

薄肉低炭素ステンレス鋼鋼管の誘導加熱曲げ法の開発

Development of Induction Bending Method for Thin-wall Low Carbon Stainless Steel Tubes

新日本製鉄(株)鉄鋼研究所
鋼管技術部(現:新日鉄情報通信システム(株))
第一高周波工業(株)
日揮(株)

直井 久*
宮川勝彦
高岸正章
佐藤健二・山本勝美・井上和誠

1. 緒言

原子力配管及び再処理施設等の配管工事において溶接式管継ぎ手の代わりに曲げ加工した鋼管を使用することは、溶接箇所への減少による施工費の低減及び工期の短縮等に有効である。最近のプラント配管では溶接式管継手に代えて誘導加熱曲げ法による曲げ管が開発され¹⁾、普通鋼の中厚肉配管で普及しつつある。一方この誘導加熱曲げ法を薄肉ステンレス鋼鋼管に適用することが望まれていたが、その肉厚が薄いため小半径の曲げ加工時において曲げ内周部の蛇腹、曲げ外周部の減肉及び断面の偏平等の解決すべき技術課題が残されていた。今回この技術課題を解決し、薄肉ステンレス鋼鋼管の誘導加熱曲げ法を開発したので報告する。

2. 実験方法

2・1 供試材

供試材はSUS304Lを材料として溶解-連続鋳造-熱押しプロセスで製造した外径50Aで肉厚Sch10S (50A*Sch10Sと呼ぶ)及び外径125Aで肉厚Sch10S (125A*Sch10Sと呼ぶ)の鋼管で、その組成及び機械的性質をTable 1に示す。

2・2 曲げ加工方法

本試験に用いた誘導加熱曲げ法をFig. 1. に示す。誘導加熱装置の最大出力は150kW、発振周波数は2.4kHzであり、加熱コイルと水噴射により鋼管の冷却を行うノズルを一体とした。鋼管の加熱温度は1050~1100℃とし、水噴射の水量は30~55/minとした。鋼管を誘導加熱しつつ、後方からプッシャーにより連続的に曲げ加工力 F_1 を荷し、曲げ加工速度は最大5mm/sで、曲げ半径 R と鋼管の外径 D の比 R/D (曲げ半径比と呼ぶ)が1.5、2.0、2.5、3.0及び5.0に成形した。この従来の誘導加熱曲げ法に加えて以下に述べる4つの新しい曲げ加工技術で成形された鋼管の寸法・形状について調査した。

2・2・1 グラデーション曲げ法(G曲げ法)

薄肉鋼管を小半径に曲げると曲げ開始部で蛇腹が発生しやすい。蛇腹を防止するため曲げ開始部の小区間においては規定半径 R より大きな初期曲げ半径 R_0 とし、その後規定半径 R まで徐々に曲げ半径を縮小させるG曲げ法の調査を行った。加熱コイルと鋼管の相対速度と曲げの角速度の比を制御して²⁾、初期曲げ半径 R_0 と規定曲げ半径 R の比を2.3、4.0及び9.0と変えた。

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of SUS304LTP tubes

	Chemical composition (wt%)							0.2% Yield stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr			
JIS G3459 Code	<0.03	1.00	2.00	<0.040	<0.030	9.00 ~13.00	18.00 ~20.00	≤175	≤480	≤35
50A*Sch10S	0.022	0.43	1.07	0.028	0.008	10.15	18.41	235	539	74
125A*Sch10S	0.023	0.45	1.05	0.029	0.010	10.01	18.40	235	539	66

