

建築構造用高 HAZ 靱性鋼を用いたエレクトロスラグ溶接部の 衝撃特性に関する研究（その2）

The Impact Toughness of Weld Metal Produced by Electroslag Welding Using High HAZ Toughness Steel for Building Construction (Part 2)

櫻井 謙次*¹ 中野 秀二*² 吉川 薫*³
Kenji SAKURAI Shyuuji NAKANO Kaoru YOSHIKAWA

Summary

This part continues our study of the toughness of weld metal produced by electroslag welding. Using our results from Part 1, we verify the effect of the cooling rate of weld metal on the toughness. In addition, we report on the results of tests that were done to improve welding wire. We establish the optimum welding conditions so that the required toughness of welding metal can be obtained. The toughness can be obtained under a range of conditions, even when electric furnace steel FB is used for the backing strip and the heat input is above normal.

キーワード：衝撃特性，溶接金属，HAZ 細粒高靱性化技術，エレクトロスラグ溶接

1. はじめに

建築基準法の改正に伴い箱形断面柱に用いられるダイアフラムの板厚が厚くなる傾向がある。これによりエレクトロスラグ溶接（Electroslag Welding：ESW）の溶接入熱が更に増大し、溶接継手部の冷却速度の低下が金属組織の粗大化を招き、衝撃特性の劣化が懸念される。

第一報では、HTUFF 鋼（SA440C-HF，BT-HT355C-HF）と対応溶接材料である YM-55HF を用いて溶接継手部の衝撃特性の改善を目的として、①WM の酸素含有量による影響、②裏当金材質の相違による窒素含有量と溶接入熱量による影響、③裏当金の処理と組立状況による影響を変数とした試験を実施し、その影響の程度を確認した¹⁾。

この結果を受けて、第二報では冷却速度が靱性に及ぼす影響を確認すると共に、裏当金に電炉材 FB を使用しても、また入熱が多少大きくなっても溶接金属に必要な靱性が広い条件範囲で安定して得られるように溶接ワイヤの改良および最適な溶接施工条件を確立することを目的として実施した試験の結果を報告する。

2. HTUFF 鋼と HTUFF 鋼対応溶接材料の概要

HTUFF 鋼は「HAZ 細粒高靱性化技術」（HTUFF：Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure imparted by Fine Particles）を用いて製造した大入熱溶接対応高性能鋼である。この HTUFF 技術は、より高温まで安定な酸化物や硫化物等の微細粒子を鋼中に多数分散させ、大入熱溶接においても HAZ 組織の粗大化を強力に抑制する技術である。更に、鋼材化学成分の最適化によって、HAZ における局部脆化組織を低減し、安定した大入熱 HAZ 靱性を確保する技術である^{2) - 8)}。

前報で示したように、HTUFF 鋼の BOND および HAZ の衝撃特性は非常に良好であることが確認された。一方、大入熱溶接における HTUFF 鋼の HAZ と同等以上の性能を有する溶接金属（Weld Metal：WM）を得ることが可能な「YM-55HF」が ESW 用ワイヤとして開発されている。このワイヤは、従来広く使用されている YM-55A をベースに粒界フェライトの低減とオーステナイト粒の微細化を実現したもので、ESW のような大入熱溶接の条件下においても優れた WM が得られる^{9) - 10)}。

本研究では、WM のさらなる高靱性化を図る目的でワイヤの化学成分を微調整した。

*¹松本工場品質管理部品質管理課

*²松本工場品質管理部品質管理課課長

*³松本工場製造部付課長

3. 試験計画と溶接記録

3-1. 試験概要

表-1 に試験概要を、図-1 に試験体形状及び試験片採取位置を示す。また、表-2 に使用した鋼材の機械的性質と化学成分を示す。

試験体は、溶接長 600mm の T 形でスキムプレート (SP) とダイアフラム (DP) の板厚比 (SP/DP) が 0.73 ~ 1.67 と異なる A ~ H の 8 体とした。なお、D 試験体及び H 試験体のスキムプレートの板厚は、それぞれ 60mm、50mm を機械加工により片側から減厚し 40mm として用いることとした。

鋼材の組合せとして、スキムプレートは第一報と同成分の 2 種類の HTUFF 鋼とし、これらに対して一般的によく用いられる 3 種類の鋼材をダイアフラムに用いた。また、裏当て金も一般的によく用いられる FB-SN490B とした。

使用した溶接ワイヤは、YM-55HF に焼入れ性の改良を施した YM-55HF (M) を用いた。また、フラックスは YF-15I を使用した。

試験片採取については、シャルピー衝撃試験片を溶接線中央より溶接終端部側で行い、HAZ 試験片のノッチ位置は柱側の溶融境界部 (通称: BOND) より 1mm、3mm、5mm 離れた位置で採取することとした。

