

# 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

## Discussion on Manufacture of Hot-Dip Galvanized Box Girder Bridge

鈴木 富雄\* 青木 清\*\* 中塚 勲夫\*\*\*  
Tomio SUZUKI Kiyoshi AOKI Isao NAKATSUKA

### Summary

Hot-dip-galvanized plate box girders have not been used for bridge construction because of dimensional limits of plating baths, while I-girder have been much used.

However, in the construction of Kawano junction bridge, curved plate box girders which were hot-dip-galvanized by separating the girders into two asymmetrical channel-shaped parts have been employed.

This paper presents the deformation prevention measures adopted for the manufacture and construction of the above girders. These measures were determined after a study executed prior to the start of construction. Also, presented are the results of an investigation on the amount of deformation which actually occurred after galvanization.

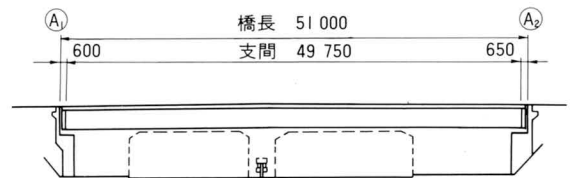
### 1. まえがき

川之江ジャンクション橋は、供用中の高松・松山自動車道と建設中の高知自動車道の分岐点に建設される鋼単純非合成箱桁である。鋼製桁橋の防錆処理としては、塗装仕様が一般的であるが塗装時の足場が必要となる。本橋は供用中の本線を跨ぐジャンクション橋で、その桁下空間は建築限界H=4.5mに対して、H=4.76mと余裕が無い。この為架設時の本線への影響と、将来の維持管理を考え、塗装塗り替えを必要としない溶融亜鉛めっき仕様が採用された。溶融亜鉛めっき橋の実績は、多数残されているが、その大多数がI桁橋であり箱桁橋としては、めっき槽の寸法上の制約から殆ど例を見ない。本橋は、

現行のめっき槽の寸法制限を上廻る断面形状を有しており、箱断面を分割することにより、めっき施工を行った。今回のように箱断面をコ形に分割し、左右非対称断面にて、めっき施工した例は過去に例が無い。

本文は、その分割方法および製作方法について報告するものである。

側面図



平面図

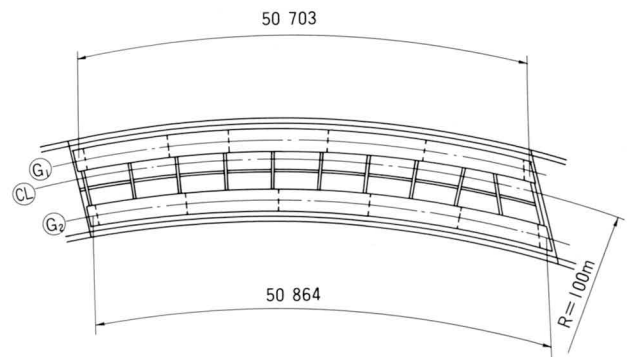


図-2 一般形状図

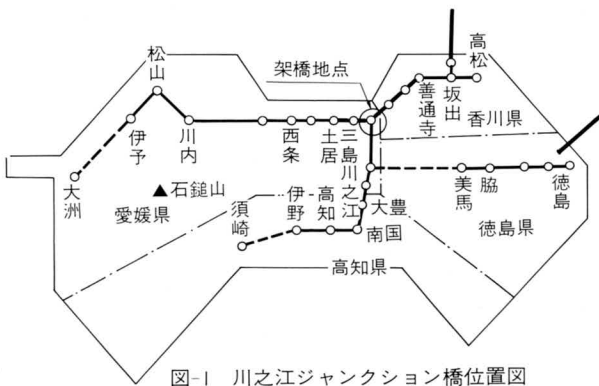


図-1 川之江ジャンクション橋位置図

\* 千葉工場製造部生産設計第1課課長代理

\*\*\* 千葉工場製造部製造第2課担当上席課長

\*\* 千葉工場製造部次長

## 2. 工事概要

川之江ジャンクション橋の一般形状図を図-2に、断面形状を図-3に、また、主要諸元、工事工程を表-1、表-2に示す。

## 3. 亜鉛めっき槽の大きさと箱桁の分割形状

現在保有されているめっき槽の寸法および能力を表-3に示す。箱桁の分割形状は、図-4の3案を考えた結果全体鋼重が軽く経済性に優れ、且つ、外観的にも優れた①案の縦1シーム案を採用した。①案は、左右非対称断面となるため、亜鉛めっきによる変形対策を十分に検討し、実施工にあたることとした。

一般的な溶融亜鉛めっき順序および条件を表-4に示す。

## 4. 製作上の検討と製作方法

亜鉛めっき施工は、約440℃のめっき浴槽内に部材を浸漬して行われるため、温度応力の発生による部材の変形、溶融金属脆化による廻し溶接部の割れが問題となる。特に今回は、コ形の左右非対称部材となるため、変形の出ることがあらかじめ予想された。部材全体の平面的な変形はその変形量が大きいと箱断面への組み上げが出来な

