しつつ, 上述のような手順によって溶接材料の必要強度レベルを決定すればよい。

7. 結 論

(1) 軟質溶接継手の静的引張強度は, JIS type の小形の継手引張試験片では母材強度を下廻るが, 十分広幅の継手では等質溶接継手と同程度の強度を示すこともある。広幅継手における継手引張強さ σ_u と一様伸び ε_u は工学的に

$$\sigma_u \geq \begin{cases} 0.87\sigma_u^W + 0.29\sigma_u^B & : 0.7 < \sigma_u^W / \sigma_u^B < 0.82 \\ \sigma_u^B & : 0.82 \leq \sigma_u^W / \sigma_u^B \end{cases}$$

$$\varepsilon_u \geq 11(\sigma_u^W / \sigma_u^B) - 6 (\%) : 0.7 < \sigma_u^W / \sigma_u^B < 1$$

で評価できる。

(2) 溶接部近傍の破壊靱性は軟質・等質の間には差が認められず, 残留応力や角変形が重畳した切欠付溶接継手の破壊性能も水圧鉄管の使用温度範囲では, 軟質・等質の間にはほとんど差が見られない。

(3) 等質・軟質両継手ともに, 水圧鉄管に生ずると考えられる種々の変動応力に対応する疲れ性能は十分に満足している。

(4) 水圧鉄管円周溶接継手に使用する軟質溶接材料の決定は, 主としてその静的引張性能に注目すればよく,

溶接材料の必要強度レベルの決定手順を示した。

最後に, 本研究に終始有益な御助言, 御指導を頂いた埼玉大学工学部奥村敏恵教授に感謝の意を表します。また, 実験および検討に御協力頂いた新日本製鉄(株)製品技術研究所ならびに八幡製鉄所に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦彦, 豊田政男, 浮田和明, 中村明弘, 松浦十四彦: 軟質溶接継手の HT80 水圧鉄管現場円周継手への適用性について (第1報) —溶接割れに対する検討—, 溶接学会誌, Vol. 47 (1978), No. 5, 283~288
- 2) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会 S J 委員会 (主査: 佐藤邦彦): 軟質溶接継手の力学的挙動と強度に関する研究 (総合報告書), (1975)
- 3) British Standards Institution: Methods for Crack Opening Displacement Testing, DD19 (1972)
- 4) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会 B E 委員会 (主査: 田村 博): 溶接構造用鋼板のボンド脆化に関する共同研究 (B E 委員会共同研究総合報告書), (1975)
- 5) 三波建市, 征矢勇夫, 萩原行人, 佐藤光雄: 表面欠陥からの脆性破壊発生に対する K_{IC} 値の検討, 溶接学会全国大会講演概要, 第15集 (1974), 430~431.
- 6) 白石隆俊: 構造用高張力鋼継手の疲労強度, 溶接学会 第8回講習会テキスト, (1965), 146~154.
- 7) 佐藤邦彦, 豊田政男, 藤井英輔: 軟質溶接継手の静的引張強度に関する研究, 日本造船学会論文集, Vol. 132 (1972), 381~393

溶 接 継 手 の 疲 れ 強 さ 改 善 に お よ ぼ す 局 部 加 熱 急 冷 の 影 響 (第1報)

——半円切欠付平板試験片の疲れ強さ改善について——

益 本 功** 赤 石 徹** Hedwig Handl**

Effect of Spot Heating and Rapid Cooling on Fatigue Strength Improvement of Welded Joint (1st Report)*

—Fatigue Strength Improvement of Semi-Circular Notched Plane Specimen—

by Isao Masumoto**, Tohru Akaishi** and Hedwig Handl**

It is well known that spot heating and following rapid cooling increase the fatigue strength of welded joint. And the reason has been attributed to the residual stress change from tension to compression at the location of fatigue crack initiation.

However, there are many different reports about the effect of residual stress on the fatigue strength of welded joint. And their conclusions does not always coincide.

Therefore, it is a little problem to consider that the change of residual stress distribution should increase fatigue strength of welded joint.

*原稿受付 昭和52年6月10日 (昭和48年度秋季全国大会にて発表)

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

On the other hand, it has been previously reported that the reasons of fatigue strength improvement by hot galvanizing and rapid cooling was mainly aging effect.

