溶融亜鉛めっきを施した部材の疲労強度に及ぼす めっき施工条件と鋼材の影響*

—溶融亜鉛めっきを施した溶接継手の疲労強度 (第3報)—

森 猛**, 南 邦明***, 堀川 秀信***

Influence of Hot Dip Galvanizing Conditions and Steel on Fatigue Strength* — Fatigue Strength of Welded Joints by Hot Dip Galvanizing (Report 3) —

By MORI Takeshi**, MINAMI Kuniaki***, HORIKAWA Hidenobu***

Recently, the discussion on prolonging life of steel bridges such as life cycle cost and long life bridge is widely done, and main factors of the prolonging life are countermeasures against fatigue and corrosion. As a countermeasure against corrosion, galvanizing is one of the effective methods, and many galvanizing steel bridges have been constructed until now. It is also considered that residual stress of welded portion is reduced by the annealing effect due to immersing welded member into hot dip galvanizing tank of about 450°C and the stress concentration at the weld toe as an origin of fatigue crack is reduced if a part of stress is transmitted in the galvanizing layer. These are correspondent to the two methods for increasing the fatigue strength. However, the effect of the galvanizing on the fatigue strength of welded joints has not been made clear sufficiently at the present. This study aims at investigating fatigue strength of welded joint with galvanizing. For this purpose, fatigue tests have been carried out on out-of-plane gusset welded joints which are made of 3 kinds of steel and are galvanized in several conditions. Residual stress measurements and three-dimensional finite element stress analyses for them are also carried out.

Key Words: Fatigue strength, Hot Dip Galvanizing Conditions, residual stress, welded joint

1. 緒 言

著者らは、第1報において、溶融亜鉛めっきを施した小型試験体(面外ガセット)による疲労試験結果を報告した¹⁾。この報告では、溶融亜鉛めっきを行うことにより、溶接部近傍では焼鈍効果や急冷効果で残留応力が低減され、また2次元のFEM解析から亜鉛の被覆により応力の一部がめっきに流れ、溶接止端の局部応力が低減することを報告した。これらは、疲労強度を向上させる因子であり、めっきを施すことによって、鋼構造物の延命化の課題である疲労と腐食の両面で有利となることが考えられた。しかし、先の試験結果では、90 MPa未満の低応力範囲(長寿命域)では疲労亀裂は発生しなかったが、100 MPaを超える高応力範囲(短寿命域)では、疲労強度は低下する結果となった。また、第2報では、大型I型桁試験体を用いて疲労試験を行った²⁾。試験は約100 MPaを上限に実施したが、その結果では、めっきを施せば疲労亀裂発生箇所が少なく、76.2 MPa以下の応力範囲では亀裂は発生しなかった。また、疲労亀裂が発生した箇所も、その多くがAs-weld状態より疲労強度は高くなった。しかし、第1報と同様、高い応力が作用した箇所のめっき試験体で、As-weld状態より疲労強度が低くなった箇

所もあった。疲労強度が低くなった箇所の破面観察を行ったが、疲労亀裂の起点は、合金層、もしくは液体金属脆化による割れから発生したものと考えられた。この合金層の層は柱状組織でお互い強固に結合しておらず、この間に種々の微細な割れが発生し易く、脆い組織である。すなわち、これが引き金となって疲労亀裂の発生を促し、疲労強度が低下したものと考えられた。

第1報および第2報の試験体に用いた鋼材は、一般のSM490YAおよびSM490YBであり(めっき用鋼材を使用せず)、めっきの施工もめっき橋梁を対象とした標準的な1条件で行った。疲労強度に影響すると考えられる合金層の性質は、鋼材の化学成分やめっき施工条件に大きく左右される。鋼材の化学成分の影響としては、特に、めっき焼け(合金層の生成を促進)を起こしやすいSiの影響が大きい。めっき施工条件では、合金層生成温度と浸漬される時間、また、めっき後の冷却状態によっても合金層の成分や厚み、あるいは結晶状態の違いが生じる。このため、めっきを施した部材の疲労強度を明確にするには、鋼材の影響やめっき施工条件の影響も考慮する必要があるものと考えられる。

