 小林: 鋼板を利用した大型溶接構造物の紹介, 日本製鋼技報, No. 16 (1964) 1815-1820.
- 8) 宮野, 小山内, 進藤, 山島, 島崎: エレクトロスラグ溶接の適用について, 日本製鋼技報, No. 24 (1968) 2775-2781.

鋳 鉄 の 溶 接*

田 村 博**

Welding of Cast Iron*

by Hiroshi Tamura**

1. 緒 言

鋳鉄は歴史的にもきわめて古い鉄系金属で、その後工業界の進展とともに、工作機械をはじめ内燃機関、各種産業機械、電気通信機器、日用品類など、鋳造用金属材料としてももっとも多く用いられている。

一方近代における接合法の先端をいく溶接が各種構造物の組立に導入されて以来、溶接が可能なのが工業材料に不可欠の条件になりつつある。ところが鋳鉄は炭素含量が普通の鋼にくらべてきわめて高いことなどにより、その溶接性がいちじるしく劣るため、他の金属材料に比して溶接による利用が制限されている。現状では鋳

鉄の溶接のほとんどが補修程度であって、積極的な組立溶接はほとんどその例がない。

鋳鉄は鋼にくらべると引張強度が低い反面、圧縮強度、鋳造性、切削性、低コストなど数々の優れた面があり、とくに最近延性鋳鉄などと呼ばれる鋼に近い機械的性質を持った新しい材料が発達しているので、溶接上の困難が軽減されるならば、鋳造品のコスト低減のための鋳鉄の組立溶接などという鋳鉄の利用面での新しい途が開かれることも期待できよう。

そこで鋳鉄の溶接の最近の研究を紹介して今後の鋳鉄利用の参考としたい。

2. 鋳鉄の種類と性質

鋳鉄は C 2.5~4.0%, Si 0.5~3.0%, Mn 0.3~1.2%,

*原稿受付 昭和43年11月26日

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

P 0.1~0.6%, S 0.02~0.12% 程度の鉄合金で、その使用目的により多種多様のものがある。一般に組織や破面の色などにより、ねずみ鋳鉄、白鋳鉄および斑鋳鉄にわけられるが、ねずみ鋳鉄がもっとも広く用いられる。日本工業規格ではねずみ鋳鉄を表-1のように分類している。この規格では成分などには触れないで、その強度によって区別をしている。FC 30 以上は高級鋳鉄とか強靱鋳鉄と呼ばれる。ミーハナイト鋳鉄 (meehanite) の多くはこの中に入る。ねずみ鋳鉄はまた黒鉛以外の地の組織によりフェライト鋳鉄、パーライト鋳鉄などと呼ばれる。高級鋳鉄とか強靱鋳鉄は皆パーライト鋳鉄である。ねずみ鋳鉄の弾性係数は鋼を1とすると0.4~0.7程度で、これが耐摩耗性および振動吸収性を大にすることと密接な関連がある。

鋳鉄の機械的性質その他はその黒鉛の形態が片状、塊状および球状のいずれであるかにより、いちじるしく相違する。溶解時に Mg や Ca などを加えて鋳放しのままで球状黒鉛を析出させたいいわゆる球状黒鉛鋳鉄 (nodular cast iron) は延性鋳鉄とも呼ばれており、引張強さは大体 40 kg/mm² 以上、靱性や延性に富み、鋼に匹敵する性質を示す。

可鍛鋳鉄は白鋳鉄に一部黒鉛化 (黒心可鍛鋳鉄) や脱炭 (白心可鍛鋳鉄) を行なって部分的に軟化させ、ねずみ鋳鉄より機械的性質を改善したものである。表-2に各種鋳鉄の機械的性質を鋼などと比較をした。

3. 鋳鉄の溶接

鋳鉄の溶接には現在までもいろいろの方法が行なわ

れてきたが、そのほとんどが肉盛とか渠埋めなどの補修溶接で、大型の構造物を溶接組立するというような積極的な溶接は鋳鋼に限られている。

表-3は参考として、溶接協会特殊材料溶接研究委員会 (委員長岡田阪大総長) が行なった鋳物の溶接についてのアンケート結果を示した。回答が少数でしかも鋳鉄だけでないのでよくわからないが、現在でも鋳鉄の溶接法にはガス溶接、被覆アーク溶接およびブレイズ溶接が主であることが知られよう。

なおこの回答ではあらわれていないが、このほかテルミット溶接なども従来から一部で利用されている。また鋳鉄の半自動溶接法として CO₂ ガスアーク溶接やイナータガスアーク溶接がしだいに利用されつつあり、さらに今後はサブマージアーク溶接やエレクトロスラグ溶接などの自動溶接も利用される可能性がある。

鋳鉄の溶接が他の工業材料にくらべてはなはだしくおくらしているもっとも大きな理由はその溶接性がいちじるしく劣ることである。鋳鉄の溶接性が不良の原因は数多くあるが、なんといっても溶接による急冷により白鈍化して異常膨脹および硬化を起し、そのため割れたり、機械切削が不可能になることがあげられる。また鋳鉄は母材自身が延性や強度が低いので、鋳造や溶接で生じた残留応力により溶接部以外の母材中にも割れを起すことが多い。そのほか鋳鉄中に存在する多量の C が溶接熱で酸化して CO ガスを発生して溶接金属にブローホールを生じ易い。また鋳鉄は鋼などに比べると H₂, O₂, S など不純物が多いので、溶接割れやブローホール発生 の機会も多い。

