

溶融亜鉛めっき箱桁橋梁のめっき割れ防止に関する検討とその成果

Discussion on Crack Prevention in Hot-Dip Galvanized Box Girder Bridge

成 宮 隆 雄* 森 下 統 一** 林 文 男***
Takao NARUMIYA Touichi MORISHITA Fumio HAYASHI

Summary

It is known that hot-dip galvanizing of steel girders involves the phenomenon of liquid metal embrittlement and that this embrittlement causes galvanization cracks on the girders. To prevent hot-dip galvanization cracks from occurring, it is essential not only to use steel which has a low susceptibility to embrittlement, but also to reduce thermal stress and stress concentration.

This paper presents concrete measures for the prevention of hot-dip galvanization cracks and describes the actual state of the cracks on the box girder members based on the results of real sectional specimens and an investigation of an actual bridge.

1. はじめに

溶融亜鉛めっきを施した箱桁橋梁において、水平ステッファナーの廻し溶接止端部等にめっき割れが発生することが知られているが、具体的な報告例は比較的少ない。また、橋建協塗装部会めっき橋ワーキンググループの実施した「溶融亜鉛めっき橋に関するアンケート調査」結果によると、溶融亜鉛めっき橋施工における技術的問題点として「めっき施工時の割れ」を挙げたのは、66社中5社であった¹⁾。

一方、送電鉄塔においてはその大型化に伴い、60キロ級以上の高張力鋼の使用が要請され、溶融亜鉛めっき時の脆化（液体金属脆化）とそれに伴うめっき割れ防止の研究が行われ、溶融亜鉛脆化特性値（ S_{LM} ）および溶融亜鉛割れ感受性当量（ $LMEC_{eq}$ ）が提唱され溶融亜鉛脆化対策鋼が開発された²⁾。その後、上記送電鉄塔溶融亜鉛対策鋼の技術を引き継ぎながら、ZE研究会において、主として箱桁橋梁における溶融亜鉛脆化の防止の立場から、「溶融亜鉛めっき橋梁の研究」がなされた³⁾。

弊社は平成元年度に、日本道路公団 高松建設局殿より、柴生第2高架橋他1橋（鋼上部工）工事を受注し、その内1橋が溶融亜鉛めっきを施した曲線箱桁橋梁であった。本橋は主桁断面が（2490H×2400W）であり、めっき槽の寸法的制約により種々検討の結果縦2分割とした。従ってめっき施工時の部材は、]型断面の非対称部材で

あり、かつキャンバーと曲線ライズが付いた複雑な構造となった。

これらの製作施工に当たり、大きな検討課題は①めっき時の熱応力による]型断面部材の縦反り、横反り、捩じれ等の変形防止、②めっきによるウエブ等の面外変形防止および熱収縮による部材寸法精度の確保、③良好なめっき外観の確保、④溶融亜鉛脆化とめっき割れの防止、等であった。

これらの内、①-③までの検討結果と製作施工結果については、別報にて報告した⁴⁾⁵⁾。

本報では主として④の溶融亜鉛めっき割れの防止の検討結果と製作施工結果を報告する。

2. 溶融亜鉛めっき脆化とめっき割れの防止対策について

ある固体金属が別の液体金属環境下において引張応力が作用すると脆化する現象は「液体金属脆化」(LME:Liquid Metal Embrittlement)と呼ばれている。鋼と溶融亜鉛との脆化に関して詳細な研究結果が報告されており、その特徴を要約すると下記の通りである^{3),6)-11)}。

- ① 溶融亜鉛脆化は主に溶接部止端で生じる。
- ② 割れの形態は鉄の結晶粒界に亜鉛が拡散することによる粒界破壊である。
- ③ 溶融亜鉛脆化は止端部での応力および鋼材の合金成分の組み合わせの中で生じる。
- ④ 溶融亜鉛脆化対策鋼の開発により、溶融亜鉛脆化

* 千葉工場製造部長

*** 千葉工場製造部生産技術課

** 千葉工場品質管理部付課長

を防止することが可能である。

これらの知見に基づき、下記のめっき割れ防止対策を行った。

- ① 使用鋼材として、溶融亜鉛脆化特性値 (S_{LM-400}) が42%以上のものを用いる。
(または溶融亜鉛めっき割れ感受性当量 $LME_{ceq} \leq 0.28\%$ の鋼材)

注)

$$S_{LM-400} = \frac{\text{溶融亜鉛中の切欠破断応力}}{\text{亜鉛のないときの切欠破断応力}}$$
$$= 226 - 667C - 25Si - 58Mn - 122Cr - 72Mo - 230V - 273Nb - 130Ti - 600B$$

$$LME_{ceq} = C + \frac{1}{27} \cdot Si + \frac{1}{12} \cdot Mn + \frac{1}{6} \cdot Cr + \frac{1}{4} \cdot Mo + \frac{1}{3} \cdot V + \frac{1}{2.5} \cdot Nb + \frac{1}{6} \cdot Ti + 9B$$

この条件を満足させるため、フランジ、ウェブともTMCP鋼を用いた。

- ② 溶接残留応力および初期変形の低減を計るため、フランジおよびウェブとも、リブやスティフナーを先溶接しローラーベンディングで機械矯正するパネル組立工法を採用した。
- ③ パネル製作時の溶接（フランジとリブ、ウェブとスティフナーのすみ肉溶接）は自動溶接による両側すみ肉同時溶接、廻し溶接も含めた連続溶接を行った。
- ④ 廻し溶接止端部の応力集中を低減するため、止端部は滑らかな形状になるよう留意した。特にウェブと水平スティフナーの廻し溶接止端部はグラインダー仕上げ等により、積極的に滑らかな形状とした。
- ⑤ 製作において、変形防止に十分留意し、できる限り加熱矯正を行わないようにした。

3. 亜鉛めっき割れ発生機構について

亜鉛めっき割れの発生機構に関しての定説は確立されていない。文献³⁾によると下記の3つの可能性が提言されている。

- ① 液体金属 (Zn) が割れに先行して粒界に拡散して粒界強度低下をもたらし、作用している応力のもとに割れに至る。従って、鋼材の亜鉛めっき割れ性は粒界への液体金属の拡散能に左右される。
- ② 液体金属 (Zn) の粒界への浸入速度と割れの進展速度が同じで常に割れの先端に亜鉛が存在している。従って亜鉛めっき割れ性の差は先端への亜鉛が供給

