各種溶接法による球状黒鉛鑄鉄溶接部の強度特性の比較*

藤井 信之**, 本多 弘範***, 深瀬 敦史****, 安田 克彦**

Comparison of Strength Characteristic of Nodular Graphite Cast Iron Welded Joints by Various Welding Process*

by FUJII Nobuyuki**, HONDA Hironori***, FUKASE Atsushi**** and YASUDA Katsuhiko**

On the welding of the nodular graphite cast iron, many researches have been carried out until now.

The shielded metal arc welding and TIG welding using the filler material with nickel, and oxy-acetylene welding have been recommended as a welding process of the nodular graphite cast iron. And, the execution of preheating, postheating, peening and interlayer thermal management is required in the welding procedure. But the expertise, experiences and high skills are needed to carry out these executions. Thus, it is the fact that these executions are too complicated to be spread widely.

In the research on the welding of the nodular graphite cast iron, there are many papers that heat input, interlayer thermal management, welding materials and welding conditions are examined and the results are discussed. However, it is hard to find a paper that compares the welding results by using several kinds of welding process and welding materials.

In this study, 9 kinds of weld test pieces are produced by using 4 kinds of generally used welding process. And the welding of nodular graphite cast iron is examined not only on its hardness, tensile strength and bending strength, but also its workability, efficiency and cost. As we emphasized its practicability, we didn't consider preheating, postheating, peening and interlayer thermal management.

Key Words: Nodular graphite cast iron, Welded joint, Welding method, Mechanical properties, Welding performance

1. は じ め に

球状黒鉛鑄鉄の溶接に関しては、今日まで多くの研究が行われ、溶接法としてガス溶接法、ニッケル系溶加材を用いた被覆アーク・ティグ溶接法が推奨されてきた。また施工時には、予熱・後熱、ピーニング及び層間温度管理などの実施が必要とされてきた。しかしこれらの作業の実施にあたっては、専門知識、経験そして高い技能が必要であり、複雑・煩雑な作業であることから、必ずしも正確に普及しているとは言い難い。

著者らは「各種溶接法による鑄鉄/軟鋼溶接部の強度特性の比較」¹⁾において、軟鋼系及びオーステナイト系ステンレス鋼溶加材を用いた被覆アーク溶接・マグ溶接の一部で、継手引張強度がほぼ母材強度に達していることを報告した。球状黒鉛鑄鉄と軟鋼の溶接において、このような結果を得ることができるのであれば、球状黒鉛鑄鉄同士の溶接にも適用の可能性が生じると考えられる。

これまでの球状黒鉛鑄鉄に関する溶接の検討では、同一溶接法の中で、溶接材料、入熱量及び温度管理などの諸条件を変化させ、その結果について比較したものが多く²⁻⁷⁾、複数の溶接法・溶接材料を適用し、それらの結果について継手性能を比較した例は見られない。

本研究では、広く普及しているガス溶接法、被覆アーク溶接法、マグ溶接法及びティグ溶接法を用いている。そしてより実用性を重視し、予熱・後熱、ピーニング及び層間温度管理などの複雑・煩雑な作業を省略し、作製した9種類の試験片について溶接性能の検討を行った。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材料及び試験片

Table 1 は本実験で使用した材料 JISG5502 FCD450 の化学成分と機械的特性である。Fig. 1 は溶接試験材及び引張・曲げ試験片の寸法を示している。試験片の作製にあたっては、溶接部の硬度が高いため、通常の湿式カッターやバンドソーを用いた切断を適用することはできなかった。そのため、平面研削盤にレジノイドブレード ($\phi 200$, 1 mmt) を取り付け、オシレート加工で切断した。切断後の溶接試験材については、フライス盤 (超硬刃) によって加工した。

2.2 溶接法

溶接法、溶接材料の選定については、長年溶接に携わっ

*受付日	平成18年11月14日	受理日	平成19年3月23日	平成17, 18年度秋季全国大会で発表
**正 員	職業能力開発総合大学校	Member, Polytechnic University		
***正 員	南伊勢職業能力開発促進センター	Member, Minami Ise Polytechnic Center		
****学生員	職業能力開発総合大学校	研究課程 Student, Polytechnic University, Postgraduate		

