

送電用鉄塔に用いる鋼管の偏心を考慮した 軸圧縮座屈耐力に関する基礎的検討

Fundamental studies on buckling strength of steel pipes for transmission towers under eccentrically axial compression

中村秀治*・三上康朗**・藤井真人***・中村雅樹****・小澤武範*****・中山 健*****・佐竹亮一*****

Hideharu Nakamura, Yasuo Mikami, Mahito Fujii, Masaki Nakamura,
Takenori Ozawa, Takeshi Nakayama and Ryouichi Satake

* 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)

** 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)

*** 工修 株式会社計測リサーチコンサルタント (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1-665-1)

**** 福山大学工学部建設環境工学科助手 (〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵)

***** 広島大学大学院工学研究科博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

***** 広島大学社会基盤工学課程 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

In these fifteen years, high-voltage transmission towers received severe damage due to the typhoon and the earthquake in Japan. Steel pipes for transmission towers have radius-to-thickness ratio of 10-25, and slenderness ratio of 20-120, and belong to relatively thick cylinders. Transmission towers have been considered to be designed with enough wind-resistance performance, however, it is necessary to re-examine the current estimation methods from the point of load carrying capacity to improve the structural integrity. The purpose of this paper is to investigate the buckling strength of the steel pipes experimentally and analytically, and to clarify the relation between the actual buckling strength and the estimated buckling strength under eccentrically axial compression.

Key Words : transmission tower, steel pipe, axial compression buckling, wind-resistant design

キーワード：送電鉄塔，鋼管，軸圧縮座屈，耐風設計

1. まえがき

本研究で直接対象とする構造物は、鋼管部材を用いた大型鉄塔である。送電用鉄塔に注目すれば25万ボルト級超高压送電鉄塔が、この15年間だけでも台風(9119号, 9313号, 9918号, 0221号, 0418台風)および地震(鳥取県西部地震)で倒壊あるいは大きな損傷を受けている^{1), 2)}。直接の原因は設計時の想定を上回る強風、あるいは基礎の不同変位であるが、構造物としての終局耐力評価の観点から、実材料による鋼管部材の耐力特性を再検討する必要性は高い。特に、発電所の遠隔地化と送電量の増大に対応するため、超高压送電線の建設が進められてきたが、山岳地や沿岸部など物資輸送や施工条件の悪い地域を通過せざるをえない場合も少なくない。このような悪条件の地点に送電用鉄塔を建設するにあたり、構造物としての構造

健全性の確保と同時にコスト削減の必要性から鉄塔重量の軽量化を指向し、軸圧縮力が支配的な鋼管トラス構造が採用されると同時に、防食対策として溶融亜鉛めっきの施された高張力鋼管が多く採用されてきた³⁾。

パイプや円筒シェルの座屈研究については、従来、航空機関係を中心に膨大な量の研究が行われてきたが、実施された座屈試験は小型で機械仕上げ等により精密に仕上げられた模型に、軸圧縮あるいは純曲げを荷重した場合が多く、薄肉弾性座屈領域のケースがほとんどであった。昭和50年代には海洋構造物の分野で、やや厚肉の溶接施工による大型鋼製模型を用いた座屈試験が数多く行われ、続いて、昭和60年代から平成にかけては、高速増殖炉の耐震座屈設計法の確立を目的として、半径対板厚比(R/t)が50~400で、地震荷重下の弾塑性せん断曲げ座屈を解明するための研究が電力業界を中心にしてなされてきた。しかしながら、半径

対板厚比 (R/t) が 50 以下で、材料特性が支配的な領域にあり、軸圧縮力や曲げモーメントに対して塑性座屈が生じて圧壊に至る現象を、実材料に即して検討した例は少ない。送電鉄塔の鋼管部材に関する現行の座屈評価式は、文献 4), 5), 6) などと同じ式が示されているが、1965 年以降基本的に見直されないまま現在に至っている。本許容座屈応力度算定式は、鉄塔部材として古くから使用されている山形鋼を対象とした耐荷力試験をベースに導かれたものであり、対称断面を有する十字断面部材や鋼管部材に対しては偏心の極めて少ない場合を想定して適用している。

送電用鉄塔に用いられる鋼管部材のサイズや長さについては、先に実鉄塔を対象として調べた結果、鋼管サイズ (外径 $D(\text{mm}) \times$ 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、この範囲の半径対板厚比 (R/t) は $R/t=10 \sim 25$ である。また、典型的な鋼管鉄塔 (500kV, 2 回線) の有効細長比 (λ) 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 $\lambda=20 \sim 80$ となることが確認されている³⁾。また、発生曲げモーメントから換算した偏心量は実構造の支柱材で概ね 20~30mm 以下であると推定されている³⁾。

以上のような実態を踏まえて、本論文においては、まず 2. で、 $R/t=10 \sim 25$, $\lambda=20 \sim 80$ における軸圧縮座屈モードなどの定性的な座屈特性の検討を解析的に行う。次に 3. で、実鉄塔に用いられる厚肉鋼管部材 (STK400 材, STKT590 材) の材料特性、初期形状不整および残留応力分布特性を把握し、実鉄塔における形状パラメータ範囲で偏心量をパラメータとした軸圧縮座屈耐力試験を行い、実験結果を示す。さらに 4. で既往の座屈耐力評価方法による値と実験結果を比較検討して、鉄塔用鋼管の基本的な座屈耐力特性を明らかにする。

2. 鉄塔用鋼管の形状パラメータ範囲における定性的な座屈特性の解析的検討

パイプ・シェルの軸圧縮、曲げ、せん断座屈荷重については、解析値と実験値の間に相違があり、種々の不整を考慮してもなお、10~20%のオーダーで解析値が大きめに出る傾向が指摘されている⁷⁾。一方、座屈モードや荷重-変位関係については、良好にシミュレーション可能なことも知られているので、座屈実験に先立ち、鋼管鉄塔における形状パラメータ範囲での座屈モードと座屈発生前後の軸方向荷重-変位関係を把握するために解析的検討を行う。本論文における主要な観点は座屈現象であり、座屈後までを含めた解析精度の重要性に鑑み、解析コードとしては ABAQUS を使用し、要素は 8 節点シェル要素 (S8R5) を選択した。

