

エレクトロスラグ溶接用メタルコアードワイヤの開発

Development of Metal-cored Wire for Electro-slag Welding of Heavy Wall Steel Plates

早川 直哉 HAYAKAWA Naoya JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)
角 博幸 SUMI Hiroyuki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)
大井 健次 OI Kenji JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・博士 (工学)

要旨

建築用鋼材のエレクトロスラグ溶接用材料である KW-60AD×KF-100AD の溶接金属靱性の確保をより安定化するべく、新規の溶接ワイヤ FG-60AD を開発した。このワイヤは溶接金属の成分安定化を図るため、メタルコアードワイヤとし、フラックス成分とワイヤ成分の最適化により溶接金属の化学組成を溶接長全長に渡り安定化させ、溶接金属靱性の溶接長全長に渡る安定確保を確認した。この技術を適用した板厚 60 mm までの SA440 鋼継手を作成し、目標の継手性能を満足することを確認し、大入熱溶接継手靱性に優れた建築用溶接材料のラインアップを拡充した。

Abstract:

New welding wire for electro-slag welding has been developed for stable toughness of electro-slag weld metal. Metal-cored wire was selected for minimizing variations of chemical composition of weld metal. Uniform chemical composition and good toughness of weld metal along weld length was achieved by optimizing flux and wire chemical compositions. High-strength welds were made with this welding consumables and mechanical properties were investigated. Good mechanical properties were confirmed and line up of welding consumables for high heat input welding of architectural structure have been expanded.

1. はじめに

エレクトロスラグ溶接は大断面の開先を高能率で溶接できる特徴を有し、**図 1** に示すように国内では主に高層ビルの柱として用いられるボックス柱の内ダイヤフラムの組立溶接方法として広く用いられており¹⁾、高層ビルの建築に必須の溶接法の一つである。**図 2** にダイヤフラム厚さと溶接入熱の関係を示すが、エレクトロスラグ溶接は非常に大きな開

先面積を 1 ランで溶接できるメリットがあり、超大入熱溶接となるため、溶接金属、および溶接熱影響部の脆化が問題となる。しかし、近年では震災時の破壊防止の観点から、重要構造物であるボックス柱には溶接金属および溶接熱影響部を含んだ継手部の高靱性化が強く求められている^{2,3)}。上記状況を踏まえ、JFE スチールでは大入熱溶接においても継手の高靱性が得られる鋼材、および溶接材料の開発を進めている。鋼材については粗粒溶接熱影響部 (CGHAZ)

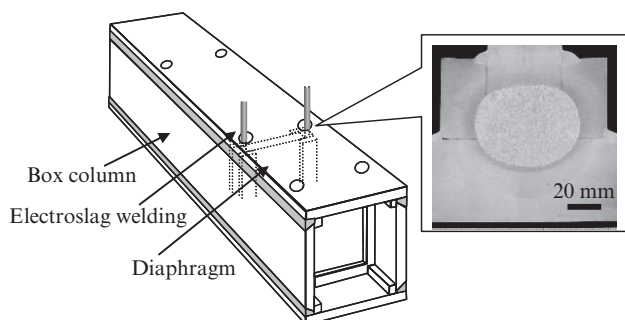


図 1 ボックス柱とエレクトロスラグ溶接継手の模式図

Fig. 1 Schematic illustration of box column and macro structure of electroslag weld joint

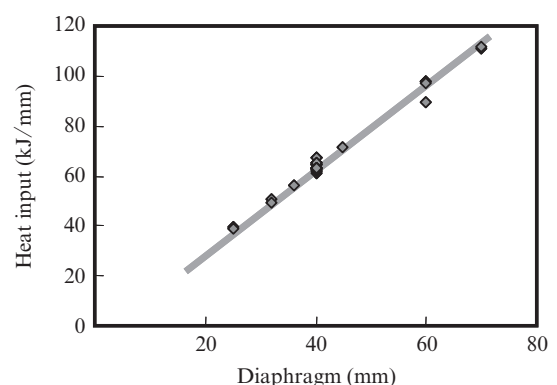


図 2 ダイヤフラム厚さと溶接入熱の関係

Fig. 2 Relationship between heat input and diaphragm plate thickness

2014 年 7 月 7 日受付

の極小化のための TiN の最適利用と、粒内組織を微細化するための BN や Ca 系介在物の利用、および低炭素当量を実現する合金設計からなる大入熱溶接部高韌性化技術「EWEL[®]」を開発⁴⁾、さらに溶接金属および熱影響部 (HAZ) を高韌性化する溶接材料を開発⁴⁾し、建築構造物の耐震安全化に寄与している。

