

電縫管の残留応力に関する研究 第3報 ——弾性回復ひずみ・残留応力分布の測定例 II——

Study on Residual Stress of Electric Welded Pipes • 3rd Report
——Distribution of Spring Back Strain and 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成形条件が、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^{1,2)}では残留応力の測定方法を提案し、この測定方法により、1、2の製品の弾性回復ひずみ分布、および、残留応力分布について検討した。本報では、基礎実験による製品、および、実生産の製品について、各方向の弾性回復ひずみ成分を測定し、各種成形条件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

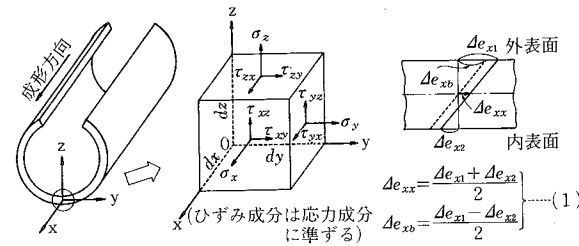


図1 座標軸と各方向の応力-ひずみ成分
図2 膜ひずみ・曲げひずみの関係

$$\begin{aligned} \Delta e_{xx} &= \frac{\Delta e_{x1} + \Delta e_{x2}}{2} \\ \Delta e_{xb} &= \frac{\Delta e_{x1} - \Delta e_{x2}}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

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 $\Delta e_{x1}, \Delta e_{x2}$ 、曲げひずみ Δe_{xb} 、膜ひずみ Δe_{xx} の定義とその関係を示す。以下参考までに、図3には実際にひずみゲージを貼付して切断した外表面弾性回復ひずみ測定用試片を示す。図4には各方向の外表面弾性回復曲げひずみ測定用試片、図5には弾性回復せん断ひずみ測定用試片を示す。

3. 測定結果および考察

以下、基礎実験および実生産の製品についての測定例を示す。基礎実験の場合の素板材質はSS 41相当熱延板、成形条件はBR-3st, SR-2st, FR-1st(KF-1)とBR-3st, SR-1st, FR-4st(KF-4I)の2種類、最終製品寸法は $\phi 76.3 \times t 3.0$ (mm)である。成形条件の詳細は既報³⁾を参照されたい。実生産(A社)の場合の素板材質はSS 41相当熱延板、成形条件はBR-4st, SR-3st, FR-3st, SQR, SZR-4st, THR-2stのライン構成であり、FR通過後の管(TF)、溶接直後の管(TS)、最終製品(TT)について検討した。この場合の最終製品寸法は $\phi 60.5 \times t 3.0$ である。実生産(B社)の場合の素板材質はKEG一般材料板、成形条件はBR-5st, SR-2st, FR-4st, SQR, SZR-8st, THR-2st, ストレートナ-6stのライン構成であり、最終製品(ST)についてのみ検討した。この場合の最終製品寸法は $\phi 76.3 \times t 2.3$ である。

