

ミズリー鉄道橋上部工溶接施工報告

Report of Welding Procedure for Fabrication of Bridge over the Missouri River

尾崎 元宣*
Motonobu OZAKI

1. 諸言

本橋は、アメリカ中部・ネブラスカ州ルロを流れるミズリー川に架設される単線の鉄道橋である。橋は、八連の鈹桁と二連の曲弦ワーレントラスで構成され、全長約567 m、トラス部高さ21 mであり、総設計重量2,900ト

ン、そのうちトラス部2,100トン、鈹桁部800トンであった。一般図を図-1に示す。

本報告書は、この橋の製作に当って当面した問題、それに対する対応と対策等を、溶接施工の立場よりまとめ、今後の参考とするものである。

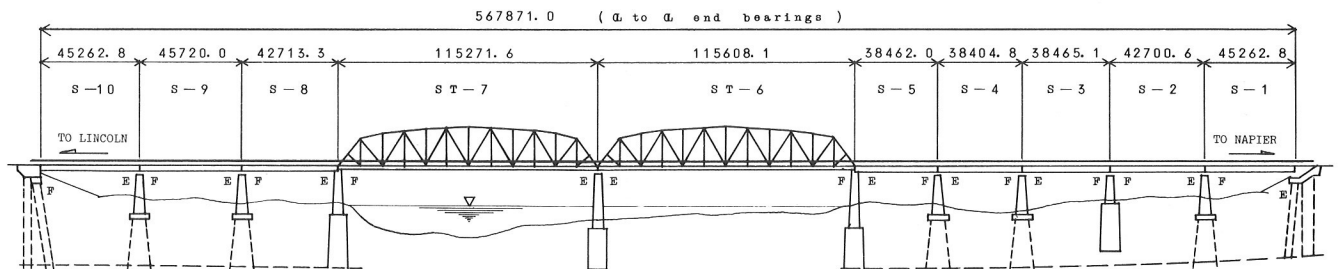


図-1 ミズリー鉄道橋一般図

2. 工事の特徴

2-1 構造および施工上の特徴

本橋の鈹桁部は、鈹桁橋としては最大クラスの大きさで、高さ3.2 m、桁長38~45 mの大きさであった。フランジとウェブのT継手は、完全溶け込みが要求された。フランジ部の板厚は、31.8 ~ 76.2 mm、ウェブは19 mmでありK型開先を採用した。ガセット・プレートは、裏当金を取り付けた完全溶け込み片面溶接をMIG溶接法で行った。

トラス部は、曲弦ワーレントラスで弦材はすべて箱型であった。この箱桁の製作に当り、各コーナーは完全溶け込みのコーナー溶接が要求された。この部分の製作は治具を考案し、作業の能率化と精度を確保した。(3-6節参照)

写真-1に仮組中のトラスの写真を示す。

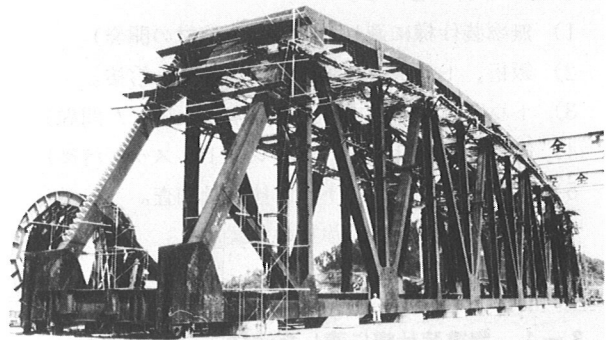


写真-1 仮組中のトラス部

*川田工業㈱生産本部四国工場製造課

2-2 材質上の特徴

本橋の主要部は、ASTM A588-74Gr. 鋼（50キロ級鋼）であり、一部にASTM A36（41キロ級鋼）が使用された。

表-1 ASTM A588鋼の組成の一例

化 学 組 成 %								
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V	Ceq
0.17	0.25	1.14	0.015	0.01	0.29	0.56	0.06	0.4

