

MC鉄塔支柱材の軽量化に関する研究

A Study on Weight-Saving for MC-Type Transmission Tower

大山 卓也 *1、水口 一義 *2、野村 憲一郎 *3、重本 広志 *4、滝下 昌洋 *5、本田 和哉 *6、内川 啓 *7

1. はじめに

支柱材にコンクリート充填鋼管を用いた送電用鉄塔（以下、MC鉄塔と称す）では、部材の細長比を小さくすれば引張降伏軸力よりも圧縮座屈耐力が高くなり、外力作用時に支柱材の引張降伏を先行して生じさせる設計が可能となるため、安全性の高い鉄塔を構築することができる。

MC鉄塔支柱材へのコンクリート充填は現場施工が主流であったが、充填不良を少なくするため1985年以降は工場充填を採用し、品質の向上を図ってきた。しかし、工場充填すると部材重量が増加することや、現場施工時の重量制限に収まるように部材長さを短くすると継手が増えるなど、運搬費や組立費が増加する弊害が生じた。そのため、MC鉄塔支柱材を軽量化するための検討が継続的に行われてきた。

表-1にMC鉄塔支柱材の変遷概要を示す。支柱材の軽量化は、充填材の軽量化と鋼管の厚肉化および高強度

化によって行われてきた。表-1中に示す n 値は鋼管と充填材のヤング係数比であり、コンクリート充填鋼管の圧縮座屈耐力に関わる値である。送電用鉄塔の設計に用いられる送電用支持物設計標準¹⁾の座屈耐力計算式（以下、JEC式と称す）では、座屈耐力 P_k の算定に用いる座屈応力 σ_k と充填鋼管の等価断面積 A_e のいずれにも n 値が関係しており、 n 値が大きくなれば P_k は小さくなる関係となっている（付録の式(1)参照）。

今後、鉄塔の高経年化に伴って大型改修工事が大幅に増加すると見込まれるため、建設費に多大な影響を与えるMC鉄塔支柱材の重量を削減することは、喫緊の課題となっている。

本研究では、充填材を従来よりも更に軽量化するため、充填材に軽量型無収縮モルタルおよび気泡コンクリートを採用した場合の支柱材の座屈耐力を把握するとともに、座屈耐力 P_k の算定に用いる n 値を20とすることの妥当性を確認するため、MC鉄塔支柱材の座屈試験を行った。

表-1 MC鉄塔支柱材の変遷概要

	既往の軽量化				今回の軽量化
充填鋼管の概要		→		→	
	当初		コンクリートの軽量化		鋼管の厚肉化
					鋼管の高強度化
鋼管	STK50		STK540		STK590
充填材	普通コンクリート		軽量コンクリート		軽量コンクリート
充填材比重	2.3		1.8		1.8
n 値	8		8		12
					充填材の更なる軽量化
					軽量型無収縮モルタル
					1.6程度
					20程度

*1 OHYAMA Takuya : (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 構造試験室 主査
*2 MIZUGUCHI Kazuyoshi : (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 構造試験室
*3 NOMURA Kenichiro : 関西電力株式会社 送配電カンパニー 電力システム技術センター 架空送電グループ副長
*4 SHIGEMOTO Hiroshi : 関西電力株式会社 送配電カンパニー 電力システム技術センター 架空送電グループ
*5 TAKISHITA Masahiro : 株式会社酒井鉄工所 鉄塔事業本部 取締役設計部長
*6 HONDA Kazuya : 株式会社酒井鉄工所 鉄塔事業本部 設計部主任
*7 UCHIKAWA Kei : 株式会社酒井鉄工所 鉄塔事業本部 設計部部長 工学博士

2. 座屈試験

2.1 試験体および試験方法

試験体一覧を表-2に、試験体の例を図-1に示す。試験体パラメータは鋼管断面（ $\phi 139.8 \times 4.5$ 、 $\phi 190.7 \times 6.0$ 、 $\phi 267.4 \times 7.0$ の3種類）、充填材（軽量型無収縮モルタル、気泡コンクリートの2種類）、および有効細長比 λ_e （19、38、57、77、96の5種類）であり、計25体である。

表-2 座屈試験の試験体一覧

試験体名	鋼管断面	充填材	座屈長さ L_k (mm)	有効細長比 λ_e ($n=20$)	
83-40-M-1	$\phi 267.4 \times 7.0$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	3,200	38	
83-40-M-2					
83-40-M-3					
91-40-M-1	$\phi 139.8 \times 4.5$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	1,700	38	
91-40-M-2			3,400	77	
91-80-M-1					
91-80-M-2					
91-100-M-1			4,250	96	
91-100-M-2					
92-20-M-1	$\phi 190.7 \times 6.0$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	1,150	19	
92-20-M-2		気泡コンクリート			
92-20-C		軽量型無収縮 モルタル	2,300		38
92-40-M-1		気泡コンクリート			
92-40-M-2		軽量型無収縮 モルタル			
92-40-C		気泡コンクリート			
92-60-M-1		軽量型無収縮 モルタル	4,800		57
92-60-M-2		気泡コンクリート			
92-60-C		気泡コンクリート			
93-20-M-1		$\phi 267.4 \times 7.0$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル		1,600
93-20-M-2	気泡コンクリート				
93-20-C	3,200		38		
93-40-C					
93-60-M-1	軽量型無収縮 モルタル		4,800	57	
93-60-M-2	気泡コンクリート				
93-60-C	気泡コンクリート				

