各種鋼材突合せ溶接継手の疲れ強さ改善に およぼす低温加熱急冷条件の影響*

益本 功** 赤石 徹** 照沼俊克*** 村松修一***

Effect of Low Temperature Quenching Conditions on the Fatigue Strength Improvement of Butt Welded Joint*

by Isao Masumoto**, Tohru Akaishi**, Toshikatsu Terunuma***
and Shuichi Muramatsu***

It was previously reported that fatigue strength of butt welded joint of SM41 steel, 60 kg/mm² and 80 kg/mm² high strength steels could be improved by hot dip galvanizing and quenching, and the reason for this improvement may be explained by compressive residual stress and aging effect by quenching from a temperature lower than A₁ temperature. This aging effect of steel plates depends on chemical composition, heating temperature, time and cooling rate. In the present study the effect of heating-quenching methods, temperature and artificial aging treatment on the improvement of butt welded joint are examined.

The results by this experiment are as follows.

1. Fatigue strength of butt welded joints of three kinds of steel is improved by low temperature quenching.
2. In the case of the same heating temperature, furnace heating is more effective than hot dip galvanizing, because heating time in furnace is longer than in zinc bath.
3. In the case of mild steel and 50 kg/mm² high strength steel, the higher the temperature beneath A₁ temperature is, the more increase in fatigue strength of welded joints is obtained.
4. In the case of 60 kg/mm² high strength steel, it was observed that there was suitable heating temperature depending on the precipitation behaviour.
5. The most important factor in fatigue strength improvement by these heat treatments was considered aging effect. And spherization of cementite also seemed to be one of the factors in the case of 700°C furnace heating-quenching.

1. 緒 言

著者の一人はすでに軟鋼 (SM41B), 60 kg/mm² 級高張力鋼 (HT 60) および 80 kg/mm² 級高張力鋼 (HT 80) の余盛つき突合せ溶接継手について, 溶融亜鉛浴に浸漬後急冷することによってその疲れ強さを改善できることを報告した¹⁾. またこの熱処理による疲れ強さ改善の効果は, A₁ 点以下の温度に加熱し急冷することによる鋼の時効と, 鋼材表面の圧縮の残留応力の生成によるものであることを明らかにした^{1)~4)}. しかし, 鋼の時効性は, 同一強度レベルの鋼材でもその化学組成および製造工程の相違によってかなり異なり, また加熱温度および冷却速度によって影響を受ける.

そこで本研究では, 市販の数種の鋼板について, 加熱急冷方法, 加熱温度および人工時効が突合せ溶接継手の疲れ強さ改善におよぼす効果について調べた.

2. 実験方法

2. 1 供試鋼材

本研究に使用した鋼材の機械的性質および化学組成を Table 1 にまとめて示す. 板厚はいずれの鋼材も約 12~13 mm である.

2. 2 溶接方法

疲れ試験片用突合せ溶接継手は, いずれの鋼材についても母材を約 200×500 mm にガス切断し, 長辺を I 型に突合せ, CO₂-O₂ 自動溶接で Table 2 に示す条件で表裏 1 パス溶接した. 溶接材料としては, SS 41 鋼材, SM 41 鋼材および SM 50 鋼材には DS 1 ワイヤを, HT 60 鋼材には DS 60 ワイヤをそれぞれ用いた. ワイヤ直径はいずれの場合も 1.6 mm である. なお, 鋼材

*原稿受付 昭和51年4月6日 (昭和47年度春季全国大会にて発表)

**正 員 名古屋大学工学部 Member, Nagoya University Faculty of Engineering

***学 生 員 名古屋大学工学部大学院 Student Member, Nagoya University Faculty of Engineering

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions

Materials	Mechanical properties			Chemical compositions (%)										
	Yield point σ_Y (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation δ (%)	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ti	Ni	Cr	V
SS 41-1	26.8	43.9	36.9	0.20	0.03	0.72	0.027	0.027	0.006	0.006	—	—	—	—
SS 41-2	26.1	46.1	35.8	0.19	0.02	0.76	0.015	0.007	0.002	0.005	—	—	—	—
SM 41-1	28.0	44.4	34.2	0.16	0.30	0.75	0.009	0.021	<0.02	0.006	<0.02	—	—	—
SM 41-2	27.0	44.0	30.0	0.17	0.06	0.71	0.013	0.022	—	—	—	—	—	—
SM 50-1	37.1	55.8	35.5	0.19	0.37	1.39	0.015	0.010	0.025	0.009	—	—	—	—
SM 50-2	37.0	55.9	35.9	0.19	0.50	1.44	0.015	0.011	0.019	0.005	—	—	—	—
HT 60-1	52.9	64.7	30.1	0.16	0.34	1.37	0.018	0.006	—	—	—	0.01	0.02	—
HT 60-2	51.0	60.0	30.0	0.14	0.50	1.26	0.010	0.007	—	—	—	0.05	0.20	0.06

