

送電用鉄塔に用いる鋼管の軸圧縮・曲げ座屈耐力に及ぼす溶融亜鉛めっきの影響について

The effects of the hot-dip zincing on buckling strength of steel pipes for transmission towers under axial compression and bending moment

三上 康朗*・本郷栄次郎**・中村 秀治***・藤井 真人****

Yasuo Mikami, Eiji Hongo, Hideharu Nakamura and Mahito Fujii

* 東京電力株式会社送変電建設センター (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-19-1)

** 工博 東京電力株式会社送変電建設センター副部長 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-19-1)

*** 工博 広島大学大学院工学研究科教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

**** 広島大学大学院博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

Hot-dip galvanized steel pipes of STK400, STK540 and STKT590 are used for large transmission towers for the reasons of excellent in corrosion resistance. It is necessary to elucidate the effects of the hot-dip zincing on buckling strength of steel pipes for towers under axial compression and bending moment to rationalize the earthquake and wind resistant design of steel pipe structures, because radius-to-thickness ratio of about 20 is found in many pipe members of the towers and these members may occur the plastic buckling ruled by yield stress. Therefore, we investigated material property test data of real pipes of STK400 and STKT590 in both case of galvanizing and not doing, and analyzed the buckling strength numerically using each material property. Based on the results, the effects of hot-dip zincing on buckling strength and post buckling strength of pipes of STK400 and STKT590 are clarified quantitatively.

Key Words : steel pipe, hot dip zincing, material property, buckling strength, numerical analysis

キーワード: 鋼管, 溶融亜鉛めっき, 材料特性, 座屈耐力, 数値解析

1. まえがき

送電用鉄塔(以下, 鉄塔という)は電力線と避雷針の役割を果す架空地線などを支持する構造物であるが, 山間部などにおける建設コスト削減の必要性から軽量化を指向し, 軸圧縮力が支配的なトラス構造を採用してきた。鉄塔への作用荷重は, 夏季の台風, 冬季の季節風による風荷重と, 電力線・架空地線(以下, 架渉線という)への着氷雪荷重が支配的である。また, 鉄塔の構成材料は, 規模が小さく風荷重の影響が小さい場合は山形鋼を, 規模が大きく風荷重の影響が大きい場合や, 作用荷重が大きく山形鋼では強度的に対応できない場合には鋼管が使用されている (Fig. 1)。

鉄塔に風荷重が作用した場合, 架渉線を含めた自重の影響から, 主要部材に対して軸圧縮力が支配的となり, 座屈により部材サイズが決定される。このため, 一般的に, 支柱材などの細長比が小さい部材には, 降伏応力度が高い高強度材を, 腹材などの比較的細長比

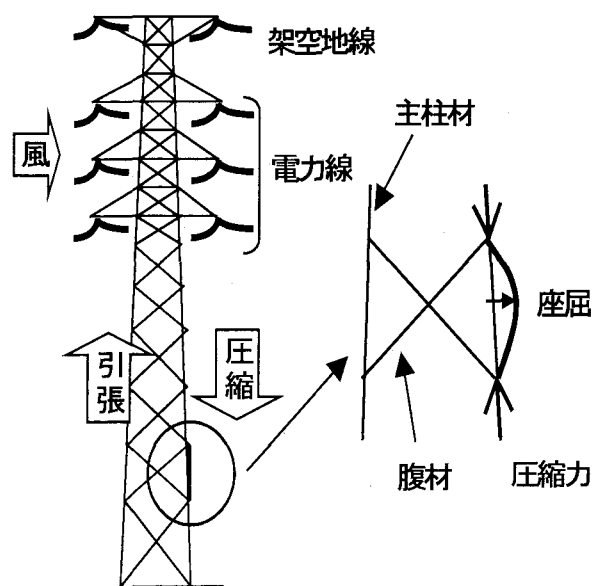


Fig. 1 送電鉄塔の概念図

が大きい部材には低強度材を適用している。

また、鉄塔は、その防食対策として溶融亜鉛めっき（以下、めっきという）を施している。めっきは耐食性に優れ、鋼管の内部までめっきを施すことができ、衝撃・摩擦などで剥離することも少なく、めっきの上から塗装もできるなど種々の利点があり、鉄塔の防食対策として古くから採用している。

めっきを施した鋼管については、参考文献1)において、めっきをする際の加熱によって降伏応力度が上昇することが定性的に確認されている。また、ヨーロッパ鋼構造協会連合が規定している座屈強度曲線2)によれば、鋼管を熱間成形した場合、冷間成形に比べ座屈耐力が上昇することが示されている。このため、鉄塔に用いる鋼管を対象とした独自のデータを取得し、めっきの影響を把握することで設計における強度評価の合理化を行うことが可能となる。

鉄塔で用いる鋼管の材質は、通常、JIS G 3444 に規定される STK400 及び STK540, JIS G 3474 に規定される STKT590 で、通常、径厚比 (D/t) が 20~50 の領域にあり、座屈評価の視点でみると厚肉円筒に属する。この断面形状では軸圧縮力や曲げモーメント、せん断力に対して塑性座屈が生じて破壊に至るため、鉄塔の静的耐荷力は材料特性に大きく依存する。風荷重や地震荷重のような動的荷重に対しては、塑性によるエネルギー吸収と動的限界状態の関係などについて未検討な部分が多いが、材料特性に大きく依存することには変わりはない。

本論文は、送電用鉄塔を代表とした鋼管構造物の耐風設計、耐震設計の合理化に寄与するため、めっきの有無を一つのパラメータとして、STK400, STKT590 の厚肉鋼管の材料特性を明らかにし、その材料特性値を用いた弾塑性座屈解析を実施して、座屈耐力に対するめっきの影響を明らかにすることを目的としている。

