ショットピーニングを施したSS400 溶接鋼板の疲労強度及び破壊特性

大 藪 優·佐 藤 裕 介*·杉 山 誠***

Fatigue Strength and Fracture Properties on Welding S S 4 0 0 Producted Shot Peening Masaru OHYABU · Usuke SATO* · Makoto SUGIYAMA**

1. はじめに

機械構造物の強度は、構成するそれぞれの部材の強 度に大きく支配される。強度を高める方法に最近、部 材全体の処理でなく表面の改質をねらった加工処理が 注目されている。例えば、従来の高周波焼入れは、20 秒間ほどの表面熱処理を行ったが、新しく試みられて きている輪郭高周波焼入れでは、わずか0.20秒ほどの 表面熱処理で効果が上がることがいわれている。

しかしながら、ここで取り上げるショットピーニン グによる表面改質処理は、簡便で経済的であり表面の 状態も一定の模様を呈し、ショット効果による圧縮残 留応力によって疲労強度の向上を得る特長がある。

なお、ショットピーニングの総論については前報29 号に記した。

2.目 的

大型あるいは省資源目的の機械構造物は、溶接に よって構築される。溶接部分には熱によるひずみ、引 張り残留応力の影響によって応力集中源が存在するこ とが発現し、溶接をしないときより疲労強度は約22~ 44%の降下がでるともいわれる。ショットピーニング は、侵炭鋼、球状黒鉛鋳鉄、機械構造用炭素鋼など比 較的高級な機械材料に対して行われた研究は多いが、 一般圧延用鋼材SS400の溶接部分にショットピーニン グを施し、溶接構造部全体の疲労強度及び破壊特性を 考慮にいれた研究はあまり例を見ない。

このような観点から、溶接SS400にショットピーニ ングを施さないものと施したものを曲げ疲労試験をし、 その結果よりマクロ及びミクロフラクトグラフィ解析 を行い、溶接構造部の破壊特性を追求した。また、前 報29号で報告した溶接をしないSS400の結果をも合わ せて比較検討した。

※よろず(株)(H9/4~)※※岩谷ガス(株)(同)

3. 実験方法

3-1. 溶接試験片の製作

板厚3.2mmのSS400をダイヘン社製TIG炭酸ガスアー ク溶接機にて、図1に示す試験片を30枚製作した。溶 接条件は試行錯誤の結果、電流150A、電圧22V、ワイ ヤー∮1.2mmで行った。溶接部の善し悪しは、疲労試 験の結果を左右する重要な出発点でありできる限り溶 接部を頑丈に一定にするために、溶接継手の強度上最 も信頼性が高いとされる突き合わせ継手を行い、溶接 トーチを自動送りとした。

3-2. ショットピーニング条件の設定

30枚の試験片をムク材・A材・B材の格10枚に分け、 噴射圧力をA材には4.6kgf/cm⁴、B材には2.6kgf/cm⁴ に設定した。ショット材は∮0.6mm鋳鉄(白銑)であ る。噴射時間の決定は前報29号と同様に、アルメンス トリップ試験片を用いA材・B材の条件で得られたイ ンテンシティ線図と噴射時間決定式より求めた。その 結果、A材は90秒、B材は120秒と決まった。ショッ トピーニングは、不二製作所製汎用手動式(直圧ブラ スト式)FDQ-4タイプを使用した。

3-3. 疲労試験

島津製作所製曲げ疲労試験機TB-10Bに完成した試 験片ムク材・A材・B材を一枚ずつセットし、両振り 曲げ疲労試験を行った。曲げ応力 σ_b は40.0kgf/mfを はじめとして各設定応力で破断した繰返し数 N_i を採 取した。繰返し数 10^7 回の時間強度をもって疲労限度 σ_* とした。

