

電縫管の残留応力に関する研究 第2報 ——弾性回復ひずみ・残留応力分布の測定例——

Study on Residual Stress of Electric Welded Pipes・2nd Report
——Distribution of Spring Back Strain and Residual Stress——

木 内 学*・新 谷 賢*
Manabu KIUCHI and Ken SHINTANI

1. ま え が き

筆者らは、電縫管の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。前報¹⁾では、電縫管の残留応力の測定方法について、種々の観点から検討し、信頼出来る測定方法・測定技術を提案した。本報では、この測定方法により、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弾性回復ひずみ分布、および、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

2・1. Δe_x の測定

電縫管の内外面にひずみゲージを貼付して、応力解放時の各ひずみ成分の回復量を測定出来れば、残留応力の測定は容易であるが、実際には電縫管の内面側にひずみゲージを貼付するのは非常に困難である。そこで、次の関係より、

$$\left. \begin{aligned} \Delta e_{xx} &= (\Delta e_{x1} + \Delta e_{x2}) / 2 \\ \Delta e_{xb} &= (\Delta e_{x1} - \Delta e_{x2}) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

外表面ひずみの回復量 (Δe_{x1}) と外表面の曲げひずみの回復量と (Δe_{xb}) を測定することにより、各ひずみ成分の回復量の分布を求めることを考案した (図1参照)。

Δe_{x1} の測定にはひずみゲージを用い、ゲージを貼付した測定箇所を $\phi 7.0$ mm (周方向) \times $\phi 7.0$ mm (長手方向)

に切断し、応力解放時のひずみの回復量を測定した。

Δe_{xb} の測定は上記と同様の切断にともなう外表面の曲率の変化を測定することにより行った。すなわち、 $\phi 7.0$ mm (周方向) \times $\phi 50$ mm (長手方向) に切断した試片について、切断前後の変位分布の変化を 1.5 mm 間隔にダイヤルゲージ (最小目盛: 1/1000) で測定し、曲がり形状を円弧として考え、最小2乗法を導入して曲率半径を計算し、切断前後の曲率の差より、外表面の曲げひずみの回復量を測定した。

このようにして、 Δe_{x1} と Δe_{xb} を求め、(1)式より内表面ひずみの回復量 (Δe_{x2})、膜ひずみの回復量 (Δe_{xx}) が求まる。

以上の結果より、長手方向の弾性回復ひずみを次の様に求めた。

$$\Delta e_x = \Delta e_{xx} + \Delta e_{xb} \dots\dots\dots (2)$$

2・2. Δe_y の測定

(1)式と同様に、y 方向についても次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta e_{yy} &= (\Delta e_{y1} + \Delta e_{y2}) / 2 \\ \Delta e_{yb} &= (\Delta e_{y1} - \Delta e_{y2}) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1')$$

Δe_{y1} の測定方法は Δe_x の場合と同様である。

Δe_{yb} の測定は外表面の曲がり形状の変化より求める。すなわち、図2に示すように、測定箇所を $\phi 7.0$ mm (周方向) \times $\phi 7.0$ mm (長手方向) と $\phi 14$ mm (周方向) \times $\phi 7.0$ mm (長手方向) に切断した試片に関し、切断前後の変位分布の変化を、CASE 1 では 0.2 mm 間隔、CASE 2 では、1.0 mm 間隔にダイヤルゲージで測定し、その結果より、各々曲率の変化を求めた。また、CASE 3 のように三

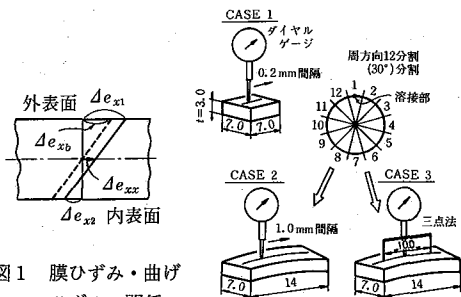


図1 膜ひずみ・曲げひずみの関係

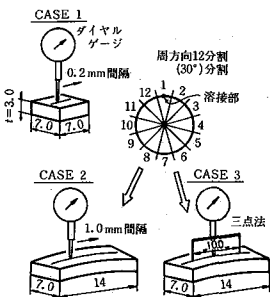


図2 周方向の外表面形状測定

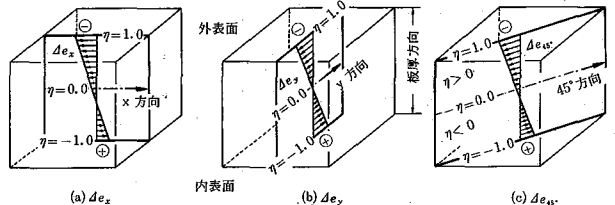


図3 板厚方向の各ひずみ分布

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

点法による測定も同時に行った。 Δe_{yb} の算出は Δe_{xb} と同様にして求めた。

以上の結果より、周方向の弾性回復ひずみを次の様に求めた。

$$\Delta e_y = \Delta e_{yy} + \Delta e_{yb} \dots\dots\dots (3)$$

2・3. $\Delta\gamma_{xy}$ の測定

45°方向の弾性回復ひずみ Δe_{45} も $\Delta e_x, \Delta e_y$ と同様にして測定出来る。これらの結果を用いて、 xy -面内のせん断回復ひずみ $\Delta\gamma_{xy}$ は次式で求められる。