される難易度、あるいは亜鉛存在下での割れ先端部の結合力に左右される。

- ③ 溶融亜鉛めっき温度 (450-470℃) で鋼材そのものの粒界脆化が起こり亜鉛は単にこれを促進するだけである。従って鋼によって亜鉛めっき割れ性が異なるのは鋼材自体の高温における粒界脆化度が異なるためである。

これらの仮設について、種々実験的検証を行い①の割れ発生機構であると、結論している。

筆者らは、かつて溶融亜鉛めっき鋼桁橋梁のパイロットメンバー製作実験時に発見された、ウェブとガセットの廻し溶接止端部のめっき割れのマクロ写真および顕微鏡写真の観察結果から、①+②の割れ発生機構によるものと考えている。

写真-1 にウェブとガセットの廻し溶接部（レ型すみ肉溶接）断面マクロ写真を、写真-2 にめっき割れの拡大写真を、写真-3 に大きなめっき割れから枝分かれした微少割れ、写真-4 に同じ微少割れの顕微鏡写真を示した。

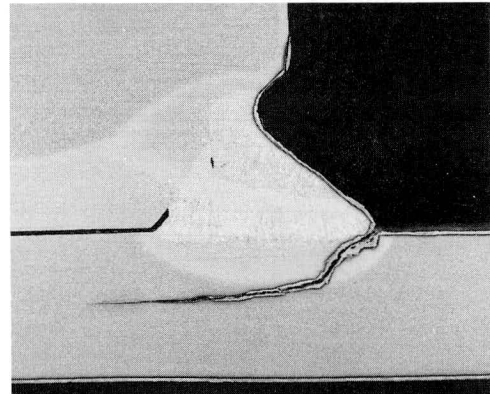


写真-1 めっき鋼桁ウェブとガセットの廻し溶接部の止端部に発生しためっき割れの代表例



写真-2 同様のめっき割れ発生部（溶接止端部）の拡大写真

これらの観察結果は以下の通りである。

イ) 写真-1 から分かるように、廻し溶接止端部より発生しためっき割れは亜鉛合金層、溶接熱影響部をとおって、母材に進展している。

ロ) 写真-3、4 で分かるように、亜鉛合金層、溶接熱影響部には止端部からの連続した割れ以外にも、近傍に独立した微細な粒界割れが数多く見られる。

従って、メインのめっき割れは、亜鉛の粒界への拡散が進行し応力の大きい廻し溶接止端部に割れが発生し、そこに亜鉛が浸入して更に亜鉛の粒界への拡散が進み割れ先端の応力集中と相俟って割れが進展していくものと思われる。この際、メインの割れ周辺にも亜鉛が拡散し組織、粒度、応力の状況に応じた微細な割れが発生するものと思われる。

これらの考察から、初期の亜鉛めっき割れを防止するため、溶接止端部の形状を滑らかにし、残留応力およびめっき時の熱応力の集中をできるだけ少なくすることが重要と考えた。

一方、鉸桁めっき時のウェブの面外変形によりウェブとスティフナーの溶接継手の廻し溶接止端部にめっき割れが多く発生することが知られている。これらのめっき割れの発生機構については、多くの研究報告がなされているが、金沢ら¹²⁾の垂直スティフナーを節としためっき前後のウェブ面外変形の反転（変形の飛び移りと称している）による2次応力の発生とめっき脆化説が妥当なようである。図-1 に2次応力発生機構の模式図を示した。これらの変形とめっき割れ発生の相関に関して図-2の報告がなされている¹²⁾。

橋梁部材のめっき割れに関して以上のような知見に基づき、2分割非対称箱桁部材のめっき割れ防止に関して、実験的研究を行い、実際の部材製作、めっき後の結果をまとめて報告する。

4. めっき割れの非破壊検査方法

実部材においてめっき割れ防止対策を施して万全を期したとしても、割れの検査方法を確立しておかないと、結果を把握できない。

めっき割れの非破壊検査方法として最も簡便な方法は目視検査と浸透探傷（以下PTと称す）である。目視検査は余程大きな割れでないと検出しにくい。まためっき被膜はマクロ外観上滑らかで、かつ均一の被膜を形成しているように見えるがミクロ的に見ると多くの欠陥を有し、

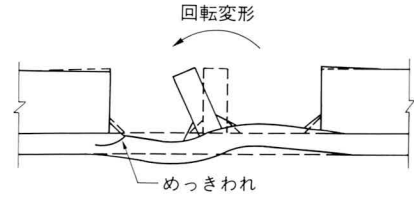


図-1 めっき前後のウェブ面外変形の反転による2次応力の発生機構¹²⁾

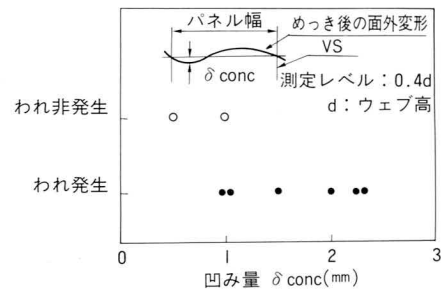


図-2 めっき後におけるウェブの凹み量とめっき割れの関係

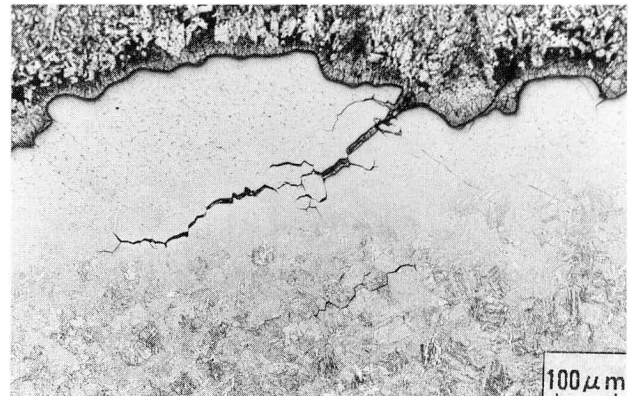


写真-3 ウェブとガセットの廻し溶接部の止端部のめっき割れから枝分れして発生しためっき割れ(マイクロ割れ)

