

## 技術ノート

# ボックス柱の角溶接による 熱影響部の特性について

Characteristic of Heat-Affected Zone on Corner Joint of Box Member  
Using Submerged Arc Welding

渡 辺 武\*  
Takeshi WATANABE

菅 野 啓 行\*\*  
Yoshiyuki KANNO

山 田 直 人\*\*\*  
Naoto YAMADA

代 田 雄 次\*\*\*\*  
Yuji SHIROTA

At present, the defects arising in the heat-affected zone in the submerged arc welding with large heat input of box type columns have become problems, but their causes and mechanisms have not been completely elucidated.

This paper reports on the reproduction test of defects, which was carried out for the purpose of quantitatively clarifying the causes of occurrence of these defects and examining the countermeasures for the prevention. As the results of the test, it was able to be confirmed that the inclusions of A system in steel materials exerted large effect to the occurrence of defects, and the generation of defects was able to be quantitatively elucidated.

Keywords : submerged arc welding, large heat input, welding defect, box column, nonmetallic inclusion

## 1. まえがき

現在、発生頻度は低いものの、ボックス柱の製作において、大入熱SAW(サブマージアーク溶接)角溶接熱影響部に生じる欠陥が問題となっている。この欠陥は鋼材メーカーの違い、材質、板厚およびファブリケーターの違いを問わず発生するといわれており、欠陥が発生した場合、工程、工期に対する影響は小さくない。また、この欠陥についての研究報告は、まだ少なく、発生原因、発生メカニズムについてある程度の推定はなされている<sup>1),2)</sup>ものの具体的な数値は明示されていないのが現状である。

そこで、この欠陥の発生原因をより明確にするとともに、その防止対策を検討するために欠陥の再現試験を行ったので以下報告する。

## 2. 欠陥の現状

問題の欠陥は、角溶接熱影響部に生じる微小な欠陥で大入熱SAW 1 ラン施工で溶接した部位に発生し、レ形V形いずれの開先形状でも生じており、溶接継手に沿って断続的に発生するといわれている。発生原因、発生メカニズムについては鋼材内の非金属介在物と大入熱角溶接による拡散性水素が大きく関与していると推定<sup>1),2)</sup>され

ており、発生位置は図-1に示すような個所である。

また、この欠陥についての統一された判定基準といったようなものはなく、欠陥が生じた場合には、個々に対応しているようである。

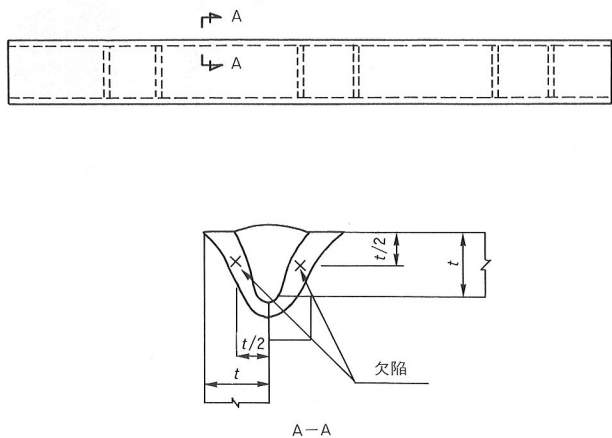


図-1 欠陥の発生位置

## 3. フラックスの吸湿量と拡散性水素量

欠陥の再現試験に先立ち、欠陥発生に関与しているといわれている拡散性水素の主な発生源となるフラックスの吸湿量について、工場内で日常使用しているフラックスの吸湿量が、どの程度になっているか調査し、あわせ

\*川田工業(株)生産事業部栃木工場次長 \*\*川田工業(株)生産事業部栃木工場工務課係長 \*\*\*川田工業(株)生産事業部栃木工場工務課  
\*\*\*\*川田工業(株)生産事業部栃木工場品質管理課係長

てこのフラックスの吸湿カーブおよびフラックスの吸湿量と拡散性水素量の関係を調査した。これらの結果を図-2～4に示す。なお、フラックスの吸湿量は作業前にフラックスホッパーより採取し110℃×1h減量法にて測定、また、拡散性水素量はJIS Z 3118によって測定した。

