

# めっき抜き孔径および位置の違いによる鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する実験的検討

岩手大学 理工学部 システム創成工学科

同

同

JFEシビル株式会社

同

株式会社デンロコーポレーション 東北ガルバセンター

名誉教授 工博

教授 工博

准教授 工博

岩崎 正二

出戸 秀明

大西 弘志

中村 信行

阿久津 英典

工博 西尾 吉史

**キーワード：**溶融亜鉛めっき、めっき割れ、めっき抜き孔、孔径、孔位置

## 概 要

溶融亜鉛めっきを行うことで発生する割れの原因は、部材寸法、形状、めっき作業条件、鋼材の成分、溶接方法、残留応力、液体金属脆化等が単独あるいは複合的に関連して発生すると考えられている。このように割れの原因是、種々考えられるが、ここでは部材形状に着目する。

一般的な柱梁仕口部に設けられたスカラップは、めっき割れが発生しやすい部位として知られている。この割れ対策としてJASS 6 (2007)<sup>1)</sup>では、めっき抜き孔径を35mmとして、孔から溶接ビードおよびH形鋼フィレットとのすき間を5mm以上設けたノンスカラップ工法が示されている。しかし実際に推奨値を適用した場合であっても割れが発生した事例がある。

そこで今回は、めっき抜き孔を有するノンスカラップ工法による一般的な柱梁仕口部の割れ対策について、数種類の実験体を用いた浸漬実験を行い、めっき割れが生じにくいめっき抜き孔の孔径および位置を検討した内容について紹介する。



めっき抜き孔の割れ発生事例

## 1. はじめに

溶融亜鉛めっきとは鋼部材を約440°C前後の溶融亜鉛へ浸漬させ、鉄－亜鉛の合金層を形成することで鉄を錆から守る表面処理のことである。この時、鋼部材が約440°Cの溶融亜鉛中に浸漬するため、急激な温度変化が与えられ、先に溶融亜鉛に浸漬している部分と後から浸漬する部分との間に温度差が生じ、鋼部材内に非定常熱応力が発生する。そのため場合によっては、スカラップ、めっき抜き孔および溶接部等に割れが発生する場合がある。その一例を示したものが図1～3である。

図1に示した柱材について、梁仕口部にあるスカラップ（図2）や溶接部（図3）にめっき割れが発生している。図2については、スカラップのR部分の端部よりめっき割れが発生していることが分かる。孔加工時やスカラップ加工時の欠陥あるいは韌性が弱いH形鋼のフェレットはめっき割れが発生しやすいと言われている。また、図3については、H形鋼と柱本体の溶接ビードにめっき割れが発生していることが分かる。これは、溶接部等の応力集中や溶接残留応力の影響が大きいものと考えられる<sup>2),3)</sup>。



図1 めっき割れが発生した柱材の全体図  
(Fig.1 General view of cracked column member)

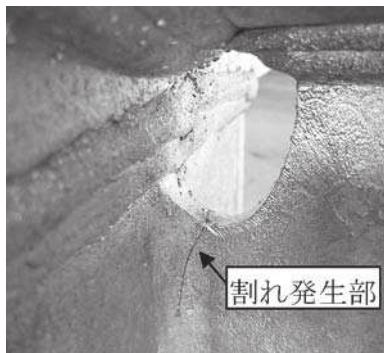
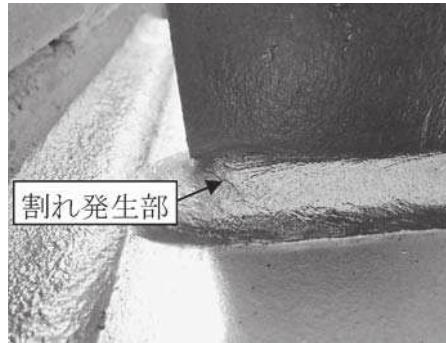


図2 柱材のスカラップめっき割れ  
(Fig.2 Galvanizing crack at scallop of column member) (Fig.3 Galvanizing crack on welded portion of column member)



この割れ対策としてJASS 6 (2007)<sup>1)</sup>では、図4に示すように、めっき抜き孔径を35mmとして、孔から溶接ビードおよびH形鋼フィレットとのすき間を5mm以上設けたノンスカラップ工法が示されている。しかし実際に推奨値を適用した場合であっても割れが発生した事例がある。