表 1 形状パラメータの範囲 (上段= R/t , 下段= λ)

t L	0.5 (mm)	1.0 (mm)	2.0 (mm)	3.0 (mm)	4.0 (mm)	5.0 (mm)	10.0 (mm)
143 (mm)	100 2.82	50 2.82	25 2.82	16.7 2.82	12.5 2.82	10 2.82	5 2.81
429 (mm)	100 8.49	50 8.48	25 8.48	16.7 8.48	12.5 8.48	10 8.47	5 8.44
714 (mm)	100 14.1	50 14.1	25 14.1	16.7 14.1	12.5 14.1	10 14.1	5 14.1
1000 (mm)	100 19.8	50 19.8	25 19.8	16.7 19.8	12.5 19.8	10 19.8	5 19.7
1429 (mm)	100 28.3	50 28.3	25 28.3	16.7 28.3	12.5 28.3	10 28.2	5 28.2
2143 (mm)	100 42.4	50 42.4	25 42.4	16.7 42.4	12.5 42.4	10 42.4	5 42.2
2857 (mm)	100 56.6	50 56.6	25 56.6	16.7 56.5	12.5 56.5	10 56.5	5 56.3
4000 (mm)	100 79.2	50 79.2	25 79.2	16.7 79.2	12.5 79.1	10 79.1	5 78.8
5000 (mm)	100 99.0	50 99.0	25 99.0	16.7 99.0	12.5 98.9	10 98.9	5 98.5

(1) 形状パラメータ範囲の設定

前述のように、実際の送電用鉄塔における形状パラメータは、 $R/t=10 \sim 25$, $\lambda=20 \sim 80$ である。本検討の範囲としては、 $R/t=5 \sim 100$, $\lambda=2.8 \sim 100$ と設定した。

座屈前の有限変形を考慮した八巻らの検討結果により、弾性座屈を仮定する時、長い円筒シェルは座屈に際して境界における周方向

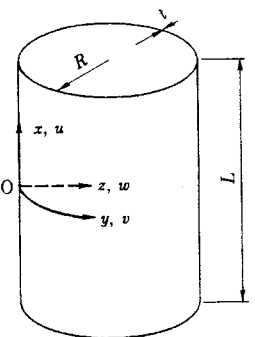


図 1 座標系

変位を拘束する場合は両端固定の長柱として、拘束しない場合には両端単純支持の長柱として座屈することが知られている⁸⁾。また、この関係の適用範囲は、 $Z = \sqrt{1-\nu^2} \cdot L^2/Rt$ (Batdorf パラメータ) として、前者では $Z \geq 64\sqrt{1-\nu^2}(R/t)^2$ 、後者では $Z \geq 16\sqrt{1-\nu^2}(R/t)^2$ となることが知られている⁹⁾ (図 1)。そこで後者の判定式を利用して、表 1 に示した形状パラメータの組み合わせで座屈モードの判定を行った結果を表 3 に示す。表中、太線内は実鉄塔部材のパラメータ範囲を示しており、L は局部座屈 (シェル座屈)、G は全体座屈 (オイラー座屈) であることを示している。

(2) 解析モデル

座屈シミュレーションを行う場合、局所的座屈変形の一つのしわに対して複数の要素が存在するようなメッシュ分割でなければ精度のよい解が得られないため、半径 $R=50\text{mm}$ 、板厚 $t=2\text{mm}$ の円筒モデルに対して、メッシュ分割は高さ方向に一定で 5mm 間隔、周方向に 5° 間隔 (72 要素) で分割した (図 2)。長さの異なる各モデルでの節点数、要素数を表 2 に示す。

表2 各モデルの節点数と要素数

長さL(mm)	節点数	要素数
143	4321	1080
429	12529	3132
714	20737	5184
1000	28945	7236
1429	34129	8532
2143	47521	11880
2857	46369	11592
4000	57745	14436
5000	64945	16236

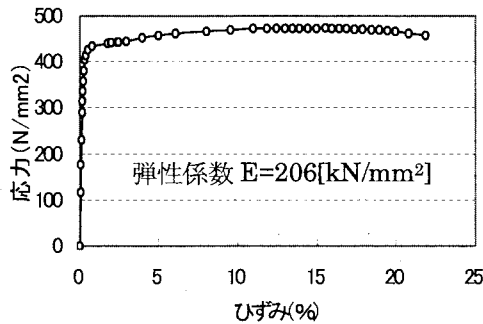


図3 材料物性値³⁾

表3 偏心無しの場合の座屈モード (上段, L: シェル座屈, G: オイラー座屈, () 内は弾性座屈理論に基づく座屈モード) と座屈荷重 (下段, N/mm²)

t	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0
L	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
143	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)
(mm)	408.	420.	421.	424.	426.	432.	432.
429	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)
(mm)	408.	418.	421.	424.	426.	430.	433.
714	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	L(L)	G(L)	G(G)
(mm)	408.	411.	417.	420.	421.	420.	420.
1000	L(L)	L(L)	L(L)	G(L)	G(L)	G(G)	G(G)
(mm)	406.	410.	406.	412.	409.	408.	416.
1429	L(L)	G(L)	G(L)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)
(mm)	406.	407.	404.	409.	410.	412.	412.
2143	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)
(mm)	402.	407.	407.	409.	412.	418.	409.
2857	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)
(mm)	401.	401.	390.	401.	404.	409.	402.
4000	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)
(mm)	386.	387.	388.	383.	381.	400.	380.
5000	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)	G(G)
(mm)	339.	339.	336.	328.	322.	334.	317.

荷重条件は軸圧縮力単調荷重および偏心軸圧縮力単調荷重とし、境界条件は鉄塔基礎直上の支柱材を念頭に置いて、上端ヒンジ (水平方向のみ固定)、下端完全固定とした。物性値は図3に示した STK400 材の実材料試験値を使用した³⁾。

(3) 解析結果

表1に示した各々の形状パラメータに対する解析結果を表3に示し、代表的ケースの荷重-変位関係を図4に示す。また、特定の2ケースについて偏心量をパラメータとした荷重-変位関係の違いを図5に示した。

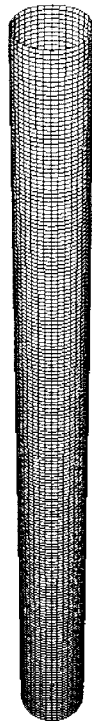
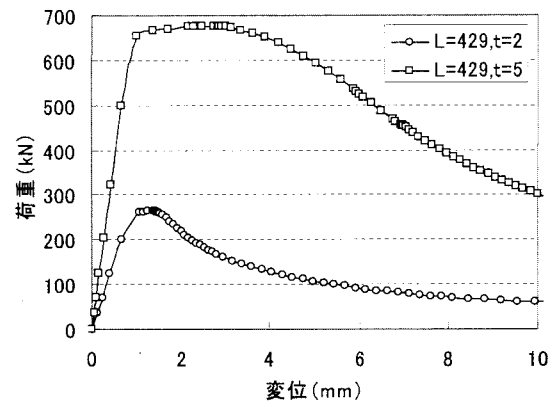
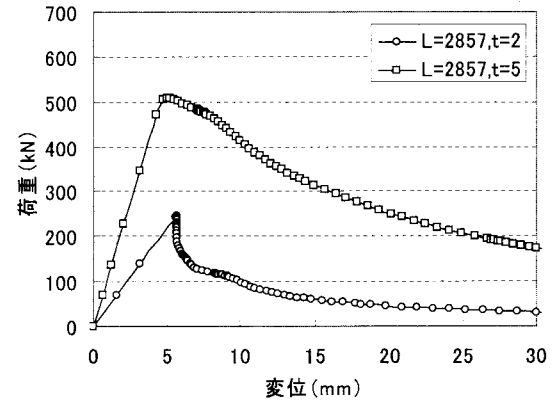