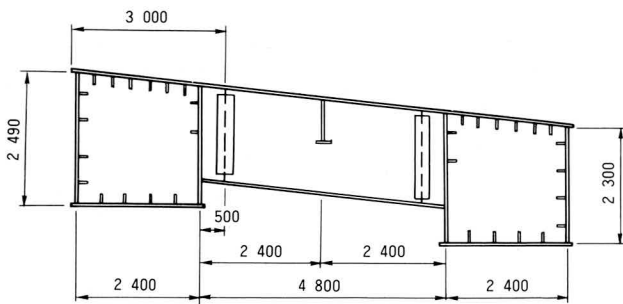


図-3 断面形状

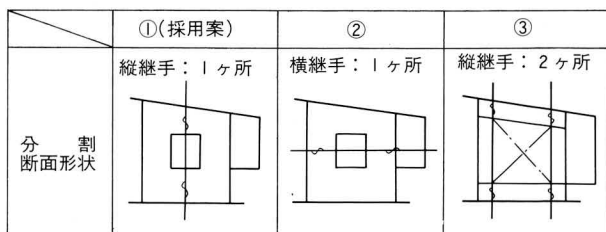


図-4 断面形状分割案

表-1 川之江ジャンクション橋主要諸元

構造形式	鋼単純非合成曲線箱桁橋
橋長	51.00 m
有効幅員	10.70 m
平面線形	R=100 m
横断勾配	9.0%片勾配
縦断勾配	3.22%↙ ↘4.60%
製作鋼重	218t

表-2 工事工程

工 事 発 注	平成元年 3月28日
本体パイロットメンバーめっき	平成元年10月12日
全 体 仮 組 立 完 了	平成2年 3月7日
架 設 完 了	平成2年 4月12日
橋 面 橋 完 了	平成2年 6月

表-3 亜鉛めっき槽の寸法及び能力

	亜鉛めっき槽の寸法(m)			めっき可能部材寸法(m)			部材重量(t)
	幅:B	高さ:H	長さ:L	幅:B	高さ:H	長さ:L	
a	2.1	3.3	16.5	1.8	2.8	15.5	10
b	1.8	3.6	16.5	1.5	3.0	15.5	10
c	1.8	3.6	16.0	1.5	3.0	15.0	10

表-4 溶融亜鉛めっき順序及び条件

		項 目	条 件
1	脱脂	アルカリ濃度 温度 浸漬時間	10±5% 80±10℃ 20~30分
2	水洗		
3	酸洗	塩酸濃度 温度 浸漬時間	15±5% 常温 130g/l以下 40~50分
4	水洗		
5	フラックス処理	フラックス濃度 温度 塩化亜鉛・塩化アンモニウム 浸漬時間 PH	28~35% 65±5% 1:2(モル比) 6g/l以下 3~6 3~5分
6	めっき	亜鉛槽組成度 温度 浸漬速度 浸漬時間 引き上げ速度	亜鉛97.5%以上 436℃ 1~3m/分 8分 1.5~3~2m/分
7	水冷	温度 浸漬速度 浸漬時間	55℃~65℃ 6.5m/分 2分

い状態、また、腹板の面外変形（やせ馬）が大きいと座屈の危険が生じる。部材の変形状や変形量を事前に把握するため、**図-5**の作業フローの如く、小型縮小体（1/2モデル）試験、FEM解析等を行った。

小型縮小体の形状は、**図-6**に示す形状とした。変形状を見るため、フランジ、ウェブの板厚比率を実橋と合わせることをおよび板厚が薄過ぎると実橋とそぐわないこと等を考え、フランジは  $t=19\text{mm}$ 、ウェブは  $t=9\text{mm}$  とした。また、温度変形は、亜鉛めっき浴槽内への浸漬速度引き上げ速度に関係することと、実橋部材の浸漬・引き上げ速度の想定を行うため、50秒、150秒、250秒の3種の浸漬・引き上げ速度とした。溶接完了後、加熱矯正後、亜鉛めっき後の測定結果を**表-5**に示す。また、

表-5 小型縮小体の測定長とめっき浸漬速度

(単位：mm)

測定長	溶接完了後	加熱矯正後	めっき後	めっき浸漬速度	浸漬時間	
①	UL1	-5.0	-6.0	-9.5	50秒	638秒
	UL2	+1.0	-5.0	-5.5		
	LL1	-2.0	-3.0	-6.0		
	LL2	+1.0	-2.0	-3.0		
②	UL1	-6.0	-6.0	-10.0	150秒	613秒
	UL2	-0.5	-6.5	-5.0		
	LL1	-3.0	-3.5	-6.0		
	LL2	+2.0	-1.0	0.0		
③	UL1	-4.5	-5.5	-3.0	258秒	615秒
	UL2	-0.5	-5.5	-4.0		
	LL1	-4.0	-5.5	-10.5		
	LL2	+0.5	-4.0	-2.0		

