溶融亜鉛めっき釜破損起点部材質調査結果に関する一考察

正会員 三 崎 弘 司* 金 井 英 一**
 白 倉 篤 志** 楠 和 憲***
 谷 野 忠 和**** 正会員 矢 島 浩****

A Study on Material Properties of Damage Starting Point of Hot Dip Galvanizing Bath

by Koji Misaki, *Member* Eiichi Kanai
 Atsushi Shirakura Kazunori Kusunoki
 Tadakazu Tanino Hiroshi Yajima, *Member*

Summary

At start-up operation of hot dip galvanizing baths to galvanize steel products, several leakage accidents of liquid zinc due to the damage at the vicinity of welded parts between side and bottom plates have been reported. The authors reported in the previous paper that the material of bottom plate of the damaged bath were examined by metal structure observation, SEM observation, EPMA analysis, hardness measurement and tensile test and it was concluded no problems were found in the material. In addition, they guessed the effect of liquefied metal soaking into grain boundary of the metal as a cause of the damage because lead and zinc were found inside of the crack. This paper, following previous one, reports that the heat affected zone of applied material at the damaged part does not have any peculiarity according to the results of Charpy impact test and maximum hardness test for a heat affected zone of the new sample of the same virgin material. Further it specifies the part where crack occurs by examining crack profile of newly taken sample and the sample applied in the previous paper.

1. 緒 言

鉄鋼製品の亜鉛めっきに使用される釜において新釜を立ち上げる際、底板と側板との溶接部近傍に亀裂が発生し、内部の溶融亜鉛が漏出する破損事故が過去に複数報告されている^{1)~3)}。

筆者らは既報⁴⁾で、新たに破損しためっき釜から採取した溶接部近傍の底板(板厚 60mm の NAGP⁵⁾鋼板)について金属組織観察、SEM 観察・EPMA 分析、硬さ測定、および室温・高温静的引張試験を実施し、次のことを報告している。

①組織はフェライトとパーライトが層状をなす通常の組織であった。

②亀裂は結晶粒界を縫って伝播していた。

③亀裂内部には Pb(鉛)および Zn(亜鉛)が検出された。

④マイクロビッカース硬さ計による亀裂部断面の硬さは、溶接金属部で Hv165~225、熱影響部で Hv175 程度、母材表面付近の亀裂部近傍で Hv120 程度であった。この Hv120 は引張強さに換算⁶⁾して 390N/mm²(40kgf/mm²) であり、NAGP 鋼板としては正常な値であった。

⑤室温静的引張試験結果は、圧延方向・板厚方向で差がなく、9 本の試験片の引張強さが平均 391 N/mm²、伸びが 40%であり、それぞれ NAGP 鋼の常温のカタログ値⁵⁾である 399 N/mm²と 41%に近く、正常な値であった。

なお、上記④、⑤で記した数値は、破損後の釜から採取した試験片であるため、約 70 時間をかけて 500℃前後までの加熱を経験した材料の試験結果であった。

本報は、引き続き NAGP 鋼の新材を用いて実施した溶接熱影響部の最高硬さ試験結果、熱影響部外側の温度履歴を模擬した材料試験片によるシャルピー衝撃試験結果を示して、使用材料に特異性がなかったことを示すとともに、新たに採取した亀裂断面のマクロ組織と既報⁴⁾の結果を合わせて亀裂発生部位を特定するものである。

* 関西設計株式会社

** 株式会社ニチゾウテック

*** 日立造船株式会社

**** 長崎総合科学大学大学院

4. シャルピー衝撃試験

先の Fig. 1 で示したとおり、破損釜の亀裂は溶接熱影響部の外側に位置している。この部分の材料の靱性を探るため、溶接熱影響部境界から外側の熱履歴を模擬して人工的に熱履歴を与えた供試材でシャルピー衝撃試験を実施した。ただし、溶接による加熱ではないため、溶接金属部分の収縮によるひずみの効果は含まれていない。試験は、厚さ 35mm の NAGP 鋼処女材に、5 種類の熱処理(400℃、500℃、600℃、700℃、および熱処理なし)を施した試験体を各 21 個作成し、-50℃～100℃(25℃ピッチ)の各試験温度で 3 体のシャルピー衝撃試験を実施した。ノッチ形状は 2mmV である。熱処理時間は 1 時間とし、冷却は空冷によった。

各熱処理材の吸収エネルギーと試験温度の関係を Table 2 および Fig. 4 に示す。なお、Table 2 には、遷移温度近傍の 25、0、-25℃での各試験結果を表示した。

Table 2 The absorbed energy near transition temperature.