表-1 ねずみ鋳鉄品の規格 (JIS G 5501, 1956)

種 類	記 号	鋳鉄品の主要肉厚 (mm)	供試材の 鋳放し直 径 (mm)	引張強さ (kg/mm ²)	抗 折 試 験		硬さ試験 H _B
					最大荷重 (kg)	た わ み (mm)	
ねずみ鋳鉄品 1 種	FC 10	4 以上 50以下	30以上	10以上	700以上	3.5以上	201以下
2 種	FC 15	4 以上 8 以下	13	19	180	2.0	241
		8 をこえ 15 以下	20	17	400	2.5	223
		15 をこえ 30 以下	30	15	200	4.0	212
		30 をこえ 50 以下	45	13	1700	6.0	201
3 種	FC 20	4 以上 8 以下	13	24	200	2.0	255
		8 をこえ 15 以下	20	22	450	3.0	235
		15 をこえ 30 以下	30	20	900	4.5	223
		30 をこえ 50 以下	45	17	2000	6.5	217
4 種	FC 25	4 以上 8 以下	13	28	220	2.0	269
		8 をこえ 15 以下	20	26	500	3.0	248
		15 をこえ 30 以下	30	25	1000	5.0	241
		30 をこえ 50 以下	45	22	2300	7.0	229
5 種	FC 30	8 以上 15 以下	20	31	550	3.5	269
		15 をこえ 30 以下	30	30	1100	5.5	262
		30 をこえ 50 以下	45	27	2600	7.5	248
6 種	FC 35	15 以上 30 以下	30	35	1200	5.5	277
		30 をこえ 50 以下	45	32	2900	7.5	269

注) 1, 2, 3, 4 種は普通鋳鉄, 5, 6 種は高級鋳鉄 (強靱鋳鉄)

表一 2 各種鑄鉄および鋼の機械的性質

	普通鑄鉄	高級鑄鉄	可鍛鑄鉄	延 性 鑄 鉄		鑄 鋼 (焼 鈍)	一 般 構 造 用 鋼 (SS 52G)	黒 鉛 鋼 (1.8% C)
				鑄造のまま	焼 鈍			
黒鉛の形状	片 状	片 状	結節状ま たは土状 (earthy)	球 状	球 状	な し	な し	塊 状
引張強さ (kg/mm ²)	22	30~45	37~60	50~70	40~55	38~60	52~64	85
降 伏 点 (kg/mm ²)	な し	な し	19~31	40~60	35~45	18~28	34	67
伸 び (%)	な し	な し	2~10	1~6	8~20	8~20	18~22	6
ブリネル硬さ	180	225	110~150	220~280	140~180	140~170	140~170	255
弾性係数 (kg/mm ²)	7,500	12,500	17,000	16,500	—	21,000	21,000	19,700
圧縮強さ (kg/mm ²)	90~100	100~140	35~60	85~125	—	35~55	38~60	85
圧縮降伏点 (kg/mm ²)	—	—	19~31	—	40~60	18~24	34	67
曲げ衝撃値 (kg·m/cm ²)	0.5以下	0.5~1.5	5~17	3.5	5.5	4~20	5~20	—

表一 3 鑄物の溶接アンケート結果 (特殊材料
溶研委 昭和41年度)
一回答 31社一

使用材料	溶 接 法	目的分類
鑄 鉄 23	アーク溶接 27	補修溶接 26
鑄 鋼 10	ガス溶接 15	肉盛溶接 17
アルミ合金 4	低温溶接 6 (硬ロウ, 共晶)	組立溶接 7
そ の 他 2	そ の 他 2	

構造用鋼は戦後溶接を対象としていちじるしく改良が加えられ、溶接構造用鋼の発達を見たことはよく知られている。一方鑄鉄については今のところ溶接性を改善しようとの試みはまったくなく、もっぱら溶接棒や溶接法を改良することが鑄鉄の溶接研究の中心である。これは構造用鋼と鑄鉄の溶接用としての重要性の根本的な相違によるものであろうが、鑄造性などのほか溶接性をも考慮した鑄鉄自身の材質的検討が望まれる。ただし溶接用鑄鉄の開発とか溶接法の改善とはいっても、鑄鉄を溶接しなければならないという必要性が先立つものであるから、一方ではその利用面での啓蒙も是非推進されるべきであると考えられる。

4. 被覆アーク溶接

鑄鉄の融接ではガス溶接、炭素アーク溶接および被覆アーク溶接が以前から用いられてきた。アーク溶接は熱量が局部的に集中するために溶接応力を増し、ガス溶接より割れを起し易い。しかし鑄鉄の溶接を一段と進歩向上させるためには、アーク溶接などの積極的な利用が必要である。ここではまず被覆アーク溶接について述べ