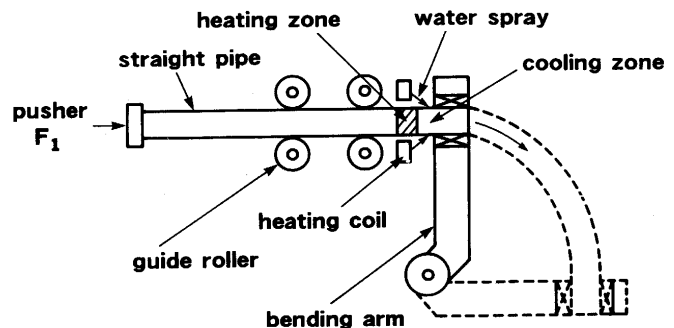


Fig.1 Induction bending method

2・2・2 拘束治具法

鋼管の曲げ加工中に曲げ中立部を長軸とし曲げ外周部と内周部を短軸とする偏平が発生しやすい。偏平を抑制する方法として、鋼管の曲げ加工した直後、曲げ中立軸の外径が公称外径と同一になるよう外径を拘束する治具の調査を行った。

2・2・3 圧縮力付加法

本法の原理はFig. 2. に示すように、曲げ部に曲げ加工力 F_1 だけでなく強制的に軸方向圧縮力 F_2 を曲げ断面全体に付加する。本法により外周部の減肉を抑制出来るが、軸方向の圧縮力 F_2 が大きくなると蛇腹が発生しやすいので軸方向圧縮力 F_2 と曲げ加工力 F_1 の比 F_2/F_1 (圧縮力比と呼ぶ) を0.25、0.5、0.75及び1.0と変化して、蛇腹の発生状況を調査した。

2・2・4 温度差法

本法の原理は、曲げ外周部の温度を低く曲げ内周部の温度が高くなるように制御し、外周部の変形抵抗を内周側のそれより大きくする。本法は外周部の減肉を抑制するが、円周方向の温度分布が不均一にのため蛇腹が発生しやすいので、G曲げ法を併用した。曲げ内周部となる加熱コイルの位置に透磁率が高く鉄損の少ない磁性体を設置³⁾して、内周部の温度を外周部の温度より最大約150℃上げた。

2・3 寸法測定方法

(1) 蛇腹の高さ Δh は米国のPFIの定義⁴⁾に従い、Fig. 3.における外径差を測定して求めた。

(2) 偏平率は曲げ加工後の鋼管の長径と短径をノギスで測定し、次式で求めた。

$$\text{偏平率} = (\text{長径} - \text{短径}) / \text{公称外径} * 100 (\%)$$

(3) 曲げ外周部の減肉率と曲げ内周部の増肉率は曲げ加工前後の肉厚を測定し次式で求めた。

$$\text{外周減肉率} = (\text{曲げ前外周肉厚} - \text{曲げ後外周肉厚})$$

$$/ \text{曲げ前外周肉厚} * 100 (\%)$$

$$\text{内周増肉率} = (\text{曲げ後内周肉厚} - \text{曲げ前内周肉厚})$$

$$/ \text{曲げ前内周肉厚} * 100 (\%)$$

3. 実験結果

3・1 曲げ内周部の蛇腹の発生とその防止技術

3・1・1 従来法による蛇腹の発生挙動

50A*Sch10S及び125A*Sch10Sの鋼管を従来の誘導加熱曲げ法により曲げ半径比R/Dで3.0及び5.0に成形した。その結果50A*Sch10Sの鋼管は曲げ半径比R/Dが3.0及び5.0で、125A*Sch10Sの鋼管は曲げ半径比R/Dが3.0で、曲げ開始部に蛇腹が生じた。50A*Sch10Sの鋼管を曲げ半径比R/Dで3.0に成形した断面形状をPhoto. 1. に