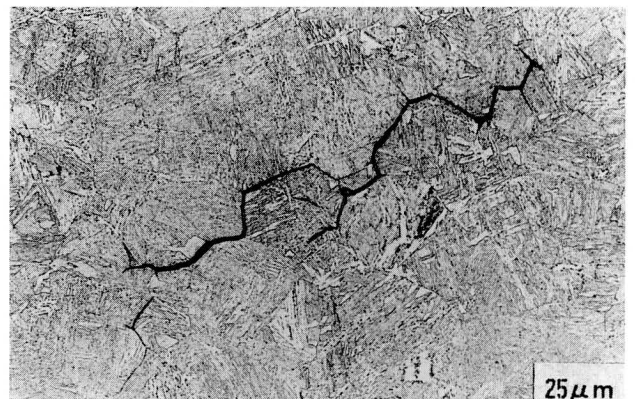


写真-4 同上のめっき割れ近傍の独立しためっき割れ(マイクロ割れ)

不均一な組成を有しているため母材に割れがなくともPTではいろいろな指示模様を示すことが多い。特に溶接ビード止端部では、めっき被膜厚の局部的不均一部において垂鉛の凝固過程における収縮により微細なめっき被膜割れが発生するため、PTでは被膜割れか母材の割れか識別できない場合が多い。

一般にめっき被膜の割れは、めっき被膜の割れと母材の割れとの組み合わせで下記の3通りのケースが考えられる。

- ① めっき被膜と母材の両方が割れている場合（主としてめっき割れ）
- ② めっき被膜だけが割れている場合
- ③ めっき被膜は健全であるが母材が割れている場合（溶接マイクロ割れ）

めっき割れの非破壊検査方法としては②のめっき被膜割れを排除し、①のめっき割れおよびできれば③の溶接割れが検出できるものが望ましい。

以上の観点からめっき割れの非破壊検査として、目視検査、浸透検査（PT）および磁粉探傷（MT）の有効性について実験を行った。

(1) めっき割れを有する小型試験体の製作

図-3、4に示す試験体を作成し、めっきを行ってめっき割れを発生させた。

(2) めっき割れの探傷試験方法に関する実験結果

図-3、4のめっき割れ試験体を用いて、目視検査、浸透探傷試験および磁粉探傷試験を行い、それぞれの結果と断面マクロ試験の結果を対比させ、表-1に示した。

① 目視試験結果

目視試験では、可なり大きく開口した割れ以外は検出できなかった。実橋においてどの程度の割れが発生するか、未知であるが検査方法としては必ずし

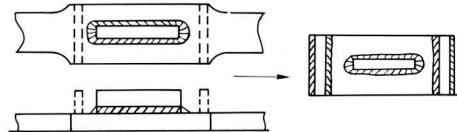
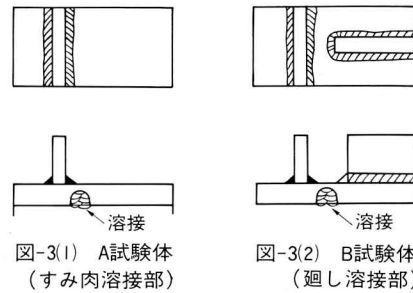
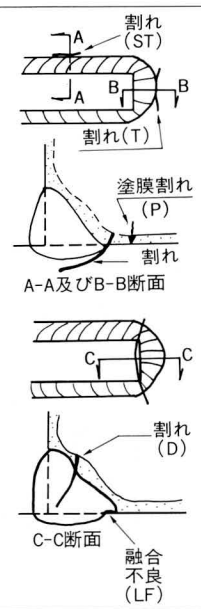


図-4 D試験体(疲労試験による廻し溶接部の微細キレツ発生試験)

表-1 小型試験体めっき割れ非破壊検査結果

試験体 番号	めっき割れ 注目部	目視検査 (VT)	浸透探傷(PT)		磁粉探傷(MT)		破壊試験(断面マクロ試験)			
			1回洗浄	2回洗浄	乾式	湿式A	湿式B	塗膜割れ	母材割れ	割れ寸法
A-1	すみ肉溶接止端部	×	○	×	×	×	×	○	×	—
A-3	すみ肉溶接止端部	×	○	○	○	○	○	○	○	7.7(D) 2.7(ST)
B-1	すみ肉・廻し溶接止端部	×	△	×	×	×	×	×	×	LF
B-3	すみ肉・廻し溶接止端部	×	△	×	×	×	×	○	×	
B-4	すみ肉・廻し溶接止端部	×	○	○	○	○	○	○	○	5.5(D), LF
B-5	すみ肉・廻し溶接止端部	×	△	×	×	×	×	○	×	
B-6	すみ肉・廻し溶接止端部	×	△	×	—	×	×	×	×	
B-7	すみ肉・廻し溶接止端部	×	△	×	—	×	×	×	×	
B-8	すみ肉・廻し溶接止端部	×	○	×	—	×	×	×	×	
B-9	すみ肉・廻し溶接止端部	×	△	×	—	×	×	×	×	
D-1-a	廻し溶接止端部	○	○	○>	—	○	○	—	—	
D-1-b	廻し溶接止端部	○	○	○	—	○	○	○	●	
D-2-a	廻し溶接止端部	×	○	—	—	○	×	—	—	
D-2-b	廻し溶接止端部	×	○	○	—	×	×	○	●	



注記) ×: 検出できず。 △: 明確には判定できない(指示模様あり) ○: 検出可能
●: 初期キレツ確認後メッキ

も妥当とはいえない。

② 浸透探傷試験

JISZ2343に示されたPTの手順で行うと、一般母材面でも多くの指示模様が認められる。表-1で明らかのように、ほとんどの試験体に割れまたは割れらしいものが存在すると判定され、過剰検出となる。前述したように、新しいめっき被膜には、ピンホール、被膜割れ等多くの微細欠陥がある。写真-5、6にめっき被膜断面に認められためっき被膜の割れの顕微鏡写真を示した。

めっき被膜の割れ等の被膜欠陥は深さが浅いことから、浸透液を散布後2回に亘って洗浄液で表面近くの浸透液を洗い流す方法（2回洗浄法）を用いれば、比較的深い母材割れを検出することが可能である。ただし検査の手間は非常に掛かる。

③ 磁粉探傷試験

一般に乾的と湿式がある。湿式は磁粉を粗粒度（湿式A）と細粒度（湿式B）を用いて行った。蛍光磁

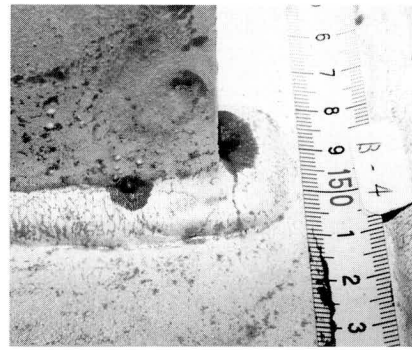


写真-7 B 4 試験体の浸透探傷 (1回洗浄法)