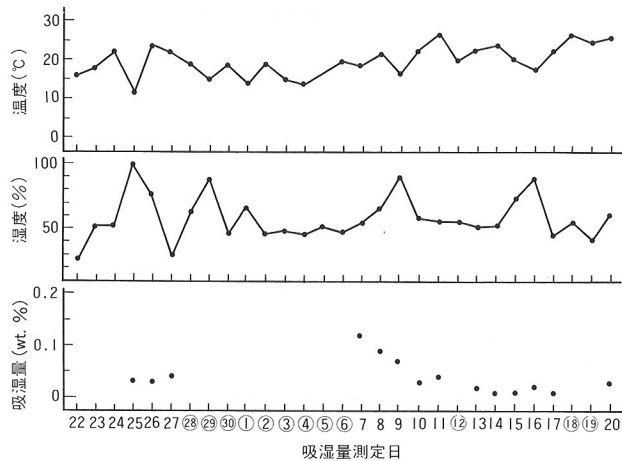


図-2 フラックスの吸湿量

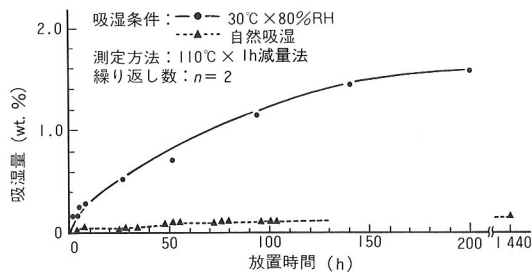


図-3 フラックス放置時間と吸湿量

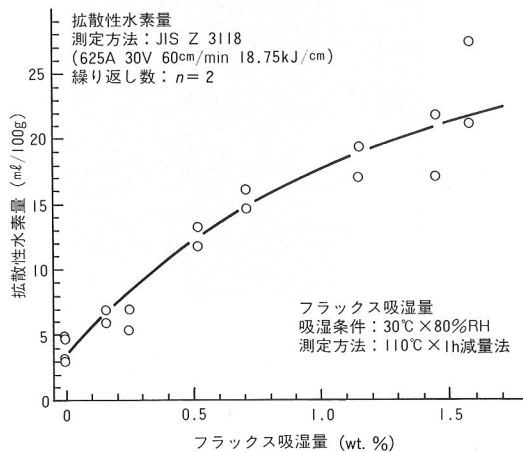


図-4 フラックスの吸湿量と拡散性水素量

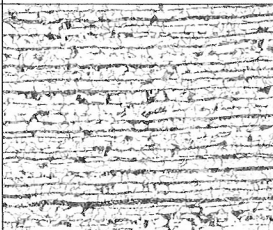
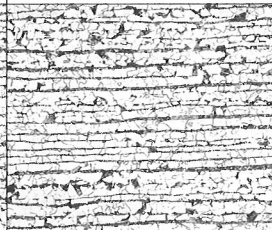
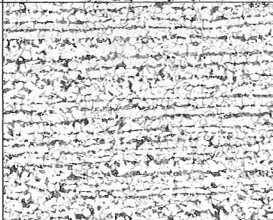
これらの結果より工場内で使用しているフラックスの吸湿量は通常で0.01%～0.07%程度であり、長期間使用しなかった後では0.09～0.12%程度となり吸湿量としてはそれほど高くない値であった。また、この時の拡散性水素量は、それぞれ4～7 ml/100 g, 8～9 ml/100 g程度であった。

#### 4. 欠陥の再現試験

##### (1) 試験方法

欠陥発生に影響するパラメータとして、鋼材の非金属介在物と溶接部の拡散性水素量を取りあげ、鋼材はSM490材、板厚22 mmで清浄度レベルの異なるA材、B材の2水準、拡散性水素量に影響する因子としてフラックス吸湿レベルの異なるもの、具体的には工場内で日常使用しているもの(I)と工場内で1ヶ月以上放置して自然に吸湿させたもの(II)の2水準の4条件とした。試験体は図-5に示すように、拘束度あるいはその他の条件を実部材に合わせるため実部材と同じ断面を有し、ダイアフラムを内蔵したボックス形状とし、実部材と同じ施工手順で組立て、大入熱SAW角溶接を行った。なお、試験に先立ち、供試鋼材の清浄度、板厚方向の硬さおよびラミネーションの有無、また、供試フラックスについては吸湿量、拡散性水素量を調べ、これらを表-1～3、図-6に示す。