In this report, the effect of residual stress change and aging effect by spot heating up to about 580°C and rapid cooling on fatigue strength are investigated, using SS41 steel plate and in vacuum melted 0.003 % and 0.27 % carbon steel.

Results obtained are as follows:

- 1) The fatigue strength of SS41 steel plate is almost equally increased, in spite of different residual stress distribution by center spot heating, notch root spot heating and furnace heating followed by rapid cooling.
- 2) While fatigue strength of 0.003 % carbon steel plate do not increase by center spot heating and rapid cooling, fatigue strength of 0.27 % carbon steel plate increases by the same heat treatment.

These experimental results make deduce that one of the main reason of the fatigue strength improvement of welded joint by spot heating and rapid cooling is aging effect of over saturated carbon in α -ferrite.

1. ま え が き

鋼材溶接継手の疲れ強さ改善の一方法として、溶接継手近傍を点状に A_1 点以下 500°C 以上に加熱し、空冷または水冷する局部加熱急冷法がある。¹⁻⁴⁾ これによる疲れ強さの向上は溶接継手近傍の引張残留応力が圧縮残留応力に変化するためとされている。^{1,2)}

しかしながら、溶接継手の残留応力が疲れ強さにおよぼす影響については種々の報告があり、一義的ということではできない。たとえば、応力除去焼鈍の疲れ強さにおよぼす影響についても、Gurney⁵⁾ および Harrison⁶⁾ らは板厚中央に介在物をもつルチル系溶接棒による溶接継手の疲れ強さが応力除去焼鈍により向上することを報告しているが、この原因は焼鈍による拡散性水素の減少であると説明している。一方、Izdinsky,⁷⁾ Baren,⁸⁾ Kenyon⁹⁾ および Ouchida¹⁰⁾ らは、応力除去焼鈍により溶接継手の疲れ強さは一般的にはほとんど変化しないことを報告し、さらに、Braithwaite ら¹¹⁾ は逆にかなり低下するとのべている。

また、焼ならしの疲れ強さにおよぼす影響について、Gurney¹²⁾ はわずかに向上することを示しているが、この原因についても焼ならしにより応力除去と表面脱炭が生じるので、説明は困難であるとのべている。また逆に、Baxter¹³⁾ は焼ならしにより溶接継手の疲れ強さは低下するという結果を示している。

したがって、上記の局部加熱急冷処理による疲れ強さの改善が残留応力の変化によるという断定は、やや疑問に思われる。

著者らが従来から行なっている低温加熱急冷（亜鉛浴または A_1 点以下の温度に加熱急冷）による鋼材溶接継手の疲れ強さ改善の研究では、その改善の原因として時効の影響が大きいことを明らかにしている。¹⁴⁾ 溶接継手疲れ強さ改善のための局部加熱急冷の最高加熱温度は約 500°C で、^{1,2)} 著者らの実験条件に近い。¹⁴⁾ そこで、この

局部加熱急冷による疲れ強さ改善にも残留応力変化のみでなく、時効による影響があるものと考えられる。この点が明らかになれば、局部加熱急冷処理による疲れ強さ改善を適確に行ない得る指針が得られる。

本研究は、この点を明らかにする目的で行なったもので、実験には SS41 鋼材の半円切欠付き試験片を用い、切欠部に引張りまたは圧縮の残留応力分布を生ずるよう最高加熱温度を 550°C とし、局部加熱急冷処理を行ない、残留応力と時効とが疲れ強さにおよぼす影響を調べた。また時効を生じないと考えられる 0.003% 極低炭素鋼および時効を十分生じる 0.27% 炭素鋼の 2 種類の材料を真空溶解により作成し、それぞれの材料についても同様の実験を行ない、局部加熱急冷による時効の効果が疲れ強さ改善に寄与していることを確認した。

