

大入熱溶接を用いたボックス柱角継手 熱影響部の超音波探傷による欠陥特性

Ultrasonic Flaw Detection of Defects of Heat-Affected Zone in Dadoed Box Column Corner Joint Shown when Heat-Welding Is Applied

中野 秀二* 田中 一男** 大月 真一***
Shuuji NAKANO Kazuo TANAKA Sinichi OHTSUKI

Summary

Minor defects are sometimes found by ultrasonic flaw detection in the zones of thick-plate box column corner joints affected by welding heat after two-electrode submerged arc welding has been employed. Though the occurrence of defects is rare and the defects themselves are minor because of the plate thickness the correction of the defects greatly affects productivity and production processes.

Thus, first, the causes of the defects were investigated by collecting defective samples and examining them; and secondly, the inferred causes were quantitatively verified by controlled defect reproduction tests using model specimens and in which the extent of the causes (internal quality of the steel and diffusive hydrogen content in the deposited metal) were varied.

1. はじめに

建築鉄骨に四面溶接構造のボックス柱が使用されてから久しいが、当初に比べると対象量が飛躍的に増大し、使用される板厚も大幅に厚くなるなど、部材製作の生産性向上は必須であった。

この背景の下に、ここ数年の間にボックス柱の角溶接作業は、これまでのサブマージアーク溶接（一電極）やガスシールドアーク溶接との組み合わせ溶接に代わり、多電極サブマージアーク溶接が、広く用いられるようになった。

従来に比べ使用される鋼板の内質は改良されて来ているが、二電極サブマージアーク溶接を適用して製作する角継手部にごく希ではあるが、超音波探傷検査により欠陥エコーが検出される場合がある。この種の欠陥は溶接部フュージョンラインから溶接熱影響部、場合によっては母材部にかけて発生するものである。発生頻度は少ないが、発生した場合は同一母材、同一溶接条件に集中するケースが比較的多い。日本建築学会の超音波探傷規準で判定すると、その程度は軽微であるが、溶接ビード長手方向に断続的に発生する為、その補修作業は工数・工程等生産への影響が大きい。この種の欠陥は発生要因がつきとめられておらず、またその構造耐力への影響も明確にはなっていない。

そこで実際にボックス柱製作中に遭遇したいくつかの

欠陥事例を検証して発生要因を抽出し、モデル化した試験体を用いた再現実験により欠陥発生メカニズムを解明すると共に、防止対策等についての検討を実施した。

本報告では、これまでの欠陥事例を紹介し、基礎的な再現実験結果について報告する。

2. 発生事例

(1) 欠陥の発生状況

欠陥の発生は、通常の管理された生産状況下で起こり、規則性が無く偶発的とも言える状況である。その発生頻度は年間数例程度（平成元年度）であるが、発生する場合は同一母材、同一溶接条件に集中し、その補修作業は生産へ大きく影響する。

その際の鋼材（ボックス柱用50キロ高張力鋼）は硫黄含有量が図-1に示すようにJIS規定値をはるかに下廻り極めて清浄な鋼材である。欠陥は大電流サブマージアーク

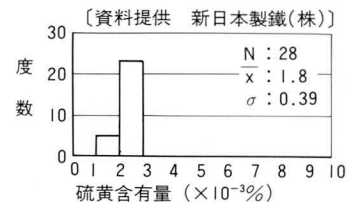


図-1 硫黄含有量図

* 松本工場製造部生産技術課係長

*** 松本工場製造部生産技術課

** 松本工場製造部長

試験条件：10%ナイトール
倍率：×1

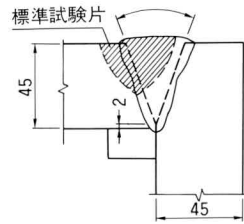
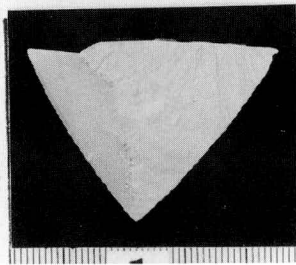


