実 用 講 座

補修溶接の採否の決定と施工上のポイント(1)
…供用下の橋梁*…A Judging Method of Advisability of Repair Welding
on Bridges in Service*

井 元 泉**

by Izumi Imoto**

キーワード：溶接施工，振動，変動荷重，高温割れ，供用，橋梁

1. は じ め に

既設橋梁に対して，補修，補強，改造を行う場合，一般には工場へ持ち帰ることは不可能であるため，設置場所で施工せざるを得ない。この場合，地域社会・経済に及ぼす影響が大きいため，交通止めを実施するとしても比較的交通量の少ない夜間のみか，少なくとも一車線の通行を確保して施工する必要がある。このような場合，施工作業の時間的制約，作業者，走行車両，通行者等の安全および騒音等の周辺住民への影響も顕著となってくる。このため可能であるならば交通を止めない施工が望まれている。

本講座では，このように交通を止めない状態での溶接，すなわち，供用下にある橋梁に対する溶接の採否の決定方法と施工上のポイントについて簡単にのべる。

2. 供用下にある溶接継手の特徴と留意点

2.1 供用下にある溶接継手の特徴

供用下にある橋梁に対する溶接と，主に工場で行われる溶接および交通止めた橋梁に対する溶接との本質的な相違は，溶接継手に走行車両等により誘起される変動荷重が作用していることにある。溶接継手に作用する荷重を基本として分類すると次のようになる。

第一段階は，荷重無負荷の状態であり，主に工場

での溶接がこれにあたる。この場合，溶接継手の健全性からは，拘束による低温割れ防止が最も大きな課題となる。これに対しては，低温割れと予熱との関連等からの溶接割れ感受性指数に関する研究，溶接継手の力学的拘束を指標として割れ発生の有無を評価した研究等から，低温割れの生じない適正な溶接条件を選定することが可能となっている¹⁾。これらの成果は，各種基準に取り入れられ実用に供されている。

第二段階は，静的荷重載荷状態であり，交通止めた橋梁のように自重による静的荷重が作用しているような場合である。この場合，当然のことながら，荷重無負荷の溶接における低温割れの問題は存在するが，それ意外に次の問題が加わる。すなわち，引張静荷重による部材の過大な変形，圧縮静荷重による座屈崩壊等の問題である。種々の研究²⁻⁵⁾によれば，一般には，溶接条件，溶接順序等に注意を払えば施工は可能であり，実工事も行われている⁶⁾。この段階の溶接については本誌にも技術資料がある⁷⁾。

第三段階は，本講座が対象とする供用下における溶接状態であり，最も厳しい溶接条件にある。この状態での溶接継手には，変動荷重による溶接部の振動と溶接継手の開発におけるルートギャップ開口変位変動が追加される。これが，前2段階と大きく異なるところである。参考に，都市高速道路の主桁におけるスティフナとフランジ間に生じた疲労クラックにおいて計測した振動計測例を図1に示す。

図1に示すように車両の走行に依存して作業足場および溶接部は変動する。このため，運棒が乱れアークが不安定となり，アンダーカット，ブローホール，

*原稿受付 平成3年1月14日

**正 員 石川島播磨重工業㈱ Member Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd

図1 供用下にある溶接継手の振動状況

図2 溶接部の振動に対する管理限界値例

ルート部の溶け込み不足、融合不良等の溶接欠陥の可能性は増す。しかし、実橋において生じる振動程度では溶接割れは生じないこと、また、ある一定の振動以内であれば、溶接継手の品質を損なうほどの欠陥は生じないことが、阪神高速道路公団らにより明らかにされている^{8,9)}。それらの結果から溶接欠陥が生じない溶接部の限界振動（管理限界）を加速度で評価した例を図2に示す。

これに対して、ルートギャップの開口変位変動により、溶接継手の健全性にとって致命的となる溶接割れが生じることがある。この割れは、橋梁に使用される鋼材では、通常考慮する必要のない高温割れであり、溶接金属が固相－液相混在状態で生じる割れ（凝固割れ）と比較的高温ではあるが固相状態で生じる割れに分類される^{10,11)}。鋼橋関係者が一般に対象とする溶接割れ、すなわち、荷重無負荷（工場）、変動荷重下（供用下）を問わず、拘束の厳しい溶接継手や溶接性の悪い材料を不注意に選定したために生じる低温割れとは、本質的に異なるものであることに注意を要する。供用下における溶接にとっては、この高温割れをいかに防止するかが最大の課題となる。