さらに、溶接金属韌性のさらなる安定化を目指して、溶接ワイヤに成分設計自由度の高いメタル系フラックスコアードワイヤを業界で初めて適用し、2012 年には国土交通大臣認定を取得し、大入熱溶接継手韌性に優れた建築用溶接材料のラインアップを拡充した。本稿では溶接金属が高韌性を得るための基本指針と、溶接部材の性能を以下に紹介する。

2. メタルコアードワイヤ適用のコンセプト

エレクトロスラグ溶接は 1950 年代に開発された溶接方法であり、ワイヤには 3.2 mm 前後のソリッドワイヤが用いられるが、1990 年頃に 1.6 mm 径の細径ソリッドワイヤを用いる能率のよい非消耗ノズル式の溶接法が開発⁵⁾され、現在国内の建築構造物の製作にはほとんどがこの非消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接が適用されている。

JFE スチールの建築向け鋼材用のエレクトロスラグ溶接材料として、溶接部の韌性に優れたソリッドワイヤ KW-60AD がラインアップされている⁴⁾。この材料は高い B 量を含む溶接金属を得ることができ、溶接金属中の旧オーステナイト粒界に生じる粗大な粒界フェライトを抑制し、かつ溶接金属から HAZ へ B を拡散させる働きにより、優れた溶接金属と熱影響部の韌性を得ることができる。

しかし、エレクトロスラグ溶接は母材の希釈が大きな溶接であり、良好な溶接金属韌性を安定に得るためには、溶接金属中の B 量を精密に制御する必要があるため、化学成分の設計自由度が高いフラックスコアードワイヤを適用することにより、溶接金属化学組成の制御をより安定化を図った。

また、韌性確保のために合金成分を多く含む細径ソリッドワイヤは固溶強化により硬くなりやすいため、ワイヤ送給性を確保するのに焼鈍工程などの多くの労力を割かなければならないが、軟質なコアードワイヤを用いることで、合金成分を多く含む細径ワイヤでも、比較的容易にワイヤの送給性を確保可能であるメリットがある。

以上のコンセプトのもと、エレクトロスラグ溶接用ワイヤとして KW-60AD に替わるメタル系フラックスコアードワイヤを開発した。

3. 溶接金属の基本設計

超大入熱であるエレクトロスラグ溶接金属においてはマイクロ組織が粗大化し、韌性低下が問題となる。この溶接金

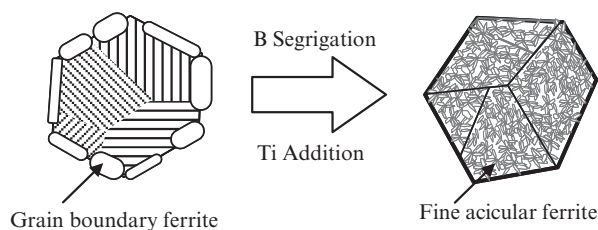


図3 大入熱溶接金属の韌性改善のためのマイクロ組織の模式図
Fig. 3 Schematic illustration of microstructure for improving toughness of large heat-input weld metal

属の高韌性化技術として、図3に示すように、旧オーステナイト粒界に生じる粗大な粒界フェライトを抑制する B の最適化、かつ旧オーステナイト粒内に微細なアシキュラーフェライトを生成させる Ti を含む介在物の分散など、溶接金属化学成分を最適化することによって高韌性化を達成できる。特にエレクトロスラグ溶接では母材の希釈率が 50~65% と大きく、溶接材料は母材の希釈量を想定し、緻密な成分設計を行なうことで溶接金属の組織を制御し、高韌性化を達成している。そして、メタル系フラックスコアードワイヤの適用により、このような溶接金属の化学成分制御はより容易となる。