Table 2 CO₂-O₂ automatic welding conditions

Arc voltage	36 V
Welding current	450~470A
Traveling speed	50cm/min
Supplied gas	CO ₂ : 20l/min O ₂ : 5l/min

の圧延方向は溶接線に直角方向とした。

2. 3 疲れ試験

上記の方法で溶接された突合せ溶接継手 (400×500 mm) より Fig. 1 に示すように 4 枚の疲れ試験片を採取した。試験片形状の詳細を Fig. 2 に示す。疲れ試験は、容量 200 kg・m のシェンク式疲れ試験機を用い、毎分1200回の応力繰返し速度で両振り平面曲げ応力で行なった。

2. 4 熱処理方法

試験片を Fig. 2 に示す形状に機械加工した後、次に示す熱処理を行なった。

i) 溶融亜鉛浴加熱急冷処理

試験片を約 480℃ に保持した溶融亜鉛浴中に70秒間浸漬した後、約 20℃ の水中に急冷した。この場合70秒で試験片の板厚中心まで均一温度になることが確かめられている。

ii) 500℃ および 700℃ 炉中加熱急冷処理

雰囲気温度がそれぞれ 500℃ および 700℃ の炉中に試験片を入れ、試験片表面がそれぞれの温度に達した後、さらに30分間炉中に保持し、約 20℃ の水中に急冷した。

iii) 人工時効

SS 41-1 鋼材, SM 41-1 鋼材, および SM 50-1 鋼材については、700℃ 炉中加熱急冷後、50℃ のグリセリン浴中で100時間人工時効させ、その疲れ強さ改善におよぼす効果も調べた。

Fig. 1 Layout of specimen in welded plate **Fig. 2** Bending fatigue test specimen

3. 実験結果

3. 1 SS 41 鋼材突合せ溶接継手

2種類の SS 41 鋼材突合せ溶接継手の溶接のままおよび各種熱処理材の疲れ試験結果を Fig. 3 にまとめて示す。

2種類の SS 41 鋼材の溶接のままの 5×10^6 回時間強さは $11 \sim 12.5 \text{ kg/mm}^2$, 亜鉛浴加熱急冷材の 5×10^6 回時間強さは 13.5 kg/mm^2 , 500℃ および 700℃ 炉中加熱急冷材ではそれぞれ 20 kg/mm^2 , 24 kg/mm^2 の値

Fig. 3 Effect of heat treatments on fatigue strength of SS41 steel welded joint

を示し、人工時効した溶接継手は 1×10^6 回時間強さで比較すると、700°C 炉中加熱急冷材に比べ、さらに約 2 kg/mm² 高い値を示している。

すなわち、本実験結果から SS41 鋼材溶接継手の疲れ強さの改善は、亜鉛浴加熱急冷に比べ、炉中加熱により加熱温度が高く、より加熱時間が長ければ一層効果的であることが確かめられた。さらに 50°C の人工時効がこの効果を一層促進するようである。このことは既報の切欠付丸棒試験片による回転曲げ疲労試験結果と一致する⁴⁾。

3. 2 SM 41 鋼材突合せ溶接継手

2 種類の SM 41 鋼材突合せ溶接継手の溶接のまま、亜鉛浴加熱急冷、700°C 炉中加熱急冷および人工時効したときの疲れ試験結果を Fig. 4 にまとめて示す。本実験結果に示す 2 種類の SM 41 鋼材の化学組成は相当異なるのに拘らず、溶接のままの疲れ強さは実験した寿命範囲内でほぼ同じ値を示し、 5×10^6 回時間強さは 13 kg/mm² であるが、亜鉛浴加熱急冷により 21 kg/mm²、700°C 炉中加熱急冷により 23.7 kg/mm² さらに 50°C 100 時間の人工時効により 27.5 kg/mm² に上昇している。

