

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靱性に関する研究（その1）

Study on the Impact Toughness of Welding Metal by Electroslag Welding Using High HAZ Toughness Steel for Building Construction (Part 1)

櫻井謙次^{*1} 中野秀二^{*2} 吉川薫^{*3}
Kenji SAKURAI Shyuuji NAKANO Kaoru YOSHIKAWA

Summary

Although the toughness of steel is not considered in the designing of steel structure as a calculation parameter, impact toughness of 27J and 47J are used as the specified strength for Charpy impact test, in general. While the validity of required performance has been discussed in many instances, recently the criteria of impact toughness for box-section columns increased and now exceeded 70J or 100J. In addition, for welding control, it is required to strictly control the heat input and interpass temperature according to the guideline of JIS Z 3312. This paper reports the results of welding tests by electroslag welding using highly heat input resistant steel plates that were developed to meet these requirements.

キーワード：衝撃靱性，溶接金属，HAZ細粒高靱性化技術，エレクトロスラグ溶接，酸素含有量

1. はじめに

建築鉄骨BOX柱の製作においては建築基準法施行令第67条「接合」の関連告示1464号「仕口のずれ」に対応するため、柱梁接合部のダイアフラム厚を仕口フランジ厚の1サイズアップとする（鋼板の板厚は段階的に定められており、ある板厚を1段階厚い鋼板に変更して使用する）例が見られ、エレクトロスラグ溶接（Electroslag Welding：ESW）の入熱量が増大する傾向にある。

このような状況の中、大入熱溶接部の継手性能とりわけ衝撃靱性の改善を目的としたHTUFF鋼（SA440C-HF、BT-HT355C-HF）と対応溶接材料であるYM-55HFを新日本製鐵(株)、日鐵溶接工業(株)より紹介された。第一報として試験結果を報告する。

2. HTUFF鋼とHTUFF鋼対応溶接材料の概要

従来鋼では、Tiの酸化物や窒化物を利用した溶接熱影響部（Heat Affected Zone：HAZ）靱性改善技術が施されてきた¹⁾。今回開発された「HAZ細粒高靱性化技術」（HTUFF：Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure imparted by Fine Particles）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の組織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⁾⁻⁷⁾。

そこで、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た。「YM-55HF」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することで、ESWのような大入熱溶接の条件下においても優れたWMが得られるものである⁸⁾⁻⁹⁾。

3. 試験概要

ESWのような大入熱溶接において溶接継手部の衝撃靱性が劣化する要因は、以下のように考えられる。

- ① ミルスケール等から混入した酸素が溶融スラグ中に十分除去されなかったことによる酸素（O）の増大による影響
- ② 裏当金に使用する電炉製平鋼（FB）からの希釈によりWMに混入する窒素（N）による影響
- ③ FBからの希釈によりWMに混入するリン（P）、硫黄（S）等の不純物元素による影響

*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松本工場製造部製造課課長代理

のノッチ位置は溶融境界部（通称：BOND）より3mm又は5mm離れた位置で採取することとした。

3-2. 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

(1) 試験概要

表-8に試験概要を示す。裏当金材質の相違による窒素含有量と溶接入熱量の影響を確認するため、裏当金にHTUFF鋼とSN490B-FBの2種類を用いた。溶接条件は、標準条件と高めの入熱量となる2種類で各種機械試験を実施した。

(2) 鋼材

スキンプレートおよびダイアフラムには、表-2に示すHT355C-HFを用いた。また、裏当金は表-9に示す2種類とした。HTUFF鋼の裏当金については、スキンプレートおよびダイアフラムと同じ鋼板より採取した。SN490Bは、一般的に広く使われているFBを使用した。

(3) 試験体形状

図-2に試験体形状を示す。

(4) 溶接材料

ワイヤはYM-55HF、フラックスはYF-15Iとし、表-5, 6と同様の化学成分のものを使用した。

(5) 溶接条件

溶接条件を表-10に示す。M7、M4の電圧を56Vとし、入熱量を標準条件より61kJ/cm大きく設定した。

(6) 試験片採取要領

図-3に試験片採取位置を示す。衝撃試験片の採取位置は、裏当金材質の影響を確認することを考慮してWM中央部だけでなくダイアフラムの表面下6mmの位置から

表-8 試験概要

| 試験マーク | 裏当金 | 入熱量 | 機械試験 |
|-------|-----------|------|--|
| M1 | HTUFF | 標準条件 | 成分分析 衝撃試験 引張試験 マクロ試験 ミクロ試験 硬さ試験 |
| M3 | SN490B-FB | | |
| M7 | HTUFF | 高め | |
| M4 | SN490B-FB | | |