写真-1 欠陥部サンプル写真

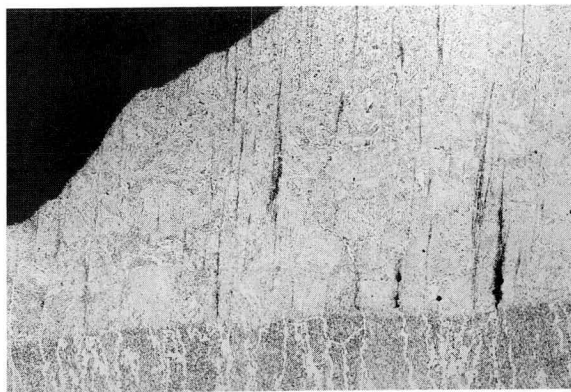


写真-2 拡大写真

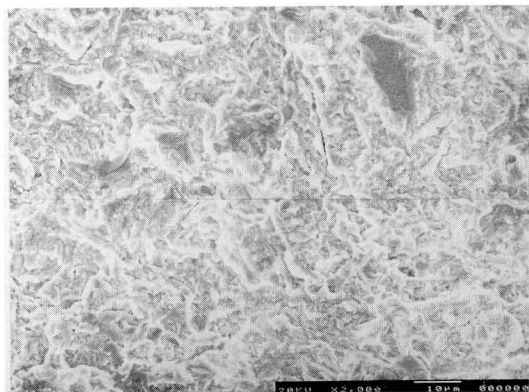


写真-3 破面写真



写真-4 浸透探傷写真

表-1 成分表

(Wt%)

| | C | Si | Mn | P | S | Ceq |
|-----------|------|----|-----|-------|---|------|
| | ×100 | | | ×1000 | | — |
| 取鍋成分分析 | 17 | 40 | 140 | 14 | 2 | 0.42 |
| チェック分析(1) | 18 | 41 | 142 | 13 | 1 | 0.44 |
| チェック分析(2) | 16 | 41 | 140 | 11 | 1 | 0.41 |

表-2 溶接条件表

| パス数 | L or T | 電流 (A) | 電圧 (V) | 速度 (cm/min) | 入熱 (KJ/cm) |
|-----|--------|--------|--------|-------------|------------|
| 1 | L | 1850 | 38 | 27 | 295 |
| | T | 1300 | 48 | | |
| 2 | L | 1100 | 36 | 32 | 173 |
| | T | 1100 | 48 | | |

ワイヤーY-A 6.4φ フラックス NSH-52

ク溶接により施工した角継手部のフランジ側、ウェブ側いずれにも発生する事が確認されているが、炭酸ガス溶接で施工した場合は、この種の欠陥は発生していない。

(2) 欠陥の事例

- ① 実製品(□-900×900×45材質SM50B)で発生した欠陥部をトレパンソーで採取した。その試料のマクロ組織を写真-1に、部分拡大したものを写真-2に示す。
- ② 欠陥の破面を写真-3に示す。
- ③ 欠陥部をアークエアガウジングを行い、浸透探傷した結果を写真-4に示す。
- ④ 鋼材の成分分析値を表-1、溶接条件を表-2に示す。

この他にも数例の同種欠陥を発見し調査したが、いずれも同様の欠陥性状である事が確認された。

(3) 欠陥および発生状況の特徴

- ① 欠陥は微小なもので発生頻度はごく少ないが、ある生産ロットに連続して発生する。
- ② 欠陥は目視検査では発見し難く、50倍程度に拡大してようやく確認できる程度である。
- ③ 欠陥の形態は、顕微鏡で拡大して観察すると割れが認められる。実製品の欠陥を浸透探傷検査で確認できたものも同様であり、溶接線方向に断続的にある範囲に発生している。

- ④ 欠陥はフュージョンライン直近あるいはやや離れた部位から溶接熱影響部にかけて発生しており、この部分は再結晶粗粒域にあたる。
- ⑤ 欠陥発生は鋼材の厚さによる違いはあまり無く、フランジ側、ウェブ側いずれにも発生し、その発生頻度は同程度である。また、ダイヤフラム取り付け位置に特に多いという傾向は見られず、特に収縮応力が支配的な要因とは考えられない。
- ⑥ 欠陥部の破面は、水素性の脆化破面であり、部分的に非金属介在物が認められる。
- ⑦ 欠陥の発生は大電流（二電極）サブマージアーク溶接に集中しており、炭酸ガス溶接では発生していない事から、拡散性水素量あるいはそのトラップ等の挙動と密接に関係しているのではないかと推測される。
- ⑧ 鋼材の化学成分値を見ても、全く不具合な点は見当らない。特にここに示した発生事例のように硫黄が0.001~0.002%程度の良好な鋼材でも欠陥が発生している事、0.006~0.008%程度の鋼材の場合に必ずしも欠陥が発生していないことから、単に硫黄の含有量と欠陥の発生とを結び付けられるものではないと考えられる。