3・1 各方向の弾性回復ひずみ分布の測定例

図6に外表面の弾性回復ひずみ分布、外表面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

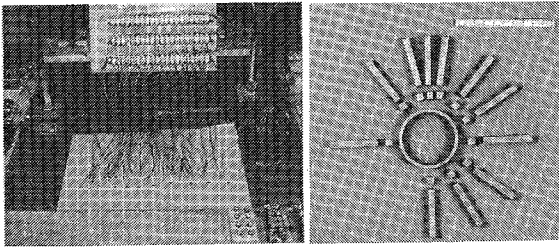


図3 各方向の外表面弾性回復ひずみ測定用試片
図4 各方向の曲げひずみ測定用試片

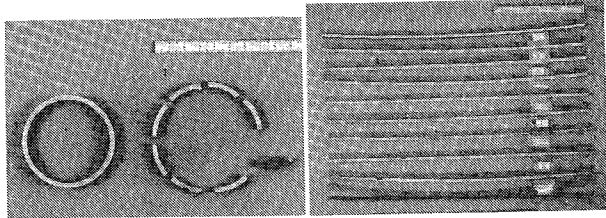


図5 弾性回復せん断ひずみ測定用試片

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

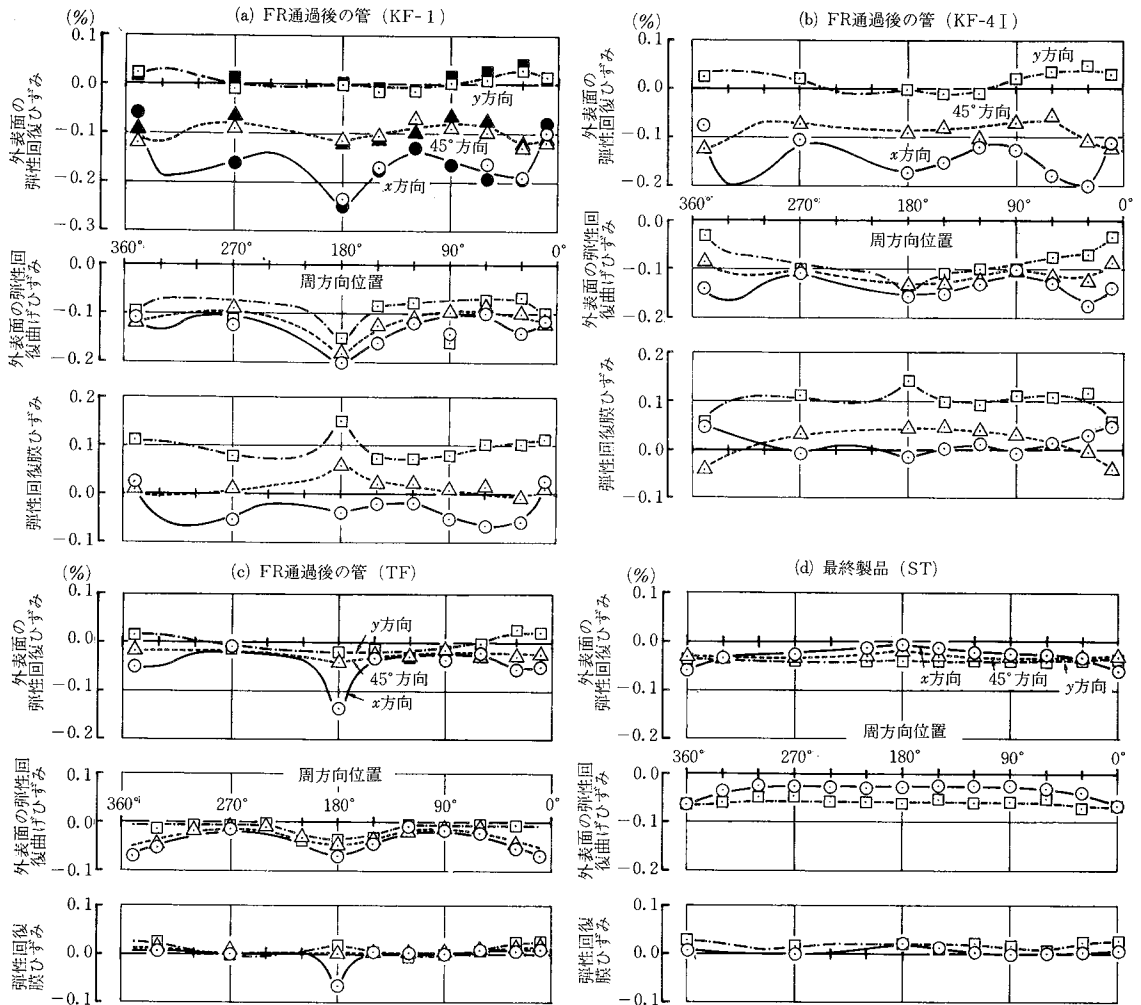


図6 各方向の弾性回復ひずみ分布

す。ただし、図中に示す各管の表示記号(図上のカッコ内の記号)に注意されたい。

図6(a)に示す外表面の弾性回復ひずみの○△□と●▲■は、同一成形条件の管に関する測定方法の信頼性・再現性をみたものである。

外表面の弾性回復曲げひずみは、FR通過後の管、溶接直後の管、および、最終製品について、いずれの場合も長手・周・45°方向とも負となっている。これより、弾性回復により長手方向にはくら形のそり、周・45°方向には切断前の曲率半径が切断により大きくなる傾向を示すことがわかる。

FR通過後の管の周方向各位置における弾性回復膜ひずみ分布をみると、リダクションにより周方向に圧縮、長手方向に伸び変形を受けた影響が残留しており、全体

的にみて、周方向の弾性回復膜ひずみは伸び、長手方向のそれは縮みとなる。さらに、リダクションの大きいほうが長手・周方向ともに弾性回復膜ひずみは大きくなる。

実生産のFR通過後の管(TF)の縁部およびその近傍の弾性回復膜ひずみについてみると、長手・周方向とも伸びの回復ひずみを示すが、溶接直後の管(TS)では、縁部すなわち溶接部およびその近傍は溶接時の加熱・冷却の影響を受け、弾性回復の方向は長手方向に縮みの回復ひずみ、周方向に伸びの回復ひずみを示す。最終製品(TT)の溶接部およびその近傍はSZR・THRのリダクションの影響を受け、長手・周方向とも残留応力の均一化・分散化が進み、弾性回復膜ひずみの回復の方向は変わらないものの、ひずみ値そのものは小さくなる傾向を示す。