めっき割れについての既往の研究は数編ある。小山等<sup>4)</sup>は、柱梁仕口スカラップを有する実大部分モデルについて浸漬実験を行い、熱電対を用いて供試体の表面温度を測定している。また、熱伝導解析および熱応力解析を行い、スカラップ回し溶接止端部に発生する応力値を推定している。その

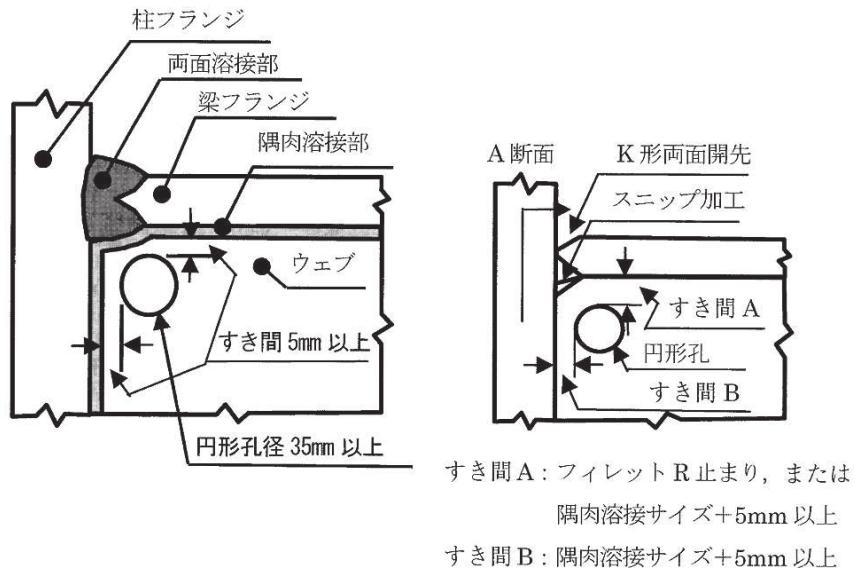


図4 JASS6(2007)<sup>1)</sup>加工要領  
(Fig.4 Processing instruction in accordance with JASS 6 (2007))

結果、以下のように述べられているが、最適な孔径や孔位置について言及されていない。

- ・板厚比が大きくなるにつれて、亜鉛めっき浴槽浸漬時に部材間に発生する温度差およびスカラップ回し溶接部に発生する応力は大きくなり、割れの発生率は高くなる。
- ・溶融亜鉛めっきによる割れの要因としては、材料的要因よりも構造的・形状的要因が大きく、仕口部構造をスカラップ工法からめっき抜き孔を設けスカラップを省略したノンスカラップ工法にすることで、割れの発生率が大きく減少する。

護等<sup>5)</sup>は、実大の溶接組立H形鋼を用いて、溶融亜鉛めっきによる割れ再現実験を行い、スカラップやめっき抜き孔の位置について、割れを防ぐディテールの検討を行っている。その結果、以下のように述べられている。

- ・めっき抜き孔は少なくともフィレットおよび隅肉溶接止端から10mm以上離すと効果があり、スカラップよりもめっき抜き孔の方が割れを防ぐことができる。

以上から本稿では、一般的な柱梁仕口部の部分的なモデルとして、めっき抜き孔の孔径および位置を変更した数体のH形鋼構造物を作製して浸漬実験を行う。それらの結果

から、めっき割れが生じにくいめっき抜き孔の孔径および位置について検討する。

## 2. 溶融亜鉛浸漬実験

### 2. 1 実験体

柱梁仕口部を部分的に抜き出した実験体5体のうち、JASS6で示された標準型よりもさらに隙間を設けた実験体をCase 1として図5に示す。また、実験体の条件を以下に示し、他の孔径および位置を変更した実験体Case 2～5についても表1に示す。

- ・実験体Case 1として、SN490鋼材を使用したH450×200×9×19のウェブに溶接ビードから15mm離した位置に孔径35mmのめっき抜き孔を設ける。実験体の溶接作業は、通常の柱の製作と同様に孔明け後に行っている。
- ・両端部を拘束するように、PL25 (25mmの鋼板) およびPL40 (40mmの鋼板) を溶接し、最大板厚差4.4倍のモデルとする。
- ・溶融亜鉛めっき浸漬前の実験体内には、残留ひずみが複雑に内在していると考えられる。この残留ひずみが溶融亜鉛めっき浸漬によって発生する割れに影響すると考えられるため、各実験体の溶接条件は、全て統一している。