$$C_{eq}(\text{炭素当量}) = C + Si/24 + Mn/6 + Cr/5 + V/14$$

ASTM A588 鋼は、いわゆる耐候性用鋼であり、Cr, Cu, V 等が添加され耐食性がすぐれており、長期間、大気に暴露すると、安定した錆が表面を覆い耐食性が増す。したがってこの鋼は、無塗装で使用することも可能である。無塗装仕様は、維持、管理に非常なメリットがあり、アメリカでは、最近、この種の鋼の使用率が高まっております、本橋もこの仕様であった。

無塗装仕様の場合、溶材は機械的性質や耐食性、色調等に特別の規定があり、AWS D1. 1-74, 4.1.4 によらねばならず、材質上の問題がここに生じて来る。A 588 鋼の炭素当量について検討すると、本鋼は、Cr, Cu, V 等が添加されているため炭素当量が比較的高い。そのため、溶着金属の硬化や、収縮にともなう歪や、割れを防ぐため施工方法に、充分な注意が必要であった。

3. 製作上の問題点と対策

製作に当たって、次のような点が問題となった。これらに対して、必要なものは施工試験を行って検討し、治具の必要なものは、これを考案して対処した。以下に問題点と対策を順に述べる。

- 1) 無塗装仕様に適した溶材。（溶材の開発）
- 2) 鉋桁、トラス弦材等の完全溶け込み溶接。
- 3) トウ割れの発生。（製作段階で発生した問題）
- 4) 厚板の突合せ溶接。（エレクトロスラグ溶接）
- 5) ガセット・プレートの溶接歪量調査。
- 6) 箱桁の裏当金仮付治具の考案。
- 7) 予熱管理。

3-1 無塗装仕様に適した溶材

本工事に用いる溶材は、AWS 規格に適合する必要がある。すなわち、ASTM A588 を無塗装で使用する場合、

耐大気腐食性と、母材と同等の発錆、色特徴を備えていなければならない。さらに、手溶接棒では低水素系の溶材、サブマージ・アーク溶接等では、溶着金属の機械的性質と化学組成が規定されており、これに適する溶材の開発と選択が必要であった。ところが、ASTM A588 鋼を用いた無塗装の構造物を製作した例は、まだ我国ではほとんどない。したがって、この時点ではこの規格に適するサブマージ・アーク溶接用と被覆アーク溶接用溶材は、市販されておらず、新しく開発する必要があった。そのため、溶材メーカーと協議・検討しながら、規格に適し、かつ溶接性の良好な溶材の開発を行った。溶材メーカーと当社の間で種々の試験を行った結果、機械的性質、化学的組成、色調等AWSの規格に適した溶材の開発に成功した。

表-2 に本工事で用いた溶材の一覧表を示す。

表-2 ミズリー鉄道橋使用溶材

溶 接 方 法	溶 材 銘 柄	溶 材 メ ー カ ー	A W S 該 当 規 格
被覆アーク溶接	L-55 ※	日鉄溶接工業	E7016
被覆アーク溶接	OT-60B ※※	"	E8016G
サブマージアーク溶接	MF-38XUSW588, ※※ MF-63XUSW588, ※※	神戸製鋼	グレードF80
MIG溶接 (Ar+2%O ₂)	YM-70A	日鉄溶接工業	
消耗ノズル式 エレクトロスラグ溶接	Y-462XYP-15 XSES-15B	"	

