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*

護 雅典**, 中込 忠男***, 鈴木 至****, 金 昌秀*****

Source and Prevention of Cracking of Hot-Dip Galvanization Coating for Steel Beam-Column Joints*

by MORI Masanori**, NAKAGOMI Tadao***, SUZUKI Itaru**** and KIM Changsu*****

In case of using hot-dip galvanized steel beam-column joints, cracking of hot-dip galvanization coating occurs, frequently. Simulations of the phenomenon were carried out for different configurations of steel beam column joints. Also, residual stresses by means of welding were measured to consider their effect on the phenomenon. As results, it has been verified that the residual stresses and configuration of the toe of weld were main factors of the phenomenon. Non-Scallop with circular hole type was found to be effective to prevent cracking of hot-dip galvanized steel beam-column joints.

Key Words: Beam-to-Column Joints, Hot-Dip Galvanization, Cracks at Plated Parts, Residual Stress, Non-Scallop

1. は じ め に

溶融亜鉛めっきは、発錆・腐食に対し防食性が高いことや塗装に比べ長期にわたり防食効果が保持されるなどの点から鉄骨構造では多く使用されている。特に送電鉄塔や橋梁、建築物の屋上鉄骨構造物のように直接外気とふれ雨ざらしになる構造体では塗装にかわりその地位を占めている。送電鉄塔では送電量の変化に伴い引張強度 590 N/mm^2 級鋼材の使用が検討されていく過程で溶融亜鉛めっき割れ（以下、特に断わりのない限り、めっき割れと称する）発生が主要なテーマとなり、鋼材の化学成分の検討、溶接熱影響部の硬さに関する検討などの研究が行われめっき割れを考慮した鋼材の JIS 化に結実している。また、橋梁、送電鉄塔などの大型部材、高張力鋼ではめっき脆化、めっき時の熱による応力解析などが数多く行われている¹⁻¹⁶⁾。

一方、建築鉄骨における標準仕様書である日本建築学会の標準仕様書鉄骨工事：JASS6 では、1991年に建築鉄骨において、めっき割れを防止する施工方法について初めて記載された。その当時は、「個々の部品をめっきし、めっき高力ボルトで接合する」方法を前提としていた。実際の設計や工事では柱梁溶接接合部について溶融亜鉛めっきが行われている。またその規模も大きくなり、めっき槽の限度一杯さらにはめっき層に一回では入らない部材までめっきされる場合もある。このような状況の中、建築鉄骨柱梁溶

接部のスカラップ部分などでは「溶融亜鉛めっき割れ」が数多く発生し、報告されているものも有る¹⁷⁾。建築鉄骨の実工事ではめっき割れが発生した場合、その部分を補修する、あるいはめっき割れが入った部材そのものが破棄される等してめっき割れの現物が残っていないことが多く、めっき担当者や関係者の記憶や写真にしか残っていないのが現実であり、めっき割れの発生状況が明らかになっているとは言いがたい。また、建築鉄骨構造物を対象とした溶融亜鉛めっきの手引書においてもめっき割れに関して必ずしも明確に述べられてはいない^{18, 19)}。更に、建築鉄骨では、送電鉄塔や橋梁に使用される鋼材強度に比べ低強度の鋼材の使用が圧倒的に多いが、そのような強度レベルでの実験はほとんどない。

本研究は、引張強度レベルが 400 N/mm^2 , 490 N/mm^2 級の鋼材を使用し、H 形鋼と溶接組立 H 形鋼の組み合わせによる実大試験体によるめっき割れ再現実験を行い、めっき割れの発生状況や発生原因を把握する。つぎに柱梁溶接接合部の溶接熱による残留応力を測定し、それらを総合して、めっき割れを発生させない施工条件および溶接接合部ディテールの提案を行うことを目的としている。

2. 実大溶融亜鉛めっき実験

2.1 実験概要

2.1.1 使用材料、試験体形状

柱梁実大試験体では、柱及びスチフナーは板厚 32 mm の SN490B 材とした。柱は $\text{H}-400 \times 400 \times 32 \times 32$ で溶接により組み立てた。梁は圧延 H 形鋼で、 $\text{H}-594 \times 302 \times 14 \times 23$, $\text{H}-588 \times 300 \times 12 \times 20$ を使用し、鋼種は SS400, SN490B, SM490A である。供試鋼材の機械的性質と化学成分を Table 1 に示す。なお、化学成分には、JIS G3129 による CEZ（溶融亜鉛めっき割れに対する感受性を表す指標で、JIS G3129

