

電縫管の残留応力に関する研究 第4報

—製造プロセスが残留応力分布に与える影響 I—

Study on Residual Stress of Electric Welded Pipes · 4th Report

—Influence of Manufacturing Process on Residual Stress I—

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、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)~3)}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、各社の異なる成形ラインにより、実生産された最終製品について、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-ひずみ成分の表示方法について示す。また、図2は表面ひずみ Δe_{x1} 、 Δe_{x2} 、曲げひずみ Δe_{xb} 、膜ひずみ Δe_{xx} の定義とその関係を示す。

3. 測定結果および考察

図3に製品(管)の提供を受けた各社の製造プロセス、および、素板材質・製品寸法を示す。

3・1 各方向の弾性回復ひずみ分布の測定例

図4に各社(A~D社)の製品の弾性回復曲げひずみ分布、弾性回復膜ひずみ分布の測定例を示す。

一般に、電縫管の成形過程において、素板はFRでリダクションを加えられ、周方向に圧縮、長手方向に伸び変形を受けつつ成形され、SQR通過後、SZR, THR, さらに、ストレートナ(STR)により、リダクションや繰り返し曲げ変形を加えられ、断面の真円度・真直性が向上し、あわせて周方向・長手方向に残留応力が均一化・分散化され、製品の品質向上が図られるとされている。測

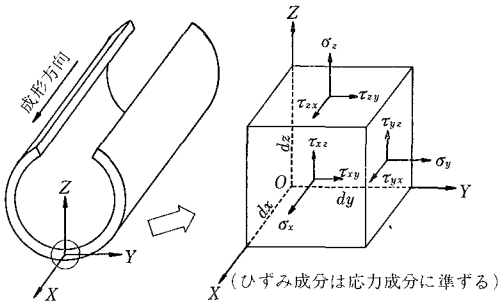
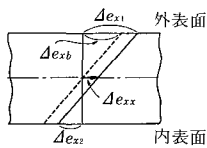