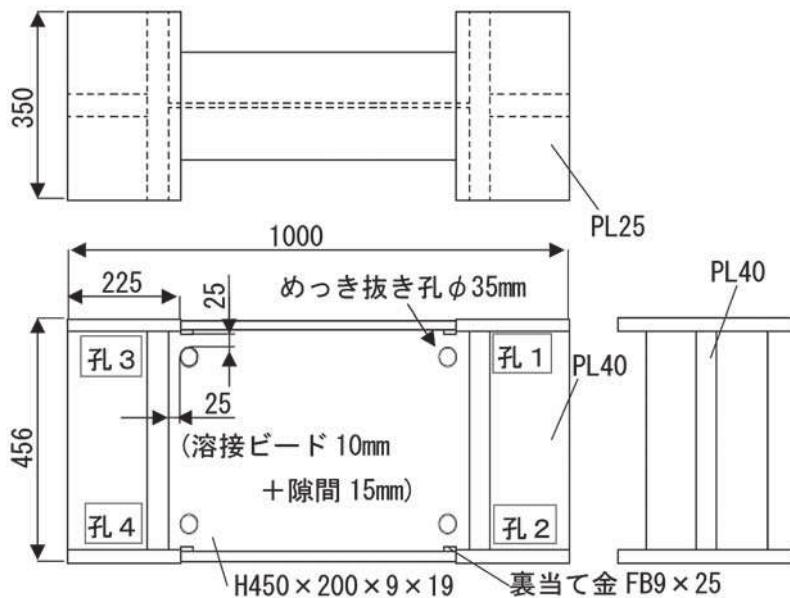


図5 実験体Case 1部材詳細図(mm)  
(Fig.5 Geometry and dimension of specimen for Test Case 1)

表1 各実験体の孔径および孔位置  
(Table1 Hole size and location of each specimen)

実験体Case	孔径(mm)	溶接ビードと孔との隙間(mm)	備考
Case1	35	15	ø 35割れ対策型
Case2	35	5	JASS6(2007)標準型
Case3	35	0	0距離型
Case4	25	15	ø 25標準型
Case5	25	5	ø 25割れ誘発型

くわえて、溶融亜鉛浸漬時の実験体の温度履歴を測定するため、熱電対（東京ワイヤー製作所製：K型）を用いて温度測定を行う。熱電対の取り付け状況を図6に示す。熱電対は専用溶接機（東京測器製：W-50R）を用いて実験体Case 1のみのH形鋼、PL40およびPL25の表面に合計31箇所設置する。

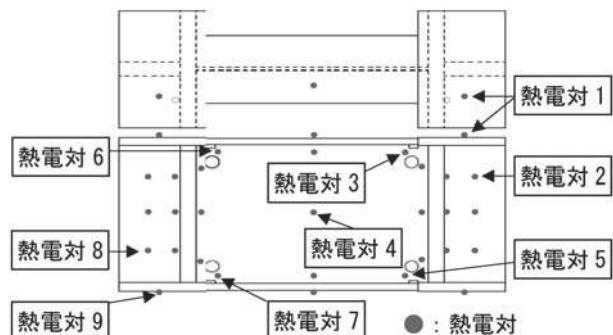


図6 热電対取付け位置  
(Fig.6 Distribution of thermocouples)

## 2. 2 実験方法

- 浸漬直前の様子を図7に示す。実際に割れが発生した事例をもとに、以下に示すめっき処理条件を適用する。また、浸漬開始より600sec間の温度履歴を2sec間隔で測定する。
- ・めっき浴温度を445°Cとして、浸漬速度を0.5m/minとする。

- ・実際の柱材のめっき方法に合わせて長手方向に45°傾けた状態で浸漬を行う。
- ・全ての実験体を専用治具にセットし、めっき浴槽へ同時に600sec間浸漬させる。そのため孔の浸漬順序は、図5に示す孔4, 3, 2, 1の順となった。
- ・溶融亜鉛浸漬前の予熱はなしとした。