*受付日 平成20年 8月29日 受理日 平成20年12月27日
平成18年度秋季全国大会で発表

**正 員 ㈱竹中工務店 Member, Takenaka Corp.

***正 員 信州大学 Member, Shinshu University

****正 員 住友金属工業㈱ Member, Sumitomo Metal Co.

*****学生員 信州大学大学院 Student Member, Graduate of Shinshu University

Table 1 Mechanical properties and chemical component of materials

Material	Y.P (N/mm ²)	T.S (N/mm ²)	E.L (%)	Y.R (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)	B (%)	Ceq (%)	Pcm (%)	CEZ (%)
A PL-32 SN490B	372	539	29	69.0	0.13	0.24	1.30	0.017	0.004	0.19	0.07	0.09	0.02	0.012	0.002	—	0.0006	0.38	0.22	0.62
B H-594×302×14×23 SS400	318	429	31.5	74.1	0.10	0.16	0.80	0.045	0.022	—	—	—	—	—	—	—	—	0.24	0.15	0.22
C PL-32 SN490B	370	521	28	71.0	0.17	0.39	1.40	0.016	0.004	—	0.01	0.03	Tr.	—	0.002	—	—	0.43	0.25	0.39
D H-588×300×12×20 SM490A	353	551	29	64.1	0.17	0.24	1.16	0.033	0.024	0.35	0.10	0.09	0.01	Tr.	0.004	—	Tr.	0.40	0.26	0.40
E H-588×300×12×20 SN490B	373	531	30	70.2	0.16	0.23	1.17	0.014	0.004	0.21	0.07	0.12	Tr.	Tr.	0.005	0.008	Tr.	0.39	0.24	0.38

Table 2 Welding condition

Layer	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Weld speed (cm/min)	Interpass temperature (°C)	Heat input (kJ/cm)
1	1	330	36	39.2	64	18
2	2	330	36	28.2	129	25
3	3	330	36	27.5	196	26
4	4	330	36	24.5	254	29
5	5	330	36	48.7	294	15
5	6	330	36	40.3	244	18
6	7	330	36	54.9	285	13
6	8	320	34	27.0	120	24
7	9	320	34	30.2	191	22

Fig. 1 Configuration of H-section steel model (Type 2)

では0.44%以下と規定されている)も合わせて示す。材料符号のCは高炉製品であり、それ以外は海外製品も含む電炉材である。なお、完全溶込み溶接の溶接材料はYGW11を使用、溶融亜鉛めっきの仕上がりを考慮し、最終仕上げ層のみYFW-C50DMを使用した。また、隅肉溶接には、YGW11を使用した。溶接条件は、パス間温度350℃以下、入熱量40kJ/cm以下としその一例をTable 2に示す。

柱梁試験体は、Fig. 1に示す十字試験体(以下、Type 2と称する)と同図の破線部分が無いT形試験体(以下、Type 1と称する)とした。いずれも柱通し形式とし、梁にスカラップを設けている。Type 1では複合円形スカラップ、Type 2ではスカラップを設けず丸孔をあけたもの(以下、ノンスカラップ+丸孔形式と称する)と複合円形スカラップで

Fig. 2 Type of Scallop and form of corner of Stiffener**Table 3** Combination of specimens and materials

	Type	Material		Web of beam		Stiffener	
		Column and Stiffener	Beam	Composite Scallop	Non-Scallop + Circular hole	35R Scallop	Circular hole
NO-1	1	A PL-32	B H-594×302	○	—	○	—
NO-2	1			○	—	○	—
NO-3	2			—	○	○	—
NO-4	2			○	—	—	○
NO-5-1	2	C PL-32	D H-588×300	—	○	○	—
NO-5-2	2			○	—	—	○
NO-6-1	2		E H-588×300	—	○	○	—
NO-6-2	2			○	—	—	○

ある。柱、梁には縦、横にスチフナーを設けた。スチフナーのコーナー部の溶融亜鉛抜き孔は、従来の四分の一円型スカラップ形式(35Rスカラップと称する)と丸孔形式とした。Fig. 2にスチフナーコーナー部におけるスカラップまたは丸孔の詳細図を示す。図中のdは丸孔の位置を示す。