$$\Delta\gamma_{xy} = 2\Delta e_{45} - \Delta e_x - \Delta e_y \dots\dots\dots (4)$$

2・4. $\Delta\gamma_{yz}$ の測定

$\Delta\gamma_{yz}$ は近似的に次式で定義する。

$$\Delta\gamma_{yz} \approx \bar{\theta} \approx \theta_1/l_1 \dots\dots\dots (5)$$

2・5. $\Delta\gamma_{zx}$ の測定

$\Delta\gamma_{zx}$ は $\Delta\gamma_{yz}$ と同様に、次式で定義する。

$$\Delta\gamma_{zx} \approx \bar{\theta} \approx \theta_2/l_2 \dots\dots\dots (6)$$

以上の方法により、各方向の弾性回復ひずみ成分の測定を行ったが、板厚方向の分布については、図3に示す直線分布を想定していることになる。弾性回復ひずみ分布より残留応力を算出するに際しては、 $E=21000 \text{ kgf/mm}^2$, $G=8100 \text{ kgf/mm}^2$, $\nu=0.3$ とした。なお、測定手順および切断方法の詳細については前報¹⁾を参照されたい。

表1 測定精度の検討

ひずみ	測定方法	検討事項
Δe_{x1}	ひずみゲージによる測定	貼付方法 (方向, 接着状態) 結線の再現性 (ドリフト等)
Δe_{y1}		
$\Delta e_{45^{\circ}1}$		
Δe_{xb}	外表面形状の測定	測定距離は長い(50 mm)
* Δe_{yb}		測定距離は短い(7, 14 mm)
$\Delta e_{45^{\circ}b}$		測定距離は短い(9, 19 mm)

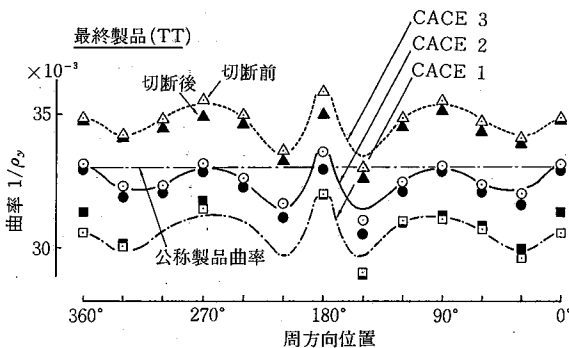


図4 周方向の曲率分布

3. 測定結果および考察

以下、溶接直後の管(TS)と最終製品(TT)に関する測定例について示す。この場合、素材材質は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、パスラインはボトムラインコンスタント、最終製品寸法は $\phi 60.5 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}(t/D=5\%)$ である。

3・1. 測定精度の検討

表1は各方向の外表面の弾性回復ひずみ・弾性回復曲げひずみの測定精度について検討した結果である。この表から、ひずみゲージの測定精度より外表面形状の測定精度の方に問題があると考えられ、以下に測定距離の短い Δe_{yb} の測定について検討する。

図4は図2に示すCASE 1, 2, 3の方法により、測定した結果の一例を示す。周方向曲率分布はいずれの測定方法でも同様な傾向を示すが、測定方法の違いにより、全体的にズレが生じている。CASE 1, 2の測定は図5に示すように、ダイヤルゲージの測定子R(0.4R)の影響を受ける。円弧状の試片の頂点を測定する場合、誤差(m)は生じないが、測定点が両端側へ移動するほどmは大きくなる。CASE 1の場合の最大誤差は0.002 mm, CASE 2は0.008 mmである。このmを加え計算を繰り返すと、mを加えない場合より、曲率は大きくなり、図4のCASE 1, 2の曲率分布は上側(曲率大の方向)に移動する。CASE 3の測定方法は治具の両側の足の部分(ナイフエッジ)(図6参照)に問題がある。測定を繰り返しているうちに、ナイフエッジの部分がダレて、足の間隔が広がる。この間隔の誤差を加えると、加えない場合より曲率は小さくなり、図4のCASE 3の曲率分布は下側(曲率小の方向)に移動する。なお、同一位置を数回繰り返して測定した結果、測定の再現性に関する誤差はCASE 1で0.004 mm, CASE 2で0.002 mm, CASE 3で0.003 mmであった。

