溶融亜鉛めっき鋼管の圧縮変形性状に関する研究

STUDY ON COMPRESSIVE DEFORMATION BEHAVIORS OF HOT DIP ZINC GALVANIZED STEEL PIPES

鈴木敏郎*, 佐藤亘宏**, 深沢 隆***

Toshirou SUZUKI, Nobuhiro SATOH and Takashi FUKASAWA

Yield stress of steel pipes became higher than that of plates because of work hardening; however, the apparent yield stress lower than that of the expected because of residual stress. And also in case of hot dip zinc galvanized steel pipes, thier deformation behaviors are alternated comparing with the raw materials since residual stress is partially released through the galvanizing.

This study quantitatively realized the effects of the galvanizing to compressive deformation behavior by residual strain measurements, tensile strength tests, and compressive strength tests of the series of short columns. Furthermore, we propose the limited value of thickness to diameter ratio of hot dip zinc galvanized steel pipe.

Keywords : hot dip zinc galvanized steel pipe, compressive deformation behavior, limited value of thickness to diameter ratio

1. はじめに

冷間成形される鋼管部材の降伏応力度は、製造過程における加工硬化によって、原板の降伏応力度より高くなる一方、残留応力が相当存在し見掛けの降伏応力度を下げることは良く知られている。

この鋼管部材が防錆対策として溶融亜鉛めっき処理を施される場合、製管のままの鋼管に比べて変形性状が変化することが指摘されている。これは、めっき処理過程において約460度の熱処理を受けることにより、製管時の塑性加工において生じた残留応力が一部解除されるためと考えられる。

したがって、溶融亜鉛めっき処理（以下めっき処理と呼ぶ）を施した鋼管（以下めっき鋼管と呼ぶ）を構造物に適用する場合、めっき処理が鋼管の圧縮変形性状に及ぼす影響を定量的に把握しておくことが必要となる。

鋼管の圧縮変形性状に関する研究としては、日本鋼構造協会標準委員会¹⁾、加藤・秋山ら²⁾、鈴木・小河ら⁵⁾の種々の方法で製造した鋼管短柱を対象とした圧縮試験研究があり、製管のままの鋼管（残留応力を含む鋼管に分類される）、あるいは継ぎ目なし鋼管、焼鈍鋼管（残留応力のない鋼管に分類される）それぞれについて、局部座屈耐力、変形能力等の諸性能と径厚比との関係を明らかにしている。また、黒羽・越智⁶⁾は製管のままの鋼管

を対象に、材料特性を統計的に評価し、限界状態設計法を念頭においた、確率統計論に基づく部材耐力、変形能力の評価を行っている。

また、冷間成形される鋼管の残留応力あるいは残留応力の圧縮変形性状に及ぼす影響に関する既往の研究としては、電縫鋼管に関するものが多く、加藤、青木ら³⁾は、製管過程を分析し、数理塑性学的取扱いにより残留応力を推定し、見掛けの応力とひずみの関係を調べている。また、青木、福本ら⁴⁾は、残留応力の変形性状に及ぼす影響と材料強度の不規則性について考察している。

しかしながら、めっき鋼管を対象とした圧縮変形性状あるいは残留応力に関する研究は、筆者らの知る限りほとんど行われていないのが実状である。

本研究では、まず鋼管の残留ひずみ計測を行い、めっき処理が鋼管の残留応力に及ぼす影響を明らかにする。続いて、径厚比を変化させた短柱圧縮試験を行い、めっき鋼管の局部座屈耐力、変形能力等の諸性能と径厚比、降伏応力度との関係を定量的に把握し、めっき処理に伴う残留応力の変化が鋼管の諸性能に及ぼす影響を明らかにする。さらに、めっき処理により残留応力が一部解除されることに伴う製管のままの鋼管に比べて変形性状が変化する現象、あるいは降伏応力度が上昇する現象を考慮し、めっき鋼管を対象とした許容応力度設計対応の径

* 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

** (株)巴組鐵工所・工博

*** (株)巴組鐵工所

Tokyo Institute of Technology Prof., Dr. Eng.

Tomoe Iron Works, Ltd., Dr. Eng.

Tomoe Iron Works, Ltd.