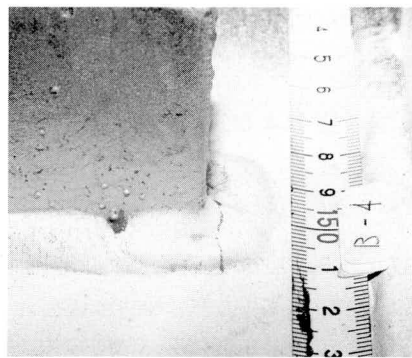


写真-8 B 4 試験体の浸透探傷 (2回洗浄法)

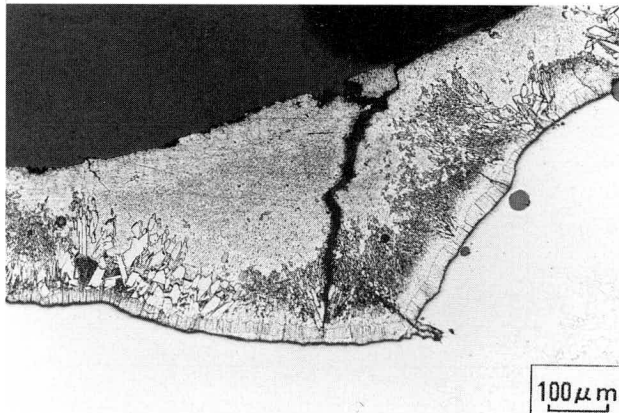


写真-5 めっき被膜割れの顕微鏡写真

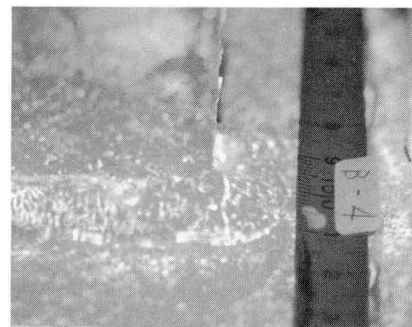


写真-9 B 4 試験体の磁粉探傷

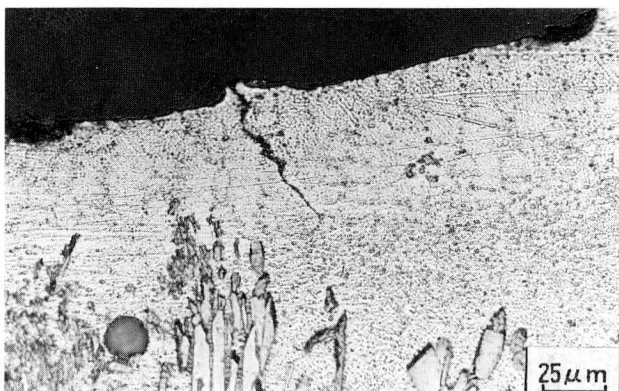


写真-6 めっき被膜表面の微細割れ

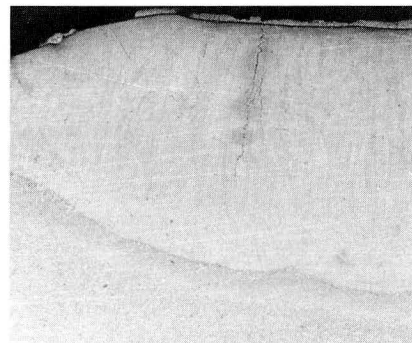


写真-10 B 4 試験体の断面マクロ写真

粉であるため、探傷検査はある程度暗くする必要があり。いずれにしても、検出能力は割れに対して直角に磁極をセットできるかどうかによって大きく変わる。これは探傷部位の空間的制約条件による。めっき被膜そのものは、非磁性体であり、被膜割れは検出しないのでPTのように判定に悩むことは少ない。乾式よりは、湿式の方が扱い易く、判定もし易い。磁粉の粒度の有意差は認められなかった。

写真-7～写真-10に、B4試験体のPT(1回洗浄法)、PT(2回洗浄法)、MTおよびその割れの断面マクロ写真を示した。めっき割れ試験方法としては、浸透探傷2回洗浄法か湿式磁粉探傷法が妥当なようである。

5. 各種試験体および試験結果

(1) 1/2縮小断面試験体

実橋は縦2分割の曲線箱桁で、めっき時の部材形状は]型断面の非対称部材であり、めっき変形およびめっき時の垂鉛浴の浮力によるめっき浸漬時間管理等に關してのデータが少なく、実断面施工前に予備実験として図-9の実橋断面および長さの1/2の縮小試験体(]型断面但し板厚はすべて9mm、材質SS41)3体によるめっき試験を行った。

めっき割れに關係がある結果のみを下記に示す。

- ① めっき前後におけるめっき収縮量は]型断面においてフランジ自由端よりウェブ側が大きい。従って部材の平面変形は、ウェブ側に凹になるように変形する。本試験体は全体的に部材の剛度は小さい。
- ② めっき後のウェブの面外変形は、フランジと垂直スティフナーまたはダイヤフラムで囲まれるパネルの変形パターンが図-5のように類型化された。水平スティフナー位置における橋軸方向のウェブの面外変形は部材自体の剛度が小さいため、平面曲りの影響が多くめっきによる変形の反転は認められなかった。水平スティフナーと下フランジの中央位置では図-5(1)に示したような山型変形およびS字変形が認められた。

ウェブパネルの変形形状は部材全体の変形抵抗力によって異なるようである。

- ③ ウェブ材質がSS41にも拘らず、またウェブ板厚9mmと薄くウェブの面外変形も非常に大きかったにも拘らず、めっき割れはまったく認められなかった。

全体的な変形が支配的で、すみ肉溶接ビードの止端部に大きな応力が掛かる局部的変形が少なかったことによるものと思われる。

(2) 実断面パイロットメンバー

実橋の製作、めっき施工に先立ち、実断面のパイロットメンバーを製作し、めっき施工を行い、磁粉探傷によるめっき割れ検査を行い検討結果の検証を行った。

パイロットメンバーの形状、寸法は図-9の実橋と同じとした。

① 鋼材

めっき割れの防止対策として、溶融亜鉛脆化特性値(S_{LM-400})を0.42以上とするためフランジおよびウェブにTMCP鋼を用いた。まためっき焼け防止のためSiを0.20程度に抑えた。