(全体の様子)



(熱電対取り付け後の様子)

図7 浸漬実験の様子  
(Fig. 7 Scene of immersion test)

## 2. 3 分析方法

分析は以下の方法で行う。

- ・溶融亜鉛浸漬後に各実験体のめっき抜き孔周辺の磁粉探傷検査を行い、割れの発生有無を確認する。
- ・割れが溶融亜鉛浸漬時および水冷槽浸漬時のどの工程で発生しているのか確認するために、割れが発生した代表的な部分について、断面組織観察およびEPMA元素マッピング分析を行う。
- ・実験体の製作に使用した材料が、成分的に溶融亜鉛めっきによる割れが発生しやすい材料であるのかを確認するために、固体発光分析によって各成分量を測定し、JIS G 3129鉄塔用高張力鋼鋼材(2005)<sup>6)</sup>で規定されている溶融亜鉛めっき割れ感受性当量CEZを式(1)を用いて算出し判断する。

$$CEZ = C + \frac{Si}{17} + \frac{Mn}{7.5} + \frac{Cu}{13} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{4.5} + \frac{Mo}{3} + \frac{V}{1.5} + \frac{Nb}{2} + \frac{Ti}{4.5} + 420B \quad \cdots (1)$$

## 2. 4 実験結果と考察

### (1) 磁粉探傷検査結果

磁粉探傷検査の結果から、特に大きな割れが発生した実験体Case 4の割れ発生位置と状況を図8, 9に示す。また、その他の実験体について各孔の割れの有無を表2に示す。得られた結果を以下に示す。

- ・図8, 9より、めっき抜き孔端部から溶接ビード方向に斜めに割れが発生していることが分かる。
- ・表2の結果より、実験体Case 1以外は割れが発生している。
- ・割れは、実験体Case 3～Case 5に複数発生しており、特にめっき抜き孔部からH形鋼フランジ側の方向に発生しやすい傾向にある。
- ・割れは、孔2～4の位置で発生しやすく、孔1では割れが発生しない傾向にある。

以上より、完全に割れの発生を防ぐことが可能と思われる実験体Case 1のみである。

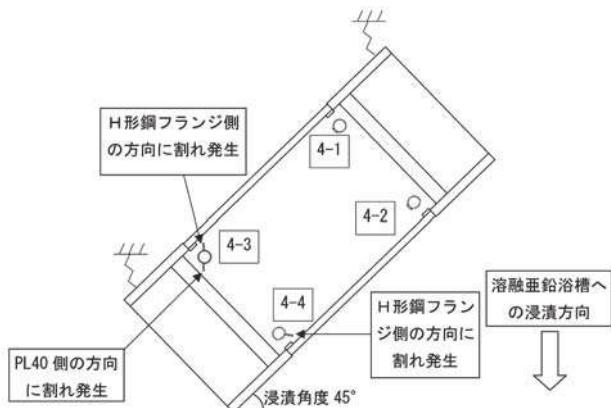


図8 実験体Case 4 の割れ発生状況  
(Fig.8 Cracks in specimen on Test Case 4)

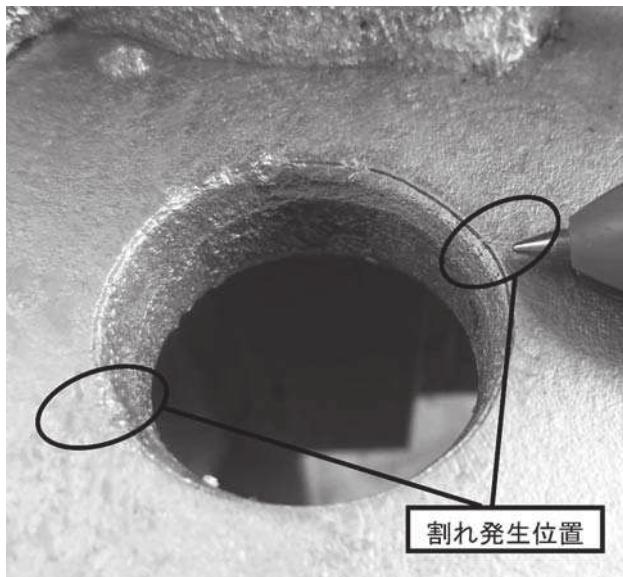


図9 孔位置4-3詳細図  
(Fig.9 Enlarged view of hole location 4-3)