厚比制限値を提案する。

2. 残留ひずみ

2.1 残留ひずみ計測概要

Table 1 に示す製管のままの鋼管、製管のままの鋼管にめっき処理を施した鋼管、600 度 1 時間加熱後炉冷する方法による焼鈍処理を施した鋼管について、円周方向表裏に等間隔に貼付したひずみゲージの周辺を、Fig. 1 に示すように、50 mm 方形に切断した場合の拘束開放前後のひずみの変化から、材軸方向、円周方向それぞれの残留軸ひずみ、曲げひずみを計測する。

鋼管の材質は、Table 2 に示すように、めっき割れ感受性当量を従来鋼に対し低く押えた JIS G 3474 に規定される鉄塔用高張力鋼管 STKT 60 鋼管（以後 HT 60 鋼管と呼ぶ）、JIS G 3444 に規定される一般構造用炭素鋼鋼管 STK 41 鋼管の 2 種類の電縫鋼管とする。

なお、溶融亜鉛めっき処理は以下の要領で行う。

- ①脱脂 : 化成ソーダ, 80~90 度, 1 時間
- ②酸洗い : 硫酸, 60 度, 0.5~1 時間
- ③フラックス処理 : 塩化亜鉛, 塩化アンモニウム, 60 度, 2~3 分
- ④めっき処理 : 亜鉛, 460 度, 3~5 分
- ⑤冷却 : 温水, 60 度, 1~2 分

2.2 めっき処理の残留ひずみに及ぼす影響

Fig. 2 に (1) 式により求めた残留軸ひずみ、最外縁の曲げひずみの分布図を示す。

$$\left. \begin{aligned} \text{材軸方向軸ひずみ} & \quad \varepsilon_{TN} = (\varepsilon_{T0} + \varepsilon_{T1})/2 \\ \text{円周方向軸ひずみ} & \quad \varepsilon_{LN} = (\varepsilon_{L0} + \varepsilon_{L1})/2 \\ \text{材軸方向曲げひずみ} & \quad \varepsilon_{TM} = (\varepsilon_{T0} - \varepsilon_{T1})/2 \\ \text{円周方向曲げひずみ} & \quad \varepsilon_{LM} = (\varepsilon_{L0} - \varepsilon_{L1})/2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ε_{T0} , ε_{T1} : 材軸方向計測ひずみ

ε_{L0} , ε_{L1} : 円周方向計測ひずみ

添字の T , L はそれぞれ材軸方向、円周方向を、0, 1 はそれぞれ鋼管外、内側を表す。

Table 1 に計測ひずみから (2) 式を介して算定した

- ①鋼管中央部において、シーム部を基準とした 16 等分の外面に、材軸方向、円周方向に一致させて二軸ひずみゲージを貼付する。

- ②鋼管中央部において、1.5D の幅にガス切断し、内面の外面と同様な位置に二軸ひずみゲージを貼付する。

- ③1.5D 幅に切断した鋼管を、電動ノコギリで 50mm 幅の輪に切断後、さらにひずみゲージ貼付位置を中心に 50mm の方形にスリット切断する。

- ④ひずみは、それぞれゲージ貼付後の値を零点とする。これより、50mm 方形後の値との差が残留ひずみとなる。なお、ひずみ計測ポイント番号はシーム部を起点とする。

Fig. 1 残留ひずみ計測要領 (16 分割の場合)

Table 2 HT 60 鋼管成分表 (単位: %)

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Nb+V
含有比率	0.12	0.40	2.00	0.030	0.030	0.15
	以下	以下	以下	以下	以下	以下

- 1) 管の炭素当量は 0.40% 以下とする。

- 2) 板厚 22mm 以下の管の溶融亜鉛めっき割れ感受性当量は 0.28% 以下とする。なお、当量の計算は次式による。
当量 = $C + Si/27 + Mn/12 + V/3 + Nb/2.5 + Ti/5 + Cr/6 + Mo/9 + 9B$

Table 1 残留ひずみ計測結果

試 験 体				材料引張 試験結果	残 留 ひ ず み 計 測 結 果					
					材 軸 方 向			円 周 方 向		
サ イ ズ	D/t	材 質	処理方法	降伏応力度 σ_{yt} (t/cm ²)	ε_T (μ)	σ_T (t/cm ²)	σ_T / σ_{yt}	ε_L (μ)	σ_L (t/cm ²)	σ_L / σ_{yt}
φ139.8×4.5	31	STK41	製管のまま	3.93	530	1.41	0.36	270	0.99	0.25
			め っ き	4.31	250	0.76	0.18	260	0.77	0.18
			焼 鈍	3.49	130	0.35	0.10	70	0.25	0.07
φ216.3×5.8	37	HT60	製管のまま	6.44	1480	3.65	0.57	340	1.81	0.28
			め っ き	6.20	910	2.29	0.37	270	1.25	0.20
φ355.6×5.8	61		製管のまま	6.11	1110	2.85	0.47	420	1.74	0.28
			め っ き	6.20	860	2.22	0.36	340	1.38	0.22