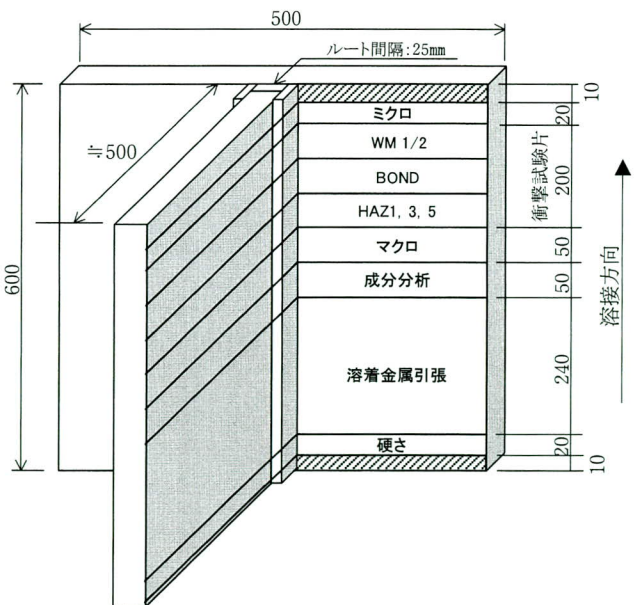


図-1 試験体形状及び試験片採取位置

3-2. 溶接記録

表-3 に溶接条件を、図-2, 3 に表面温度の測定位置

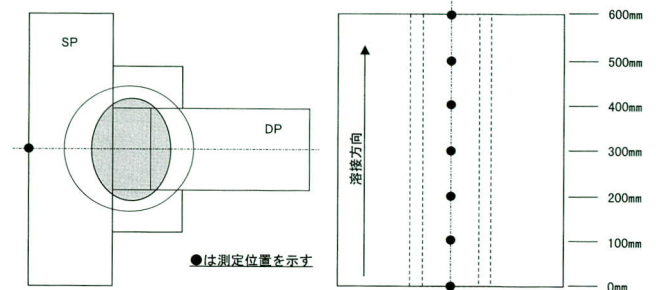


図-2 表面温度測定位置

表-1 試験概要

試験体 マーク	鋼材				溶接材料			試験項目	
	スキムプレート 材質	ダイアフラム 材質	裏当て金 材質	SP/DP 板厚	ワイヤ銘柄	フラックス	非破壊試験	機械試験	
A	SA440C-HF	SN490B	36	1.67	YM-55HF (M)	YF-15I	UT検査	成分分析	衝撃試験
B		TMCP325B	45	1.33					
C		TMCP355B	55	1.09					
D		TMCP355B	55	0.73					
E	BT-HT355C-HF	SN490B	36	1.39	1.6φ	20×D	UT検査	成分分析	衝撃試験
F		TMCP325B	45	1.11					
G		TMCP355B	55	0.91					
H		TMCP355B	55	0.73					

表-2 (a) 鋼材の機械的性質

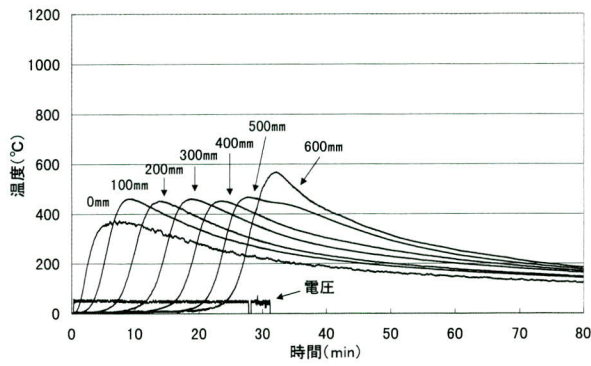
部位	材質	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	伸び (%)	vEo (J)
SP	SA440C-HF	450	622	32	236
	BT-HT355C-HF	440	581	27	340
DP	SN490B	383	530	29	210
	TMCP325B	396	519	32	395
	TMCP355B	425	551	33	332

表-2 (b) 鋼材化学成分

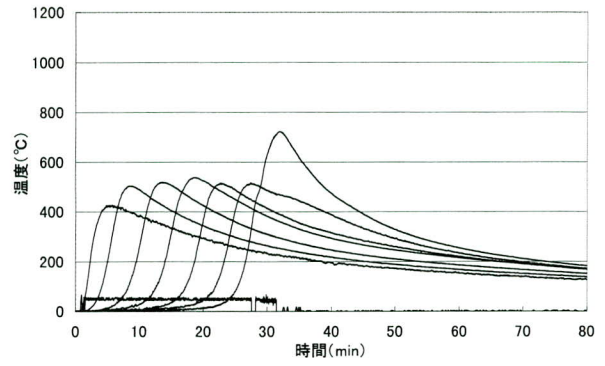
部位	材質	(mass%)						
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
SP	SA440C-HF	0.10	0.16	1.56	0.006	0.002	0.56	0.59
	BT-HT355C-HF	0.12	0.26	1.40	0.010	0.003	0.01	0.02
DP	SN490B	0.17	0.36	1.37	0.016	0.004	0.00	0.01
	TMCP325B	0.14	0.35	1.23	0.010	0.002	0.01	0.01
	TMCP355B	0.14	0.35	1.35	0.007	0.002	0.01	0.01

表-3 溶接条件

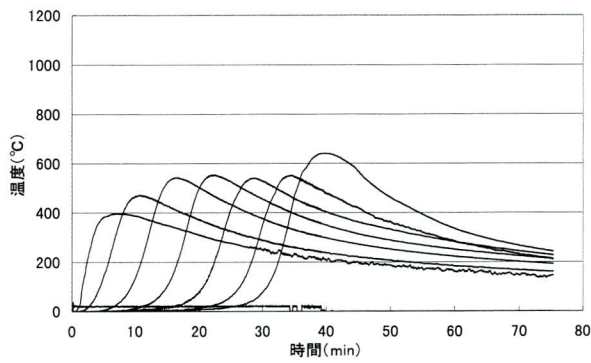
試験体記号	DP板厚 (mm)	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	ノズル上昇速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/cm)
A	36	380	48	2.20	497
B	45	380	50	1.75	651
C	55	380	51	1.44	808
D	55	380	51	1.42	819
E	36	380	48	2.16	507
F	45	380	50	1.79	637
G	55	380	51	1.43	813
H	55	380	51	1.40	831