表2 磁粉探傷検査による各実験体の各孔の割れの有無  
(Table2 Results of cracking investigation by magnetic-particle inspection)

実験体 Case	孔位置	割れの有無	
		PL40 側の 方向	H形鋼フランジ側 の方向
Case 1	1-1	なし	なし
	1-2	なし	なし
	1-3	なし	なし
	1-4	なし	なし
Case 2	2-1	なし	なし
	2-2	なし	なし
	2-3	なし	なし
	2-4	なし	<u>あり</u>
Case 3	3-1	なし	なし
	3-2	なし	<u>あり</u>
	3-3	なし	<u>あり</u>
	3-4	なし	<u>あり</u>
Case 4	4-1	なし	なし
	4-2	なし	なし
	4-3	<u>あり</u>	<u>あり</u>
	4-4	なし	<u>あり</u>
Case 5	5-1	なし	なし
	5-2	<u>あり</u>	<u>あり</u>
	5-3	<u>あり</u>	なし
	5-4	なし	なし

## (2) 温度測定実験結果

温度測定結果から、図6に示した各熱電対の位置のうち代表的な7点についての温度履歴曲線を図10に示す。得られた結果を以下に示す。

- ・図10より、部材が全体に浸漬完了した浸漬開始90sec後では、H形鋼ウェブのめっき抜き孔近傍にある熱電対5は約400°Cに達するが、板厚が厚いPL40の熱電対2では約110°Cであり、H形鋼ウェブとPL40では約290°Cの温度差が生じる。
- ・めっき抜き孔の中で最後に浸漬する熱電対3は、熱電

対 5 と比べて温度上昇が開始する時間に約50secの差がある。そのため熱電対 3 の温度が上昇し始める浸漬開始60sec時に熱電対 5 の温度は380°Cに達しており、熱電対 3 , 5 の温度差は360°C程度である。

- ・ H形鋼ウェブの熱電対 3 , 4 , 5 の中では、最初に浸漬する熱電対 5 の温度上昇が最も早く、浸漬開始から約90secで約400°Cに達する。

以上より、割れが孔 2 ~ 4 の位置で発生しやすい原因の一つとして、4つの孔の中で孔 1 は、溶融亜鉛めっき浸漬時に一番最後に温度が伝わる部分であり、孔 2 ~ 4 と比較すると孔周辺の部材温度とめっき浴温度との温度差は小さいことが差異として考えられる。