る。

4. 1 被覆アーク溶接棒とその方法

現在 JIS には表一 4 の 5 種の溶接棒が規定されている。被覆アーク溶接もガス溶接と同様、予熱のいかんによって冷間溶接、低温予熱溶接および高温予熱溶接 (熱間溶接) にわけられることはよく知られている¹⁾。鑄造品は一般に多少の鑄造応力が残存しているものが多く、したがって広範囲を加熱すると、この残留応力と熱応力が重なって割れを生ずる。そこで冷間溶接が鑄造品の修理などに用いられる。この場合は主に細径の Ni や Fe-Ni 溶接棒が用いられ、できるだけ直線の断続ビードを置き、かつピーニングを行なって割れを防止する。低温予熱溶接は 100°C 前後の比較的低温に予熱して第 1 層目の溶接金属の急冷を防止し、割れを防ぐもので、軟鋼および Ni や Ni-Cu などの溶接棒が用いられる。熱間溶接は前二者と異り溶接部のとけ込みをじゅう分にするもので、主に鑄鉄溶接棒が用いられ、高温予熱 (一般には 500~600°C) して溶接金属をできるだけ徐冷することにより、黒鉛化を促進し、割れや硬化を防止する方法である。

以上ニッケル系の溶接棒を用いれば割れもなく機械加工性もよく、冷間溶接も可能であるが、コスト高や色調が異なるなどの欠点がある。また冷間または低温予熱溶接では一般にとけ込みを小さく、小入熱で断続ビードをおくというきわめて消極的な溶接であるから当然能率面では満足がいかない。一方溶接金属を共金とする鑄鉄溶接棒による熱間溶接では、大型の鑄造品を高温に予熱することが困難なためこれも工業的に利用することは不可能である。従って現状としては鑄鉄を溶接組立する目的に適する溶接法が見当たらないので、これらの点について

表-4 鑄鉄用被覆アーク溶接棒 (JIS Z3252)

溶接棒の種類	化 学 成 分 (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Fe	Cu
DFC Ni	1.8 以下	1.0 以下	2.5 以下	0.04以下	0.04以下	92 以上	—	—
DFC Ni Fe	2.0 以下	2.5 以下	2.5 以下	0.04以下	0.04以下	40 ~ 60	残 部	—
DFC Ni Cu	1.7 以下	2.0 以下	1.0 以下	0.04以下	0.04以下	60 以上	2.5 以下	25 ~ 35
DFC CI	1.5~5.0	1.0 以下	2.5~9.5	0.20以下	0.04以下	—	残 部	—
DFC Fe	0.05以下	0.8 以下	1.0 以下	0.03以下	0.03以下	—	残 部	—

もっかいいろいろと研究が進められつつある訳である。

4.2 アーク溶接部の組織

図-1は鑄鉄板上に2種の溶接棒でシングルビードをおいた時の溶接部の組織を模式化したものである。鑄鉄心線アーク溶接棒を用いた場合のように溶接金属が鑄鉄成分となる場合は、鑄鉄の複平衡状態図からも明かなように溶接部が急冷された場合は cementite が析出した $Fe_3C + \gamma$ (のち pearlite) 共晶 (ledebulite) を持ついわゆる白鉄組織があらわれるが、徐冷の場合は黒鉛の析出した組織となる。しかしアーク溶接部は鑄造にくらべるとかなり急冷されるから、多くの溶接部は白鉄化されると見てよい。鑄鉄の黒鉛化は勿論冷却速度だけでなく、主として C および Si 量そのほか Ti, Ni, Al など黒鉛化促進元素などに支配されるから、溶接部の成分を調整することにより白鉄化を防ぐことが考えられる。またニッケル心線アーク溶接棒を使用した場合は、ニッケルに富む溶接金属の融点が鑄鉄母材より高いため、融合部付近の鑄鉄母材がとけるので、図-1の右のごく薄い層が白鉄化される。本間ら²⁾がシングルビードについて測定した結果の例では、ニッケル棒で、0.075 mm、軟鋼棒では 0.118 mm 程度の厚みで、この程度のもものでは機械切削には別段支障はなかったとのことである。

図-1 鑄鉄のアーク溶接部組織 (和田)

一方融合部から離れたいわゆる溶接熱影響部では、最高温度が低く局部的溶解が起らない限り、黒鉛の形態の変化は溶接のような短時間の熱サイクルでは少なく、マトリックスのみが変化を受ける。すなわち基地の成分と溶接部の冷却速度の程度により、sorbite, troostite, bainite あるいは硬い針状の martensite を生ずる。ま

たじやつかんの austenite を残留することもある。なお本間ら³⁾が Mg 鑄鉄の急熱急冷組織をしらべた結果では、1200°C (融点 1150°C) で30秒程度の保持で球状黒鉛の崩壊が見られた。またねずみ鑄鉄では急熱で黒鉛が溶解したため、1050°C で局部的に白鉄の生成が認められている。また同じく横田ら⁴⁾が行なったねずみ鑄鉄の結果では、急速加熱で黒鉛の分散が見られ、最高温度を Ac_1 直上にして焼入れると腐食し難い超硬マルテンサイトがパーライト地に生じたことを報告している。

以上鑄鉄のアーク溶接部に生じた白鉄層や熱影響部に生じたマルテンサイトはきわめて硬くてもろく、また白鉄化による異常収縮などの歪により溶接割れを起したり機械加工を困難にする。従って高い予熱や後熱により溶接部の冷却速度をできる限りゆるやかにして黒鉛の析出を助長し、割れを防止し、機械加工を容易にする必要がある。なお焼鈍で硬化部を和らげることは、延性鑄鉄などには有効であるが、ねずみ鑄鉄などでは母材の機械的性質が落ちることがある。