以下、2. で材料試験結果をもとに鋼管部材の材料特性について述べ、3. で静的軸圧縮座屈試験結果と解析結果の比較検討を行いつつ、座屈耐力について考察した後、4. で実鉄塔に用いられる鋼管部材の径厚比や細長比といった各種パラメータ範囲内でのパラメータスタディを行い、めっきの影響を定量的に明らかにする。

2. 送電鉄塔用鋼管部材の力学的材料特性

鋼管部材のめっきの影響について、鉄塔を主対象とした独自のデータ取得を目的として、鋼管にめっきを

施した場合と施さない場合の材料試験を実施した。

(1) 試験条件

材料試験は、鋼管から切り出して作成した JIS Z 2201 の 5 号試験片を用い、1,000kN アムスラー万能試験機にて、JIS Z 2241 に基づいて実施した。

なお、めっき施工は通常の鉄塔部材施工条件に合わせ、亜鉛浴温度を 445℃、浸漬時間を 3 分に統一した。

(2) 材料試験ケース

Table 1 に試験体一覧を示す。表中の数字は試験体数を表す。

同一サイズで複数試験を行っている場合の鋼管は、製造メーカーや製作ロットが異なっている。材質は STK400, STKT590 の 2 種類で、鋼管の種類は電気抵抗溶接鋼管である。

(3) 試験結果

Fig. 2, Fig. 3 に材料引張試験の「応力度-ひずみ関係」の一例を示す。Fig. 2 は材質 STK400 ($\phi 114.3 \times 3.5$, 試験No.7), Fig. 3 は材質 STKT590 ($\phi 139.8 \times 3.5$, 試験No.10) の場合で、各図の(a), (b)はそれぞれめっき無、めっき有の場合を示す。

めっき無の場合は降伏棚の明確に現れない形となり、めっき有の場合は降伏棚を有する形となった。

また、本試験の結果から得られる降伏応力度（又は 0.2%耐力）、及び引張強さについて、めっきの有無による影響を対比すると Fig. 4, Fig. 5 及び Table 2, Table 3 のとおりである。

これより、めっき有の場合はめっき無に比べ、降伏応力度は約 10%、引張強さは約 5%程度大きくなるのがわかる。これらの現象は、めっきをする際の加熱により残留応力が除去され、さらにひずみ時効が促進されるなどの理由によるものと考えられる³⁾⁻⁷⁾。

Table 1 試験体一覧

No.	材質	サイズ	D/t	材料引張試験		軸圧縮試験	
				めっき無	めっき有	めっき無	めっき有
1	STK400	$\phi 89.1 \times 3.2$	27.8	3	3	—	1
2				3	3	—	1
3				3	3	—	1
4				3	3	—	1
5				3	3	—	1
6		$\phi 114.3 \times 3.5$	32.7	3	3	1	1
7				3	3	1	1
8				3	3	1	1
9				3	3	1	1
10				3	3	1	1
11	STKT590	$\phi 139.8 \times 3.5$	39.9	3	3	1	1
12				3	3	1	1
13				3	3	1	1
14				3	3	1	1
15				3	3	1	1
16		$\phi 165.2 \times 4.5$	36.7	3	3	1	1
17				3	3	1	1
18				3	3	1	1
19				3	3	1	1
20		$\phi 406.4 \times 10.0$	40.6	3	3	1	1
21		$\phi 558.8 \times 12.0$	46.6	3	3	1	1

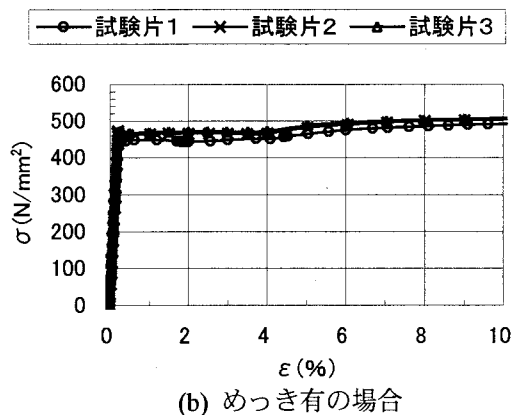
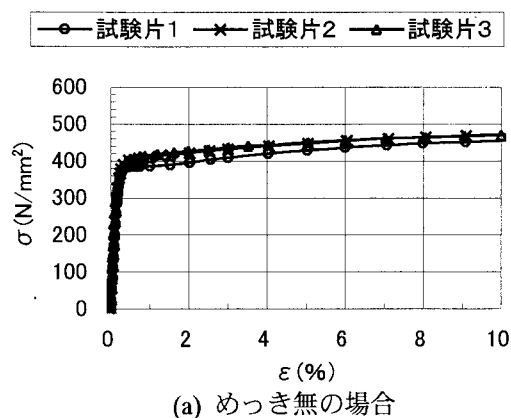


Fig. 2 STK400 の材料試験結果

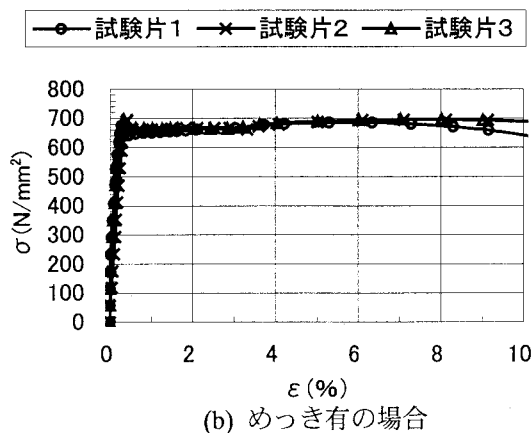
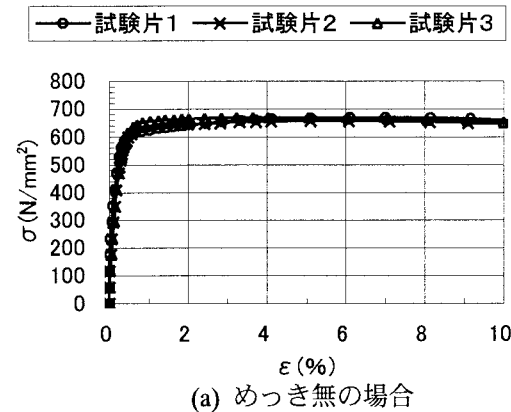


