

I-11

現場溶接で発生する応力度に関する報告

開発土木研究所 正 員 山内 敏夫

〃 〃 城ヶ端政次

〃 〃 城野 忠幸

〃 〃 中野 修

1. はじめに

現場における溶接施工は、工場におけるそれと比べ環境条件が非常に厳しいものとなるが、特に供用中の橋梁で行う溶接であればなおさらである。

この環境条件の悪化による溶接性の低下は、アンダーカットやブローホール等の溶接欠陥や残留応力の発生を招くことになるが、それら溶接性を低下させる原因としては、静的応力作用と動的応力作用が考えられ、それぞれ以下のものが挙げられる。

静的応力作用としては、死荷重応力が負荷されていること、外気温に影響されやすく温度の不均一分布によって応力変化があること等があり、動的応力作用としては、風や車両通行による橋体の振動、溶接技術士の姿勢や足場の振動による溶接性の悪化等である。

近年、既設橋の交通量の増大や老朽化等による補強・補修および拡幅工事が増えてきており、当然、このような状況では供用させながら施工する場面も多々ある。そのような場合に、現場溶接が用いられることが今後、多くなってくると思われる。この場合に、問題視されるのが、前述した現場における施工条件・溶接性の低下である。

これらの問題に対する研究が、近年活発になってきており、その中の静的応力作用の研究としては、徳澤・堀川らの平板及び梁へ応力を載荷した状態の溶接残留応力の報告<sup>1)2)</sup>、プレートガーダーへ溶接の報告<sup>3)</sup>、柴崎らの熱弾塑性解析を行った報告<sup>4)</sup>等がある。このような静的応力作用下の問題に対しては日本鋼構造協会・阪神道路公団からそれぞれ指針案<sup>5)</sup>及び現場施工マニュアル<sup>6)</sup>が作成されている。

また、動的応力作用の研究としては、振幅・振動数が割れに対してどのような影響を与えるかを明らかにした研究<sup>7)</sup>、変動応力下において発生する割れは高温割れによるものであることを明らかにした研究<sup>8)</sup>等いくつか報告されている。

構造研究室でも施工現場の要請に応えるべく、これに関連する研究を実施しており、一般国道274号の赤岩大橋において現場溶接の実験を行い、特に今回は溶接残留応力度について検討した。

2. 計測概要

今回の計測の対象となった赤岩大橋は、昭和45年に架設された3径間+2径間連続箱桁+単純ホーローラブリッジで、橋長157.379m、車道幅員9.00mの曲線橋となっている(図-1)。今回の工事は、将来の交通量の増大をみこんで車道幅員を12.25mに拡幅し、登坂車線(3.25m)を設けようとするものである。この既設橋と新橋との接合部に、1000×400×9の板(以下横桁端部と呼ぶ)を溶接し、完成後には横桁となる。

計測する箇所の鋼材質は、既設桁がSM41、新設の横桁部はSM50Yであった。測定箇所は、A橋(連続鋼箱桁、RC床版)のA、B断面の2箇所とした。その計測システムを図-2に示す。