2.2 供用下（変動荷重下）の溶接における高温割れ評価法^{12)~14)}

変動荷重下での高温割れが生じるか否かに対しては、力学的観点から実用的な力学指標である溶接前ルートギャップ開口変位 $\Delta\delta$ を指標とした割れ評価法が提案されている。これによれば、溶接金属に高温割れが生じない条件は次式で表される。

$$\Delta\delta < \Delta\delta_{cr} \text{ (溶接棒, 継手剛性, 周波数等)} \quad \cdots(1)$$

ここに、 $\Delta\delta_{cr}$ ：割れ発生限界ルートギャップ開口変位

供用中の橋梁において種々の $\Delta\delta$ を実測した結果を図3に示す。詳細な検討によれば、図3に示されるように、 $\Delta\delta$ は車両走行速度、橋梁を構成する部材の大きさから特性値を持ち、振幅は1mm程度以下、その周波数 f は高々10数Hz以下であり、0.2～0.3Hzおよび4～7Hzが大きくなる。この $\Delta\delta$ は拘束板などを取付け力学的拘束を厳しくすると低減し、有効な割れ防止方法となる。

次に、 $\Delta\delta_{cr}$ であるが、上述のように溶接棒の化学組成、継手剛性、 $\Delta\delta$ の周波数 f 等に依存する材料特性値である。3種の溶接棒（表1）の $\Delta\delta_{cr}$ を、橋梁における代表的な $\Delta\delta$ の f について図4（実線： $f=0.33\text{Hz}$ 、点線： $f=5.5\text{Hz}$ ）に示す。この内、D5016-MODは新たに開発された耐高温割れ溶接棒である¹⁵⁾。図に示されるように、 $\Delta\delta_{cr}$ は継手剛性が厳しくなると小さくなる。また、 f が小さくなると $\Delta\delta_{cr}$ は大きくなり、割れの形態も異なってくる。(1)式を具体的な形で示すと理論的には(2)、(3)式となる。また、式からも容易に理解されるように、割れ限界ひずみをもとめることなく、2種の周波数に対して割れ試験を行えば、割れ限界 $\Delta\delta_{cr}$ 曲線が求められる。

固相－液相混在状態で生じる割れ

$$(A_s + B_s \cdot f) \Delta\delta < 1 \quad \cdots(2)$$

固相状態で生じる割れ

図3 供用下の鋼橋溶接継手のルートギャップ開口変位 $\Delta\delta$

表1 溶接棒の化学組成

Grade	Size mm	Chemical compositions (%)							Mn/S	Mn/Si
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo		
D5016-MOD	φ4	.03	.22	1.44	.008	.001	~	~	1440	6.5
D5816		.06	.52	1.10	.014	.007	.62	.23	157	2.1
D4316		.04	.42	0.03	.002	.004	~	~	12	0.1

D5016-MOD : Newly developed welding electrode

図 4 高温割れ発生限界ルートギャップ開口変位

$$(A_Q + B_Q \cdot \Delta\delta)f < 1 \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、A, B は溶接棒の化学組成、継手剛性、溶接条件等に依存する材料特性値

なお、せん断方向に変位($\Delta\delta_H$)する隅肉溶接では、 $\Delta\delta = 0.67 \times \Delta\delta_H$ として評価すればよい。

2.3 施工上のポイント¹⁶⁾

供用(変動荷重下)の溶接施工特有のポイントを表 2 に示すが、溶接施工が可能か否かを考える場合には、表 2 以外に注意すべきことが種々ある。基本的には、荷重無負荷、静的荷重負荷の条件で溶接施工する際に注意すべき問題点に留意すればよい。