4.3 アーク溶接部の冷却速度と割れ

鑄鉄のアーク溶接ではまず溶接部の白鉄化と割れを防止するための限界冷却速度を求めることが必要である。著者ら⁵⁾は肉厚 20 mm に砂型鑄造されたミーハナイト鑄鉄 (大きさ 130×200 mm) に市販の球状黒鉛鑄鉄棒 (八幡溶接棒 C-ID 6 mm 径)* でシングルビード溶接した際の冷却状況、組織および割れ感受性をしらべた。溶接電流は250, 300, 350および400アンペア、予熱温度200, 300および、400°C、溶接速度は100, 150および200 mm/min であった。

融合部付近の冷却状況をアルメルクロメル熱電対で測定した。鑄鉄の白鉄化を決定すると思われる高温の冷却状況を考慮して、冷却時間には凝固直後 (約 1300°C) から 500°C までの値をとった。図-2は各予熱温度をパラメータとして溶接入熱と冷却時間の関係を示した。

*溶着金属の成分, C 3.5~5.0%, Si 6.1~8.5%, Mn 1.0%以下, P 0.025% 以下, S 0.024% 以下, 推奨予熱 200~500°C (カタログより)

図-2 鋳鉄のアーク溶接におけるボンド付近の冷却時間と溶接入熱の関係 (田村, 加藤, 増田)

これらの結果から板厚 20mm の場合、冷却時間 S は次式であらわされる。

$$S = \frac{14(60EI/v)^{1.53}}{(760 - T_0)^{2.67}} \dots\dots\dots (1)$$

鋼で測定した稲垣の結果⁶⁾は分子の指数が1.5故、鋳鉄にも鋼について求めた関係が大体あてはまるようである。なお図-2にも鋼で求めた式⁶⁾から換算した値を図中に

記入したが、上述の関係がよく知られる。

一方冷却時間が小さい場合はビードにいちじるしい横割れが生じてくる。割れは融合部に近い白銹化した溶接金属部から発生し、表面に達するのはかなり溶接部の温度が低下してからである。

図-3は溶接部の硬さ分布の代表例を示した。融合部に近い部分に白銹組織によるいちじるしい硬さの増加が見られる。図-4は同じく溶接部の平均硬さと割れの関係である。図-5は溶接金属の代表的な組織で、溶接電流が増し、入熱が大になるにつれ、白銹組織が減少していきることがわかる。

以上溶接割れの防止には予熱がもっとも効果があり、とくに 400℃ 以上に予熱をした場合は入熱が小でも割れが起らなかった。結局鋳鉄の溶接割れ防止方法としては、前述のように、小入熱で歪をできるだけ少なく、とけ込みを小さくして溶接するじゅうらいの方法と、さらに予熱をじゅう分にし、大入熱で溶接して組織を軟かい黒鉛組織とする方法とがある。しかし前者はきわめて消極的な方法で、生産性や能率を考えた場合の溶接には向かないし、また後者を探り入れるためには予熱温度を一層下げるための努力が必要である。

著者ら⁵⁾はさらに上記の横割れの発生温度と発生応力を求める目的で図-6のような拘束試験装置を作成し、溶接部の溶融凝固過程における収縮応力ならびに温度を測定した。図-7はその1例を示す。これらによると、横割れは変態が終了して収縮応力がいちじるしく増大する過程で生じており、発生温度は約 200~600℃ 程度で、

図-3 鋳鉄溶接部の硬さ分布 (田村, 加藤, 増田)

a) 溶接電流 300A, 溶接速度 100 mm/min 予熱温度 200 °C

b) 溶接電流 250A, 溶接速度 150 mm/min 予熱温度 300 °C

c) 溶接電流 250A, 溶接速度 200 mm/min 予熱なし

図-5 溶接金属の組織と溶接条件の関係, 白色はレーデブライト 200×1/2 (田村, 加藤, 増田)

図-4 溶接ビードの硬さ, 組織および横割れの関係 (田村, 加藤, 増田)

図-6 鑄鉄の溶接割れの研究に用いた収縮応力拘束試験装置 (石井, 田村, 加藤, 手塚)

図-7 収縮応力拘束試験装置で求めた鑄鉄溶接ビードの溶接後の時間と温度および収縮応力の関係 (石井, 田村, 加藤, 手塚)

なお以上は横割れのみに注目をしたが、突合せ溶接では横割れの起らない溶接条件でも縦割れが生ずると考えられるから、組立溶接を考慮する場合は、突合せ溶接のような苛酷な試験片による割れを検討の必要がある。

4.4 軟鋼系溶接棒の開発

鑄鉄用溶接棒はそれぞれ前述のような特徴があるが、生産性とコストを考慮した場合軟鋼系溶接棒を使用して溶接金属をじゅう分黒鉛化し、割れない機械加工性のよい溶接を得ることが要望される。そこでこのような観点にたった被覆溶接棒の試作研究がいろいろと行なわれている。軟鋼心線を用い溶接金属を黒鉛鑄鉄にするにはいうまでもなく多量の C および Si がなんらかの形で溶接部に入るような溶接棒を用いる必要がある。

横田ら⁷⁾⁸⁾は C および Si による溶接金属の炭素黒

高電流ほど発生温度が低温に移っている。また破断応力も 7~13 kg/mm² 程度で、これは割れないビード置き試験片で測定した残留応力の値が約 10 kg/mm² 程度であったこととほぼ一致している。