実験に供した2体のType 1と6体のType 2における使用材料、スカラップ形状、スチフナー形状部の組合せをTable 3に示す。めっき割れの対象となる梁ウェブのスカラップの個所数は、Type 1では2個、Type 2では4個である。Type 2において丸孔は、柱梁交点から対角方向へ位置を変化させて設けた。対象となるスカラップの位置番号とめっき浸漬方向およびType 2の丸孔の位置関係をFig. 3に示す。同図に示す①～④が割れの対象となる梁ウェブのスカラップの位置であり、丸孔の位置はそれぞれd=0,10,20,40mmとした。

スチフナー部でめっき割れの対象となる溶融亜鉛抜き孔の

Fig. 3 Direction of dipping and position of Scallop

Table 4 Number of Cracks – composite Scallop (Web of beam)

	Type	Cracking/ Number of Scallop	Tested site	Place of cracking
NO-1	1	2/2	①,②	Bead
NO-2	1	1/2	①	Bead
NO-4	2	1/4	①	Bead
NO-5-2	2	4/4	①,②,③,④	Bead:3,Fillet:1
NO-6-2	2	4/4	①,②,③,④	Bead:4,Fillet:3
Total		12/16		

個所数は、Type 2 では36、Type 1 では28である。また、Fig. 1 に示すように試験体の左右でスチフナーのスカラップ部や溶接止端部のまわり溶接部は棒グラインダーにより仕上げたものと仕上げないものを半分ずつとした。

2.1.2 実験方法

文献 16) によれば、浸漬速度が遅い場合、先にめっき層に浸漬される部分でめっき浴の温度差による熱応力の違いが大きくなり結果としてめっき割れ発生の可能性が大であるとされている。したがって、めっき割れの発生状況を明らかにするため、めっき割れが発生する可能性が高くなるであろう条件としてめっき層への浸漬速度を施工時の2～3m/分より遅い0.5m/分と設定した。めっき作業は一般的な工程（脱脂—酸洗—水洗—フラックス処理—めっき—冷却）で行った。また、めっき浴の温度は450℃と設定し実験時は447～455℃の範囲であった。浸漬にあたってはめっき浴面に対しおおそ45度の角度とし（Fig. 3）、そのままの状態適切な亜鉛合金層が生成できるように設定した時間、浸漬を行った。浸漬時間は、13～15分とした。浴中で特に揺動は行っていない。設定時間後取り出し、水冷工程を経て自然冷却した。十分冷えてからめっき割れを観察した。目視確認のあとスカラップ及び溶融亜鉛抜き孔周辺について浸透探傷法による全箇所検査を行った。

2.2 実験結果

2.2.1 複合円形スカラップにおけるめっき割れ

梁ウェブの複合円形スカラップにおける割れ発生状況を

Table 5 Number of Cracks – 35R Scallop (Stiffener)

	Type	Cracking/ Number of Scallop		Place of cracking
		No grinding	Grinding	
NO-1	1	12/14	0/14	Bead:8,R:4
NO-2	1	2/14	0/14	Bead:1,R:1
NO-3	2	2/18	0/18	R:2
NO-5-1	2	0/18	0/18	—
NO-6-1	2	1/18	0/18	Bead:1
Total		17/82	0/82	

Table 6 Number of Cracks – non-Scallop+circular hole (Web of beam)

	Type	Cracking/ Number of Scallop	Tested site	Place of cracking
NO-3	2	0/4	—	—
NO-5-1	2	1/4	②	R:1
NO-6-1	2	1/4	①	R,Fillet:1
Total		2/12		

Table 7 Number of Cracks – non-Scallop+circular hole (Stiffener)

	Type	Cracking/ Number of Scallop		Place of cracking
		No grinding	Grinding	
NO-4	2	0/18	0/18	—
NO-5-2	2	0/18	0/18	—
NO-6-2	2	0/18	0/18	—
Total		0/54	0/54	

Table 4 に示す。表中には、めっき割れの発生数、めっき割れの発生個所を示す。発生個所におけるビードというのは溶接ビード止端部近傍、フィレットとはH形鋼のフィレット部をさす。NO-6-2 では、ビード部とフィレット部の両方にめっき割れが発生していたことを示す。また、発生個所①は Fig. 3 におけるスカラップ位置を示す。この表からわかるように複合円形スカラップの場合、全ての試験体でめっき割れが発生している。ここで、複合円形スカラップではフィレット部、溶接部端部及びR部で発生する可能性がある。どこか1箇所でもめっき割れがあった場合、割れ発生1箇所と数えた。また、部分的にめっき割れの発生したNO-2、NO-4 では割れの発生した個所は、柱梁溶接部に近接している Fig. 3 における①であった。