も採取した。

表-9 裏当金

(mass%, *, ppm)

| 材質 | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | N* | O* |
|-----------|------|------|------|-------|-------|------|------|----|----|
| HT355C-HF | 0.12 | 0.26 | 1.50 | 0.008 | 0.002 | 0.01 | 0.04 | 40 | 17 |
| SN490B-FB | 0.12 | 0.29 | 1.31 | 0.022 | 0.009 | 0.09 | 0.05 | 99 | 36 |

表-10 溶接条件

| 試験マーク | 電流 (A) | 電圧 (V) | 速度 (cm/min) | 入熱 (kJ/cm) |
|-------|--------|--------|-------------|------------|
| M1 | 380 | 52 | 1.5 | 790 |
| M3 | | | | |
| M7 | | 56 | | 851 |
| M4 | | 54 | | 821 |

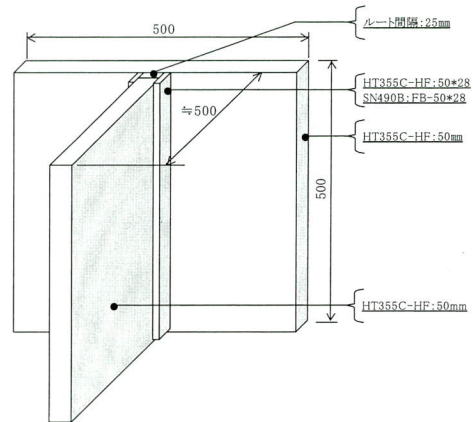


図-2 試験体形状

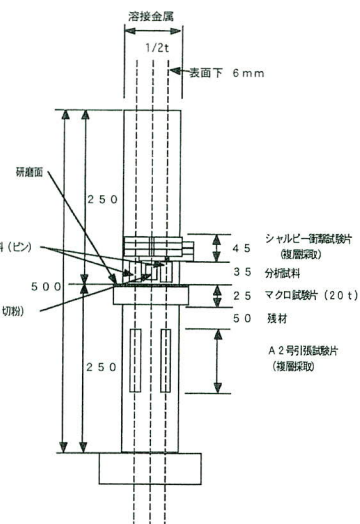
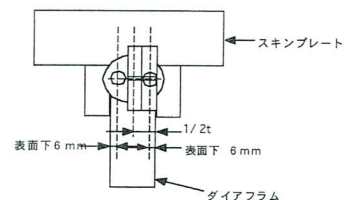


図-3 試験片採取位置

3-3. 裏当金の処理と組立状況による影響

(1) 試験概要

表-11に試験概要を示す。裏当金の処理と組立状況による影響を確認するため、裏当金の処理を3種類、組立溶接方法を連続または断続の2種類として組合せ、3体の試験を実施した。

(2) 鋼材

スキンプレート及びダイアフラムは、表-2に示す材料とし、裏当金は、表-9と同様のSN490B-FBを使用した。

(3) 試験体形状

試験体形状は、図-2と同様とした。また、図-4に開先面処理状況および組立溶接状況を示す。

(4) 溶接材料

ワイヤはYM-55HF、フラックスはYF-15Iとし、表-5、6と同様の化学成分のものを使用した。

(5) 溶接条件

溶接条件は表-12に示す標準条件を適用した。

(6) 試験片採取要領

図-5に試験片採取位置を示す。衝撃試験片の採取位置は、裏当金の処理と組立溶接の差異による影響を確認することを考慮してWM中央部ではなくダイアフラムの表面下6mmの位置から採取した。

表-11 試験概要

| 試験マーク | 裏当金 | 開先面裏当金の処理 | 機械試験 |
|-------|--------|-------------------------------|-------------------------------|
| M3 | SN490B | ミルスケール除去 (グラインダー) | 成分分析 衝撃試験 引張試験 マクロ試験 |
| M13 | | ミルスケールのまま | |
| M17 | | ミルスケールのまま、ギャップ:1mm 組立溶接:断続 | |