3-4. マクロ及びミクロフラクトグラフィ

マクロフラクトグラフィにはオリンパス製実体顕微 鏡SD-60で巨視的破面を、ミクロフラクトグラフィに は日本電子製走査型電子顕微鏡JSM-T300で微視的破 面を解析した。

3-5. 溶接部及び非溶接部の硬度

疲労強度に及ぼす硬度の影響をAKASI製マイクロ ビッカース硬度計AVK-C2を使用して調べた。

-61-

4. 実験結果

4-1. ショットピーニングによる表面層

A材・B材のそれぞれを図2及び図3に示す。代表 の痕粒径は $d_A = 0.28$ mm、 $d_B = 0.23$ mmとなり、B材が 痕の状態は平均している。

4-2. 疲労試験

疲労試験の結果より得られたS-N線図を図4に示 す。N=10⁷回における疲労限度は、ムク材で $\sigma_{WA}=1$ 7.0kgf/mf、A材で $\sigma_{WA}=20.5$ kgf/mf、B材で $\sigma_{WB}=22.5$ kgf/mfと決定された。

4-3. マクロフラクトグラフィ

図5~7に示す通り、突き合わせ継手の盛り上がり の山でなく、麓(溶接部ビード)に応力集中が起こり 破壊している。破面の写真は倍率×20で撮影したもの で、上側から疲労き裂が進展し下側が最終破面である。 上側上部では疲労試験機の構造上、破壊の瞬間破面同 士がぶつかりこすれてしまったと考えられる部分(タ イヤトラック)が存在する。疲労層と最終破面の境界 がはっきりと分かる。

4-4. ミクロフラクトグラフィ

図8~10に示す通り、SEMによる解析によって疲 労き裂進展方向(FCP)に明瞭なストライエーション が観察された。最終破面は引張り型ディンプル(図11) が現れていることから、一気に破壊したのでなくある 程度のじん性を持ってゆっくり破壊している。

4-5. ビッカース硬度の測定

疲労試験をしない試験片を溶接部と非溶接部に分け てファインカッターで切断し、切断面をエメリペーパー で研磨した。以上の結果をまとめて表1に示した。表 2に溶接なしのSS400のデータを示した(前報29号)。

5.考 察

表1と表2より、疲労限度はムク材では17.0kgf/ md、溶接なしの場合で19.5kgf/mdと約13%の減少と なった。これは溶接時のぜい性がもろに現れている (今回は溶接後の後処理を行わなかった)。また、A材・ B材ではそれぞれ20.5kgf/md・22.5kgf/mdと、溶接 なしの場合と比べ差はそれ程見られなかった。しかし ながら、B材はムク材に比べ増加率が32.4%と大きな 伸びを示し、疲労強度に対するショットピーニングの 効果はかなり有効であると判断される。

破面のマクロフラクトグラフィの結果より、丸棒試

験片に見られるビチーマークは観察されず破壊の起点 を知ることはできなかった。疲労破壊層を測定した結 果、ムク材で1.83mm、A材で1.95mm、B材で2.18mmと なり、B材の疲労強度が向上した原因となっている。

ミクロフラクトグラフィから、疲労破面には所々に ストライエーションが図8~10に示す通り観察された が、疲労破面全体にきれいには現れていない。しかし ながら、比較的良好に観察されたストライエーション より、き裂進展速度を知る目安としてストライエーショ ン間隔の平均値をそれぞれの繰返し数で割った値 (da/dN)を求めた。その結果、ムク材で2.37×10⁻⁷ mm/cycle、A材で1.30×10⁻⁷mm/cycle、B材で3.80× 10⁻⁸mm/cycleとなり、B材のき裂進展速度が最も遅い ことが分かった。これはB材の疲労強度が向上してい ることを示している。一方、最終破面においては引張 り型ディンプルパターンが破面全体に観察され延性破 壊が生じており、リーバーパターンは見られずぜい性 破壊は起こっていないことが分かった(図11)。