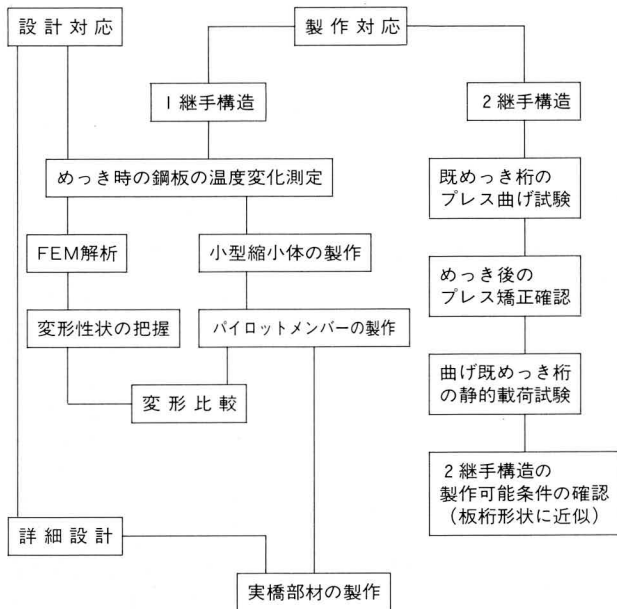


図-5 作業フロー

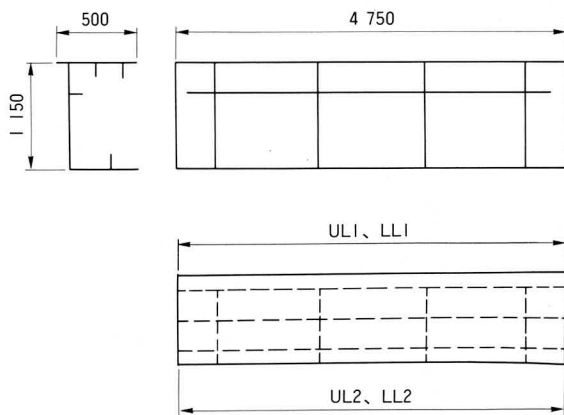
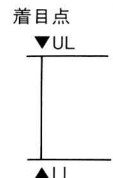


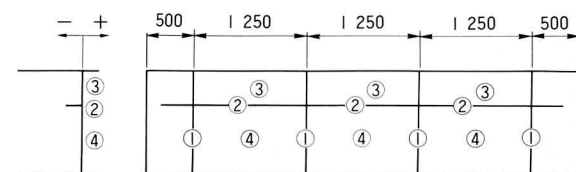
図-6 小型縮小体の形状

小型縮小体の平面曲がり

平面曲がり	溶接完了後	加熱矯正後	めっき後	
①	UL	-12.0	-1.5	-10.4
	LL	-3.0	-1.3	-3.8
②	UL	-8.1	-1.3	-9.0
	LL	-7.0	-1.3	-7.7
③	UL	-6.0	-1.2	-13.1
	LL	-5.0	-0.5	-10.2



小型縮小体ウェブの面外変形



	500	1250	1250	1250	500
①(50S)	①	-1	-6	-4	-2
	②	-2~-2	+3~-7	+2~+3	
	③	-3~-4	+6~-8	+4~+5	
	④	+10~+13	-8~+10	-9~+13	
②(150S)	①	-5	-9	-9	-4
	②	+2~+2	0~-10	0~+3	
	③	+4~+5	+3~-10	+4~+5	
	④	+13~-9	-8~+10	-10~+15	
③(250S)	①	+6	-4	+2	-4
	②	-6~-6	-6~-8	-3~0	
	③	-4~-5	-5~-7	-2~+1	
	④	-16~+10	-11~+9	-7~+7	

亜鉛めっき後の形状を写真-1に示す。この結果に基づき、めっき施工で発生する変形を抑止するために行った検討と製作上の配慮を以下に述べる。まず、亜鉛めっき時に於ける問題点とその軽減方法を考えると表-6に示すようなものが考えられる。

(1) 残留応力に起因する変形について

一般に、部材の組み立て時に発生する初期不整を矯正する方法としては、加熱矯正が行われる。この方法では部材内に、加熱による残留応力の発生・蓄積が形成される。残留応力が存在する部材を高温のめっき浴槽に浸漬した場合、応力の開放が起これ、これがめっき後の変形に影響を与えることが縮小体により確認された。

この対策として、溶接による初期不整を押さえることと共に、不整除去の方法として加熱矯正以外の矯正方法を検討した。

1) 自動溶接工法と機械矯正方法の採用

フランジ、ウェブには、パネル自動溶接工法を使用し、縦リブ、水平補剛材、垂直補剛材の溶接を行い、溶接入熱、ビード形状の均一化を図り、廻し溶接部にも自動溶接を行った。部材パネルに発生した初期不整は、可能な限りローラーによる機械的な転圧矯正を行い、極力加熱矯正を避け、溶接残留応力の軽減に努めた。

2) めっき前部材精度の確保と初期不整の軽減

めっき前の部材精度確保のためフランジをパネルの段階で仮ボルトにて一枚板とし、主桁断面形状に組み立てた後首溶接を両側同時に自動溶接で行い、溶接入熱の均一化を図り、初期不整の軽減に努めた。

(2) 構造物の形状に起因する変形について

めっきを行う部材の非対称性およびフランジ、ウェブの板厚差等に起因し、高温のめっき槽に部材を浸漬して行く過程で部材各部の応力状態が異なるため、部材に均一な変形が生じない。また、変形を補剛材で拘束されているウェブは、板の座屈による面外方向の変形という形で応力が解放される。コ形断面の部材は、その非対称性から図-7の如くウェブのある側に変形する性状を有している。そこで写真-2に示すような拘束材を取り付け、平面変形・捩れ等の防止対策を行った。

ウェブの面外変形に対しては、パイロットメンバーで水平補剛材を4段配置した部材と2段配置した部材を亜鉛めっきした結果、4段配置ではほとんど変形が生じず、2段配置でも特に問題となる値では無かったため、景観

表-6 亜鉛めっき時の問題点及び軽減方法

問題点		軽減方法
変形要因	残留応力	a. 鋼材のロール工程 b. 鋼材のガス切断 c. 溶接順序、溶接方法 d. 矯正方法  ①パネル自動溶接工法 ②箱形状首溶接の同時溶接 ③ローラーベンディング工法
	形状特性	a. 板厚 b. 非対称性 c. 補剛材の配置 d. 桁高、部材長  ①Flg、Web板厚差を小さく ②対称性を持たせる ③バランス配置 ④めっき槽の余裕
	作業・条件	a. 浸漬、引上げ速度 b. めっき温度 c. 部材の操作 d. 冷却  ①速度は早く ②なるべく低く ③細部構造の工夫 ④拘束材の取り付け
廻し溶接部の割れ	溶融金属脆化による廻し溶接部のめっき割れ	①脆化感受性の低い鋼材の採用 ②ビード止端形状の仕上げ ③溶接及び矯正方法