熱処理	試験温度 ℃	吸収エネルギー J				脆性破面率 (平均) %
		試験1	試験2	試験3	平均値	
なし	25	119.4	122.3	122.3	121	14
	0	88.0	60.9	76.9	75	45
	-25	18.2	18.2	24.6	20	82
400℃	25	125.2	122.3	122.3	123	14
	0	88.0	60.9	82.4	77	46
	-25	12.1	12.1	18.2	14	79
500℃	25	113.6	122.3	116.5	117	18
	0	93.6	82.4	79.7	85	36
	-25	22.4	22.4	22.4	22	76
600℃	25	113.6	110.7	116.5	114	18
	0	90.8	63.5	60.9	72	45
	-25	18.2	20.3	26.8	22	82
700℃	25	96.4	131.0	119.4	116	26
	0	36.0	58.3	48.1	47	59
	-25	12.1	8.2	8.2	9	86

Fig. 4 The relationship between absorbed energy and testing temperature.

400℃、500℃、600℃熱処理材と熱処理なし材の各試験温度における吸収エネルギーに顕著な差は認められなかった。なお、700℃熱処理材の 0℃での吸収エネルギーは 47J であるが、NAGP 鋼と同等の強度を有する溶接構造用炭素鋼 SM400B 材の規格値(27J 以上)⁸⁾を満足している。

以上により、破損釜の溶接熱影響部境界から外側の靱性は、

母材とほぼ同等であったものと考えられる。

5. マクロ組織および破面観察による亀裂位置の特定

5.1 試験片-1

破損釜に発生していた亀裂の位置を特定するために、未貫通亀裂発生部分からテストピースを切り出し、2mm ピッチで 34 断面にスライスした断面のマクロ組織を観察するとともに、割れを強制的に破断して、スライス断面を再度重ねた破面を観察して亀裂の起点部を推定した。採取した試料の外観状況を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 The outside view where specimen -1 is taken.

1) 破面観察

試験片-1 の破面を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 The condition of the fracture surface of specimen -1.

最も明確な放射状の模様が集合するところで、割れ先端までの距離が長いところを亀裂の発生点と推定すれば、断面 No.21 近傍に該当し、亀裂の起点は断面 No.21 近傍と考えられる。

2) マクロ組織観察

上記で亀裂の起点と考えた断面 No.21 を中心に No.18～No.24 までのマクロ組織写真を Fig. 7-a)～Fig. 7-g)に示す。これらの中で開口幅が最も大きい断面のマクロ写真は Fig. 7-d)(No.21)であり、また、下向き直進部分が長い。この部分で亀裂開口力の大きかったことが推察され、マクロ組織観察からも亀裂の起点が No.21 近傍であると推定できる。

Fig. 7-d) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 21).

Fig. 7-a) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 18).

Fig. 7-e) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 22).

Fig. 7-b) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 19).

Fig. 7-f) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 23).

Fig. 7-c) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 20).

Fig. 7-g) Macrostructure of specimen -1 (Cross section 24).

また、いずれの断面でも亀裂が熱影響部の外側に生じていることがわかる。

5.2 試験片-2

同じ釜について既報⁴⁾で示した別試料の亀裂部の外観と断面マクロ写真を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 9 の断面は、Fig. 8 の外観で亀裂がビードに平行に発生していて、何処の断面を採っても大差がないと考えられること、また、中央付近の開口幅が端部に比べて大きく、その付近に亀裂の起点があると推察されたことから、亀裂長さの中央付近を切断したものである。したがってほぼ亀裂起点部に近い断面であると考えている。

また、Fig. 9 中のマクロ組織写真の下にはマイクロビッカース硬さ計による硬さ分布を、亀裂の長さに縮尺を合わせて示した。

Fig. 8 A crack occurred in specimen - 2.