本研究では、第1報、第2報に引き続き、溶融亜鉛めっきを施した溶接継手の疲労強度を明らかにすることを目的とする。そのため、第1報と同様に、鋼橋で用いられる継手の中でも特に疲労強度が低く、疲労損傷の発生が懸念されている面外ガセットすみ肉溶接継手を対象とし、2種類の鋼材を使用した試験体を新たに製作し、それらにいくつかの条件で溶融亜鉛めっきを施した試験体の疲労試験を実施する。

* 原稿受付 平成15年7月18日 平成13年度秋季全国大会で発表

** 正 員 法政大学工学部 Member, Hosei University

*** 正 員 (株)サクラダ Member, SAKURADA Corporation

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions.

Material used	Mechanical properties			Chemical compositions (mass %)										
	Yield strength	Tensile strength	Elongation	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Nb	V
SM490YA	440MPa	559MPa	26%	0.14	0.48	1.51	0.021	0.002	-	-	-	-	-	-
SM490YB	466MPa	542MPa	20%	0.16	0.22	1.04	0.012	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0
SM400	266MPa	421MPa	33%	0.17	0.10	0.55	0.012	0.008	-	-	-	-	-	-
Weld metal	500MPa	560MPa	31%	0.05	0.60	1.50	0.017	0.012	-	-	-	-	-	-

Fig. 1 Out of-plane gusset welded specimen.

また、それらを対象とした残留応力測定と3次元有限要素応力解析を行う。さらに、詳細な亀裂発生位置を調べるため、断面マイクロ組織の観察を行ったので、これらの結果を報告する。

2. 試験体

2.1 試験体の製作

今回新たに追加した鋼材は、板厚 12 mm の溶接構造用鋼材 SM490YB と SM400 の 2 種類である。これらの鋼材の機械的性質と化学成分を Table 1 に示す。なお、比較のため、第 1 報¹⁾ で使用した SM490YA の化学成分も示す。ここで用いた SM490YB は、溶融亜鉛めっき用鋼板（めっき焼け、めっき割れ対策鋼）である。また、SM400 は一般材であるが、Si や Mn などの合金元素の含有量が低く抑えられており、めっき焼けや割れが起り難い鋼材である。

試験体は、Fig. 1 に示す面外ガセット継手である。母板とガセット板の接合は水平姿勢の炭酸ガス溶接法で行った。その際の電流は 240 A 程度、電圧は 31 V、速度は 25 cm/min 程度とした。溶接に用いたワイヤはメタル系のフラックスコアタイプのものである。公称の溶接金属の機械的性質と化学成分も Table 1 に示している。以後、SM490YA、SM490YB、SM400 を使用した溶接のままの試験体を、それぞれ 490YA-AW 試験体、490YB-AW 試験体、400-AW 試験体と呼ぶ。これら 3 種類の試験体に対して Table 2 に示す条件で溶融亜鉛めっきを施し、疲労試験に用いる試験体を作製した。なお、SM490YA 試験体については、第 1 報¹⁾ で示した試験結果に、さらに疲労試験を追加したので、鋼材の影響を示すため、本論でも第 1 報のデータの一部を再度引用する。

490YA-AW 試験体に脱脂、酸洗いおよびフラックス処理

Table 2 Conditions of galvanizing.

Specimen	Galvanizing tank		Cooling tank	
	Temperature (°C)	Time (sec)	Temperature (°C)	Time (sec)
490YA-GS	452	480	48	180
490YA-GR	452	480	48	180
490YB-GS	440	480	58	180
490YB-GH	440	945	58	180
490YB-GA	439	490	Air cooling	
490YB-GN	439	490	58	185
400-GS	443	483	56	205
400-GL	443	266	56	190

などの前処理を行った後、めっき橋梁を対象とした標準的な条件^{3), 4)}で溶融亜鉛めっきを施した試験体を 490YA-GS 試験体と呼ぶ。490YA-GS 試験体を濃度 50% の塩酸と 2% のインヒビターの水溶液に約 30 分浸してめっきを除去した試験体を 490YA-GR 試験体と呼ぶ。インヒビターは、鋼材に腐食による欠損が生じないように混入したものである。