図-7 めっきによる変形

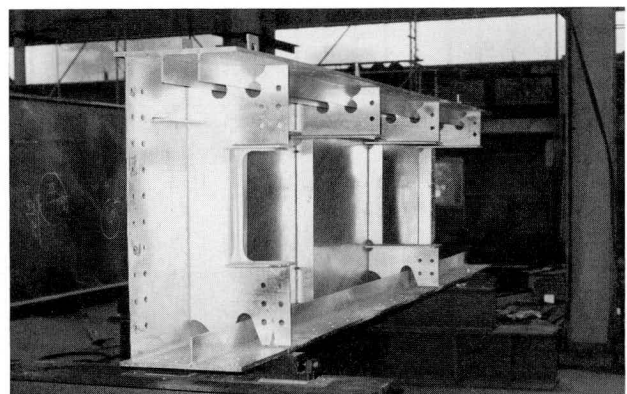


写真-1 小型縮小体形状

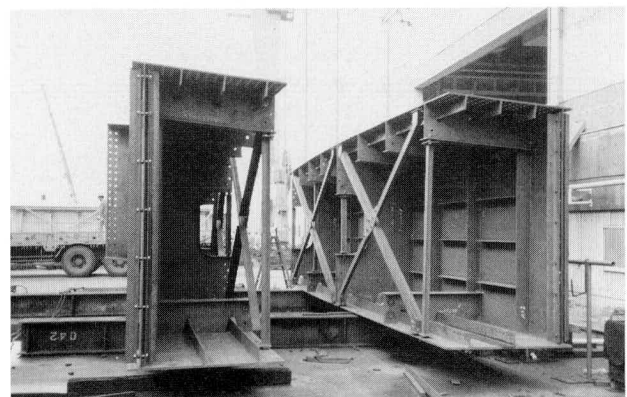


写真-2 拘束材取付

上と経済性から走行車より視認出来る外側ウェブのみ、  
 図-8 の如く、4 段配置とした。

(3) めっき浸漬速度に起因する変形について

部材のめっき槽への浸漬速度は、鋼の比重(7.85 t/m<sup>3</sup>)  
 と亜鉛の比重(7.14 t/m<sup>3</sup>) が近いと、断面形状がコ

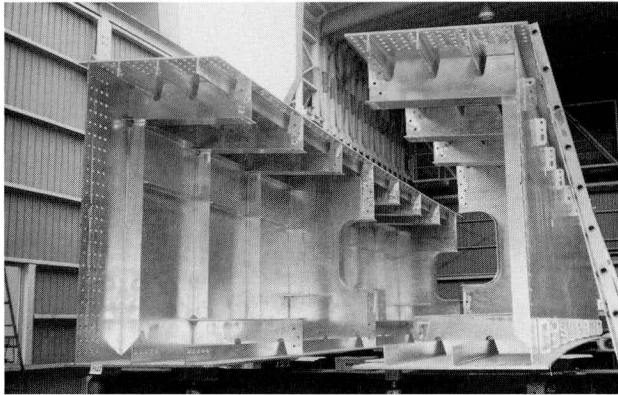


写真-3 パイロットメンバー

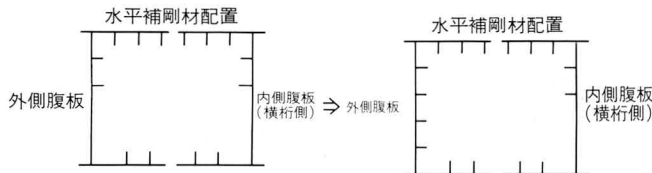
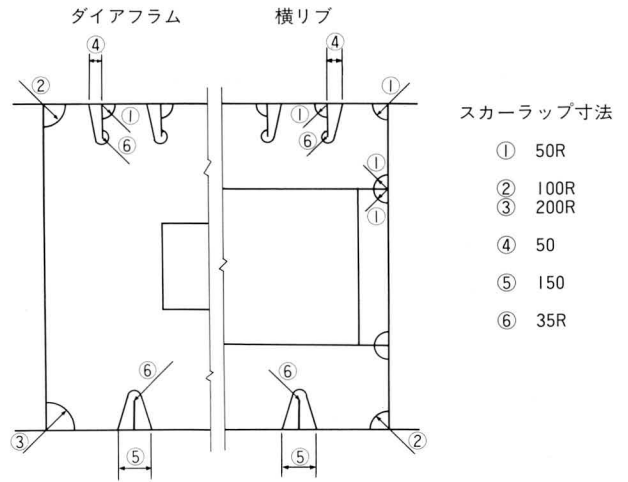


図-8 水平補剛材配置

表-7 めっき施工時間(平均時間)

作業項目	作業時間	備 考
投入時間	82秒(1' 22")	投入開始～投入完了
浸漬時間	549秒(9' 09")	全 体 浸 漬
引上げ時間	91秒(1' 31")	引上げ開始～引上げ完了
空冷時間	68秒(1' 08")	空 気 中 放 冷
水冷時間	216秒(3' 36")	水冷開始～水冷完了
合 計	1006秒(16' 46")	