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of base metals

Test piece	Thick-ness	(mass%)						
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg
FCD 450	16mm	Bal.	3.4	2.7	0.30	0.023	0.0060	0.043
	10mm	Bal.	3.8	2.6	0.28	0.031	0.011	0.039

Test piece	Thick-ness	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)
FCD 450	16mm	558±14	—
450	10mm	533±3.1	1180±74

(a) Welded test material

(b) Test piece of tensile test

(c) Test piece of bending test

Fig. 1 Size of welded test material and test pieces

てきた技能者・技術者及び研究者の意見から判断した。Table 2 は使用した溶接法、溶接材料及び溶接条件を示している。溶接法は 4 種類、比較した試験片は 9 種類である。

具体的な選定理由は以下の通りである。ガス溶接においては、よく行われている母材から切り出した共金材を溶加材とした。被覆アーク溶接では、事前調査の結果、JISZ3211 D4316 の使用が広く行われていることが分かった。

Table 2 Relation among welding method, welding consumables, shielding gas and welding conditions

Welding method	Welding consumables (mm)	Shielding gas	Welding current(A)	Welding voltage(V)
Gas welding	FCD450 ϕ 4.5			
Metal-arc welding with covered electrode	DFC Ni ϕ 3.2		100~120	20
	DFC NiFe ϕ 3.2		80~140	20
	D4316 ϕ 3.2		80~120	20
	YGW12 ϕ 1.2	CO ₂	100~130	18~20
Metal-arc active gas welding	YF308LC ϕ 1.2	CO ₂	110~120	24
		Ar+CO ₂ (20%)	120	23~24
	Y308 ϕ 1.2	Ar+O ₂ (3.5%)	120~130	18~22
TIG welding	Ni (57%)-Fe ϕ 2.6	Ar	80~110	13

そこで鋳鉄用溶接棒として市販されている JISZ3252 DFCNi, JISZ3252 DFCNiFe 及び D4316 を溶接材料とした。マグ溶接では、事前調査からオーステナイト系ステンレス溶接材料が使われていることが分かった。そこで以下の 4 種類の方法を採用した。(1) JISZ3321 Y308 と Ar+3.5%O₂ の組合せ。Y308 はオーステナイト系ステンレス鋼で最も一般的であり、Ar+3.5%O₂ の使用は、アークの安定性・指向性を高める。(2) JISZ3323 YF308LC と CO₂ 又は Ar+20%CO₂ の組合せ。YF308LC は、Y308 に比べ溶接条件範囲が広くアークが安定であり、クロム炭化物の析出によるぜい化の防止が期待される。CO₂ 又は Ar+20%CO₂ の使用は、ビード外観や溶込みに変化をもたらす。(3) JISZ3312 YGW12 と CO₂ の組合せ。軟鋼用溶接法として一般的である。ティグ溶接では、鋳鉄用 57%Ni-Fe 棒を溶接材料とした。

溶接施工面では、作業性・溶着効率・実用性を重視し、予熱・後熱、ピーニング及び層間温度管理を実施しないこととした。

溶接試験片を作製した者は、職業訓練指導員免許（溶接科）を有する者である。

2.3 入熱の算出法

溶接時の入熱については、以下の式を用いて求めた。

(a) ガス溶接⁹⁾

アセチレン流量を A (l/min), 溶接速度を v (m/s) とすると、単位長さ当たりの入熱量 Q_m は、式 (1) で表される。 Q は、アセチレンの総発熱量 53.5 (MJ/m³) である。

$$Q_m = Q \times (A/v) / 60 \text{ (J/m)} \dots\dots\dots (1)$$

中西ら⁹⁾によると「ガス炎の熱効率は、火口の大きさ、火口の移行速度、火口の角度、炎の混合比、被加熱物の種類、大きさ、形状など非常に多くの因子によって左右され、いちがいに定めることはできない」とされている。よって、ここでは熱効率を考慮していない。