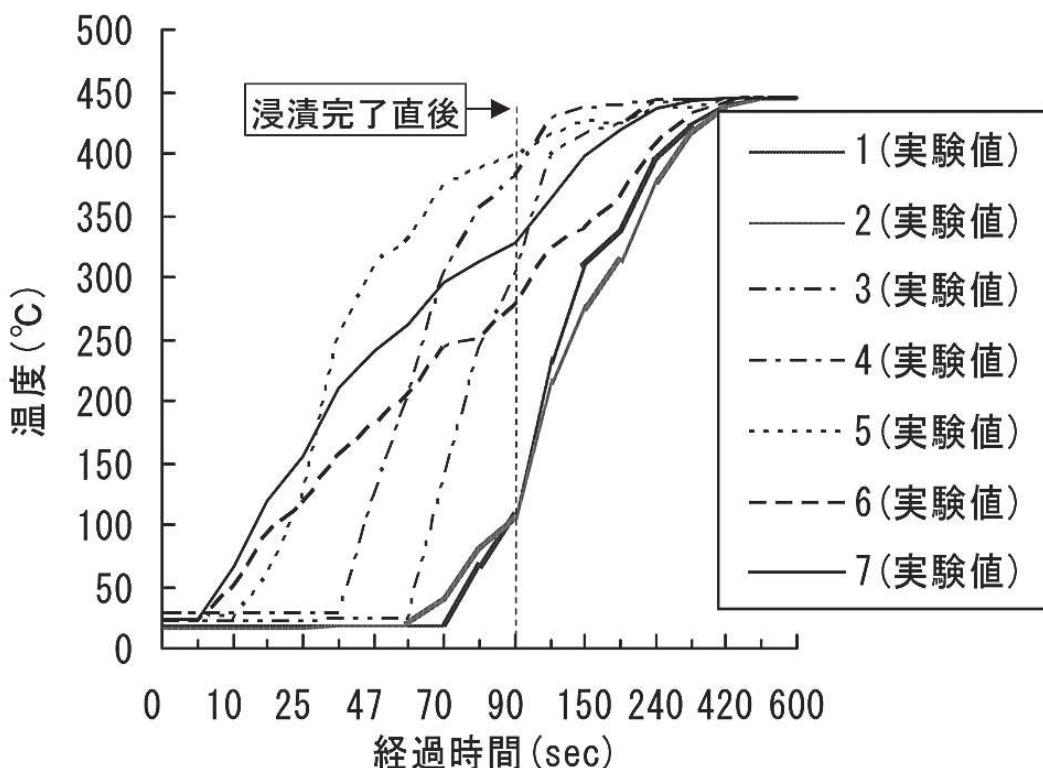


図10 Case 1 における実験値の温度履歴  
(Fig.10 Temperature history of Test Case 1)

### (3) 溶融亜鉛めっき割れ感受性測定結果

H形鋼フランジ、H形鋼ウェブ、PL25およびPL40の各材料について各3体ずつ固体発光分析により成分を測定し、式(1)より求めたCEZの平均値を表3に示す。また、材料ごとに3体測定した結果に大きな差がないことから、分析方法による誤差は小さいと考えられる。得られた結果を以下に示す。

- ・JIS G 3129鉄塔用高張力鋼鋼材(2005)<sup>6)</sup>では、CEZを0.44%以下とすると定められているが、用いた実験体はどの部位においてもCEZが0.44%を超えており、材料成分的に溶融亜鉛めっきによる割れが発生しやすい材料であると分かる。
- ・H形鋼フランジとH形鋼ウェブのCEZに大きな差がある。これは、CEZを算出する式(1)から分かるように、材料中のB(ホウ素)量が大きく影響している。個体発光分析の結果から、H形鋼フランジのBは平均0.001%であり、H形鋼ウェブのBは平均0.0003%であった。よって、H形鋼の部位ごとにB量が微量に異なり、CEZの差に繋がったと考えられる。

表3 各材料のCEZ値  
(Table3 CEZ of each material)

材料名	CEZ(%)
H形鋼フランジ	0.79
H形鋼ウェブ	0.50
PL25	0.47
PL40	0.57

### (4) 断面組織観察およびEPMA元素マッピング分析

代表的な割れが発生した試料として、図8に示した孔位置4-3のH形鋼フランジ側に発生した割れについて、断面組織の様子を図11に示す。得られた結果を以下に示す。

- ・図11より、鋼材は一般的な層状のフェライト+ペリサイト組織を成している。
- ・割れは、圧延方向に沿った小さな割れと、放射方向に進展する大きな割れの2種類発生していることが分かる。