今回使用めっき槽寸法：2.1m×3.3m×16.6m(W×H×L)  
 めっき部材の最大寸法：1.94m×2.5m×10.9m(W×H×L)



- スカーラップ寸法
- ① 50R
  - ② 100R
  - ③ 200R
  - ④ 50
  - ⑤ 150
  - ⑥ 35R

図-9 スカーラップ形状

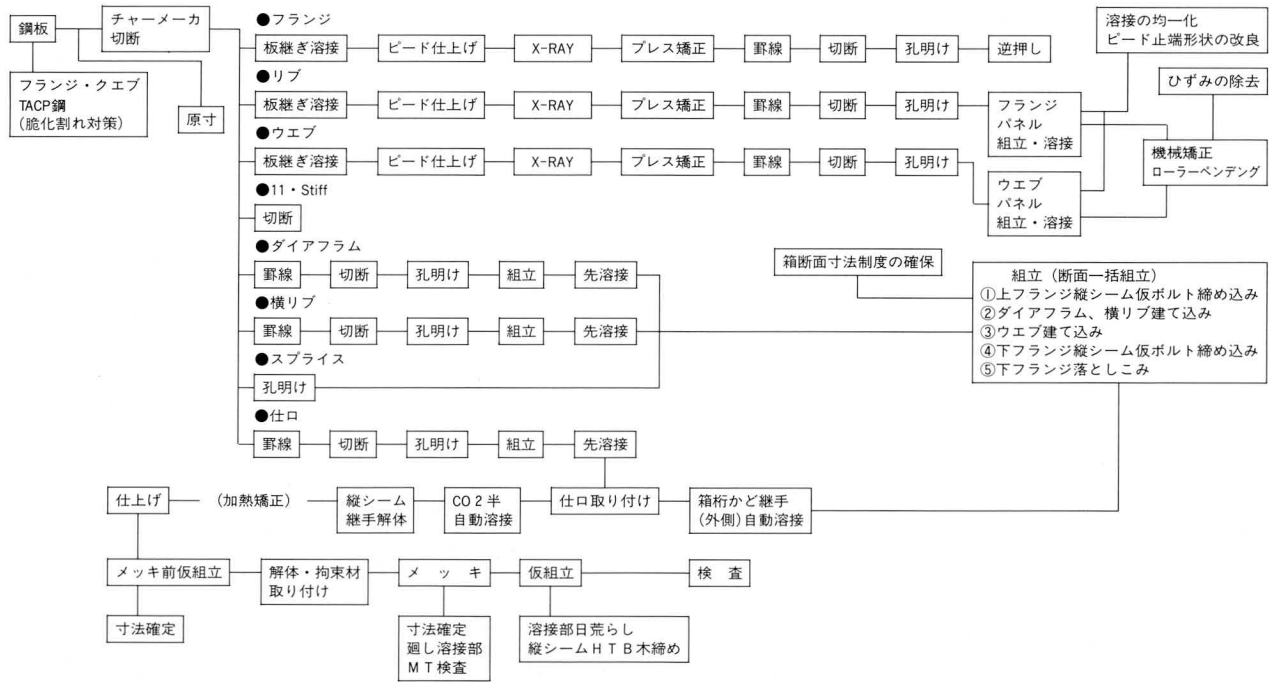


図-10 溶融亜鉛メッキ箱桁製作・メッキフローチャート

形で浸漬時めっき浮力により傾き、且つ、めっき槽に余裕がなく上方へのめっきのまわりが悪く、I型断面に比べ浸漬速度低下の一因となっている。

浸漬速度が遅いと、垂鉛に浸漬した高温部と外気に接している低温部との温度差により熱応力が生じ、これが部材変形に起因すると考えられる。この対策として浮力の発生の防止と垂鉛の流れを良くするために、各部に通常より大き目のスカーラップを採用した。

スカーラップの形状を図-9に示す。

#### (4) 部材箱形状組み立てのための施工対策

以上の変形対策考慮を事前に行っても、まったく変形を無くすことは出来ず、全体の組み立てが困難な場合が想定される。そこで組み立て時の作業性を考え、M22のボルトに対し、オーバーホールサイズ(26.5φ)を採用した。(通常孔径M22ボルトに対しては、24.5φである。)採用に先立ち、溶融亜鉛めっき面オーバーホール孔のすべり試験を実施し、接合面の施工性、すべり係数に問題の無いことを確認し、実施工に使用した。

母材の接合面は#30の砥石でグラインダー目荒しを行い添接板はブラスト処理にて目荒しを行った。試験は、所定軸力導入後、60時間放置し、引張試験機により各試験体のすべり係数を確認した。初期導入軸力の減少は、約7%ですべり係数値は $\mu=0.46$ であった。

### 5. めっき箱桁の実施工と出来形

#### (1) めっき施工結果

図-10に今回のめっき箱桁製作のフローを示す。また、表-7にめっき施工時間(実績平均時間)を示す。

めっき槽への投入・引上げ時間は約90秒で当初目標を満足するものであった。

#### (2) 部材の出来形

##### 1) 平面曲がり変形

めっき施工後、ウェブのある側に平均 $\delta=7$ mm程度変形した(図-11、表-8)。

##### 2) 部材長への影響

表-9に測定結果を示す。めっきによる収縮量を2mm見込んだが見込み通りの結果となった。

##### 3) キャンバーへの影響

全体キャンバーは支間中央で20mm(1部材2mm)の上

げ越しを見込んだ。めっき後のキャンバーも満足の結果となった。

#### 4) ウェブの面外変形

測定箇所および測定結果を図-12に示す。

面外変形は、水平補剛材を挿入しなかった内面⑤がやはり大きく最大で11mmを超える面外変形が出た。水平補剛材の追加を行い、変形を拘束し、押えることが面外変形には有効であることを裏付けた。なお、桁端、横桁仕口腹板、ダイアフラムにも変形が生じたが、その変形量は、最大10mm程度であり部材の組み立て締付け上は、問題とならなかった。