図2 要素分割図

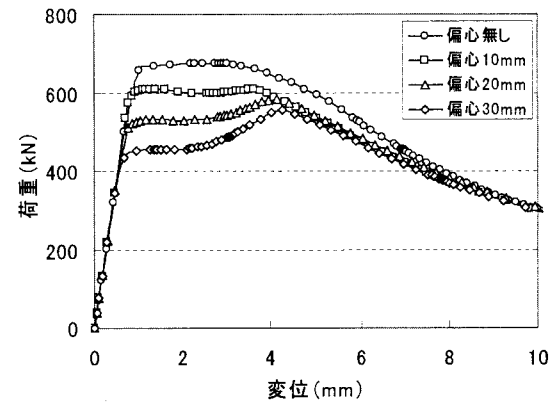


a) 短柱で薄肉の場合と厚肉の場合

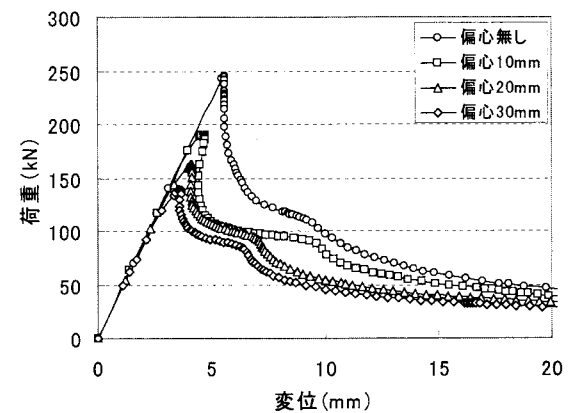


b) 長柱で薄肉の場合と厚肉の場合

図4 偏心の無い軸方向荷重と軸方向変位の関係



a) 短柱で厚肉の場合 (L=429mm, t=5mm)



b) 長柱で薄肉の場合 (L=2857mm, t=2mm)

図5 偏心を考慮した軸方向荷重と軸方向変位の関係

軸圧縮力と曲げモーメントの連成効果については、図示していないが、 $R/t=10$ および 25, $\lambda=2.8, 8.5, 14.1, 19.8, 28.3, 42.4, 56.5, 70.1, 98.9$ の組合せについて同様の解析結果にもとづいて検討した結果、厚肉で短柱の場合は相互の連成が弱く、薄肉で長柱になるほど強度の相関関係が直線に近くなることが確認された。

(4) 鉄塔用鋼管の形状パラメータ範囲における定性的座屈挙動特性

本検討の結果、次の事項が定性的に明らかになった。

- ①鉄塔用鋼管の形状パラメータ範囲の一部は、オイラー座屈とシェル座屈の同居する領域である。したがって、有効細長比 λ のみでなく、半径対板厚比 R/t も座屈現象の支配因子となる。
- ②鉄塔部材では、基本的に偏心が極めて少ないことを前提としているが、実態として、最大 20~30mm 程度の偏心が見込まれるとすれば、座屈評価において偏心量は考慮すべき重要な因子である。
- ③荷重－変位関係は形状パラメータにより様相が異なり、厚肉で短柱であれば座屈後の荷重低下は緩く、薄肉で長柱ならば座屈後の荷重低下は急激である。
- ④軸圧縮力と偏心による曲げモーメントの連成効果については、厚肉で短柱であれば連成が弱く、逆に、薄肉で長柱になるほど連成が強くなる。

3. 座屈耐荷力試験の条件および試験結果

(1) 供試体

a) 供試体の形状

供試体の形状は表 4 に示した通りである。有効細長比 λ については、一端固定、他端回転自由かつ横方向変位固定で試験するため、有効座屈長は $0.7L$ としている¹⁰⁾。形状パラメータとしては、厚肉側の $R/t=13$ で有効細長比 $\lambda=20, 54$, および $R/t=20$ で $\lambda=20$ である。メッキの有無、STK400 と STKT590 の違いも考察できるようにしている。

b) 材料物性値

実験供試体を作成した鋼管の一部から JIS 5 号試験片を各 3 本ずつ切り出して材料試験を行い、平均値として表 5 の結果を得た。座屈点あるいは座屈直後の時点で解析に用いられるひずみレベルは 10% 程度までと想定し、座屈解析に引張試験結果を用いるものとする。

c) 降伏後の応力－ひずみ関係

文献 3) にも示されている通り、めっきありの場合の応力－ひずみ関係は明確な降伏棚を有し、一方、めっきなしの場合は降伏棚が生じないので 0.2% 耐力をもとに降伏点を定めたが、めっきなしに比べてめっきあ

表 4 試験体の形状と載荷時の偏心量

材料および形状		Case	めっき	偏心量 (mm)
シリーズ 1	STK400 外径 $\phi=76.3\text{mm}$ 板厚 $t=2.8\text{mm}$ 長さ $L=2000\text{mm}$ $\lambda=54, R/t=13$	1	なし	0
		2	あり	0
		3		10
		4		20
		5		30
シリーズ 2	STK400 外径 $\phi=76.3\text{mm}$ 板厚 $t=2.8\text{mm}$ 長さ $L=743\text{mm}$ $\lambda=20, R/t=13$	6	なし	0
		7	あり	0
		8		10
		9		20
		10		30
シリーズ 3	STKT590 外径 $\phi=139.8\text{mm}$ 板厚 $t=3.6\text{mm}$ 長さ $L=1377\text{mm}$ $\lambda=20, R/t=20$	11	なし	0
		12	あり	0
		13		20
		14		35
		15		50

表 5 材料試験結果

	めっき	ヤング率 (GPa)	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)
STK 400	なし	178	350	406
	あり	183	380	447
STKT 590	なし	198	493	619
	あり	210	614	662

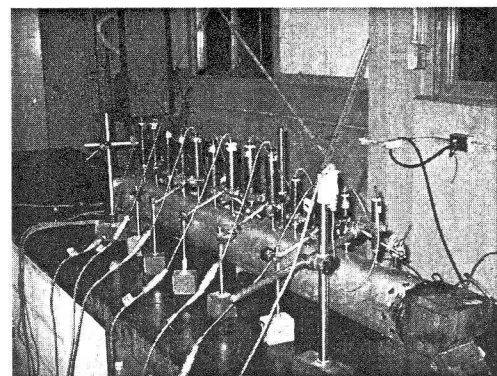


写真 1 初期不整計測

りは約 10% 程度降伏応力が高くなり、引張強さも 5 ~10% 程度高くなる (表 5)。

d) 初期形状不整

載荷に先立って、供試体の初期形状不整を計測した。計測対象とした供試体はシリーズ 2 および 3 の計 16 本である。測定は、定盤の上で V 字型に切り込んだ治具を供試体両端に置き、ダイヤルゲージを軸方向に移動させながら、あるいは供試体を回転させながらダイヤルゲージで読み取る方法で行った (写真 1)。