※ 仮付専用溶材

※※ 本工事のために開発された新製品

3-2 鉋桁、トラス、弦材等の完全溶け込み溶接

完全溶け込み溶接を要求された部分は、板厚が大きく、かつ部材も大型であるため、溶接歪や溶接性を予じめ調査し実施に備えた。

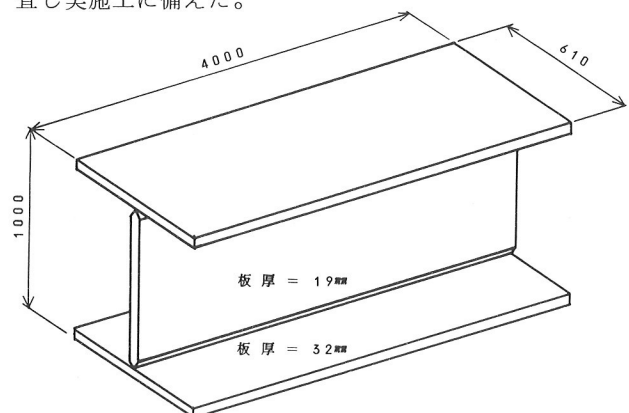


図-2 施工試験材の形状

施工試験の概要は、次のとおりであった。開先形状は、K型開先、溶接方法は、サブマージ・アーク溶接法を用いた。試験片の形状は、図-2のとおりである。

施工試験後、溶け込み深さ、溶接歪、作業性等を多角的に検討した結果、図-3に示した開先形状と積層法を適応することに決定した。

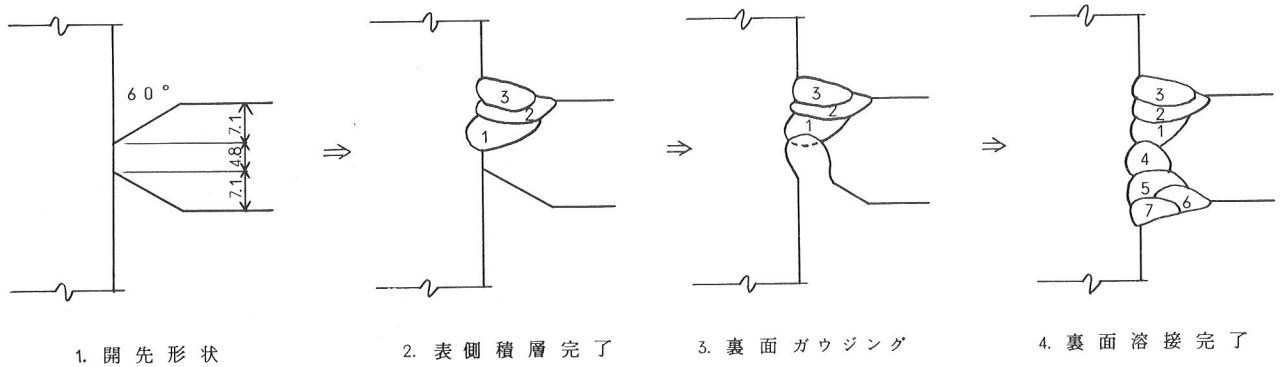


図-3 完全溶け込みT継手積層法

3-3 トウ割れの発生(図-4)