図7は切断前後の曲率の差を検討したもので、CASE 2, 3のいずれの方法も同様な傾向を示す。

以上の検討結果より、 Δe_{yb} の測定については、測定距離が長く、測定誤差の少ないCASE 2の方法を採用し

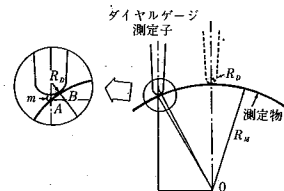


図5 ダイヤルゲージ測定子による誤差

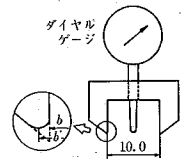


図6 ナイフエッジのダレ

研究速報
 た。さらに、 Δe_{45} の測定についても検討した結果、測定用試片を $14\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ に切り出す方法を採用した。
3・2. 各方向の弾性回復ひずみ分布の測定例
 図8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、外表面の弾性回復せん断ひずみ分布の測定例を示す。
 外表面の弾性回復曲げひずみは、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。
 溶接直後の管 (TS) の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、弾性回復膜ひずみとしてみると、長手方向に圧縮の回復ひずみ、周方向に伸びの回復ひずみとなる。最終製品 (TT) の溶接部およびその近傍の弾性回復膜ひずみは、SZR・THR のリダクションの影響を受け、長手・周方向とも小さくなる。最終製品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、SZR・THR の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。
 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、溶接直後の管の溶接部・底部は負 (正負の定義は図中に示す。) の回復ひずみ、側部は正の回復ひずみとなっている。最終製品は SZR・THR のリダクションの影響を受け、溶接部・底部では正の回復ひずみ、側部では負の回復ひずみとなる。
 yz -面内の弾性回復せん断ひずみ ($\Delta\gamma_{yz}$) については、溶接直後の管および最終製品とも溶接部から側部にかけて、僅かに負から正の回復ひずみが発生しており、底部では切断前後で変化がないことがわかる。
 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。

3・3. 残留応力分布の計算例
 図9・10に周方向各位置における $\sigma_x, \sigma_y, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$ の残留応力分布の計算例を示す。
 長手方向については、ロールへの進入時に受けるくら

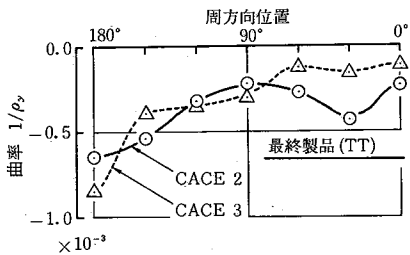


図7 切断前後の曲率の差

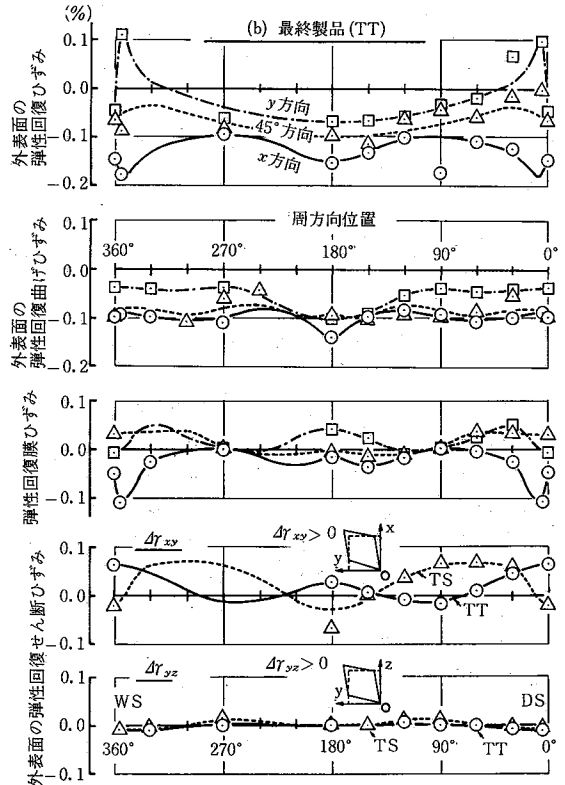
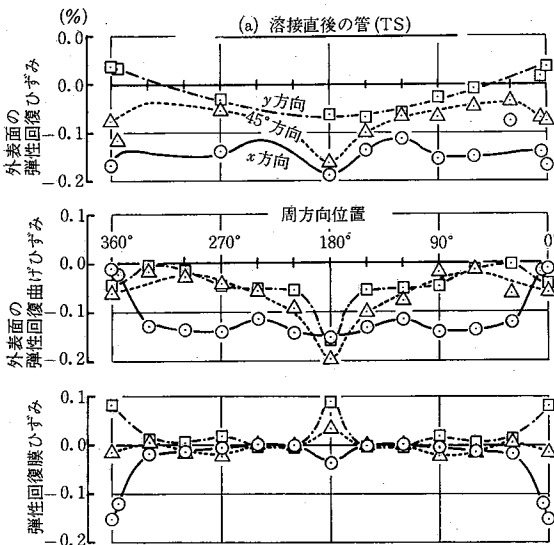