測定は周方向に 15 度ピッチ、軸方向にシリーズ 2 の鋼管は 5cm おきの 15 点、シリーズ 3 の鋼管は 10cm お

きの13点とした。

計測結果の一部は図7 a)～d) に示した通りであるが、シリーズ2の鋼管 ($\phi=76.3\text{mm}$, STK400) および、シリーズ3の鋼管 ($\phi=139.8\text{mm}$, STKT590) のいずれにおいても、最大値と最小値の差が0.3 mm程度となっている。部材の直線性という観点でみれば、無視できるほど小さいと考えられるが、一方、真円度、ジャバラ状の形状という視点で見ると、座屈耐力への影響が無視できない可能性があり、今後の検討が必要である。

e) 残留応力

本実験に用いる供試体は電気抵抗溶接管で、鉄板を丸めて端部を溶接することにより接合されたものである。鋼管部材の製造工程における残留応力の発生は不可避であり、座屈耐力への影響も懸念されるため、残留応力の計測を行った。計測対象としたのは、シリーズ2の鋼管 ($\phi=76.3\text{mm}$, STK400) および、シリーズ3の鋼管 ($\phi=139.8\text{mm}$, STKT590) である。

計測方法はストレインゲージ法とし、座屈試験に用いる鋼管を外径の2倍の長さで切断し、中央断面に溶接線を中心として45ピッチで2軸ゲージを貼付(表裏両面)した。なお、溶接線近傍は溶接線に寄せて密にストレインゲージを配置し細かく計測するようにした(図6、写真2)。

切断は管軸方向に2つ割りした後、さらにゲージの近傍で短冊状に管軸方向に切断する手順で行った。切断による形状変化や温度変化による残留応力の発生を避けるために、切断はできるだけゆっくり行い、切断後は供試体が冷めるまで時間を置いた(写真3)。

シリーズ3の鋼管の残留応力測定結果を図8に示す。鋼管表面については、周方向、軸方向共、引張応力が残留しており、周方向の方が若干大きめである。溶接線近傍で特に応力集中というほどの傾向は見られない。裏側(鋼管内側)の残留応力は、表面と符号は逆であるが値は必ずしも一致していない。めっきありの方がめっきなしよりも残留応力が低い傾向は見られるが、この結果から結論づけるのは難しい。シリーズ2の鋼管についても、板厚が薄いことから残留応力の値自体は小さめであったが、傾向はほぼ同じであった。

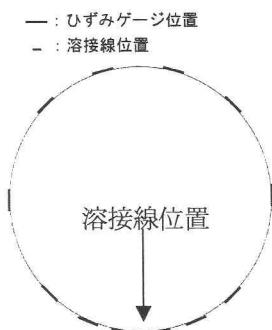


図6 ゲージ位置

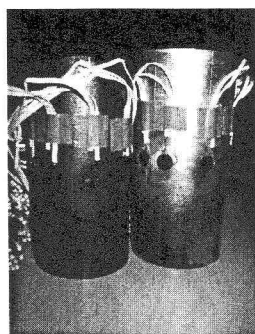
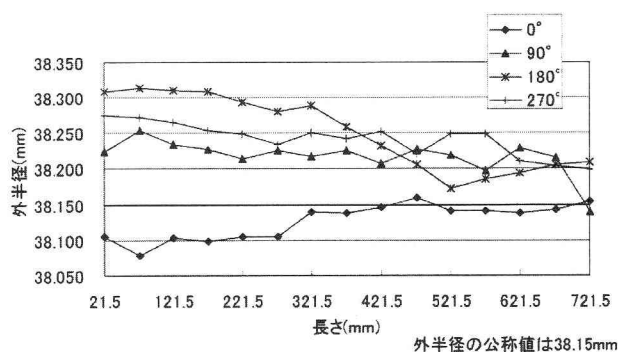
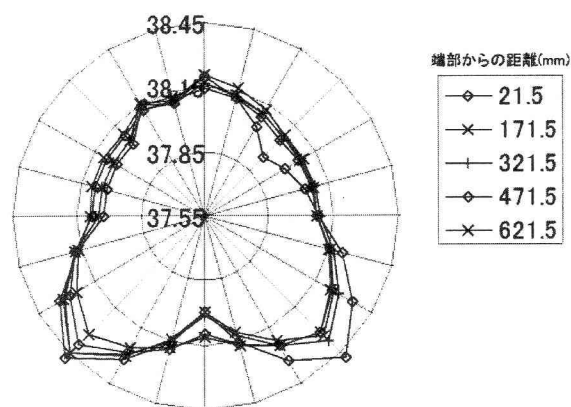


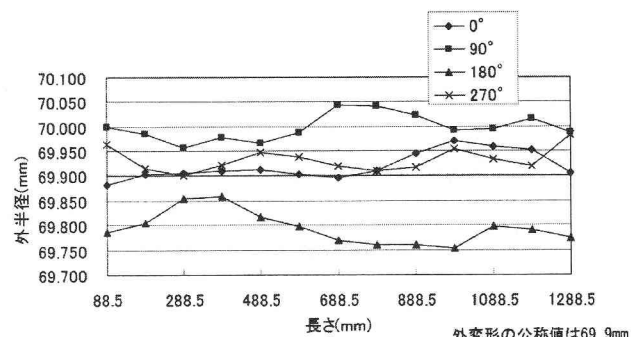
写真2 実験供試体



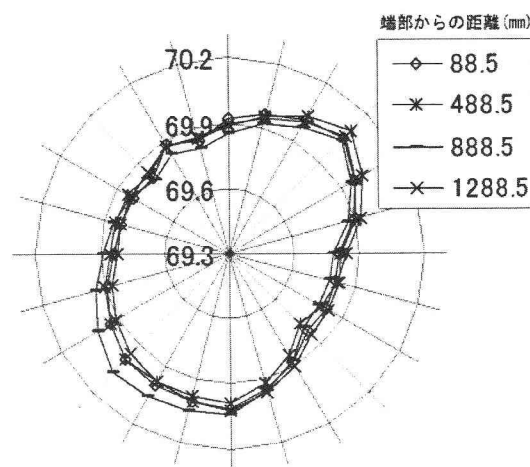
a) 軸方向初期不整 (STK400)



b) 周方向初期不整 (STK400)



c) 軸方向初期不整 (STKT590)



d) 周方向初期不整 (STKT590)