REPORT ON STRESS IN A FIELD WELD

By Toshio YAMAUCHI, Masatugu JOEGAHATA, Tadayuki SIRONO and Osamu NAKANO

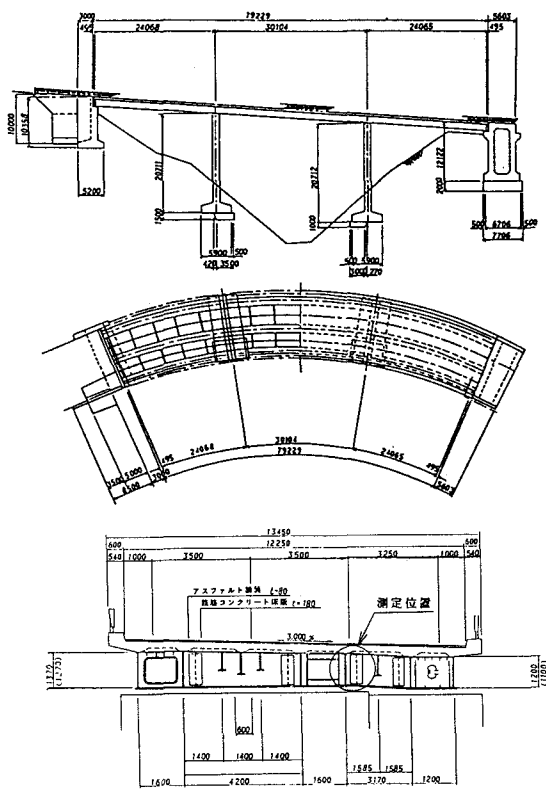


图-1 赤岩大橋一般図

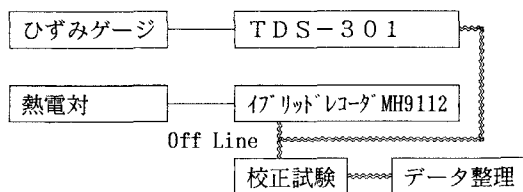


図-2 システム図

表-1 溶接開始前の外気温および鋼材温度

| 日 程     | 断<br>面      | 天 候<br>気 温 (℃) | 鋼材温度<br>(℃) |      | 平均<br>(℃) |
|---------|-------------|----------------|-------------|------|-----------|
| H2.7.31 | A<br>断<br>面 | 晴れ 21.5        | u. f        | 24.7 | 24.2      |
|         |             |                | web         | 23.7 |           |
|         |             |                | l. f        | 24.3 |           |
| H2.8.1  | B<br>断<br>面 | 曇り 21.0        | u. f        | 21.5 | 21.9      |
|         |             |                | web         | 21.2 |           |
|         |             |                | l. f        | 23.0 |           |

溶接は被覆アーク溶接法で、立ち向き下進2層盛りで行った。本溶接にあたり、作業した者はJIS Z 3801及びJIS Z 3841の溶接資格を有したものであり、溶接施工機械はダイヘン交流アーク溶接機RK500、溶接棒は低水素系のS16-D4316φ4mmを使用して行った。

各測定位置でのひずみゲージの取付け位置は、溶接線に向かって左側に5cm、10cm、20cmの距離の点で測定した(図-3)。したがって、既設橋と横桁をT継手に溶接する場合、左側と右側とは、横桁の板厚( $t=9\text{mm}$ )程度、ひずみゲージからの距離の違いができる。

また、ひずみゲージの測定方向は、5cm位置に水平・垂直方向、10cm位置に垂直方向とした。熱電対は、上記のひずみゲージ位置に付け加え、20cm位置にも取り付けた。また、横桁端部の温度を調べるため、そこにも熱電対を取り付けた。

測定は、A断面は平成2年7月31日、B断面は8月1日の2日間に行った。天候・気温及び橋体温度はそれぞれ、晴れ・21.5℃・24.2℃、曇り・21.0℃・21.9℃であった(表-1)。

使用したひずみゲージと接着剤は、その適用温度範囲が $-196\sim+170^{\circ}\text{C}$ のものを用了。この現場

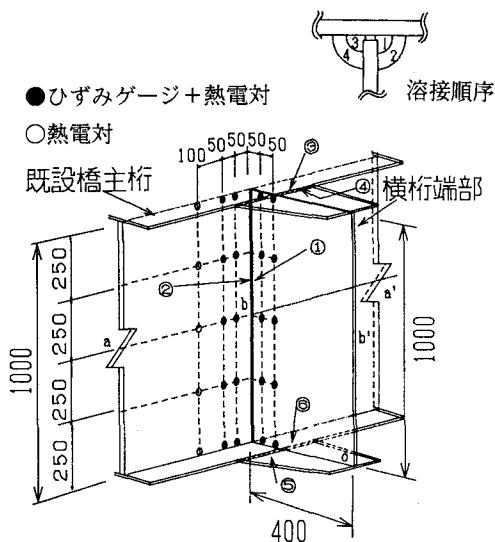


図-3 ひずみゲージ・熱電対取付け位置  
及び溶接順序

試験の後、校正試験を行って誤差補正を行った。また、本来であるならば溶接時の収縮たわみを計測すべきであるが、現場の状況から不可能であった。

### 3. 計測した温度について

図-4～5に、ウェブ中央部の温度経時変化を示す（凡例の中の数字は溶接線からの距離）。ピークが4つあるが、これらはそれぞれ右側の1・2層目、左側の1・2層目の溶接のグラフである。

このグラフより、溶接線から5cmの距離で最大130～100℃の温度上昇が見られた。その他の部分でも、溶接線から10cmの部分で最大60℃程度、20cmの部分で最大40℃程度の温度上昇が見られた。また、横桁端部では最大31.9℃であった。

