

大阪大学大学院 学生員○讀井一将 大阪大学工学部 正 員 西村宣男
大阪大学工学部 正 員 村上茂之 (株)酒井鉄工所 正 員 竹内修治

1. はじめに 電縫鋼管は圧縮材として用いられたとき、効率的な断面形状であることから、構造部材等として幅広く用いられている。製造工程では、コイルリングされた鋼板を平らに圧延し(uncoiling, leveling)、塑性曲げ加工を施し(forming)、両端突き合わせ部を電気抵抗溶接し(welding)、形状を整えるために管全体を絞る工程(sizing)が加えられる(図-1)。これらの工程の中で不可避免的に発生する残留応力や加工硬化による降伏応力の上昇等の材料的初期不整は、初期たわみなどととも部材強度に大きな影響を及ぼすことは過去の研究からも明らかにされている¹⁾。これらの研究では、鋼管の機械的性質として短柱圧縮試験結果から近似的に得られる見かけ上の応力-ひずみ関係を用いているが、本研究では加工前の鋼材の材料試験から得られる材料定数を用いて、前述の各工程でのひずみ分布を求め、移動硬化則に基づいた構成式²⁾により電縫管の持つ材料的初期不整を解析的に求める。

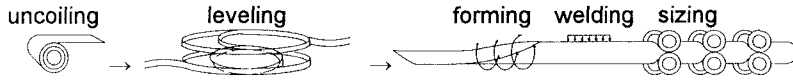


図-1 電縫鋼管の製造工程

2. 製造工程におけるひずみの評価

ここで、製造ラインの各工程で与えられるひずみの板厚方向の変化を定式化する。

(1) uncoiling uncoiling では、コイル状に巻かれていた帯鋼が平らに延ばされる。このため、鋼材が受けるひずみ $\varepsilon_{coil,l}$ は、コイルの径 D_{coil} と板厚 t に依存し、次式で与える。

$$\varepsilon_{coil,l} = \frac{t}{D_{coil}} \cdot \eta \quad (\eta \text{ は板厚パラメータで } -1 \leq \eta \leq 1 \text{ となり、外縁では } \eta = 1) \quad (1)$$

(2) leveling leveling は、uncoil 後の帯鋼を全体的に均質な鋼シートに成形する工程である。ここでは、使用するローラーの径 D_{level} と板厚に依存して、ひずみ $\varepsilon_{level,l}$ が与えられる。この工程で与えられるひずみは、式(1)と同様に、次式で与えられる。

$$\varepsilon_{level,l} = \frac{t}{D_{level}} \cdot \eta \quad (2)$$

(3) leveling 工程後の除荷 leveling 工程が終了すると、一旦載荷荷重が除荷されることになる。除荷は弾性的に行われることから、そのときに与えられる管軸、管周方向ひずみはそれぞれ次式となる、

$$\varepsilon_{unload,l} = \frac{6}{E} \left(\frac{1}{t} \right)^2 (M_l - \nu M_c) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{unload,c} = \frac{6}{E} \left(\frac{1}{t} \right)^2 (M_c - \nu M_l) \quad (4)$$

ここで M_l , M_c は板厚内の抵抗モーメントで leveling 時の応力 $\sigma_{level,l}(\eta)$, $\sigma_{level,c}(\eta)$ から次式で与えられる。

$$M_l = \int_{-t/2}^{t/2} \eta \sigma_{level,l}(\eta) d\eta \quad (5)$$

$$M_c = \int_{-t/2}^{t/2} \eta \sigma_{level,c}(\eta) d\eta \quad (6)$$

(4) forming uncoiling, leveling で与えられるひずみは管軸方向の成分であるが、この forming で与えられるひずみは、円周方向成分となる。forming は、帯鋼を円形に成形する工程であり、鋼管の径 D_{pipe} と板厚に依存してひずみ $\varepsilon_{form,c}$ が与えられることになる。forming の工程で受けるひずみは次式で与えられる。

$$\varepsilon_{form,c} = \frac{t}{D_{pipe} - t} \cdot \eta \quad (7)$$

(5) sizing 前出3工程は塑性曲げ加工の工程であるため、与えられるひずみも板曲げひずみに相当する。しかし、sizing は鋼管を絞り込む工程であるため、円周方向に一樣な圧縮ひずみが与えられる。この sizing で与えられる周方向ひずみ $\varepsilon_{size,c}$ は、絞り率 α の関数として次式で与えられる。

$$\varepsilon_{size,c} = -\alpha \quad (8)$$

管軸方向の変位は自由であるため、軸方向ひずみ $\varepsilon_{size,l}$ は、

$$\varepsilon_{size,l} = -\nu \varepsilon_{size,c} \quad (9)$$

となる。ここで、 ν は絞り工程中に刻々と変化するポアソン比を示している。

(6) sizing 工程後の除荷 sizing 工程後の除荷では、管周方向に発生した応力の板厚内の総和が 0 となるようにひずみが決定される。軸方向はポアソン効果による自由変位が発生する。

$$\varepsilon_{unload,c} = \frac{1}{l-t/2} \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{size,c}(\eta) d\eta \quad (10)$$

$$\varepsilon_{unload,l} = -\nu \varepsilon_{unload,c} \quad (11)$$

3. 解析結果 上式から得られる各工程でのひずみを構成式に代入することにより、応力を求める方法で解析を行った。板厚方向の変化に対しては、板厚を 100 層に分割することで対応している。