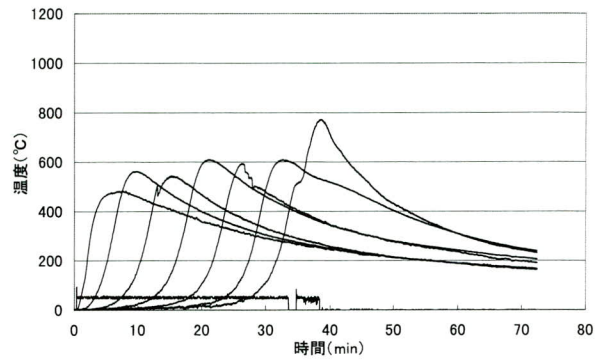
A 試験体 (SP/DP=1.67)



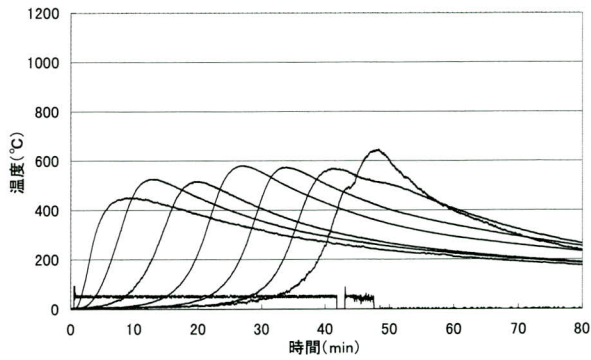
E 試験体 (SP/DP=1.39)



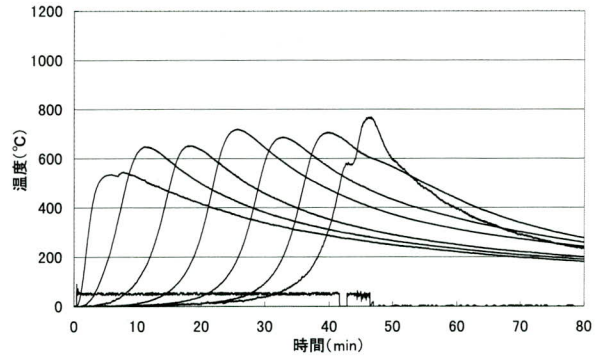
B 試験体 (SP/DP=1.33)



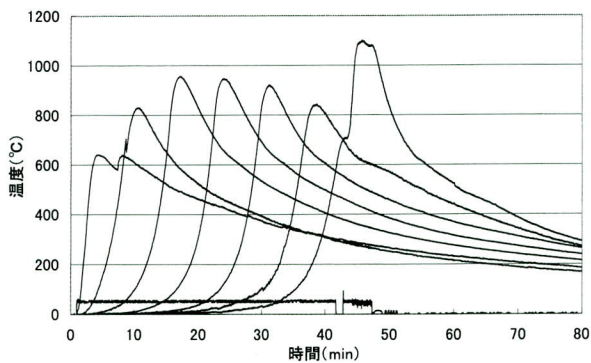
F 試験体 (SP/DP=1.11)



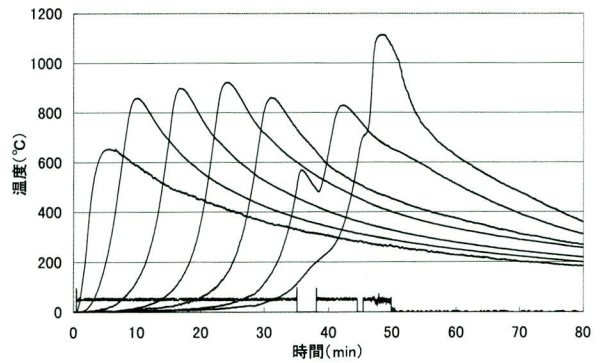
C 試験体 (SP/DP=1.09)



G 試験体 (SP/DP=0.91)



D 試験体 (SP/DP=0.73)



H 試験体 (SP/DP=0.73)

図-3 表面温度測定結果

置と測定結果を示す。溶接入熱量は、497～831kJ/cm となった。

表面温度測定には熱電対を用い、測定位置はスキンプレート表面で幅500mmの中央部を溶接方向に100mmピッチとした。このときスタート側を0mm、エンド側を600mmとした。表面温度は、SP/DPが1.0以上の試験体では、平均的に500～600℃程度であるのに対し、1.0以下では平均的に700～900℃程度と高い値を示した。

4. 試験結果

4-1. 超音波探傷試験結果

日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規程・同解説（1996）」に基づいて試験を実施した結果、欠陥は無く、溶け込み幅も十分に確保されており、良好な結果が得られた。

4-2. 溶接部調査結果

(1) 溶接金属の化学成分

表-4に溶接金属の化学成分を示す。鋼材の化学成分を反映して、Si, Mn量にわずかに差はあるものの、試験体によらずほぼ同様の化学成分となっている。なお、N, O含有量はいずれの試験体も、健全な範囲内でほぼ一定となっている。

(2) 引張試験

表-5に引張試験結果を示す。それぞれの値の差は小さく良好な結果が得られた。

(3) 硬さ試験

表-5にスタート側の硬さ試験結果を示す。最高硬さ

表-4 化学成分分析試験結果

(mass%)

試験マーク	C	Si	Mn	P	S	Mo
A	0.09	0.36	1.52	0.008	0.003	0.55
B	0.10	0.37	1.48	0.007	0.004	0.55
C	0.09	0.37	1.49	0.005	0.003	0.59
D	0.08	0.35	1.53	0.005	0.003	0.55
E	0.10	0.40	1.43	0.009	0.003	0.57
F	0.09	0.40	1.42	0.008	0.003	0.61
G	0.10	0.40	1.44	0.008	0.003	0.59
H	0.10	0.40	1.45	0.008	0.003	0.58

表-5 引張試験・硬さ試験結果

試験マーク	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	Hv
A	509	733	26	238
B	495	727	25	239
C	508	731	29	243
D	496	729	23	239
E	509	731	26	243
F	507	721	28	243
G	497	721	28	232
H	493	732	30	239