Fig. 3 STK590 の材料試験結果

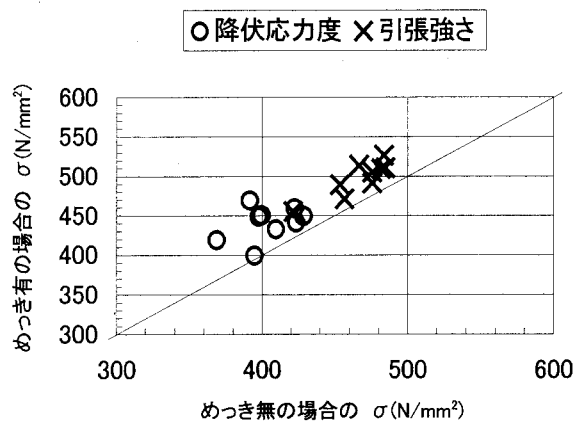


Fig. 4 めっきの有無による機械的性質の対比
(STK400)

Table 2 機械的性質 (STK400)

		規格値	シフト	めっき		比 有/無
				無	有	
降伏応力度	平均値	235	399.11	404.4	440.7	1.09
	標準偏差	0.00	32.19	19.11	21.30	
	平均値/規格値	1.00	1.70	1.72	1.88	
引張強さ	平均値	400	470.1	467.0	496.6	1.06
	標準偏差	0.00	19.11	20.29	22.39	
	平均値/規格値	1.00	1.18	1.17	1.24	

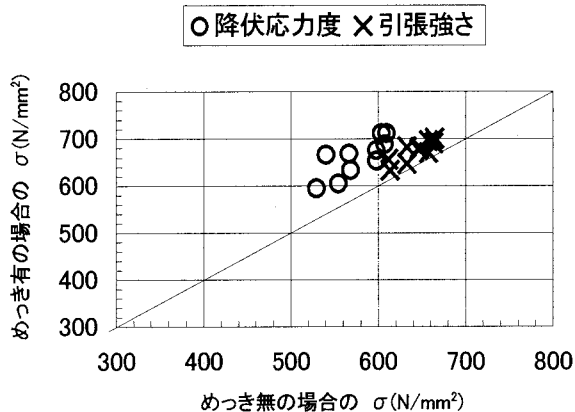


Fig. 5 めっきの有無による機械的性質の対比
(STK590)

Table 3 機械的性質 (STK590)

		規格値	シフト	めっき		比 有/無
				無	有	
降伏応力度	平均値	440	556.1	578.0	660.4	1.14
	標準偏差	0.00	37.37	29.45	40.09	
	平均値/規格値	1.00	1.26	1.31	1.50	
引張強さ	平均値	590	646.9	643.2	673.0	1.05
	標準偏差	0.00	12.35	19.49	22.20	
	平均値/規格値	1.00	1.10	1.09	1.14	

(4) 材料試験結果のまとめ

めっきの有無をパラメータとした材料試験の結果 (Table 4)、めっきの影響として以下を確認した。

- ① 応力度－ひずみ関係は、STK400 と STKT590 のいずれにおいても、降伏棚が現れず降伏点が明瞭ではない形から、めっきをすることにより、降伏棚が明瞭に現れる形に変化する。
- ② 試験片ごとに引張強さにやや差があるものの、材質が同じであれば、最大耐力到達後の挙動 (応力度－ひずみ関係) には大きな差は見られない。
- ③ 降伏応力度や引張強さはめっき有の場合が大きくなり、平均値で見て、STK400 では降伏応力度は9%、引張強さは6%大きく、STKT590 では、降伏応力度は14%、引張強さは5%大きくなった。
- ④ 降伏応力度や引張強さの規格値に対しては、平均値で見て、STK400 では降伏応力度は88%、引張強さは24%大きく、STKT590 では、降伏応力度は50%、引張強さは14%大きくなった。

Table 4 材料試験結果一覧

材質	No	サイズ	ミルシート値		材料引張			
					めっき無		めっき有	
			σ_y	σ_B	σ_y	σ_B	σ_y	σ_B
STK400	1	$\phi 89.1 \times 3.2$	374	421	424	476	441	491
	2		372	459	395	422	399	455
	3		394	501	423	485	459	510
	4		411	490	410	482	432	509
	5	$\phi 114.3 \times 3.5$	403	471	398	467	448	513
	6		454	514	429	484	449	526
	7		444	482	392	476	469	505
	8		367	463	369	454	419	489
	9		373	430	400	457	450	471
		平均値	399	470	404	467	441	497
STKT590	10	$\phi 139.8 \times 3.5$	559	644	608	664	688	691
	11		545	637	610	665	711	701
	12		600	655	604	658	711	695
	13		605	673	541	633	666	682
	14	$\phi 165.2 \times 4.5$	557	639	569	612	633	655
	15		579	655	598	648	675	681
	16		569	634	567	658	668	670
	17		555	634	598	647	653	676
	18	$\phi 406.4 \times 10.0$	506	654	530	614	594	632
	19	$\phi 558.8 \times 12.0$	486	644	555	633	605	647
		平均値	556	647	575	641	657	671

(5) 送電用鉄塔鋼管部材の応力度－ひずみ関係の設定

めっきの有無によって力学的材料特性に差異があることを確認した。めっきの影響の詳細評価には弾塑性解析を用いるため、得られた結果から材質ごとの代表的な材料特性を設定した。