表-1 供試鋼材の緒元

| 鋼材 | 機 械 的 性 質                                                                            |                            |           |                                                                                       |           |                 |                 |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|
|    | YP<br>(N/mm <sup>2</sup> )                                                           | TS<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | EL<br>(%) | Impact Test<br>(J at 0℃)                                                              | YR<br>(%) |                 |                 |
| A  | 363[37]                                                                              | 530[54]                    | 22        | —                                                                                     | 68        |                 |                 |
| B  | 371[38]                                                                              | 513[52]                    | 31        | Ave. 222[22.6]                                                                        | 72        |                 |                 |
| 鋼材 | 化 学 成 分 (%)                                                                          |                            |           |                                                                                       |           |                 |                 |
|    | C                                                                                    | Si                         | Mn        | P                                                                                     | S         | C <sub>eq</sub> | P <sub>cm</sub> |
| A  | 0.16                                                                                 | 0.41                       | 1.45      | 0.014                                                                                 | 0.005     | 0.42            | 0.25            |
| B  | 0.15                                                                                 | 0.35                       | 1.34      | 0.013                                                                                 | 0.002     | 0.40            | 0.24            |
| 鋼材 | 清 淨 度                                                                                |                            |           |                                                                                       |           |                 |                 |
|    | 位 置                                                                                  | A系介在物                      | B系介在物     | C系介在物                                                                                 | 清浄度       |                 |                 |
| A  | t/4                                                                                  | 0.02%                      | 0         | 0.01%                                                                                 | 0.03%     |                 |                 |
|    | t/2                                                                                  | 0.01%                      | 0         | 0.01%                                                                                 | 0.02%     |                 |                 |
| B  | t/4                                                                                  | 0                          | 0         | 0.01%                                                                                 | 0.01%     |                 |                 |
|    | t/2                                                                                  | 0                          | 0         | 0.01%                                                                                 | 0.01%     |                 |                 |
| 鋼材 | ミクロ組織                                                                                |                            |           |                                                                                       |           |                 |                 |
|    | t/4                                                                                  |                            |           | t/2                                                                                   |           |                 |                 |
| A  |  |                            |           |  |           |                 |                 |
|    |  |                            |           |  |           |                 |                 |

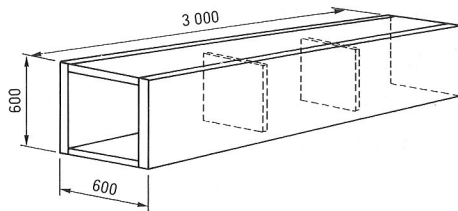


図-5 試験体形状

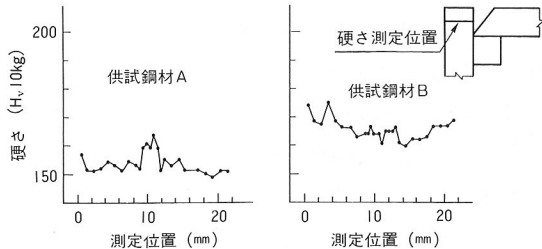


図-6 供試鋼材の板厚方向の硬さ

表-2 供試鋼材のラミネーション調査結果

| 供試鋼材 | ラミネーションの有無                      | 検査方法およびUT検査位置                                        |
|------|---------------------------------|------------------------------------------------------|
| A    | 異状なし<br>(底面エコー以外のエコーは、検出されなかった) | JIS G0901および日本建築学会のエレスラ溶接部の欠陥探傷感度で右図の斜線部についてUT検査を行った |
| B    | 異状なし<br>(底面エコー以外のエコーは、検出されなかった) |                                                      |

表-3 供試フラックスの吸湿量と拡散性水素量

| 供試フラックス         | 吸湿量 (wt. %) |      |      | 拡散性水素量 (ml/100g) |      |      |
|-----------------|-------------|------|------|------------------|------|------|
|                 | 1           | 2    | Ave. | 1                | 2    | Ave. |
| I<br>日常使用フラックス  | 0.03        | 0.03 | 0.03 | 6.0              | 6.0  | 6.0  |
| II<br>自然吸湿フラックス | 0.15        | 0.15 | 0.15 | 9.8              | 10.8 | 10.3 |

注) 供試溶接材料……ワイヤ: US-36L  
フラックス: PFI-52ES

## (2) 試験結果

### a) 超音波探傷試験結果

ボックス試験体の角溶接完了後、垂直探傷および斜角探傷法で角溶接部の超音波探傷試験を行い、欠陥の有無を調査した。なお、探傷感度は以下のとおりで、試験結果を表-4に示す。