この傾向は前述の SS41 鋼の場合と全く同一であるが、亜鉛浴加熱急冷による改善効果は特に顕著である。

3. 3 SM 50 鋼材突合せ溶接継手

2 種類の SM 50 鋼材突合せ溶接継手の溶接のままおよび各種の熱処理を行なったときの疲れ試験結果を Fig. 5 にまとめて示す。

2 種類の溶接のままの疲れ強さは、ほぼ同じ直線で表わされ、疲れ限度は約 11 kg/mm² である。

亜鉛浴加熱急冷により疲れ限度は 22 kg/mm² に上昇

Fig. 4 Effect of heat treatments on fatigue strength of SM41 steel welded joint

Fig. 5 Effect of heat treatments on fatigue strength of SM50 steel welded joint

し、さらに 500°C および 700°C の炉中加熱急冷により 24 kg/mm² および約 26 kg/mm² に上昇しているが、この場合人工時効の効果は認められない。

3. 4 HT 60 鋼材突合せ溶接継手

既報の実験結果¹⁾と合わせて 2 種類の HT 60 鋼溶接継手につき溶接のままおよび各種の熱処理を行なった試験片の疲れ試験結果を Fig. 6 にまとめて示す。2 種類の HT 60 鋼材の溶接のままの継手の疲れ強さはほぼ同じ S-N 曲線で表わされ、疲れ限度は 14.8 kg/mm² であるのに対し、亜鉛浴加熱急冷により 18~22 kg/mm² の疲れ限度を示している。また本実験の炉中加熱急冷の結果では 500°C の方が 700°C より疲れ強さはむしろ高くなっている。

HT 60 鋼のような高張力鋼では SS 材または SM 材

Fig. 6 Effect of heat treatments on fatigue strength of HT60 steel welded joint

に比べ化学組成は複雑であり、これらの鋼種の場合に結論されたように、 A_1 点以下の加熱温度が高く、加熱時間が長い程疲れ強さ改善効果は顕著であるとはいえない。最良の熱処理条件があるのではないかと考えられる。

3. 5 硬度測定結果

溶接継手に各熱処理を施し、熱影響部の粗粒部、細粒部および母材について調べたが、SS 41 鋼溶接継手の時効による硬度上昇はきわめてわずかで、大きい場合でも 10 Hv 程度であった。

SM 50 鋼溶接継手の場合には亜鉛浴加熱急冷、および 500°C、700°C 炉中加熱急冷により数時間から 10 時間後粗粒域で 20~25 Hv の硬度の上昇がみられた。しかし、細粒部および母材の硬度変化はほとんど認められなかった。

HT 60 鋼溶接継手の場合には各熱処理後の常温時効により熱影響部、母材に 10 Hv 以下のわずかの硬度上昇が認められた。

3. 6 組織観察結果

SS 41, SM 50, HT 60 の三種類の鋼材の溶接継手に各熱処理を施した時の組織変化を、熱処理後約 1 か月経過してから観察した。

光学顕微鏡では、各熱処理材の組織は、溶接のままのそれと全く区別できなかった。そこで、各溶接熱影響部および母材から 2 段レプリカ膜を作成し、電子顕微鏡観察した結果の一例を Photo. 1~3 に示す。

Photo. 1 は SS 41 鋼溶接熱影響部および母材の各熱処理による電顕写真を比較して示したものである。溶接のままと亜鉛浴加熱急冷の熱影響部、及び母材のフェライト粒内に析出粒子は全く認められず、特に相違は見出せない。500°C 炉中加熱急冷では熱影響部に微細粒子の

Photo. 1 Electron-Microstructures of SS41 welded joint after various heat treatments

Photo. 2 Electron-Microstructures of SM50 welded joint after various heat treatments

Photo. 3 Electron-Microstructures of HT60 welded joint after various heat treatments

析出が認められ、粗粒域ではセメントタイトのわずかな球状化が見られた。700°C 炉中加熱急冷では、粗粒域、及び細粒域のフェライト粒内で、100~500 Å 程度の粒状

の析出物が観察された。しかしレプリカ試料であるため、その形状、大きさは確かではない⁵⁾。母材の組織は、溶接のままのそれと全く変化なかった。また熱影響部でのセメンタイトの球状化は 500°C の場合に比べより顕著であった。