2. 実 験 方 法

2-1 供試鋼材および試験片形状

実験には、Table 1 に示す機械的性質と化学組成をもつ板厚 7 mm の SS41 鋼板と、実験室で真空溶解した炭素含量 0.003% および 0.27% のインゴットを鍛造、圧延し、使用した。実験室で溶製した試験材は真空溶解炉により電解鉄を溶解し、銑鉄を加えて所定の炭素量の鋼塊約 3 kg を熱間圧延し、板幅 85 mm、板厚 7 mm および長さ 700 mm の鋼板としたものである。このように溶解作成した鋼板を A_3 点 (0.003% 炭素鋼; 920°C, 0.27% 炭素鋼; 830°C) で 10 分間保持後空冷して焼ならし、その後機械加工により 80×300×5 mm の試験片とした。その中一方を無処理の試験片とし、他方を中央部点加熱用試験片として用いた。試験片はすべて機械加工の後、真空炉を用いて、650°C で 1 時間応力除去焼鈍を行なった。

疲れ試験片の形状および寸法を Fig. 1 に示す。試験片半円切欠部の応力集中係数は 2.6 である。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Materials	Chemical compositions (%)						Mechanical properties		
	C	N	Si	Mn	P	S	Yield stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	elongation (%)
SS41	0.17	0.004	0.03	0.88	0.014	0.013	28	44	27
Fe-0.003%C	0.003	0.003	0.01	0.02	0.003	0.006	15.5	24.9	—
Fe-0.27%C	0.27	0.003	0.01	0.02	0.003	0.005	17.5	34.8	42

Fig. 1 Dimensions of fatigue test specimen

2-2 局部加熱急冷処理

試験片には、中央部点加熱急冷、切欠底加熱急冷および炉中加熱急冷の3種類の処理を行ない、試験片切欠部の残留応力分布を変化させた。

点加熱は酸素—アセチレンガス溶接用トーチにより行なった。中央部点加熱および切欠部点加熱の要領をそれぞれ、Fig. 2 および Fig. 3 に示す。中央部点加熱を行なうとき、試験片の表裏で温度差を少なくするためには、両面から同時に加熱することが望ましいが、加熱温度の制御が困難であるので本実験では下面の片側からのみ加熱した。切欠部点加熱を行なうときは、2本のトーチにより2つの切欠部を同時に加熱した。

Fig. 2 に示す中央部点加熱の温度を制御するために、白金—白金ロジウム熱電対を中心部および切欠部の穴に埋込み、試験片の加熱側表面近傍の熱履歴を測定した。また同時に、加熱炎中心の反対側表面に500℃用および600℃用、切欠近傍に200℃および250℃用のサーモメルト粉末を巾方向に帯状に置き、その溶融状態を観察した。その結果、熱電対により測定した下側すなわち加熱側表面温度が580℃のとき、上側表面の500℃用のサーモメルト粉末が加熱中心より約10 mm溶融しているのが観察された。したがって、本実験の板厚5 mmの試験片の場合、両面での温度差は数十度であるが、実験上支障はないものと考えた。また、熱電対で測定した熱履歴をFig. 2の図中に示した。この予備実験の結果から、加熱側表面の最高加熱温度は580℃とした。

また以上の予備実験の結果から、各疲れ試験片の加熱温度制御はサーモメルト粉末のみで行なった。すなわち、上面（加熱面反対側）の500℃用サーモメルト粉末が加熱中心で約10 mm溶融した時、即座に0℃の氷水中に急冷した。

切欠部点加熱にはFig. 3に示すごとく2本のトーチを

Fig. 2 Method of center spot heating and thermal cycle

Fig. 3 Method of side spot heating and thermal cycle

同時に使用し、これについても上述と同様な予備実験を行ない、Fig. 3の図中に示すごとく、切欠部近傍の熱履歴を予め求めた。この時試験片中央部の温度は約220℃であった。切欠部加熱時間は中央部点加熱の場合とほぼ同程度とし、切欠部の500℃のサーモメルトが10 mm溶融した時、直ぐに0℃の氷水中に急冷した。

また比較のため炉中で均一加熱急冷したものについても実験を行なった。この場合、試験片表面の脱炭を防止するため試験片を鋳鉄粉末に埋込み、550℃で10分間加熱した後、0℃の氷水中に急冷した。

