低温応力除去法

炉中焼鈍中の但し書によって低温応力除去法を行う場合には、熔接線の両側を各々約100mm巾にわたって150°C～200°Cの温度に加熱し、直ちに水冷しなければならない。

ピーニング

本法は割合重要度の低い熔接部にたいして行うことができる。たゞし本操作は熔接部が常温になってから実施するものとする。

熔接管の残留応力分布に関する二三の実験的研究*

渡辺正紀** 峰久節治** 尾上久浩***

Some Experimental Studies to the Residual Stresses of the Welded Pipes*

By M. Watanabe,** S. Minehisa** and H. Onoe***

Abstract

We studied the distributions of residual stresses of the seam-welded and circumferentially welded pipes, changing the welding sequence such as shown in Fig. 2. The results of our experiment were shown in Fig. 3~Fig. 6. To compare these results, we adopted the maximum value of the stress, equivalent stress (σ_{eq}) defined by the eq. (1) and the triaxiality ratio (Tr) defined by the eq. (3). Fig. 11~Fig. 14 show these values of each specimens.

Generally speaking, the residual stress distributions in the seam-welded pipes are nearly the same as in the butt welded plate, but the stress distributions of the circumferentially welded pipes are not the same as in the butt welded plate. As shown in Fig. 9, effects of bending moment can be considered in the latter cases.

I. 緒言

熔接々手に残留する応力に関する実験的研究は古くより種々の場合について多数発表せられている。しかし熔接管についてなされたものは僅少にして、最近に研究が発表せられているが¹⁾、極く特性的な記述がなされているにとまり充分なる資料が発表せられるに至っていない。著者の一人が管の熔接に関して特に注目するに至ったのは、これらの文献の発表より更に古く昭和26年(1951年)に蒸汽管の事故調査を行ったときからであるが²⁾、諸般の事情により研究が遅れはゞ昭和27年に実験を完成したものである。なおこれとは別にかねて低温応力緩和法について研究を進めてきたのであるが³⁾、本法を有効確実に適用するには予め熔接後の応力分布の特性を認識しておく必要があり⁴⁾、こ

の見地よりこれを実物の製品に適用するに当り最も製品として一定の応力分布特性をもつてあらうと考え得る熔接管への適用を試みたいとの意図をもった。

本研究はかゝる意図の下にまづ熔接管を種々の熔接順序で熔接した場合の応力分布の特性を明にせんと試みたものである。なおこれに対する低温応力緩和法の適用については掲載の順序が逆になったが本誌1月号に発表せられた。

II. 試験体及び残留応力測定法

熔接管としてはシーム熔接管(Seam Welded Pipe)と2ヶの管の銜合円周熔接管(Butt Welded Pipe)の二種が考えられる。もちろん実際の場合にはこの両者を同時に使用する場合も多いわけであるが、本報は基本的な場合として前述の両者の場合について実験を行った。シーム熔接管はFig. 1(a)の如く外径200mm、壁厚7mm、長さ500mmの円管の母線上にわざわざ実験のためにミリーングカッターでFig. 1(c)のような開先をとり、その上に熔接を行ったものである。また銜合円周熔接管はFig. 1

* 原稿受付 昭和28年2月(昭和28年度熔接学会春季学術講演会において発表)

** 正員、大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University.

*** 正員、三菱日本重工横浜造船所 Member, Mitsubishi Nihon Heavy Industry Co. Ltd. Yokohama Ship Yard.

(b) の如く外径 200mm, 壁厚 7mm, 長さ 300mm の円管の端部を Fig. 1 (c) のように開先をとり二本突合せ溶接したものである。溶接はいずれも神鋼 B-10 4mm 棒で 2 層溶接を行った。

熔着法としてはシーム溶接管では Fig. 2 (a) に示すような管の一端から一端まで一方向に連続して溶接を行う Straight 法及び円管の中央部から左右に振りわけて溶接を行う Symmetry 法の二種を採用し、銜合円周溶接管には Fig. 2 (b) のように円周上のある点を基準にとって、それより全円周を一方向に連続的に溶接する Straight 法、基準点より左右に振りわけて半円周づつを溶接する Sym-

metry 法及び全円周を四等分して四分円を一つ飛びに溶接して行く Skip 法の三種を採用した⁵⁾。

残留応力の測定は電気抵抗線歪計を用いて行ったが、その方法は次の如くである。すなわち標点距離 9.0mm のゲージを円管外面の測定点に溶接線方向とそれに直交する方向の二方向に二枚貼りつけ、その後このゲージの周囲を鋸切りしゲージを含む小片を試験体より切り出し、その際ゲージに表われる歪の弛緩量を求め、その結果より弾性公式