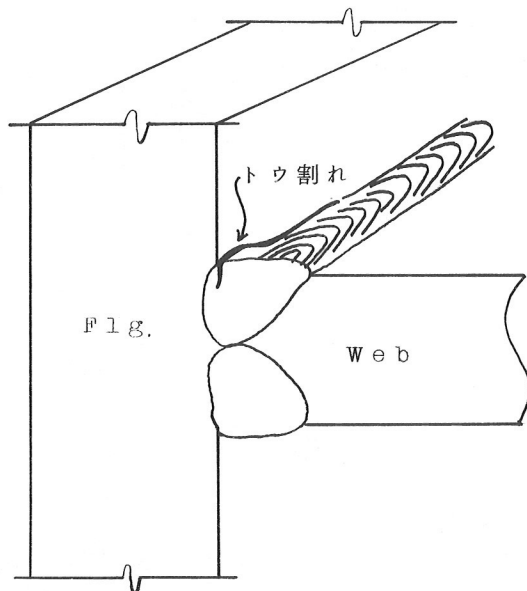


図-4 トウ割れ

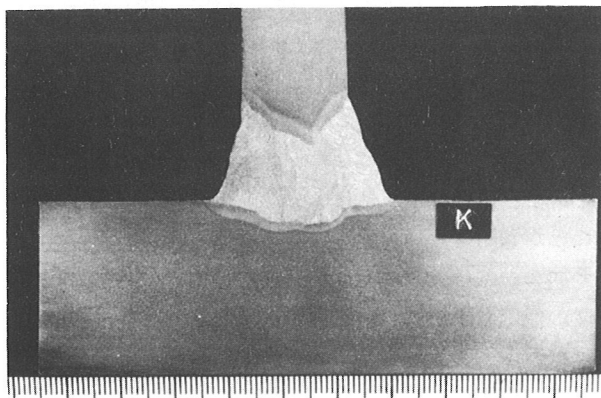


写真-2 T継手マクロ腐食

実施工の結果、鉋桁のフランジとウェブのT継手部に、施工試験では見られなかったトウ割れの発生が見られるものがあつた。調査の結果、最終層のトウ部において、母材と溶着金属のなじみが良くないことが判明した。(写真-2, 3参照)

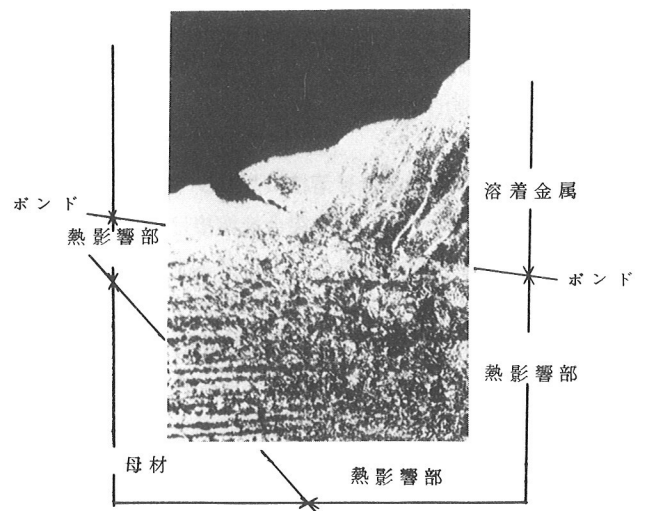
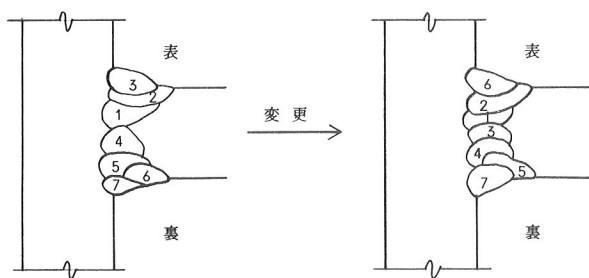


写真-3 トウ部拡大。溶着金属と母材に発生したトウ割れ。(×50)

この原因として以下の事が考えられた。

- 大型の鉋桁で板厚が大きいので、溶接歪による拘束力が大きく、トウ部に応力が集中した。
- 予熱が不十分で急冷硬化や水素の影響が考えられる。
- 立て板であるフランジとビードのなじみがよくないため応力の集中が一層大きい。
- 溶材の乾燥が不足している。

これらに対し、次のような対策がこうじられた。a)については、溶接による歪を分散させるため積層法を下記のように変更した。すなわち、裏側の最終層⑦は、表側の溶接が終わった後行うようにした。



⑥、⑦層は、ミサ溶接法を採用。

図-5 T継手部積層法の変更

更に、ビードと母材のなじみを良好にするため、電流の安定したビード外観の良好なミサ溶接機(1.6φワイヤ)を、⑥、⑦に採用した。その他、溶材の乾燥、予熱、開先部の清掃等に注意を払った結果、鋸桁部に発生したトウ割れは解消できた。

