高硬度・大比重ショットピーニングによる SM490A 溶接継手の 疲れ強さ改善*

長谷川正義**, (故) 太田 訓郎***, 鈴木 浩昭****

Improvement of Fatigue Strength of SM490A Welded Joint by High Hardness and Large Specific Gravity Shot Peening*

by HASEGAWA Masayoshi**, the late OHTA Kunio*** and SUZUKI Hiroaki****

In this study, we have developed new shot materials of tungsten carbide (150 and 100 μ m in average diameter) with high hardness and large specific gravity, which is about 1.7 times (HV1400) in hardness and about 1.9 times in specific gravity (specific gravity 14) compared with the conventional one. And we have examined the improvement in the fatigue strength of SM490A welded joint, the outbreak of noise and the use of projection air when this shot material is used.

The following experimental results were obtained :

1) The fatigue strength of welded joint was improved very well even in low projection air pressure 0.2 MPa when the peening was performed with the tungsten carbide shot materials of 150 μ m in diameter, which has higher hardness and larger specific gravity than the conventional steel ball shot materials.

2) When the tungsten carbide with 100 μ m in diameter or the conventional steel ball with 177 μ m in diameter was used as the shot material, the higher projection air pressure above 0.4 MPa was needed in order to obtain the same fatigue strength improvement when the tungsten carbide with 150 μ m in diameter was applied.

3) This improvement of the fatigue strength was mainly an effect of hardness increase by peening, but there was an additional effect of the compressive residual stress, too.

4) It was possible to reduce the noise value by approximately 10 dB and also the amount of projection air by more than 50 %, when the shot material with the high hardness and large specific gravity in particle diameter 150 μ m was used in order to obtain the similar peening effect of the conventional steel ball shot materials.

Key Words: Fatigue strength, Improvement, Welded joint, Shot peening, High hardness large specific gravity shot material

1. 結 言

近年、地球温暖化防止や省エネルギーの立場から航空機、新幹線および自動車等の輸送機は勿論のこと、家電製品、工作機械、産業機械および構造物等のあらゆる分野において軽量化が求められている。その結果、これらは高応力や大きな面荷重を受ける過酷な条件下で使用される場合が多くなり、この軽量化に伴う疲れ破壊が新たな問題として大きな関心が寄せられている。この問題を解決するために新材料の開発研究あるいは既存の材料表面に必要な性質を付与して高強度化を目指す表面改質技術の開発研究が盛んに行われている。

ショットピーニング法は表面改質技術に分類されるが、この方法は装置および処理技術が比較的簡単で、誰が処理しても確実に疲れ強さの改善が期待できるので、古くから用いられてきたが、近年、軽量化の要求に伴う疲れ強さ改善技術の一つとして、輸送機械を中心にあらゆる分野において積極的

に採用され、それに関する研究報告も数多く見受けられる¹⁻⁶⁾。

しかし、従来から最も多く用いられてきた鋼球ショット材は硬度が低く、高硬度材への利用範囲に制限を受けるばかりでなく、比重が小さいため、大きな運動エネルギーを得るには粒径の大きなショット材を用い、高速投射を行う必要があり、それに伴う残留応力の発生位置、表面粗さの悪化および騒音等の点で問題となっている。また、溶接継手においては疲れ亀裂の発生点となる余盛止端部の半径がきわめて小さく^{7,8)}、従来の粒径の大きな鋼球ショット材を用いた場合にはショット材の半径の方が余盛止端部の半径よりも著しく大きくなり、このような場合には亀裂発生点である余盛止端部処理が不可能となり、大きなピーニング効果が期待できない。

そこでこれらの点を改善するため、従来の鋼球ショット材に比べ、硬さで約 1.7 倍 (HV1400) および比重で約 1.9 倍 (比重 14) の値を持つ、微小粒径 (平均粒径 150 および 100 μ m) のタングステンカーバイド製の高硬度・大比重ショット材を新しく開発した。