Fig. 9 The macrostructure of a cross section of specimen - 2 and the distribution of Vickers hardness.

Fig. 9 でも、マクロ組織およびビッカース硬さ分布から、亀裂が熱影響部外側の母材にあることが明確である。

5.3 その他の試験片-3～試験片-6

当該の釜については、破損直後の調査で上記 5.1、5.2 以外に 2 カ所(A 部・B 部とする)の亀裂発生部でマクロまたはミクロ組織観察が行われた。B 部の亀裂は長いものであったため中央付近、端部、亀裂起点部の 3 カ所で断面観察されている。

A 部を試験片-3、B 部の中央付近を試験片-4、端部を試験片-5、亀裂起点部を試験片-6 とし、これらの断面写真を Fig. 10～Fig. 13 に示す。試験片-3～試験片-6 をマクロ組織写真で見ると、試験片-3(Fig. 10-a))が最も溶接止端部に近いが、それでさえミクロ組織(Fig. 10-b))を見ると、熱影響部から外側に外れていることがわかる。試験片-6 の亀裂起点部断面ではマクロ組織写真(Fig. 13-b))でも亀裂が熱影響部の外側にあることがわかり、亀裂部のミクロ組織写真(Fig. 13-c))により一層そのことが明らかとなる。これらのうち、試験片-6 以外は亀裂の起点を特定した上での断面観察ではないが、いずれの亀裂も熱影響部の外側にあることがわかった。

1) 試験片-3 (A 部)

Fig. 10-a) The macrostructure of specimen - 3.

Fig. 10-b) The microstructure around the crack of specimen - 3.

2) 試験片-4 (B 部の中央断面)

Fig. 11 The macrostructure of specimen - 4.

3) 試験片-5 (B部の端部断面)

Fig. 12-a) The macrostructure of specimen - 5.

Fig. 12-b) The microstructure around the crack of specimen - 5.

4) 試験片-6 (B部の亀裂起点部)

Fig. 13-a) The condition of the failure surface of specimen - 6.

Fig. 13-b) The macrostructure of specimen - 6.

Fig. 13-c) The microstructure around the crack of specimen - 6.

6. 亀裂発生位置が母材であることの要因

6.1 亀裂発生位置と最大応力発生位置との関係

筆者らは当該部分に引張の応力集中があり、降伏強度を大きく超える応力が発生すること、また Fig. 14 に示す一例のとおりに、その応力方向が Fig. 1 などでも示した実際の亀裂の開き方向と合致することを確認している^{9)~11)}。

Fig. 14 The maximum principal stresses occurred at the corner of bottom and side plate when transfer of liquefied zinc is completed.¹⁰⁾

しかし、解析上得られる最大主応力は断面急変による応力集中の影響を含んでおり、その発生位置は要素で見て溶接止端部直近の底板側、節点としてみれば止端そのもの、すなわちボンド部に該当する。したがって、最大主応力発生位置は、第5章で示した“亀裂位置が熱影響部外側の母材である”ことと合わない。

6.2 亀裂が母材に発生する要因の推察

亀裂の原因が、溶接部が熔融亜鉛・熔融鉛と接触して結晶粒界が溶け、そのことで応力集中部が出現・成長して、不安定亀裂が発生・伝播したと推察できることは、既報⁴⁾で記したとおりである。

この液体金属脆化に対して熱影響部外側の母材に靱性低下などの材料的な問題がないことは既報⁴⁾および本報の第3章、第4章で記した。

本報で明らかとなった“亀裂発生部が熱影響部ではなく母材にある”こと理由として、Fig. 9 の硬さ分布に現れているとおり、溶接金属部分の降伏強度(420N/mm²)は母材の降伏強度(210N/mm²)に比べて著しく高く、熱影響部も硬さ分布から判断すると、降伏強度は母材より高くなっていることが考えられる。したがって、熱影響部の外側の母材から亀裂は発生したものと考えられる。すなわち、応力集中部の中でも