鉛化の効果を普通パーライト铸铁 (50×12×200 mm) にシングルビードおよび多層溶接を行なって調べている。各元素の添加は黒鉛とカーボランダムとの配合による。図-8 はフラックス中の黒鉛とカーボランダムとの比による溶接金属中の C と Si 量およびビッカース硬さの関係を示す。多層溶接の場合は予熱効果があるので硬さは比較的低いが、一層ビードでは黒鉛とカーボランダムとの比を 3 : 7 に配合した時がもっとも硬さが低く、加工性、溶接作業性、ビード外観、ブローホールとも良好で黒鉛化の目的をじゅう分達成している。なお心線中に Si を添加したいわゆるシリコナイズド軟鋼心線を使用すれば、上記の普通軟鋼心線の場合にくらべてカーボランダム配合量を 10% 程度減少することができる⁷⁾。

さらに横田ら^{7,8)}は以上の被覆剤を基本として黒鉛化促進剤に、Ni, Mg, カルシウムシリサイドおよびアクチノライト*を添加してその黒鉛化の効果を調べている。アクチノライトの添加は黒鉛化に顕著な効果があるが、一般に用いられているニッケルマグネシウムやカルシウムシリサイドでは完全な黒鉛の粒状化は見られていない。

横田ら⁹⁾は以上開発した粒状黒鉛溶着铸铁を作る被覆アーク溶接棒を使用して、軟鋼と铸铁板を溶接した場合の溶接部を硬さ、組織、成分および引張強さの諸点から検討した。9 mm 厚 150×130 mm 軟鋼板 (SS41) のあらかじめ V 形開先面をニッケルでバタリングしたものとし、铸铁板 (FC15) と (9×150×130 mm) を定盤上にボルトで強固に拘束したのち室温で 1 層あるいは 2 層溶接した。その結果を図-9 に示した溶接棒 (C-10) は径 8 mm の溶着鉄が高 Si 铸铁になるもの**である。比較的高い溶接入熱 (57,750~103,100 ジュール/cm) を用いたため、冷却速度は小 (800°C~200°C の冷

図-8 フラックス中の C と SiC の割合が溶着铸铁の成分とたたさにおよぼす影響 (横田, 石井)

*天然に産出される石灰、マグネシア、鉄の珪酸塩、砕いて薄緑色粉末状に精製されたものを使用、主要成分値 12% Total Mg, 7% Total Ca, 45% SiO₂

**溶着鉄成分 (4.20% C, 7.20% Si, 0.34% Mn, 0.014% P, 0.003% S)

図-9 軟鋼と铸铁の突合せ溶接部の硬さ分布 (横田, 石井)

却時間約 5 分) で、溶接のままでもニッケルバタリングの有無にかかわらず硬さは 320 ビッカース以下で、接合部境界にマルテンサイトおよびセメンタイトは認められなかった。溶着鉄はニッケルをバタリングした時は約 25% Ni を含有するオーステナイトとなり、黒鉛は球状化する。バタリングしない時も、入熱を 100,000 ジュール/cm 以上にすれば容易に黒鉛は球状化し、予熱しなくとも割れない切削性の良い溶接部が得られる。なお同じ市販溶接棒 C-10 を用いた先の著者らの結果⁵⁾では、割れの防止にかなりの高い予熱を要する点で、本結果と一致しないが、この原因としては棒径、板厚および入熱などの実験条件の相違が考えられよう。

岡田¹⁰⁾は同様の目的からタンマン炉で C と Si 量の異なる Fe-C-Si 合金を溶製し、溶解後の冷却速度をビード溶接の場合の急冷 (溶接後 100°C までの冷却時間が約 1 分) と、徐冷の 2 種について組織と硬さを求め、この結果から溶接後急冷しても白鈍化せず切削容易な溶接金属の組成を決定した。その結果によると第 1 層溶接金属は母材により稀釈されるので、その組成は次式によりあらわされる。

$$C_w = \frac{p}{100} C_B + \frac{100-p}{100} C_D \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Si_w = \frac{p}{100} Si_B + \frac{100-p}{100} Si_D \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし C_w, Si_w : 第 1 層溶接金属の C, Si 量

C_B, Si_B : 母材の "

C_D, Si_D : 全溶着金属の "

p はとけ込み率で次式であらわす

$$p = \frac{\text{母材の溶融断面面積}}{\text{溶接金属の全断面面積}} \times 100(\%)$$

従って上式から第 1 層の溶接金属が急冷しても硬化しないためには全溶接金属の C, Si 量を次式の値以上にしなければならないことが導かれる。

$$C = 4.23 + \left(4.23 - C_B - \frac{1}{6} Si_B \right) \times \frac{p}{100-p} - \frac{Si}{6} \quad \dots\dots\dots (4)$$

結局図-10 のハッチを付けた範囲がとけ込み率 $p=50\%$ とした場合の第 1 層および多層用を兼ねた場合の実

図—10 高 Si 心線を用いた特殊鋳鉄溶接棒による溶着鉄の化学成分の限界 (岡田)

用化しうる組成範囲となる。これによればねずみ鋳鉄、鋳型用鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄は冷間溶接が可能で、可鍛鋳鉄では予熱徐冷がかならずいるという結果になる。