図 7 に外表面の弾性回復せん断ひずみ分布の測定例を示す。xy-面内の外表面の弾性回復せん断ひずみ(Δr_{xy})についてみると、FR 通過後の管の縁部から側部にかけては負(正負の定義は図中に示す)となる。KF-1・KF-4I の場合と TF の場合とで、縁部の Δr_{xy} の絶対値に大きな差があるのは、前者の成形条件がロール段数・スタンド間距離等、後者に比較して厳しく、素板縁部の立ち上がりが急激であったことによると思われる。さらに、前者の FR によるリダクションが後者のそれよりも 5 倍

程度大きかったのにもかかわらず、 Δr_{xy} の低減にあまり寄与していないことから、FR によるリダクションの Δr_{xy} への影響は比較的小さいと考えられる。

yz-面内の弾性回復せん断ひずみ(Δr_{yz})は、縁部で負、側部でわずかに正、側部から底部にかけてわずかに負となり、底部では切断前後で変化がないことがわかる。一般に、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 Δr_{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発生する。

zx-面内の弾性回復せん断ひずみ(Δr_{zx})についても Δr_{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。

3.2 残留応力分布の計算例

図 8・9 に周方向各位置における $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ の残留応力分布の計算例を示す。

一般に、長手方向については、ロールへの進入時に受けるくらの形そのり変形が修正され、拘束されてまっすぐ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。FR 通過後の管では、リダクションの大きいほうが内外表面側の σ_x は大きいですが、これは、周方向の圧縮に伴う内表面側の σ_x, σ_y の絶対値の増大、同時に発生する長手方向の伸びに伴う外表面側の σ_x の絶対値の増大を意味している。溶接直後の管の溶接部は局部的な加熱・冷却の影響を受け、板厚方向全体に引張りの残留応力が発生し、外表面側と内表面側には、冷却速度の違いにより残留応力の差が生じる。