材料試験で得られた応力度－ひずみ関係の傾向は材質ごとに概ね一致している。そこで、Table 4 に示した降伏応力度や引張強さの平均値と各ケースにおける降伏応力度や引張強さを比較し、差の絶対値和が最小となる試験ケースを各材質の代表として利用するものと見なし、Fig. 6、Fig. 7 を各材質における関係として設定した。

なお、弾塑性解析に用いる応力度－塑性ひずみ関係には、Table 5、Table 6 を用いることとした。

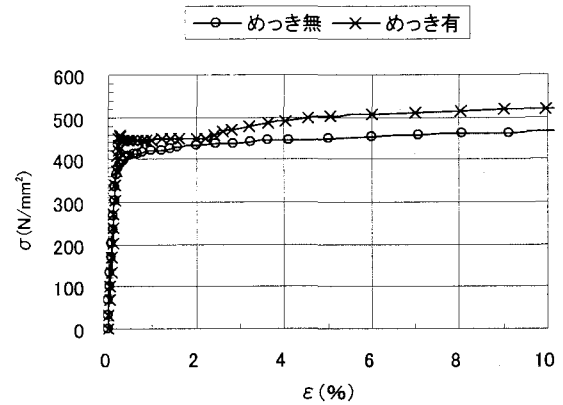


Fig. 6 鉄塔用鋼管部材の応力度－ひずみ関係
STK400 (試験No.5)

Table 5 解析に用いる応力度－塑性ひずみ関係
(STK400)

【めっき無】		【めっき有】	
応力度 σ (N/mm ²)	塑性ひずみ ϵ_p (%)	応力度 σ (N/mm ²)	塑性ひずみ ϵ_p (%)
336.70	0.000	373.70	0.000
363.80	0.023	408.30	0.002
379.80	0.055	421.80	0.015
391.10	0.090	435.60	0.008
398.70	0.146	449.90	0.021
404.20	0.204	457.60	0.038
408.90	0.281	454.10	0.059
412.10	0.380	444.90	0.104
414.70	0.478	445.40	0.144
416.70	0.598	445.10	0.204
420.20	0.796	445.40	0.264
423.60	1.014	445.10	0.344
426.10	1.213	444.90	0.444
428.40	1.392	444.90	0.564
432.30	1.790	445.80	0.663
436.50	2.228	446.50	0.783
439.40	2.626	448.20	1.002
442.40	3.025	448.00	1.222
444.80	3.424	448.50	1.402
447.10	3.903	450.30	1.801
451.10	4.801	450.30	1.981
454.90	5.799	460.00	2.196
458.30	6.837	464.90	2.394
461.00	7.836	469.10	2.592
462.40	8.915	477.10	2.988
464.70	9.874	484.70	3.384
466.80	10.913	490.50	3.802
467.80	11.853	496.70	4.319
468.40	13.052	501.40	4.796
469.00	13.912	507.90	5.773
469.20	14.892	512.50	6.731

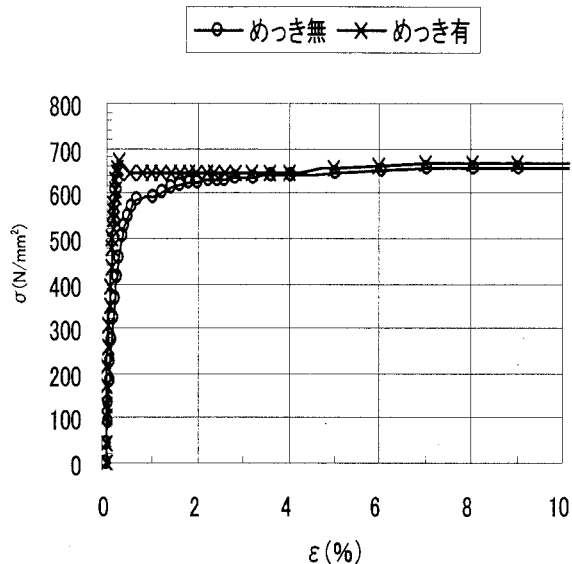


Fig. 7 鉄塔用鋼管部材の応力度－ひずみ関係
STKT590（試験No.16）

Table 6 解析に用いる応力度－塑性ひずみ関係
（STKT590）

【めっき無】		【めっき有】	
応力度 σ (N/mm ²)	塑性ひずみ ε_p (%)	応力度 σ (N/mm ²)	塑性ひずみ ε_p (%)
321.64	0.000	671.91	0.000
367.20	0.003	646.84	0.206
412.76	0.022	645.97	0.486
458.31	0.060	645.11	0.687
504.78	0.098	644.24	0.887
527.56	0.148	643.38	1.087
549.43	0.198	644.24	1.307
567.65	0.270	645.11	1.487
584.05	0.383	645.11	1.667
593.17	0.722	645.97	1.886
602.28	0.919	645.97	2.066
610.48	1.117	645.11	2.287
615.03	1.317	645.11	2.507
620.50	1.517	645.97	2.886
623.23	1.697	645.97	3.266
625.97	1.938	645.97	3.686
628.70	2.119	655.48	4.681
630.52	2.300	661.54	5.679
632.35	2.541	664.99	6.677
635.08	2.924	666.72	7.696
638.72	3.326	665.86	8.696
641.46	3.729	664.99	9.697
646.01	4.737	663.27	10.718
650.57	5.744	644.24	13.627
653.30	6.733	632.13	14.693
655.13	7.742	620.89	15.438
656.04	8.752	613.97	15.842

3. 静的軸圧縮座屈試験及び解析

めっきの有無による鋼管部材の座屈耐力の違いを明らかにし、さらには解析精度を確認するため、鋼管部材の静的軸圧縮試験及び座屈解析を行った。

(1) 試験条件

静的軸圧縮試験は、1,000kN アムスラー万能試験機を用い、平押し条件で実施した。実験では鋼管上下端部と中央にそれぞれ4枚のひずみゲージを貼付、荷重増大時に下記を満足するように制御した。

$$(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) / \varepsilon_{\min} \leq 0.1 \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}$ ：同一断面内の最大ひずみと最小ひずみ