3. 再現実験

(1) 実験計画

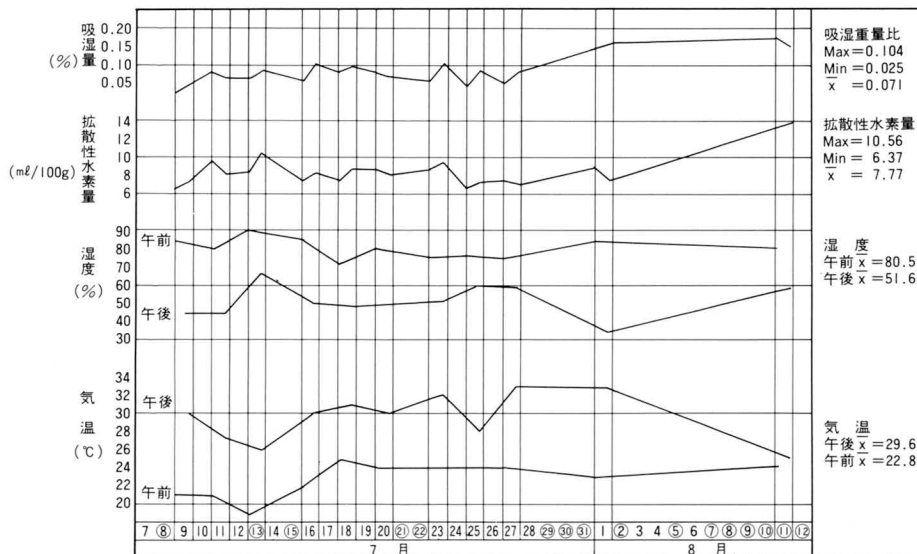
前述の事例のように、多くの要因が考えられるが、第一段階として、その中で大きな影響を与えると思われる次の二点に着目して再現試験を実施し、原因およびその程度を把握する事にした。

- ① 鋼材の内質（清浄性・均質性）のレベル
- ② 溶接金属の拡散性水素量レベル

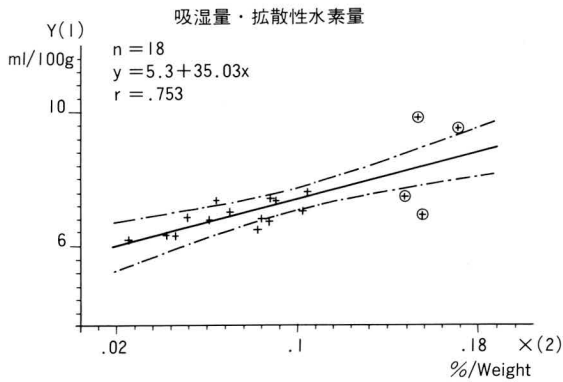
供試鋼材はSM50A厚板35mm（メーカー新日鐵）で、非金属介在物の形態等を制御して内質レベルを変えた4種類とした。

溶接金属の拡散性水素量は、実施工時の状態を基準にする事とした。フラックスの吸湿程度により拡散性水素量が左右される事に着目し、工場で使用中のフラックスを最も吸湿しやすい散布ホース口で採取しその吸湿量と溶接金属の拡散性水素量を測定（JIS Z3118鋼溶接部の水素量測定方法に準拠）した結果を図-2に示す。

その結果、吸湿量（重量比）は0.05~0.1%、拡散性水素量は7~8 ml/100gであった。図-2中の日付けの○印は溶接作業の実施されなかった日を示す。その翌日の測定値はやや高目になる傾向が見られる。特に8月11日は数日間溶接作業を実施しなかった為増加傾向が顕著で



- 1) フラックスは散布ホース口より約2000g採取した。
 - 2) 気温・湿度の測定は午前8時及び午後1時。
 - 3) 吸湿重量は採取したフラックス40gを電気炉(350℃ h)で乾燥して測定した。
 - 4) 拡散性水素量の測定はJIS Z3118鋼溶接部の水素量測定方法に準拠した。
 - 5) 日付の○印は溶接作業の実施されなかった日を示す。
 - 6) 平均値等は8月1、11日を除く。
- 図-2 気温・湿度及び使用フラックス吸湿重量・拡散性水素量測定図（1990年7~8月）