### ① 垂直探傷………a. JIS G 0901

b. 日本建築学会のエレスラ溶接部の探傷感度

### ② 斜角探傷………日本建築学会の「引張り応力が作用する場合」の感度

表-4 超音波探傷試験結果

|    | Ⅰ<br>(日常フラックス) |       | Ⅱ<br>(自然吸湿フラックス)                                                         |                      |                      |
|----|----------------|-------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
|    | 吸湿量            |       | 0.03%                                                                    |                      |                      |
|    | 拡散性水素量         |       | 6.0ml/100g                                                               |                      |                      |
|    | 溶接方法           |       | 大入熱SAWタンデム                                                               |                      |                      |
|    | 溶接条件           |       | 先行：1 300～1 400 A 38～40 V 34～36cm/min<br>後行： 950～1 000 A 50～53 V 173kJ/cm |                      |                      |
| 鋼材 | S              | 量     | 清浄度                                                                      | U T 結果 <sup>1)</sup> | U T 結果 <sup>1)</sup> |
| A  | 0.005%         | 0.03% | △△                                                                       | ×                    | ×                    |
| B  | 0.002%         | 0.01% | 〇〇                                                                       | 〇                    | 〇                    |

注) 1) 〇……欠陥エコー検出せず(全線合格)  
△……合格内欠陥または部分的に不合格欠陥あり  
×……全線または、ほぼ全線不合格

### b) マクロ試験結果

超音波探傷試験後、各溶接継手より試験片を採取してマクロ試験、サルファープリントを行った。なお、試験片は欠陥エコーが検出された継手では、その欠陥エコーの最も高い個所より採取した。マクロ試験結果を表-5、写真-1、2に示し、サルファープリント結果を写真-3に示す。

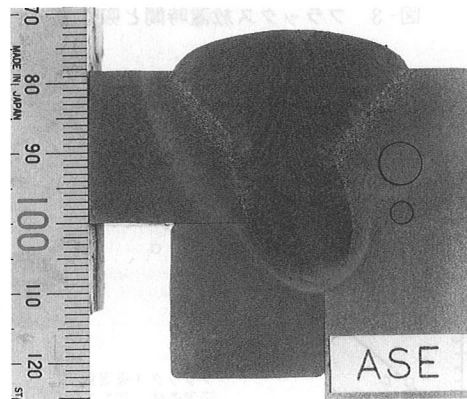


写真-1 欠陥部のマクロ組織

表-5 マクロ試験結果

| 溶接継手<br>(鋼材×フラックス) | 試験片<br>記号 | TP採取位置<br>のUT結果 | マクロ試験結果          | 欠陥発生位置 |
|--------------------|-----------|-----------------|------------------|--------|
| A×I                | ASW       | △               | 異状なし             |        |
|                    | ANW       | △               | 空隙 MAX. l=0.7mm  |        |
| A×II               | ASE       | ×               | 空隙 MAX. l=1.30mm |        |
|                    | ANE       | ×               | 空隙 MAX. l=0.7mm  |        |
| B×I                | BSE       | ○               | 異状なし             |        |
|                    | BNE       | ○               | 異状なし             |        |
| B×II               | BSW       | ○               | 異状なし             |        |
|                    | BSW       | ○               | 異状なし             |        |

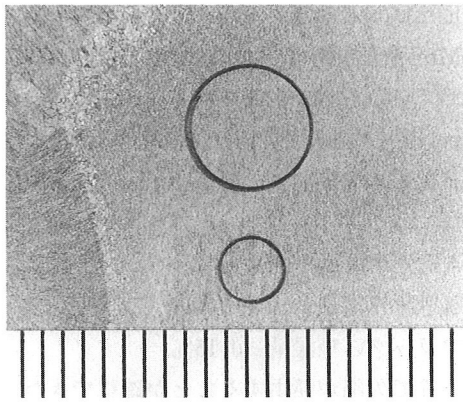


写真-2 欠陥部のマクロ組織(拡大)