試験体となる鋼管長さ L は、鋼管径 D の3倍とし、めっきを施した場合と施さない場合の試験体を対で作成し、めっきの有無による耐力への影響確認を行った。めっき施工条件は材料試験と同じく、亜鉛浴温度を445℃、浸漬時間を3分に統一した。

(2) 試験ケース

試験ケースは、先にTable 1に示したとおりである。

試験体のサイズは、径厚比 D/t が大きいものを選定し、同一サイズの鋼管は製造メーカーや製作ロットの異なる材料を用いている。

(3) 座屈解析

8 節点シェル要素を用いた弾塑性大変形解析により軸圧縮力による座屈解析を行った。解析プログラムはABAQUSを用い、材料物性値はTable 5、Table 6に示した値とし、また、ヤング係数、ポアソン比はそれぞれ、 2.06×10^5 [kN/mm²]、0.3とした。降伏条件としてはミーゼスの条件を、単調荷重であるため硬化則としては等方硬化を採用した。要素分割は周方向全周72要素とし、軸方向は細長比により異なるが、シェル座屈の半波長に5要素程度入るように分割した⁸⁾。境界条件は下面完全固定、上面は単純支持とし、軸方向変位は自由とした。

(4) 試験及び解析結果

Photo 1 に静的軸圧縮試験の状況を示す。Fig. 8 にSTK400 (φ114.3×3.5) の場合、Fig. 9 にSTKT590 (φ139.8×3.5) の場合の静的軸圧縮座屈試験結果と解析結果を対比した例を示す。

試験では、めっき無の場合は初期段階から徐々に剛性が低下して、最大耐力に至っているのに対し、めっき有の場合は弾性的に一定の勾配を保ったまま推移し、最大荷重到達後の耐力低下は相対的に大きくなる様子

が見られる。これらの現象はFig. 6, Fig. 7 の材料特性の違いによって生じたと考えられる。

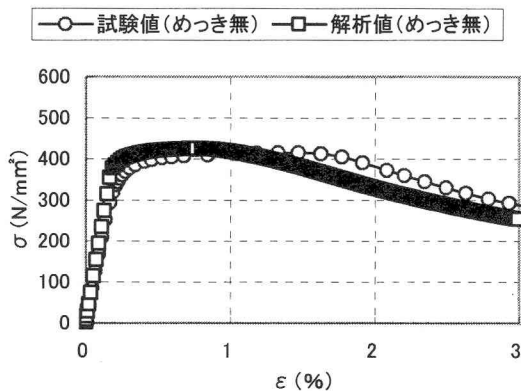
座屈解析結果は、最大荷重到達後の段階まで含めて、耐荷力特性を概ねよく表わしているものと言える。

また、本試験の結果得られた最大荷重について、めっきの有無を対比するとFig. 10 及びTable 7 のとおりである。これより、本実験及び解析条件に限定すれば、めっき有の場合はめっき無に比べ、最大荷重が 10%程度高くなる事がわかる。

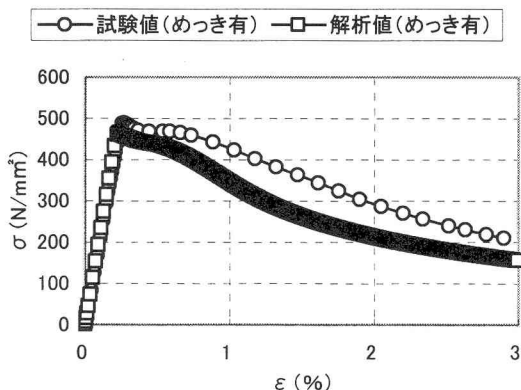
(5) まとめ

めっきの有無をパラメータとした静的軸圧縮座屈試験及び解析を実施した結果、めっきの影響として以下を確認した。

- ①応力度－ひずみ関係は、めっき無の場合は初期段階から剛性低下傾向が見られ、最大荷重に至っているのに対し、めっき有の場合は一定の勾配を保ったまま推移し、最大荷重到達後の耐力低下が相対的に大きくなる傾向が見られる。
- ②最大荷重はめっき有の場合の方が大きくなり、本試験及び解析条件に限定して言えば、STK400 で14%大きく、STKT590 では11%大きい。
- ③座屈解析結果は試験結果を概ね再現できており、解析による評価が可能と判断できる。

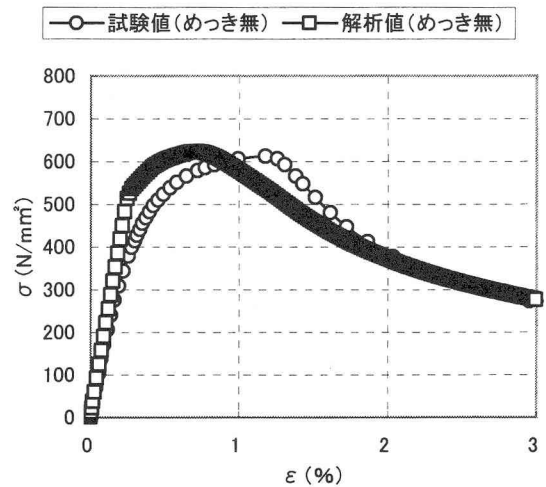


a) めっき無の場合

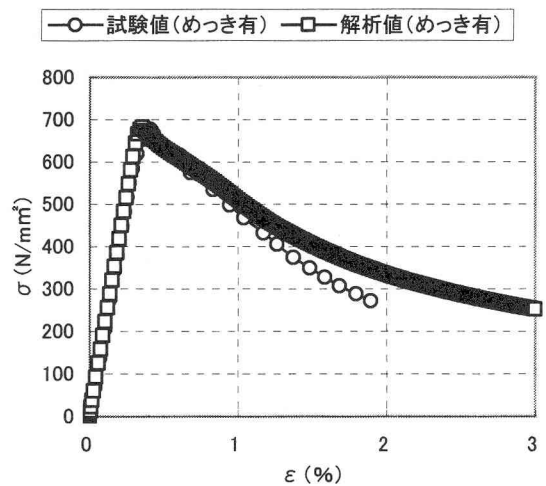


b) めっき有の場合

Fig. 8 静的軸圧縮座屈試験と解析の比較 (STK400)



a) めっき無の場合



b) めっき有の場合

Fig. 9 静的軸圧縮座屈試験と解析の比較 (STKT590)