図-7に代表的なグラフとしてA・B断面2層目の溶接時の経時温度変化を示す。この図中に示されている実・破線は、溶接による温度変化の解析値である。

通常、鋼材に与えられた溶接入熱 $Q$ は、次式で求まる。

$$Q = 0.239 \cdot \eta \cdot V \cdot I / v \quad (\text{cal/cm})$$

ただし、 $\eta$ ：熱効率、 $V$ ：アーク電圧（V）、 $I$ ：溶接電流（A）、 $v$ ：熱源の移動速度（cm/s）。

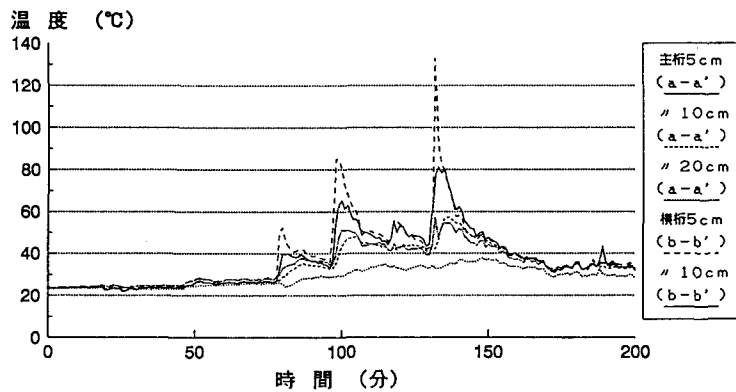


図-4 A断面桁中央部の温度変化

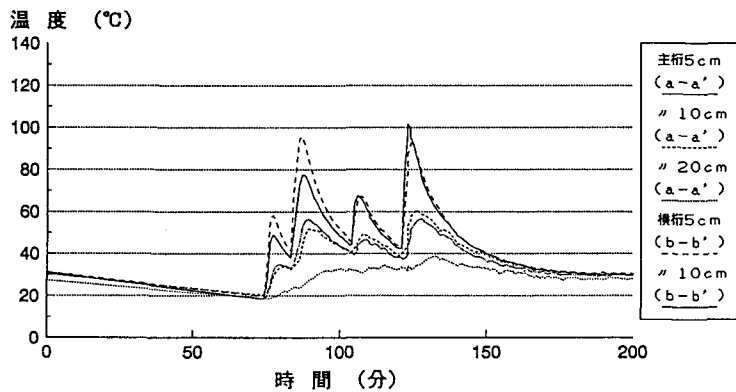


図-5 B断面桁中央部の温度変化

表 - 2 各溶接時における溶接速度

|      | 測 定 位 置    | 溶 接 速 度 (cm/min) |
|------|------------|------------------|
| A 断面 | ウェブ右側 1 層目 | 32.7             |
|      | " 2 層目     | 26.6             |
|      | ウェブ左側 1 層目 | 46.4             |
|      | " 2 層目     | 34.5             |
| B 断面 | ウェブ右側 1 層目 | 34.2             |
|      | " 2 層目     | 25.1             |
|      | ウェブ左側 1 層目 | 33.8             |
|      | " 2 層目     | 26.7             |

平均 1 層目 36.8 cm/min  
2 層目 28.2 cm/min

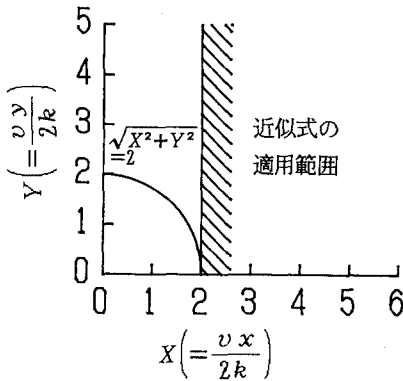


図-6

無限固体中の  $x$  軸上を  $x$  の負の方向に移動する熱源による  
準定常状態の温度上昇の近似式の適用範囲(移動熱源の場合)

ここで  $\eta$  は熱効率と呼ばれ、その値はアーク溶接法の種類、及びアーク長(アーク電圧)に依存するが、溶接電流にはあまり影響されない。

そこで、熱効率  $\eta=0.8$ 、電流  $I=150$  (A)、電圧  $V=30$  (V)、溶接速度  $v$  を実測値(表-2 参照)として計算したところ、A 断面で  $Q=1496$  (cal/cm)、B 断面  $Q=1933$  (cal/cm) となった。