溶接金属中の固溶 B は酸素および窒素と結びつくことによって減少するが、特に窒素は大きな影響を持つ。溶接金属を高韌化するには溶接金属中の B/N 比を適正に制御する必要がある²⁾。図4に溶接金属のシャルピー吸収エネルギーと溶接金属の B/N の関係、およびマイクロ組織との関係を示す。B/N が 1.0 付近にピークがあり、これより B/N が低い場合は旧オーステナイト粒界のフリー B が不足し、粗大な粒界フェライトが生成する。そのため、シャルピー吸収エネルギーの低下をきたす。一方、窒素が少なく、フリー B が過剰となっても韌性が低下する。高 B/N による韌性の低下は固溶 B の増大によって焼入れ性が増加し、MA 相 (島状マルテンサイト) が生じるためと考えられる。

4. エレクトロスラグ溶接金属の韌性安定化

4.1 溶接ビードの化学組成安定化

上述のごとく、B は溶接金属の韌性に大きな影響を及ぼす元素であり、微量で大きな効果が生じるため、韌性の安定化には溶接長全長に渡って B 量を安定化させることが重要である。

溶接金属の B 量を安定化させるにはフラックスからの B 添加が有効であることが知られている⁶⁾。フラックスコアードワイヤを適用した場合においてもフラックスからの B 添加により溶接長全長での B 量安定化が有効である。