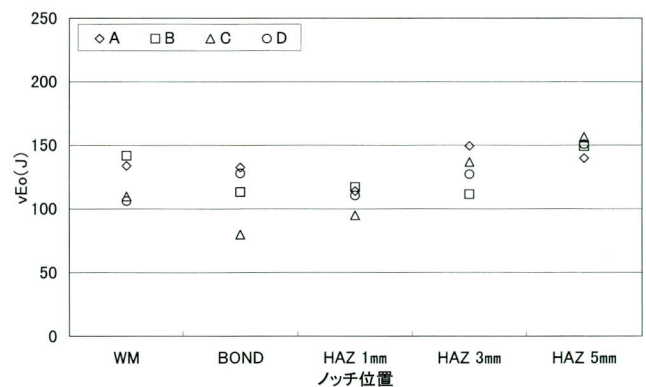


図-5a 衝撃試験結果 (SA440C-HF)

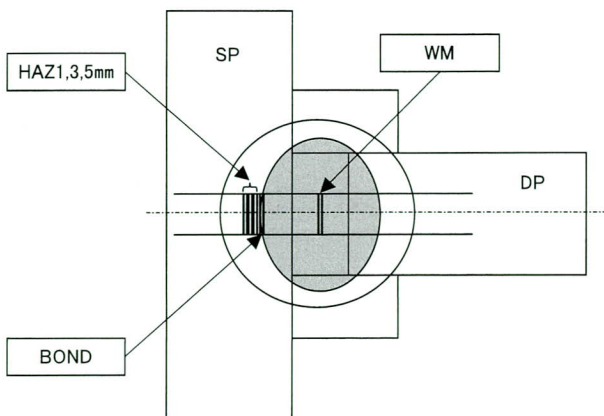


図-4 衝撃試験片採取位置

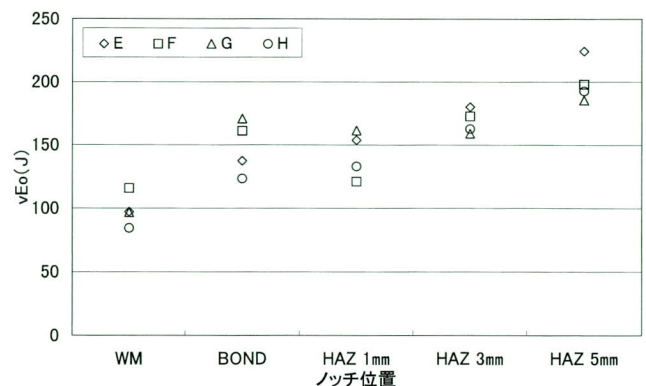


図-5b 衝撃試験結果 (BT-HT355C-HF)

に大きなバラツキはみられなかった。また、最高硬さはWMにおいて示され、SA440C-HFのC試験体、BT-HT355C-HFのE、F試験体で243Hvが最高値であった。また、過度の軟化はみられず良好であった。

(4) 衝撃試験

図-4に衝撃試験片採取位置を、図-5に衝撃試験結果を示す。全ての採取位置において衝撃特性はいずれも良好な結果であった。最も低い値でも、SA440C-HFのBONDで80J（入熱量808kJ/cm）、また、BT-HT355C-HFのWMで84J（入熱量831kJ/cm）であった。