490YB-AW 試験体に標準的な条件で溶融亜鉛めっきを施した試験体を 490YB-GS 試験体と呼ぶ。さらに、490YB-GS 試験体よりもめっきを厚くするために標準よりも長い時間めっき槽に浸漬した試験体を 490YB-GH 試験体と呼ぶ。また、めっき層の組織の影響を調べる目的で、冷却槽には浸漬せず、完全空冷を行ったものを 490YB-GA 試験体と呼ぶ。この他に、残留応力の影響を調べるため、490YB-AW 試験体を野外に放置して発錆させた後（めっき後の塗装を剥離させ易くするため）、エポキシ系樹脂の塗装を 3 回行い、めっき槽に浸した試験体を用意した。このように、塗装により鋼材表面にめっきが付着しないようにして作製したものの（非めっき処理）を 490YB-GN 試験体と呼ぶ。

400-AW 試験体に標準的な条件で溶融亜鉛めっきを施した試験体を 400-GS 試験体と呼ぶ。標準よりもめっき槽への浸漬時間を短くしてめっき層を薄くした試験体を 400-GL 試験体と呼ぶ。

以上のように、ここで準備した試験体は、SM490YA を用いた 3 種類、SM490YB を用いた 5 種類、SM400 を用いた 3 種類、計 11 種類である。

2.2 溶接部形状とめっき層の観察

溶接のままの試験体 3 種類 (490YA-AW, 490YB-AW, 400-AW) の廻し溶接部の脚長測定結果を Table 3 に示す。この測定は疲労試験に用いたすべての試験体について、4 箇所の

Table 3 Average value of weld leg length.

Specimen	Leg length on gusset plate	Leg length on base plate
490YA-AW	7.2mm	12.1mm
490YB-AW	7.4mm	12.4mm
400-AW	6.2mm	12.0mm

Table 4 Weld toe shape (average value).

Specimen	Radius of curvature (ρ)	Flank of angle (θ)
490YA-AW	2.0mm	145°
490YB-AW	1.8mm	140°
400-AW	1.9mm	137°
490YA-GR	2.1mm	142°
490YB-GN	1.9mm	141°

Fig. 2 Macro photograph (490YB-GS). **Fig. 3** Microstructure of galvanizing layer.

廻し溶接部で行っている。いずれの形式の試験体においても、ガセット側に比べて母板側で長い不等脚な溶接形状となっている。これが水平姿勢で角廻し溶接を行った際の形状的な特徴である。400-AW試験体のガセット側脚長が他の試験体に比べて若干小さくなっているものの、同じ条件で溶接を行っているため、試験体間で脚長に顕著な差は認められない。

めっき皮膜のない5種類の試験体(490YA-AW, 490YB-AW, 400-AW, 490YA-GR, 490YB-GN)の廻し溶接止端部の曲率半径 ρ とフランク角 θ を測定した。測定は、歯科

用印象材(親水性ビニルシリコン印象材)を用いて溶接部の型取りを行い、その型の廻し溶接部中心近傍から1.0 mm間隔で5つのスライス状のサンプルを採取して、それらを20倍の拡大投影機上で観察することによって行った。溶接止端は各試験体で4箇所あるため、1試験体につき20の ρ と θ を測定したことになる。なお、この測定は疲労試験を実施したすべての試験体に対して行った。各形式試験体の ρ と θ の測定結果をTable 4に示す。溶接のままの試験体3種類の溶接止端曲率半径は1.8~2.0 mm、開き角は137~145°であり、特に母板の材質による止端形状の顕著

Fig. 4 Residual stress distribution.

な違いは認められない。また、塩酸とインヒビターの水溶液でめっきを除去した490YA-GS試験体の ρ と θ は2.1 mmと 142° 、めっきが付着しないエポキシ樹脂を塗布してめっき槽に浸漬した490YB-GN試験体の ρ と θ は1.9 mmと 141° と、溶接のままの試験体とほぼ同じである。したがって、490YA-GS試験体と490YB-GN試験体に対して行った処理が止端形状に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