岡田¹⁰⁾は本研究をもとに開発した高 Si 鋼心線を用いた特殊溶接棒をシングルビード割れ試験により他の市販溶接棒と比較しており、本試作棒がもっとも割れ感受性が少なかったと報告している。すなわち本試作棒を用いれば、ねずみ鋳鉄および鋳型鋳鉄は、熱入力を小さく、溶込みを浅く、熱応力を小にすれば冷間溶接が可能となる。一方黒心可鍛鋳鉄や球状黒鉛鋳鉄では 400°C 程度以上の予熱が必要であった。

4.5 ニッケル系溶接棒の研究

鋳鉄の溶接では前にも述べた通り鋳鉄系溶接棒や軟鋼系溶接棒では大形鋳物の溶接に可能な程度の比較的低温の予熱あるいは予熱なしの溶接の実現性が薄いので、コストや色調を度外視してもニッケル系溶接棒の使用のほかないこともしばしばある。

石井¹¹⁾は組立溶接への適用性をしらべる目的で市販の鋳鉄用アーク溶接棒22種について実験を行なった。その結果からとくに耐きれつ性が優れ、硬化の少ないものとして純ニッケル系および鉄ニッケル系心線溶接棒を選んで、鋳鉄の冷間アーク溶接の合理的な条件を検討している。12 mm 厚 FC15 および FC20 鋳鉄板に V 溝を作り、多層溶接を行なった結果から予熱温度と最高硬さの関係を図—11に示した。中間層は次層の溶接熱でかなりの軟化を示すから予熱しない場合も 350 ビツカース前後の値となり、切削加工に支障がない。ただ最上層だけはかなりの硬化を示している。

耐われ性についてはシングルビード 1 層 4 パス盛金溶接試験で割れのなかった鉄ニッケル系溶接棒と割れの少なかった純ニッケル系溶接棒について図—12のような拘

図—11 突合せ溶接部の最高硬さ (石井一淑)

図—12 割れ発生時間と予熱温度の関係 (石井の結果を著者が図にまとめたもの)

束の強いスリット型割れ試験を行なった。この場合は鉄ニッケル棒も純ニッケル棒と同様の割れが発生しているが、溶接後割れ発生までの時間が鉄ニッケル系の方が長い。この傾向を図-12に示した。予熱温度を上げていくと、しだいに割れ発生時間が長くなり、300°C 予熱では鉄ニッケル系には割れが見られない。以上鑄鉄の冷間アーク溶接では溶接後かなりの時間で割れが発生するので、この間にピーニングを行なえば割れを防ぐことが可能である。その後の結果などから総合して見ても、鑄鉄の突合せ溶接では予熱温度のいかんによらずピーニングは絶対に必要で、とくに低温予熱の場合はピーニングを行なわなければ溶接は不可能に近い。そこで先の割れ発生時間から考えると、その限られた時間内にビード全長にじゅう分なピーニングを行なうには、常温溶接ではビード長さをせいぜい 20 mm 前後、100°C 予熱で 20～30 mm 程度に押える必要があるということになる。

なお石井¹¹⁾は以上の溶接上の注意を参考に FC20 で 98×98×200 mm t, 肉厚 14 mm の実物箱を突合せ溶接部を含めて作製し、水圧試験を実施している。鉄ニッケル系溶接棒は気密性ではるかに優れ、純ニッケル系溶接棒の場合は溶接金属境界部から漏洩するという結果が示された。

一方ニッケル系溶接棒を使用し、母材を余り溶融させずに溶接金属を母材になじませるような溶接を行なって、硬化層や割れの発生を少なくする方法が考えられる。このような見地から、純ニッケル心線の被覆中に少量の元素を加えた場合のねずみ鑄鉄母材 (FC20) と溶着金属のなじみ性と硬化層の状況が観察されている¹²⁾。添加元素としては主として黒鉛化を促進する元素を選んでいるが、5～10%程度の少量の添加で溶け込みやビード形状がいちじるしく変化していることは興味深い。この状況を図-13に示した。なお硬化層の硬さなどを考慮すると、Cu, Si, Zrなどを添加すると、溶け込みも浅く、熱影響の少なく溶接が可能な溶接棒が得られることが知られる。

5. サブマージアーク溶接

鑄鉄への自動または半自動溶接の適用は、CO₂ アーク溶接¹³⁾やとくに球状黒鉛鑄鉄のアルゴンアーク溶接¹⁴⁾、¹⁵⁾など多くの例があるが、サブマージアーク溶接については少ない。関口ら¹⁶⁾は鑄鉄を対象としたサブマージアーク溶接法として ICSA 法 (Insulated Carbon Shielded Arc Welding Process の略) を考えた。これは接合または肉盛しようとする母材局部を C および SiC を主成分とする遮蔽剤で覆い、この中に裸ワイヤを送給してアークを発生させて接合または肉盛を行なうも

図-13 純 Ni 心線の被覆剤中に種々の金属を添加した場合の鑄鉄への溶着金属のなじみ性の変化 (日本ウエルディングロッド)

のである。遮蔽剤は C および SiC を 70% 程度含み、さらに電氣的絶縁や冶金効果をはかるためにいろいろの酸化物や炭酸塩などが入っている。溶接ワイヤは普通鋼ワイヤまたは Si 入りワイヤ (Si 2.5～3%) で、一般の溶接条件で 300～400°C 程度の予熱を行なえば白鈍層をほとんど生ぜず、割れもない。