TMCP鋼の化学成分を表-2に示す。

② 製作方法

イ) フランジは板継後孔明けを行い、縦リブを先溶接し、ローラーベンディングで溶接角変形と縦ソリを矯正しパネルとした。

ロ) ウェブは孔明け後、水平スティフナーのみを先溶接し、ローラーベンディングで矯正し、その後

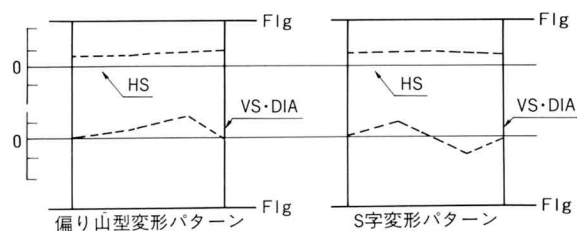


図-5(1) ウェブパネルの部材長方向の変形パターン

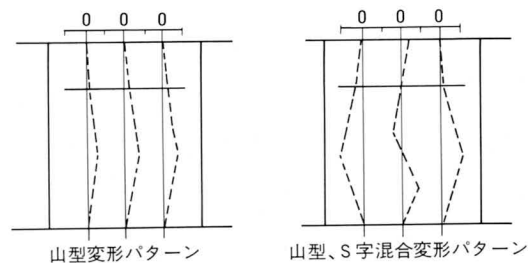


図-5(2) ウェブパネルの高さ方向の変形パターン

表-2 主要部材鋼材の化学成分(%)

(SM50Y)

	板厚	C	Si	Mn	P	S	Ceq	S_{LM-400}
フランジ	18	0.15	0.18	1.12	0.012	0.003	0.34	56.49
ウェブ	10	0.15	0.20	1.13	0.014	0.003	0.35	55.41

垂直スティフナーを取り付け、溶接してパネルとした。

ハ) 組立は2分割フランジを添接し、箱断面として行い、角溶接およびダイヤフラム等の溶接も箱断面状態で行った。

ニ) 主桁端部添接部の加熱矯正、仕上げ等を行い、2分割部材として溶融亜鉛めっきを行った。

ホ) 亜鉛めっき完了後は一切矯正を行わなかった。

③ めっき前後のウェブの面外変形

パイロットメンバーは実橋と同じ構造としたためウェブ外面に仕口、ピース等の取り付けがあり、ウェブの面外変形を測定できない箇所もあるが、主として水平スティフナーの位置で、めっき前後のウェブ面外変形を測定し図-6に示した。

鈹桁の場合は、フランジと水平スティフナーに囲まれたウェブ面が変形モデルのパネルとなるが、箱桁ではどちらかという、フランジとダイヤフラムに囲まれたウェブ面が変形モデルのパネルとなる。

図-6によると、ダイヤフラム位置およびパネルの中央の垂直スティフナーの位置での水平スティフナーの廻し溶接部におけるめっき前後のウェブ面外変形の反転はそれ程著しくはない。すなわちめっき前後のウェブの面外変形は比較的少なく、逆に水平スティフナーの中央位置でのめっき前後の変形が大きい箇所が認められている。ウェブに水平スティフナーを

溶接後ローラーベンディングで矯正した際、ウェブに導入された溶接残留応力が解放されたことがめっき後の面外変形を少なくしていると思われる。一方、水平スティフナーの中央部での変形はスティフナー自由端のガス切断の残留応力の解放または溶融亜鉛めっき時の温度勾配による熱応力によるものと思われる。

これらの結果から水平スティフナー廻し溶接部のめっき割れは少ないことが予測された。

④ めっき割れの検査

めっき割れの検査方法に関する予備試験結果を表-1に示したが、実橋部材での検査手順と施工性を確認するため、改めてPTおよびMTによる検査を行った。検査箇所はウェブ、フランジの廻し溶接部の他、ダイヤフラム、ブラケット等仕口の廻し溶接部515箇所全てとした。部材の廻し溶接部の構造、形状のディテールとその位置表示記号を図-7に示した。これらの結果を表-3に示した。

PT(1回洗浄法)では、めっき被膜割れによる欠陥指示模様として膨大な量が認められた。MTで慎重に検査した結果めっき割れと思われる欠陥は6箇所であった。なお、PT(2回洗浄法)も行ったが、洗浄程度の加減が難しくまた再現性に乏しく、手間も非常にかかることから途中で中止した。