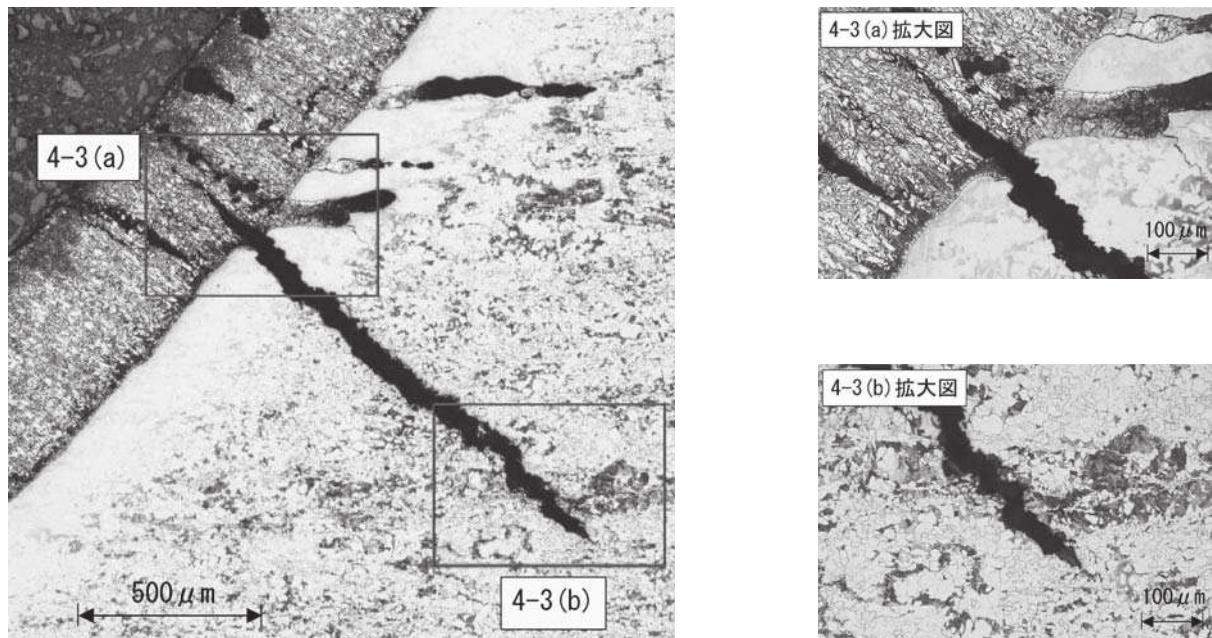


図11 孔位置4-3の断面組織  
(Fig.11 Microstructure of hole location 4-3)

さらに、図11に示した孔位置4-3についてEPMA元素マッピング分析を行い、Zn, FeおよびOの濃度分布を測定した結果を図12に示す。図12より、得られた結果を以下に示す。