遮蔽剤組成とシングルビード溶着部の諸性質との関係を表-5に示す。(C+Si) 合計量は SiO₂, TiO₂, CaCO₃ を含む遮蔽剤を使用する場合の順に多くなる傾向などが知られる。また SiO₂ を含む場合はビード横断面中央に白鈍の存在が見られ、硬さもやや高い。

関口ら¹⁶⁾は ICSA 法を普通鑄鉄 (FC20) の肉盛溶接、隅肉溶接、突合せ溶接に適用している。突合せ溶接例では厚さ 15 mm, 幅 140 mm, 長さ 200 mm の鑄鉄板を 90° Y 開先とし、表 1～5 パス裏側 1 パスで溶接をした。その結果溶接部に割れやブローホールはなく、外観も良好であった。継手引張強さは 19.4 kg/mm² で破断は溶接金属で起った。なお溶接金属の化学成分は C 4.41%, Si 4.68%, Mn 0.97%, S 0.003%, P 0.035% であった。なお鑄鉄と軟鋼との溶接も可能なことが確かめられている。

6. エレクトロスラグ溶接

最近エレクトロスラグ溶接が大形鑄鋼品などにも盛んに利用されている。エレクトロスラグ溶接はじゅうらい

表一五 自動溶接金属の諸性質，溶接条件（440A，36V，24 cm/min，316°C 予熱）

添加剤*	溶接金属の成分（%）					ワイヤの 溶融速度 W _R , g/sec	造蔽剤の 消失速度 C, g/sec	C-/W _R	とけ込み率 %	溶接金属 の硬さ VHN
	C	Si	Mn	P	S					
CaCO ₃	4.30	3.89	0.62	0.047	0.012	1.35	0.363	0.269	57.5	251
TiO ₂	4.03	4.07	0.62	0.035	0.013	1.55	0.342	0.221	49.3	258
SiO ₂	3.66	3.84	0.62	0.045	0.022	1.61	0.274	0.170	53.2	308

* 基本成分（50% C，30% Si，5% CaF₂）にそれぞれ15%添加

鋳物のような厚肉製品の溶接に適していることで知られているが，先行スラグによる予熱効果と，大入熱による徐冷効果が先のサブマージーク溶接などより一層大きいことから鋳鉄の溶接にはきわめて適していると考えられる。¹⁷⁾

Svetlopolyanskii¹⁷⁾ はさきに低炭素鋼の板状電極（断面 2×30 mm）と高 Si フラックス AN-348A を用い，15 mm 径ねずみ鋳鉄棒のエレクトロスラグ溶接を行ったことを報告している。

著者ら¹⁸⁾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，ミーハナイト鋳鉄（30×150×200 mm）のエレクトロスラグ溶接の開発研究を行った。まず市販の軟鋼ワイヤと軟鋼中空ノズルを使用して溶接した結果では，割れもなく容易に溶接できたが，溶接金属中の C 1.47～2.0%，Si 0.93～1.18% の範囲となり，Maurer の組織図からも明らかなように，いかに徐冷しても白銲化し，機械加工がほとんど不可能であった。そこで溶接金属の C，Si 量を高めて黒鉛化を促進させるため，2.8% Si 入りワイヤと，高炭素鋳鉄を鋳込んで作った中空ノズルに黒鉛粉末，Ca-Si，Fe-Si，金属アルミなどの黒鉛化促進剤を個々に塗布したものにさらに溶加棒として鋳鉄棒（4.5% C）を図14の b）ように抱き合わせたもので溶接をした。一般に溶接金属にはまだかなりの硬化が見られるが，接種剤の効果も見られ，組織は部分的に片状または球状黒鉛が析出し，硬さも金属アルミ添加の場合は 350 ビツカース以下に低下し，比較的良好であった。

図一四 各種ワイヤ使用の際のノズル断面（石井，田村，加藤ほか）

以上は主として鋳鉄母材ならびに中空ノズルから炭素その他を得ることにより溶接金属の黒鉛化を促進し，白銲化を防ごうとしたものであるが，さらに炭素量を増す手段としてリボン状軟鋼帯をパイプ状にしたものの内部に鋳鉄，白銲および浸炭鉄粉などの粉末と Fe-Si，Ca-Si，金属アルミなどの黒鉛化促進剤を入れたいわゆる充填ワイヤを中空の黒鉛ノズルと組合せて溶接した（図14-c 参照）。この場合黒鉛ノズルも一部消耗して溶接金属に入るのて，溶接金属は C 3.02%，Si 2.08% 程度となり硬さのいちじるしく低い被削性のよいものが得られた。図一15はさきの軟鋼ワイヤおよび Si 入りワイヤによる場合をも含めて得られた溶接部の硬さ分布を示した。図一16は充填ワイヤを用いて得られた溶接金属の組織を示したもので，片状黒鉛の分布したフェライトおよびパーライト組織を呈している。

7. その他の溶接

なお以上のほかガス溶接やブレイズ溶接などが古くから鋳鉄の溶接に用いられている。ブレイズ溶接には青銅溶接法と共晶合金組成を溶加材とした Eutectic Welding などがあるが，ともに強度を問題としない場合を対象とする。一方鋳鉄の固相圧接は数少ない。Carriere と Wolf¹⁹⁾ はノデュラー鋳鉄と低炭素鋼を圧接して，ノデュラー鋳鉄の90～95%の強さの溶接部を得ている。塩