図1 座標軸と各方向の応力-ひずみ成分 (1) 実生産 [A社] SS41相当熱延板 φ60.5×t3.0



$$\Delta e_{xx} = \frac{\Delta e_{x1} + \Delta e_{x2}}{2} \dots\dots(1)$$

$$\Delta e_{xb} = \frac{\Delta e_{x1} - \Delta e_{x2}}{2}$$

図2 膜ひずみ・曲げひずみの関係

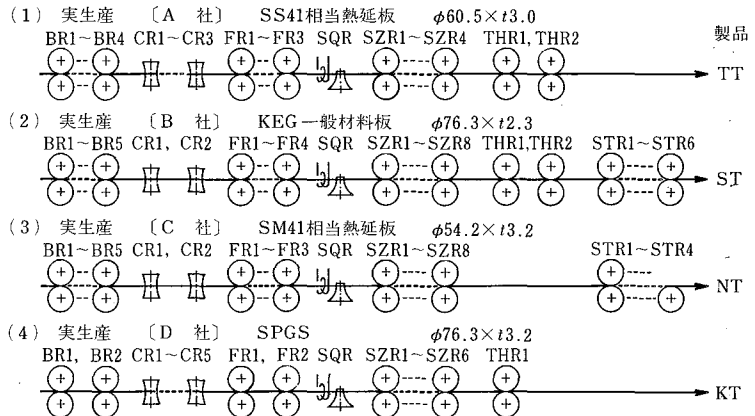


図3 電縫管の製造プロセス

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

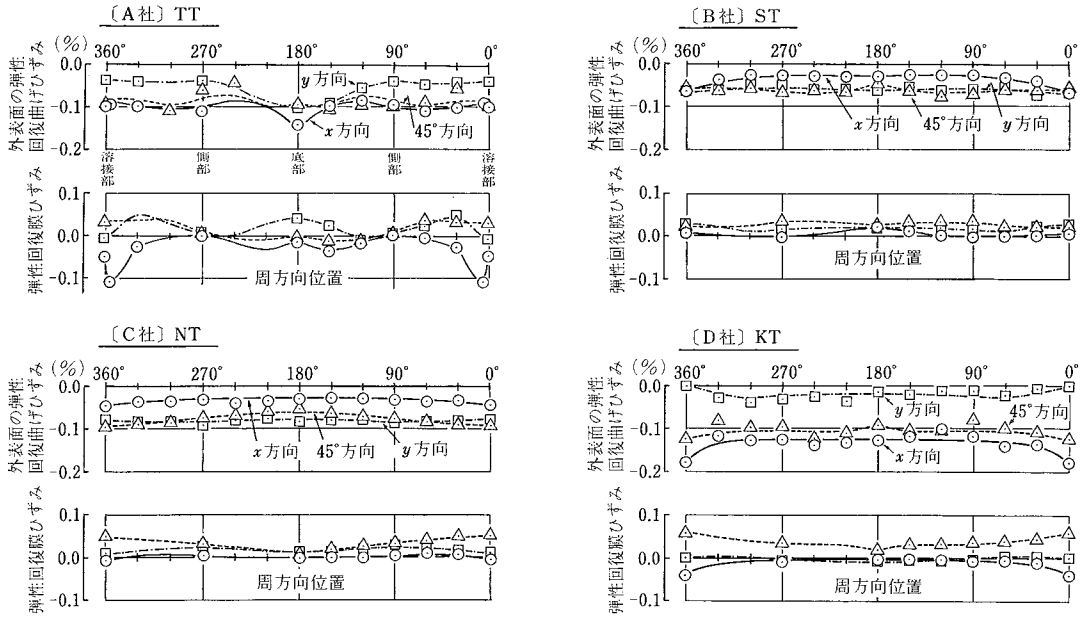


図 4 各方向の弾性回復ひずみ分布

定結果をみると、外表面の弾性回復曲げひずみは、いずれの製品についても、長手・周・45°方向ともに負となっている。これより、弾性回復に伴い、長手方向にはくらの形をのり、周・45°方向には曲率半径が大きくなる傾向にあることがわかる。各方向の外表面の弾性回復曲げひずみの大小関係を比較すると、A・D社の製品は周方向、45°方向、長手方向の順に、B・C社の製品は長手方向、45°方向、周方向の順に負の値が大きくなる傾向を示している。さらに、周方向、45°方向の外表面の弾性回復曲げひずみは、各社(A~D社)の製品とも同程度の負の曲げひずみであるのに対し、長手方向のそれは、A・D社の製品の方がB・C社の製品より、負の曲げひずみの値が大きい。この理由については、A・D社の後工程は少数のSZR・THRのみで構成されていることもあって、成形時に素板の各部が受けた長手方向のくらの形をのり変形的影響が十分除去されておらず、B・C社の後工程は多段のSZRとSTRを配しているため、同様の長手方向のくらの形をのり変形的影響が解消される方向に向かったものと考えられる。

弾性回復膜ひずみについて、A社の製品は、FR・SZRで周方向に圧縮、長手方向に伸び変形を受けた影響がそのまま残留し、周方向に伸び、長手方向に縮みの回復ひずみが発生している。B・C社の製品は、周方向には、FR・SZRで圧縮変形を受けた影響がそのまま残留し、伸びの回復ひずみが発生しているが、長手方向についてみると、僅かに伸びの回復ひずみが発生している。これは、FR・

SZRによる成形時に、長手方向の圧縮力が作用し、周方向への圧縮の際に、長手方向には十分伸びきれず、その分板厚方向へ変形が若干多く発生した可能性があることを意味しているが、その発生原因は(1)リダクション配分、(2)ロール径(または、ロール周速)、(3)ロールプロフィール、等の整合性にあると考えられる。さらに、同様な意味で、STRによる成形過程においても、長手方向の圧縮力が作用したことも推定される。D社の製品は、溶接前の成形方式が他と異なっていることもあり、FR・SZRでのリダクションが小さいこともあって、周方向の回復ひずみはほとんど零である。他方、長手方向には縮みの回復ひずみが発生しているが、これは中間にクラスターロール(CR)を多用しているため、FR・SZRで強く引張りながら成形した影響が残留したものと推定される。さらに、B・C社の製品は、後工程に多段のSZRとSTRを配していることもあって、周・長手両方向の弾性回復膜ひずみが周方向に均一化・分散化されている様子がわかる。しかし、A・D社の製品は、後工程が少数のSZR・THRのみで構成されており、溶接部およびその近傍の長手方向の弾性回復膜ひずみをみると、溶接時の加熱・冷却の影響が十分修正されていないことがわかる。