図7 初期不整計測結果

(2) 実験装置, 载荷方法, 計測方法

座屈耐荷力試験には、図9に概念的に示す静的二軸载荷装置（福山大学、ハイテクリサーチセンター）を用いた。本装置は上下、水平方向载荷（容量 980kN）が可能であり、制御についても荷重制御と変位制御の両方を随時切り替えて使用することができる。

境界条件は上端ヒンジ、下端固定として、载荷方法は予想最大荷重の半分までは鉛直下方に荷重制御であげて行き、その後は変位制御に切り替えて、最大荷重後の耐荷力低下特性の把握に努めた。

計測項目および計測方法は、次の通り。

- ①鉛直方向载荷荷重
- ②供試体各部及び载荷枠の変位（鉛直、水平方向）
- ③供試体各部のひずみ（座屈変形発生の予想される上下端から $3\sqrt{Rt}$ 以内、および上端から $0.7L/2$ 近辺の位置にゲージを集中配置）
- ④座屈モード（画像）

荷重・変位、ひずみデータは、予め設定した荷重段階および随時手動でパソコンに取り込みながら収録した。

(3) 試験結果と考察

a) 座屈荷重

座屈耐荷力試験により得られた座屈荷重（最大荷重）を、表6にまとめて示す。この値は、図11、図12、図13に示した荷重－変位関係における最大荷重値を読み取ったものである。

Case 1, 2（シリーズ1）、Case 6, 7（シリーズ2）、Case 11, 12（シリーズ3）はいずれも偏心量0の場合であり、各ペアにおける違いは溶融亜鉛めっきの有無のみである。文献3)と同様、溶融亜鉛めっきを施すことにより座屈耐荷力はシリーズ1で25%、シリーズ2で12%、シリーズ3で14%上昇している。図10は各シリーズにおける偏心なしの場合を基準とした座屈荷重と偏心量の関係を示したものである。小径（ $\phi=76.3\text{mm}$ ）のシリーズ1、2では偏心量30mmにおいて座屈荷重は偏心なしに比べ半分程度になっており、偏心による耐荷力の低下が著しい。シリーズ3においても偏心量50mmで偏心なしに比べ0.6程度になっている。

b) 座屈モード

鋼管各部の座屈変形については、どの部位の変形が先行して生じ、耐力を支配したかを見極めるのは容易ではない。ひずみゲージの読みが最も信頼できるが、ゲージ貼付位置に必ずしも座屈変形が生じるわけでもなく、見落とす可能性は否定できない。最高荷重到達時点において、供試体全体を目視で判断しながら座屈モードを判定した結果は次の通りである。

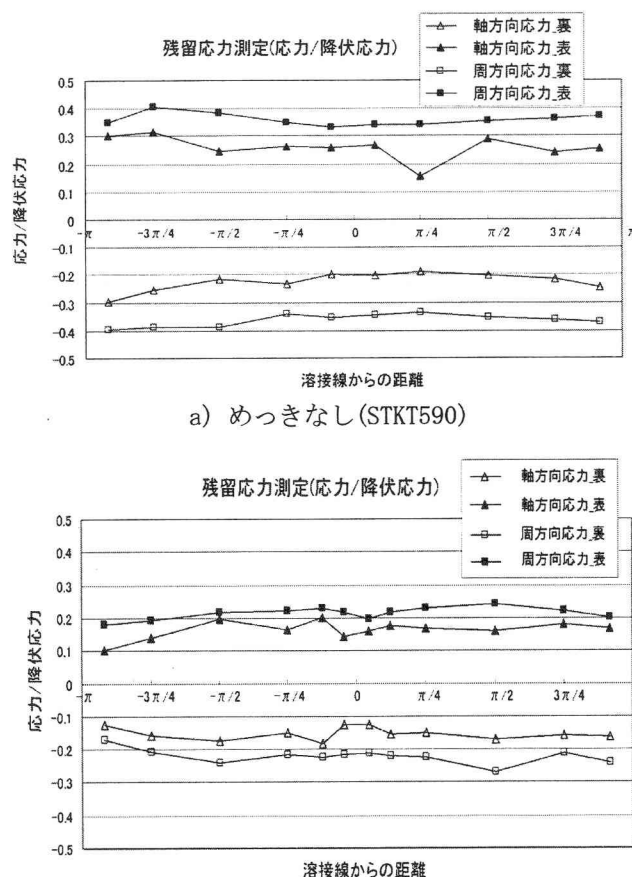


図8 残留応力測定結果の例

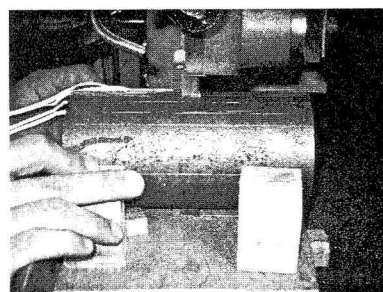


写真3
管軸方向に
切断してい
る状況

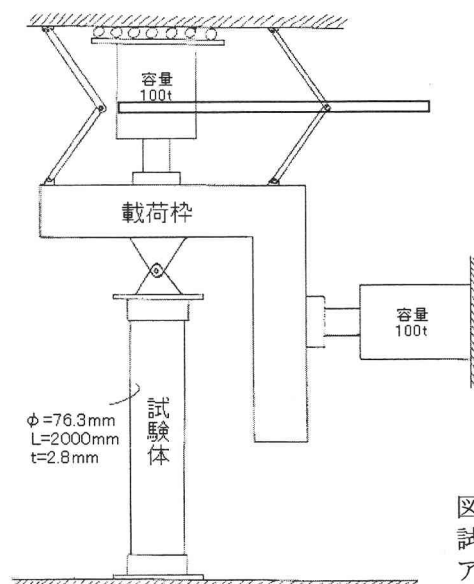


図9
試験体セット
アップ概念図

①シリーズ1はすべて、鋼管部材の中央断面近くで横たわみが大きくなり、オイラー座屈を生じ、最終的には屈服と同じ変形を残した。曲げ変形を生じる途中段階では、中央断面近くの圧縮縁で細かなさざ波状の変形が見られた。偏心载荷の場合は供試体上端近くに象の脚型の変形が生じた。

②シリーズ2で偏心量0の場合は、中央断面近くの横たわみと供試体上下端の象の脚型変形がほぼ同時に生じて、オイラー座屈とシェル座屈のどちらが先行し、座屈荷重を支配したかは明確ではない。最終的な変形は、中央断面近くに屈服がおこり、上下端には象の脚型変形が残った。シリーズ2で偏心がある場合は、始めから横たわみが生じ、特に上端に大きな象の脚型変形が残った。