(b) アーク溶接¹⁰⁾

アーク溶接の溶接入熱 Q_m は式 (2) で表される。

$$Q_m = VI/v \text{ (J/m)} \dots\dots\dots (2)$$

V : 溶接電圧 (V) I : 溶接電流 (A) v : 溶接速度 (m/s)

ここで溶接熱伝導を考慮し、真の入熱量 Q_{net} を求めると、 $Q_{net} = \eta Q_{in}$ となる。

η は熱効率であり、溶接方法によりほぼ決った値である。被覆アーク溶接 80%、マグ溶接 70%、ティグ溶接 65% とした¹⁰⁾。

3. 実験結果及び考察

3.1 硬さ試験結果

硬さ試験には、ビッカース硬さ試験（荷重 1.96 N）を用いた。Fig. 2 は溶接部断面の測定位置、層及びパスを示している。測定間隔については、硬さ変化の著しいボンド部近傍で 0.2 mm、その他の部分で 0.5 mm とした。

Fig. 3 は各種溶接試験片の硬さ分布を示している。(a) はガス及びティグ溶接試験片、(b) は被覆アーク溶接試験片、(c) はマグ溶接試験片の硬さ分布である。

共金材を用いたガス溶接試験片では、最大約 HV400 が測定された。FCD450 母材硬さが約 HV200 であることから、HV200 程度の硬さ上昇が認められたことになる。しかし、他の溶接試験片に比べガス溶接試験片は最高硬さが小さいことが分かる。これについては、ガス溶接試験材作製時の入熱量が大きいために徐冷効果が生じたことによるものと考えられる。Table 3 は溶接試験材作製時の入熱、溶接時間及びパス数を示している。

Fig. 4 はガス溶接試験片における溶接部の組織である。球状黒鉛が、溶着金属及び溶融部で微細化していることが分かる。

Fig. 2 Measurement positions of Vickers hardness, welding layer and pass

Table 3 Relation among heat input, welding time and pass number of test pieces

Welding method	Gas Welding	Metal-arc welding with covered electrode			Metal-arc active gas welding				TIG welding
Welding consumables	FCD 450	DFC Ni	DFC NiFe	D4316	YGW 12	YF308 LC (CO ₂)	YF308 LC (Ar+CO ₂)	Y308	NiFe
Heat input (MJ/m)	95	7.9	5.3	4.0	3.0	3.6	2.9	3.2	9.9
Welding time (min)	70	11	6.1	6.7	4.8	4.6	3.9	5.4	28
Pass number	3	10	8	6	3	4	4	4	16

(a) Gas and TIG welding test pieces

(b) Test pieces of metal-arc welding with covered electrode

(c) Test pieces of metal-arc active gas welding

Fig. 3 Hardness distribution of test pieces using various welding methods

Fig. 4 Microstructure near FCD450 weld interface in gas welding test piece

ティグ溶接試験片では、ボンド部近傍で約 HV750 が測定された。他のアーク溶接法に比べ入熱が大きいにもかかわらず、明らかな硬度低下は認められなかった。

被覆アーク溶接・DFC*Ni* 溶接棒試験片では、白銑組織をほとんど認めることができなかった。ニッケルは炭素を固溶しないためその移行を防止する作用が大きい。よって、ボンド部において脱炭による白銑化を生じ難くしているものと考えられる。

DFC*NiFe* 及び D4316 溶接棒試験片では、ボンド部近傍で白銑組織が確認された。Fig. 5 は DFC*NiFe* 試験片のミクロ組織である。溶融部には、初晶セメンタイトやレデブライトなどの硬い白銑層の形成が認められる。白銑層の幅は広い部分で約 250 μ m である。

DFC*NiFe* 溶接棒試験片では、約 HV1000 であり、全試験片の中で最も高い値を示した。この理由について以下のように考えている。DFC*NiFe* 溶接棒には、鉄が約 40% 含まれている。この合金の膨張係数は母材のそれとほぼ等しく、溶接後の残留応力を低減させる効果がある。しかし、含有