本研究ではこの新しく開発したショット材を用いた場合の SM490A 溶接継手の疲れ強さ改善効果、騒音の発生程度および空気使用量に及ぼす投射条件の影響について検討した。

*原稿受付 平成 14 年 3 月 4 日 平成 10 年度秋季全国大会で発表、平成 11 年 2 月溶接疲労強度研究委員会で発表

**正 員 中部大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Chubu University

*** 新東工業(株) Sintokogio, Ltd.

****正 員 新東工業(株) Member, Sintokogio, Ltd.

2. 実験方法

供試母材は板厚 6 mm の溶接構造用圧延鋼 SM490A で、その化学組成および機械的性質を Table 1 に示す。溶接試験材は板厚 6×幅 100×長さ 540 mm のものを用い、溶接線が圧延方向と直角になるように、I 開先で突合わせ、溶接電流 270 A、アーク電圧 27 V および溶接速度 470 mm/min の溶接条件で、表裏それぞれ 1 パス、計 2 パスで、板を拘束して MAG 溶接を行い、溶接完了後もそれぞれ 30 分間拘束した。この場合の溶接入熱は 9.3 kJ/cm である。

溶接用ワイヤとしては、市販の直径 1.6 mm の DS60 ワイ

Fig. 1 Shape and size of fatigue test specimen for welded joint, unit ; mm.

ヤを、また、シールドガスには Ar 16 ℓ/min+CO₂ 4 ℓ/min を用いた。疲れ試験片は前述の溶接継手試験材から溶接ビードと直角方向に幅 65×長さ 200 mm の短冊形試験片を 7 枚採取し、Fig. 1 に示す形状および寸法に機械加工により作製した。その後、Table 2 に記号 A150 および A100 で示す硬さ HV1400、比重 14 の値を持つ平均粒径 150 および 100 μm の新しく開発した微小粒径のタングステンカーバイド製の高硬度・大比重ショット材を用い、空気式投射機により直圧式で同表に示す投射条件で、Fig. 2 に示すように、表裏の余盛止端部に各 1 パス、計 4 パスでショットピーニング処理を行った。なお、同図の余盛止端部に矢印付きで示す 1~4 の数字はピーニング処理の順序を示したものである。このようにピーニング処理した試験片は、疲れ試験、ビッカース硬さ測定（測定荷重 0.098 N）および X 線応力測定（半価幅中点法）による疲労試験片長手方向の残留応力分布の測定を行った。なお、残留応力の測定は Window 法により行ったが、X 線のコリメータ径は 0.5 mm である。また、ビッカース硬さおよび残留応力の測定箇所はいずれも余盛止端から 5 mm 離れた位置で行った。この箇所は熱影響部の外側ではあるが 575 K 程度に加熱された箇所よりも内側である。

さらに、投射ノズル中心の先端から真横方向に 1000 mm 離れた箇所に積分騒音計を設置し、ピーニング処理時に発生する騒音の測定も行った。

なお、本研究では新しく開発した微小粒径の高硬度・大比重ショット材と比較するため、Table 2 に記号 B177 で示す、従来の鋼球ショット材（平均粒径 177 μm、硬さ HV850 お

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490A base metal.

Chemical composition, mass(%)					Mechanical properties				
C	Si	Mn	P	S	Yield point, (MPa)	Tensile strength, (MPa)	Elongation, (%)	Vickers hardness, (HV)	Fatigue limit, (MPa)
0.16	0.38	1.45	0.017	0.003	465	576	20	236	250

Table 2 Shot materials and peening conditions.

Shot materials					Peening conditions	
Mark	Materials	Particle diameter, (μm)	Particle hardness, (HV)	Specific gravity	Air pressure, (MPa)	Impact angle, (°)
A150	Tungsten carbide	150	1400	14	0.12 0.2 0.3 0.4 0.5	45
A100	Tungsten carbide	100	1400	14	0.2 0.3 0.4 0.5	45
B177	Steel	177	850	7.45	0.2 0.5	45

Fig. 2 Method of shot peening and measurement of noise, unit ; mm.