図5に弾性回復せん断ひずみの測定例を示す。xy-面内の外表面の弾性回復せん断ひずみ($\Delta\gamma_{xy}$)についてみると、D社の製品では周方向全体に正(正負の定義は図中に示す)、A社の製品では周方向にのみ変動量が大きく、B・C社の製品はA・D社の製品より $\Delta\gamma_{xy}$ が小さい

ことがわかる。これは、B・C社の製品は溶接前の工程で、素板縁部の立ち上がりが多段のBR・FRを用いて滑らかに成形されているのに対し、A・D社の製品は素板縁部の立ち上がりが少数のBR・FRで急激に成形されたことに起因していると考えられる(図6参照)。

yz -面内の弾性回復せん断ひずみ($\Delta\gamma_{yz}$)は各社(A~D社)の製品とも溶接部およびその近傍で僅かに負、側部から底部にかけて切断前後で変化がないことがわかる。図6に示すように、素板のロールへの進入・立ち上がりに際して、縁部から側部にかけては外周長・内周長の差により、ここでの定義による負の $\Delta\gamma_{yz}$ が発生する。このひずみはFRによる縁部の圧縮により修正されるが、その影響は完全に除去されず、応力解放時には弾性回復として負のひずみが残留する。さらに、この $\Delta\gamma_{yz}$ は t/D が大きくなるほど、外周長・内周長の差が大きくなり、負のひずみが大きくなると考えられるが、今回の測定範囲($t/D \approx 3 \sim 6\%$)ではその影響がみられなかった。

zx -面内の弾性回復せん断ひずみ($\Delta\gamma_{zx}$)についても $\Delta\gamma_{yz}$ と同様の測定を行ったが、周方向各位置において、切断前後で有意差がみられなかった。

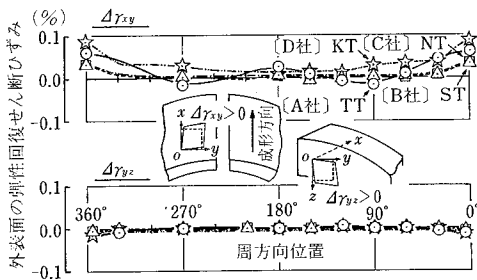


図5 各方向の弾性回復せん断ひずみ分布

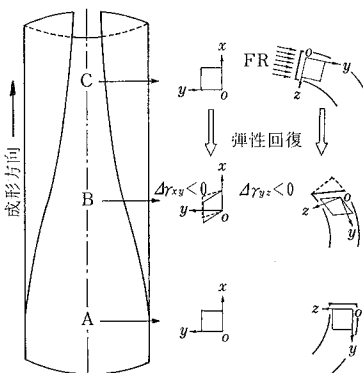


図6 素板縁部の変形状態

3・2 残留応力分布の計算例

図7・8に各社の製品について、周方向各位置における σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yz} の残留応力分布の計算例を示す。図9にそれらの周方向各位置の σ_x , σ_y , τ_{xy} の最大値および平均値の比較を示す。

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となる。長手方向の残留応力は、B・C社の製品の方がA・D社の製品に比べ周方向全体に均一に分布し、しかもその値は全体的に小さいことがわかる。これは既述のように、B・C社の後工程は多段のSZRとSTRを配しており、これによる残留応力の矯正効果が明瞭に現れている結果であると考えられる。

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となる。周方向の残留応力はB・C・D社の製品の方がA社の製品に比べ全体に均一に分布していることがわかる。これも、B・C社の製品では、後工程における多段のSZRとSTRによる矯正効果が明瞭に現れている結果であり、A社とD社の製品に関する相違は、溶接前の成形方式の違いによる結果であると考えられる。