している鉄に母材中の炭素及びフラックス中の炭素が拡散するため球状黒鉛が分解されセメンタイトなどの炭素化合物が生成された。

D4316 溶接棒試験片では、約 HV650 が測定された。低水素系の溶接棒は、DFC*NiFe* 溶接棒に比べアークが安定であり均一な溶込み、ビード形状が得られ易い。ビードを覆うスラグの生成状態も安定していた。これらのことが、硬度低下の要因になっていると考えられる。

マグ溶接試験片では、いずれの試験片においても白銑層が認められ、その硬さは約 HV700～850 であり、試験片による大きな差は認められなかった。

3.2 引張試験結果

試験速度は 0.6 mm/min、試験片数は一溶接試験片について 3～6 本である。

Fig. 6 は各種試験片の引張強度、入熱、溶接時間及び伸びを示している。被覆アーク溶接試験片 2 種 (DFC*NiFe*, D4316) 及びマグ溶接試験片 4 種の計 6 種の試験片では、実用上の目安となる 400 MPa を超えており、母材強度の約 77～87% を示した。

ガス溶接試験片では、試験片 3 本中の 1 本に母材破断 (500 MPa) が生じた。そのため、ばらつきが大きくなっている。溶接部断面の上・下部において明かな組織の違いが見られた。断面上部では、セメンタイトの混在する組織となっており、下部では黒鉛粒径が小さくなった組織 (Fig. 4 の溶着金属部) になっていた。セメンタイト混在比率が高いほど強度は低下する傾向が見られた。

被覆アーク溶接試験片 (DFC*Ni*) では、母材強度の約 44% (244 MPa) を示した。強度が低かった理由について以下のように考えている。ニッケル系溶接棒の被覆剤は黒鉛を含有している。ニッケルは炭素を固溶せず、遊離黒鉛と

Fig. 5 Microstructure of FCD450 weld zone in the welding test piece of DFC*NiFe* covered electrode

Fig. 6 Relation among tensile strength, heat input, welding time and elongation of test pieces

して溶着金属に存在する。この遊離黒鉛は残留応力を緩和するため割れを防ぐ働きがある。しかし、純ニッケルの引張強度は約 320 MPa であり、そこに遊離黒鉛が存在するため有効断面積が減少し強度が低下した。Fig. 7 は DFCNi 溶接棒継手の溶着金属の組織を示している。黒丸部分及び薄い線状のものが遊離黒鉛である¹⁰⁾。

DFCNiFe 及び D4316 溶接試験片の引張強度は共に約 450 MPa で、ほぼ等しい強度を示した。

マグ溶接試験片では、いずれの試験片においても 430 MPa を超える強度を示した。ばらつきも小さく信頼性が高いことが分かる。YF308LC (Ar + CO₂) 試験片は 483 MPa と全試験片中の最高値を示した。

ティグ溶接試験片は 376 MPa であった。ほぼ同成分である被覆アーク溶接 (DFCNiFe) 試験片 453 MPa と差が生じていることが分かる。この原因は、熱影響部の幅にあると考えている。ティグ溶接試験片の最大幅が約 2000 μ m であるのに対し後者のそれは約 1000 μ m であった。ティグ溶接試験材については、他のアーク溶接試験材に比べ作製時の溶接時間が長いことから球状黒鉛の炭素が拡散し熱影響部 (変質層) が広がったと考えられる。

Fig. 7 Deposited metal structure in the welding test piece of DFCNi covered electrode

Fig. 6 に伸びも示したが、母材の伸びが 7.4% であるのに対し全試験片のそれは 0.23~2.1% と低く、期待できないことが分かる。

以下に試験材作製時に観察された特記事項を記す。

ガス溶接法は、長い作業時間を要し溶着効率の低い溶接法であることが分った。この原因は、ガス炎の温度が低いために、母材、溶加棒の溶融が迅速に行われ難いためと考えられる。