35Rスカラップにおけるスチフナーコーナー部の割れ発生状況を Table 5 に示す。同表からわかるように、溶接止端部を仕上げた部分では、めっき割れは無しであった。

2.2.2 ノンスカラップ+丸孔形式におけるめっき割れ

梁ウェブのノンスカラップ+丸孔形式における割れ発生状況を Table 6 に示す。表中の「R」とは丸孔加工部の円周部をさす。また、部分的に割れの発生したNO-5-1、NO-6-1 では、割れの発生した個所は、Fig. 3 における①および②であり、③、④に割れは発生しなかった。

ノンスカラップ+丸孔形式におけるスチフナーコーナー部の割れ発生状況を Table 7 に示す。同表からもわかるように、すべてにおいて割れは見られなかった。

2.2.3 割れの状況・めっき抜き孔周囲状況の写真

Fig. 4, Fig. 5 にスカラップ部の溶接止端部および35Rス

Fig. 4 Scallop
(No consumption)

Fig. 5 Stiffner 35R
(No consumption)

Fig. 6 Scallop (consummation)

Fig. 7 Non Scallop+circular hole

Fig. 8 Base metal

Fig. 9 Fractographic study

カラップの溶融亜鉛抜き孔周囲でのめっき割れ状況を示す(矢印が割れを示す)。

Fig. 6は同様なスカラップ部の溶接止端部であるが止端部を仕上げたもので、めっき割れは発生していない。Fig. 7は、ノンスカラップ+丸孔形式としたものである。またFig. 8は母材部のめっき割れを示す。場所は柱のスチフナー部でFig. 3の右下部分であり、先にめっき浴に浸漬している。

2.2.4 割れ破面の観察

Fig. 8に示す母材部分のめっき割れについて、破面を含む部分を切り出し、Fig. 9のように割れに沿ったA面と割れと直交するB面について顕微鏡観察およびSEM観察、EDXによる分析を行い、めっき割れの状況、合金層の形成状態、亜鉛の浸透状況などを確認した。めっき割れに沿った面のEDX分析結果をFig. 10に示す。上が合金層部分、下は割れ破面内部を示すが、両者とも同じレベルで亜鉛が検出されている。割れと直交方向の光学顕微鏡写真結果をFig. 11に示す。また、SEMの分析結果をFig. 12に示す。破面表面の亜鉛の付着及び破面内部への浸透が光学顕微鏡、SEMで検出面されており、めっき浴中での割れ発生を示している。断面上部には亜鉛および合金層を見ることができ、正常にめっきがされたことを示している。Fig. 11の(b)の矢印部分に割れ部分を示すが、めっき合金層が存在している。両断面からわかるように破面内に亜鉛が浸透している。

Fig. 10 Result of EDX Analysis

Fig. 11 Result of observation of optical

Fig. 12 Result of SEM Analysis

2.3 実験結果の考察

2.3.1 スカラップ・めっき抜き孔の形状・位置とめっき割れ発生の関係

割れ発生個所の写真からわかるように、割れ発生部分は溶接部近傍であり、応力集中が起こりやすい個所であった。複合円形スカラップのようにその端部形状を滑らかにした場合でもめっき割れが発生する。

それに対し、ノンスカラップ+丸孔形式とした場合、全体的に割れの入る確率はかなり低くなる。複合円形スカラップのような応力集中個所がないことがその理由と考える。

しかしながら、スカラップ、ノンスカラップの場合とも溶接部近傍にはめっき割れが発生している。溶接残留応力や母材材質の影響を別途考える必要がある。

次に、スカラップ等の位置との関係を考えてみる。Table 4 および Table 6 によれば、複合円形、ノンスカラップでそれぞれ 1 箇所のみめっき割れが入った試験体がある。割れの入った箇所は、Fig. 3 で示す①が 3 箇所、②が 1 箇所である。①、②ではめっき割れが発生し易く、③、④では割れが発生しにくいといえる。冷間成形角形鋼管の実験²⁰⁾では後からめっき浴に浸漬される側にめっき割れが多く発生したが、今回は発生しなかった。丸孔の位置 (Fig. 3 の d 寸法) が溶接部に近いことを考えると溶接残留応力が割れ発生の原因と考えることができる。