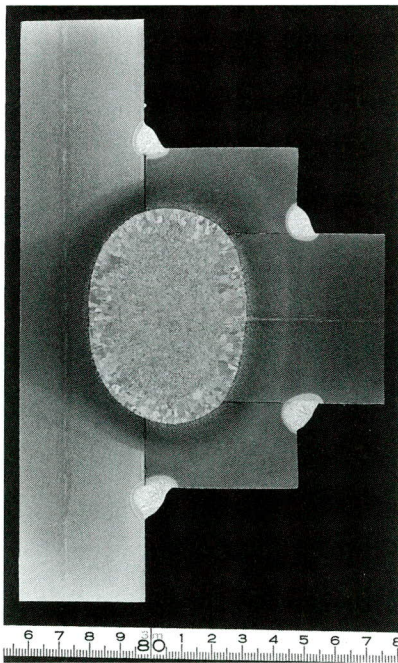


写真-1 マクロ写真（H試験体）

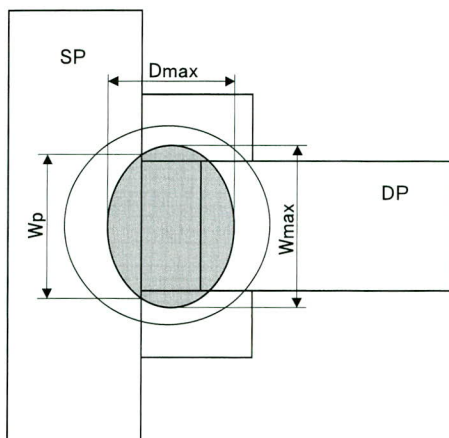


図-6 WMサイズ測定位置

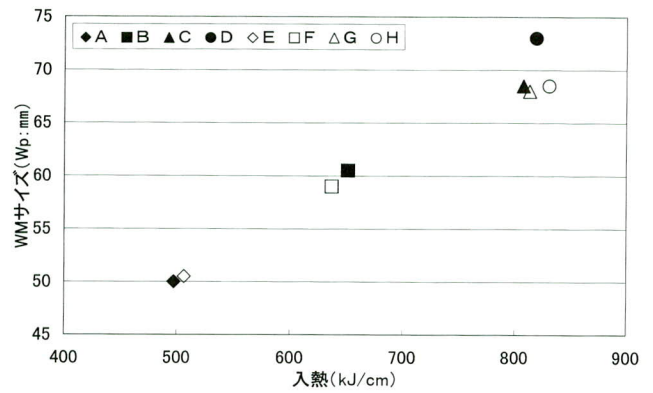


図-7 入熱量とWMサイズ測定結果

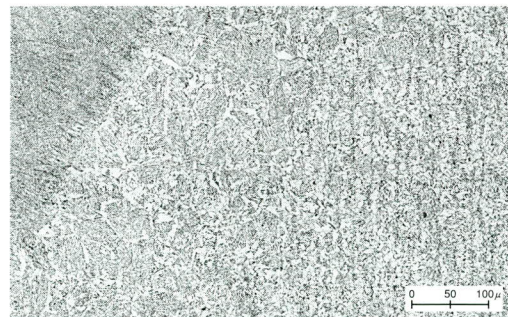
(5) マクロ試験

写真-1にマクロ写真を例示する。試験面に欠陥は検出されず良好な結果が得られた。

図-6にWMサイズ測定位置を、図-7に入熱量とWMサイズ測定結果との関係を示す。エレクトロスラグ溶接の条件的な性質から、DP板厚が厚くなるに従い入熱量は増大し、これに伴ってWMのサイズも増大する傾向となった。

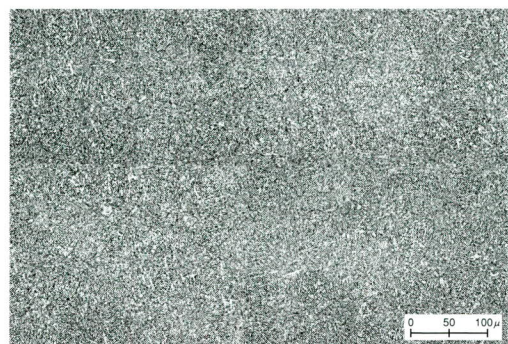
(6) ミクロ試験

写真-2にSA440C-HFを用いた試験体C、写真-3に



×100

写真-2 ミクロ写真（C試験体 BOND～HAZ）



×100

写真-3 ミクロ写真（H試験体 WM）

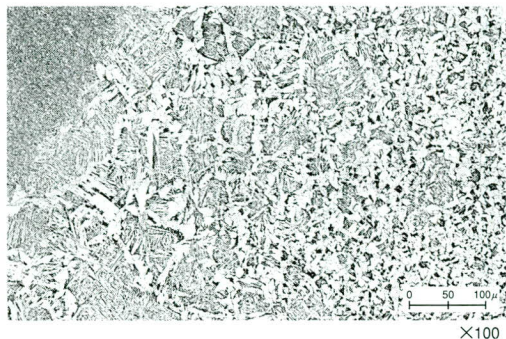


写真-4 ミクロ写真 (H試験体 BOND~HAZ)

BT-HT355C-HFを用いた試験体HのWM、BOND、HAZの組織を例示する。C試験体は、BONDで80J、HAZ 1mmで95J、H試験体はWMで84Jといずれも非常に高い値ではあるが、本試験体においての最低値である。これらはWM、HAZとも入熱によるマイクロ組織の変化は小さく、WMは入熱、鋼材の種類によらず粒界フェライトが抑制された均一微細組織となっていて高い靱性を保っており、HAZはHTUFF技術による細粒効果によって靱性低下が抑制されている。

5. 考察

5-1. 衝撃特性に及ぼす入熱量の影響

(1) 入熱量とBOND、HAZ衝撃特性の関係

図-8にBOND、図-9にHAZ1, 3, 5mmの入熱量と衝撃試験結果の関係を示す。特に組織が粗大化するBONDとHAZ1mmでは、C試験体(入熱量808kJ/cm)のBONDで80J、HAZ1mmで95Jがそれぞれ最も低い値であるが、HAZ3mm、HAZ5mmの結果も含め、必ずしも入熱量の増大に伴って衝撃特性が低下するとは言えず、むしろ本試験の入熱範囲(約500~800kJ/cm)においては衝撃特性が平均的に100J以上という高い値を得られる結果となった。これは、熱影響部のマイクロ組織観察の結果で示したように、HTUFF鋼の持つ性能(HAZ細粒高靱性化技術)により組織の粗大化が入熱量に関わらず顕著に抑制されており、特に、今回の入熱範囲では衝撃特性に悪影響を及ぼすと考えられている上部ベイナイトや疑似パーライトの生成量が少なかったためと考えられる。このように、HTUFF鋼の靱性レベルは入熱量にあまり依存せずに高靱性を維持すること、換言すると、本研究のようにSP/DPを0.73~1.67とかなり広い範囲で実用的に変化させた場合においてもそのBONDとHAZ

表-6 SP/DP値

SP (mm)	DP (mm)							
	28	32	36	40	45	50	55	60
28	1	0.88	0.78	0.70	0.62	0.56	0.51	0.47
32	1.14	1	0.89	0.80	0.71	0.64	0.58	0.53
36	1.29	1.13	1	0.90	0.80	0.72	0.65	0.60
40	1.43	1.25	1.11	1	0.89	0.80	0.73	0.67
45	1.61	1.41	1.25	1.13	1	0.90	0.82	0.75
50	1.79	1.56	1.39	1.25	1.11	1	0.91	0.83
55	1.96	1.72	1.53	1.38	1.22	1.10	1	0.92
60	2.14	1.88	1.67	1.50	1.33	1.20	1.09	1

はいずれも高靱性であることが確認されたわけである。

(2) 入熱量とWM衝撃特性の関係

図-10に入熱量とWM衝撃試験結果の関係を示す。平均的に100J以上という非常に高い結果となったものの、入熱量の増大に伴って衝撃特性が若干低下する傾向が見られる。これは、溶接金属の変態組織(アシキュラーフェライト、ベイナイト)が粗大化したことによるものと考えられる。