周方向については、周方向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

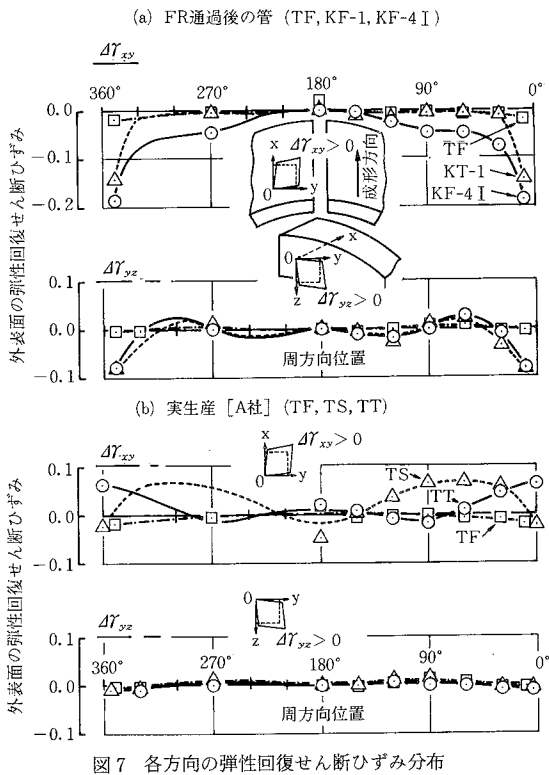


図 7 各方向の弾性回復せん断ひずみ分布

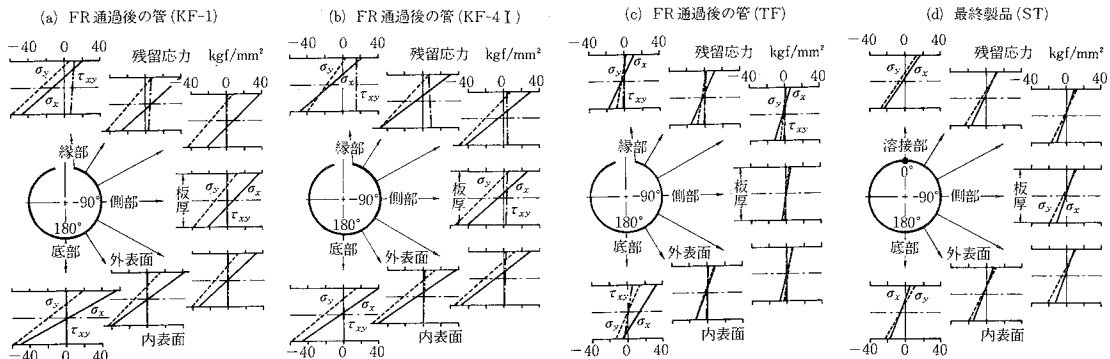


図 8 板厚方向の残留応力分布

研究速報

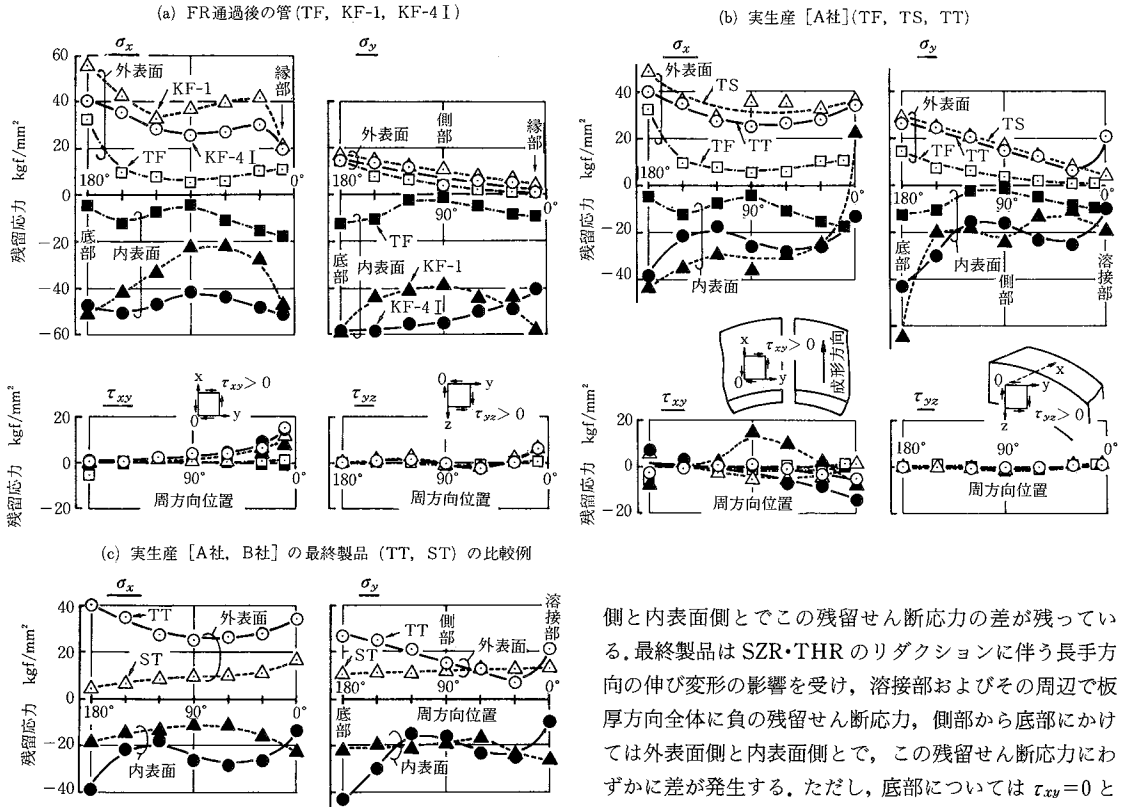


図9 周方向各位置の残留応力分布

側に引張り、内表面側に圧縮の残留応力が発生する。リダクションが大きくなるほど、内表面側の圧縮の残留応力が大きくなる傾向を示すが、これは当然予想される結果である。

実生産(A社とB社)の最終製品の残留応力は、長手・周方向とも、B社のほうが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、B社では最終工程にストレートナを配しており、これによる矯正効果が明瞭に現れている結果であると、考えることができる。

素板の縁部およびその近傍は、ロールへの進入過程において、大きな面内せん断変形を受ける。このせん断変形は素板の立ち上がりに対応しているが、その際、ロールへのなじみ方が、外表面側と内表面側とで若干異なり、その結果、外表面側と内表面側とで残留せん断応力 τ_{xy} に差が生ずるものと考えられる。FR通過後の管は縁部から側部にかけて、板厚方向全体に正(正負の定義は図中に示す)の残留せん断応力が発生する。これは明らかに縁部から側部の立ち上がりに伴う、面内せん断変形の方