③シリーズ3で偏心量0の場合は、写真6に示すように下端で提灯座屈が生じた。明らかにシェル座屈であり、鋼管鉄塔部材でオイラー座屈以外の座屈モードのありえることを示すものである。偏心がある場合は、偏心量によって違いがあるが、基本的に上下端に象の脚型変形が生じ、特に上端で顕著であった以上の座屈モードについては、表3に示した座屈モードと概ね良く一致した。

c) 荷重－変位関係と座屈後の耐荷力特性

各シリーズにおける荷重－変位関係は図1 1, 1 2, 1 3, 写真4, 5, 6に示した通りである。主な特徴は次の通りである。

①図1 1はシリーズ1であり、この形状パラメータにおけるオイラー座屈では、座屈荷重までの荷重－変位関係はほぼ直線的であり、座屈発生後は急速に耐力低下を生じる

②図1 2はシリーズ2であり、この形状パラメータの場合、塑性領域でオイラー座屈とシェル座屈が同時に生じるような形で座屈破壊が進行している。最大荷重到達後も耐力を保持し、徐々に耐力低下していく。

③図1 3はシリーズ3であるが、この形状パラメータにおいては、塑性域におけるシェル座屈が生じる。座屈荷重到達以前の非線形の荷重－変位関係は、主として材料特性に依存したものであり、座屈後の荷重低下はシェル座屈によるものである。

d) 偏心の影響

偏心については、前記の通りであり、図1 1, 1 2, 1 3から明らかな通り、鋼管部材の軸圧縮座屈において、偏心は座屈荷重を大きく低下させる要因となる。偏心量を δ としたとき、シリーズ1, シリーズ2では、 $\delta/R = 0.26, 0.52, 0.78$ であり、シリーズ3では、

表6 シリーズ1, 2, 3の座屈耐力試験条件と実験により得られた座屈荷重

	Case	めっき	偏心量(mm)	座屈荷重(kN)
シリーズ1	1	なし	0	173.1
	2	あり	0	217.0
	3		10	167.9
	4		20	132.3
	5		30	115.0
シリーズ2	6	なし	0	219.4
	7	あり	0	245.5
	8		10	217.8
	9		20	171.5
	10		30	140.1
シリーズ3	11	なし	0	846.3
	12	あり	0	963.9
	13		20	811.0
	14		35	713.1
	15		50	590.0

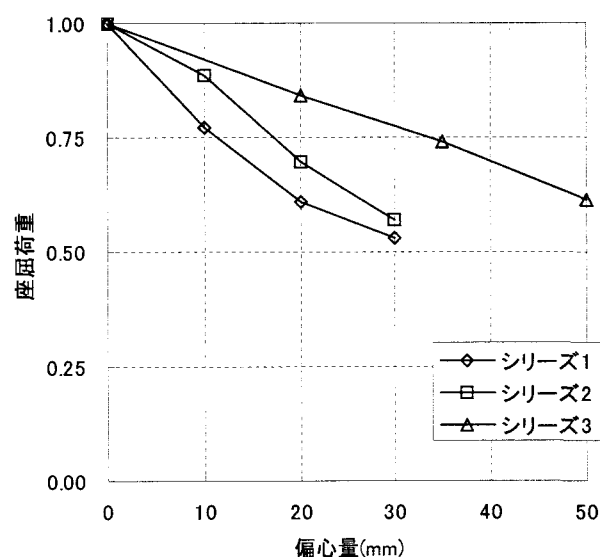


図1 0 シリーズ1, 2, 3における偏心ありの場合と偏心なしの場合の座屈荷重の比率（めっきありの場合）

$\delta/R = 0.28, 0.50, 0.71$ である。図1 0に示す程度の荷重低下、および座屈変形状の変化をもたらすことは明らかである。

なお、本試験では偏心により鋼管部材全体に様な曲げモーメントが作用するように条件設定しているが、モーメントが分布するような場合は、偏心の影響が軽減され、本実験結果は安全側評価となることに留意する必要がある。

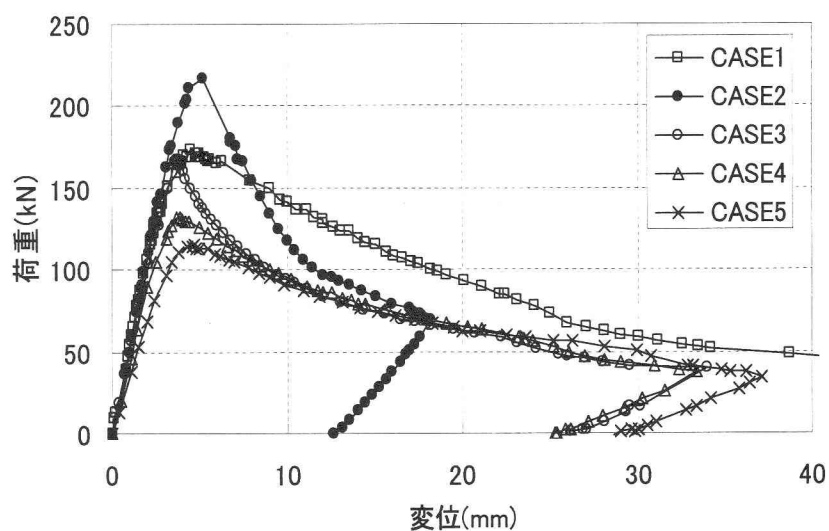


図 1.1 荷重－変位曲線(シリーズ1)

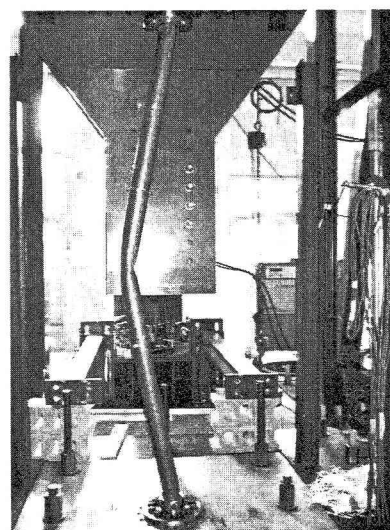


写真 4 Case 1 の載荷後の状況

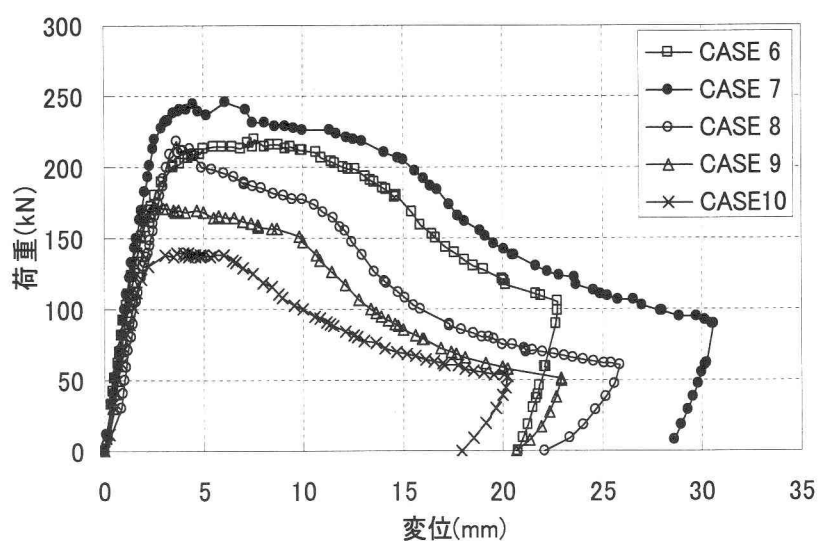


図 1.2 荷重－変位曲線(シリーズ2)