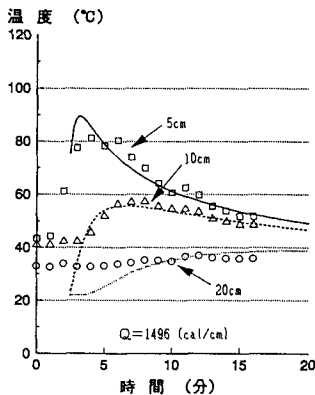
佐藤ら<sup>9)</sup>によると、移動する線熱源の薄板における準定常状態の温度変化の近似式は、図-6の適用範囲内であれば、次のようになる。

$$\theta - \theta_0 = \frac{Q}{c \rho h} \cdot \frac{e^{-\frac{Y^2}{4kt}}}{2\sqrt{\pi k t}}$$

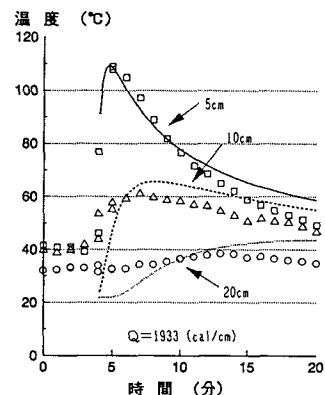
ただし、 $h$  : 板厚 (cm),  $Q$  : 入熱 (cal/cm),  
 $\theta$  : 鋼材の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\theta_0$  : 外気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $t = \left(\frac{x}{v}\right)$  : 熱源が  $x$  点を通過後の時間 (s)

ただし、この計算では、計算の簡素化のために、熱伝導率  $k$  :  $0.162$  (cal/cm $\cdot$ s $\cdot^{\circ}\text{C}$ ), 比熱  $c$  :  $0.114$  (cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$ ), 密度  $\rho$  :  $0.182$  (g/cm $^3$ ) として温度変化によるこれらへの影響を考えていない。

この図では温度曲線の立ち上がりが合致していないが、これは1層目の溶接温度の影響である。また、温度が低下するにつれて、実測値が早く冷却しているが、これは現場計測では鋼材表面から熱の発散が行われているからである。一般的に、



(a) A断面



(b) B断面

図-7 温度変化と理論近似式の比較

冷却速度が速ければ強度は増すが延性が劣化するため、溶接割れを誘起しやすいことが言われている。したがって、溶接した部分においても冷却速度が速まっていると思われるが、本試験ではそこまで確認していない。

以上のことを併せ考えると温度変化の理論式は実測値をよく再現しており、溶接線から約5cm離れた位置で110℃、約10cm離れた位置で60℃、約20cm離れた位置で約40℃程度となった。したがって、溶接熱によって125℃以上になるのは溶接線から5.0cm以内の部分であり、溶接によって熱せられるのはほとんど溶接線近傍のみであることがわかった。

#### 4. 残留応力度について

溶接線近傍では、温度冷却後、残留応力度が生じる。この分布形状は、一般的に、溶接線近傍で降伏点に近い引張り応力が生じ、その周りではそれを打ち消すような圧縮応力が生じることになる。

その溶接線周りの垂直方向（溶接方向）の圧縮応力度は、小松ら<sup>10)</sup>の残留応力度の提案値によると、S M 5 0 Y・S M 4 1 各々の降伏応力度 $3600 \cdot 2400 \text{ kgf/cm}^2$ に対して $-612 \text{ kgf/cm}^2$ ・ $-720 \text{ kgf/cm}^2$ 程度とされている。ただし、これらの値は若干の安全側であると記している。

図-8に計測した橋軸鉛直方向の残留応力度を示す。

この計測での桁上下端部では、 $500 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の引張り応力が計測されているが、この原因は、この部分にフランジ溶接を行ったことによる影響である。それ以外の部分では概ね提案値以下であった。

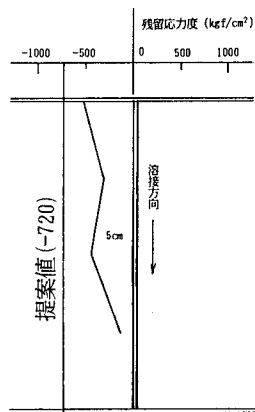
したがって、この程度の残留応力度が発生するのは予想されることであり、過去の報告等の実験結果から危険というほど大きな応力でないことがわかった。