3-4 厚板の突合せ溶接(エレクトロスラグ溶接)

板厚の厚いフランジ等の突合せ溶接は、非常に工数が重むため能率化が望まれる。そこで本工事では、消耗ノズル式エレクトロ・スラグ溶接(写真-4参照)の採用を検討し、施工試験を行った。X線透過試験、超音波探傷試験、その他各種の機械試験の結果、満足できる溶接が行えることが確認され、欠陥は認められなかった。エレクトロ・スラグ法で常に問題となる衝撃値は、 -18°C で $3.7 \sim 4.0 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 、熱影響部で $5.2 \sim 8.9 \text{ kg}\cdot\text{m}$ に達し、規定のVノッチ・シャルピー衝撃値(-18°C で $2.8 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 以上)を満足していた。

この施工試験の結果をもとに実施工を行った。実施工での突合せ材は、板厚 $32 \sim 76 \text{ mm}$ 、巾 1200 mm であった。施工後の超音波探傷検査によって、継手部に微細な“割れ”の認められるものが一部あった。この“割れ”は、溶着金属のフェライト帯*に発生していることが確認された。写真-5は、フェライト帯の“割れ”を示す。

このフェライト帯は、強度が低く“割れ”が生じやすい性質をもっている。このため補修を行った場合、その

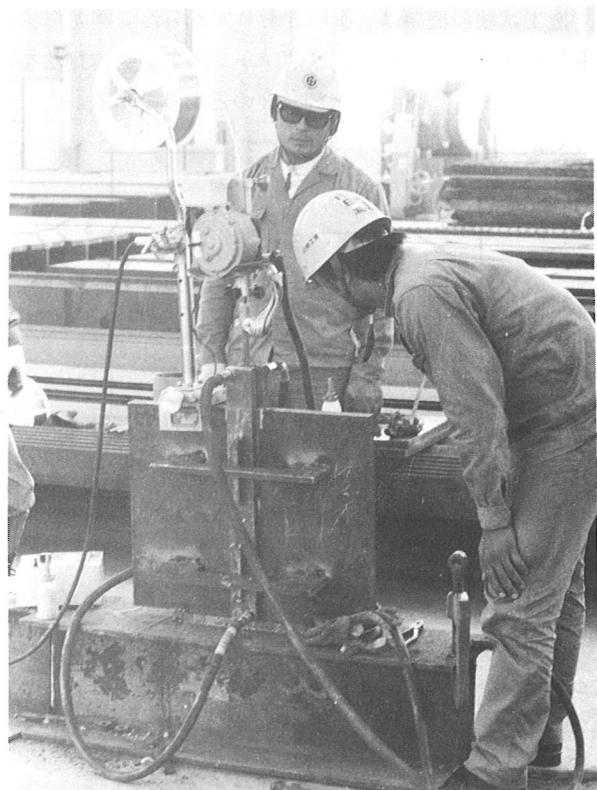


写真-4 エレクトロスラグ溶接施工試験



写真-5 エレクトロスラグ溶着金属部に発生した割れ。(×120)

溶接歪や熱収縮のため、健全であった部分にも“割れ”が伝播することが判明した。すなわち、エレクトロ・スラグ溶接部の金属組織は、予想以上に割れ感受性が高いことが判明した。エレクトロ・スラグ溶接法は、大量の金属を一度に溶融し凝固させるため、その凝固過程で強度の低い金属組織が析出すると考えられる。これは、エレクトロ・スラグ溶接法自体が常に直面する欠点である。施工試験において“割れ”の発生が認められなかったにもかかわらず、実施工において“割れ”が発生した理由

は次のように考えられる。

- (イ) 部材が大型で多量の金属が凝固するため、凝固収縮時の拘束力が大きく、かつ冷却速度も大きいため、強度の低いフェライト帯で“割れ”が発生した。
- (ロ) 溶接金属中の水素の存在が、(イ)の原因を一層促進した。
- (ハ) 溶着金属中のシリコン (Si) の存在。