Photo. 2 は SM 50 溶接熱影響部および母材の電顕写真である。

溶接のままと亜鉛浴浸漬急冷処理の場合との顕著な差はなく、母材及び熱影響部のフェライト粒での析出物は、全く観察されなかった。500°C 処理の細粒域と母材は溶接のままと比べ、変化はなかった。しかし、粗粒域にはセメンタイトの球状化とフェライト地内に微細な析出物が認められた。また 700°C 炉中加熱急冷の場合には熱影響部のセメンタイトの球状化とフェライト地内の析出物はより顕著に認められた。

Photo. 3 は HT 60 溶接熱影響部および母材の電顕写真である。この場合も SS 41 鋼 (Photo. 1) および SM 50 鋼 (Photo. 2) の場合と同様、溶接のままと亜鉛浴浸漬加熱急冷とでは顕著な差は認められない。しかし、溶接のままの母材および細粒熱影響部にすでに微細な析出物が見られるのは、SS 41 鋼および SM 50 鋼にはなかったことである。この析出物は熱影響部で母材に比べ少なく、特に 500°C 炉中加熱ではほとんど認められない。700°C 炉中加熱急冷では粗粒域に微細な析出物らしきものが認められるが、母材に比べ少ない。セメンタイトの球状化がはっきり認められるようになる点は Photo. 1 および Photo. 2 の場合と同様である。

4. 考 察

470~480°C の亜鉛浴浸漬急冷処理とはほぼこれと同じ加熱温度の 500°C 炉中加熱急冷処理の加熱時間は、亜鉛浴が70秒に対して、炉中加熱処理では30分である。この値は既報の実験により両者共、板厚約 12mm の溶接継手内部まで均一に加熱するに充分な時間であることが確められている⁴⁾。従って加熱後の水冷によって生じる継手板厚方向の残留応力の大きさは、両者同一程度と考えられる。

しかし、3種鋼材溶接継手の亜鉛浴浸漬急冷処理材と 500°C 炉中加熱急冷処理材の疲れ強さを比較すると、いずれの鋼材溶接継手においても、500°C 炉中加熱急冷処理による改善の程度は、亜鉛浴浸漬急冷処理よりも大きくなっている。

この原因は加熱中にフェライト粒内に拡散し、固溶される炭素、窒素量が異なり、水冷後の時効状態が異なると考えられる。

水冷後、室温で約1000時間保持した溶接部の組織観察の結果、SS 41 及び SM 50 溶接継手を 500°C 炉中加熱急冷処理したものは、熱影響部に微細な析出粒子、球状化セメンタイトが認められるに対し、亜鉛浴浸漬急冷したものには、全く認められなかった (Photo. 1 および 2)。これは固溶された炭素、窒素量の違いに依存すると考えられる。従って A₁ 点以下の加熱急冷による溶接継手の疲れ強さ改善効果の支配因子として時効の影響が挙げられる。

また Photo. 1~3 の写真を通じ、700°C 炉中加熱急冷ではセメンタイトの球状化が相当すすむことが認められ、疲れ試験結果もこの処理の場合が最も高い値を示した。このセメンタイト球状化も溶接継手疲れ強さ改善の一つの要素と考えられる。これらの効果は加熱温度が高い程また加熱時間が長い程大である。

しかし、HT 60 溶接継手の場合には Photo. 3 に示すように、母材にすでに析材物が存在し、500°C 炉中加熱急冷処理と亜鉛浴浸漬急冷処理した材料の熱影響部に析出粒子は観察されなかった。

このような SS 41 鋼、SM 50 鋼と異なる析出物の挙動が疲れ試験結果 Fig. 6 に示すように、500°C 炉中加熱急冷が 700°C 炉中加熱急冷より高い値を与えたものと思われる。

5. 結 言

亜鉛浴浸漬急冷処理、500°C 及び 700°C 炉中加熱急冷処理による軟鋼 SM 50 および HT 60 の3種類鋼材溶接継手の疲れ強さ改善効果を調べた結果、次のことが分かった。