表-12 溶接条件

| 電流 (A) | 電圧 (V) | 速度 (cm/min) | 入熱 (kJ/cm) |
|-----------|-----------|----------------|---------------|
| 380 | 52 | 1.5 | 790 |

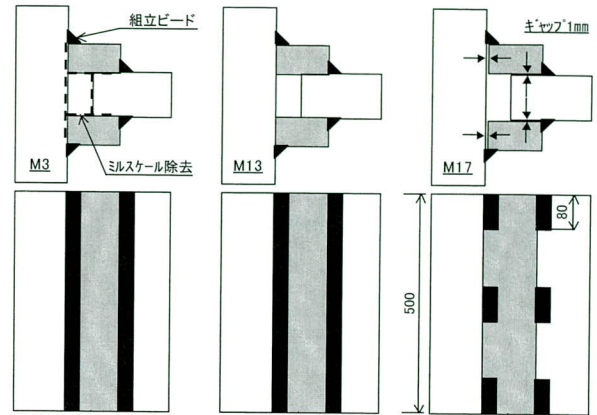


図-4 試験体形状

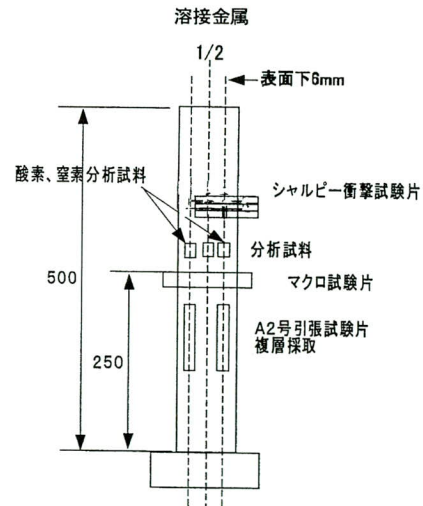
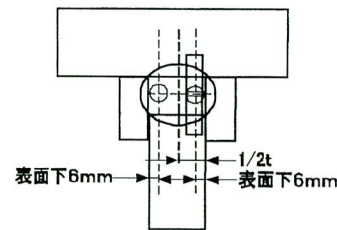


図-5 試験片採取位置

4. 試験結果

4-1. WMの酸素含有量による影響

(1) 化学成分分析試験結果

表-13にWMの化学成分分析試験結果を示す。塩基度の低いYF-15Aを使用することにより窒素含有量は、YF-15I使用時の50~58ppmの範囲でほぼ同量であるのに対し、酸素含有量は、150ppm以上と大幅に増大する結果となった。

(2) 衝撃試験結果

表-14に衝撃試験結果を示す。BOND、HAZについては、それぞれ平均値が78~150J、149~235Jと非常に良好な結果が得られた。しかし、F試験体のBONDの1点25Jという結果に対しては、破面の詳細調査を行い、粗大な介在物を起点とした特異な破壊であることを確認した。

WMについては、酸素含有量が少ないA,B,E,Fの平均値が40~80Jであるのに対し、酸素含有量の多いa,b,e,fでは、平均値が27~39Jであった。

(3) その他試験結果

超音波探傷検査において、内部欠陥は検出されず、また、溶込みも良好であった。溶着金属引張試験では、降伏点、引張強さともに十分な性能が得られた。硬さ試験においても、過度の軟化はみられず良好であった。マクロ試験においても、欠陥は検出されず良好であった。なお、写真-1にマクロ写真を例示する。写真-2に試験体B（HTUFF使用）のHAZ組織、写真-3に従来鋼使用のHAZ組織を例示する。HTUFF使用の写真では、BOND近傍のHAZにおいて、組織の粗大化が強力に抑制されている。HTUFF鋼は、このHAZ細粒効果によって、ESWにおいても良好なBOND靱性とHAZ靱性が達成されている。