#### 5) めっき後の箱断面の組み立て

めっき完了後、コ形断面部材を箱桁形状に組み上げた。

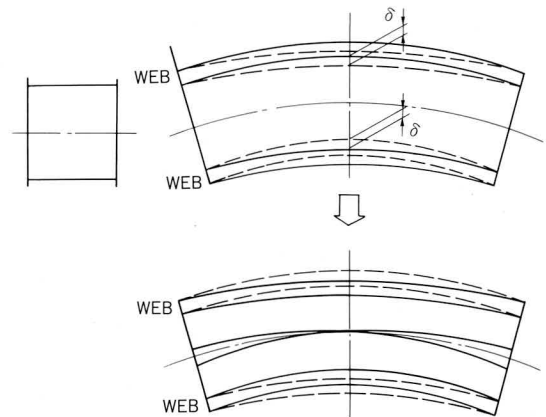


図-11 平面曲がり形状

表-8 実橋部材の平面曲がり

平面曲がり		溶接完了後	矯正後	めっき後
内	U L	-5.5	-1.8	-6.5
	L L	-3.0	-1.5	-3.3
外	U L	-5.4	+0.6	-8.5
	L L	-3.9	-0.2	-0.5

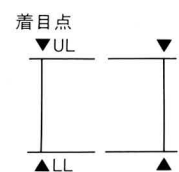
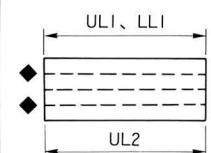


表-9 実橋部材の測定長

測定長		溶接完了後	矯正後	めっき後
内	UL1	-1.5	-0.5	-6.0
	UL2	+0.5	-3.0	-2.0
	LL1	-3.5	-3.5	-6.5
外	UL1	-3.5	-5.5	-9.5
	UL2	0.0	-2.0	-1.0
	LL1	-4.0	-4.0	-4.0



平面変形の少ないものは中央から寄せピンにて組み上げ変形の大きなものは簡単な引き寄せ治具により、コ形部材断面をとじあわせた。

組み上げ後の断面における隙間は、4 mm程度であった。

## 6. 溶融亜鉛めっきによる廻し溶接部の割れ

### (1) めっき割れ対策

板桁等の全めっき桁に於いて、廻し溶接止端部に溶融金属脆化による割れ(めっき割れ)が発生することが、これまでの溶融亜鉛めっき施工で確認されている。

今回、このめっき割れを極力押さえる意味で、割れ感受性の低いTMCP鋼(Thermo Mechanical Control Process)をウェブ、フランジに採用した。この鋼材は、溶接硬化性を押さえるために、炭素当量(Ceq)が0.34以下となっている。

### (2) めっき割れの検査方法

めっき割れの非破壊検査方法と特徴を表-10に示す。また、疲労試験にて発生させた割れ試験片をめっきしたものについて浸透探傷検査(PT)の2回洗滌後の写真例および湿式磁粉探傷検査(MT)の写真例を示す(写真-4)。この非破壊検査試験に基づき今回は、湿式磁粉探傷法を採用した。

### (3) 検査結果

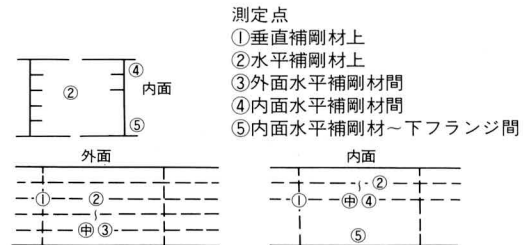
めっき完了後、主桁24台、横桁11台、縦桁10台の廻し溶接部約6000ヶ所について、めっきによる割れ発生の有無を検査した。割れの発見されたのは、横桁仕口リブに4ヶ所、水平補剛材に5ヶ所、ダイアフラムのスカーラップに7ヶ所の合計16ヶ所であった。割れ発生箇所を図-

表-10 溶融亜鉛めっき割れの非破壊検査方法

検査方法	内容
目視検査	開口した大きな割れ以外発見不能。
浸透探傷検査(PT)	(JIS Z 2343)表面開口の割れは発見可。めっき塗膜割れ、塗膜ピンホールからも指示模様有。2回洗浄方法が比較的有効。
磁粉探傷検査(MT) *注)	めっき塗膜は非磁性体の為、塗膜割れは検出しない。母材割れのみ検出。めっき塗膜割れ・塗膜欠陥に影響されないため母材割れには最も適当と思われる。 (めっき塗膜割れ、アンダーカット等の溝内に残留した場合は、注意を要する。)

\*乾式と湿式では湿式の方が良い。

13に示す。これらの割れの発生は、いずれの場合もリブ側、ダイアフラム側、水平補剛材側の母材と反対側の溶接部から亀裂の発生を見た。亀裂面を点検の結果、リブダイアフラム部は、多少アンダーカットきみ、水平補剛材部は、面外変形の数値の大きな部位に見受けられ、金属脆化と変形とが複合して影響を与えたものと思われる。めっき割れの発生率は、0.27%であった。