1. 3種鋼材溶接継手を各熱処理することにより、疲れ強さは改善された。
2. 同程度の加熱温度であれば加熱時間の短い亜鉛浴浸漬急冷処理よりも、加熱時間の長い炉中加熱処理の方が、疲れ強さ改善には有効である。
3. 軟鋼、SM 50 鋼では A₁ 点以下の加熱温度が高い程、急冷後の溶接継手の疲れ強さ改善の程度は大である。
4. 高張力鋼の場合には、母材の析出物の挙動により最適な加熱温度があり、供試 HT 60 鋼溶接継手では 700°C より 500°C から急冷した方が良い結果を示した。
5. これらの処理による疲れ強さ改善効果の支配因子は時効によるものと思われる。また 700°C においてはセメンタイトの球状化も一因子として上げられる。

参 考 文 献

- 1) 益本, 岩田: 鋼材溶接継手の亜鉛浴加熱急冷による疲れ強さの改善 (第2報) — 種々の溶接法による各種鋼材の溶接継手の疲れ強さ —, 本誌, 第38巻 (1969) 第6号, 593~600
- 2) 益本, 玉置, 岩田: 同上 (第1報) — 鋼材溶接継手の疲れ強さに及ぼす金属被覆の効果 —, 本誌, 第38巻 (1969) 第5号, 540~546
- 3) 益本, 岩田: 同上 (第3報) — 鋼材溶接継手の疲れ強さに及ぼす溶融亜鉛メッキ作業の諸因子の影響 —, 本誌, 第38巻 (1969) 第7号, 744~751
- 4) 益本, 岩田: 同上 (第4報) — 金属浴加熱, 急冷した継手の残留応力および時効 —, 本誌, 第38巻 (1969) 第8号, 847~853
- 5) W.C. Leslie, R.M. Fisher, N. Sen: Morphology and Crystal Structure of Carbides Precipitated from Solid Solution in α -Fe, Acta Metallurgica, Vol. 7 (1959), No. 9, p. 632

鋼材溶接継手の低温加熱急冷疲れ強さ 改善処理の靱性におよぼす影響*

益本 功** 赤石 徹** 米川 俊之***
村松 修一*** 福智 久***

Effect of Low Temperature Quenching on the Toughness of Steel Welded joints*

by Isao Masumoto**, Tohru Akaishi**, Toshiyuki Yonekawa***,
Shuichi Muramatsu*** and Hisashi Fukuchi***

It was already reported that quenchings from a temperature under A_1 point improved the fatigue strength of steel welded joints, and the reasons of this fatigue strength improvement was attributed to quench aging effect and compressive residual stress in surface layer.

On the other hand, aging of steel has a likelihood to make a embrittlement of steel. This experiment was carried out to clarify the effect of this fatigue strength improving heat treatment (low temperature quenching) on the toughness of welded joint.

Each welded joint of rimmed steel, 50 kg/mm² and 60 kg/mm² steel was heated by hot dip galvanizing, at 500°C and 700°C in furnace, followed by quenching into about 20°C water. Toughness of toe of welded joint was investigated by i) Standard V notch Charpy Impact Test ii) COD Test and iii) ESSO Test.

The following results were obtained,

1) The results of Charpy impact test and COD test showed that toughness of SS41, SM50 and HT60 steel welded joints did not decreased remarkably compared with as welded joint by a low temperature quenching.

2) The ESSO test result showed that crack arrest temperature of SM50 steel welded joint slightly increased by low temperature quenching, but crack arrest temperature of SS41 and HT60 steel welded joints were nearly same compared with as welded joints.

1. 緒 言

本研究室では, 余盛つき鋼材溶接継手の疲れ強さを改善する方法として, 溶接継手を A_1 点以下の温度に加熱し, その後急冷する低温加熱急冷法を提案した¹⁻⁶⁾。ま

たこの方法により疲れ強さが向上するのは, 鋼の焼入時効と鋼材表面に生じる圧縮の残留応力によるものであることを明らかにした⁴⁾。

しかし, 鋼の時効は鋼を脆化させる可能性もある。そこで低温加熱急冷により溶接継手の疲れ強さを改善する場合, この処理が溶接継手の靱性におよぼす影響を明確にしておくために本研究に着手した。

本研究に用いた鋼材は, 先に報告した「各種鋼材突合せ溶接継手の疲れ強さ改善におよぼす低温加熱急冷条件

*原稿受付 昭和51年5月10日(昭和51年度春季全国大会にて発表)

**正 員 名古屋大学工学部 Member, Nagoya University Faculty of Eng.

***学 生 員 名古屋大学大学院 Student Member, Nagoya University, Postgraduate Course.