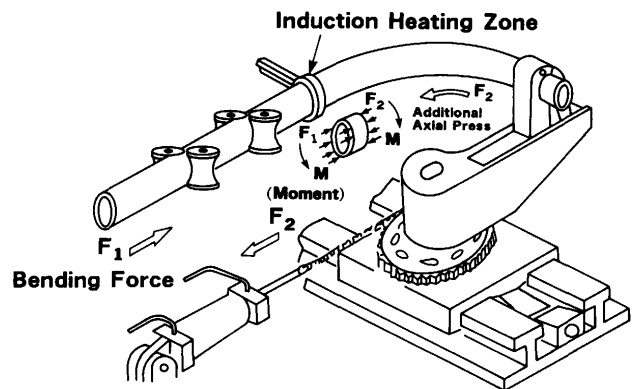


Fig.2 Axial press method

$$\Delta h = \{(\text{OD})_1 + (\text{OD})_3\} / 2 - (\text{OD})_2$$

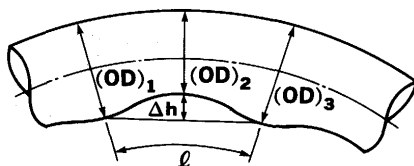


Fig.3 Pipe wall buckling measurement

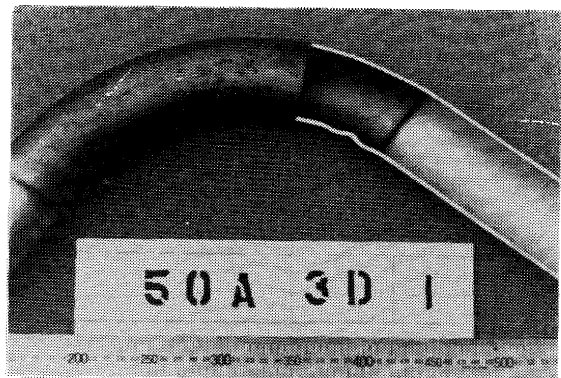


Photo.1 Behavior of buckling (D:50A, R/D:3.0)

示すように、肉厚が湾曲して波打ちが2, 3個伝播している。125A*Sch10Sの鋼管は曲げ半径比 R/D が5.0で蛇腹は生じなかった。

3・1・2 G曲げ法による変形特性

50A*Sch10Sの鋼管をG曲げ法により曲げ半径比 R/D で2.5に成形する場合に於いて、初期曲げ半径 R_0 と規定曲げ半径 R の比を2.0、4.0及び9.0と変えて蛇腹に及ぼす影響を調査した結果、蛇腹高さ Δh は R_0/R が大きくなるとともに小さくなり R_0/R が4.0以上で飽和した。そこで、 R_0/R が4.0となるG曲げ法により50A*Sch10S及び125A*Sch10Sの鋼管を曲げ半径比 R/D で5.0及び3.0に成形し、50A*Sch10Sの鋼管を曲げ半径比 R/D で2.5、2.0及び1.5に成形し、また125A*Sch10Sの鋼管を曲げ半径比 R/D で2.5及び2.0に成形し、その結果をFig. 4. に示した。50A*Sch10S及び125A*Sch10Sの鋼管をG曲げ法により成形すると、曲げ半径比 R/D が大きいほど蛇腹高さ Δh は小さくなり、従来法による曲げ半径比 R/D が3.0や5.0の成形で生じていた蛇腹はすべて消滅した。

3・2 断面偏平の発生とその抑制技術

拘束治具法による偏平抑制の効果をG曲げ法単独との比較でFig. 5. 示した。外径が大きくて曲げ半径比 R/D が小さくなるほど、偏平抑制の効果は大きく、例えば125A*Sch10Sの鋼管を曲げ半径比 R/D で3.0に成形すると偏平率が約7%となるが、拘束治具を用いて成形すると偏平率は5%以下まで減少する。

3・3 外周部減肉の発生とその抑制技術

3・3・1 圧縮力付加法

圧縮力付加法により曲げ半径比 R/D で5.0に成形した場合の外周減肉率及び偏平率の影響をFig. 6. に示した。 F_2/F_1 を大きくするとともに外周減肉率はやや減少するが、偏平率は増大する。特に偏平率は外径の大きい鋼管ほど増大するが、拘束治具により減少される。