測定位置	<-5	-5~-4	-4~-3	-3~-2	-2~-1	-1~0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	計
補剛材上	①	—	4	1	10	22	22	19	10	2	—	90
	②	—	1	3	5	5	13	5	5	—	—	42
外面	③	—	—	2	1	6	12	5	6	3	—	35
内面	④	—	1	1	0	3	3	1	1	0	1	14
	⑤	*2	1	0	1	0	2	0	0	1	—	7
合計	2	3	10	8	24	52	35	31	20	2	1	188

\*は-6.5mm、-11.3mm

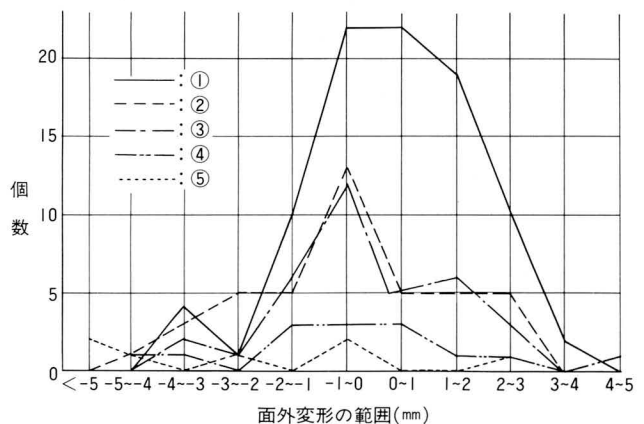


図-12 ウェブの面外変形

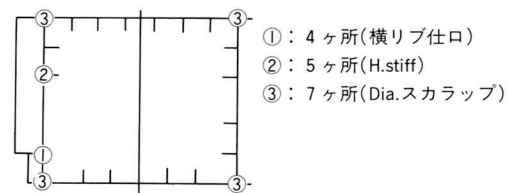


図-13 割れ検出位置図

#### (4) めっき割れの補修

めっき割れ部はグラインダーにて削り取り、発錆の原因となる削り粉を除去した。その後めっきの変質を防止するため裏面を流水または、濡れ布で冷却しながら手溶接で補修した。補修部はビード整形後ワイヤーブラシで十分清掃後、ローバル（亜鉛めっき補修用塗料）にて補修した。

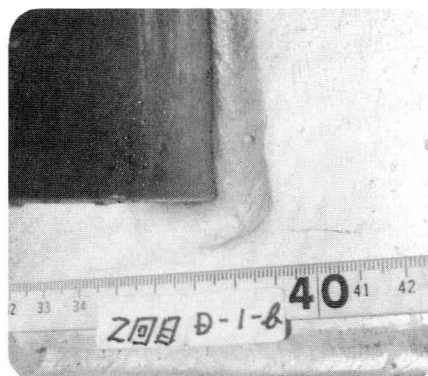


写真-4(a) 浸透探傷写真(2回洗滌後)

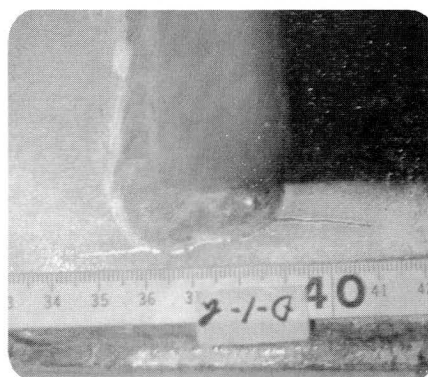


写真-4(b) 湿式磁粉探傷写真

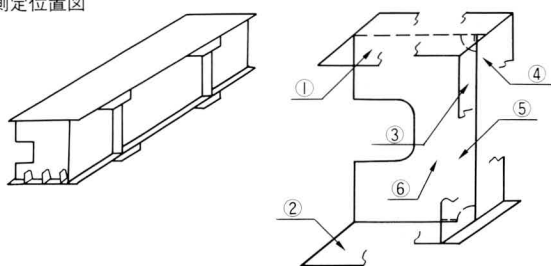
### 7. めっき膜厚の測定

めっきの完了した部材の膜厚測定を行った。測定機器は、電磁膜厚計LE-200型を使用し、上・下フランジ、腹板、ダイアフラム面を測定し、同時にテストピースによる亜鉛付着量の測定もあわせて行った。図-14に測定位置と測定結果を示す。

### 8. 溶融亜鉛めっき箱桁の経済性について

本橋に於いては、分割構造による添接板や高力ボルト等の増加により、鋼重が約15%増加している。これは、過去に於ける亜鉛めっき鉸桁橋の列が3～6%程度であるのに比べ、10%程度多い。しかしながら本橋のように桁下空間のない曲線箱桁の場合、塗装足場が建築限界を

測定機器：電磁膜厚計 LE-200型  
測定位置図



	測定値						平均値
	①	②	③	④	⑤	⑥	
A	175	232	205	181	251	249	215.5 μ
B	172	229	235	260	263	225	230.7 μ
C	248	281	243	229	269	276	257.7 μ
D	234	247	225	257	263	242	244.7 μ
E	172	264	240	236	253	236	233.5 μ
							236.4 μ