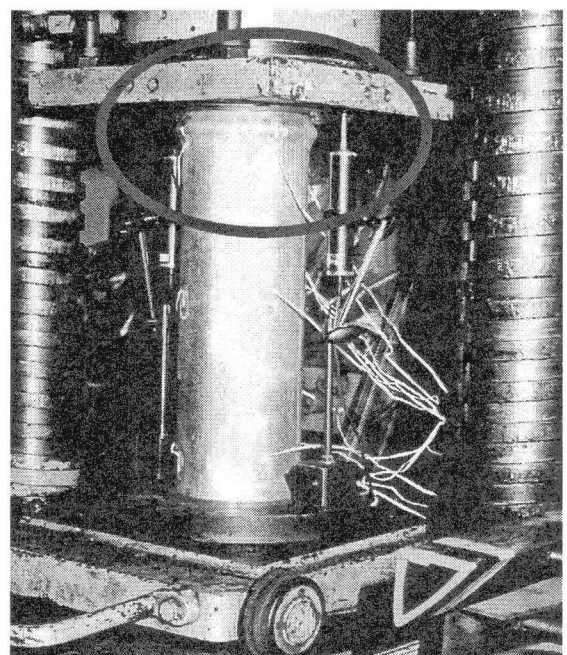


Photo 1 静的軸圧縮座屈試験状況

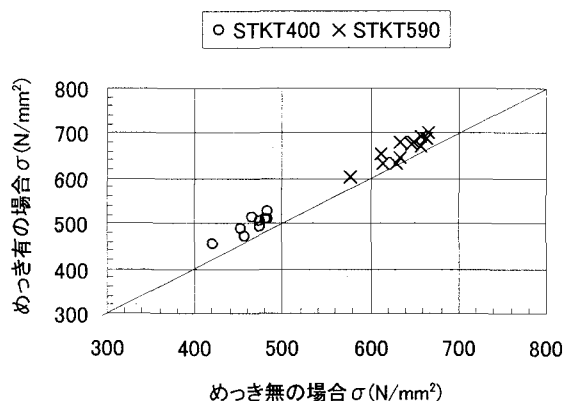


Fig. 10 めっきの有無による最大耐力の対比

Table 7 最大耐力の比較

		規格値	ミルシート	めっき		比 有/無
				無	有	
STK400	平均値	400	472.3	413.8	471.5	1.14
	標準偏差	0.00	35.16	16.84	27.23	
	平均値/規格値	1.00	1.18	1.03	1.18	
STKT590	平均値	590	646.9	596.7	664.9	1.11
	標準偏差	0.00	12.35	27.19	40.72	
	平均値/規格値	1.00	1.10	1.01	1.13	

4. 鋼管部材の軸圧縮・曲げ座屈耐力に関するパラメータ解析

3. における検討結果より、鋼管部材の材料物性値を用いた座屈解析により、概ね鋼管部材の耐荷力特性が求められることが明らかになったので、実際の鉄塔に用いられる鋼管の使用条件を明らかにし、その範囲内におけるめっきの影響を検討する。

(1) 実鉄塔を対象としたパラメータ範囲

500kV 級、2 回線の標準的な鉄塔に用いる鋼管部材のサイズや長さなどを調査した結果、概ね以下のことが明らかになった。

a) 径厚比 (D/t)

鉄塔に使用する鋼管サイズ (鋼管径 $D(\text{mm}) \times$ 板厚 $t(\text{mm})$) の規格範囲は、 $42.7 \times 2.4 \sim 1117.6 \times 26.0$ であり、この範囲の径厚比 (D/t) は Fig. 11 のとおりであり、 $D/t = 20 \sim 50$ である。

b) 細長比 (λ)

標準的な鉄塔に使用される部材の細長比分布を Fig. 12 に示す。これより、細長比の範囲は概ね $\lambda = 20 \sim 120$ にあるが、支柱材に着目した場合の範囲は概ね $\lambda = 20 \sim 80$ となる。

c) 軸圧縮と曲げモーメント

標準的な鉄塔を対象に、各パネルの支柱材端部にいて、軸圧縮力と曲げモーメントの関係を調べた結果、

概ね Fig. 13 のようになることが明らかになった。

図中、 x =軸圧縮力、 y =曲げモーメント、としてプロット分布を線形近似するとほぼ $y=2x$ となる。また、プロットは $y=0.2x$ と $y=2.5x$ の間にあることがわかる。

これより、部材に生じる平均的な曲げモーメント ($\text{kN} \cdot \text{cm}$) は、軸圧縮力 (kN) の偏心量を 2cm とした場合に相当しており、全プロットを網羅する範囲は軸圧縮力の偏心量が $0.2 \sim 2.5\text{cm}$ の範囲となる。