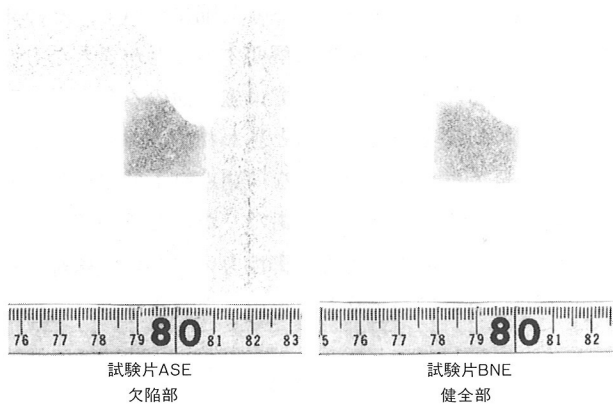


写真-3 サルファープリント

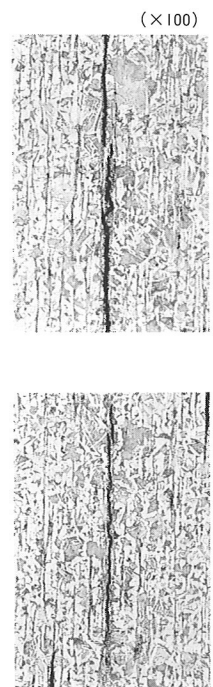
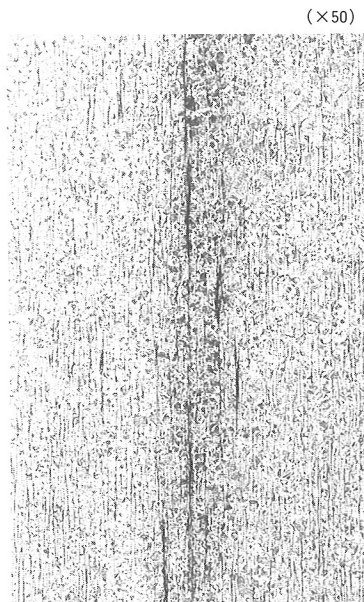
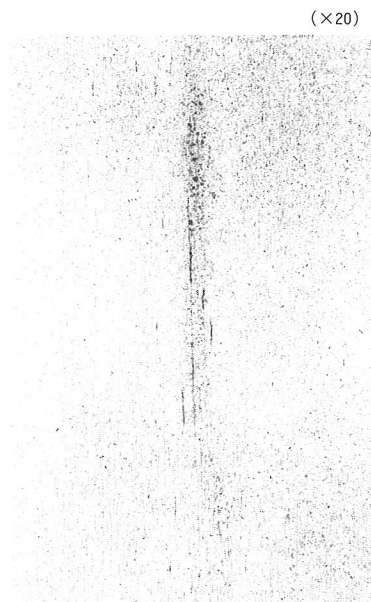
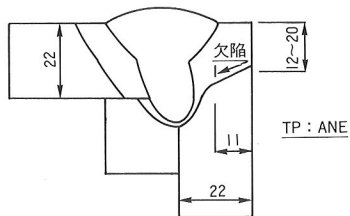