各試験体の溶接部とめっき部をFig. 1に示すa-a断面で切断し、その面を1500番のエメリー紙で鏡面に仕上げた後、ナイトール（硝酸＋エチルアルコール）でエッチングした。その断面をデジタルマイクロスコープで観察することにより、めっき厚を測定した。これらのマクロ写真の例をFig. 2に示す。溶接止端部でのめっき厚は、490YA-GS試験体で0.8 mm、490YB-GS試験体で0.5 mm、490YB-GH試験体で0.6 mm、490YB-GA試験体で0.5 mm、400-GS試験体で0.5 mm、400-GL試験体で0.4 mm程度であった。

溶融亜鉛めっきを施した溶接部、溶接止端部と母板部のめっき層の組織を調べる目的で、試験体をFig. 1に示したa-

a断面で切断し、さらに、溶接止端部を中心におよそ20 mm四方のサンプルを取り出した。このサンプルをポリエステル樹脂の中に入れ、表面を研磨機で鏡面に仕上げた。さらに、研磨面をナイトール（硝酸＋エチルアルコール）でエッチングし、デジタルマイクロスコープを用いて450倍に拡大して観察した。

Fig. 3に各試験体の溶接止端部の拡大写真を示す。SM490YAに溶融亜鉛めっきを施した490YA-GS試験体では、めっきと鋼材の境界部に大きな凹凸が見られる。それに対し、溶融亜鉛めっき用鋼材SM490YBとそれに相当するSM400をめっきした試験体の境界部は滑らかとなっている。

一般に、亜鉛めっき皮膜は、亜鉛と鋼との反応で形成された合金層と純亜鉛層からなる。さらに、合金層は、鉄地に近く比較的鉄の含有量の多い δ_1 層と比較的鉄の含有量が少ない δ_2 層からなるとされている。いずれの試験体、位置においてもこれらの組織の存在が認められる。また、 δ_1 層には割れ状の不連続部も認められる。

Fig. 5 Analytical model.

Fig. 6 b-b sections of analytical model.

Fig. 7 Finite element model.

3. 残留応力の測定

3.1 計測方法

めっき作業に伴う焼鈍効果と急冷効果による残留応力の低減効果を調べる目的で、残留応力を測定した。測定は、ガセット端部より17 mm (溶接止端から5 mm) 離れた線上の母板の表裏面に2軸のひずみゲージを、またコバ面には1軸のひずみゲージを添付し、切断法を用いて行った。なお、SM490YAについては、第1報¹⁾でも示したが、溶接止端から2 mmの位置に1軸のひずみゲージを取りつけており、計測条件が若干異なる。残留応力測定に用いた試験体数は、490YA-AW試験体と490YA-GS試験体で3体、他の試験体については1体である。なお、490YA-GR試験体は、490YA-GS試験体のめっきを除去した試験体であり、490YA-GS試験体の残留応力と差異がないので残留応力の測定は行っていない。さらに、490YB-GS, 400-GS, 400-GL試験体は、めっき表面と鋼表面の残留応力を測定した。ただし、490YA-GS試験体は鋼表面のみ、490YB-GH, 490YB-GA試験体はめっき表面のみで残留応力を測定した。

3.2 計測結果

残留応力測定結果を Fig. 4 (a) - (d) に示す。図中に示す値は、表裏面の平均値、490YA-AW試験体と490YA-GS試験体については3体の平均値を示している。いずれの場合も、試験体中央で引張残留応力、端部で圧縮残留応力が生じている。溶接に最も近い試験体中央の残留応力は、490YA-AW試験体で262 MPa、490YA-GS試験体で57 MPa、490YB-AW試験体で201 MPa、490YB-GS試験体で95 MPa、

490YB-GN試験体で109 MPa、400-AW試験体で210 MPa、400-GS試験体で64 MPa、400-GL試験体で65 MPaとなっている。以上のように、SM490YAとその他の鋼材とは計測条件が若干異なるが、溶接のままの490YA-AW、490YB-AW、400-AW試験体の残留応力の値は200 MPa以上であるのに対して、溶融亜鉛めっきを施した試験体の残留応力の値はそのほぼ半分以下となっている。また、鋼材の違いやめっきの施工条件の違いによる残留応力低減への影響はほとんどないことが判る。なお、2軸成分の影響は、ほとんどなかった。

Fig. 4 (d) は、めっき表面の残留応力の測定結果を示している。その際の残留応力は、めっき部のヤング率を亜鉛単体のヤング率 9.0×10^4 MPaとして計算した。めっき表面においても残留応力分布は鋼板部とほぼ同じであるが、その値は試験体中央で50 MPa程度である。