以上の結果をまとめると Table 8 のとおりである。

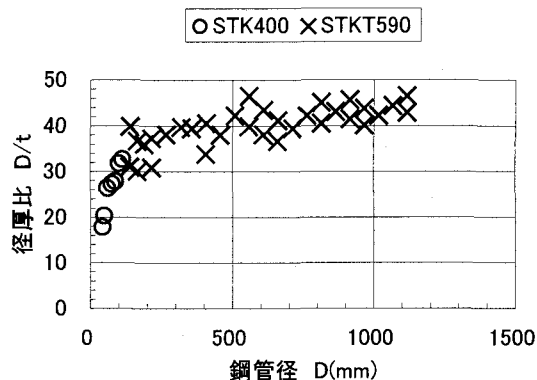


Fig. 11 径厚比 (D/t) の分布

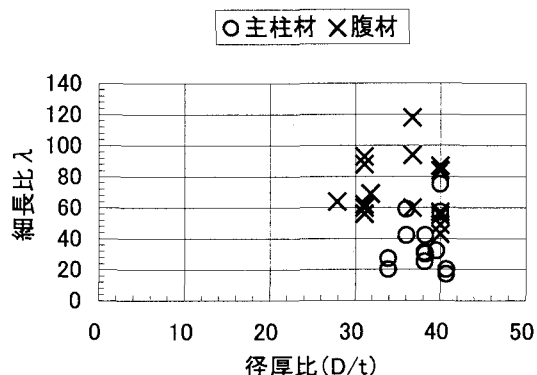


Fig. 12 細長比 (λ) の分布

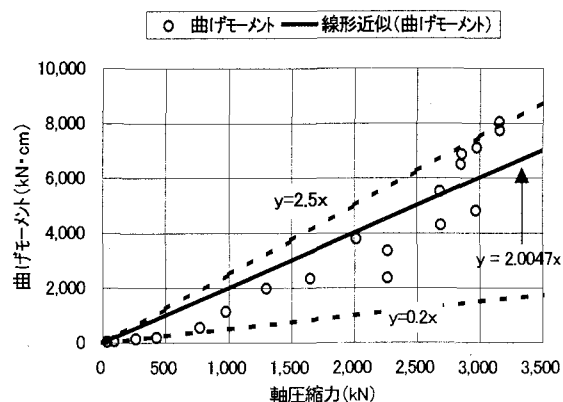


Fig. 13 軸圧縮力と曲げモーメントの関係

Table 8 実鉄塔のパラメータ範囲

パラメータ	内 容
材質	STK400, STKT590
径厚比 (D/t)	20~50 D/t=20; 48.6×2.4 D/t=30; 165.2×5.5 D/t=40; 139.8×3.5 D/t=50; 558.8×12.0
細長比(λ)	20~80
偏心量(cm)	0.2~2.5

(2) 座屈解析

上記のとおり、実鉄塔の各種パラメータ範囲が明らかになった。座屈解析ケースは形状比及び偏心量のほぼ両極端を押さえるものとし、Table 9に示すように計16ケースを選択した。

なお、解析の諸条件は、3. で述べたとおりである。

Table 9 解析ケース一覧

パラメータ	内 容
めっき処理	有, 無
材質	STK400, STKT590
径厚比 (D/t)	20, 40 D/t=20; 48.6×2.4 D/t=40; 139.8×3.5
細長比 (λ)	20, 60 D/t=20; λ=20 D/t=40; λ=60
偏心量(cm)	0.2, 2.0

(3) 解析結果のまとめ

応力度-ひずみ関係は Fig.15, Fig.16 に示し、各ケースにおける最大応力を Table 10 に示す。なお、図中、応力度 σ とひずみ ε は次式で算定している。

$$\sigma = P/A \quad (2)$$

$$\varepsilon = \delta/L \quad (3)$$

ここで、 P ：軸圧縮力、 A ：鋼管断面積、

δ ：鋼管長さの変形量、 L ：鋼管長さ

また、解析で得られる座屈モードには Fig. 14 の2種類(タイプG：全体座屈、及びタイプL：局部座屈)が存在した。

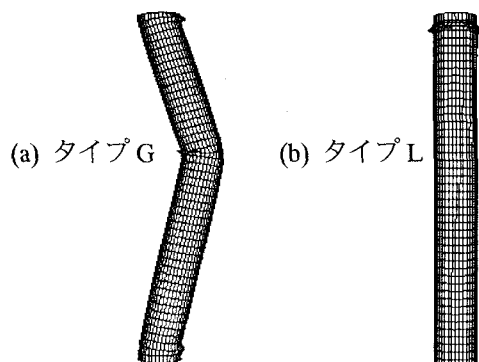
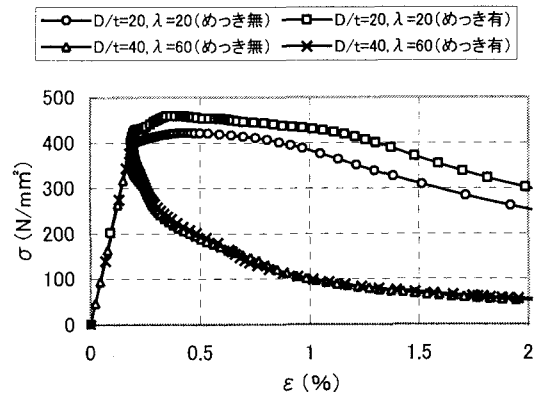
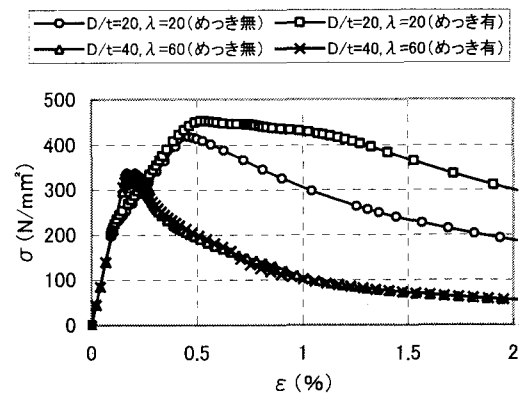


