

電縫管の残留応力に関する研究 第5報 ——製造プロセスが残留応力分布に与える影響 II——

Study on Residual Stress of Electric Welded Pipes · 5th Report

——Influence of Manufacturing Process on Residual Stress II——

木内 学*・新谷 賢*
Manabu KIUCHI and Ken SHINTANI

1. ま え が き

筆者らは、電縫管の品質評価法に関する研究の一環として、成形過程における各種条件が、最終製品の残留応力分布に与える影響について、基礎的研究を進めている。既報¹⁻⁴⁾では残留応力の測定方法を提案し、この方法により、基礎実験によるFR通過後の半製品、および、実生産の各成形段階において採取した半製品、または、最終製品に残留する応力について測定を行った。

本報では、各社の異なるライン構成により、実生産された溶接直後の半製品、および、最終製品について、製造プロセスが周方向各位置における残留応力分布に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 測定方法

本研究で開発した残留応力の測定方法については、既報^{1,2)}に詳述してあるので、ここでは説明を省略する。図1は、測定に際して用いている座標軸と各方向の応力一ひずみ成分の表示方法について示す。また、図2は、x(長手)方向を例にとり、管の外内面の表面ひずみ Δe_{x1} 、 Δe_{x2} 、曲げひずみ Δe_{xb} 、および、膜ひずみ Δe_{xs} の定義とその関係を示す。

3. 測定結果および考察

図3に溶接直後の半製品と最終製品の提供を受けた各社のライン構成、素板材質、最終製品公称寸法、および、

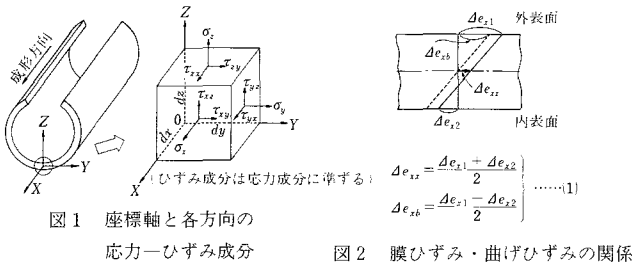


図1 座標軸と各方向の
応力一ひずみ成分

図2 膜ひずみ・曲げひずみの関係

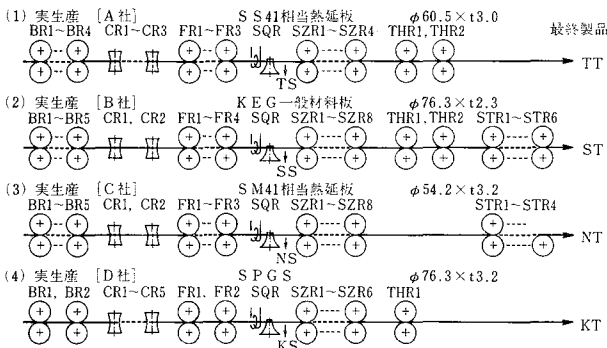


図3 実生産(各社)のライン構成

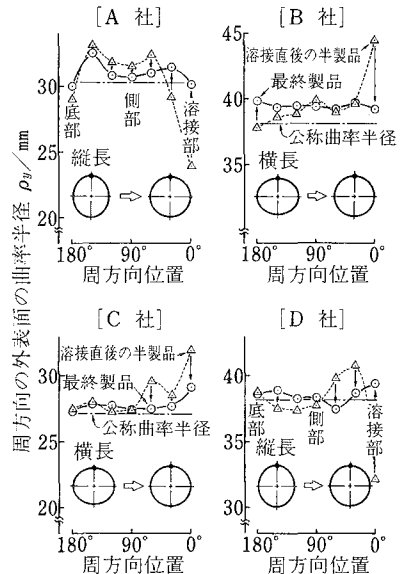


図4 外表面の曲率半径の周方向分布

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報
各製品の表示記号を示す。

3.1 対象製品の外表面形状の特徴

図4に各社(A~D社)の溶接直後の半製品と最終製品の外表面の周方向曲率半径 ρ_y の測定例を示す。 ρ_y の測定位置は、溶接部(0°)から30°間隔に12箇所とし、各位置において周方向に長さ12mmの領域を、0.5mm(または、1.0mm)間隔にダイヤルゲージ(最小目盛:1/1000, 測定子:0.4R)で外表面の座標を測定し、曲率半径を算出した。