よび比重 7.45) を用いて同様な研究を行った。

疲れ試験には最大容量 196N-m のシェンク型疲れ試験機を用い、負荷方法は完全両振り（応力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ ）平面曲げで、繰返し速度は 30 Hz とし、試験はすべて大気中において室温で行った。

なお、本実験では疲れ限度を 2×10^6 回とし、この繰返し数で破断しなかった試験結果には矢印を付して示した。

3. 実験結果とその検討

Fig. 3 は平均粒径 $150 \mu\text{m}$ のタングステンカーバイド製ショット材 A150（以下これを A150 という）による溶接継手の疲れ強さ改善に及ぼすピーニング処理の効果を調べた結果を示したものである。投射空気圧力（以下これを P という） $P=0.12, 0.2, 0.3, 0.4$ および 0.5 MPa で処理した継手の疲れ限度は $225 \sim 235 \text{ MPa}$ で、溶接のままの継手のそれ (170 MPa) に比べ、著しく高い値を示している。

Fig. 4 は平均粒径 $100 \mu\text{m}$ のタングステンカーバイド製ショット材 A100（以下これを A100 という）を用いた場合の処理効果を調べた結果を示したものである。 $P=0.2$ および 0.3 MPa の場合の疲れ限度は 205 および 210 MPa であるが、 P が 0.4 および 0.5 MPa と高い場合には疲れ限度も $225 \sim 230 \text{ MPa}$ と増加することが認められる。

Fig. 5 は従来からの鋼球ショット材 B177（以下これを B177 という）の場合の処理効果を示したものである。 $P=0.2 \text{ MPa}$ で処理した継手の疲れ限度は 210 MPa であるが、 $P=0.5 \text{ MPa}$

Fig. 3 Effect of shot peening on fatigue strength of welded joint (A150).

Fig. 4 Effect of shot peening on fatigue strength of welded joint (A100).

Fig. 5 Effect of shot peening on fatigue strength of welded joint (B177).

の場合には 235 MPa と高い値が得られている。

なお、疲れ亀裂の発生箇所はショットピーニング処理の有無にかかわらず、いずれの場合も余盛止端部であった。

Fig. 6 は A150 を用いた場合の母材表面から深さ方向への硬さ分布の測定結果を示したものである。いずれの P の場合も表面から約 30 μm 程度までは硬化層の深さに関係なくほぼ一様な硬度の硬化層が存在していることが認められる。しかし硬化の程度は P により異なり、 $P=0.12\text{ MPa}$ の場合には約 HV270 $\sim$ 275 であるが $P=0.2, 0.3, 0.4$ および 0.5 MPa の場合には約 HV278 $\sim$ 290 にも達し、溶接のままの継手の約 HV232 $\sim$ 238 に比べかなり高い値を示している。

Fig. 7 は A100 を用いた場合の硬さ分布の測定結果を示したものである。この場合も A150 の場合と同様に、いずれの

Fig. 6 Effect of shot peening on hardness distribution (A150).

Fig. 7 Effect of shot peening on hardness distribution (A100).

P の場合も硬化層の深さには関係なく表面から約 30 μm 程度まではほぼ一様な硬度の硬化層が得られている。そして、その値は $P=0.2$ および 0.3 MPa の場合は約 HV257 $\sim$ 275 であるが $P=0.4$ および 0.5 MPa の場合で約 HV276 $\sim$ 284 に上昇するが、A150 の場合よりもやや低い値である。

Fig. 8 は B177 による硬さ分布を示したものであるが、硬化層の深さは表面から約 30 μm であるが、深さの増加と共に硬度はほぼ一様に低下する傾向が見られた。なお、B177 による硬化が最も顕著な表面近傍の硬さは $P=0.2$ および 0.5 MPa の場合でそれぞれ約 HV264 および HV272 で、同一 P における A150 による場合よりもいずれもかなり低い値であった。