以上の理由によりフランジの突合せ溶接の一部は、サブマージ溶接で行った。(イ)、(ロ)の考案は現在の時点で確証はされていないが、次の事は云える。すなわち、引張応力が作用したり、高い衝撃値が要求される構造物の溶接にエレクトロ・スラグ法を適用する場合は、技術的に慎重を期さねばならないと考えられる。同時に、この溶接法自体の基礎的研究を重ね、信頼のおける溶接法にしなければならないと考える。

一方、1977年2月付、アメリカ運輸省通達によると『引張り応力の作用する主要構造物へのエレクトロ・スラグ溶接法の適用が、当面技術的な改善がなされるまで禁止された。』と伝えられている。

* フェライト帯 (Ferrit Band),

フェライト相が帯状に析出した組織。フェライトは地鉄ともいい、炭素を0.035%まで溶かし込む。機械的性質は、柔らかく、強度は低い。

3-5 ガセット・プレート溶接の歪量調査

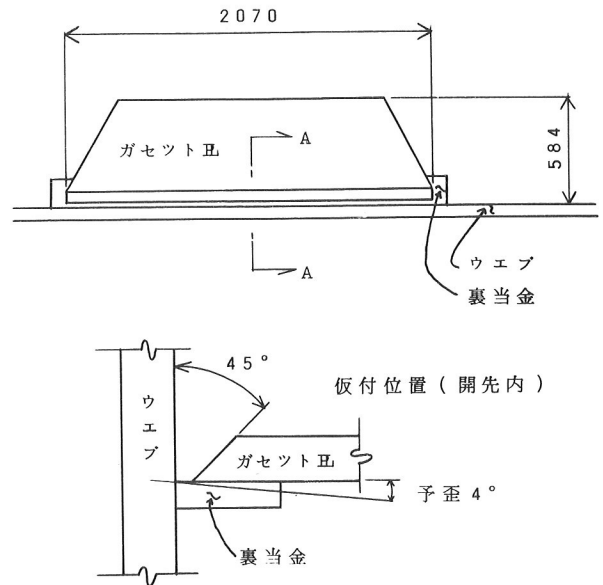
本橋の鉋桁部に取り付けられるガセット・プレートは、裏当金をとりつけた片面完全溶け込み溶接が要求された。溶接は、MIG溶接を用い、開先は図-6のような形状であった。ガセットの仮付けに当って、継手部への応力作用を考慮した次のような制限が与えられた。

- (イ) 仮付溶接の位置を開先内に制限する。
- (ロ) 開先の裏側を仮付けする場合は、連続溶接としなければならない。

そこで実施工に先立ち、溶接歪量、仮付け位置、作業性を調査するため施工試験を行った。その結果、仮付けは、(イ)の方法で行い良好な結果が得られる事が確認された。したがって、(イ)よりも工数が重む(ロ)の方法は選択されなかった。