Fig.14 解析により得られた座屈モード

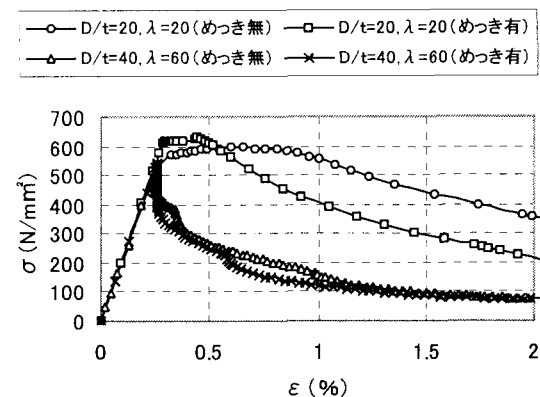


a) 偏心量=0.2cm の場合

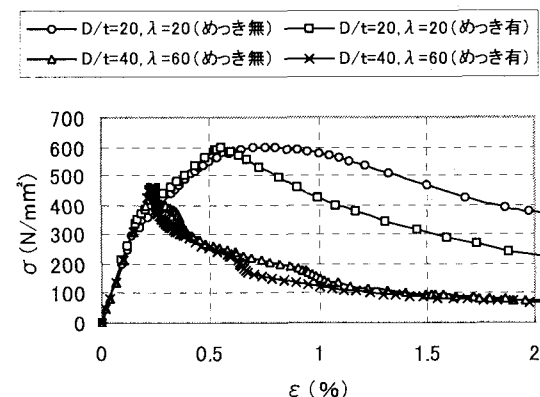


b) 偏心量=2.0cm の場合

Fig.15 めっきの影響 (STK400)



a) 偏心量=0.2cm の場合



b) 偏心量=2.0cm の場合

Fig.16 めっきの影響 (STKT590)

Table 10 座屈解析結果

材質	径厚比 (D/t)	細長比 ($\lambda=L/r$)	偏心量 (cm)	めっき の有無	最大応力 (N/mm ²)	座屈 モード
STK400	20	20	0.2	無	422	G
				有	459	G
			2.0	無	418	L
				有	453	G
	40	60	0.2	無	383	G
				有	412	G
			2.0	無	315	G
				有	336	G
STKT590	20	20	0.2	無	595	G
				有	628	L
			2.0	無	595	G
				有	599	L
	40	60	0.2	無	493	G
				有	542	G
			2.0	無	418	G
				有	460	G

(4) 鉄塔用鋼管部材の軸圧縮・曲げ座屈耐力に 及ぼす溶融亜鉛めっきの影響

実鉄塔の各種パラメータによって座屈解析を行った結果、めっきの影響として以下の傾向が確認された。

- ①実鉄塔に用いる鋼管の形状比においては、ほとんどが塑性座屈であり、座屈モードとしてはシェルとしての局所的な座屈よりも全体座屈（タイプG）が生じる。
- ②軸圧縮主体ではあるが、曲げモーメント（偏心量）も加わる場合、座屈荷重は若干低下し、応力度一ひずみ関係は初期の段階から非線形の傾向が生じる。この傾向は形状比が大きいほど顕著になる。
- ③めっきの有無以外は同じ解析条件の場合において、座屈荷重以外に座屈モードの違いも生じ得る。
- ④座屈モードが同じ場合、めっきをすることにより、10%程度座屈荷重が大きくなる。

6. 結 論

以上、本論文は、送電用鉄塔などを代表とした鋼管構造物の耐風設計、耐震設計の合理化に寄与するため、めっきの有無を一つのパラメータとして、電気抵抗溶接鋼管(STK400, STKT590)の材料特性、及びその座屈耐力に及ぼす影響を検討し明らかにした。

溶融亜鉛めっき施工条件は次のとおりとした。

- ・亜鉛浴温度 445～460℃
- ・浸漬時間 3 分以上（部材全体均等加熱）

得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) めっきを施すことにより、鋼管内の残留応力が除去されるなどにより降伏応力度が上がる。これに伴って、降伏応力度が支配要因である厚肉鋼管の軸圧縮座屈、曲げ座屈荷重は増加する。
- (2) めっきの影響は素材レベル（材料試験結果）よりも部材レベル（軸圧縮座屈試験結果）のほうが顕著に現れる。
- (3) 座屈解析結果は軸圧縮座屈試験結果と概ねよく一致しており、解析の適用性が確認できた。
- (4) 実鉄塔の鋼管部材については、めっきをすることにより、10%程度座屈荷重が向上することが確認され、軸圧縮力に曲げモーメントが加わった場合についても同様な傾向が確認できた。
- (5) 座屈解析結果により、めっきが座屈モードにも影響する場合がありますことを確認した。

参 考 文 献

- 1) 鈴木敏郎, 佐藤亘宏, 深澤隆: 溶融亜鉛めっき鋼管の圧縮変形状態に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集第 420 号, pp.51-61, 1991.
- 2) 日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針, pp.28-29, 1996.
- 3) 日本建築学会: 鋼管トラス構造設計施工指針・同解説, pp.31-32, 2002.
- 4) 本郷栄次郎・小川正浩・山崎智之: 鋼管の溶融亜鉛めっきによる降伏応力度上昇に関する研究（その 1）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.357-358, 1999.
- 5) 小川正浩・本郷栄次郎・山崎智之: 鋼管の溶融亜鉛めっきによる降伏応力度上昇に関する研究（その 2）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.359-360, 1999.
- 6) 松尾康博・本郷栄次郎・小川正浩: 鋼管の溶融亜鉛めっきによる降伏応力度上昇に関する研究（その 3）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.435-436, 2000.
- 7) 三上康朗・本郷栄次郎: 鋼管の溶融亜鉛めっきによる降伏応力度上昇に関する研究（その 4）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.727-728, 2001.
- 8) 松浦真一・中村秀治・小木曾誠太郎・大坪英臣: 高速増殖炉容器の耐震座屈設計法に関する研究（第 5 報, 座屈解析法の適用性評価）, 日本機械学会論文集（A 編）, 61 巻 585 号, pp.138-146, 1995.

(2003年9月12日受付)