Fig. 9 は A150 により処理した場合の残留応力分布の測定結果を示したものである。いずれの P の場合も表面では約 -282 $\sim$ -380 MPa および表面から約 25 μm 近傍には約 -436 $\sim$ -488 MPa の最大圧縮残留応力が存在するが、P の相違による最大値および最大位置の差は小さいことが認められた。また、圧縮残留応力域の幅は $P=0.12$ および 0.2 MPa による場合の方が $P=0.4$ および 0.5 MPa の場合よりもやや狭いようである。なお、同図には比較のため溶接のままの継手の残留応力分布も示してある。前述のように、ピーニング処理により最大圧縮残留応力が付与される表面から約 25 μm 近傍について比較すれば、溶接のままの場合には僅かな引張残留応力が存在しているが、ピーニング処理により大きな圧縮残留応力に変化していることが認められる。

Fig. 10 は A100 による場合の残留応力分布の測定結果を示したものである。いずれの場合も表面では約 -305 $\sim$ -328 MPa および表面から約 25 μm 近傍には約 -425 $\sim$ -455 MPa の最大圧縮残留応力が存在していることが認められる。また、この場合も P の相違による最大圧縮残留応力値の差は小さいことが認められた。さらに、A150 の場合と比較すると表面から約 25 μm までは圧縮残留応力の値に大きな相違は認

Fig. 8 Effect of shot peening on hardness distribution (B177).

Fig. 9 Effect of shot peening on residual stress distribution (A150).

Fig. 10 Effect of shot peening on residual stress distribution (A100).

められなかったが、圧縮残留応力域の幅は A150 の方が A100 の場合よりもやや広いことが認められた。

なお、Fig. 11 に示す B177 の場合の圧縮残留応力の最大位置は $P=0.2$ および 0.5 MPa のいずれの場合も表面から約 $25\text{ }\mu\text{m}$ 近傍であり、A150 および A100 の場合とほぼ同一位置であるが、その値は約 $-369\sim-386\text{ MPa}$ で、A150 および A100 の場合の $-436\sim-488\text{ MPa}$ および約 $-425\sim-455\text{ MPa}$ に比べ低い値であることが認められる。

Fig. 12 は各種ショット材により処理した場合の表面粗さ

Fig. 11 Effect of shot peening on residual stress distribution (B177).

Fig. 12 Comparison of surface roughness.

の測定結果を比較して示したものである。同図中に示す R_y , R_a および R_z は最大高さ、算術平均粗さおよび十点平均粗さである。いずれのショット材の場合も P の増加と共に表面粗さは増大する傾向が認められる。なお、ショット材による表

面粗さを比較すれば、A150 の場合は A100 および B177 の場合に比べ、やや粗く、 R_y で示せば、約 $7\sim 10\ \mu\text{m}$ 程度大きな値を示している。

A150 および A100 を用いれば、小さな投射圧力で疲れ強さは著しく改善されたが、その原因として前述の硬さの上昇および圧縮残留応力の付与の他にピーニングにより余盛止端部が変形し、応力集中係数が減少したことが考えられる。そこで、溶接のままの余盛形状とピーニングを行った後の余盛形状とを Fig. 13 に示すように比較検討した。同図は歯科用モデリングコンパウンドで余盛を型取りし、これを投影機で拡大して写真撮影したものである。同図によれば、(a)と(b)および(c)と(d)に示すように、ピーニング前後における余盛止端部の形状の変化はほとんど認められない。

Fig. 13 Bead configuration after peening.

Fig. 14 Effect of air pressure on air flow rate and noise level.

Fig. 14 はショットピーニング処理時に発生する騒音値および空気使用量に及ぼす投射空気圧力の影響を調べた結果を示したものである。騒音値および空気使用量は P の増加と共にほぼ一様に増加する傾向が認められた。なお、A150 を用いた場合の疲れ限度は $P=0.2\ \text{MPa}$ ですでに $235\ \text{MPa}$ と著しく改善されているが、この場合の騒音値は約 $80\ \text{dB}$ で空気使用量は約 $1.5\ \text{Nm}^3/\text{min}$ であった。また、従来の鋼球ショット材 B177 を用い、A150 と同程度の改善効果を得るには $P=0.5\ \text{MPa}$ の高い P が必要であり、この場合の騒音値および空気使用量は同図から明らかのように、約 $90\ \text{dB}$ および $3.5\ \text{Nm}^3/\text{min}$ となる。したがって、A150 を用いてピーニング処理を行えば、騒音値および空気使用量は著しく低くすることが可能であることが明らかとなった。