- ・圧延方向に沿った小さな割れの内部にはZnが検出されていることから、これは溶融亜鉛浸漬時に発生した割れ

と推定できる。

- ・放射方向に進展する大きな割れの内部にはZnが検出されておらず、Oが検出されていることから、これらは溶融亜鉛槽から引き上げた以降に発生した割れと推定できる。

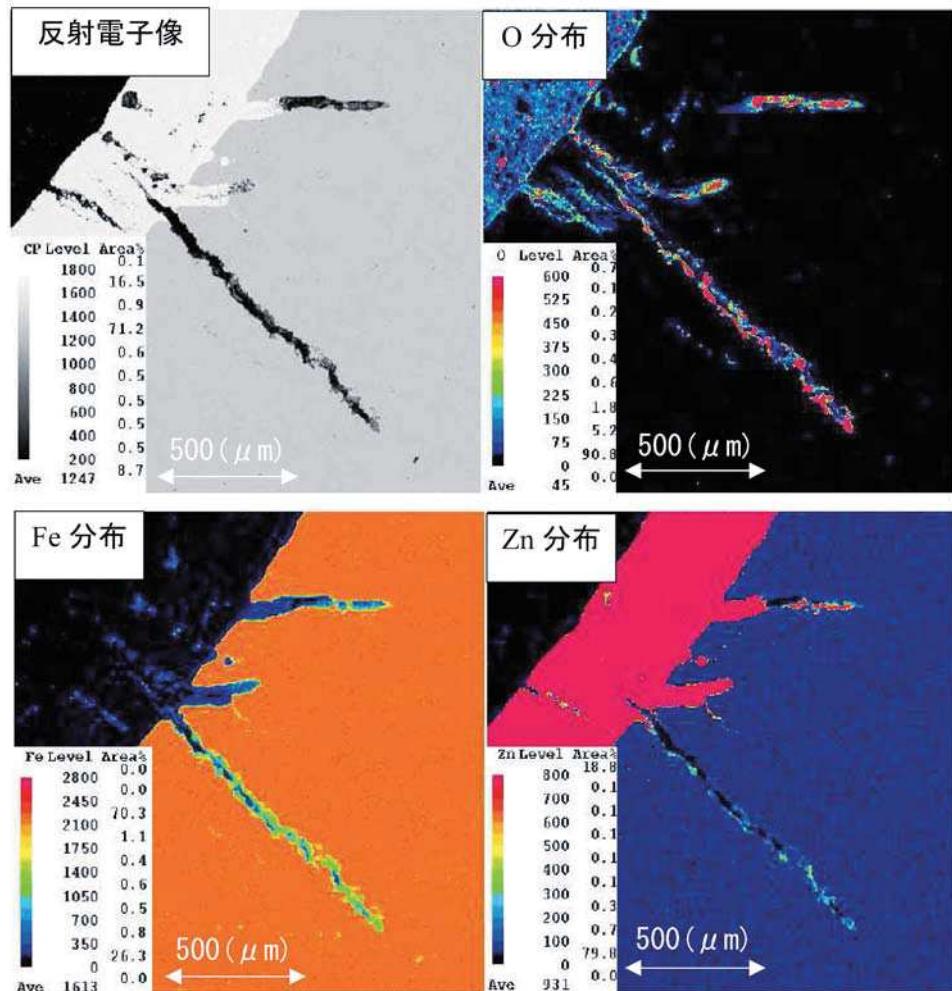


図12 孔位置4-3のEPMA元素マッピング  
(Fig.12 Results of EPMA elemental mapping at hole location 4-3)

### 3. まとめ

本稿では、柱梁仕口部のめっき割れに着目し、柱梁仕口部を抜き出した実大部分モデルのH形鋼構造物に対して、めっき抜き孔の孔径および位置を変化させた数種類の実験体を用いた溶融亜鉛浸漬実験を行った。以下に得られた結果を示す。

- 1) 実験体の材料成分を分析した結果、CEZは0.44%を超えており、溶融亜鉛めっきによる割れが発生しやすい材料であった。そのような条件下であっても、溶融亜鉛浸漬実験の結果から、実験体Case 1のようなめっき抜き孔の孔径35mm、かつ溶接ビードと孔端との隙間15mmに設定することで、溶融亜鉛めっきによる割れの発生の可能性を大きく低減できる。
- 2) その他の実験体Case 2～5の結果より、孔径25mmや溶接ビードと孔端との隙間0 mmおよび5 mmでは、割れが発生する可能性が高いと考えられる。
- 3) 割れは、めっき抜き孔端部からH形鋼フランジ側の方向に発生しやすい傾向にある。また、4つの孔の中では、孔2～4に割れが発生しやすく、孔1に割れは発生しない傾向にある。この理由として、4つの孔の中で孔1は、溶融亜鉛めっき浸漬時に一番最後に温度が伝わる部分であり、孔2～4と比較すると孔周辺の部材温度とめっき浴温度との温度差は小さいことが影響していると考えられる。
- 4) 溶融亜鉛浸漬後に割れ発生部のEPMA元素マッピング分析を行った。その結果、圧延方向に沿った小さな割れの内部にはZnが検出されたため、溶融亜鉛浸漬時に発生した割れと推定できる。また、放射方向に進展する大きな割れの内部にはOが検出されたため、溶融亜鉛槽から引き上げた後に発生した割れと推定できる。

次稿では、3次元FEM解析を用いた非定常熱伝導解析および弾塑性熱応力解析を実施し、溶融亜鉛浸漬時に本報で用いたH形鋼構造物内、特にめっき抜き孔の近傍にどのような熱応力が生じるかを明らかにする。さらに、部材構造および溶融亜鉛めっき時のめっき作業条件を変

更した状態で3次元FEMによる熱伝導－弾塑性熱応力連成解析を行い、割れが生じにくい部材構造、およびめっき作業条件を検討した事例について紹介する予定である。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建築学会：鉄骨工事技術指針－工場製作編，p.594, 2007.
- 2) ASTM Specification A143-01: Standard Recommended Practices for Safeguarding Against Embrittlement of Hot Dip Galvanized Structural Steel Products and Procedure of Detecting Embrittlement.
- 3) Lay, M.G.: Structural Steel Fundamentals - An Engineering and Metallurgical Primer, The Australian Road Research Board, Victoria, Australia, Chapter9, 1982.
- 4) 小山明久, 岩崎雅紀, 永田晋, 直原明：鉄骨柱仕口スカラップの溶融亜鉛めっき割れに関する検討, 溶接学会論文集, 第22巻, 第3号, pp.435-442, 2004.
- 5) 護雅典, 中込忠男, 鈴木至, 金昌秀：柱梁接合部における溶融亜鉛めっき割れ発生原因とその防止法, 溶接学会論文集, 第27巻, 第1号, pp.41-47, 2009.
- 6) 一般財団法人日本規格協会：JIS G 3129 鉄塔用高張力鋼鋼材, p.2, 2005.