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu\epsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu\epsilon_x)$$

を用いて残留応力を算定した。ただし上式中 σ , ϵ はそれぞれ応力及び歪を、また添字 x , y は溶接線方向およびそれに直交的方向を表す。もちろん E 及び ν は材料のヤング率及びポアソン比である。なお応力の測定は管の外表面のみで行った⁶⁾。

III. 実験結果及び考察

シーム溶接管の残留応力分布は Fig. 3 及び Fig. 4 に示す通りであるが、Fig. 3 は溶接線上で測定した結果であり、Fig. 4 は管の中央部の円周上で測定した結果である。

銜合円周溶接管の残留応力分布は Fig. 5 及び Fig. 6

(a) Dimensions of Seam Welded pipe

(b) Dimensions of Butt Welded Pipe

(c) Detail of Groove

Fig. 1 Test Pieces.

(a) Seam Welded Pipe

(b) But Weld Pipe

Fig. 2 Welding Sequences.

(a) Residual Stress Distribution in the direction of welding

(b) Residual Stress Distribution in the circumferential direction

Fig. 3 Residual Stress Distribution measured at Each Sections of the Seam Welded Pipe

に示す如くであるが、Fig. 5 は熔接線上におけるものであり、Fig. 6 は母線上におけるものである。

Fig. 3 (a) はシーム熔接管の熔接線上熔接線方向（軸方向）の応力分布図であるが、これによると Straight 法に比して Symmetry 法はその熔接開始点すなわち円管中央部で応力が小となっている以外余り変りはないようである。これらの傾向は平板の衝合熔接の場合にみられるものと全く同様のものである。Fig.

Fig. 4 Residual Stress Distribution measured at the middle Section of the Seam Welded Pipe.

Fig. 6 Residual Stress Distribution measured at Each Sections of the Butt Welded Pipe.

3 (b) は (a) 図と同位置における熔接線と直交方向（円周方向）の応力分布図であって Straight 法の方が Symmetry 法に比して一様に引張側にあるが、傾向としては両者共中央部で圧縮両端部で引張応力がある。これは Fig. 7 の如く両端部が開き、中央部が縮まって鼓形の変形をしているためと考えられる。

Fig. 4 (a) はシーム熔接管の中央部円周上の熔接線方向（軸方向）の応力分布図である。この場合 Straight 法と Symmetry 法とが熔

接線附近で応力値に相当差異を生じているが、これは Fig. 3 (a) の端部から 250mm（管の中央部で Symmetry 法で bead をついだ所）の位置で測定しているため生じたものであって、Fig. 3 (a) より推察すれば他の位置では大差ないように思われる。この分布状態も平板の衝合熔接時にみられるものとよく似ている。Fig. 4 (b) は Fig. 4 (a) と同位置における熔接線に直交方向（円周方向）の応力分布図である。この分布状態をみると熔接線上で圧縮応力が存在しており、平板の場合とやや異なるようであるが、これは Fig. 8 に表わすように熔着金属部の収縮に伴い曲げモーメントが生じ、このために外面に圧縮、内面に引張応力が生ずる故であろう。

Fig5 (a) は衝合円周熔接管の熔接線上熔接線方向（円周方向）の応力分布である。この応力分布は曲げモーメントの影響が入っており複雑な形状となっている。この形式は平板の場合と非常に異なり、平板の場合には引張応力となるべきものが管の外面応力は Straight, Symmetry の両

Fig. 5 Residual Stress Distribution measured at Welded Line of the Butt Welded Pipe.

Fig. 7

Fig. 8

Fig. 9

(a)

Fig. 10

(a) Equivalent Stress Distribution on Welded line

(b) Equivalent Stress Distribution at middle Section

Fig. 11 Equivalent Stress Distribution of the Seam Welded Pipe.

(a) Triaxiality Ratio Distribution on Welded line

(b) Triaxiality Ratio Distribution at middle Section

Fig. 12 Triaxiality Ratio Distribution of the Seam Welded Pipe.