一方、予歪は、 4° 与えれば良い事が確認された。

作業性と溶接性は、いずれも(イ)の方法で良好な結果が得られた。



A-A 断面詳細

図-6 ガセット・プレート開先形状

3-6 箱桁の裏当金仮付け治具

箱桁の断面を図-7に示す。箱桁の製作に当って、前項3-5の(イ)、(ロ)と裏当材が問題となった。すなわち、

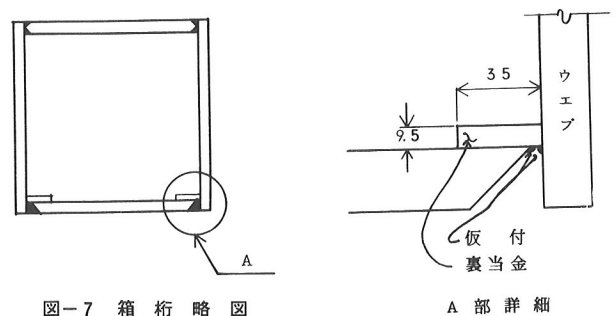


図-7 箱桁略図

A部詳細

裏当材自体も、ASTM A588 鋼であるため規格の平鋼は入手出来ない。

そのため、大板材をガス切断して裏当材を作成した。この裏当材は $35 \times 9.5 \text{ mm}$ の断面を持ち、長さ約 20 m (途中で突合せ溶接する場合は、完全溶け込み溶接が必要) であるため、ガス切断による歪が大きい。そこで、治具により歪を拘束して修正し、フランジに仮付けした。図-8にその治具の外観を示す。この治具により裏当金の歪を修正した結果、正確な仮付が可能となり良好な開先精度を得た。

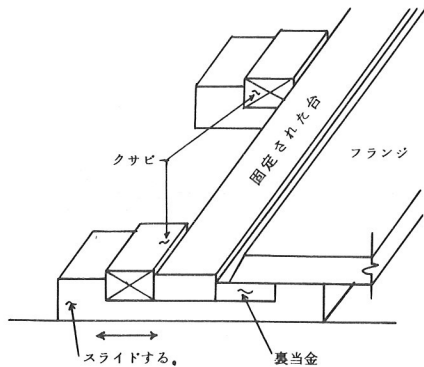


図-8 裏当金仮付け治具

3-7 予熱管理

ASTM A588 鋼の溶接予熱温度に関しては、AWS D1. 1-74, 4.2 に次のような最低予熱温度を規定している。

表-3 A588鋼最小予熱・パス間温度(AWS D1.1-74)

板 厚 (mm)	最小予熱・パス間温度
$t \leq 19$	なし
$19 < t \leq 38$	22℃
$38 < t \leq 63.5$	66℃
$63.5 < t$	108℃

ミルシートにもとづいて、本橋で使用する鋼材の炭素当量を算出すると最大0.50であった。これは、HT 70 ~ HT 80 鋼材に相当する。したがって、PCM** (割れ感受性組成) により予熱温度を求めると150° ~ 200℃必要となる。そこで、適正予熱・パス間温度を確認・調査するため施工試験を行った。

サブマージ・アーク溶接——窓型拘束われ試験***

被覆アーク溶接——U型溶接われ試験****。

被覆アーク溶接では、入熱が比較的小さく冷却速度が大きくなるため試験片にクラックが生じた。したがって、クラックの生じなかった温度である150℃以上の予熱パス間温度で施工することにした。

サブマージ・アーク溶接では、施工試験の結果、上記

の予熱・パス間温度でクラックを生じなかった。しかし、実施工では、クラックの発生が認められるものがあったため、被覆アーク溶接と同様、150℃で管理し健全な溶接を得た。

予熱・パス間温度は、高強度材や極厚板では、クラックの発生と密接な関連があり、予熱管理が重要になってくる。

特に、手溶接の予熱は、とかくおろそかにされがちであるが、極厚板や高強度材では急冷硬化し、割れが発生しやすいので、充分注意する必要がある。

** PCM (割れ感受性組成) ;

$$PCM = C/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + 1/10 + 5B$$

PCMは、上記の式で表わされ、鋼中の添加元素が鋼の硬化に及ぼす影響を炭素濃度に換算したものである。PCMが大きい程、硬化しやすく、割れやすい。SM50でPCMは約0.25前後である。

*** 窓型拘束われ試験 } ;

**** U型溶接われ試験

拘束した試片に溶接ビードを置き、ビードの割れ発生を調査する試験方法。

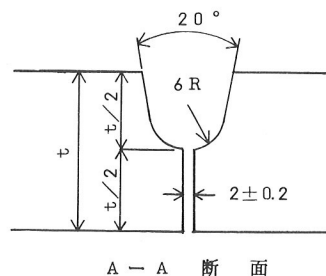
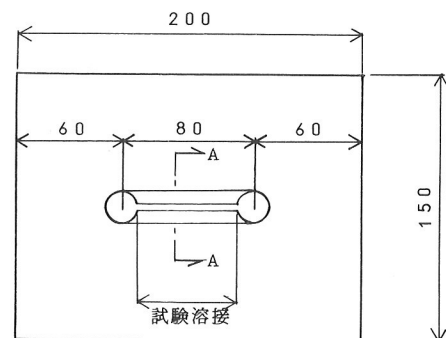