図5に溶接開始点からの距離と溶接金属中の B 量の関係を示す。適用した溶接条件は表1に示す。この図は、ワイ

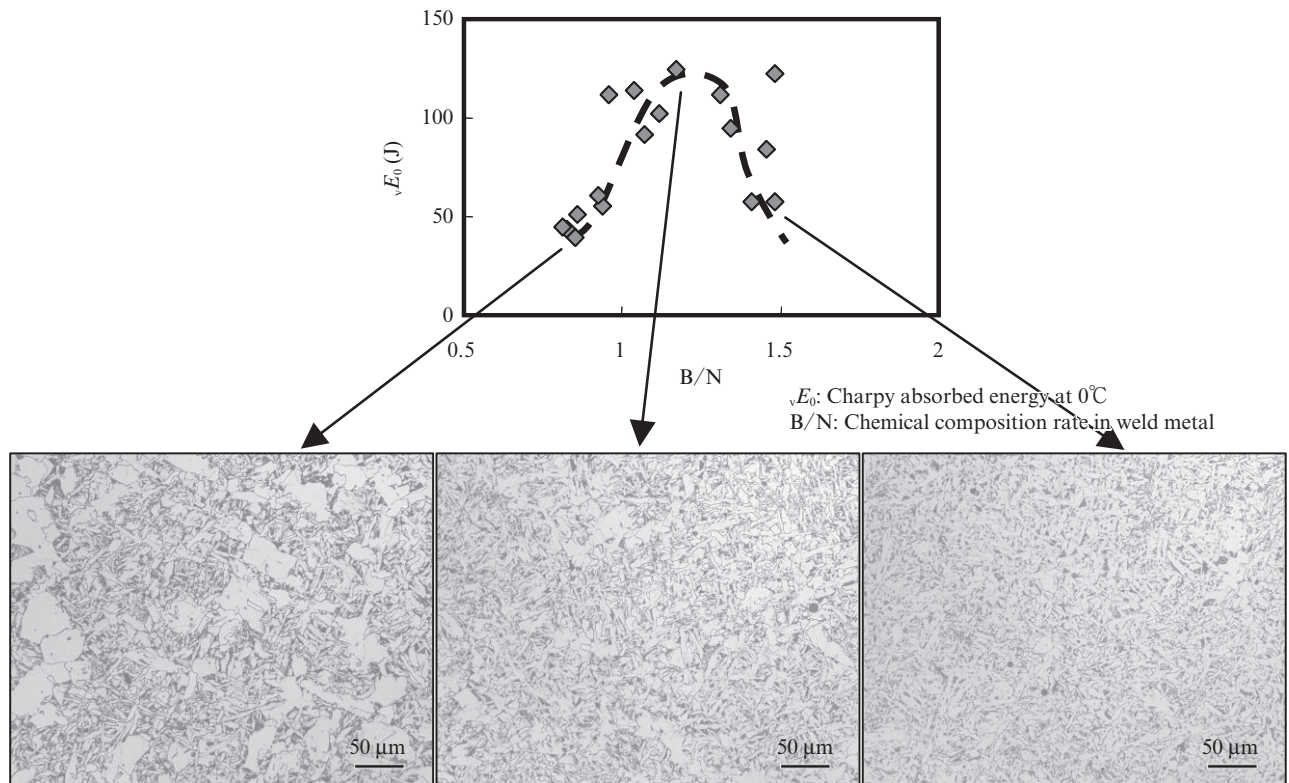


図4 溶接金属のシャルピー吸収エネルギーとマイクロ組織に及ぼす溶接金属 B/N の影響
 Fig. 4 Effect of B/N on Charpy absorbed energy of weld metal and microstructure

ヤ中の B 量を一定 (0.013 mass%) とし、フラックス中の B₂O₃ 量を 0~2.2% の間で変化させ、溶接長全長に渡る溶接金属中の B 量の変化を示している。

フラックスに B₂O₃ が無添加の場合は溶接金属中の B が溶接スタート付近で少なく、溶接進行とともに次第に増加する。一方、フラックスへの B₂O₃ 添加量が 2.2% と多い場合、溶接開始付近の B 量が高くなる。B₂O₃ 添加量を 0.5 mass% とした場合には溶接開始より溶接金属中 B 量が一定量を示し、約 0.005 mass% と安定した。いずれの場合においても、B 量

は溶接長 400 mm 付近で 0.005 mass% 前後に収斂する。すなわち溶接長全長に渡って B 量が安定化する最適なフラックス中 B 量が存在する。

エレクトロスラグ溶接の溶接速度は 15 mm/min 程度と極めて遅く、熔融したスラグは一部 2000℃ 付近の高温となり¹¹⁾、溶接電流による電磁力によって熔融金属のある下方へ熱輸送される。図 6 に模式図を示す。スラグメタル反応は平衡反応と取り扱うことができ¹⁵⁾、次式のような反応が熱力学的にスラグメタル間で起こっていると考えられる。

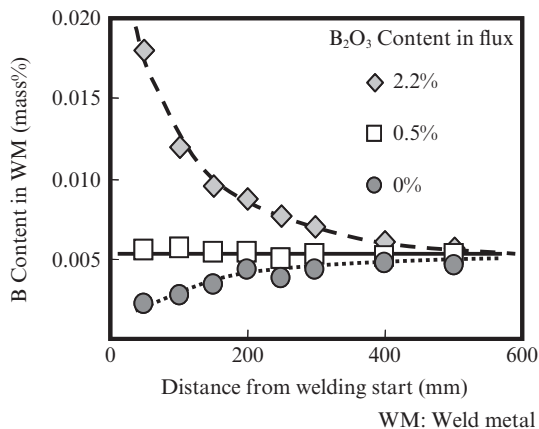
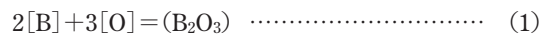


図5 溶接長における溶接金属中 B 量の変化
 Fig. 5 Change in B content of weld metal through weld length

表 1 適正溶接材料を用いた溶接条件
 Table 1 Welding condition using suitable welding consumables

Welding current (A)	Voltage (V)	Heat Input (kJ/mm)	Welded joint shape
380	51	83	

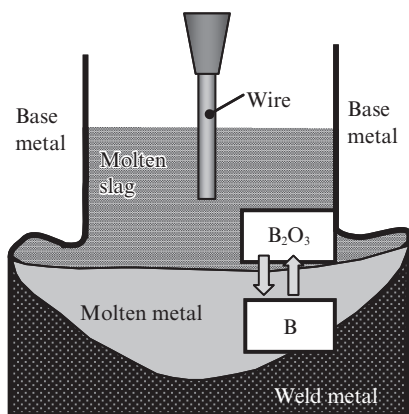


図6 溶融スラグー溶融メタル界面におけるスラグメタル反応の模式図

Fig. 6 Schematic illustration of slag-metal reaction at interface between molten slag and molten weld metal