- 1) D: 鋼管外径, t: 鋼管板厚, D/t: 径厚比を表す。

- 2) 材料引張試験における降伏応力度は、同一材料の材軸方向の値を示す。

- 3) 残留ひずみは、最外縁の計測点の平均引張ひずみの値を示す。 4) 残留応力は、(2)式により求める。

最外縁の平均残留応力度を示す。

$$\begin{aligned} \text{材軸方向残留応力 } \sigma_T &= E(\epsilon_T + \nu\epsilon_L)/(1-\nu^2) \\ \text{円周方向残留応力 } \sigma_L &= E(\nu\epsilon_T + \epsilon_L)/(1-\nu^2) \end{aligned} \quad \dots(2)$$

ただし、 ν ：ポアソン比

鋼管には、計測値と逆符号の残留ひずみが内在し、外側引張、内側圧縮となる。また、残留ひずみは、整管の影響により、材軸方向、円周方向ともほぼ一様に分布する。シーム部は、他の製管方法に比べて溶接入熱量が比較的小さく部分焼鈍されることから、乱れは小さい。

いずれの鋼管においても材軸方向の曲げひずみが最も大きく、その値は径厚比が小さいほど降伏応力度が高いほど大きくなる傾向にあり、最外縁の残留応力度は、製

管のままの鋼管においては、材料引張試験から求まる降伏応力度の 30～60 % に相当する。

めっき鋼管の残留ひずみは、製管のままの鋼管に比べて値の大きい材軸方向曲げひずみで 2/3 程度となり、いずれも解放される傾向にあり、めっき処理による残留応力の一部解除効果が認められる。

焼鈍鋼管の残留ひずみはほぼ解放されており、材軸方向曲げひずみは製管のままの鋼管に比べ 1/4 程度となる。

3. 引張変形性状

3.1 材料引張試験概要

Table 3 に示す、製管のままの鋼管、めっき鋼管、焼鈍鋼管および原板を対象に、JIS Z 2241 に基づく材軸方向、円周方向の材料引張試験を行う。材料引張試験片は、JIS Z 2201 金属材料引張試験片に基づき製作する。なお、鋼管の円周方向については、JIS Z 3444 一般構造用炭素鋼鋼管表—6 試験片の適用に準じて 5 号試験片を適用する。

3.2 めっき処理の応力度-ひずみ度関係に及ぼす影響

Fig. 3 に代表的な試験片の応力度-ひずみ度関係曲線を示す。

材軸方向においては、製管のままの鋼管は製管時に生

Fig. 2 残留ひずみ分布図

ずる残留応力が内在することから、降伏棚を有しない (RH) 型に、焼鈍鋼管は焼きなまし効果、あるいは高温処理により残留ひずみがほぼ解放されることにより、降伏棚を有する (EPH) 型に分類される。また、めっき鋼管は後者に分類される。

一方、円周方向においては、製管のままの鋼管、めっ

き鋼管は降伏棚を有しない型に、焼鈍鋼管は降伏棚を有する型となる。

なお、原板はいずれの方向も降伏棚を有する。

3.3 めっき処理の機械的性質に及ぼす影響

Fig. 4 に製管のままの鋼管の降伏応力度、引張強さ、伸び等の機械的性質 (下添字 1 で表す) の原板 (下添字

Table 3 材料引張試験結果

試 験 片						材 料 引 張 試 験 結 果			
サイ ズ	D/t	材 質	採取方向	番 号	処理方法	降伏応力度 σ_{yt} (t/cm ²)	引張強さ σ_{bt} (t/cm ²)	降 伏 比 σ_{yt}/σ_{bt}	伸 び ϵ_{next} (%)
$\phi 139.8 \times 4.5$	31	STK41	材軸方向	12B	製管のまま	3.93	4.85	0.81	29.7
					め っ き	4.31	5.08	0.85	28.0
					焼 鈍	3.49	4.62	0.76	36.7
PL-5.8		HT60	材軸方向	5	製管のまま	5.38	6.38	0.84	30.0
					め っ き	5.64	6.51	0.87	29.3
			円周方向	5	製管のまま	5.81	6.61	0.88	28.3
					め っ き	5.99	6.67	0.90	25.7
$\phi 114.3 \times 5.8$	20	HT60	材軸方向	12B	製管のまま	6.41	6.55	0.98	23.3
					め っ き	6.17	6.69	0.92	25.7
$\phi 216.3 \times 5.8$	37	HT60	材軸方向	12C	製管のまま	6.44	6.73	0.96	29.7
					め っ き	6.20	6.79	0.91	28.7
			円周方向	5	製管のまま	6.36	6.76	0.94	27.3
					め っ き	6.63	6.81	0.97	22.7
$\phi 355.6 \times 5.8$	61	HT60	材軸方向	12C	製管のまま	6.11	6.70	0.91	30.3
					め っ き	6.23	6.83	0.91	28.3