(1) ρ_y の分布をみると、A・D社の溶接直後の半製品の溶接部の曲率半径は、最終製品の公称曲率半径より小さい。すなわち、素板縁部は縦長に成形され突き合わされて、溶接されていることがわかる。(2)しかしながら、最終製品の溶接部の曲率半径は、最終製品の公称曲率半径とほぼ等しく、SZR・THRで曲げ戻し変形を受けて成形されていることがわかる。

(3)一方、B・C社の溶接直後の半製品の溶接部の曲率半径は、最終製品の公称曲率半径より大きい。これは素板縁部が横長に成形され突き合わされていることを意味している。(4)これらの場合も、最終製品の溶接部の曲率半径は最終製品の公称曲率半径に近づいているが、これらの場合には、SZR・THR・STRで逆に曲げ変形が進行していることがわかる。

(5)周方向全体の断面形状をみると、A・D社の溶接直後の半製品は、形状の不均一さが目立ち、B・C社のそれは、溶接部近傍を除いて、形状が比較的均一に成形され

ている。(6)すなわち、A社の最終製品の断面形状は、縦長形状が改善される方向にはあるが、必ずしも十分ではない。(7)一方、B社の最終製品の断面形状は、多段のSZR・THR・STRを用いていることもあって、かなり真円度が向上しているが、全体的に公称曲率半径より大きい。(8)また、C・D社の最終製品の断面形状は、溶接部の曲率半径が公称曲率半径よりやや大きく、若干横長に成形されている。

3.2 各方向の弾性回復ひずみ分布の測定例

図5・6に各社(A~D社)の溶接直後の半製品と最終製品の、外表面の弾性回復曲げひずみの周方向分布、弾性回復膜ひずみの周方向分布の測定例を示す。

測定結果の特徴をまとめると以下のようになる。(1)外表面の弾性回復曲げひずみは、溶接直後の半製品と最終製品について、長手・周両方向ともに負となっている。これは、弾性回復に伴い、長手方向にはくらの形のそり、周方向には曲率半径が大きくなる方向の残留応力が存在していることを意味している。(2)ただし、溶接直後の半製品の溶接部については、長手・周両方向とも、弾性回復曲げひずみは、溶接時の局所的な加熱・冷却の影響を受け、ほとんど発生しない。(3)側部から底部にかけて、長手方向の弾性回復曲げひずみは0.1%前後発生し、周方向にはほぼ均一に分布している。(4)周方向の弾性回復曲げひずみは、B社の溶接直後の半製品を除き、側部から底部にかけて大きくなり、底部で最大となっている。