方法共圧縮応力となっている。また Skip 法の場合には相当大なる引張圧縮の両応力が残存している。Fig. 5(b) は Fig. 5(a) と同位置での熔接線に直交方面(軸方向)の応力分布

位置)の収縮によって緩和されるが完全に元の状態には返らず Fig. 10(b) のようになっている。すなわち第2回目の熔着部は第1回目のその拘束のために十分に縮み得ない状態にある。故にこの部分に引張の残留応力が発生し、それに対して第1回目の熔着部に圧縮残留応力が誘起されるものと考えられる。

Fig. 6(a) は衝合円周熔接管の円管母線上熔接線方向(円周方向)の応力分布図である。このときも Fig. 5の場合に述べたように曲げモーメントの影響を受けて平板と異った分布形状となっている。Fig. 6(b) は熔接線に直交方向(軸方向)の応力分布を示すものであって、これは Fig. 9(b) のごとき状態を考えると理解できよう。

以上応力分布曲線について定性的に説明を行ったが、これらの実験結果よりいずれの方法が最も適当であるかを調べるため、換算引張応力(Equivalent Stress)ならびに三軸応力比 T_r (Triaxiality ratio) なる量を採用して検討をしてみる⁸⁾。

前者は二次元問題の場合には

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

で表わされるものであって、剪断歪エネルギー説等によればこの応力伝が引張試験で求めた降伏応力 σ_v になったとき降伏を起すのであるから、この値は少いことが望ましい。ただし σ_1, σ_2 は主応力であるが熔接線近傍部では熔

接線方向およびそれに直交する方向の応力が主応力となるので本報告では簡単のためすべての計算に熔接線方向の応力およびそれに直交方向応力の中で値の大なるものを σ_1 、小なる方を σ_2 とした。

また後者は三軸応力状態の場合主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) としたとき

$$T_r = \frac{|\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3|}{3|\sigma_{\max}|} \quad (2)$$

で表わされるものであって、これが大なるとき、すなわち全方向に一樣な応力が作用した多軸応力状態のときには脆性破壊を生じやすい傾向にあると考えられているので、これも小なることが望ましいわけである。なお本実験では試験体の壁厚が薄いので半径方向の応力は零とみなせるので T_r の計算には次式を用いた。

$$T_r = \frac{|\sigma_1 + \sigma_2|}{3|\sigma_{\max}|} \quad (3)$$

シーム熔接管の換算引張応力値を Fig. 11 に示すが Fig. 11 (b) よりわかるごとく Straight, Symmetry 法いずれの場合も熔接線上で最大値を示し、熔接線から離れるにしたがって急激に減少しており傾向および値はほぼ同様である。換算引張応力の見地からすると Straight, Symmetry のいずれの方法も余り優劣に差はないようである。しかし Fig. 12 (a) から明らかな如く熔接線上の三軸応力比の見地からすると Straight 法は Symmetry 法に比してその値が大であって好ましくない状態である。Fig. 12 (b) をみると Straight 法は熔接線以外では Symmetry 法のものより小なる値を示しているが、材質的に熔接線附近が最も脆化していること、その上更に脆化度を大とするような

Fig. 13 Equivalent Stress Distribution of the Butt Welded Pipe.

応力状態になることは好ましくないから、Symmetry 法の方が Straight 法よりやや良好なものと考えられる。

次に衝合円周熔接管の換算引張応力を Fig. 13 に示す。Fig. 13 (a) をみると Symmetry 法が比較的よく次で Straight 法の順で、Skip 法は応力の最大値は Symmetry 法と大差ないがその変化(勾配)が激しく余り良い結果とは認め難い。Fig. 13 (b) をみると熔

接線の近傍を除けば Skip 法が最も悪く Symmetry, Straight 両法とも余り変らない。熔接線近傍部の値は Fig. 13 (a) よりわかるごとく熔接線上の値が各位置によって大いに異っているので、測定位置によって異なるものと考えられ、この値から優劣を直ちに比較することはできないであろう。Fig. 14 (a) の三軸応力比をみると Straight 法が最も良好のように考えられ、次で Symmetry, Skip の順のようである。以上総合すれば Straight, Symmetry Skip 法の順となるが、これは円管の衝合円周熔接の場合熔接によって曲り変形が発生するために平板の場合と異った結果になるものと考えられる。

III. 結 論

シーム熔接管に対しては Straight, Symmetry 法で熔接を行ったもの、また衝合円周熔接管に対しては Straight, Symmetry および Skip 法で熔接を行ったものについて残留応力分布状態を求め、それより換算引張応力、三軸応力比を計算して各種の熔着法の優劣を調べてみた。その結果を総括すれば次のごとくである。

シーム熔接管の場合は Symmetry 法の方が Straight 法よりやや優れているが、衝合円周熔接管では Straight, Symmetry, Skip 法の順になっている。

(a) Triaxiality Ratio Distribution on Welded line.