1) HT60鋼管は、HT60鋼板 (t = 5.8mm) を用いて製管を行った。

2) 試験片番号は、JIS Z 2201 金属材料引張試験片による。

Fig. 3 応力度-ひずみ度関係 (材料引張試験)

0で表す)に対する比と鋼管の径厚比の関係を示す。このとき、図中の大きな□印のプロット点は本研究におけるHT 60 鋼管の試験結果、小さい○印プロット点は既往研究におけるSTK 41 鋼管の試験結果¹⁾を示す。

製管のままの鋼管は、加工硬化の影響により、原板に比べ降伏応力度が上昇し、その値は径厚比が小さいほど大きい。一方伸びは逆に低下する。また、引張強さはほとんど変化しない。

Fig. 5 にめっきした鋼管 (図中白抜きプロット点)、焼鈍した鋼管 (塗り潰しプロット点) の機械的性質の製管のままの鋼管に対する比と径厚比の関係を示す。このとき、図中の大きなプロット点は本研究結果、小さいプロット点は既往の研究結果^{1), 8)}を示す。

めっき鋼管は、降伏応力度、引張強さ、伸び共に製管のままに比べて大きな変化は見受けられない。一方、焼鈍処理を施した場合は、加工硬化が解除されることから、降伏応力度は1~2割程度低下し、逆に伸びは大きくなる。

Fig. 4 製管のままの鋼管の機械的性質の原板に対する比

4. 圧縮変形性状

4.1 短柱圧縮試験概要

Table 4 に示す製管のままの鋼管、めっき鋼管および焼鈍鋼管について試験体長さ3Dの短柱圧縮試験を行い、局部座屈耐力、変形能力、耐力劣化剛性等の圧縮変形性状を構成する因子と径厚比、あるいは降伏応力度との関係を定量的に把握する。

載荷は両端回転固定、平押し条件で行い、中心圧縮精度は初期段階における同一断面に貼付したひずみゲージ計測値により、(3)式に示す条件で管理する。

$$(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) / \varepsilon_{\min} \leq 0.1 \quad (3)$$

なお、同一鋼管を用い径厚比を変化させた試験体は、HT 60 鋼管で径厚比が小さい場合は、同一ロットで同厚の板を用い径を変化させる方法により、また、その他の場合は、径厚比の小さい鋼管の内外を削り出し板厚を減ずる方法により製作する。

4.2 めっき処理の応力度-ひずみ度関係に及ぼす影響

Fig. 6 に、処理方法の異なる鋼管ごとに、径厚比を変化させた応力度-材軸方向ひずみ度関係曲線を示す。このとき、縦軸は応力度を同一シリーズの径厚比の小さい

Fig. 5 めっき製管、焼鈍鋼管の機械的性質の製管のままの鋼管に対する比

Table 4.1 短柱圧縮試験結果 (STK 41 鋼管)