平衡定数 K は

$$K = \frac{a_{B_2O_3}}{a_B^2 \cdot a_O^3} \dots\dots\dots (2)$$

- $a_{B_2O_3}$: スラグ中 B_2O_3 の活量
- a_B : メタル中 B の活量
- a_O : メタル中 O の活量

フラックス中の B_2O_3 添加量を高めるとメタル中の B 量も増加し、フラックス中に B_2O_3 がなければメタル中 B の酸化消耗が進み、溶接金属中に歩留まる B 量はワイヤに添加した量よりも減少する。溶接の進行とともにスラグ中の B_2O_3 量が増加すると次第に B の酸化消耗は減少し、一定値に収斂する。この収斂する B 量はフラックス中の B 量に依存せず、ワイヤに添加される B 量と相関を持つ。

以上より、ワイヤ B 量に応じてフラックス B 量を最適化することにより、溶接金属中の B 量を溶接長全長に渡って安定化させることが可能になった。

4.2 溶接金属の靱性安定性

上述の考え方に基づいて、溶接金属中の B 量が安定化する

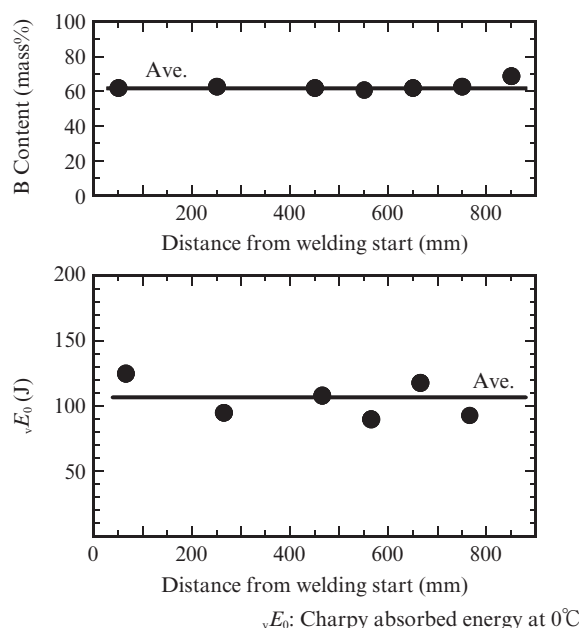


図7 フラックス中 B_2O_3 を最適化した溶接金属の B 量とシャルピー吸収エネルギー

Fig. 7 Charpy absorbed energy and B content of weld metal

るように溶接ワイヤおよびフラックスの B 量を調整し、溶接継手を作製した。表 1 に示す溶接条件を用いて溶接長 900 mm の溶接継手を作製し、溶接金属中の B 量および溶接金属靱性を評価した。図 7 に溶接金属の全長にわたる溶接金属の B 量とシャルピー吸収エネルギー $\sqrt{E_0}$ を示す。B 量はほぼ一定値を示し、溶接金属の靱性も安定して高い値が得られた。

5. 溶接継手の特性

開発した溶接材料による継手特性を調査する目的で、ボックス柱の大入熱溶接継手を模擬した T 型試験体を作製し、継手性能の確性を示した。継手の作製条件を表 2 に示す。スキンプレートには JFE スチールの大入熱溶接熱影響部の高靱性化技術である「EWEL[®]」⁴⁾ を適用した大入熱対策鋼の SA440C-E 鋼を適用し、ダイヤフラムには 50 kgf/mm² 級

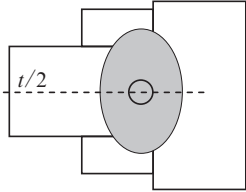
表 2 溶接継手機械性能評価の溶接条件

Table 2 Welding condition for evaluation of mechanical properties of weld joint

Base metals	Welding consumables	Joint shape	Heat input
Skin plate: SA440C-E 60 mm Diaphragm: HBL325B 60 mm	Wire: FG-60AD Flux: KF-100AD	<p style="text-align: right;">unit : mm</p>	98 kJ/mm

表3 溶接金属の引張試験結果

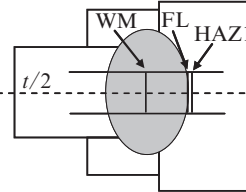
Table 3 Tensile test results of weld metal