- 1) 図-2の吸湿重量・拡散性水素量のプロットである。
- 2) ○印は図-2中8月1日及び11日の数値であり実使用とは異なる。

図-3 吸湿重量・拡散性水素量相関図

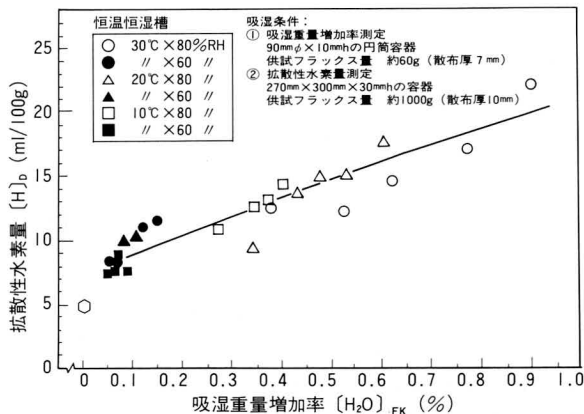


図-4 フラックス吸湿重量増加率と拡散性水素量の関係
〔資料提供 日鐵溶接工業(株)〕

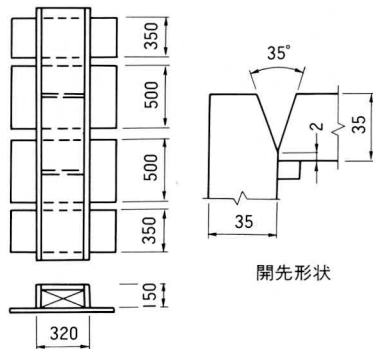


図-5 試験体形状図

表-3 拡散性水素量規格値表

| JIS規格 | 規格名 | 規格値 (ml/100g) |
|---------------|------------------------------|---------------|
| Z 3211 D 4316 | 軟鋼用被覆アーク溶接棒 低水素系 | ≤10 |
| Z 3212 D 5016 | 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 低水素系 | ≤10 |
| Z 3313 YFW25 | 軟鋼及び高張力鋼用アーク 溶接フラックス入りワイヤ | ≤8.5 |

表-4 供試鋼材成分表

| 鋼種 | C | Si | Mn | P | S | Ceq | 備考 |
|-----|------|----|-----|-------|---|------|----------|
| | ×100 | | | ×1000 | | — | |
| 鋼板A | 17 | 39 | 140 | 17 | 4 | 0.42 | 一般材 |
| 鋼板B | 15 | 46 | 144 | 10 | 1 | 0.41 | 内質対策-I |
| 鋼板C | 15 | 43 | 143 | 11 | 1 | 0.41 | 内質対策-II |
| 鋼板D | 13 | 27 | 135 | 11 | 2 | 0.37 | 内質対策-III |

表-5 溶接条件表

| パス数 | L or T | 電流 (A) | 電圧 (V) | 速度 (cm/min) | 入熱 (KJ/cm) |
|-----|--------|--------|--------|-------------|------------|
| I | L | 1650 | 36 | 28 | 248 |
| | T | 1200 | 47 | | |

あった。

その吸湿量と拡散性水素量の相関を図-3に示すが、

$$[H] = 35.03 \times [H_2O] + 5.3 \quad (\gamma=0.753)$$

[H] : 拡散性水素量 ml/100g

[H₂O] : 吸湿量 (%)

である。

また、乾燥したフラックスによる吸湿量、拡散性水素量の相関を調べた結果を図-4に示すが、吸湿量0.1%前後では前述の図-3と良く一致している。

参考の為に他の溶接方法の拡散性水素量の規格値を表-3に示す。

これ等を参考に、供試フラックスは吸湿あるいは乾燥させる事により調整し、実際の施工状態での平均的拡散性水素量レベル7~8ml/100gとその上下の3レベルとした。

再現試験は前述の4種類の供試鋼材と、これ等3種類の供試フラックスを組み合わせ実施した。

試験体形状は、図-5に示す如く口型とし、中間に2箇所板厚25mmのダイヤフラム(3方向完全溶込み溶接)を取り付け、裏面は主材と同厚の鋼板で拘束した。なお、鋼板Bはボックス柱用として特に内質対策が取られている鋼板であり、通常その適用も多いため、試験体の数量を各々2体とし、その他は各々一体とした。

(2) 試験結果

再現試験に用いた供試鋼材の化学成分(取鍋分析値)を表-4、溶接条件を表-5に示す。得られた実験結果を以下に述べる。

- ① 各種の超音波探傷検査(70度斜角探傷、垂直探傷、

表-6 超音波探傷結果表(斜角探傷)

| 鋼板 レベル | 拡散性水素量レベル | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|------|---|----|------|------|---|----|------|------|---|---|
| | 少 ← | | | | | | | | → 多 | | | |
| | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | |
| | マーク | 1or2 | F | W | マーク | 1or2 | F | W | マーク | 1or2 | F | W |
| 鋼板 A | A1 | 1 | ○ | ○ | — | — | — | — | A3 | 1 | × | × |
| | | 2 | ○ | ○ | | | | | | 2 | × | × |
| 鋼板 B | B1 | 1 | ○ | ○ | B2 | 1 | ○ | ○ | B3 | 1 | ○ | ○ |
| | | 2 | ○ | ○ | | 2 | ○ | ○ | | 2 | × | ○ |
| | B1R1 | 1 | ○ | ○ | B2R1 | 1 | △ | ○ | B3R1 | 1 | △ | ○ |
| | | 2 | ○ | ○ | | 2 | △ | ○ | | 2 | ○ | ○ |
| 鋼板 C | — | — | — | C2 | 1 | ○ | ○ | C3 | 1 | △ | △ | |
| | | | | | 2 | ○ | ○ | | 2 | △ | ○ | |
| 鋼板 D | — | — | — | D2 | 1 | ○ | ○ | D3 | 1 | ○ | ○ | |
| | | | | | 2 | ○ | ○ | | 2 | △ | △ | |