試 験 体			短 柱 圧 縮 試 験 結 果								パラメータ
サ イ ズ	D/t	処理方法	降伏応力度 σ_{yc} (t/cm ²)	圧縮強さ σ_{maxc} (t/cm ²)	応力上昇率 σ_{yc}/σ_{uc}	降伏ひずみ ϵ_{yc} (%)	最大ひずみ ϵ_{maxc} (%)	変形能力 $\epsilon_{yc}/\epsilon_{maxc}$	劣化勾配 E_d (t/cm ²)	座屈モード	
$\phi 139.8 \times 4.5$	31	製管のまま	3.76	4.30	1.14	0.38	2.15	5.66	100	syn.	18.0
		めっき	4.13	4.41	1.07	0.20	2.60	13.00	100	syn.	16.0
		焼鈍	3.40	3.66	1.08	0.16	2.45	15.31	80	syn.	19.0
$\phi 139.8 \times 3.3$	42	製管のまま	3.66	3.95	1.08	0.37	1.10	2.97	130	syn.	13.7
		めっき	4.13	4.21	1.02	0.20	0.66	3.30	170	syn.	12.1
$\phi 139.8 \times 2.5$	56	製管のまま	3.72	3.91	1.05	0.38	0.58	1.53	230	syn.	10.1
		めっき	4.13	4.16	1.01	0.20	0.30	1.50	240	syn.	9.1
		焼鈍	3.40	3.42	1.00	0.16	0.27	1.69	210	syn.	11.0
$\phi 139.8 \times 2.1$	67	製管のまま	3.74	3.81	1.02	0.38	0.48	1.26	370	syn.	8.4
		めっき	4.13	4.19	1.01	0.20	0.25	1.25	300	syn.	7.6
$\phi 137.1 \times 1.7$	81	製管のまま	3.76	3.65	0.97	0.38	0.32	0.84	570	syn.	6.7
		めっき	4.13	4.18	1.01	0.20	0.21	1.05	740	syn.	6.2
		焼鈍	3.40	3.40	1.00	0.16	0.17	1.06	340	syn.	7.6
$\phi 136.5 \times 1.3$	105	製管のまま	3.76	3.56	0.95	0.38	0.19	0.50	570	syn.	5.2
		めっき	4.13	4.16	1.01	0.20	0.20	1.00	1000	syn.	4.5
		焼鈍	3.40	3.41	1.00	0.16	0.17	1.06	540	syn.	5.8
$\phi 135.9 \times 1.1$	124	製管のまま	3.76	3.51	0.93	0.38	0.19	0.50	800	asym.	4.6
		めっき	4.13	4.14	1.00	0.20	0.20	1.00	1330	syn.	3.9
		焼鈍	3.40	3.45	1.01	0.16	0.17	1.06	760	syn.	4.6
$\phi 135.3 \times 0.9$	150	製管のまま	3.76	3.25	0.86	0.38	0.17	0.45	2000	asym.	3.2
		めっき	4.13	3.65	0.88	0.20	0.19	0.95	2000	asym.	3.3
		焼鈍	3.40	3.44	1.01	0.16	0.17	1.06	1200	syn.	3.9

Table 4.2 短柱圧縮試験結果 (HT 60 鋼管)

試 験 体			短 柱 圧 縮 試 験 結 果								パラメータ
サ イ ズ	D/t	処理方法	降伏応力度 σ_{yc} (t/cm ²)	圧縮強さ σ_{maxc} (t/cm ²)	応力上昇率 σ_{yc}/σ_{uc}	降伏ひずみ ϵ_{yc} (%)	最大ひずみ ϵ_{maxc} (%)	変形能力 $\epsilon_{yc}/\epsilon_{maxc}$	劣化勾配 E_d (t/cm ²)	座屈モード	
$\phi 114.3 \times 5.8$	20	製管のまま	5.83	6.62	1.14	0.48	2.57	5.35	80	syn.	18.3
		めっき	6.44	7.02	1.09	0.31	3.83	12.35	100	syn.	16.8
$\phi 216.3 \times 5.8$	37	製管のまま	5.33	5.93	1.11	0.45	1.21	2.68	230	syn.	10.6
		めっき	6.29	6.29	1.00	0.30	0.45	1.50	220	syn.	9.4
$\phi 318.5 \times 5.8$	55	製管のまま	5.29	5.67	1.07	0.45	0.82	1.82	450	syn.	7.2
		めっき	6.17	6.17	1.00	0.29	0.36	1.24	490	syn.	6.5
$\phi 355.6 \times 5.8$	61	製管のまま	5.33	5.54	1.04	0.45	0.63	1.40	610	syn.	6.5
		めっき	6.42	6.42	1.00	0.31	0.36	1.16	780	syn.	5.4
$\phi 406.4 \times 5.8$	70	製管のまま	5.36	5.41	1.01	0.46	0.60	1.30	760	syn.	5.6
		めっき	6.41	6.41	1.00	0.31	0.34	1.10	970	syn.	5.1
$\phi 108.0 \times 1.4$	77	めっき	6.44	6.31	0.98	0.31	0.31	1.00	1180	syn.	4.3
$\phi 107.5 \times 1.0$	108	めっき	6.44	6.18	0.96	0.31	0.30	0.97	1360	asym.	3.0
$\phi 107.0 \times 0.8$	134	めっき	6.44	5.32	0.83	0.31	0.25	0.81	1800	asym.	2.5
$\phi 107.0 \times 0.7$	152	めっき	6.44	5.27	0.82	0.31	0.25	0.81	2100	asym.	2.2
$\phi 107.0 \times 0.6$	177	めっき	6.44	4.97	0.77	0.31	0.24	0.77	2600	asym.	1.8