これらMTで検出されためっき割れの詳細箇所は下

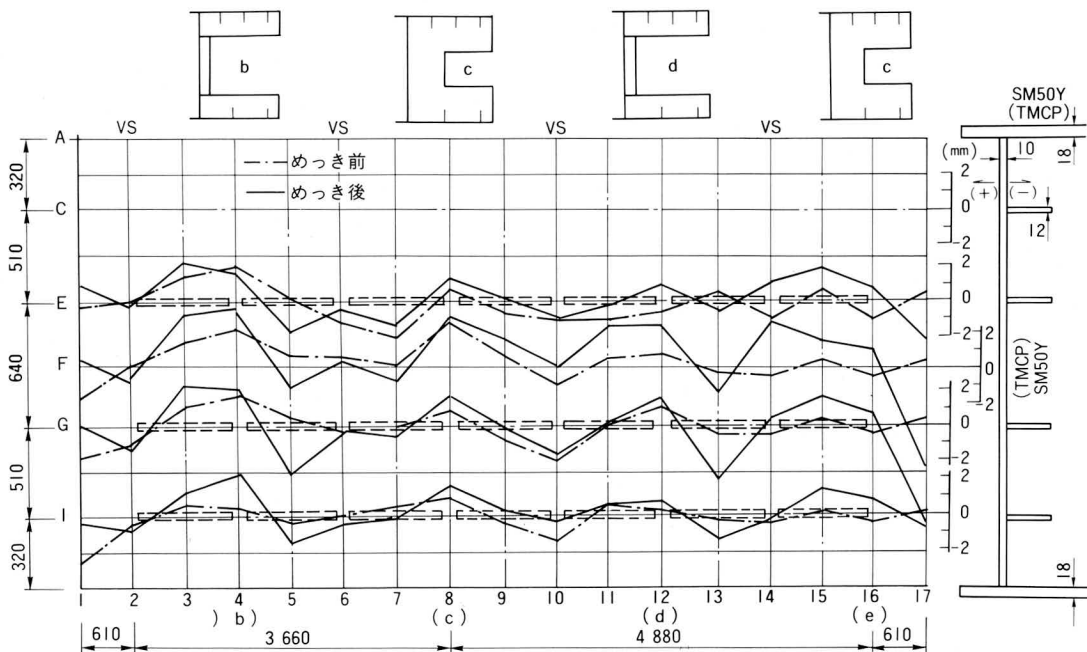


図-6 パイロットメンバーウェブ面外変形測定結果


記の通りである。


めっき割れ M1：水平スティフナー 2 段部材の上から 2 段目の水平スティフナーの廻し溶接のウェブ側溶接止端部（割れ発生位置記号①）割れ

M2：水平スティフナー 4 段部材の上から 4 段目の水平スティフナーの廻し溶接のスティフナー止端部から溶着金属に入った（位置記号③）割れ

M3：水平スティフナー 4 段部材の上から 3 段目の水平スティフナーの廻し溶接のスティフナー止端部から溶着金属に入った（位置記号③）割れ

M4：上フランジ側横リブのウェブと上フランジの廻し溶接部の溶着金属に入った（記号③）微細な割れ

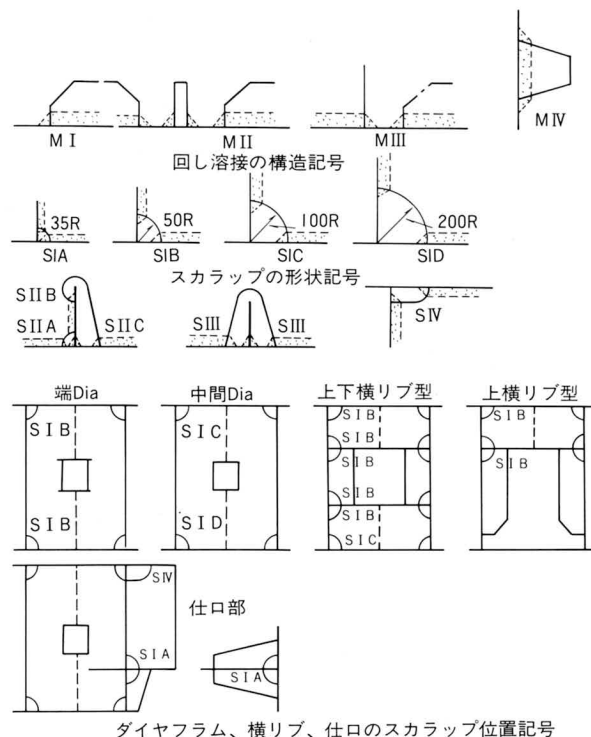
M5：上フランジ側横リブの縦リブスカラップの上フランジとの廻し溶接部（ S IIC 箇所）の横リブウェブ側止端部から溶着金属に入った（記号③）割れ

M6：ダイヤフラムと下フランジの廻し溶接部（ S I D）のダイヤフラム側止端部から溶着金属に入った（記号③）割れ

これらのめっき割れの内、M3めっき割れのMT指示模様を写真-11に示した。またM3めっき割れの発

生した廻し溶接部の断面マクロ試験片を切り出し、断面マクロおよび顕微鏡試験を行った。

スティフナー板厚中央での断面マクロを写真-12に示した。MTで検出した割れはB部であるが、ウェブ側止端部（A部）に微細な割れが認められた。前述したようにウェブとスティフナーの廻し溶接は2台のロボットによりスティフナーの両側より同時溶



ダイヤフラム、横リブ、仕口のスカラップ位置記号

図-7 部材の廻し溶接部の構造・形状の詳細と表示記号

表-3 パイロットメンバー非破壊検査結果

構造・形状 記号(*1)	廻し溶接部位	浸透探傷 (1回洗浄法)					湿式磁粉探傷			
		①	②	③	④	欠陥無し	①	②	③	④
MII MIII	Hスティフナーとweb	35	1	22	0	26	1	0	2	0
MIII	横リブFLGとWEB	6	0	12	0	20	0	0	0	0
MI	VスティフナーWEB	4	0	1	0	3	0	0	0	0
SIA. B	Vスティフナーと横リブFLG等	13	1	53	0	58	0	0	0	0
SIC	ダイヤフラムとWEB, FLG	5	3	37	0	125	0	0	0	0
SID	ダイヤフラムとWEB, FLG	2	0	5	0	1	0	0	1	0
SIII	LF側横リブ等の縦リブスカラップ	15	0	10	0	7	0	0	0	0
SII	縦リブとUF側横リブ・ダイヤグラム	11	0	28	0	9	0	0	2	0
SW	仕口ウェブとUF	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	合計	91	5	168	0	251	1	0	5	0

接し、スティフナー端部で2プール会合している。従って写真-12の断面マクロはスティフナー側へ溶け込んだ溶接金属とすみ肉ビードを形成している溶着金属とが認められる。B部の割れはスティフナー側に溶け込んだ溶接金属のデンドライトの会合部に沿っており、一見高温割れのように見受けられる。デンドライド会合部に偏析された低融点化合物への溶融亜鉛の拡散の難易および脆化促進の程度については今後の課題となるが、もともと会合部は脆化しており、めっき時の熱応力により割れが発生したことも否定できない。今後の課題としたい。

また、A部の割れは0.3mmの微細な割れであり、且つ写真-13で分かるようにめっき被膜の割れの上に、亜鉛槽より引き上げた時流れたと思われる亜鉛が割れ口を塞いでおり、磁粉液が浸透できず、MTで検出できなかったものと思われる。

写真-12、13で分かるように、普通鋼材のスティフナーの熱影響部の粒度に比べTMCP鋼のウェブ熱影響部の組織粒度は非常に小さい。

⑤ 廻し溶接部の硬さ試験結果

写真-12の断面マクロ試験片を用いた、廻し溶接部のウェブ止端部とスティフナー熱影響部の硬さ試験結果を図-8に示した。ウェブ（TMCP鋼）の熱影響部の最高硬さはHv210、スティフナー（SS41）の熱影響部の最高硬さHv243であり、廻し溶接部に拘らずウェブ熱影響部の硬さは良好であった。