次に水平方向の応力を検討する。

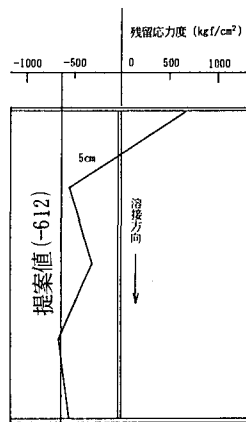
通常、供用中の橋梁には、常に死荷重や車両荷重が負荷されている。古閑ら<sup>11)</sup>は、圧縮応力が負荷されているところでは、溶接の高温状態及び冷却過程で降伏域が広がり、収縮変形が大きくなることに留意すべきであることを指摘し、特に、橋梁のセンター部での上フランジや支点部の下フランジなどの圧縮応力の大きな部分では最も注意すべきであると報告している。

今回、計測された主桁部の水平方向の最大圧縮応力は、 $-519 \text{ kgf/cm}^2$ であった。また、本橋の死荷重応力は、計算した結果、 $-106 \text{ kgf/cm}^2$ 程度となった。したがってこの部分（溶接線から5cmで負荷圧縮領域）での合計圧縮応力は、 $-625 \text{ kgf/cm}^2$ ほどとなり、降伏応力度以下であることがわかった。

以上のことから、降伏域は溶接線から少なくとも5cm以内であり、これは橋梁全体としてわずかな部分であるので、残留応力度により大きなキャンパー低下等の悪影響を及ぼすものではないことがわかった。



(a) 主桁ウェブひずみ分布



(b) 横桁ひずみ分布

図-8 計測されたひずみ分布と提案値

## 5. まとめ

- (1) 計測では、理論近似式と比べ温度の低下が速かった。これは、板表面からの熱放散によるものである。
- (2) 溶接時の鋼材の温度は、溶接線から5cmの位置で最大110℃、10cmで最大60℃、20cmで最大40℃程度であった。これは、佐藤らの理論近似式によく一致しており、今回の計測結果は妥当なものであった。すなわち、この理論近似式は現場溶接でも有用であることがわかった。
- (3) 残留応力度は、室内実験と同じく溶接線の近傍のみに発生した。このことにより溶接による影響は、熱源までの距離が支配的であり、かつその範囲は限定的であることがわかった。
- (4) 以上のことから、溶接によって生じる残留応力度が、橋梁の耐力に大きく影響するとは考えられない。

## 6. おわりに

現在まで室内試験での溶接の研究は非常に多く行われているが、現場施工中での試験はここ数年活発になってきたのみである。今後は社会経済活動に影響を与えることなく、土木構造物の迅速な施工及び維持・補修ができるような方法が必要とされると思われる。このようなことから、溶接の現場試験が、活発になることを切に願うものである。

最後に、本実験を行うにあたってご協力をいただいた日高道路事務所に対し、甚大なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 徳澤直紀, 堀川浩甫: 応力作用下にある平板への溶接, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集 I-146
- 2) 徳澤直紀, 堀川浩甫: 応力作用下にある梁への溶接, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集 I-115
- 3) 堀川浩甫, 鈴木博之 他: 荷重作用下にあるプレートガーダーの改造に関する実験, 橋梁と基礎 86-4
- 4) 柴崎啓二, 堀川浩甫, 前田幸雄: 応力を付加された板へ溶接を施したモデルの熱弾塑性解析, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要 I-114
- 5) 供用下にある鋼構造物の溶接による補強・補修指針(案): 日本鋼構造協会, JSSCレポート, No. 8, 1988
- 6) 現場溶接施工マニュアル: 阪神高速道路公団, 平成3年5月
- 7) 鈴木巖, 山崎鷹生, 大澤守彦: 既設橋梁の振動下における現場溶接実験, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集 I-96
- 8) 中西保正, 中村義隆 他: 変動応力载荷中の溶接施工に関する研究(第1報), 溶接学会論文集 第3巻(1985)第1号
- 9) 佐藤邦彦: 移動熱源による熱伝導の特性に関する覚え書, 溶接学会誌 第36巻(1967)第2号
- 10) 小松定夫, 牛尾正之 他: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文報告集第265号・1977年9月
- 11) 古閑俊之, 岩崎雅紀 他: 供用下における鋼橋の溶接補修に関する実験, 横河橋梁技報 No. 20 1991年1月