1) 製管のままの鋼管の降伏応力度は、0.2% off set法により求める。

また、降伏ひずみは、次式にて求める。 $\epsilon_y = \sigma_{yc}/E + 0.2\%$

3) 劣化勾配は、下図の要領で算定する。

5) パラメータ α_c の算定には実断面寸法を用いる。

2) めっき鋼管、焼鈍鋼管の降伏応力度は、下降伏応力度とする。

また、降伏ひずみは次式にて求める。 $\epsilon_y = \sigma_{yc}/E$

4) 座屈モードは対称形の場合は syn.、非対称の場合は asym. で表示する。

残留応力を含む鋼管
(製管のままの鋼管) 残留応力のない鋼管
(めっき鋼管、焼鈍鋼管)

試験体の降伏応力度で除すことにより無次元化する。また、横軸のひずみ度は試験体の全変形量 δ を長さ 1 で除した値とする。

製管のままの鋼管は、径厚比にかかわらず降伏棚を有しない (RH) 型となる。また、焼鈍鋼管は、径厚比が小さい場合は降伏棚、ひずみ硬化域を有する (EPH) 型となるが、径厚比が大きい場合はひずみ硬化域まで至らず座屈する (EP) 型となり、さらに大きくなると明瞭な降伏棚が存在しない (E) 型となる。

これに対し、めっき鋼管は、材軸方向の材料引張試験と同様、後者に分類され、応力度-ひずみ度関係の面からは残留応力を含まない鋼管に属する。

なお、いずれの場合においても、径厚比が小さいほど変形状は良好となる。

Fig. 7 応力度-ひずみ度関係 (短柱圧縮試験)
[処理方法を変化させた場合]

Fig. 6 応力度-ひずみ度関係 (短柱圧縮試験) [径厚比を変化させた場合]

試験体の座屈モードは、径厚比が非常に大きく降伏応力度を下回る場合は非対称モードとなるが、それ以外は上端部あるいは下端部においていわゆる堤灯型の軸対称モードとなる。

4.3 めっき処理の諸性能に及ぼす影響

Fig. 7 に処理方法を変化させた場合の応力度-材軸方向ひずみ度関係を径厚比ごとに示す。

最大応力度の大きさは、径厚比にかかわらずめっき>製管のまま>焼鈍の順となるのに対し、最大応力度に対応するひずみ度は、径厚比が小さい場合はめっき≒焼鈍>製管のままの順、大きい場合は製管のまま>めっき≒焼鈍となり、径厚比により様相が異なる。

Fig. 8 に、製管のままの鋼管の最大応力度が降伏応力度を上回る場合における、製管のままの鋼管の原板（材料引張試験結果）に対する降伏応力度比と径厚比の関係を示す。なお、製管のままの鋼管の降伏点は0.2% offset 法により求める。また、径厚比が大きく降伏点が明確に求まらない場合は、同一材料からなる径厚比の小さい試験体の降伏点と同値として扱う。

Fig. 8 製管のままの鋼管の降伏応力度の原板に対する比

Fig. 9 めっき鋼管の諸性能の製管のままの鋼管に対する比

鋼管の降伏応力度は、径厚比が40を下回る場合は加工硬化の影響により原板より大きくなるが、径厚比が40より大きい場合は、おおむね等しい値となる。

Fig. 9 にめっきした鋼管の製管のままの鋼管に対する降伏応力度、最大応力度に対応するひずみ度の比と(4)式で定義するパラメータ α_c の関係を示す。

$$\alpha_c = E / (\sigma_{yc} \cdot D / t) \quad (4)$$

めっき鋼管の降伏応力度は製管のままの鋼管のそれを1~2割程度上回る。また、ひずみ度はパラメータ α_c の大きい領域では上回るのに対し、小さい領域では逆に下回る。

4.4 圧縮変形性状の定式化

Fig. 10 にパラメータ α_c と応力上昇率 ($= \sigma_{\max c} / \sigma_{yc}$, $\sigma_{\max c}$: 最大応力度, σ_{yc} : 降伏応力度) の関係, Fig. 11 に変形能力 ($= \epsilon_{\max c} / \epsilon_{yc}$, $\epsilon_{\max c}$: 最大応力時ひずみ度,

Fig. 10 応力上昇率とパラメータ α_c の関係

Fig. 11 変形能力とパラメータ α_c の関係

ε_{yc} : 降伏点に対応するひずみ度) との関係, Fig. 12 に耐力劣化勾配 ($E_a: t/cm^2$, $0.95 \sim 0.8 \sigma_{maxc}$ 間の平均劣化剛性) との関係を示す。このとき, 図中の大きなプロット点は本実験結果, 小さなプロット点は既往の研究結果^{1), 2), 5), 8)}, 実線は実験回帰線, 点線, 一点鎖線は既往の研究^{2), 5)}における実験式を示す。