圧縮力付加法により曲げ半径比 R/D で3.0に成形した

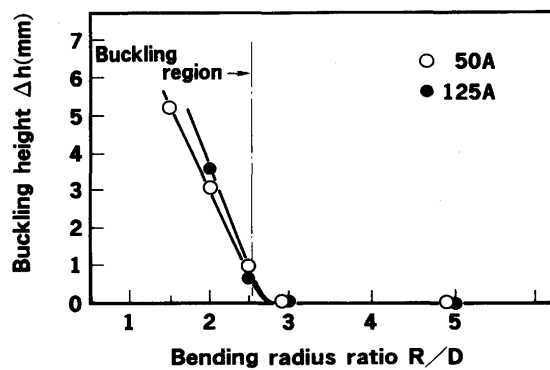


Fig. 4 Effect of gradation method on buckling height

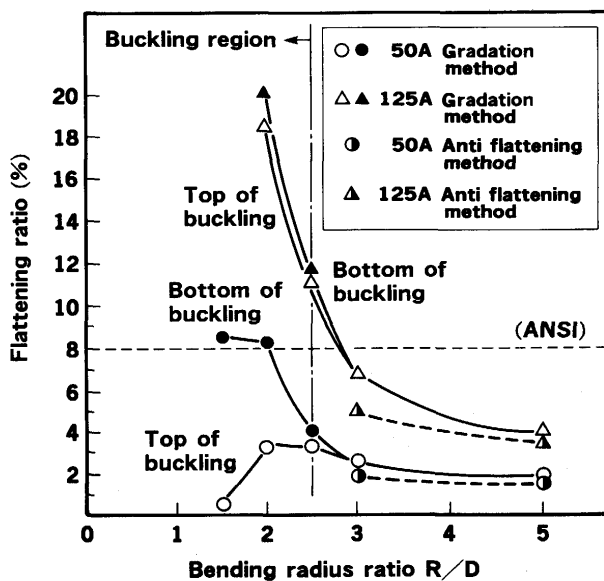


Fig. 5 Effect of anti-flattening method on flattening ratio

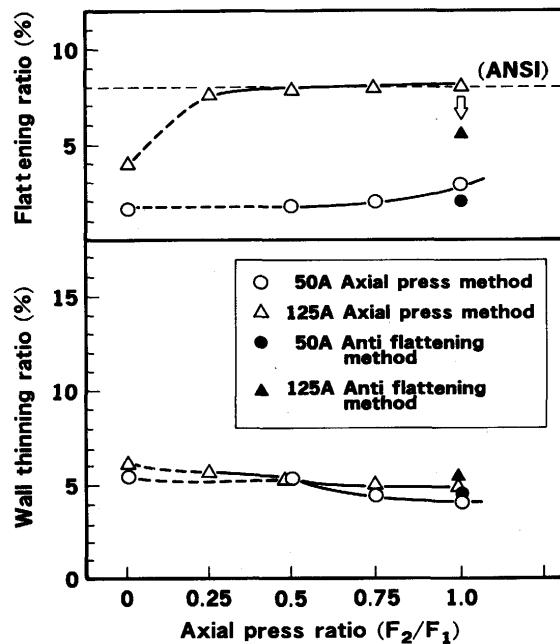


Fig. 6 Effect of axial press method on wall thinning and flattening ratio ($R/D:5.0$)

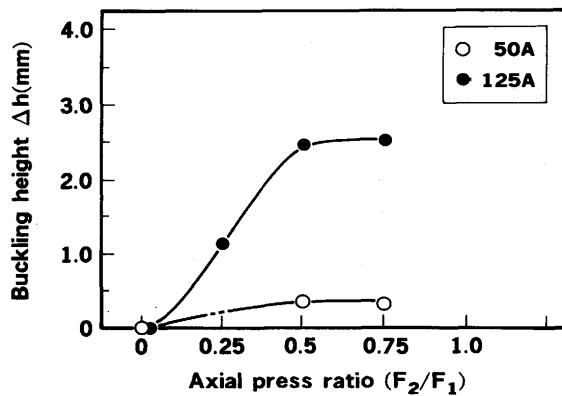


Fig. 7 Effect of axial press method on buckling height (R/D:3.0)