凡例 1or2 1：第一溶接ビード 2：第二溶接ビード
 F,W F：フランジ側 W：ウエブ側
 記号 ○：欠陥無 △：欠陥有(合格) ×：不合格

合格判定は建築学会規準による

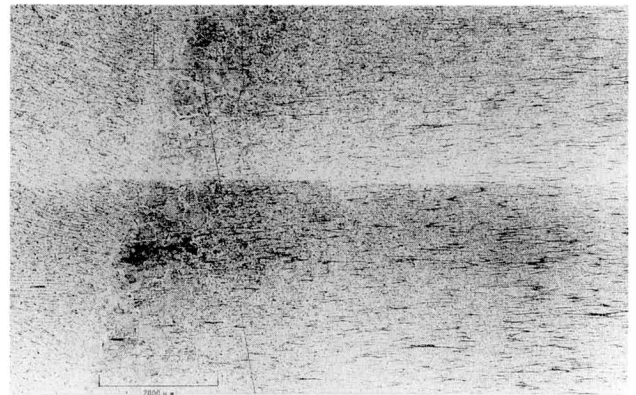


写真-5 拡大写真

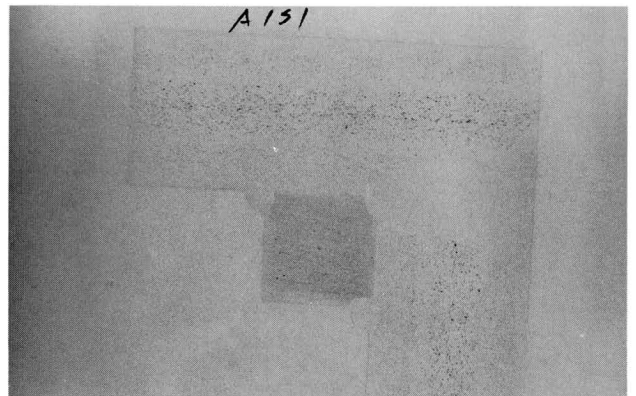


写真-6 サルファプリント写真(鋼板A)

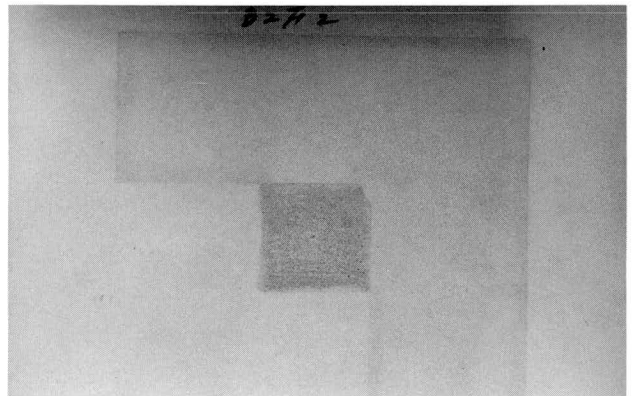


写真-7 サルファプリント写真(鋼板B)

表-7 超音波探傷結果表

| 探傷 方法 | 欠陥位置(mm) | | | エコー高 さ eh (%) | 備考 |
|-------------|----------|----|----|------------------------|------|
| | X | Y | d | | |
| 斜角探傷*1 | 全線 | 22 | 19 | 30 | 領域II |
| 垂直探傷*2 | 15 | 17 | 21 | B | — |
| | 65 | 17 | 20 | B | |
| | 85 | 20 | 20 | C | |
| | 110 | 17 | 19 | C | |
| | 130 | 17 | 20 | C | |
| | 175 | 25 | 20 | C | |
| | 375 | 25 | 19 | C | |
| | 400 | 18 | 19 | C | |
| | 50 | 50 | 17 | D | |
| | 100 | 47 | 17 | C | |
| | 130 | 48 | 17 | C | |
| | 200 | 46 | 17 | D | |
| | 350 | 45 | 18 | D | |
| 400 | 50 | 17 | C | | |
| Cスキャン 探傷 | 図-7 参照 | | | 図-8 参照 | — |

*1：70°斜角探傷
 *2：STB V2の欠陥エコーをCRT 80%に設定
 (STB V2の2mmφ平底穴のエコー高さは建築学会基準の3.2mmφ横穴(ARB)エコー高さより5dB低い)
 エコー高さ A：eh≤10 B：10<eh≤30
 C：30<eh≤80 D：80<eh