- ①：上フランジ下面
- ②：下フランジ上面
- ③：腹板内面
- ④：腹板外面
- ⑤：ダイアフラム内面
- ⑥：ダイアフラム外面

尚、TP材による平均亜鉛付着量は、 $2.435\text{g}/\text{m}^2$ であった。

図-14 めっき膜厚測定表

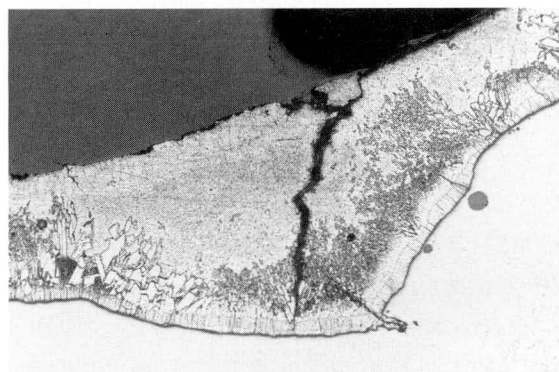


写真-4(c) メッキ割れマクロ

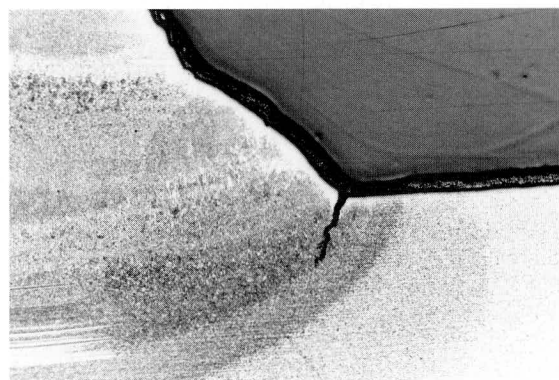


写真-4(d) 母材割れマクロ



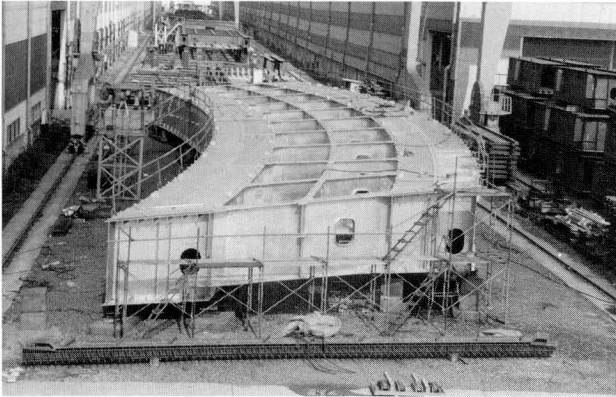


写真-5 工場仮組立

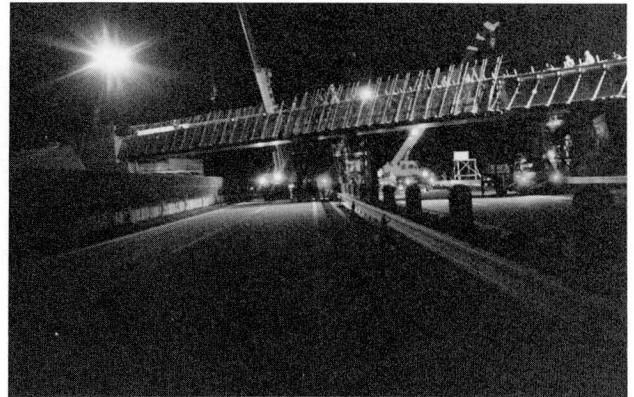


写真-6 現場仮設

侵すことによる通行車輛および塗装作業員に対する安全性の問題、塗装足場の設置・撤去時の通行止め等の本線規制の必要性による将来のメンテナンスの面からめっき橋の採用がなされたが、現地架橋環境を考えれば長期防錆が期待出来るので、初期投資の効果は得られるものと思われる。今後の追跡調査を待ちたい。

## 9. あとがき

今回の溶融亜鉛めっき箱桁橋は、部材の大きさ、めっき槽の制約上から箱桁断面を分割し、左右非対称なコ型断面でめっき加工を行った。既往の鉸桁橋等のめっき報告から変形等の予想は出来るが、コ形断面の実績データは皆無であることから手探りの状態から検討を始めた。平面変形による曲率の狂い、腹板の面外変形等、全体を箱桁状に組み合わせたとき、規定の曲線形状が再現出来るのか不安視された。

箱桁形状への組みあわせは、ピンを使用しコ形断面を箱部材に組み上げ後、めっき高力ボルトへの盛り替えを行いつつ、全体形状を組み上げた。当初心配された曲率の狂いもなく、所定の精度で無事全体仮組立が完了した。

めっき後の工場仮組立形状、現場架設状況を写真-5、

6に示す。本橋は、平成2年4月に架設を完了、平成2年6月に橋面工を完了した。

この工事にかかわり、貴重なる御意見をいただきました皆様に誌上を借り、謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 日本道路公団大阪建設局；近畿自動車道天理吹田線溶融亜鉛めっき橋梁工事報告書、昭和63年3月
- 2) 金沢、山下、家沢、征矢；溶融亜鉛めっき橋梁の研究（Ⅰ）、巴組鐵工所技報No.1、1987年
- 3) 金沢、山下、家沢、山戸、井上、金谷；溶融亜鉛めっき橋梁の研究（Ⅱ）、巴組鐵工所技報No.1、1987年
- 4) 金沢、山下、家沢、征矢；溶融亜鉛めっき橋架の研究（Ⅲ）、巴組鐵工所技報No.2、1989年
- 5) 西川、河野、池田、村井；20年を経過した溶融亜鉛めっき橋梁の現況、橋梁と基礎、1988年
- 6) 鎌田、青木、沓掛；溶融亜鉛めっき橋の施工試験、宮地技報No.2、1986年
- 7) 鈴木、福田、青木；溶融亜鉛めっき曲線箱桁の製作、土木学会第45回年次学術講演会、平成2年9月

1990.10.31受付