被覆アーク溶接法における DFCNi 及び DFCNiFe 棒の使用では、アークの指向性・安定性に難がありスラグ巻込みなどの欠陥が生じ易かった。また、棒焼けに伴う被覆剤の剥離が度々生じた。

マグ溶接 (4 種類) は、溶接作業性に優れていた。アークの指向性、安定性の良さは溶接作業のしやすさにつながり、ひいては溶接部の品質向上につながるとされる。また、YF308LC (CO₂ 及び Ar + 20%CO₂) のビード外観はきれいであったが、Y308 については、スパッタの発生が多く、除去することが難しかった。

ティグ溶接は、1 パスあたりの溶着金属量が少ないため長い作業時間を要し、溶接パス数が増すと共に被溶接材からの輻射熱が増し、溶接作業を続ける上で問題となった。

溶接作業性の問題は、実用面から軽視できない部分だと思われる。

3.3 曲げ試験結果

引張試験において低強度を示したガス溶接法、DFCNi 棒による被覆アーク溶接法、ティグ溶接法については実用性が低いと判断し実施しなかった。

曲げ試験には JISZ3122 に準じローラ曲げ試験方法を用いた。各溶接試験材から表・裏曲げ試験片各々 3 本の試験片を製作した。Fig. 8 は曲げ試験結果を示している。曲げ速度は 1 mm/min である。

DFCNiFe 試験片を除き、裏曲げ試験片が表曲げ試験片に比べ高強度を示している。この理由については、以下のよ

Fig. 8 Relation among bending strength, heat input and welding time of test pieces

Fig. 9 Schematic figure of bending test

Table 4 Relation between yield point and tensile strength of deposited metals and base metal

	DFCnFe	D4316	YGW12	YF308LC	Y308	Base metal
Yield point (MPa)	248	480	485	392	410	292
Tensile strength (MPa)	510	560	573	573	600	533

うに考えている。Fig. 9は実施した曲げ試験に関する説明図である。さらにそれを補足するため、Table 4に溶着金属と母材の耐力及び引張強度を示す。溶着金属の耐力及び引張強度についてはメーカ公表値であり、母材の耐力及び引張強度については実測値である。Fig. 9(a)の表曲げではDFCnFeを除き、溶着金属の耐力が母材のそれより高いため、溶着金属は変形せず応力はB点近傍に集中し変形が始まる。B点近傍には、硬く脆い白銑組織が存在するため破壊起点となり易い。一方(b)の裏曲げでは、溶着金属の耐力が高いため、溶着金属は変形せずB点では圧縮となりC点近傍で変形が始まる。そのため、A点近傍の白銑組織における応力集中が緩和され高強度を示した。また、DFCnFe試験片では、溶着金属の耐力が母材のそれより小さいため変形は溶着金属部で始まる。裏曲げ試験片における変形は狭い溶着金属部に集中するため伸びは小さく、裏曲げ試験片の強度が低くなった。

D4316及びYGW12試験片は共に軟鋼系の溶接材であり、表曲げ強度の低下が顕著である。この理由については、溶着金属の耐力が共に高いため変形がボンド部に集中したためと考えている。

Table 5は以上の結果についての総合評価である。◎、○、△、×の4段階で評価している。評価基準は以下である。曲げ強度に関しては、表・裏曲げを比較し小さい値を使用している。

- ① 引張強度 (◎：母材強度の80%以上，○：70%以上，△：60%以上，×：60%未満)
- ② 曲げ強度 (◎：母材強度の70%以上，○：65%以上，△：60%以上，×：60%未満)

Table 5 Evaluation list of this experiment

Welding method	Welding consumable	Tensile strength	Bending strength	Workability	Efficiency	Economical merit
Gas welding	FCD450	△	—	×	×	◎
Metal-arc Welding with covered electrode	DFCnFe	×	—	△	△	×
	DFCnFe	◎	△	△	○	×
	D4316	◎	×	○	○	◎
Metal-arc active gas welding	YGW12	○	×	◎	◎	◎
	YF308LC (CO ₂)	○	◎	◎	◎	○
	YF308LC (Ar+CO ₂)	◎	○	◎	◎	○
	Y308	◎	△	○	◎	○
TIG welding	NiFe	△	—	○	×	×