Cスキャン超音波探傷)の内、斜角探傷検査の結果を表-6に示す。

- ② 拡散性水素量レベル3の溶接においては、鋼板A(一般材)はいずれの部位でも不合格である。鋼板B(内質対策-I)の一体は不合格、もう一体および鋼板C(内質対策-II)、鋼板D(内質対策-III)は合格ではあるが欠陥が発生している。

- ③ 拡散性水素量レベル2の溶接においては、鋼板B(内質対策-I)では、2体の内一体は合格欠陥が発生し、もう一体および鋼板C(内質対策-II)、鋼板D(内質対策-III)は欠陥は全く発生していない。
 ④ 拡散性水素量レベル1の溶接においては、いずれの鋼板にも欠陥は発生していない。
 ⑤ 鋼板B(内質対策-I)と拡散性水素量レベル3

の組み合わせ試験体（マークB3）から採取した欠陥を調べると（写真-5）、実工事での発生事例に類似している。また、破面観察でも水素性の脆化破面を呈しており、今回の試験は「2. 発生事例」を良く再現している。

⑥ B3試験体で実施した斜角探傷、垂直探傷、Cスキャン超音波探傷検査の結果を表-7に示し、その斜角探傷と垂直探傷の欠陥位置のプロットを図-6、Cスキャン超音波探傷の出力図を図-7、に示す。（Cスキャン超音波探傷検査の概要を図-8、図-9に示す。）