図-9 U型溶接われ試験片形状

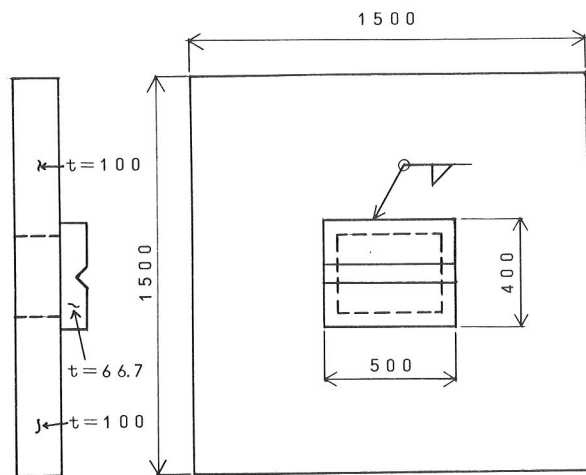


図-10 窓形拘束割れ試験形状

4. 総 括

ミズリー鉄道橋の製作を終え、顧みるとき種々の教訓が残された。

特に、本橋は、使用する溶材の開発から着手し、その構造は大型で無塗装仕様という特殊な工事であった。そのため、溶接施工管理、それらを裏づける調査と研究、実施工を有機的に結びつけ、フィードバックするという溶接施工管理体系が問われた。そういう意味で本工事は、溶接施工の原点を浮きぼりにするよい例であったといえる。工事の遂行に当って、調査、施工、管理が一体となって始めて可能となったものである。複雑な開先や、新しい溶材を使用するに先立ち種々の調査、試験を重ね実施工を行なったが、良好な結果が得られないこともあった。すなわち、試験では良い結果が得られたが、実施工では失敗したという場合も生じてくる。このようなとき、種々の試行錯誤を重ねて改善しなければならず、実施工と試験の間に密接なフィードバック体系が必要となってくる。本工事においても、試行錯誤を繰り返しながら施工試験と実施工との間の差を埋めて行きよい結果を得た。しかし、今後の課題として、施工試験と実施工との差を小さくし、試験の信頼度を高める努力が必要である。

更に施工時に生じる種々の問題を迅速に改善、解決するため、社内における調査、研究を組織的に行い、密度の高い良質なデータを蓄積して行かなければならない。たとえば、溶接歪量測定を考えると、歪量は、入熱、試

験片の大きさ、開先形状、積層法等により相違するし、測定方法を誤れば、信頼のおけるデータの蓄積は、期待できないことになる。したがって、調査研究に当っては、試験方法、測定方法、データの処理に当り充分注意を払い、再現性があり、信頼できるデータを蓄積して行かねばならない。

実施工に当っても同様であるが、基本動作に忠実で、その上に創意を凝らして行かねばならない。このような溶接体系全般に渡る技術の集積は、地道なものであり、日々の生活の中ではややもすると疎かにされがちであるが、能率化、技術の向上、省力化の根本となるものである。

今回のミズリー鉄道橋で特に感じた事は、溶接工程全体を結びつけるシステムの重要性、同時に各部門（実施工・調査・管理）の充実であった。

謝 辞

本報告書をまとめるに当り始終適切なる御指導下さった森清敏氏（元川田工業社員）他製造課の方々に深く感謝いたします。また、AWS規格に適合した新しい溶材の開発に際し、神戸製鋼㈱、日鉄溶接工業㈱の全面的な援助に心より御礼申し上げます。