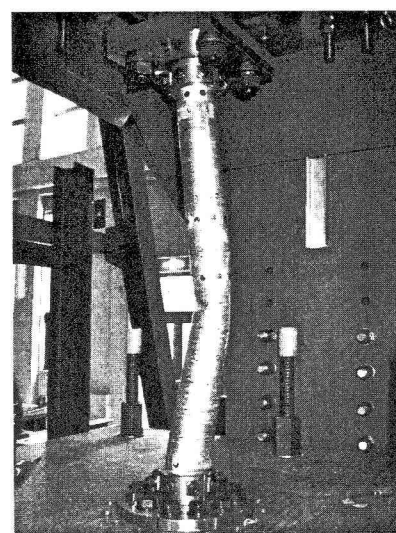


写真 5 Case 7 の載荷後の状況

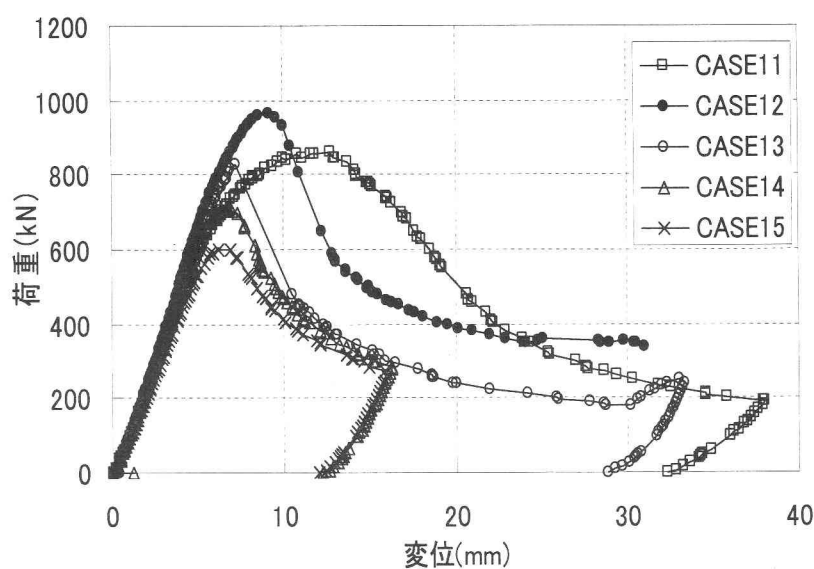


図 1.3 荷重－変位曲線(シリーズ3)

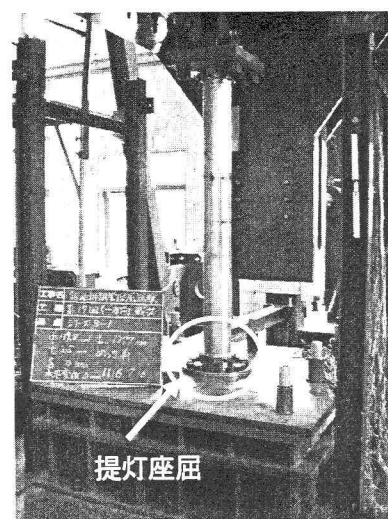


写真 6 Case 12 の載荷後の状況

4. 実験値と座屈評価式による値との比較検討

(1) 現行の座屈評価式

電気設備の技術基準の解釈及び解説⁶⁾において現状の設計評価式は表7のように規定されており、1965年の制定以来、改定されることなく現在に至っている。この許容座屈応力度の計算式は、鉄塔部材として古くから使用されている山形鋼を対象とした耐力試験をベースに導かれたものであり、対称断面を有する十字断面部材や鋼管に対しては偏心の極めて少ない場合を想定して適用しており、その妥当性に関する検討は必要である。また、表7の式の適用に際しては極めて偏心が少ない場合を想定しているが、実際の支柱材は水平材や斜材と交わる節点で連続した鋼管であり、曲げモーメントを完全に伝達する構造である。したがって、支柱材には軸力のみならず曲げモーメントが作用し、これを偏心量に換算すると、実際の鉄塔構造で最大20～30mmに相当するということで、偏心载荷状態となっている場合が多い。このような場合、文献4)によれば、部材断面外縁での最大応力度を次式

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{\sigma_{ka}}{\sigma_{ca}} \frac{M}{I} R \quad (1)$$

ここで、 P ：作用軸力、 A ：断面積、 R ：断面半径

M ：作用曲げモーメント、 I ：断面二次モーメント

σ_{ca} ：許容圧縮応力度、 σ_{ka} ：許容座屈応力度で算定し、これを表7の設計評価式で評価する。しかし、偏心量が大きい場合に対して、偏心量の増加に伴うこれら鋼管部材の座屈強度低下を考慮した送電用鋼管鉄塔関連の評価式はない。

表7 中空鋼管の許容座屈応力度計算式⁵⁾

材質	有効細長比 $\lambda = L/r$	許容座屈応力度 [N/mm ²]
STK400	$0 < \lambda < 100$	$\sigma_{ka} = 156 - 63 \left(\frac{\lambda}{100} \right)^2$
	$100 \leq \lambda$	$\sigma_{ka} = \left(\frac{93}{\lambda/100} \right)^2$
STKT590	$0 < \lambda < 70$	$\sigma_{ka} = 293 - 211 \left(\frac{\lambda}{100} \right)^2$
	$70 \leq \lambda$	$\sigma_{ka} = \left(\frac{93}{\lambda/100} \right)^2$

注) L ：有効座屈長さ、 r ：回転半径 $r = \sqrt{I/A}$

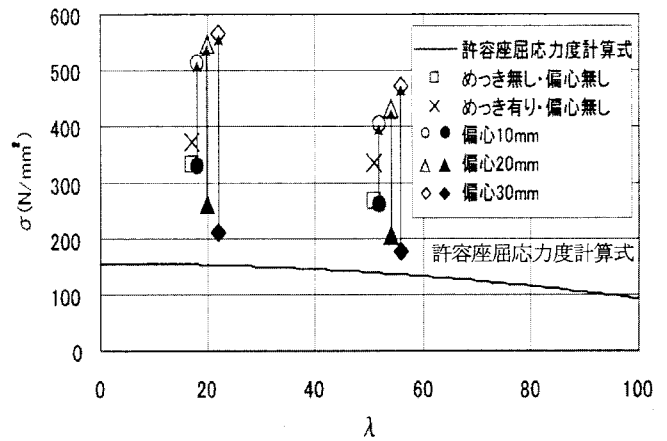


図14 座屈耐力に関する実験値と評価式による値の比較 (STK400)