2.3.2 鋼材質と割れ発生の関係

Fig. 8 に示す母材にめっき割れが入った試験体の材料の CEZ は 0.62% と他に比べ高い値を示した。CEZ は本来、溶接熱影響部のめっき割れに関与する指標であるが、引張強度 490 N/mm² 級の鋼材でも CEZ が高い場合、母材のめっき割れに関係する可能性を示している。

またフィレット部にめっき割れが発生している。一般的に H 形鋼のフィレット部は他の部分に比べ材質が劣る²¹⁾といわれ、また、寸法変化が始まる部分で応力集中が起こりやすい。めっき割れについていずれかが原因と考えられるがそれらの影響は今回の実験では明確になっていないので、今後の課題とする。

2.3.3 めっきと割れ発生時期

溶融亜鉛めっきは、めっき浸漬、引上げ、温水冷却、空冷の工程を経る。2.2.4 の破面観察からわかるように破面内に亜鉛が浸透し、合金化している。このことからめっき浴中での割れ発生であり、めっき後の温水冷却や空冷段階での割れではないといえる。

3. H 形鋼柱梁接合部残留応力測定実験

3.1 実験概要

部材の熱処理や溶接加工、負荷などによって生じる残留応力は、実負荷 (実荷重) が許容値であっても、実負荷に残留応力が付加される形で構造物の強度や疲労強度を低下させてしまうことが知られている。溶融亜鉛めっき割れの発生要因として考えられる因子として、熱応力のほかに溶接や加工の際に生じる残留応力が割れの起因となっていることが考えられる。

本章では実際にめっき浸漬実験をおこなった試験体を再現し、残留応力を測定することで接合部ディテールによる残留応力の違いについて検討する。

3.2 実験方法

H 形鋼柱梁接合部亜鉛めっき浸漬実験で用いた実大柱梁接合部を再現した。試験体形状を Fig. 13 に示す。溶融亜鉛

抜き孔は複合円形スカラップと直径 24 mm の丸孔を、Fig. 2 の d が 10 mm, 25 mm, 50 mm となるように配置した 4 種とした。

鋼材は柱材には SS400、梁材には SN400B を用いた。実際にめっき割れが見られた箇所においてウェブ面に三軸ゲージを孔小口に単軸ゲージを貼付した。歪測定位置を Fig. 14 に示す。三軸ゲージの 3 つの軸はそれぞれ 45 度ずつ角度をつけ、貼付方向は R 部の接線方向とした。また、単軸ゲージの貼付方向も同様に R 部の接線方向である。同図には孔周りにおける最大応力発生位置を○印で併せて示す。歪ゲージ貼付後周辺を段階的に切断していき、最終的にその周辺を全て切断して残留応力を完全に開放しその歪変化量より残留応力を算出した。また切断はすべてバンドソーおよびラクソーの 2 種における電動鋸にて切断し、切断の際の加工歪ができる限り少なくなるようにした。

試験体溶接条件を Table 8 に示す。同表には一例として複合円形スカラップにおける溶接条件を示す。設定入熱 30 (kJ/cm), 設定パス間温度 350 (°C) とし、実際のパス間温度の管理は温度チョーク、接触温度計の 2 種を用い、管理し

Fig. 13 Specimen shape

Fig. 14 Measurement location of strain

Table 8 Welding condition

Composite scallop							
Layer	Current (A)	Voltage (V)	Start time	Finish time	Arc time (sec)	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)
1	330	41	0'00"	1'04"	64	28.9	—
2	330	41	1'04"	1'58"	54	24.4	—
3	330	41	1'58"	3'15"	77	34.7	320
4	330	41	5'56"	7'30"	94	42.4	312
5	310	41	10'37"	11'33"	56	23.7	310
6	290	41	13'37"	14'32"	55	21.8	—

Fig. 15 Final form after cut specimen shape

た。なお、溶接材料はH形鋼柱梁接合部亜鉛めっき浸漬実験に用いたものと同様であるが、最終層まで YGW11 で行った。

3.3 実験結果

完全に歪が開放された切断後における最終形状拡大写真を Fig. 15 に示す。試験体の最終的な大きさはおよそ 10 mm×15 mm、板厚方向は 12 mm のまま切断していない。Table 9 に切断前に作用していたと想定される歪および最大主歪、最小主歪、最大主応力を示す。歪測定位置はいずれも歪の値がもっとも大きかった位置を示しており、いずれも梁フランジ溶接位置にもっとも近い箇所であり、主歪の方向は測定箇所 R 部における接線方向である。