5-2. 衝撃特性に及ぼすSP/DPの影響

(1) SP/DP値とBOND、HAZ衝撃特性の関係

表-6にSP/DP値を示す。また、表中のハッチ部分は本試験のSP/DP値を示す。製作頻度の高い板厚となる28mmから60mmの範囲では、SP/DP値が0.47~2.14の範囲で変化することが確認できる。

図-11にBOND、HAZ1, 3, 5mmのSP/DP値と衝撃試験結果の関係を示す。SP/DPとBOND靱性及びHAZ靱性との間に明確な相関関係は認められず、本試験のSP/DPの範囲内であれば平均的に100J前後の良好な靱性を確保することが可能であると考えられる。

(2) SP/DP値とWM衝撃特性の関係

図-12にSP/DP値とWM衝撃試験結果の関係を示す。SP/DPとWM靱性との間に相関関係が認められ、SP/DPが小さいほど靱性は低下している。これは、WMの靱性に対しWMの冷却速度による影響があるものと考えられる。

5-3. 衝撃特性に及ぼす冷却速度の関係

(1) $\Delta t_{800/500}^{\circ}\text{C}$ とWM衝撃特性

図-13にWMの温度が800 $^{\circ}\text{C}$ から500 $^{\circ}\text{C}$ まで冷却される時間($\Delta t_{800/500}^{\circ}\text{C}$)をX軸とし、WMの衝撃値をY