以上の実験結果から A150 ショット材を用いれば、 $P=0.2\ \text{MPa}$ の低い投射空気圧力で溶接継手の疲れ強さは著しく改善されることが明らかとなった。

ショットピーニングによる溶接継手の疲れ強さ改善で、本研究のように平面曲げ疲れ試験を行なった場合、疲れ強さに大きな影響を与える因子として表面の硬さおよび残留応力が考えられる。そこで、疲れ強さの改善原因を明らかにするため、A150、A100 および B177 についてそれぞれ疲れ限度、表面の硬さおよび最大圧縮残留応力値を比較検討した。Table 3 はその結果を示したものである。なお、同表で示す表面の硬さは表面に最も近い測定点〔表面から $5\ \mu\text{m}$ 〕の硬度である。また、同表に示す $P=0$ は溶接のままの継手の結果である。

Fig. 15, 16 および 17 は Table 3 をもとに、疲れ限度、表面の硬さおよび最大圧縮残留応力値と P の関係を、また、Fig. 18 は疲れ限度と表面の硬さの関係を調べた結果を示したものである。Fig. 15 によれば、A150 の場合の疲れ限度は $P=0.2\ \text{MPa}$ までは P の増加と共にほぼ一様に増加するが、 P がそれ以上では飽和する傾向が認められる。また、A100 および B177 の場合にはいずれも $P=0.4\ \text{MPa}$ までは P の増加と共に疲れ限度も増加するが、その値は $P=0.4\ \text{MPa}$ 以下では A150 の場合よりもかなり低い値であることが認められる。また、Fig. 15 において A150 および A100 の場合にはいずれも P が $0.4\ \text{MPa}$ を越えると Fig. 16 に示す硬さが上昇しているにもかかわらず、疲れ限度は逆に低下する傾向が認められる。これは Fig. 12 に示す表面粗さの増加および Fig. 17 に示す圧縮残留応力の減少によるものと考えられる。また、Fig. 18 の疲れ限度と表面の硬さの関係から明らかのように、いずれのショット材の場合も疲れ限度は硬さの上昇と共に増加し、しかも、ショット材の相違による差も小さいことから、疲れ強さの改善因子は表面の硬さにほぼ支配されているものと考えられる。しかし、硬さが $\text{HV}280$ 以上になると硬さが上昇しても疲れ強さが改善しないのは、前述のように圧縮残留応力の若干の減少と表面粗さの増加に伴う応力集中の増大によるものと考えられる。

以上の実験結果から、A150 を用いた場合の疲れ強さの改

Table 3 Fatigue limit, surface hardness and maximum value of compressive residual stress of shot peened welded joint.

Air pressure, (MPa)	Fatigue limit, (MPa)			Surface hardness, (HV)			Maximum value of compressive residual stress, (MPa)		
	A150	A100	B177	A150	A100	B177	A150	A100	B177
0 (As welded)	170	170	170	236	236	236	27	27	27
0.12	225	—	—	273	—	—	-436	—	—
0.2	235	205	210	280	260	262	-440	-436	-386
0.3	235	210	—	283	275	—	—	-455	—
0.4	235	230	—	287	280	—	-488	-449	—
0.5	230	225	235	290	284	272	-473	-425	-369

Fig. 15 Relation between fatigue limit and air pressure.

Fig. 16 Relation between surface hardness and air pressure.

Fig. 17 Relation between maximum value of compressive residual stress and air pressure.

Fig. 18 Relation between fatigue limit and surface hardness.