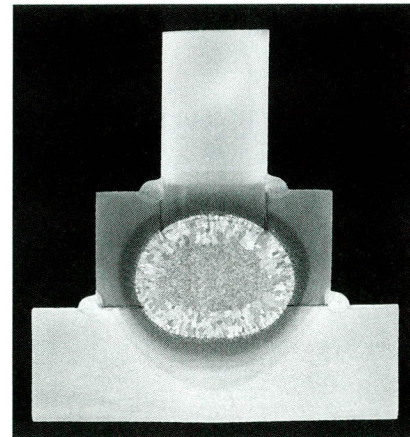


写真-1 マクロ写真

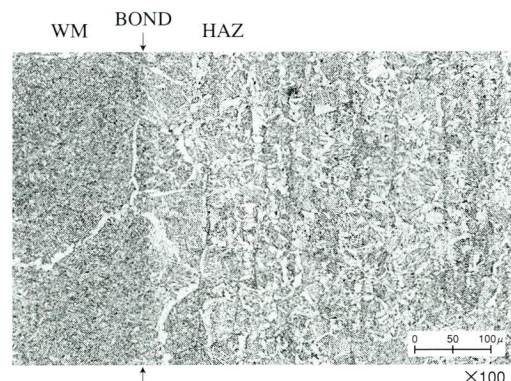


写真-2 ミクロ写真 (HTUFF使用)

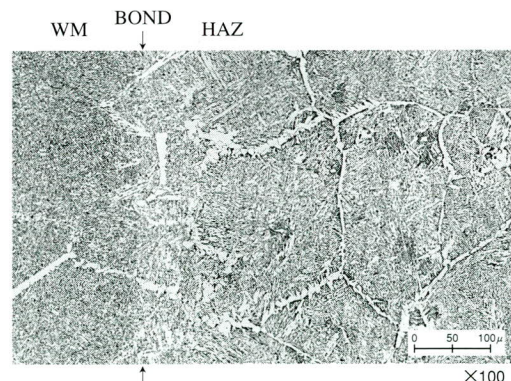


写真-3 ミクロ写真 (従来鋼使用)

表-13 化学成分分析試験結果 (WM)

| フラックス | 試験マーク | C | Si | Mn | P | S | Mo | N | O |
|------------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|------|----|-----|
| YF-15I 20×D 塩基度 (高) | A | 0.09 | 0.22 | 1.73 | 0.010 | 0.007 | 0.18 | 53 | 89 |
| | B | 0.09 | 0.20 | 1.72 | 0.008 | 0.006 | 0.18 | 58 | 93 |
| | E | 0.10 | 0.23 | 1.73 | 0.011 | 0.006 | 0.18 | 53 | 84 |
| | F | 0.10 | 0.23 | 1.73 | 0.008 | 0.005 | 0.18 | 58 | 72 |
| YF-15A 20×D 塩基度 (低) | a | 0.10 | 0.22 | 1.68 | 0.009 | 0.007 | 0.18 | 52 | 159 |
| | b | 0.10 | 0.22 | 1.65 | 0.008 | 0.006 | 0.18 | 50 | 171 |
| | e | 0.10 | 0.22 | 1.65 | 0.008 | 0.006 | 0.18 | 53 | 168 |
| | f | 0.10 | 0.22 | 1.66 | 0.008 | 0.007 | 0.18 | 52 | 175 |

表-14 衝撃試験結果

| 試験体 マーク | 採取位置 | vE ₀ | | | | 試験体 マーク | vE ₀ | | | |
|------------|---------|-----------------|-----|-----|-----|------------|-----------------|-----|-----|-----|
| | | 個々 | | 平均 | 個々 | | 平均 | | | |
| | | | | | | | | | | |
| A | WM | 79 | 59 | 73 | 70 | a | 35 | 39 | 43 | 39 |
| | BOND | 65 | 114 | 107 | 95 | | 114 | 56 | 103 | 91 |
| | HAZ 5mm | 173 | 152 | 152 | 159 | | 147 | 143 | 157 | 149 |
| B | WM | 54 | 54 | 52 | 53 | b | 30 | 28 | 27 | 28 |
| | BOND | 63 | 129 | 103 | 98 | | 109 | 86 | 50 | 82 |
| | HAZ 5mm | 150 | 194 | 194 | 179 | | 180 | 175 | 175 | 177 |
| E | WM | 86 | 58 | 96 | 80 | e | 35 | 30 | 35 | 33 |
| | BOND | 152 | 98 | 197 | 149 | | 166 | 145 | 140 | 150 |
| | HAZ 5mm | 211 | 199 | 199 | 203 | | 180 | 180 | 166 | 175 |
| F | WM | 37 | 39 | 44 | 40 | f | 32 | 25 | 23 | 27 |
| | BOND | 111 | 25 | 98 | 78 | | 152 | 180 | 109 | 147 |
| | HAZ 5mm | 216 | 286 | 204 | 235 | | 199 | 213 | 189 | 200 |