最大主応力は以下の式 (1) により算出した。

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{\max} + \nu_{\min}) \quad \dots (1)$$

$$= \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{1-\nu} - \frac{1}{1+\nu} \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 \right\}} \right]$$

$\sigma_{\max}$: Maximum principal stress

E : Young modulus

$\epsilon_{\max}$: Maximum principal strain

ν : Poisson ratio

$\epsilon_{\min}$: Minimum principal strain

ϵ_1 : Strain in the direction of the first axis

ϵ_2 : Strain in the direction of the second axis

ϵ_3 : Strain in the direction of the third axis

3.4 考察

残留応力を測定した結果、Fig. 16 からスカラップ、丸孔 (10, 10)、丸孔 (25, 25)、丸孔 (50, 50) の順に最大主応力の値が減少していくことが分かった。特に複合円形スカラップ、丸孔 (10, 10) で高い値を示した。これらのディテールは H 形鋼柱梁接合部亜鉛めっき浸漬実験でめっき割れが

Table 9 Values of $\epsilon_{\max}$, $\epsilon_{\min}$ and $\sigma_{\max}$ in four details

	$\epsilon_1(\mu\epsilon)$	$\epsilon_2(\mu\epsilon)$	$\epsilon_3(\mu\epsilon)$	$\epsilon_{\max}(\mu\epsilon)$	$\epsilon_{\min}(\mu\epsilon)$	$\sigma_{\max}(\text{N/mm}^2)$
Scallop	2151.7	-627.1	1427.1	2302.5	-777.9	477.5
(10,10)	1691.8	-473.4	1245.4	1864.9	-646.5	385.6
(25,25)	609.7	63.8	466.7	639.0	34.4	149.8
(50,50)	-646.4	222.2	-343.0	241.5	-665.7	9.7

Fig. 16 Difference of $\sigma_{\max}$ in four details

確認されたものであり、これらの結果からスカラップの有無と孔位置の差によるめっき割れへの影響は応力集中部での残留応力の大きさにより概ねその傾向が説明できる。また、今回歪ゲージで測定をしていない箇所（溶接が無い箇所）では、溶接残留応力が無いが、めっき熱による熱応力の集中が関与すると考える。

4. 結 論

実大溶融亜鉛浸漬実験及び溶接部残留応力測定実験から得られた結果及び割れ発生を防ぐあるいは低減させる方策は以下の通りである。

- 1) 溶融亜鉛めっき抜きを丸孔とすることで溶接残留応力が低減できる。そしてその位置を柱梁の交点からウェブの中心部へ移動させることで、溶接の際に発生する孔周辺の引張残留応力を低減することができる。少なくともフィレット端あるいは隅肉溶接止端から 10 mm 以上はなすと効果がある。
- 2) 溶融亜鉛めっき抜きを丸孔とすることでめっき割れを防止できる。
- 3) スチフナーのスカラップまわりの溶接止端部を仕上げることで、割れ発生を低減することが可能である。
- 4) 割れ破面観察結果より、破面内に亜鉛が浸透し合金化していることから、めっき浴中で割れが発生していると考えられる。これは既往研究成果（例えば参考文献16）とも一致している。

今後はめっき塗装の有効性の確認、めっき割れ発生とめっき浴への浸漬順序・めっき抜き孔位置の関係の検討を進める予定である。

謝 辞

この実験は溶接学会・建築鉄骨溶接特別研究会の研究の一環として行われた。研究を進めるにあたり、試験体製作・めっき作業、温度測定他で(株)デンコーの中島氏、住友金属テクノロジー(株)の緒方氏に多大な協力をいただきました。