善原因はピーニングによる硬さの上昇が主で、それに圧縮残留応力の付与が加わったものと思われる。

なお、ピーニングにより著しい硬さの上昇および大きな圧縮残留応力が付与されているにもかかわらず、ピーニング処理した継手の疲れ限度はいずれも母材よりも低い値で、しかも疲れ破断箇所は全て継手の余盛止端部であった。これは Fig. 13 に継手の余盛形状を示したように、本実験で用いた継手の疲れ亀裂発生箇所である余盛止端部の切欠きが鋭く(余盛止端半径 r = 約 0.1~0.2 mm)、応力集中が顕著であるためと考えられる。

4. 結 言

従来の鋼球ショット材に比べ、硬さで約 1.7 倍および比重で約 1.9 倍の値を持つ、微小粒径の高硬度・大比重ショット材を新しく開発し、このショット材を用いた場合の SM490A

溶接継手の疲れ強さ改善，騒音の発生および空気使用量について検討した。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 新しく開発した粒径 $150\ \mu\text{m}$ の高硬度・大比重ショット材を用いてピーニング処理を行えば，溶接継手の疲れ強さは $0.2\ \text{MPa}$ の低い投射空気圧力でも高い改善が得られる。
- 2) 新しく開発した粒径 $100\ \mu\text{m}$ の高硬度・大比重ショット材および粒径 $177\ \mu\text{m}$ の従来の鋼球ショット材を用い，粒径 $150\ \mu\text{m}$ の高硬度・大比重ショット材と同程度の疲れ強さの改善を得るには $0.4\ \text{MPa}$ 以上の高い投射空気圧力を必要とする。
- 3) この疲れ強さの改善原因はピーニングによる硬さの上昇が主で，それに圧縮残留応力の付与が加わったものである。
- 4) 粒径 $150\ \mu\text{m}$ の高硬度・大比重ショット材を用いれば，従来の鋼球ショット材と同程度のピーニング効果を得るのに，騒音値で約 $10\ \text{dB}$ および投射空気使用量で約 $1/2$ 以上低くすることが可能である。

参 考 文 献

- 1) Kojima Yoshihiko, Miwa Yoshihisa, Shibata Shinya and Arimi Yukio : New processes for Manufacturing High-Strength Transmission Gears, Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, 42-6 (1988), 755-760. (in Japanese)
- 2) Iida Kisuke and Tosha Katsuji : Comparison between Steel Shot and Glass Shot on the Peened Surface and the Surface Layer, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 54-5 (1988), 922-927. (in Japanese)
- 3) Mitsubayashi Masahiko, Miyata Takashi and Aihara Hideo : Prediction of Improvement in Fatigue Strength by Shot Peening and Selection of Most Effective Peening Condition, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A, 61-586(1995), 1172-1178. (in Japanese)
- 4) Hoyashita Shigeru, Hashimoto Munetoh, Kamo Hidetoshi and Matsunoshita Tomohiro : Improvement of Surface Durability of Case-Carburized and Hardened Gear (Effects of Shot Peening and Barrelling Processes), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, 62-595 (1996), 1106-1112. (in Japanese)
- 5) A.Drechsler, J.Kiese and L.Wagner: Effects of Shot Peening and Roller-Burnishing on Fatigue Performance of Various Titanium Alloys, Shot peening, Institute of Precision Mechanics, Warsaw, Poland (1999), 145-152.
- 6) V.S. Nadkarni, M.C. Sharma : Behaviour of Shot Peened Electron Beam Welded Stainless Steel Plate Samples Under Combined Reverse Torsional and Bending Cyclic Stress, Shot Peening, Institute of Precision Mechanics, Warsaw, Poland (1999), 161-166.
- 7) Masumoto Isao, Shinoda Takeshi and Tajima Naoyuki : Fatigue Strength of the Welded Joints by Various Coated Electrodes, J.JWS, 44-3 (1975), 202-210. (in Japanese)
- 8) Masumoto Isao, Shinoda Takeshi and Suzuki Katsuhiro : Fatigue Strength of Welded Joints by CO₂ Welding, J. JWS, 45-10 (1976), 882-889. (in Japanese)