なお、周方向各位置での残留応力分布は、板厚中央面に対して外面側、または、内面側に偏っており、板厚中央面上の残留応力は、上述の弾性回復膜ひずみの発生方向と対応していることに注意されたい。

xy -面内の残留せん断応力 τ_{xy} については、各社の製

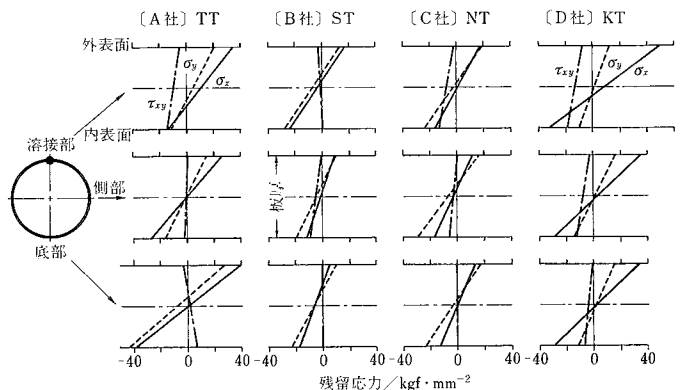


図7 板厚方向の残留応力分布

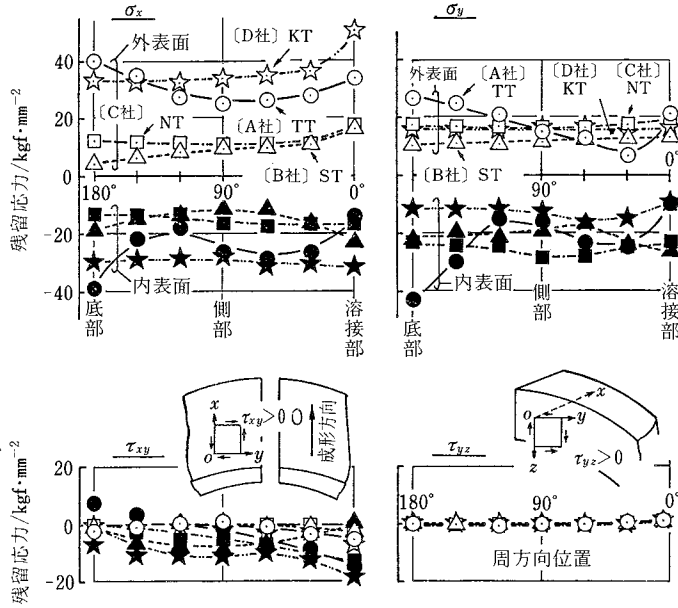


図 8 周方向各位置の残留応力分布

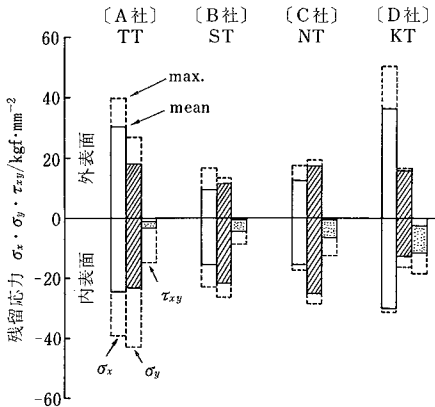


図 9 周方向各位置の残留応力の比較

留し、側部から底部にかけて、ほとんどせん断応力が残留していないことがわかる。

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やSTRを配し、リダクションや繰り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、各製造プロセスの製品、あるいは半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3月29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春塑加講論，507
- 3) 木内・新谷：第36回塑加連講論，663

品とも溶接部およびその近傍から側部にかけて、板厚方向全体に負（正負の定義は図中に示す）のせん断応力が残留し、外表面側と内表面側とで τ_{xy} に差が生じている。

yz -面内の残留せん断応力 τ_{yz} については、各社の製品とも溶接部およびその近傍で僅かに正のせん断応力が残