図一15 種々のワイヤを用いたエレクトロスラグ溶接部の硬さ分布（石井，田村，加藤ほか）

母材 溶接金属
図-18 エレクトロスラグ溶接部の境界付近の組織(×50)(石井, 田村, 加藤ら) 充填ワイヤ, 白鉄+Fe-Si 添加の場合

谷²⁰⁾は黒心可鍛鋳鉄管と炭素鋼管を摩擦圧接し、破断は可鍛鋳鉄母材で起ったことを報告している。

8. 結 言

工作機械などに使用される大型鋳鉄品は、通常は多量少量生産されるので、どうしても製造コストが高くなる傾向にある。そこでもし溶接が可能になれば、鋳鉄品を溶接組立することによって生産コストを大幅に低減することが考えられる。また製造で生じた大きい果や割れなどを能率的に補修が可能な溶接法が確立されれば、数多くの不良品を生かすことができるので、工業上の利益はきわめて大きい。このような夢を実現する目的で現在各方面で鋳鉄の溶接の研究が行なわれつつあり、本報はその1部を紹介したものである。以上述べた通り、各種溶接法のうちもっとも普遍性の大きい被覆アーク溶接は、Ni系溶接棒は高価であり、その他の棒では低い予熱での溶接が困難なため上述のような生産性の高い溶接とはかなりの格差があり、理想には遠いようである。ただエレクトロスラグ溶接で代表される大入熱の溶接法が、今後溶接材料などの開発しだいでは成功の可能性を秘めているように思われる。しかしそれにしても工業界が鋳鉄を積極的に溶接組立しようとする意欲と、溶接の研究に

対する理解と支援が必要ゆえ、今後とも協力をねがうしだいである。なおここで引用させていただいた多くの文献の著者に対しては未筆ながら深甚な謝意を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 溶接技術講座 第4巻「鉄鋼の溶接」日刊工業 1963
- 2) 本間, 和田, 山谷, “鋳鉄および球状黒鉛鋳鋼の溶接(第1報)”, 本誌 29(10) 1960, 38~44
- 3) 本間, 和田, “急熱急冷による鋼, 鋳鉄の不均一組織について(第2報)(概要)”, 本誌 35(2) 1966, 145
- 4) 横田, 井口, “鋳鉄の急速加熱組織”, 本学会 昭和43年春期講演会概要 183~184
- 5) 石井, 田村, 加藤, 手塚 “鋳鉄のアーク溶接” 同上 59~60 および鋳鉄のアーク溶接の研究(第1報)”, 溶接協会特殊材料溶研委資料(SW-41-14).
- 6) 稲垣, “構造用鋼材溶接部の変質について”, 金属材料技術研究所報告 第3巻 1号(1960) p. 170.
- 7) 横田, 石井, “粒状黒鉛鋳鉄化被覆アーク溶接棒の研究 I, II(概要)”, 本誌 31(8) 1962, 33~34
- 8) 横田, 石井, “鋳鉄用軟鋼線被覆アーク溶接棒の黒鉛化について”, 溶接協会特殊材料溶研委資料(SW41-21) 1966.
- 9) 横田, 石井, “粒状黒鉛化鋳鉄被覆アーク溶接棒の研究 III, 本学会冶金研資料(WM-82-65) 1965.
- 10) 岡田, “鋳鉄用特殊溶接棒に関する研究 I, II(概要)”, 本誌 31(8) 1962, 75~76
- 11) 石井一淑, “ニッケル系および鉄ニッケル系溶接棒による鋳鉄の冷間アーク溶接について”, 溶接協会溶接棒部会技術委資料(59-25, 1959)
- 12) 日本ウェルディングロッド KK, “鋳鉄の溶接について”, 溶接協会特殊材料溶研委資料(SW42-14) 1967.
- 13) “炭酸ガスアーク溶接法による鋳鉄溶接の自動化について”, 溶接協会特殊材料溶研委資料(SW41-31) 1966.
- 14) たとえば本間, 山谷, “鋳鉄の溶接の最近の進歩”, 溶接界 14(10) 1962, 637~650
- 15) J. Ruge, P. Hildebrandt u. W. Keinert, “Untersuchungen zum Schweißen von Gußeisen mit Kugelgraphit”, Schweigen, u. Schneiden 17(7) 1965, 299~304.
- 16) 関口, 杉岡, “炭素および炭化珪素を主成分とする遮熱剤によるアーク溶接法 I, II, III(概要)”, 本誌 33(3) 1964, 144~146
- 17) V. I. Svetlopolianskii, “The Electroslag Welding of Cast Iron”, Avt. Svarka, 1962, No. 10, pp. 66~67.
- 18) 石井, 田村, 加藤, 村瀬, 森下, “鋳鉄のエレクトロスラグ溶接” 本学会 昭和42年度秋季講演会予稿 147~148
- 19) S.H. Carriere and R.V. Wolf, “Solid Phase Welding of Nodular Iron to Low Carbon Steel”, Welding J., 44(8) 1965, 398-s~401-s.
- 20) 塩谷, “鋳物の摩擦溶接”, 溶接協会特殊材料研究委資料(SW 41-20) 1966.