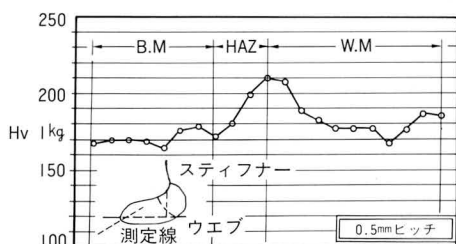


図-8(1) ウェブとスティフナー廻し溶接ウェブ止端部の硬さ分布

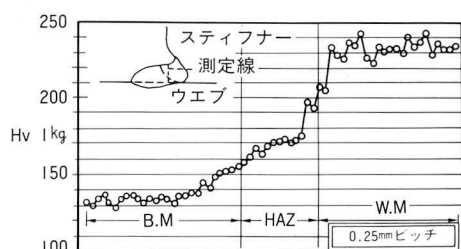


図-8(2) ウェブとスティフナー廻し溶接のスティフナー側熱影響部の硬さ分布

6. 実橋のめっき割れ検査結果

実橋部材の1例を図-9に示した。製作した2分割部材は全部で20部材であり、これら全ての廻し溶接部についてMTを行った。検査箇所は全部で6000箇所にも及んだ。これらの結果を表-4に示した。

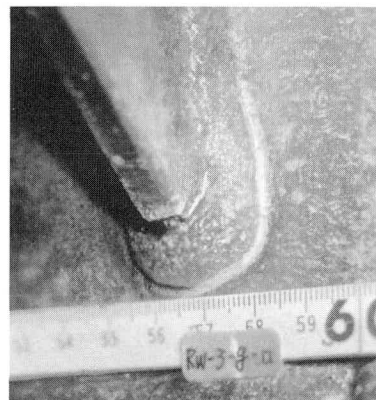


写真-11 めっき割れM3のMT結果

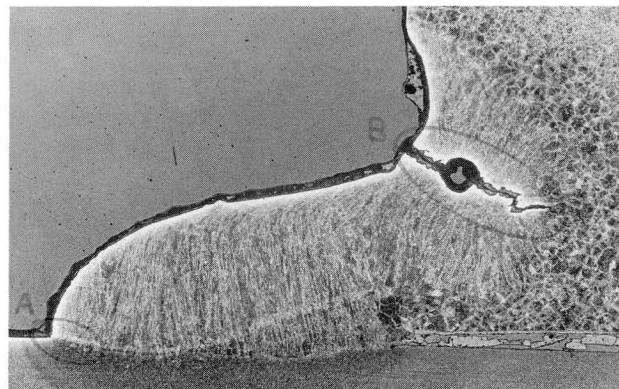


写真-12 めっき割れM3発生廻し溶接部の断面マクロ写真

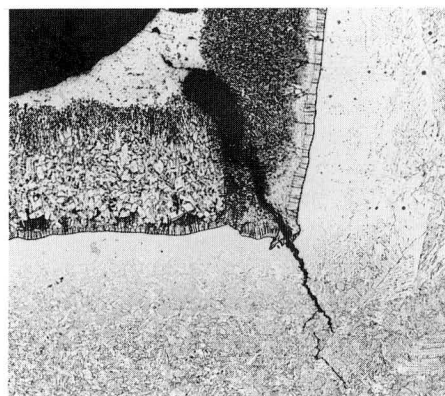


写真-13 ウェブ止端部に発生した微細割れのマイクロ写真

めっき施工は平成2年2月5日～2月13日まで行われたが、最初の日に行われた6部材のめっき割れが比較的多い。めっき施工条件等は別報「溶融亜鉛めっき箱桁橋梁の製作に関する検討とその成果」⁵⁾に詳しく示したが、なぜ2月5日のめっき施工部材にめっき割れが多かったかは明らかでない。

実橋に認められためっき割れでTMCP鋼を用いたフランジ、ウェブの溶接止端部に発生したものは、3件であり、非常に少ない。普通鋼を用いたダイヤフラム、横リブ等のスカラップの廻し溶接部の止端部または溶接金属に発生しためっき割れが以外に多い。

7. まとめ

曲線箱桁2分割非対称部材のめっき施工に当たって、めっき割れ防止に最大限の対策を検討し、実施した。めっき割れの検査も膨大な努力を払い実橋においては、実に6000箇所の探傷を行った。その結果めっき割れが多かったか、少なかったかは評価を待つとして、筆者らはこれらの検討結果が非常に有効であったと確信している。

特に、危惧していた水平スティフナーとウェブの廻し溶接のウェブ側止端部に発生しためっき割れが非常に少なかったことは、①TMCP鋼を用いて溶接熱影響部の硬化、組織的粗粒化を防止したこと。②ウェブ、フランジ

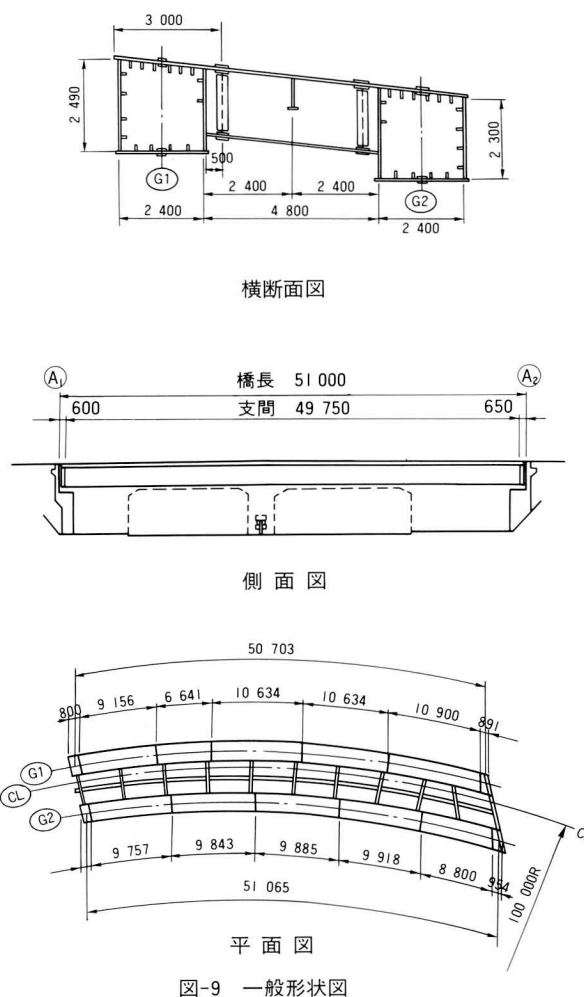


図-9 一般形状図

表-4 実橋の磁粉探傷結果

(探傷箇所約6000)