真空溶解した2種類の炭素鋼については、上記の熱処理のうち、中央部点加熱急冷のみを行ない、熱処理をしないものと疲れ試験結果を比較した。

2-3 残留応力の測定

上述の熱処理を行なった試験片について、それぞれ残留応力の測定を行なった。測定は試験片の切欠きを結ぶ線上の数点に抵抗線歪ゲージをはりつけ、切出し法で行なった。

2-4 疲れ試験

疲れ試験は島津万能疲れ試験機で、軸荷重、片振引張りで行なった。なお、荷重方向は試験片の長手方向で供試鋼材の圧延方向と一致させた。応力繰返し速度は毎分2,200~2,300回である。

3. 実験結果および考察

3-1 加熱急冷処理による残留応力分布

上述の3種の加熱急冷処理をした試験片表面の荷重方向およびそれに直交する方向の残留応力 σ_y および σ_x を Fig. 4 にまとめて示す。中央部点加熱急冷試験片では中央部に約 24 kg/mm^2 の引張り残留応力、切欠部に約 16 kg/mm^2 の圧縮残留応力が荷重方向に存在している。切欠部点加熱試験片では、切欠部近傍にのみ約 4 kg/mm^2 の引張残留応力が存在し、他の場所では約 5 kg/mm^2 の圧縮残留応力が荷重方向に存在している。また炉中加熱急冷試験片では、著者の一人がすでに他の亜鉛浴浸漬加熱急冷処理の研究¹⁴⁾で示しているごとく巾全体に大きな圧縮残留応力が存在している。

Fig. 5 は炉中加熱急冷試験片の中央部2点における板厚に沿っての σ_x および σ_y の分布を Rosenthal ら¹⁵⁾の提案した方法により測定した結果である。この場合、残留応力は表面で大きな圧縮残留応力を示すが、板厚中

心に向って漸減し、中心部ではほとんど残留応力は存在しない。

各試験片の中央部および切欠部の残留応力の種類を各種熱処理についてまとめたものを Table 2 に示す。

Table 2 Residual stress distribution and quality

Heat treatment	Residual stress	
	in the middle	at notch root
Center spot	tension	compression
Side spot	compression	tension
In furnace	compression	compression

3-2 疲れ試験結果

上述の3種の加熱急冷処理を行ない、切欠部の残留応力の異なる SS41 鋼の疲れ試験結果を、Fig. 6 に比較して示す。10⁶ 回での時間強さで比較すれば、無処理試験片は 15.5 kg/mm^2 であるのに対し、中央部点加熱急冷試験片では 19.1 kg/mm^2 であり、いずれの熱処理によ

っても時間強さは向上している。しかし、各処理による差はわずかである。

これらの試験片の残留応力は Table 2 に示したように、き裂の発生部および伝播部のいずれにおいても異なる。それにもかかわらず、疲れ強さは同程度であることから、これらの熱処理による残留応力の変化は疲れ強さに本質的な影響を与えていないと考えられる。

つぎに真空溶解した 0.003% C および 0.27% C 鋼試験片により、無処理のものと中央部点加熱急冷したものとの疲れ強さの比較を Fig. 7 にまとめて示す。焼入れ時効を生じないと考えられる 0.003% C 鋼の場合には、無処理および中央部点加熱急冷試験片で、疲れ強さに全く差は認められ

ない。炭素含量 0.27% で、時効を生じ易い材料では、中央部点加熱急冷により、時間強さがかなり改善されている。0.003% C および 0.27% C 鋼のそれぞれに中央部点加熱急冷処理をすることにより生じた残留応力分布を Fig. 8 に示す。炭素含量により両者の間に残留応力の差は生じないと考えられるが、本実験結果も本質的な差がないことを示している。もし、切欠部の圧縮残留応力が疲れ強さを向上させるならば、中央部点加熱急冷により 0.003% C 鋼についても疲れ強さの向上が認められるはずである。しかし、0.003% C 鋼では中央部加熱急冷の疲れ強さ改善の効果がなく、0.27% C 鋼にのみ効果が認められるのは、疲れ強さ改善に時効が影響しているた

Fig. 4 Residual stress distributions of SS41 steel specimens after center spot heating, side spot heating and furnace heating