図-2 に製造時の内部応力の推移を示す。解析モデルの構造諸元は表-1 に示すとおりである。uncoiling 時の応力分布では軸方向に大きな応力が発生する (第 1 図)。除荷は弾性的に行われ、第 2 図のような分布となる。forming では円周方向に一部でひずみ硬化域に達する大きな応力が発生することになるが、軸方向の変位が拘束されないため、軸方向応力は前工程時とほとんど変わらない (第 3 図)。sizing では非常に大きな圧縮応力が発生し、円周方向応力は断面全体で圧縮側に移動する。この間、軸方向はポアソン効果による軸伸び変位が発生するが、応力増分はほとんど発生していないことがわかる (第 4 図)。sizing 工程での除荷は円周方向について断面一様に行われ、除荷後の円周方向残留応力はかなり小さいものへ矯正されることとなる (第 5 図)。

径厚比を変化させた場合の降伏応力の上昇について図-3 に示す。上昇率は公称値と実験から得られた降伏応力によって算出した値である。加藤³⁾と越智⁴⁾の提案曲線も併せて比較した。公称値を用いた場合、 $1/\alpha \geq 0.05$ の範囲で同じく公称値を用いた加藤式に良好に一致する。実験値を用いて無次元化した解析値のほうは、同じく実験値から求めた越智式と比較して径厚比の小さい範囲においてよく一致する結果が得られた。本解析では sizing の絞り率を D/t によらず 1.0% としたが、実際には径が大きくなるに従って絞り率は減少し、そのため降伏応力の上昇は小さくなる。径厚比の大きい範囲では、sizing の絞り率が降伏応力の上昇に対して支配的であることから、絞り率を少なくすると越智の曲線にさらに近づくと考えられる。

表-1 解析モデルの諸元

外径	318.5 mm
板厚	10.0 mm
降伏応力	353 MPa
ひずみ硬化開始勾配	3.923 GPa
コイリング径	1000 mm
sizing 絞り率	1.0%

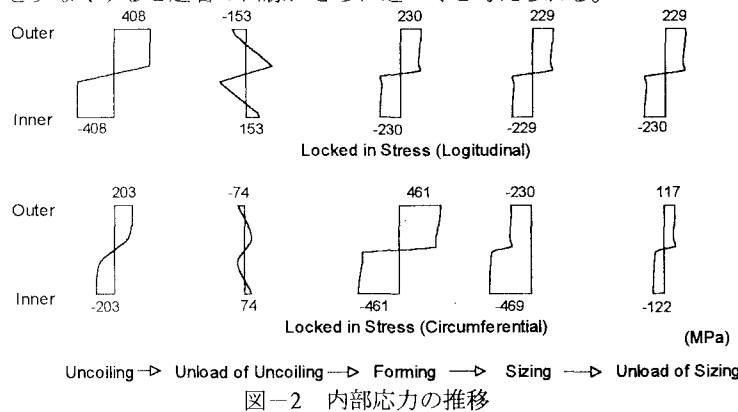


図-2 内部応力の推移

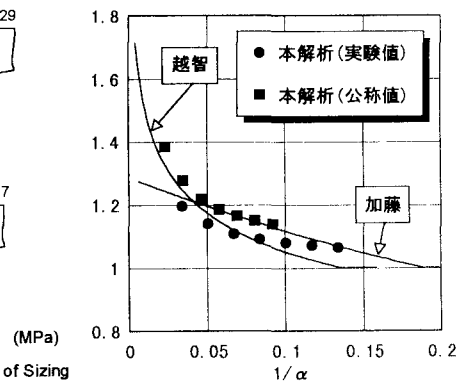


図-3 径厚比-降伏応力の上昇率

<参考文献>

- 1) 例えば、加藤勉、青木博文：電気抵抗溶接鋼管のひずみ履歴と残留応力、日本建築学会論文報告集第230号、昭和50.4.
- 2) 西村宣男、小野潔、池内智行：単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式、土木学会論文集、第513号、pp.27-38、1994.
- 3) B. Kato : Local Buckling of Steel Circular Tubes in Plastic Region, SSRC/ASCE, pp.375-391, 1977.
- 4) 越智健之：円形鋼管部材の終局耐力と変形能の統計的評価、熊本大学学位論文、1991.