側と内表面側とでこの残留せん断応力の差が残っている。最終製品はSZR・THRのリダクションに伴う長手方向の伸び変形の影響を受け、溶接部およびその周辺で板厚方向全体に負の残留せん断応力、側部から底部にかけては外表面側と内表面側とで、この残留せん断応力にわずかに差が発生する。ただし、底部については $\tau_{xy}=0$ となるべきであるが、実際には多少の誤差が含まれている。

yz -面内での残留せん断応力 τ_{yz} については、FR通過後の管、溶接直後の管および最終製品とも縁部(溶接部)から側部にかけてわずかに発生し、底部およびその周辺にかけては、ほとんど発生していないことがわかる。

4. ま と め

本報では、筆者らが提案した方法により、基礎実験によるFR通過後の管、および、実生産の各段階において採取した管に発生する残留応力の測定結果について示した。測定結果は、従来行ってきた一連の成形実験により明らかになった成形中の素板の変形挙動とよく対応するものであり、以上の結果、各成形段階におけるリダクション等の成形条件、溶接・サイジング・ストレートニング等の加工が製品の残留応力に与える影響を系統的に明らかにすることができた。今後さらに、各種の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。(1985年9月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・新谷：第35回塑加連講論集 17
- 2) 木内・新谷：昭60塑加春講論集 507
- 3) 木内・新谷・高田橋：昭58塑加春講論集 89