4-2. 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

(1) 化学成分分析試験結果

表-15にWM化学成分分析試験結果を示す。酸素含有量はほぼ同量であるのに対し、窒素含有量は、裏当金にHTUFF鋼を用いた試験体M1,M7 (43ppm) に比べ、FB使用の試験体M3,M4 (51~54ppm) とやや高い値となった。

(2) 衝撃試験結果

表-16に衝撃試験結果を示す。裏当金にHTUFF鋼を使用したM1,M7はFB使用のM3,M4に比べ良好な結果となった。また、標準条件のM1,M3に比べ入熱量の大きいM4,M7は衝撃性能が低下している。採取位置による結果を比較するとダイヤモンドの表面下6mmに比べWM中央部は高い値を示した。

(3) その他試験結果

表-17に溶接金属の引張試験結果を示す。図-6および表-18に硬さ試験結果を例示する。裏当金材質の相違による窒素含有量と溶接入熱量の影響による差異はみられなかった。

4-3. 裏当金の処理と組立状況による影響

(1) 化学成分分析試験結果

表-19にWMの化学成分分析試験結果を示す。開先面裏当金ミルスケールの有無および裏当金組立ギャップの有無を比較した結果、酸素含有量は80ppm前後、窒素含有量は50ppmといずれも有意差は確認されなかった。

(2) 衝撃試験結果

表-20に衝撃試験結果を示す。裏当金のミルスケールをグラインダーで除去したM3よりもミルスケールのままのM13が良好な結果となった。M13とM17の結果を比較すると、ギャップのないM13が良好な結果となった。

(3) その他試験結果

表-21に溶接金属の引張試験結果を示す。裏当金の処理と組立状況の影響による差異はみられなかった。

マクロ試験においても、欠陥は検出されず充分な溶け込みが得られていることを確認した。

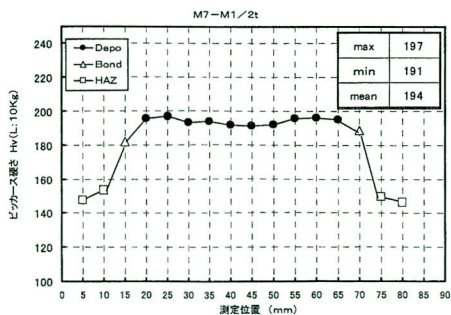


図-6 硬さ試験結果

表-15 化学成分分析試験結果 (WM)

| 試験マーク | (mass%,*:ppm) | | | | | | | |
|-------|---------------|------|------|-------|-------|------|----|----|
| | C | Si | Mn | P | S | Mo | N* | O* |
| M1 | 0.091 | 0.20 | 1.80 | 0.007 | 0.003 | 0.21 | 43 | 74 |
| M3 | 0.084 | 0.20 | 1.76 | 0.009 | 0.004 | 0.21 | 51 | 75 |
| M7 | 0.097 | 0.20 | 1.75 | 0.007 | 0.003 | 0.16 | 43 | 74 |
| M4 | 0.089 | 0.20 | 1.73 | 0.009 | 0.004 | 0.19 | 54 | 73 |

表-16 衝撃試験結果

| 試験マーク | ノッチ位置 | vE ₀ | | | |
|-------|--------|-----------------|-----|-----|-----|
| | | 個々 | | | 平均 |
| | | | | | |
| M1 | 中央 | 94 | 126 | 94 | 105 |
| | 表面下6mm | 79 | 70 | 48 | 66 |
| M3 | 中央 | 69 | 55 | 114 | 79 |
| | 表面下6mm | 53 | 46 | 60 | 53 |
| M7 | 中央 | 87 | 62 | 74 | 74 |
| | 表面下6mm | 53 | 38 | 62 | 51 |
| M4 | 中央 | 55 | 44 | 83 | 61 |
| | 表面下6mm | 58 | 30 | 40 | 43 |

表-17 引張試験結果

| 試験マーク | 0.2%PS (N/mm ²) | TS (N/mm ²) | EL (%) | RA (%) |
|-------|-----------------------------|-------------------------|--------|--------|
| M1 | 419 | 603 | 25 | 66 |
| M3 | 408 | 599 | 26 | 68 |
| M7 | 412 | 592 | 25 | 55 |
| M4 | 407 | 596 | 26 | 66 |