(b) Triaxiality Ratio Distribution at Each Section

Fig. 14 Triaxiality Ratio Distribution of the Butt Welded Pipe.

シーム熔接管の場合の応力分布は平板の衝合熔接の場合の応力分布とよく似ているが、衝合円周熔接管のそれは平板の場合と全然異った分布状態をしている。これについては追って理論的な解析を行う予定である。なお今回の実験は管の外表面の応力だけしか測っていないので決定的な結論に達しなかったが、種々の熔着法による影響についての定性的な特性はほぼ明らかにし得たと考えている。

本研究にあたっては関西電力 K. K. より材料の支給を受けた。記して謝意を表します。

註

- 1) L. J. Pripoznik; Welding J. Sept 1951. p. 422s~p. 428s
- 2) 渡辺; 熔接学会誌 Vol. 21. No. 5. 6. 7. (昭和27年) p. 182~p. 190

- 3) 渡辺, 松山, 村越; 熔接学会誌 Vol. 22 No. 4 (昭和28年) p. 104~p. 108
- 4) 渡辺; 熔接応力の緩和法について; 機械学会誌 Vol. 57 No. 426 p.485~p.492
- 5) 種々の熔着法に対して後述のごとく大なる特性上の差異を認め得なかったのが才2報(本誌1月号に既に発表) 以下の熔着法はすべて Straight 法によった。
- 6) このことは後から気のついたことであるが、管の応力測定としては不十分であって、才2報以下においては管の内外面において測定を行った。
- 7) このことは才2報以下で確認されている。
- 8) 渡辺, 佐藤, 木村, 星; 熔接法及び熔接順序が接手の残留応力に及ぼす影響, (未発表)

銅の含有量の變化した軟鋼に關する 切欠脆性試験*

吉 識 雅 夫** 金 沢 武**

Notch Sensitivity Tests on Mild Steels with Varied Copper Contents*

By M. Yoshiki,** T. Kanazawa**

Abstract

We have performed charpy impact tests of specimens with different notch radius, which were machined out from three mild steels having 0.22, 0.29, and 0.40% Cu content respectively.

We have obtained the following facts:

- (1) Using the experimental results by Rinebolt & Harris, and Williams to eliminate the effects of C, Mn, and P on the transition temperature, we have found that the transition temperature is lowered, as the Cu content increases (in the range 0.22-0.40%).
- (2) The formula formerly proposed by the authors to give the relation between the notch geometry and the transition temperature, or the absorbed energy at low temperature matches fairly well with the present experimental results.
- (3) Furthermore we have got a relation between the absorbed energy at 0°C and the transition temperature determined from 2.6 kg-m/cm² energy level.

§ 1 緒 言

鋼材中に含まれる各種化学成分によって鋼材の脆性遷移温度が影響を受けることは多くの実験によって認められているが、特に我が国の鋼材は Cu の含有量が多くなる傾向にあり、Cu 含有量が軟鋼の脆性破壊に及ぼす影響を求め

ることは重要なことであらう。Cu の影響については既に Williams, Rinebolt & Harris, 大谷氏, 秋田氏等の標準 V-型切欠シャルビ試験による研究が発表されている。

Williams は Cu 含有量 0~0.2% の範囲では Cu の増加によって Ductility Transition Temperature は僅かに低下するといっている¹⁾。Rinebolt & Harris はキルド鋼について実験し、Fracture Transition Temperature は Cu の含有量が 0.5% まではほとんど変化しないが、それ以上になると上昇し、Ductility Transition Temperature は Cu の含有量が 0~0.5% までは含有量の増加につれて低下

* 原稿受付 昭和29年9月15日 (昭和29年度熔接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員, 東京大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Tokyo University