場合の蛇腹高さ Δh への影響をFig. 7. に示した。圧縮力比 F_2/F_1 が0.25-1.0において蛇腹が生じ、 F_2/F_1 が大きくなるとともに蛇腹高さ Δh は増大しその傾向は50A*Sch10Sの鋼管よりも外径の大きい125A*Sch10Sの鋼管の方が大きくなる。

3・3・2 温度差法

温度差法を用いて鋼管を曲げ半径比R/Dが3.0に成形した場合の減肉率及び偏平率への影響をFig. 8. に示した。

曲げ内周部と曲げ外周部の鋼管の加熱温度の差が大きくなるとともに外周減肉率は低下し偏平率は増大する。温度差が100℃以上になると外周減肉率への影響が飽和するが、この理由は加工温度域における供試材SUS304Lの変形抵抗の差異が小さいためと考えられる。125A*Sch10Sの鋼管を約150℃の温度差法で成形すると外周減肉率は約7.8%であり従来法より約3.0%小さくなるが、偏平率は約10%まで増大するのでANSI⁵⁾による偏平率の基準である8.0%を超えるが、拘束治具法を用いて成形すると6%まで減少する。

4. 結論

50A*Sch10Sと125A*Sch10Sの薄肉低炭素ステンレス鋼鋼管を曲げ半径比3.0及び5.0に成形できる誘導加熱曲げ法が開発された。

- (1) 曲げ半径比R/Dで3.0及び5.0の成形で生じる蛇腹はG曲げ法で防止される。
- (2) 圧縮力付加法により外周部の減肉は抑制されるが、蛇腹が発生しやすくまた偏平率は増大する。
- (3) 温度差法により外周部の減肉は抑制されまた蛇腹は発生に変化はないが、偏平率は増大する。
- (4) 拘束治具法により偏平は抑制される。

本研究は東北電力(株)、北海道電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)の10電力会社及び日本原燃(株)により電力共通研究として行われた委託研究成果の一部である。

参考文献

- 1) NAOI H. et al; ASME PVP, 139(1988), P57.
- 2) 半揚 他; 特開昭53-135870
- 3) 花本 他; 特開昭53-135870
- 4) PFI STANDARD ES-24; PIPE FABRICATION, P4.
- 5) ANSI B31.3; 1984

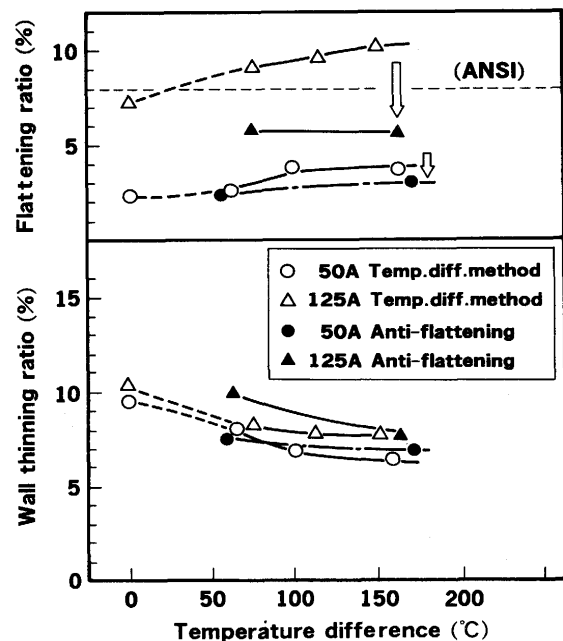


Fig. 8 Effect of temperature difference method on wall thinning and flattening ratio (R/D:3.0)