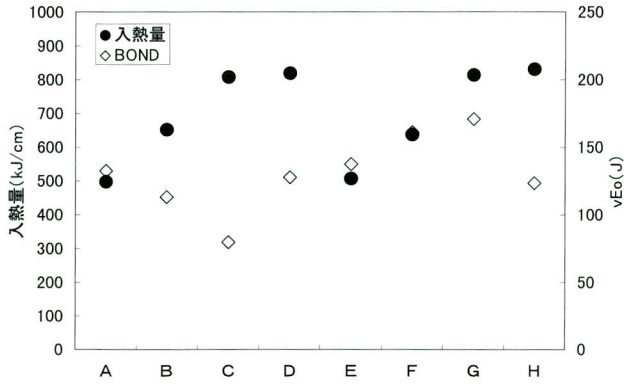


図-8 入熱量とBOND衝撃試験結果

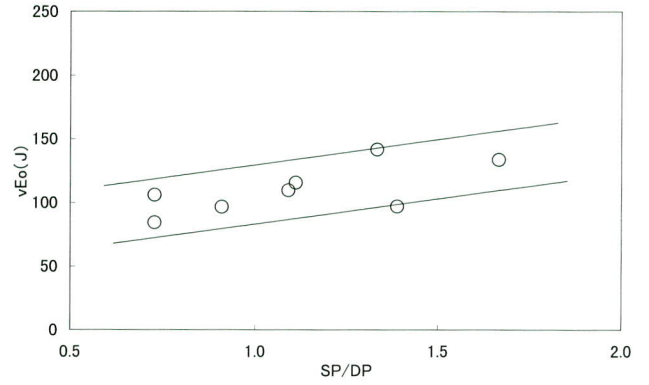


図-12 SP/DP値とWM衝撃試験結果

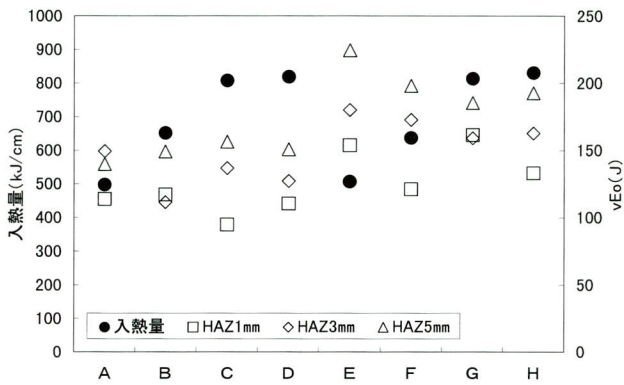


図-9 入熱量とHAZ1,3,5mm衝撃試験結果

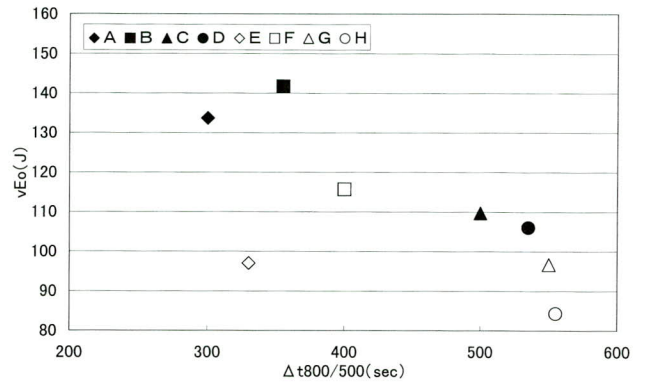


図-13 Δt800/500℃とWM衝撃試験結果

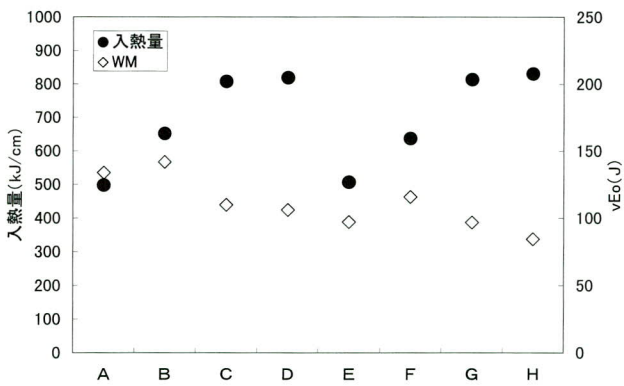


図-10 入熱量とWM衝撃試験結果

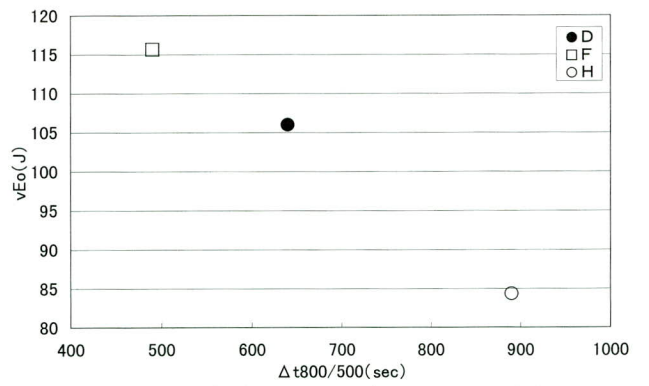


図-14 表面温度 (Δt800/500℃)とWM衝撃試験結果

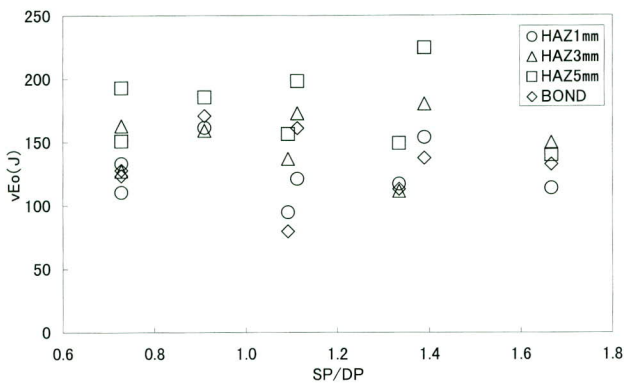


図-11 SP/DP値とBOND, HAZ衝撃試験結果

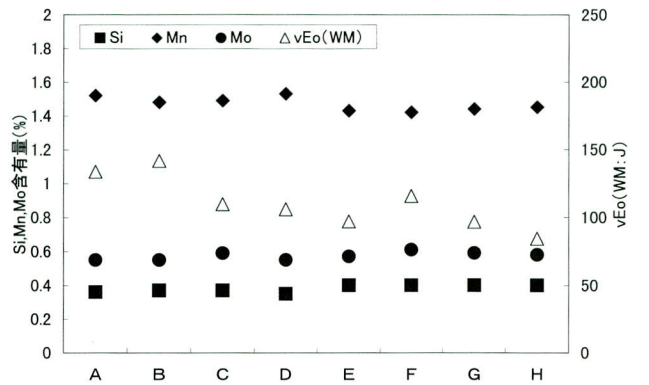


図-15 Si, Mn, Mo含有量と衝撃試験結果

軸とした関係を示す。なお、 $\Delta t_{800/500}^{\circ}\text{C}$ は市川ら¹¹⁾が3次元差分法により推定した値を用いた。傾向として、冷却速度が小さいほど衝撃値も低下していることがわかる。本試験では、WMの組成に大きな違いがないことから、WMの組織への影響は、主として冷却速度によるところが大きく、冷却速度が小さいほどWMの変態組織が若干粗大化したことによるものと推定される。

(2) 表面温度とWM衝撃特性

図-14に表面温度結果から読み取った $\Delta t_{800/500}^{\circ}\text{C}$ とWM衝撃試験結果の関係を示す。これらは、表面温度が 800°C 近傍まで上昇した値から直接読み取ることができた3体について比較したものである。この結果、図-13と同様に冷却速度が小さいほど衝撃値が低下する傾向が認められる。

5-4. 衝撃特性に及ぼす化学成分

(1) Si, Mn, Mo含有量とWM衝撃特性

図-15にSi, Mn, Mo含有量と衝撃試験結果の関係を示す。Si, Mn, Mo含有量とWM韌性との間に明確な相関関係は認められず、これらの合金元素含有量の範囲では、WMの韌性値の違いに対し大きな影響を及ぼしていないことが推定される。

5-5. ミクロ組織と衝撃特性

(1) SA440C-HFのミクロ組織と衝撃特性の関係

平均的な粒径を評価した場合には明らかに入熱依存性があるものの、ミクロ組織的に大きな変化は認められない。しかしながら、部位によっては、結晶粒径が粗大化し、韌性に悪影響を及ぼすことが知られている粒界フェライトの粗大化や粒内に粒内フェライトに加えて、硬質相の上部ベイナイトの存在が僅かであるが確認された。BT-HT355C-HFに比較して、シャルピー吸収エネルギーがやや低いのはこのようなミクロ組織の影響を反映したものと推定される。

(2) BT-HT355C-HFのミクロ組織と衝撃特性の関係

この場合もミクロ組織の結晶粒径には入熱依存性が認められるが、その変化代は同様に軽微である。一方、粒内の微細組織はSA440C-HFと同様に粒内フェライトと少量の上部ベイナイト組織となっているが、入熱が大きい場合には粒界フェライトの生成が助長され、しかも粒界フェライトの粗大化が局所的に進んでいることが確