両氏を含め、関係各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Japanese Standards Association; JIS G3129: 2005 High Tensile Strength Steel for Tower Structural Purposes.
- 2) T. Takeda; Evaluation Method of Zinc Induced Cracking, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 71-4 (2002), 32-38. (in Japanese)
- 3) T. Takeda, K. Kanaya, K. Yamato, K. Eiro, Z. Chano, S. Kanazawa, T. Hiroki and T. Iezawa; Development of 60Kgf/mm² Steel for Power-transmission Pipe Tower and Its Resistance to Liquid Zinc Embrittlement, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan (1984), 124-130. (in Japanese)
- 4) Y. Miyauchi, G. Etoh, K. Funami, H. Shimizu and H. Yasui; Effect of Hot Dip Galvanizing on Strength of 60Kgf/mm² Class Tensile Strength Steel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers N0.932-1, P.67-69, 1993. (in Japanese)
- 5) K. Kanaya, T. Iezawa, S. Kanazawa and Y. Ishida; Penetration Behavior of Zn along Prior γ Grain Boundary during Galvanizing of Steel Structures, Tomoe Corporation Technical Report No.10 P.67-75. (in Japanese)
- 6) T. Iezawa, N. Inoue, K. Hirano, T. Okazawa and T. Ozeki; Effect of Boron on Liquid Zinc Induced Embrittlement in Heat Affected Zone of STK590 Steel Tube for Power Transmission Tower: Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan (1993) 79-9, 1108-1114. (in Japanese)
- 7) T. Iezawa, T. Yamasita, A. Kato, K. Kanaya, S. Kanazawa and S. Aihara; Study on Hot-Dip Galvanizing Steel Bridge (VIII)-Examination of Prevention Method for Molten Zinc Induced Cracking in Bridge Girders-, Tomoe Corporation Technical Report No.8 P.87-95. (in Japanese)
- 8) T. Ozeki and K. Amano; Effect of Alloying Elements on Liquid Zinc Embrittlement of HT590Mpa Class Steel Plate, Kawasaki Steel Giho Vol.25, No.1, P.20-26 1993.3. (in Japanese)
- 9) Y. Kikuta, T. Araki, M. Yoneda and K. Uchikawa; Effect of Fabrication Procedure on Liquid Metal Embrittlement Cracking in Welded Steel Structures by Molten Zinc, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 4-4 (1986), 93-99. (in Japanese)
- 10) M. Nagano, Y. Mikami, T. Miyazawa, K. Kanaya, K. Yoshida and Y. Shiniwa; Prediction and Prevention of Liquid Zinc Induced Cracking in Tubular Structures of 590MPa Steel Based on Elastoplastic-Thermal Stress Analysis, JHPI Vol.41, No.1 P.17-21 2003.1.
- 11) N. Nagano, T. Miyazawa, N. Asayama and K. Yoshida; Experimental Studies on Liquid Zinc Induced Cracking of High Tensile Strength Steel Tubes for Tower Structural Purpose under Hot-Dip Galvanizing, JHPI Vol.38, No.5 P.268-276 2000.9. (in Japanese)
- 12) E. Hongo and H. Urushibara; Study on crack prevention of hot-dipplating on steel pipe power transmission towers, 鉄塔 No.89 P.1-128 1994.10. (in Japanese)
- 13) H. Toi and LEE J-M; Thermal Elasto-Plastic Damage Analysis of Pylon Members in Hot-Dip Galvanization, JSMA Journal Series A Vol.65, No.632 P.723-730 1994.4. (in Japanese)
- 14) M. Takagaki and Y. Toi; Damage Analysis of Steel Structural Members under Hot-Dip Galvanization by Finite Element Method Considering Thermo-Damage-Embrittlement Coupling, Seisan Kenkyu (Institute of Industrial Science The University of Tokyo) 55巻, 3号 P.309-312 2003. (in Japanese)
- 15) T. Iesawa, S. Kanazawa, T. Yamasita, H. Toi and K. Kohashi; Thermal-Elasto-Plastic Analysis on Occurrence of Liquid Zinc Induced Cracking in Bridge Girder under Hot-Dip Galvanizing, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan (1994), 80-12, 950-955. (in Japanese)
- 16) Tomoe Corp.; -解説-溶融亜鉛めっき大型構造物のめっき割れ現象とその防止法, 2001.1. (in Japanese)
- 17) A. Koyama, M. Iwasaki, S. Nagata and A. Jikihara; Study on Galvanizing Cracks on Scallops of Steel Column Connection Joints, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 22-3 (2004), 435-442. (in Japanese)
- 18) Japanese Society of Steel Construction; 建築用溶融亜鉛めっき構造物の手引き (改訂版), 2002.2.
- 19) Architectural Institute of Japan; JASS6: 2007.
- 20) I. Suzuki, T. Nakagomi, M. Mori, C. Kim; Experiment on Soaking Architectural Steel Frame in Galvanization (Part 1), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan 2008.
- 21) T. Shima and T. Nakagomi; Mechanical properties including weldability of rolled H section steels, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 23-3 (2005), 442-451. (in Japanese)