Position	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
	459	636	20

YS: Yield strength
TS: Tensile strength
El: Elongation

表4 溶接継手のシャルピー試験結果

Table 4 Results of Charpy V-notch impact test of welded joint

Notch position	Charpy absorbed energy, vE_0 (J)		
	222	147	116

*1 mm from fusion line
FL: Fusion line
WM: weld metal

のTMCP(熱加工制御)鋼であるHBL[®]325B鋼を適用した。「EWEL[®]」は(1)γ粒微細化技術,(2)HAZ粒内組織制御技術,(3)最適成分設計と製造プロセスおよび(4)WM(溶接金属)からのB拡散を利用したHAZ組織制御の4つの技術要素を統合させたものであり,これらの技術を建築高張力鋼板へ適用することで,大入熱溶接熱影響部の高靱化を達成している。溶接入熱は98 kJ/mmであり,極めて高く,機械的性能評価としては厳しい条件とした。表3および表4に溶接継手の機械的性質を示す。溶接金属強度は636 MPaと十分な強度を示した。溶接金属のシャルピー衝撃吸収エネルギーは0°Cにて平均116 J,熱影響部においては溶融線(FL)上にて平均147 J,溶融線より母材側に1 mm離れたHAZ1では平均222 Jと良好な特性を示し,目標である70 J以上を満足した。

6. おわりに

新たなエレクトロスラグ溶接用材料としてメタルコアード

ワイヤであるFG-60ADを開発した。ワイヤとフラックスの化学組成最適化により高靱性を安定に得ることができる。本溶接材料は2012年に大臣認定を取得し,大入熱溶接継手人生に優れた建築用溶接材料のラインアップを拡充した。JISにおいてもエレクトロスラグ溶接用コアードワイヤの規格が定められ,今後の適用拡大が期待される。

本溶接材料は株式会社神戸製鋼所溶接事業部門技術センター殿との共同開発によるものです。開発にあたりまして多大なるご協力,ご支援を賜りました末永和之様,笹倉秀司様,陳亮様,中野利彦様(現神鋼溶接サービス株式会社)に謹んで感謝申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば, 向野聡彦, 浅野美次. 日本建築学会 学術講演梗概集. C-1, 構造 III, 木質構造, 鉄骨構造, 鉄骨鉄筋コンクリート構造. 1997, 581-582.
- 2) 稲田達夫, 小川一郎. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 340-343.
- 3) 稲田達夫. 溶接技術. 2003, vol. 51, p. 57-64.
- 4) 木村達巳, 角博幸, 木谷靖. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 38-44.
- 5) 鈴木雄二, 乙黒盈昭, 長友和男, 鈴木友幸, 堀井行彦. 溶接学会講演概要. 1994, vol. 54, p. 124-125.
- 6) 木谷靖, 池田倫正, 安田功一. 溶接学会講演概要. 2005, vol. 77, p. 422-423.
- 7) 木谷靖, 池田倫正, 小野守章, 池内建二. 溶接学会論文集. 2009, vol. 27, p. 240-246.
- 8) 木谷靖, 池田倫正, 安田功一. 溶接学会講演概要. 2004, vol. 75, p. 340-341.
- 9) 木谷靖, 池田倫正, 安田功一. 溶接学会講演概要. 2004, vol. 75, p. 338-339.
- 10) 木谷靖, 池田倫正, 大井健次, 一宮克行. 溶接学会講演概要. 2003, vol. 72, p. 108-109.
- 11) 安藤弘平, 和田宏一. 溶接学会誌. 1970, vol. 39, p. 669-675.
- 12) 安藤弘平, 和田宏一. 溶接学会誌. 1971, vol. 40, p. 1016-1024.
- 13) 安藤弘平, 和田宏一. 溶接学会誌. 1971, vol. 40, p. 1104-1110.
- 14) 安藤弘平, 仲田周次, 和田宏一. 溶接学会誌. 1973, vol. 42, p. 106-113.
- 15) 中野昭三郎, 玉置克臣, 坪井潤一郎. 溶接学会誌. 1977, vol. 46, p. 68-75.
- 16) 早川直哉, 角博幸, 大井健次, 石神篤史, 笹倉秀司, 中野利彦. 溶接学会講演概要. 2013, vol. 92, p. 196-197.



早川 直哉



角 博幸



大井 健次