写真-4 欠陥部のミクロ組織

### c) ミクロ組織および硬さ

欠陥部のミクロ組織および欠陥部近傍の硬さを写真-4, 図-7に示す。なお、硬さは欠陥部を中心に板厚方向に0.1 mmピッチ, 200 g荷重で測定した。

### d) EPMA分析

欠陥およびその近傍の元素の分布状態を調べるため、EPMA分析を行った。その結果を写真-5, 6に示す。

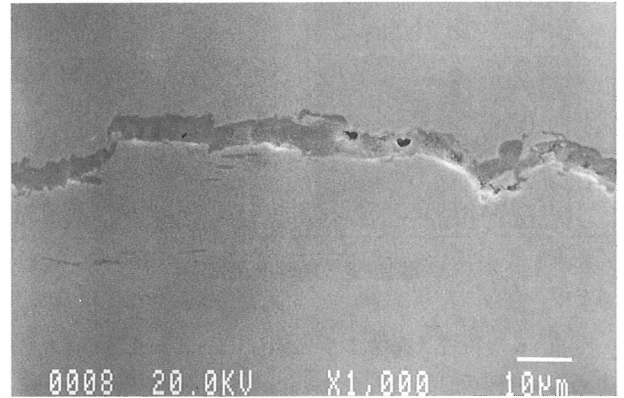


写真-5 2次電子線像

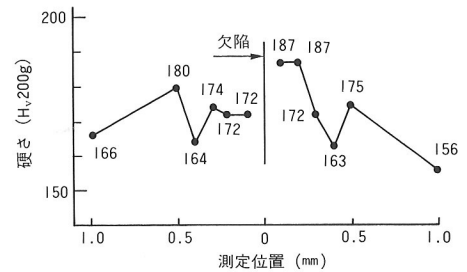


図-7 欠陥近傍の硬さ

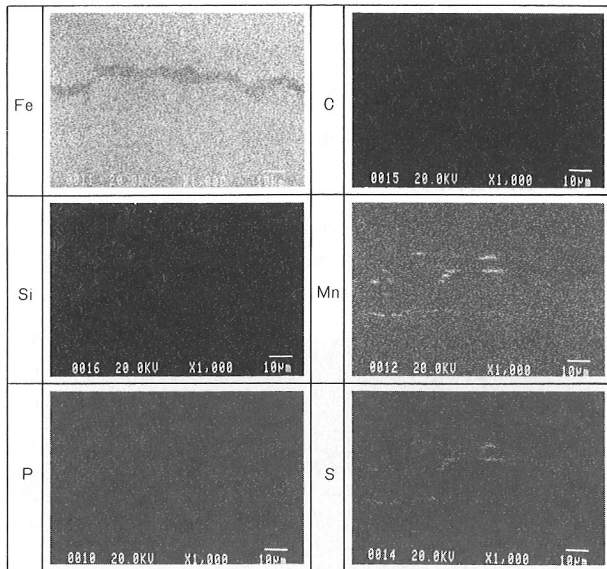


写真-6 特性X線像

写真-6の特性X線像より欠陥に沿ってMn, Sの偏析が認められた。

## 5. 考察

欠陥再現試験の結果より、角溶接熱影響部に生じる欠陥について以下のことが明らかになった。

- ① 欠陥はA材のフランジ板厚中央部に生じている。
- ② 欠陥は鋼材の偏析帯に沿って生じた微小な空隙であり、かたまって存在していた。
- ③ 欠陥の発生位置として、ダイアフラム近傍に多いということではなく、これより拘束度の影響は少ないものと考えられる。
- ④ 鋼材の清浄度が0.01%の場合、フラックスの吸湿量が0.15%であっても欠陥は発生していないが、清浄度が0.03%の場合には、フラックスの吸湿量が0.15%で全線に欠陥が発生し、吸湿量が0.03%であってもわずかながら欠陥が発生している。

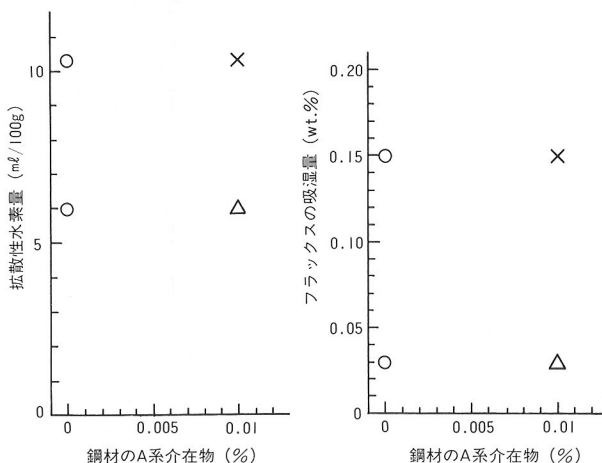


図-8 試験パラメータと欠陥発生の関係

- ⑤ EPMA分析より、鋼材の非金属介在物のうち、特にMnS系介在物(A系介在物)が欠陥発生に大きく影響しているものと推測される。

図-8に鋼材のA系介在物と拡散性水素量、フラックス吸湿量と欠陥の発生状況の関係を示しているが、今回の試験では

- ① A系介在物 $\geq 0.01\%$
- ② 拡散性水素量 $\geq 10 \text{ ml}/100\text{g}$
- ③ フラックス吸湿量 $\geq 0.15\%$

という条件で欠陥が発生することが確認できた。

## 6. まとめ

大入熱角溶接熱影響部に生じる欠陥について、その発生原因を、ある程度定量的に解明することができたものと考えている。防止対策としては施工面のみならず、鋼材面からの対策も必要であると思われる。いずれにしても我々としては上述したような問題点を十分認識して欠陥を生じさせないよう製作にあたりたいと考えている。

最後に、本試験の分析等に御協力いただいた㈱神戸製鋼所の関係各位に心よりお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 岩井清・岡野重雄ほか4名：建築構造用TMCP型厚肉520N/mm<sup>2</sup>級鋼板の開発，日本鉄鋼協会講演論文集，Vol. 4，pp.760～769，1991.
- 2) 田中一男・中野秀二ほか2名：日本建築学会関東支部研究報告集，pp.37～40，1990.