4. 応力解析

4.1 解析方法

解析対象は、2章で示した面外ガセット溶接継手試験体である。この試験体の対称性から、Fig. 5に示すように1/8にモデル化して解析を行った。なお、ここでは、溶接のままの試験体、標準めっきを施した試験体、厚膜めっきを施した試験体を対象とした。溶接のままのモデル (490YB-AW試験体) の溶接部は2章で示した脚長、曲率半径とフランク角の測定結果に基づき、Fig. 6 (a) のように設定した。標準めっきモデルと厚膜めっきモデルのめっき厚さは2章で示したマクロ試験結果 (490YB-GS、490YB-GH試験体) に基づき、Fig. 6 (b) と Fig. 6 (c) のように設定した。

Fig. 8 Distribution of stress concentration.

疲労亀裂の起点になる溶接止端部の応力分布とひずみ分布を調べる目的で、汎用解析ソフト COSMOS/M を用い、3次元有限要素応力解析を行った。各モデルの要素分割図を Fig.7 に示す。用いた要素は、8 節点固体要素である。解析は、モデル端に等分布荷重を作用させて行った。溶接止端近傍の要素の大きさは 0.1 mm とした。鋼材のヤング率は 2.0×10^5 MPa、ポアソン比は 0.3 とした。めっき皮膜は、合金層と亜鉛層からなり、また合金層は鉄の含有量が比較的高い δ_1 層と比較的低い δ_2 層からなり、それぞれの層でヤング率やポアソン比も若干異なるものと考えられる。さらに柱状組織からなると層ではこれらの方向依存性も考えられる。しかし、これらの詳細については不明であるが、合金層の約 90% は亜鉛の成分であるので、ここではめっき皮膜のヤング率を亜鉛単体のヤング率と等しいと考え 9.0×10^4 MPa とし、ポアソン比は 0.3 とした。

4.2 解析結果

疲労亀裂が発生すると考えられる溶接止端近傍表面の試験体中央長手方向に沿う応力分布の解析結果を Fig. 8 に示す。図の縦軸は、解析より求めた応力を母板部の公称応力で無次元化したもの、横軸は溶接止端からの距離であり、ガセット板側 (廻し溶接側) の符号をマイナスとしている。いずれのモデルとも、最も高い応力集中が生じている点は、溶接止端から 0.6 mm 離れた溶接ビード上である。その値は AS-WELD モデルで 3.00、標準めっきモデルで 2.15、そして厚膜めっきモデルで 2.13 であった。このようにめっきを施すことにより、溶接止端の応力集中は 30% 程度低下する。また、めっき層を厚くすると、若干ではあるが、応力集中係数が低下することもわかる。

4.3 ひずみ集中係数を用いた疲労亀裂発生点の検討

一般に疲労亀裂の発生 (疲労亀裂発生寿命) は、ひずみ集中係数に依存すると考えられている。つまり、ひずみ集中係数が高いところほど、疲労亀裂の起点となりうる可能

(a) standard layer model

(b) thick layer model

Fig. 9 Strain distribution.

性が高いと考えられる。

標準めっきモデル、厚膜めっきモデルの溶接止端部周辺のひずみ集中係数を Fig. 9 (a) と (b) に示す。ここでは、疲労亀裂が発生すると考えられるめっき表面、めっき金属部と鋼板の境界面のめっき側と鋼板側の 3箇所 のひずみ集中に着目した。これらの図は、試験体中央長手方向に沿うひずみ分布を示したものである。図の縦軸は、解析より求めたひずみを母板部の公称ひずみで無次元化したもの、横軸は溶接止端からの距離であり、ガセット板側 (廻し溶接側) の符号をマイナスとしている。標準めっきモデル、厚膜めっきモデルとも、ひずみ集中係数は、めっき層表面で高くなっている。したがって、ひずみ集中係数のみを考えれば、めっき皮膜表面が疲労亀裂の起点となりやすいといえる。

Fig. 10 Appearance of test set-up.

(a)SM490YB-AW

(b)SM490YB-GS

Fig. 11 Fatigue failure surface with beach marks.