次に、最終製品の長手方向の弾性回復曲げひずみにつ

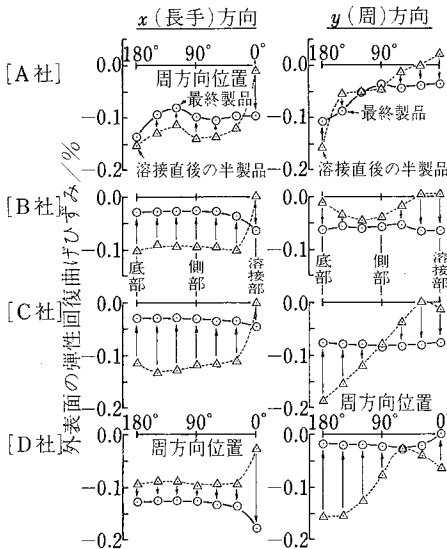


図5 外表面の弾性回復曲げひずみの周方向分布

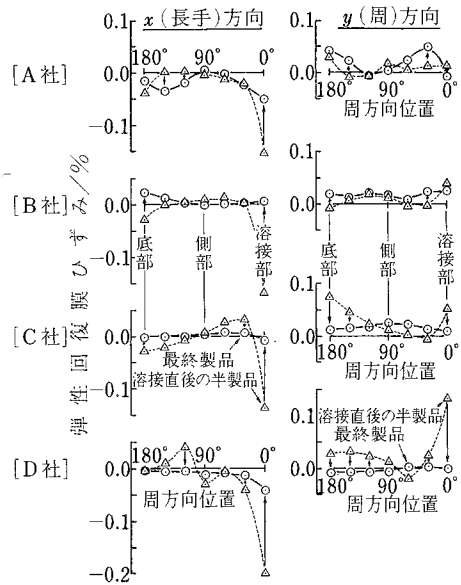


図6 弾性回復膜ひずみの周方向分布

研 究 速 報

いてみると、(5)溶接部は、SZR・THR、さらに、STRにより長手方向のそり(溶接部を内側とするいわゆる上ぞり)の修正が行われるため、弾性回復としては負の曲げひずみが発生する。(6)側部から底部の長手方向の弾性回復曲げひずみは、溶接直後から最終製品に至る過程で減少する場合と増大する場合とがある。(7)一般に、溶接後の後工程に多段のSZR・THR、さらに、STRなどを配している場合には、溶接前の成形過程で素板各部がロールへの進入時に受ける長手方向のくら形のそり変形の影響が次第に解消される方向に向かうものと考えられる。(8)これに対し、後工程がSZR・THRのみで構成される場合には、その影響が十分解消されず、また、SZR・THRのリダクションが過大、あるいは、ロール径が過小の場合には、弾性回復曲げひずみが増大することもありうる。(9)周方向の弾性回復曲げひずみは、一般に、SZR・THR・STRにより周方向に均一に分散される。また、この傾向はリダクションが大きい場合(D社)顕著になる。

弾性回復膜ひずみについては以下のことがいえる。

(1)溶接直後の半製品は、FR・SQRで周方向に圧縮、長手方向に伸び変形を受けた影響が残留し、概して、周方向に伸び、長手方向に縮みの回復ひずみが発生する。

(2)特に、溶接部では、局所的な加熱・冷却の影響により周方向に伸び、長手方向に縮みの回復ひずみが大きくなる。

(3)最終製品については、SZR・THR・STRで周方向に圧縮、長手方向に伸び変形を受けた影響が現れ、また残留し、周方向に伸び、長手方向に縮みの回復ひずみが発生する傾向があるが、周方向にみると、その均一化が進むことがわかる。

(4)SZR・STRによる成形時に、長手方向の圧縮力が作用する場合には、周方向への圧縮の際に、長手方向に十分伸びきれず、その分板厚方向へ変形が若干多く発生する可能性があるが、そのような場合には、長手方向へ伸びの回復ひずみが発生するこ

とが考えられる。B社の最終製品は、SZR・THR・STRでのリダクションが小さいこともあって、長手方向に伸びの回復ひずみが発生している。

図7に xy 一面内の外表面の弾性回復せん断ひずみ $\Delta\gamma_{xy}$ の測定例を示し、図8に素板縁部(溶接部)の xy 一面内のせん断ひずみ γ_{xy} の変化を示す。