主なものを挙げると、次のようになる。

- ① 橋梁の製作年が古い場合、使用されている材料自身が溶接に適していないことがある。このため、材料の溶接性を必ず確認する必要がある。
- ② 溶接施工が環境の整った工場以外で行われるため、作業環境が悪いことが多く、無理な溶接姿勢を取らざるを得ないことがある。基本的には、現場溶接の留意点であるが、特に、溶接作業性の低下(足場の振動、溶接継手の振動等)からのブローホール、融合不良等に留意した施工、仮設備が必要である。
- ③ 溶接施工中、施工後の構造物としての安全性確保(特に、静荷重作用下)および低温割れが生じない条件等が確保されていること。

表 2 供用下の溶接に於けるポイント

溶接棒の $\Delta\delta_{cr}$	化学組成、入熱、継手剛性、周波数等に依存
化学組成	低C、Si、P、Sおよび高Mn系の溶接棒： $\Delta\delta_{cr}$ 大
入熱	過度なウィーピング(入熱大)： $\Delta\delta_{cr}$ 低下
継手剛性	剛性大： $\Delta\delta_{cr}$ 低下
周波数	周波数大： $\Delta\delta_{cr}$ 低下
継手の $\Delta\delta$	$\Delta\delta > \Delta\delta_{cr} \rightarrow$ 拘束治具等による低減

3. 溶接施工可否判定手順

ここでは、供用下の溶接施工可否を判定する手順を示すとともに、実工事への適用例を示す^{14,16)}。

3.1 溶接施工可否判定手順

供用下において溶接を行う場合の採否の決定を行う手順を図 5 に示す。

補修計画により溶接継手が決定されると、まず、溶接欠陥の可能性判定がなされる。このためには、加速度計等により、溶接継手部の全体振動変位(加速度)を計測し、溶接施工可能かつ溶接欠陥の生じない範囲にあることを確認する。

次に、溶接金属に高温割れが生じるか否かを判定する。このために、溶接前ルートギャップ開口変位 $\Delta\delta$ を計測または推定する。計測または推定した $\Delta\delta$ の周波数と振幅より、高温割れ発生判定式を用いて、割れが生じるか否かを判定する。割れが生じると判定された場合には、高温割れ防止方法を適用する。すなわち、拘束板を取り付ける等して、 $\Delta\delta$ の低減を行うか、 $\Delta\delta_{cr}$ のより大きな溶接棒を使用する。あるいは、両方法を併用して用いる。また、当然のことながら溶接棒は母材と同一強度以上のものを選定する

図 5 供用下の溶接施工可否判定手順

必要があるが、多層溶接を行う場合には、2層目以降は変動荷重下から静荷重下の溶接となるため、初層のみ $\Delta\delta_{cr}$ の大きな溶接棒を使用する方法もある。

このような手順により、供用下で補修溶接が可能か否かが判定される。なお、いかなる方法を講じて、高温割れが発生すると判定された場合には、荷重の低減、すなわち、部分的あるいは全面的に交通規制(大型車でよい)を行い、 $\Delta\delta$ および溶接継手部の振動を低減せざるを得ない。この場合には静荷重下での溶接となる。

3.2 実工事への適用例

溶接施工可否判定手順を三つの実工事に適用した例を示す。工事例 A は、鋼床版間(SS41 材)の溶接の場合であり、溶接長が長く、拘束の弱い場合である。工事例 B は、主桁ウェーブに生じた疲労クラック(クラック長：200~400mm、板厚：16mm、SM58 材)の補修を対象としたものである。工事例 C も疲労クラック(クラック長：150mm、板厚：9mm、SS41 材)の補修工事である。

まず、溶接継手の振動による溶接欠陥の可能性は、計測した溶接部の全体振動を振動加速度(図2のシンボル)で評価すると、3 ケースとも溶接欠陥を生じさせない範囲である。このため、高温割れが生じるか否かを判定するルートギャップ開口変位 $\Delta\delta$ に注目する。

各ケースにおいて計測した $\Delta\delta$ の最大値 $\Delta\delta_{MAX}$ をシンボルで図4に示す。また、いずれの場合も $\Delta\delta$ の周波数が 0.1~0.3Hz の間にあったため、 $f=0.33\text{Hz}$ の場合に対する $\Delta\delta_{cr}$ 曲線で評価した。