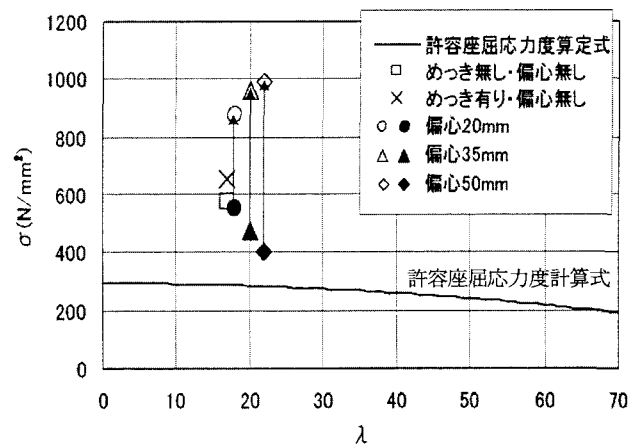


図15 座屈耐力に関する実験値と評価式による値の比較 (STKT590)

(2) 実験値と座屈評価式による値との比較検討

図14は、表7におけるSTK400の式に対して、本論文における座屈耐力試験結果を比較検討したものである。偏心ありの場合に矢印で示しているのは、 $\sigma = P/A$ を下に、 $\sigma = P/A + (\sigma_{ka}/\sigma_{ca})(MR/I)$ を上プロットして、断面内の圧縮応力分布範囲を示したことによって。図15はSTKT590に関する結果であり、同様に表示した。

$\sigma = P/A$ で評価する場合、偏心なしの場合において、表7の座屈耐力評価式は、表8より実験値に対して概ね2.4程度の裕度（ここでは、実験値と表7の計算式による値の比を裕度と定義）を有することがわかる。偏心がある場合は座屈耐力が低下し、今回の座屈耐力試験の範囲では1.3程度まで裕度が低下することが明らかになった。なお、設計において、偏心を考慮して発生応力を $\sigma = P/A + (\sigma_{ka}/\sigma_{ca})(MR/I)$ で評価する場合は、過度に安全側評価になる可能性がありえることにも留意すべきであろう。

表8 表7の評価式と座屈耐力試験結果の比較

a) シリーズ1の場合

δ/R	裕 度			
	0	0.26	0.52	0.78
シリーズ1	2.4	1.9	1.5	1.3

b) シリーズ2の場合

δ/R	裕 度			
	0	0.26	0.52	0.78
シリーズ2	2.5	2.1	1.7	1.4

c) シリーズ3の場合

δ/R	裕 度			
	0	0.28	0.50	0.71
シリーズ3	2.3	1.9	1.7	1.4

5. 結 論

本研究では、送電用鋼管鉄塔に使用されている鋼管部材の形状パラメータは、半径対板厚比 $R/t=10\sim 25$ 、有効細長比 $\lambda=20\sim 80$ である事実を踏まえ、実材料（STK400 材，STKT590 材）を用いて座屈耐力および座屈モード、荷重－変位関係などについて検討した。本研究で得られた結果は次の通りである。

（1）解析によりパイプ・シェルの座屈荷重自体を精度よく推定するのは一般に難しく、解析結果が10～20%程度大きい値を与えることが多いが⁷⁾、座屈モードおよび荷重－変位関係に関する現象把握は可能なので、 $R/t=5\sim 100$ 、 $\lambda=2.8\sim 100$ の広い範囲で座屈特性の検討を行った結果、次の知見を得た。

- ①鉄塔用鋼管の形状パラメータ範囲は、オイラー座屈とシェル座屈の同居する領域である。したがって、有効細長比 λ のみでなく、半径対板厚比 R/t も座屈現象の支配因子となる。
- ②鉄塔部材では、基本的に偏心が極めて少ないことを前提としているが、実態として、最大20～30mm程度の偏心が見込まれるとすれば、座屈評価において偏心量は考慮すべき重要な因子と言える。
- ③荷重－変位関係は形状パラメータにより様相が異なる。厚肉・短柱ならば座屈後の荷重低下は緩く、薄肉・長柱であるほど座屈後の荷重低下は急激である。
- ④軸圧縮力と偏心による曲げモーメントの連成効果については、厚肉・短柱であるほど連成が弱く、逆に、薄肉・長柱であるほど連成が強くなる。

（2）鉄塔用鋼管部材の軸圧縮座屈耐力を実験的に明らかにするため、形状パラメータとしては厚肉側の $R/t=13$ で有効細長比 $\lambda=20, 54$ 、および、 $R/t=20$ で $\lambda=20$ の鋼管について、偏心量をパラメータとした

座屈実験を行った。めっきの有無、および材質の違いなどもパラメータとし、次の知見を得た。

- ①鉄塔用鋼管の座屈耐力に及ぼす因子として、めっき以外にも、初期形状不整、残留応力などがあり、これらの詳細な影響評価は今後さらに必要である。
- ②実験で得られた座屈荷重自体は、現行の設計評価式に対して十分裕度のあることが確認されたが、偏心を考慮した場合、裕度が大幅に低下することも明らかになった。
- ③座屈モードについては、鉄塔用鋼管の形状パラメータ範囲において、大部分はオイラー座屈領域にあるが、一部シェル座屈領域にもあり、両方の座屈モードが生じえることを実験的にも確認した。

参考文献

- 1) 中村秀治・石川智巳：架空送電線の対風設計（その2．送電用鉄塔の耐風設計），日本風工学会誌，第98号，2004.1
- 2) 当麻純一，他：平成12年鳥取県西部地震調査速報，電力中央研究所報告，調査報告：U00019，pp.50-58，2000.12
- 3) 三上康朗・本郷栄次郎・中村秀治・藤井真人：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，構造工学論文集，vol.50A，2004.3
- 4) 電気学会：送電用支持物設計標準，JEC-127-1979，pp.83-95，113-117，1979
- 5) (社)日本鉄塔協会：中空鋼管許容応力表，pp.8-120，1997
- 6) 資源エネルギー庁公益事業部：電気設備の技術基準の解釈及び解説，pp.315-316，199
- 7) 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，1995
- 8) 八巻昇・児玉昭太郎：円筒殻の圧縮による座屈（第4報），座屈前の有限変形を考慮した *Flügge* 型の式による解，東北大学高速力学研究所報告，第30巻，第297号，pp.43-71，1972
- 9) 福本秀士編：座屈設計ガイドライン，鋼構造シリーズ2，土木学会，1987
- 10) 西野文雄編：鋼構造物設計指針，Part A 一般構造物，土木学会，pp.54-55，1997