部材番号	めっき施工日	欠陥番号	構造・形状記号(*1)	廻し溶接部位	割れ発生位置記号(*2)
G1-5	2/5	N1	MII	2段目のHスティフナーの廻し溶接ウェブ止端部	①
G1-5	2/5	N2	SIB	ダイヤフラム上コーナー部スカラップ 廻し溶接部	③
G1-5	2/5	N3	SID	ダイヤフラム下 コーナー部 スカラップ 廻し溶接部	③
G1-6	2/5	N4	SIB	ダイヤフラム上コーナー部スカラップ 廻し溶接部	③
G1-6	2/5	N5	SIB	ダイヤフラム上コーナー部スカラップ 廻し溶接部	③
G1-6	2/5	N6	MI	横桁仕口補強リブ廻し溶接部	③
G1-6	2/5	N7	MI	横桁仕口補強リブ廻し溶接部	③
G1-4	2/6	N8	MII	2段目のHスティフナーの廻し溶接ウェブ止端部	①+④
G1-4	2/6	N9	MII	2段目のHスティフナーの廻し溶接ウェブ止端部	③+④
G1-4A	2/6	N10	SIB	ダイヤフラム上コーナー部スカラップ 廻し溶接部	③
G1-2	2/7	N11	MI	横桁仕口補強リブ廻し溶接部	②
G2-5	2/8	N12	SIB	ダイヤフラム上コーナー部スカラップ 廻し溶接部	②
G2-5	2/8	N13	MI	横桁仕口補強リブ廻し溶接部	②
G2-2	2/9	N14	MII	2段目のHスティフナーの廻し溶接ウェブ止端部	①+④
G2-3A	2/9	N15	MII	4段目Hスティフナーの廻し溶接ウェブ止端部	②
G2-3A	2/9	N16	SID	ダイヤフラム下 コーナー部 スカラップ 廻し溶接部	③

(*1) 図-7参照 (*2) 表-2付図参照

(めっき施工日2/5～2/13)

をパネル方式とし、スティフナー、縦リブ溶接後ローラーベンディングにより変形矯正し、その際に溶接残留応力の開放が行われたこと。③ウェブと水平スティフナーの廻し溶接をロボットで行ない止端部形状が良好だったこと。また止端部形状改善に積極的にグラインダーを掛けたこと。④溶融亜鉛めっきによる面外変形を非常に少なくすることができたこと。⑤めっきの施工管理をパイロットメンバー等の検討を通して適切に行ったこと。等による総合結果と思われる。一方、溶着金属のめっき割れについて今後の研究が必要であることが分かった。

本報で得られた知見は今後のめっき橋梁のめっき割れ防止に役立てば幸である。最後になったが、本研究を行うに当たり、新日本製鐵君津製鐵所渡辺部長代理をはじめとし、新日本製鐵には一方ならぬ御協力を頂いた。まためっき施工をお願いした新星鋼業にも多大なご協力頂いた。ここに深く感謝の意を表したい。

＜参考文献＞

- 1) (社)日本橋梁建設協会 塗装部めっき橋ワーキンググループ；溶融亜鉛めっき橋に関するアンケート調査
- 2) 送電鉄塔用新HT60開発委員会；JSSC Vol.21、No.221、1985
- 3) 溶融亜鉛めっき橋梁の研究（溶融亜鉛ぜい化の防止

- について）、ZB研究会報告書、平成元年12月
- 4) 伊藤他；溶融亜鉛めっき箱桁橋梁の熱応力・変形に関する検討、宮地技報No.7、1991
 - 5) 鈴木他；溶融亜鉛めっき箱桁橋梁の製作に関する検討とその成果、宮地技報No.7、1991
 - 6) 菊地；溶融亜鉛による鋼の液体金属ぜい化とその対策、金属、1985.5
 - 7) 菊地他；溶融亜鉛中における鋼の液体金属ぜい化割れに関する研究、日本造船学会講演会、昭和56年5月8日
 - 8) 内川他；鋼の溶融亜鉛めっきによる溶融金属脆化割れに関する研究（第1報）、溶接学会全国大会講演概要35集、1984.10
 - 9) 内川他；鋼の溶融亜鉛めっきによる溶融金属脆化割れに関する研究（第2報）、溶接学会全国大会講演概要35集、1984.10
 - 10) 金沢他；溶融亜鉛めっき橋梁用高張力鋼の研究（その1）、巴組鐵工所技報No.1、1988.3
 - 11) 金沢他；溶融亜鉛めっき中での応力挙動の研究（その2）、巴組鐵工所技報No.2、1989.3
 - 12) 金沢他；溶融亜鉛めっき中での応力挙動の研究（その3）、巴組鐵工所技報No.3、1990.3
- 1990.10.31受付

グラビア写真説明

花畔大橋

札幌市北部郊外に隣接する石狩湾新港のアクセス道路として、又道央圏の交通需要に対応する為、国道231号の新ルート改築の一環として石狩川水系炭戸川に架かるハープ型の斜張橋です。

古くは、架橋地の石狩町周辺には馬車鉄道が通っていた歴史のある道ですが、現在はその面影もなく、近くには当社も施工致しました札幌大橋、石狩河口橋等数橋の長大橋が架けられております。

約5年の工事期間を要し平成2年11月に開通し、夜にはライトアップをされ美しい姿を見せております。

工事の思いでとして、仮組立、輸送工事で知恵を絞った様に工事関係者から伺っております。(川村)

丹生谷橋

丹生谷橋は、昭和13年12月に開通し、当時の工費として、121,000円をかけて施工され、この橋が開通するまでは、渡し舟による交通のみで大水のたびに川留めとなり通行が途絶し、そのため、この地方は当時「大津か、草津か、仁字の津か」と云われ30軒を越える宿屋や、料理屋で繁盛をきわめたが、橋の開通とともにそれらの店は次第に店をたたみ、今はその面影もない。開通当時「この橋を一ペンは通らんと極楽に行けん」と用もないのに行ったり来たりする者が後をたたなかつたと云う、エピソードを地元の古老が語ってくれた。

平成の新橋となり、親柱には丹生谷の鷺敷町や各町村の新たな発展とその歴史を刻もうと飛上がろうとしている「鷺」を飾っている。(古市)