工事例 A の場合、 $\Delta\delta_{MAX}$ (◇印) は D4316 および D5816 の $\Delta\delta_{cr}$ よりも大きくなっている。このため、 $\Delta\delta_{MAX}$ を拘束治具等を利用して低減させるか、 $\Delta\delta_{cr}$ が $\Delta\delta_{MAX}$ より大きな溶接棒を使用する必要がある。ここでは、拘束治具の使用により、 $\Delta\delta_{MAX}$ を 0.24mm (◆印) まで低減し、D5816 溶接棒を使用した。

工事例 B では、 $\Delta\delta_{MAX}$ (▽印) は、D4316 の $\Delta\delta_{cr}$ よりわずかに大きく D5816 の $\Delta\delta_{cr}$ よりも小さかった。このため、D5816 を使用し施工した。確認のため D4316 を一部使用したところ、しばしば割れが生じた。

工事例 C の場合、 $\Delta\delta_{MAX}$ (▼印) は D4316 および D5816 の $\Delta\delta_{cr}$ より大きくなっていたため、工事例 A のような策を施す必要がある。ここでは、 $\Delta\delta_{cr}$ の大なる溶接棒 D5016-MOD を使用した。

以上のように確実な管理を行えば、供用下において溶接を行っても健全な溶接継手を得ることができ。なお、著者は計測から溶接条件決定までの、供

用下(変動荷重下)の溶接条件決定支援システムを作成し実工事に使用している。

4. おわりに

溶接は、コンクリート工事と同じで、作業員、施工管理者に最終的に依存する。さらに、供用下における溶接は、通常の現場溶接に加えて、管理者および溶接作業員の高い技術、技能レベルおよび仮設備を必要とする。したがって、健全な溶接継手を施工するためには、実務監督者、溶接士の育成を計る必要がある。それらの裏づけとなる供用下の溶接施工を対象とした施工法の指針化、基準化、さらには技術者、溶接作業員の資格認定を公的機関により行い、一般技術者が安心して計画・施工ができるようにする必要がある。

参 考 文 献

- 1) 例えば、佐藤邦彦編：溶接強度ハンドブック、理工学社、1988
- 2) 鈴木ら：応力作用下で溶接された平板の変形挙動、土木学会論文集、NO.350/I-2 (1984)
- 3) 鈴木ら：応力作用下で溶接された継手の機械的性質および残留応力、土木学会論文集 NO.362/I-4 (1985)
- 4) 鈴木ら：圧縮応力作用下にあるパイプ柱への溶接、土木学会論文集、NO.356/I-3 (1985)
- 5) 堀川ら：荷重作用下にあるプレートガーダーへの溶接、土木学会論文集、NO.368/I-5 (1986)
- 6) 池田ら：供用下における鋼桁腐食部の溶接による補修、土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集、I-288 (1987)
- 7) 堀川ら：供用下における鋼橋の補修・補強溶接、本誌、59-7 (1990)
- 8) 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領第 1 部 鋼構造物、1990、6
- 9) 鈴木ら：既設橋梁の現場溶接施工実験、土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集、I-96 (1982)
- 10) 中西ら：変動応力下の溶接割れ試験、本会論文集、3-1 (1985)
- 11) 井元ら：変動荷重下の溶接割れに対する実験的考察、本会論文集、7-3 (1989)
- 12) 井元ら：変動荷重下の凝固割れに対する力学的指標と割れ発生評価式の提案、本会論文集、8-1 (1990)
- 13) 井元ら：変動荷重下の凝固割れに対する力学的検討、本会論文集、9-1 (1991)
- 14) 井元ら：変動荷重下における溶接可否判定法、本会議論文集、9-2 (1991)
- 15) 中西ら：変動応力下の補修溶接棒の開発、石川島播磨技報、27-4 (1987)
- 16) 井元ら：変動荷重下にある鋼橋への溶接における高温割れ評価法の適用、土木学会論文集、投稿中
- 17) 上田ら：スリット溶接継手の拘束度、本誌、48-10 (1979)