xy 一面内のせん断ひずみ γ_{xy} の挙動の特徴は以下のとおりである。(1)一般に、素板のBR・CRへの進入、立ち上がり際に際して、縁部から側部にかけて、 xy 一面内には負(正負の定義は図8に示す)のせん断ひずみが発生するが、FRでリダクションが加えられることにより、このせん断ひずみは修正され、逆方向のせん断ひずみが増えらる。(2)SQR通過後、素板縁部(溶接部)の γ_{xy} は溶接時の加熱・冷却の影響を受け、弾性回復せん断ひずみ $\Delta\gamma_{xy}$ そのものは零になる。(3)溶接部の γ_{xy} は解消されるが、側部にかけて、正のせん断ひずみが残留する。(4)さらに、SZR・THR・STRにより、リダクションや繰り返し曲げ変形を加えられ、長手方向・周方向の形状が修正されるが、その際、溶接部の長手方向そり・周方向の形状の修正が行われることの影響を受けて、 γ_{xy} が発生し、その結果として $\Delta\gamma_{xy}$ が発生する。

yz 一面内・ zx 一面内の弾性回復せん断ひずみは、 xy 一面内の弾性回復せん断ひずみに比較して十分小さく、ほとんど無視できる。

3.3 残留応力分布の計算例

図9・10に各社(A~D社)の溶接直後の半製品と最終製品について、周方向各位置における σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} の残留応力分布の計算例を示す。その特徴は以下のとおりである。(1)一般に、長手方向については、素板がロールへの進入時に受けるくら形のそり変形がロール直下、または、出側にかけて修正され、拘束されて真直な製品へと成形され、溶接されることの影響を受け、外表面側に引張り、内表面側に圧縮の残留応力が発生する。(2)溶接直後の半製品の溶接部は、局所的な加熱・冷却の影響