⑦ 鋼板A、鋼板Bの溶接部のサルファプリントを写

真-6および写真-7に示したが、いずれもサルファバンドは極めて軽微で良好である。

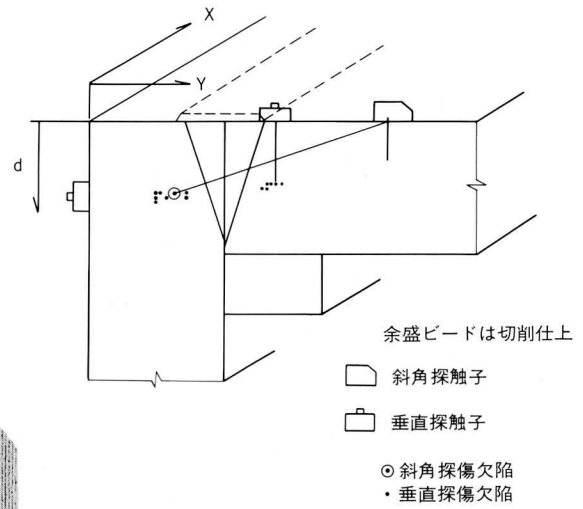


図-6 超音波探傷測定要領図

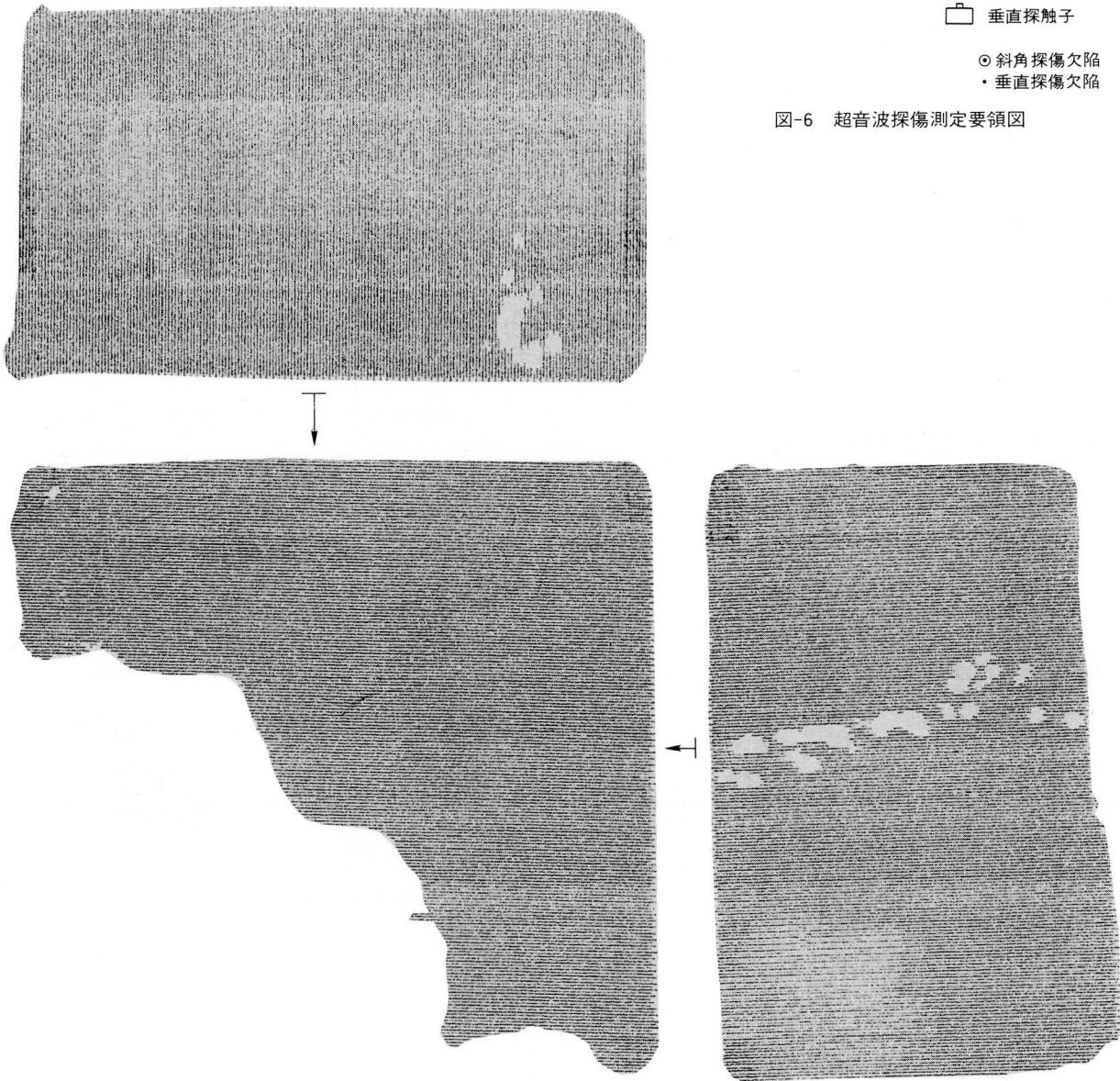
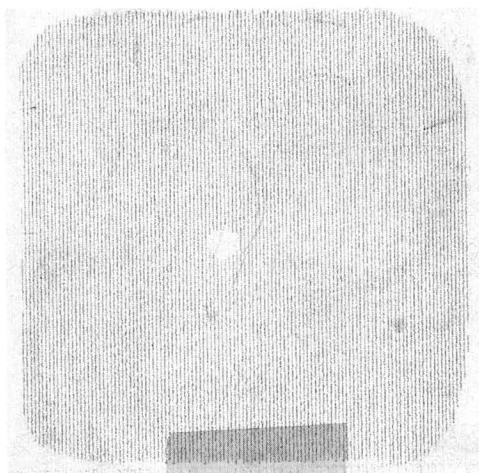


図-7 Cスキャン出力図

4. 考察

本実験の結果をまとめて述べる。

- ① 拡散性水素量レベル3（フラックスを強制的に一定量吸湿させたもの）においては、
 - 鋼板Aでは建築学会超音波探傷規準の判定で不合格となる。
 - 鋼板Bでは一体は部分的に不合格欠陥が検出されており、もう一体および鋼板C、鋼板Dは一部にご



STB-G V2
5MHz 8° Focus
φ2人工欠陥 80%
26dB

図-8 探傷感度設定図

く低い欠陥エコーが検出（表-6中△印）されているものの合格であるが、この組み合わせは注意を要する。

- 従って鋼板A、鋼板Bは拡散性水素量レベル3では適当と言えない。また、鋼板C、鋼板Dもその他の条件によっては不合格になる危険性があると考えられる。
- ② 拡散性水素量レベル2（実施工状態のもの）においては、
 - 鋼板Bでは一体は全くエコーが検出されず合格であり、もう一体は合格であるがごく低い欠陥エコーが検出（表-6中△印）されている事より、今回の再現実験以外の条件によっては、不合格になる危険性があると考えられ、今後の課題である。
 - 鋼板C、鋼板Dでは全くエコーが検出されず合格であるが、この鋼板が今回の実験のために特に製造されたものであり、使用するに当たっては鋼板Bと同様に、経済性とのバランスを考慮する必要がある。
 - ③ 拡散性水素量レベル1（フラックスを『JIS Z3118鋼溶接部の水素量測定方法』の規定により乾燥したもの）においては、
 - 鋼板A、鋼板Bともエコーが検出されず合格である。
 - この状態のフラックスを使用すれば、通常的一般材でも問題なく使えると思われる。しかしこのフラックス状態は、実験室では達成可能であるが実作業でこの状態を維持する事はむずかしく今後の課題である。
 - ④ 超音波探傷検査について