表-18 硬さ試験結果 (WM)

| 試験マーク | Hv (L:10kg) | | |
|-------|-------------|-----|------|
| | max | min | mean |
| M1 | 207 | 193 | 198 |
| M3 | 202 | 190 | 196 |
| M7 | 197 | 191 | 194 |
| M4 | 202 | 193 | 197 |

表-19 化学成分分析試験結果 (WM)

| 試験マーク | (mass%,*:ppm) | | | | | | | |
|-------|---------------|------|------|-------|-------|------|----|----|
| | C | Si | Mn | P | S | Mo | N* | O* |
| M3 | 0.084 | 0.20 | 1.76 | 0.009 | 0.004 | 0.21 | 51 | 75 |
| M13 | 0.090 | 0.18 | 1.75 | 0.005 | 0.004 | 0.20 | 49 | 78 |
| M17 | 0.090 | 0.20 | 1.72 | 0.007 | 0.004 | 0.24 | 48 | 82 |

表-20 衝撃試験結果

| 試験マーク | vE ₀ | | | |
|-------|-----------------|-----|-----|-----|
| | 個々 | | | 平均 |
| | | | | |
| M3 | 53 | 46 | 60 | 53 |
| M13 | 83 | 117 | 150 | 117 |
| M17 | 40 | 74 | 50 | 55 |

表-21 引張試験結果

| 試験マーク | YP (N/mm ²) | TS (N/mm ²) | EL (%) | RA (%) |
|-------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|
| M3 | 392 | 592 | 26.2 | 59 |
| | 403 | 591 | 25.4 | 66 |
| M13 | 420 | 604 | 27.1 | 70 |
| | 430 | 604 | 27.9 | 71 |
| M17 | 415 | 591 | 25.0 | 72 |
| | 421 | 595 | 25.0 | 73 |

5. 考察

5-1. WMの酸素含有量による影響

酸素含有量とWM衝撃試験結果を比較したグラフを図-7に示す。全体として酸素含有量の増大に伴い、WMの衝撃靱性が低下する傾向が見られる。しかし、F試験体については、衝撃試験結果が低い値となっているため、マイクロ組織観察をした結果、発達した粒界フェライトが多く認められ、旧 γ 粒界に沿った粗大な（粒界）アロトリオモルフフェライトの存在により、破面単位の大いへき開破面が生じ、低靱性が発生したと考えられる。

アロトリオモルフフェライトとは、低合金鋼をAe3点以下に冷却した際にオーステナイト粒界に最初に比較的小さい過冷度で形成される組織である。粒界は容易な拡散パスであるので、急速にこのような薄いフェライト組織で覆われる。

5-2. 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

図-8に入熱量の影響を示す。裏当金に電炉製FBを用いると、HTUFF鋼共金にした場合よりもWMの靱性が劣る結果となり、かつ入熱の増大に伴っても劣化することを確認した。