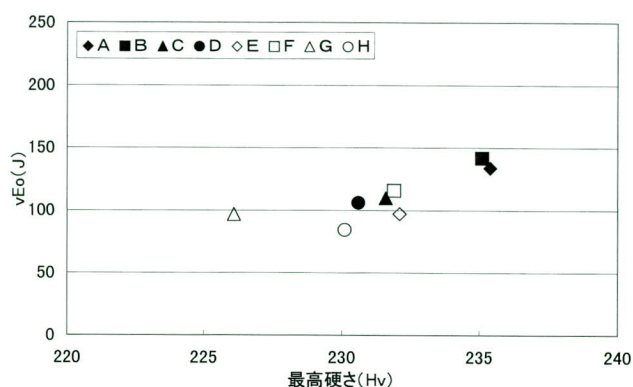


図-11 SP/DP値とBOND, HAZ衝撃試験結果

認された。その結果として粒界フェライトに沿って生成した疑似パーライト [黒く見える領域] 量が増大する傾向となっている。

5-6. 硬さとWM衝撃特性

図-16に最高硬さとWM衝撃試験結果の関係を示す。

WMの硬さと韌性との間に相関関係が認められ、硬さが高いほど韌性は良好となった。硬さの高いものほど組織が微細化していることを示唆しており、図-13、図-14において、入熱の増加にともなって冷却速度が小さくなるほど韌性が劣化する理由が組織の粗大化によるものであることを裏付けている。

6. まとめ

本報では、HTUFF鋼と対応溶接材料のYM-55HFに焼入れ性を改良したYM-55HF(M)を用い、ダイアフラムと裏当て金は従来鋼という組合せにより、大入熱で溶接されるエレクトロスラグ溶接部の衝撃特性を主とした機械的性質について検討した。

この結果、WM, BOND, HAZのすべてにおいて衝撃特性は80J以上という非常に高い衝撃値が得られた。この理由として、WMについては、ワイヤの改良によりWMの化学成分が適正化されて組織が均一微細化されたことと、不純物元素を低減させたことによるものである。また、BONDおよびHAZについては、HTUFF鋼の特徴であるHAZ細粒化効果によってBOND近傍におけるHAZ組織の粗大化が顕著に抑制されたことと、さらにHAZ韌性に悪影響を及ぼす上部ベイナイトのような硬質第二相の生成が少ないためである。

しかし、本試験に用いたワイヤは試作段階であるため、

今後、製品への適用には低コスト化なども含めて早急な実用化を期待したい。

7. 今後の課題

これまで、大入熱で溶接されるエレクトロスラグ溶接部の冶金的な靱性低下機構の解明に努め、衝撃特性の確保という観点から試験を実施してきたが、ダイアフラム継手部が地震時にどのような応力状態にあるのかを明らかにすることにより、どの位置で、どのくらいの衝撃特性が必要となるのかを明確にしていくことが、今後の大きな課題であると考えられる。

本試験を実施するにあたり、御協力頂いた新日本製鐵株式会社の吉田氏、鶴田氏、渡部氏、植森氏、児島氏、市川氏、長谷川氏、磯田氏、日鐵溶接工業株式会社の木本氏、他、関係各位に心より感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 櫻井謙次ら：建築構造高 HAZ 靱性鋼を用いたエレクトロスラグ溶接部の衝撃靱性に関する研究(その1)，宮地技報 No.18 (2002)，pp.53～60.
- 2) 児島明彦ら：まてりあ 第42巻 第1号 (2003)「新技術・新製品」，pp.67～69.
- 3) 児島明彦ら：日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 (2001)，pp.761～762.
- 4) 植森龍治ら：CAMP-ISIJ，14 (2001)，p.1174.
- 5) A.Kojima et.al：Proc. 20th Int. Conf. OMAE，(2001)，Rio de Janeiro，ASME，MAT-3241.
- 6) 石田浩司ら：溶接学会全国大会講演概要集，70 (2002)，pp.214～215.
- 7) 児島明彦ら：溶接構造シンポジウム 2002 講演論文集，平成 14 年 11 月 19 日，大阪大学，(社) 溶接学会溶接構造研究委員会，pp.327～330.
- 8) 皆川昌紀ら：溶接構造シンポジウム 2002 講演論文集，平成 14 年 11 月 19 日，大阪大学，(社) 溶接学会溶接構造研究委員会，pp.331～334.
- 9) 市川和利ら：エレクトロスラグ溶接の溶接金属の機械的性質の改善・エレクトロスラグ溶接部の熱履歴と特性 (第 1 報)，溶接学会講演概要集，第 69 集，pp.176～177.
- 10) 市川和利ら：エレクトロスラグ溶接の溶接金属の組織微細化機構・エレクトロスラグ溶接部の熱履歴と特性 (第 2 報)，溶接学会講演概要集，第 69 集，pp.178～179.
- 11) 市川和利ら：溶接構造シンポジウム 2002 講演論文集 (2002 年 11 月)，p.57.

2003. 11. 14 受付

グラビア写真説明

たっぷ大橋 (岩見沢大橋架換)

本橋は、明治以来、人・物資の往來を渡船で行われてきましたが、昭和 35 年に待望の橋が完成。昭和 44 年に両側を延伸し現在に至るまで岩見沢大橋として活躍していましたが、近年の交通量増加に伴う老朽化、河川改修事業により移設が必要となり、交流ふれあいトンネル橋梁整備事業により、最新の技術を屈指し 2 代目岩見沢大橋として完成しました。橋名は、公募選考の上、たっぷ大橋と決まり平成 16 年度には、開通し地域のシンボリックな施設にもなります。

(齋木 敦)

謙信公大橋

本橋は、アーチが橋の中央に 1 本しかない単弦アーチ橋で、断面は台形、しかもこの断面がアーチ軸に沿って変化している非常に珍しい構造的特徴を持っています。また、近くにそびえる妙高連山と合う大小のアーチというデザインで、新潟県がグッドデザイン賞を受賞しました。このアーチから下へ伸びたパイプにより橋本体の重量、車の重量を吊り上げて支えています。アーチ部の架設は、取り付け道路部にて地組及び全断面溶接を行った後、自走多軸台車により運搬・架設を行いました。平成 15 年 5 月 31 日から供用開始したことにより近隣の渋滞が減少しました。

(伊藤 浩之)