- ③ 作業性 (作業工程数，アークの指向性・安定性，欠陥の生じ難さ，スパッタの発生状況，溶加材の送給性，スラグの除去性，ビード外観を総合的に判断)
- ④ 溶着効率 (単位時間当たりの溶着金属量，mm³/min) (◎：2500以上，○：1500以上，△：500以上，×：500未満)
- ⑤ 経済性 (◎：溶接材料価格1000円/kg未満，○：2500円/kg未満，△：4000円/kg未満，×：4000円/kg以上)

4. ま と め

- (1) 従来，鋳鉄の溶接に用いられてきた共金材を用いるガス溶接法及びDFCnFe溶接棒を用いた被覆アーク溶接法は，引張強度，作業性，溶着効率で低い評価となった。また，NiFe系溶加棒を用いたティグ溶接法も同様の評価となった。
- (2) D4316を用いた被覆アーク溶接法，YGW12，YF308LC (CO₂)，YF308LC (Ar+CO₂)及びY308を用いたマグ溶接法は，引張強度，作業性，溶着効率で高い評価となった。アークの指向性，安定性の良さは溶接作業のし易さにつながり，ひいては溶接部の品質向上につながると思われる。
- (3) YF308LCワイヤ (CO₂及びAr+CO₂)を用いたマグ溶接法が球状黒鉛鋳鉄の溶接に最も実用的な施工法と判断された。DFCnFe溶接棒を用いた被覆アーク溶接法は，作業性及び経済性に難点があった。

参 考 文 献

- 1) N. FUJII, J. TAKAHASHI, H. SUZUKI and K. YASUDA: Comparison of Strength Characteristic of Cast Iron/Mild Steel Welding Joints by Various Welding Process, Quarterly Journal of the Japan Welding Society 23 (2005), 302-310. (in Japanese)

- 2) K. NISHIO, N. NAKAMURA and M. KATOH: Impact Characteristics of Joints of Spheroidal Graphite Cast Irons with Ni-Base Brazing Sheet, Quarterly Journal of the Japan Welding Society 20 (2002), 523-530. (in Japanese)
- 3) S. TAKAHARA, K. MAEKAWA, Y. MITIURA, M. TAKIGAWA and H. HORIE: Weld Bonding Example of the Ductile Cast Iron Pipe, Preprints of the 53rd National Meeting of Water Supply (2002), 436-427. (in Japanese)
- 4) M. YANO: Substance Test and Substance Strength of the Nodular Graphite Cast Iron, Preprints of the National Meeting of Japan Foundry Engineering Society 145 (2004), 5. (in Japanese)
- 5) S. TOGAWA and T. TOJIMA: Weld Zone Strength of the Ductile Steel Pipe, Preprints of the 36th National Meeting of Water Supply (1985), 336-338. (in Japanese)
- 6) M. TSUDA, S. EGAWA and Y. KOKUNE: Welding of Cast Iron Using Copper-Base Alloy, IMONO 56 (1984), 288-294. (in Japanese)
- 7) T. ONISHI: Strength of welding zone of Spheroidal Graphite Cast Iron, KUBOTA GIHO 5 (1980), 100-110. (in Japanese)
- 8) M. Toyosada, K. Goto, K. Murakami, M. Ishii, Y. Nagata and A. Furushiro: Study on deformation due to thermal cutting, Proceeding of shipbuilding society of west Japan, 99 (1999), 331-342. (in Japanese)
- 9) M. Nakanishi and H. Maruo: Flame processing and thermal cutting, Sanpo (1979). (in Japanese)
- 10) Handbook of welding and joining, Maruzen (1990). (in Japanese)
- 11) K. Nikuma and K. Soejima: Chuko · Chutetsu no Kandokoro, Sanpo (1969), 149. (in Japanese)