Fig. 5 Residual stress distributions across the thickness of SS41 steel specimen after furnace heat treatment

Fig. 6 Effect of heat treatments of fatigue strength of SS41 steel

Fig. 7 Effect of center spot heating on fatigue strength of 0.003%C and 0.27%C steel

Fig. 8 Residual stress distributions of 0.003%C and 0.27%C steel specimen after center spot heat treatment

めと考えられる。

4. 結 言

半円切欠き ($\alpha=2.6$) をもった板厚 5 mm の SS41 鋼材および実験室で真空溶解した 0.003%C および 0.27%C 鋼の半円切欠試験片を用い、無処理、加熱温度約 500°C 以上の中央部点加熱急冷、切欠部点加熱急冷および 550°C 炉中加熱急冷の処理を行ない、疲れ強さに

およぼす残留応力および時効の影響について検討した結果、次の結論を得た。

(1) SS41 鋼材の疲れ強さは中央部点加熱急冷、切欠部点加熱急冷および炉中加熱急冷のいずれの熱処理によっても無処理の試験片より向上した。しかし、各熱処理による差はわずかであった。すなわち、試験片の残留応力の変化は疲れ強さに本質的な影響を与えなかった。

(2) 炭素含量 0.003% の試験片の疲れ強さは、中央部点加熱急冷処理によって向上しなかった。

(3) 炭素含量 0.27% の試験片の疲れ強さは、中央部点加熱急冷処理によって向上した。

以上の実験結果から、溶接継手点加熱急冷処理による疲れ強さ改善の効果はフェライト中の過飽和炭素による焼入れ時効が主因と考えられる。

参 考 文 献

- 1) R. Gunnert: Method for Improving a Weld's Resistance to Fatigue by Reheating and Rapid Cooling, Welding in the World, 1 (1963), No. 3, p. 104-107
- 2) T. R. Gurney and L. N. Trepka: Influence of Local Heating on Fatigue Behaviour of Welded Specimens, British Welding Journal, 6 (1959), p. 491-497
- 3) T. R. Gurney: Fatigue of Welded Military Structures, British Welding Journal, 15 (1968), p. 276-282
- 4) J. D. Harrison: Exploratory Fatigue Tests on Local Heating as a Repair Technique, British Welding Journal, 12 (1965), p. 258-260
- 5) T. R. Gurney: Effect of Stress Relief on Fatigue Strength of $\frac{1}{2}$ in. Thick Transverse Butt Welds Containing Slag Inclusions, British Welding Journal, 11 (1964), p. 593-603
- 6) J. D. Harrison: Further Fatigue Tests of $\frac{1}{2}$ in. Thick butt Welds Containing Slag Inclusions, British Welding Journal, 15 (1968), p. 85-93
- 7) O. Iždinsky: Einfluss des Glühens auf die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen, Schweisstechnik (DDR), 22 (1972), p. 454-456
- 8) M. R. Baren and R. P. Hurlabaum: The Fatigue Properties of a Welded Low Alloy Steel, Welding Journal, 50 (1971), p. 207s-212s
- 9) N. Kenyon, W. B. Morrison and A. G. Quarrell: Fatigue Strength of Welded Joints in Structural Steels
- 10) H. Ouchida and A. Nishioka: Dauerfestigkeit von Kehlnähten, Schweisstechnik (DDR), 16 (1966), p. 150-157
- 11) A. B. M. Braithwaite and T. R. Gurney: Fatigue Tests on Cross Girder Constructions, British Welding Journal, 14 (1967), 7, 71-81
- 12) T. R. Gurney: Some Fatigue Tests on Fillet Welded Mild and High Tensile Steel Specimens in the As-Welded and Normalised Conditions, British Welding Journal, 13 (1966), p. 648-651
- 13) D. E. Baxter and F. G. Modlen: Some Factors Affecting the Fatigue Strength of Fillet Welds, British Welding Journal, 13 (1966), p. 184-188
- 14) 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4報) 本誌, 第38巻 (1969) 第8号, 847-856
- 15) D. Rosenthal and J. T. Norton: A Method of Measuring Triaxial Residual Stress in Plates, Welding Journal 24 (1945), p. 295s-307s