5. 疲 労 試 験

5.1 試験方法

疲労試験は、動的能力±500 kNの電気油圧サーボ式材料試験装置を用いて、一定振幅の軸引張荷重下で行った。載荷状況を Fig. 10 に示す。繰返し荷重は、下限荷重を 10 kN

(a) SM490YA

(b) SM490YB

(c) SM400

Fig. 12 Relationship between crack depth and number of stress cycles.

とし、応力範囲が80～150 MPaとなるように設定した。繰返し速度は10～15 Hzである。また、疲労亀裂の発生と進展性状を確かめる目的で、各形式試験体1体についてビーチマーク試験を行った。ビーチマーク試験は、上限荷重を一定としたままで、所定の繰返し回数ごとに荷重範囲を半減させる条件で行った。ビーチマーク試験での応力範囲は120 MPa程度とし、荷重の変更は繰返し数5万回～10万回毎に行った。

Fig. 13 Fatigue test results.

5.2 疲労亀裂の発生と進展性状

ビーチマーク試験を行った試験体の疲労破面の例を Fig. 11 に示す。Fig. 11 に示すように、めっきの有無による違いはなく、疲労亀裂の形状は半楕円形であった。

これらの破面に残されたビーチマークを50倍の顕微鏡を用いて観察した。この観察より求めた亀裂深さ a と繰返し回数 n の関係を使用鋼材ごとに Fig. 12 (a), (b), (c) に示す。なお、横軸の繰返し数には、応力範囲を半減したときの繰返し数は含めていない。Fig. 12 (b) では、横軸の縮尺の関係で490YB-GN試験体（ルート破壊）の結果を省いているが、この試験体で深さ1 mm程度の亀裂が観察された応力繰返し数は、430万回程度であった。

Fig. 12 (a) に示す SM490YA を母材とした試験体では、As-Weld の試験体に比べて、めっきを施した試験体の方が疲労亀裂の発生が若干であるが早い。例えば、深さ1 mm程度の亀裂が生じた繰返し数は、490YA-AW試験体で43万回程度であるのに対し、490YA-GS試験体では38万回程度となっている。なお、めっきを除去した490YA-GR試験体では、破断に至らなかった。Fig. 12 (b) に示す SM490YB を母材とした試験体では、490YB-AW試験体で疲労亀裂の発生が最も早く、490YB-GS試験体で遅くなっている。また、490YB-GH試験体と490YB-GA試験体で1 mm程度の亀裂が生じる寿命は同程度であり、490YB-AW試験体と490YB-

Table 5 Fatigue strength obtained by regression analysis.

Specimen	Fatigue strength at the each number of cycles		
	5×10^5 (cycles)	1×10^6 (cycles)	2×10^6 (cycles)
490YA-AW	132.495MPa	110.893MPa	92.813MPa
490YA-GS	115.757MPa	97.680MPa	82.426MPa
490YA-GR	163.554MPa	131.216MPa	105.271MPa
490YB-AW	128.229MPa	113.141MPa	99.828MPa
490YB-GS	139.369MPa	124.020MPa	110.362MPa
490YB-GH	136.400MPa	130.935MPa	125.689MPa
490YB-GN	128.372MPa	121.672MPa	115.322MPa
490YB-GA	124.623MPa	105.012MPa	88.487MPa
400-AW	144.943MPa	122.632MPa	103.756MPa
400-GS	141.783MPa	120.596MPa	102.575MPa
400-GL	139.769MPa	128.177MPa	117.546MPa

GS試験体の中間となっている。Fig. 12 (c) に示す SM400 を母材とした試験体では、As-Weld試験体に比べて、めっきを施した2種類の試験体では、亀裂発生寿命が長くなっている。

5.3 疲労強度

各試験体の疲労試験結果を Fig. 13 に示す。なお、ビーチマーク試験を行った試験体の疲労寿命には、応力範囲を半減したときの繰返し回数は含めていない。疲労破壊は溶接ルート部で破断した490YB-GN試験体の内の1体を除き、すべて溶接止端を含む断面で生じていた (Fig. 11 参照)。

Fig. 14 Observations of galvanizing layer after fatigue test.