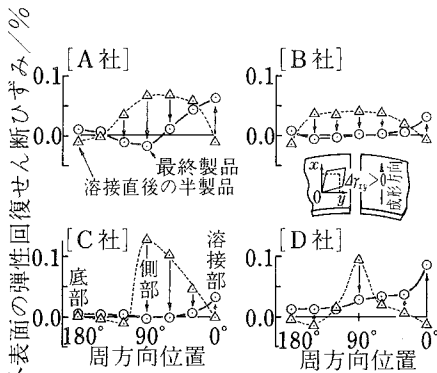


図7 外表面の弾性回復せん断ひずみの周方向分布

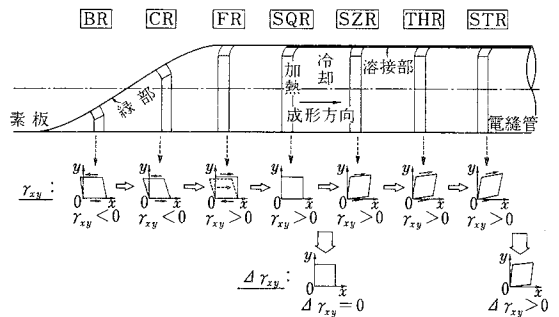


図8 素板縁部(溶接部)のせん断ひずみの変化

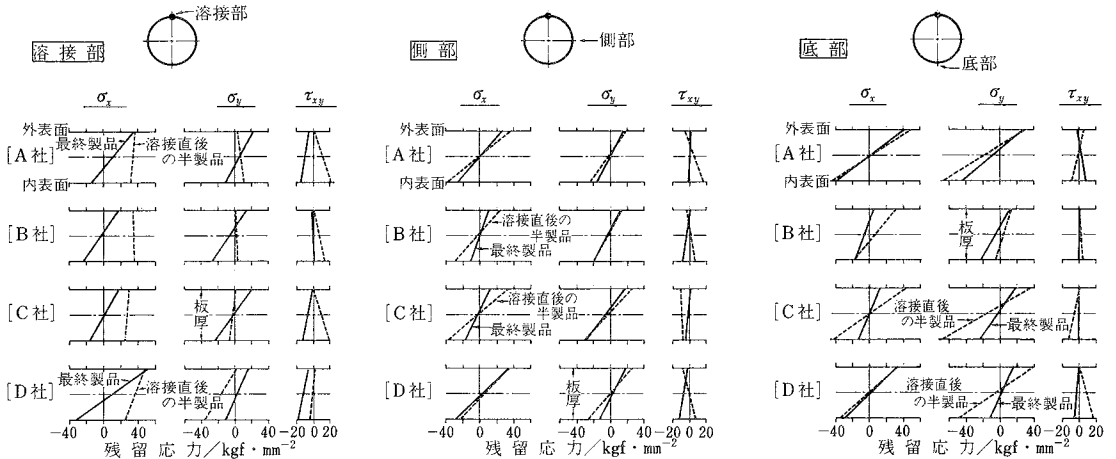


図 9 板厚方向の残留応力分布

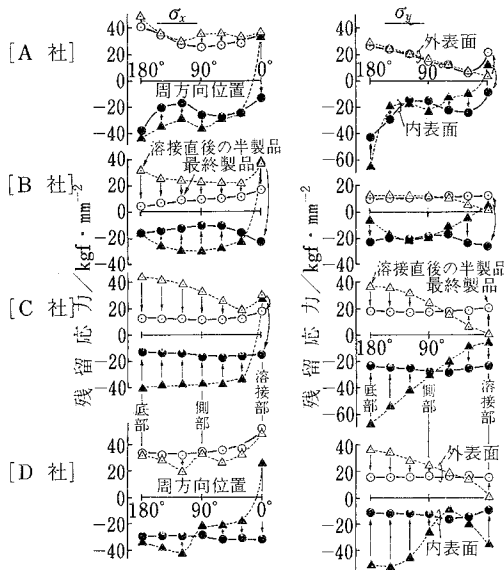


図 10 周方向の残留応力分布

を受け、板厚方向全体に引張りの残留応力となる。外表面側と内表面側では加工履歴、および、冷却速度の違いによりその値に差が生じる。(3)溶接直後の半製品の長手方向の残留応力は、周方向に不均一に分布している。(4)最終製品の残留応力については、後工程に多段のSZR・THR・STRを用いることにより、その矯正・均一化を効果的に行うことができる。(5)周方向については、成形の目的である断面形成のための曲げにより、外表面側は伸び変形、内表面側は圧縮変形を受け、しかもこの変形は他の変形よりも著しく大きいので、ほとんど常に外表面側に引張り、内表面側に圧縮の残留応力が発生する。(6)溶接直後の半製品の溶接部は、局所的な加熱・

冷却の影響を受け、板厚方向全体に引張り、または、圧縮の残留応力となり、外表面側と内表面側には、加工履歴、および、冷却速度の違いにより残留応力に差が生じる。(7)溶接直後の半製品については、底部の内・外表面の圧縮・引張りの残留応力が最大となる。(8)周方向の残留応力は、B・C・D社の最終製品のほうがA社の最終製品に比べ、全体に均一に分布していることがわかる。これは後工程における多段のSZR・THR・STRによる矯正効果、および、SZRなどにおける大きめのリダクションの効果が明瞭に現れている結果であると考えられることができる。

4. ま と め

本報では、筆者らが提案した測定方法により、実生産で得られた溶接直後の半製品や最終製品に残留する応力の測定結果について示した。以上の結果より、各製造プロセスの違いが溶接直後の半製品や最終製品の残留応力に影響を与えることを明らかにすることができた。また、残留応力の均一化・分散化を図るには、成形の後工程に多段のSZR・THR・STRを配し、リダクションや繰返し曲げ変形を適正に加えることが有効であることがわかった。今後さらに、各製造プロセスの半製品、あるいは、最終製品に関する測定を進め、電縫管の品質評価に有用なデータの蓄積を図る予定である。

(1986年10月20日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・新谷：第35回塑加連講論 17
- 2) 木内・新谷：昭60塑加春講論 507
- 3) 木内・新谷：第36回塑加連講論 663
- 4) 木内・新谷：昭61塑加春講論 267