しかし、現状ではHTUFF鋼を裏当金とすることが一般的でないため、FBを用いてもWMの靱性が十分に得られる溶接材料の開発が望まれる。

5-3. 裏当金の処理と組立状況による影響

裏当金にFBを使用し開先面研削の影響、組立溶接状況の影響によるWMの酸素含有量を調査した結果、80ppm程度であり、いずれもWMの成分に大きな影響を与えて

いないことが確認された。また、裏当金の処理と組立状況の影響による衝撃性能への影響は非常に小さいものであると考えられる。

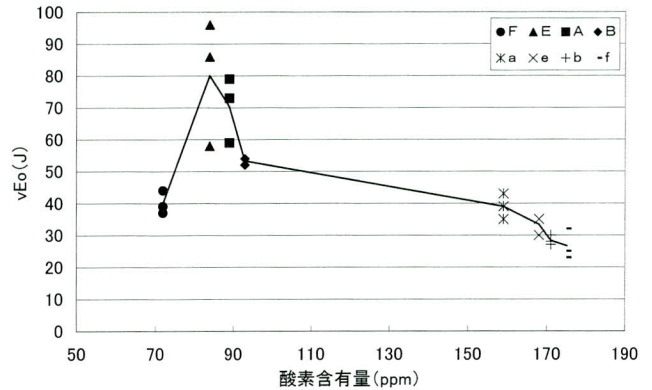


図-7 酸素含有量とWM衝撃試験結果

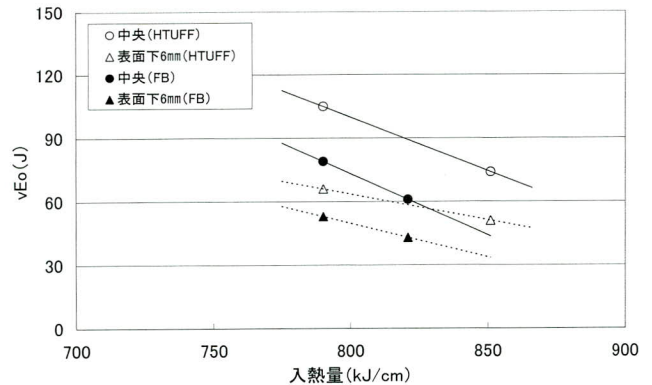


図-8 溶接入熱量の影響

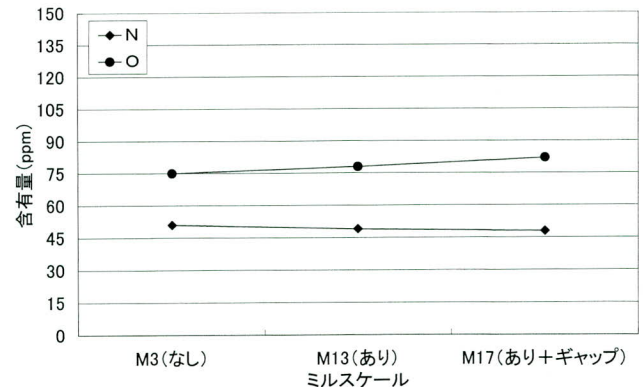


図-9 裏当金の処理と組立状況による影響

6. まとめ

WMの衝撃性能に対し、入熱量や窒素含有量のみならず、酸素含有量も影響することが確認された。また、裏当金のミルスケールの有無や組立時の裏当金の密着度によって、衝撃性能へ影響を及ぼすような窒素含有量および酸素含有量の増大はないことを確認した。

また、BOND,HAZの衝撃性能に対しては非常に良好な衝撃値が得られる結果となった。これは、HTUFF鋼の特徴であるHAZ細粒効果によって、BOND近傍におけるHAZ組織の粗大化が強力に抑制されたためである。

7. 今後の課題

引き続き、新日本製鐵(株)および日鐵溶接工業(株)と共同で、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、靱性疎外要因を抑制・解消することにより、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WMで必要な靱性が広い条件範囲で安定して得られるよう溶接ワイヤの改良および最適な溶接施工条件の確立と提案を行う。また今後、BOND、HAZの衝撃性能に影響する冷却速度等にも焦点を当て試験を実施していく。

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(吉田氏、鶴田氏、植森氏、児島氏、市川氏)、日鐵溶接工業株式会社(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) 金沢正午ら：鉄と鋼, 61(1975),pp.2589-2603
- 2) 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
- 3) 植森龍治ら：CAMP-ISIJ, 14(2001), 1174
- 4) A. Kojima et.al：Proc. 20th Int. Conf. OMAE, (2001), Rio de Janeiro, ASME, MAT-3241
- 5) 石田浩司ら：溶接学会全国大会後援概要集, 70(2002),pp.214-215
- 6) 児島明彦ら：溶接構造シンポジウム2002講演論文集, 投稿中
- 7) 皆川昌紀ら：溶接構造シンポジウム2002講演論文集, 投稿中
- 8) 市川ら：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
- 9) 市川ら：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

2002.11.28 受付

グラビア写真説明

椿原橋

本橋は、東海北陸自動車道の白川郷I.C.から更に北上した富山県との県境に位置しており、椿原ダムの下流側に隣接する緑豊かな谷あいにかかる橋で、トラス上弦材とPC床版とを合成し、PC床版に主構としてしての機能を持たせた複合トラス橋です。世界文化遺産に登録された「白川村、萩町伝統的建造物群保存地区」合掌集落の近傍を通るため特に景観との調和に配慮しています。

(菊地)