Fig. 13 (a) は溶接のままの試験体3種類の疲労試験で得た応力範囲と疲労寿命の関係を示している。400-AW試験体で若干高くなっているものの、鋼材による疲労強度の顕著な違いは認められない。図中の実線は、鋼材による区別をせずにすべての破断データを対象として、最小二乗法より求めた疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。以後、この回帰直線を基準として、各めっき試験体の疲労強度を比較する。

Fig. 13 (b) は、めっき槽に浸漬することによる溶接残留応力の緩和が疲労強度に及ぼす影響を調べる目的で、490YA-GS試験体のめっきを除去した490YA-GR試験体とめっきが付着しないようにめっき槽に浸漬した490YB-GN試験体の応力範囲—疲労寿命関係を溶接のままの試験体と比較したものである。図中の破線と点線は、それぞれ490YA-GR試験体と490YB-GN試験体の応力範囲—疲労寿命関係の回帰直線であり、実線はFig. 13 (a) に示した溶接のままの試験体で得られた回帰直線である。490YA-GR試験体の疲労強度は、すべての寿命域で溶接のままの試験体よりも20%程度高くなっている。490YB-GN試験体の疲労強度は、短寿命域においては溶接のままの試験体と同程度となっているものの、長寿命域では高くなっている。

Fig. 13 (c) は標準的な条件でめっきを施した、490YA-GS、490YB-GS、400-GS試験体の疲労試験結果を溶接のままの試験体と比較したものである。溶融亜鉛めっき用鋼材SM490YBとそれに相当するSM400で製作した490YB-GSと400-GS試験体の疲労強度は、溶接のままの試験体と同程度、あるいは若干高くなっている。しかし、SiやMnの含有量が比較的多いSM490YAで作製した490YA-GS試験体の疲労強度は、溶接のままの試験体と比べて15%程度低くなっている。

Fig. 13 (d) は、厚膜めっきとした490YB-GH試験体、薄

膜めっきとした400-GL試験体、めっき後空冷することにより合金層を故意に発達させた490YB-GA試験体の疲労強度を、溶接のままの試験体の疲労強度と比較したものである。いずれの試験体とも短寿命域の疲労強度は、ほぼ同じとなっている。しかし、長寿命域では、490YB-GH試験体と400-GL試験体の疲労強度が溶接のままの試験体よりも高くなっている。逆に、490YB-GA試験体の疲労強度は、溶接のままの試験体よりも低くなっている。

以上のように、めっき施工が疲労強度に及ぼす影響は鋼材とめっき条件によって異なる。溶接のままの試験体と比べて疲労強度が同程度、あるいは若干高くなったのは、溶融亜鉛めっき用鋼材SM490YBとそれに相当するSM400に、標準的な条件でめっき施工を行った試験体と、若干薄いあるいは厚いめっきを施した試験体である。疲労強度が向上したのは、残留応力が低減されたことによる効果と考えられる。これに対して、残留応力が低減されたにも関わらず、疲労強度が低下したのは、めっき焼け（合金層の促進）に対して有害とされているSiが比較的多く含まれるSM490YA鋼材に標準的な条件でめっき施工を行った490YA-GS試験体とSM490YBを母材として標準的な条件でめっき施工を行った後に空冷することにより合金層を発達させた490YB-GA試験体であった。これらの結果からも、合金層が疲労強度を低下させる原因であることが判る。Fig. 3で示したようにこれらのミクロ破面では境界部が凹凸状になっており、さらにめっき金属と鋼材の合金層に不連続部があった。疲労亀裂は、この部分から早い段階で疲労亀裂が生じることなどが考えられる。また、疲労寿命は前節で示した各試験体の亀裂発生寿命の相違とほぼ対応している。

Fig. 13に示した各形式試験体の回帰直線より求めた50万回疲労強度、100万回疲労強度、および200万回疲労強度を

Table 5 に示す。なお、JSSC 疲労設計指針⁵⁾では、ここで対象とした面外ガセット継手の疲労強度等級を G 等級 (200 万回で 50 MPa) としているが、いずれの試験体とも G 等級だけではなく、1 等級上の F 等級も満たしている。

6. めっき部の組織と疲労亀裂発生起点

疲労亀裂の詳細な発生位置を調べる目的で、疲労試験が終了した試験体の未破断側の溶接部を Fig. 1 に示す a-a 断面切断し、その面を鏡面に仕上げた後でエッチングして、デジタルマイクロスコップ (175 倍) で観察した。