図8 各方向の弾性回復ひずみ分布

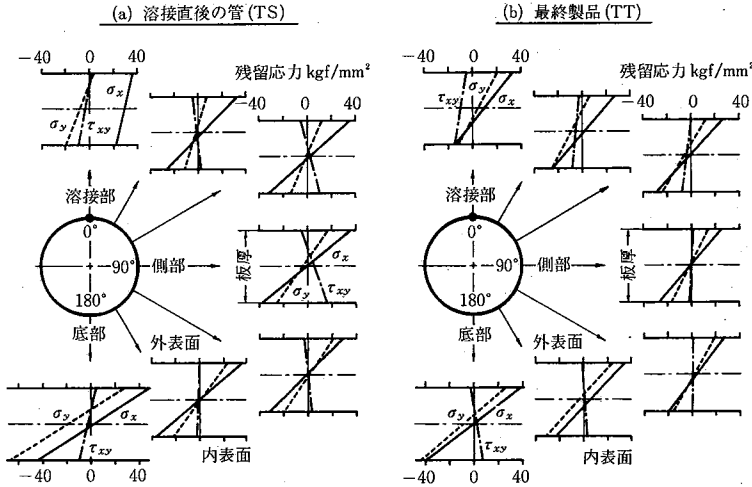


図9 板厚方向の残留応力分布

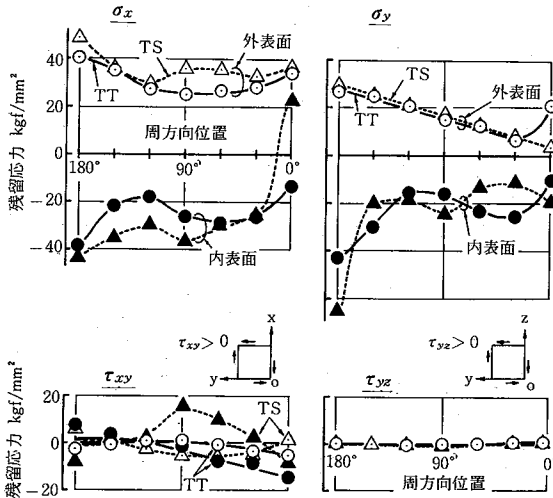


図10 周方向各位置の残留応力分布

形のそり変形が修正され、拘束されて真直な製品へと成形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。溶接直後の管の溶接部は、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側に引張り、内表面側に圧縮の残留応力が発生する。

最終製品の長手・周方向の残留応力はSZR・THRのリダクションの影響を受け、周方向全体に均一化される傾向があり、さらに、全体的に若干減少する傾向にある。

τ_{xy} については、溶接直後の管は外表面側と内表面側とで残留せん断応力に差が発生する。最終製品はSZR・THRのリダクションの影響を受け、溶接部およびその周辺で板厚方向全体に負(正負の定義は図中に示す。)の残留せん断応力、側部から底部にかけて外表面側と内表面側とで僅かに差が発生する。ただし、底部については $\tau_{xy}=0$ となるが、実際には多少の誤差が含まれている。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。その際、ロールへのなじみ方の相違により、外表面側と内表面側とに差が生じる。このことより、板厚方向についてみると、外表面側と内表面側とで残留せん断応力に差が生ずる。

τ_{yz} については、溶接直後の管・最終製品とも溶接部から側部にかけて、僅かに残留せん断応力が発生し、底部およびその周辺にかけて、ほとんど発生しない。

4. ま と め

電縫管の周方向各位置の各方向の弾性回復ひずみ成分を測定し、これらより残留応力を算出した結果、以下のことが判明した。

- (1) 一般に、長手方向・周方向とも外表面側で引張り、内表面側で圧縮の残留応力が発生する。
- (2) 最終製品の長手方向・周方向の残留応力はSZR・THRのリダクションの影響を受け、周方向全体に均一化される傾向があり、全体的に若干減少する傾向にある。
- (3) τ_{xy} は外表面側と内表面側とに残留応力の差が発生する。 (1985年3月28日受理)

参 考 文 献

1) 木内・新谷：第35回塑加連講論集 17