なお, 応力上昇率, 変形能力等の諸性能は文献^{1), 5)}に準じて定義するものとする。したがって, ここでいう変形能力は, 骨組の変形能力を算定する場合の部材の累積塑性変形倍率の完全弾塑性形の復元力特性への換算値^{9), 10)}とは異なった定義となる。

いずれの場合もパラメータ α_c と強い相関関係にあり, 応力上昇率, 変形能力に関する製管のままの鋼管の既往の実験式は一本の曲線で表されるのに対し, めっき鋼管における実験回帰線は, 焼鈍鋼管と同様, 3本の直

Fig. 12 耐力劣化勾配とパラメータ α_c の関係

Fig. 13 応力度-ひずみ度関係のモデル化

線で表されることから, めっき鋼管は残留応力のない鋼管として取り扱える。

めっき鋼管, 焼鈍鋼管において, パラメータの大きい折点 (第一折点) より大きい領域においては変形性状は良好であり, パラメータの小さい折点 (第二折点) より小さい領域においては非対象座屈に屈服し変形性状は劣る。

なお, 耐力劣化剛性は, いずれの場合においても一本の曲線で表され, 処理方法による差異は見受けられない。

4.5 残留応力の圧縮変形性状に及ぼす影響

残留応力, 特に材軸方向曲げ応力の圧縮変形性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として, 文献⁵⁾に概要を示す軸対称シェル要素による弾塑性大変形解析を行う。

Fig. 14 要素分割方法および荷重・荷重条件

Fig. 15 弾塑性大変形解析による応力度-ひずみ度関係 (1)

Fig. 16 弾塑性大変形解析による応力度-ひずみ度関係 (2)

(1) 解析の仮定事項

- ① 応力度-ひずみ度関係は径厚比が31のSTK 41めっき鋼管のそれから、Fig. 13に太実線で示すBi-linear型でモデル化する。このとき、 $\sigma_y = 4.13 \text{ t/cm}^2$ 、 $E_{st} = 15 \text{ t/cm}^2$ とする。
- ② 応力度増分-ひずみ度増分関係式は弾性域ではHookeの法則、塑性域ではPrandtl-Reussの塑性流れ理論に従うものとする。
- ③ 円錐台形状のシェル要素を、Fig. 14に示すように、板厚さ方向に層分割し、各層ごとに応力、ひずみは一定としvon Misesの降伏条件式による弾塑性評価を行う。
- ④ 荷重は、Fig. 14に示すように、解析モデルの対称性

を考慮し、単純支持した端部に平押しの条件で強制変位を加える方法で行う。

(2) 解析ケース

残留応力の測定結果では面内力としての残留応力はほとんど存在せずほぼ様な曲げ残留応力が存在している。本解析では、とりわけ値の大きい材軸方向の曲げ残留応力を初期応力として直接与える方法により、鋼管の荷重変形挙動を追跡する。このとき、縁残留応力 σ_r の降伏応力度に対する比 σ_r/σ_y は、0.0, 0.25, 0.5, 1.0の4種類、径厚比は31, 56の2種類を組み合わせた8ケースについて解析を行う。

(3) 解析結果

Fig. 15に径厚比31のシリーズにおける応力度-材軸方向ひずみ度関係曲線を示す。ここに、図中の実線は解析結果を、点線は製管のままの鋼管、一点鎖線はめっき鋼管の実験結果を示す。

応力度-ひずみ度関係は σ_r/σ_y が0, 0.25と小さい場合には、めっき鋼管の実験結果と同様、降伏棚を有するのに対し、0.5, 1.0と大きい場合には、製管のままの鋼管の実験結果と同様にRH型となる。また、図中△印で示す最大応力度あるいは最大応力度に対応するひずみ度は、残留応力の小さいほど大きくなる。

Fig. 16に径厚比56のシリーズにおける応力度-材軸方向ひずみ度関係曲線を示す。

最大応力度は、径厚比が小さい場合と同様、残留応力が小さいほど大きくなるが、最大応力度に対応するひずみ度は逆に残留応力が小さいほど大きくなる。

以上の結果は、いずれも実験結果と良い対応を示している。これより、めっき鋼管は、処理温度が約460度と変態温度を下回ることから焼鈍効果は認められないものの、高温熱処理の影響により残留ひずみが一部解除され、残留応力のない鋼管として扱えること、製管のままの鋼管に比べて降伏応力度が大きくなるのが、実験、解析両面から確認される。