代表的な観察面を Fig. 14 に示す。いずれの試験体においても、めっき表面あるいは合金層と鋼材の不連続部から発生したと思われる亀裂が複数認められる。これらは、Fig. 3 で示した繰返し荷重を加えない状態での割れ状の不連続部よりも長く、また太くなっているように見える。400-GS 試験体では、合金層から発生したと思われる亀裂がめっき部内を進展するとともに、溶接止端から鋼材内へ進展した亀裂が認められ、それらはめっき皮膜と鋼材の境界で結合している。これらの内、どちらが先に生じたかは不明であるが、めっき層に生じた割れが止端からの疲労亀裂に影響したとも考えられる。

ここで行った観察では、どの位置が最初の亀裂の起点になったかは不明であるが、起点としては溶接止端鋼材側、溶接止端めっき層側 (鋼材に見られる不連続部)、めっき層表面の 3 つが考えられる。

7. 結 言

本研究では、3 種類の鋼材 (JIS SM490YA, JIS SM490YB, JIS SM400) を使用した面外ガセット溶接継手のモデル試験体を製作し、それらにいくつかの条件で溶融亜鉛めっきを施した試験体を対象として疲労試験、ミクロ観察、有限要素応力解析を行うことにより、溶融亜鉛めっきを施した溶接継手の疲労強度について検討した。本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 溶接部の引張残留応力は、めっきの施工条件および鋼種に関わらず溶融亜鉛めっきを施すことによりほぼ半減した。このようにめっき作業を行うことで大きな残留応力除去焼鈍効果が期待できる。
- (2) 溶接構造用鋼材の SM490YA を使用した場合、Si 量が多いこともあって合金層の組織が粗く、溶融亜鉛め

きを施した試験体の疲労強度は溶接のままの試験体よりも低くなった。また、Si 量が低い溶融亜鉛めっき用鋼材 SM490YB を使用した場合でも、めっき後空冷することにより合金層の組織を粗くした場合には、疲労強度が低下した。残留応力が低減されているにも関わらず、逆に疲労強度が低くなる原因としては、めっきを施すことにより、めっき層と鋼材の境界部が凹凸状になること、めっき金属と鋼材の合金層に不連続部があり、この部分から早い段階で疲労亀裂が生じることなどが考えられる。

- (3) 溶融亜鉛めっき用鋼材 SM490YB とそれに相当する SM400 を使用した場合、通常の条件で溶融亜鉛めっきを施した試験体の疲労強度は、短寿命域 (高応力範囲) では溶接のままの試験体と比べてほとんど差はないが、長寿命域 (低応力範囲) では高くなる傾向が見られた。溶融亜鉛めっきを行うことによって疲労強度が高くなる要因としては、残留応力が低減されたことが考えられる。

謝 辞

本研究は、法政大学、日本橋梁建設協会、日本溶融亜鉛鍍金協会および㈱サクラダの 4 者共同研究であり、本研究を遂行するにあたり、日本橋梁建設協会の小笠原照夫氏、日本溶融亜鉛鍍金協会の井関巽氏には貴重なご意見やご助言を賜りました。ここに心より感謝致します。

参 考 文 献

- 1) K. Minami, T. Mori, H. Horikawa: Stress properties of Welded Portions by Hot Dip Galvanizing and Fatigue test - Fatigue Strength of Welded Joints by Hot Dip Galvanizing (Report1)-, Quar. J. JWS, 21-4 (2003), 576-583, (in Japanese).
- 2) K. Minami, T. Mori, H. Horikawa: Fatigue test on Large-scale welded Girder Specimens with Hot Dip Galvanizing - Fatigue Strength of Welded Joints by Hot Dip Galvanizing (Report2)-, Quar. J. JWS, 21-4 (2003), 584-591, (in Japanese).
- 3) (社) 日本橋梁建設協会: 溶融亜鉛めっき橋の設計・施工マニュアル, 1990, 10.
- 4) (社) 日本鋼構造協会: 溶融亜鉛めっき橋の設計・施工指針, 1996, 1.
- 5) (社) 日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.