ビッカース硬度の推移を見てみると、板厚の中央部 ではそれ程のばらつきは見られないが、溶接部の表層 部ではムク材に対してA材の増加率は53.5%、B材で は58.6%と約2倍以上になっている。硬度に差がある ことは良好と言えず溶接後の後処理をしなかったこと が原因であり、この処理を適切に行っていれば疲労強 度はもっと向上するものと推察され、今後の研究に生 かしたい。

ショットピーニング処理の一連の作業で考察される ことは、ショットピーニングマシンの構造上からくる 問題である。即ち、ショット材噴射時間決定のインテ ンシティ線図描画のためのアルメンストリップテスト 及び試験片への実際のショット材投射を全て手動で行っ ていることである。投射面と噴射ノズルの距離を150 mmに保つのであるが、これがなかなか難しい。また、 一定の噴射圧力は微妙に変化するのを受けて、噴射時 のショット圧力が変化してしまう。このことから、前 報29号の噴射時間はA材で166秒、B材で115秒と、今 回はA材で90秒、B材で120秒と算出された。これを 一定に保ち噴射ノズルの自動化をメーカー側と研究中 である。

6.結 言

溶接鋼板SS400の疲労強度は以下により向上した。 (1)噴射圧力2.0kgf/cm⁴、噴射時間120秒のショットピー ニング条件が適切である。

(2)疲労限度は22.5kgf/mmである。

(3)板厚3.2mmのうち疲労層は2.18mmである(ただし、曲 げ応力30kgf/mf、繰返し数1.5×10⁵)。 (4)疲労き裂進展速度は3.80×10⁻⁸mm/cycleである(同上)。

本研究を行うに当り、試験片製作では有限会社長島 産業社長・長島輝教氏、ショットピーニング関係では 全面的に株式会社不二製作所技術部長・菅沢好一氏及 び同社技術課・斉藤博氏に、絶大なるご協力と貴重な ご助言を戴きました。深く感謝致します。また、炭酸 ガスアーク溶接では本校機械工学科・田中好一助教授 に溶接機の借用及び使用について、親切なご教授とご 助言を戴きました。厚くお礼申し上げます。試験片製 作、治具製作では本校実習工場・猪瀬久男氏と斎藤浩 氏には工具及び装置をお借り致しました。有難うござ いました。実験及び解析その他多くに当り終始ご指導 戴きました本校機械工学科・橋本彰三教授に厚く感謝 致します。



図1 溶接鋼板SS400の試験片



図2 ショットピーニング表面層(A材)



図3 ショットピーニング表面層(B材)



図4 溶接鋼板SS400のS-N線図

小山工業高等専門学校研究紀要 No.30



σ =30kgf/mm N_=1.22×10⁵

-64-



図8 ミクロフラクトグラフィ(ムー2のX部)



図9 ミクロフラクトグラフィ(A-2のY部)



図10 ミクロフラクトグラフィ(B-2のZ部)

表1 実験結果一覧

		ムク材	A 材	B 材
N=10 ⁷ 回付近に おける疲労限度 _{σ wkg f / mn⁴}		17.0	20.5	22.5
ムク材に対する			20.6	32.4
N _t =10 ⁵ 回付近を 例としたき裂進展 速度 da/dN mm/c		23.7 ×10 ⁻⁷	13.0 ×10 ⁻⁷	38.0 ×10 ⁻⁸
同上の疲労層厚さ mm		1.83	1.95	2.18
ビッカース硬度	溶接部 H _{v1}	157	241	249
	同上ムク材に対 する増加率 %		53.5	58.6
	非溶接部 Hv2	138	152	177
	同上ムク材に対 する増加率 %		10.1	28.3

表2 溶接なしのSS400の実験結果

	ムク材	A 材	B 材
N=10 ⁷ 回付近に おける疲労限度 σ _w kg f /m ²	19.5	20.0	22.0
ムク材に対する σ _w の増加率%		2.56	12.8

(受理年月日 1997年 9 月30日)