5. めっき鋼管の許容応力度設計対応の径厚比制限値の設定

許容応力度設計に対する限界径厚比は、応力度が降伏応力度に達するまで局部座屈を起こさないとし、実験結果等から、

$$D/t \leq 240/F \quad F: \text{規格強度 } t/\text{cm}^2 \dots\dots (5)$$

パラメータ α_c に換算すると8.8としている。

また、この規定は、残留応力、元たわみの影響により、座屈応力度と径厚比の関係曲線が降伏点より相当低い点でオイラー曲線を離れることを考慮して定められた値である¹¹⁾ことから、主には製管のままの鋼管を対象としていと考えられる。

したがって、めっき鋼管のように、強度特性が製管の

ままの鋼管と異なるめっき鋼管については、新たに径厚比制限値を設けることが必要となる。

ここでは、めっき鋼管の降伏応力度が製管のままの鋼管のそれを1~2割上昇することを考慮して、パラメータ α_c の下限値として、 $8.8 \times 1.1 \sim 1.2 = 10.0$ 、径厚比制限値として

$$D/t \leq 210/F \dots\dots\dots (6)$$

を提案する。

このとき、応力上昇率は、Fig. 10 に示すように、1.0 以上が確保され、応力度が降伏応力度に達するまで局部座屈を起こさないという基本条件が満足される。ちなみに、 $\alpha_c = 10.0$ は、Fig. 11 に示す変形能力とパラメータ α_c の関係曲線の第一折点に相当し、 $\alpha_c > 10.0$ の領域では変形能力は1.0を超える値となる。また、耐力劣化勾配は、Fig. 12 に示すように、 $\alpha_c > 10.0$ の領域では、 200 t/cm^2 を下回る値となり安定した劣化挙動を示す。

6. まとめ

本研究において、得られた成果を以下に記す。

- ① 冷間成形鋼管は、溶融亜鉛めっき処理により一部残留ひずみが解放され、特に値の大きい材軸方向の曲げひずみは2/3程度となる。
- ② 材軸方向の引張変形性状は、溶融亜鉛めっき処理により残留応力が小さくなることにより、降伏棚が現れるなど変化する。
- ③ 径厚比を変化させた短柱圧縮試験における、変形性状あるいは応力上昇率、変形能力とパラメータ α_c との関係から、溶融亜鉛めっき処理を受けた鋼管は残留応力のない鋼管として取り扱える。また、降伏応力度は、製管のままの鋼管に対し10~20%程度高い値となる。
- ④ 上記試験結果より、許容応力度設計に対するめっき鋼管の径厚比制限値として、パラメータ $\alpha_c \geq 10.0$ 、 $D/t \leq 210/F$ を提案する。

謝 辞

本研究の一部は、送電鉄塔用60キロ鋼開発の一環として、新日本製鐵(株)、日本鋼管(株)、住友金属工業(株)、川崎製鐵(株)と共同で実施したものである。ここに、関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会標準委員会鋼管 JIS 小委員会：塑性加工を受けた鋼材の機械的性質—STK 41 の引張ならびに圧縮に対する機械的性質—, JSSC Vol. 6 No. 53, 1970
- 2) 加藤 勉, 秋山 宏, 鈴木弘之：軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力, 日本建築学会論文報告集, 第204号, 1973
- 3) 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—短柱の圧縮試験における見掛けの応力—ひずみ関係への影響について—, 日本建築学会論文報告集, 第230号, 1975
- 4) 青木徹彦, 福本嘯士：小口径電縫鋼管の統計的材料強度特性と残留応力分布の評価, 土木学会論文報告集, 第314号, 1981
- 5) 鈴木敏郎, 小河利行, 加藤征宏, 栗本照彦：軸圧縮力を受ける高張力鋼管の強度性状に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第321号, 1982
- 6) 越智健之, 黒羽啓明：冷間成形円形鋼管部材の耐力と変形能の統計的評価, 日本建築学会論文報告集, 第391号, 1988
- 7) 青木博文, 村田耕司：構造用鋼材の降伏点, 引張強さおよび降伏比に関する統計的調査, 日本建築学会論文報告集, 第335号, 1984
- 8) 藤本盛久, 広木光雄, 深沢 隆ほか：溶融亜鉛めっき鋼管の圧縮変形性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988
- 9) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 技報堂, 1981
- 10) 社団法人鋼材倶楽部：中低層鉄骨建物の耐震設計法, 1978
- 11) 加藤 勉：建築構造学体系 18 鉄骨構造, 彰国社, 1971

(1990年7月9日原稿受理, 1990年12月5日採用決定)