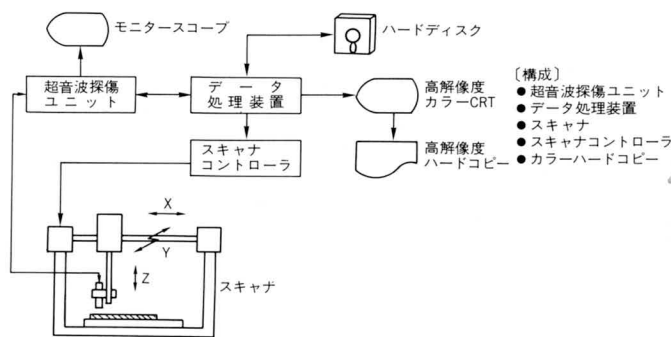


図-9 システム構成図 [資料提供 日鐵テクノス(株)]

- 同一欠陥部位に斜角探傷、垂直探傷、Cスキャン超音波探傷検査の3種類を実施したが、斜角探傷と垂直探傷・Cスキャン超音波探傷検査とは必ずしも一致した結果となっていない。
- これは今回のように**微小な欠陥の場合**、斜角探傷検査においては、形状や方向によっては、欠陥の検出が困難な場合がある為と思われる。しかし、この点については一般的にも言われている事であり、更にデータを積み重ねて確認する必要がある。
- しかし垂直探傷、Cスキャン超音波探傷検査を実施する為には余盛ビードの切削除去や探傷機器の制約があり、現在の斜角探傷検査にかえて実際のボックス柱角継手に適用することは極めて困難である。

5. まとめ

実施工においては、炭酸ガス溶接で欠陥が発生していない事、および、今回の試験でも拡散性水素量が少ない場合には発生していない事から、拡散性水素量が要因の一つである事がわかった。また、同一拡散性水素量においては、鋼材の内質レベルと欠陥の発生程度に相関がある事から、この点も要因である事が確認できた。

これ等から、欠陥の発生メカニズムは以下の様に推定される。

溶接中、フェージョンライン近傍から溶接熱影響部に再結晶粗粒域が形成され、その部位に存在する微小な非金属介在物に水素が凝集し、溶接収縮応力と相まっていわゆる水素割れが発生する。この非金属介在物等の内質の程度は、サンファプリントや清浄度の評価では差異は認められず、その分布状況および形態により左右されているものと考えられる。この他に要因として開先形状、溶接金属の形状、溶接積層状況に起因する力学的な事項が関係しているとも考えられ、今後の検討課題である。

今回は□型試験体による再現実験であったが、これまで定性的に言われてきたこの種の欠陥発生の要因について鋼材内質程度と、溶接金属の拡散性水素量の相関について、ある程度定量的に把握することができた。しかし、その限界についてはまだ明確にされておらず今後の課題である。

なお、本論の目的ではなかったが実験の段階で従来より言われていた斜角探傷と垂直探傷の欠陥検出能の差も確認できた。この種の微小欠陥を評価する場合には注意を払う必要がある。

最終的には、強度試験を実施してこの種の欠陥が構造耐力に与える影響を確認する必要がある。

6. 今後の課題

今回の基礎的な再現実験結果を踏まえて、実作業規模での実験を実施し、さらに欠陥発生の要因追究、防止対策を講じたい。今後の課題を以下に述べる。

- ① 鋼材の内質程度と欠陥発生の拡散性水素量の限界について確認する。
- ② 発生事例から収縮応力を支配的要因と考えず、□型試験体による再現試験を実施したが、実構造物がボックス柱である事を考慮し、実大ボックス柱による実験により、欠陥の発生状況を確認する。
- ③ 溶接入熱(電流・電圧・速度等)、開先形状、溶接金属の形状、積層状況等他の溶接方法を含めた条件の違いによる影響についての検討をする。
- ④ この種の欠陥が強度(構造耐力)にどの程度影響を及ぼすか確認する。

以上で報告を終了しますが、本実験を実施するに当たり、新日本製鐵株式会社、日鐵溶接工業株式会社、日鉄テクノス株式会社殿に御協力戴きました事に対し心より感謝致します。

<参考文献>

- 1) 森田、江波戸、舟橋、小南、里見、小坂；溶接組立箱型断面柱のかど溶接に関する研究 日本建築学会学術講演梗概集 1989 10月
- 2) 黒木出版社；溶接部組織写真集
- 3) 田中、中野、望月、渡邊；二電極サブマージアーク溶接を用いた厚板ボックス柱角継手熱影響部の超音波探傷欠陥について(その1)、日本建築学会関東支部研究報告集、1990年度
- 4) 日本建築学会；鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説、1989

1990.10.31受付