熱影響部より軟らかい外側の母材部分においてひずみが集中・増大し、そこに亜鉛および鉛による液体金属脆化が選択的に発生したと推察される。この現象は、豊貞らの研究¹²⁾で、9%Ni 鋼溶接継手について、母材よりも軟質である溶接金属部分に塑性化が重点的に進行するとしていることと同様の現象であると考えられる。

7. 結 言

以上のとおり、事故釜の破損箇所には材料的に問題のないことが明らかになった。また、亀裂発生位置が熱影響部ではなく、その外側の母材にあることが明らかになった。さらに、亀裂発生位置が最も応力の高い止端ではなく、熱影響部外側の母材であることの要因として、溶接金属部分および熱影響部よりも降伏強度の低い母材部でひずみが集中・増大し、その部位で液体金属脆化が選択的に発生したものと推察した。

参 考 文 献

- 1) 鈴木 清、奥崎 和宏、栗飯原 周二、矢島 浩、篠崎 賢二：鋼製溶融亜鉛めっき槽の損傷、鉛と亜鉛、第 202 号 (1998.3.)、pp.11-21.
- 2) 鈴木 清：溶融亜鉛めっき槽建造の合理化と寿命評価に関する研究、広島大学 工学部 博士学位論文 (2000.2.) .
- 3) 矢島 浩、佐藤 進、堤 満康、山本 元道、佐村 善明、辺見 鎮之：溶融亜鉛めっき槽溶接継手部の不安定破壊強度に関する一考察、西部造船会会報、第 101 号 (2001.3.)、pp.233-240.
- 4) 三崎 弘司、金井 英一、楠 和憲、谷野 忠和、矢島 浩：溶融亜鉛めっき槽破損部材質調査結果に関する一考察、長崎総合科学大学 大学院 新技術創成研究所 所報、第 6 号 (2011.3.)、pp.19-24.
- 5) 新日本製鐵株式会社：溶融亜鉛メッキ用釜鋼板(NAGP)について、
- 6) 硬さ換算表 (SAE J 417)：表 1 鋼のビッカース硬さに対する近似的換算値、JIS ハンドブック 1 鉄鋼 I、日本規格協会 (2009)、pp.1952-1953.
- 7) JIS Z 3101：溶接熱影響部の最高硬さ試験方法、JIS ハンドブック 40-1 溶接 I 基本、日本規格協会 (2009)、pp.674-675.
- 8) JIS G 3106：溶接構造用圧延鋼材、表 8-シャルピー吸収エネルギー、JIS ハンドブック 2 鉄鋼 II、日本規格協会 (2009)、p.40.
- 9) 三崎 弘司、津田 徹、小林 亨市、太田垣 良、谷野 忠和、矢島 浩：弾性解析による亜鉛鍍金釜内部固体亜鉛の熱膨張が及ぼす影響の把握－溶融亜鉛鍍金釜立ち上げ時の釜隅角部応力の把握 (その 1)－、圧力技術 (2012) . (掲載予定)
- 10) 三崎 弘司、津田 徹、小林 亨市、太田垣 良、谷野 忠和、矢島 浩：弾塑性解析による亜鉛鍍金釜内部固体亜鉛の熱膨張が及ぼす影響の把握－溶融亜鉛鍍金釜立ち上げ時の釜隅角部応力の把握 (その 2)－、圧力技術 (2012) . (掲載予定)
- 11) 三崎 弘司、津田 徹、小林 亨市、太田垣 良、谷野 忠和、矢島 浩：弾塑性解析による亜鉛鍍金釜内部固体亜鉛が側板と付着している場合の熱膨張が及ぼす影響の把握－溶融亜鉛鍍金釜立ち上げ時の釜隅角部応力の把握 (その 3)－、圧力技術 (2012) . (掲載予定)
- 12) 豊貞 雅宏、国広 敏之、桑辺 行正、川口 喜昭：9% Ni 鋼溶接継手の脆性破壊発生挙動について、日本造船学会論文集、第 138 号 (1975.11.)、pp.434-443.