凡例：83-40-M-1-枝番

└ 充填材の種類

M：軽量型無収縮モルタル、C：気泡コンクリート

└ 有効細長比を丸めた数値

└ 鋼管断面

1： $\phi 139.8 \times 4.5$ 、2： $\phi 190.7 \times 6.0$ 、3： $\phi 267.4 \times 7.0$

└ 試験実施年度：8：平成28年度、9：平成29年度

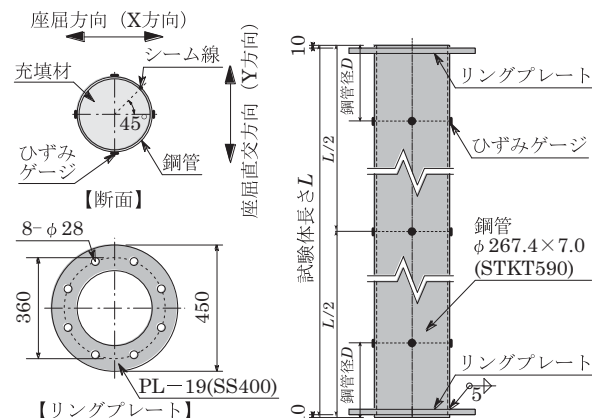


図-1 試験体（鋼管 $\phi 267.4 \times 7.0$ ）

試験体は試験体長さ L が座屈長さ L_k と一致するように計画されており、表-2中の有効細長比は n 値を20として算出している。試験体の両材端には荷重用治具を取り付けるためのリングプレートが溶接されている。

試験方法を図-2に示す。試験体の両端に円筒形支承を取り付けて両端をピン支持の条件とし、10MN試験機によって試験体芯に単調軸圧縮力を加える方法で荷重した。なお、円筒形支承の回転中心は試験体端部にあり、試験体長さ L は座屈長さ L_k と一致する。

図-1、図-2に示すように、材端から鋼管径 D だけ離れた位置と中央に2軸ひずみゲージを4枚ずつ貼付している。また、上下の円筒形支承に取り付けた計測フレームに変位計を設置し、軸方向変位と中央の横たわみを計測した。

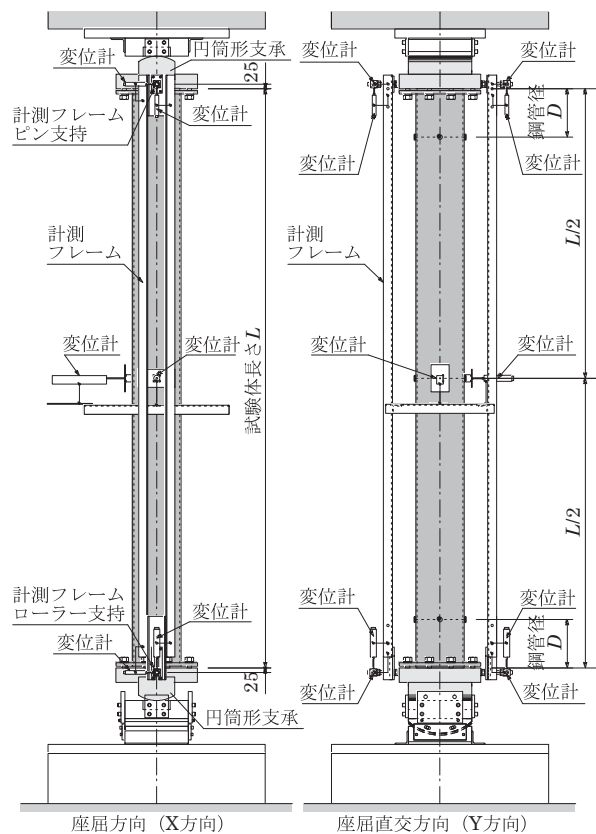


図-2 試験方法（鋼管 $\phi 267.4 \times 7.0$ ）

表-3に座屈試験に用いた鋼管の素材試験結果を、表-4には充填材の材料試験結果を示す。鋼管はいずれも鉄塔用高張力鋼管STKT590であり、充填材の軽量型無収縮モルタルは「太平洋プレユーロックスLW30」、気泡コンクリートは「発泡スチロール（EPS）コンクリート」である。平成28年度の軽量型無収縮モルタルの座屈試

験日材齢は32日と35日であり、平成29年度の座屈試験日の材齢は、軽量型無収縮モルタルが38日から58日、気泡コンクリートが28日から41日である。

2.2 試験結果

図-3に軸圧縮力 P と軸方向変形 δ_v の関係を、図-4には軸圧縮力 P と中央たわみ δ_x の関係を示す。また、表-5に試験結果の最大耐力と式(1)による座屈耐力計算値を示す。

いずれの試験体も、図-2に示す座屈方向に全体座屈を生じて耐力が低下した。有効細長比が80と100の試験体を除き、試験体鋼管の長さ方向の中央部または端部付近に局部座屈が発生している。局部座屈は有効細長比が小さい試験体ほど顕著であった。また、有効細長比が80と100の試験体は、中央に貼付したひずみゲージの値が降伏ひずみに達する以前に全体座屈を生じて耐力低下したが、有効細長比が20、40、60の試験体では、最大耐力以前に降伏ひずみに達している。

試験終了後の変形状況を写真-1に示す。

表-3 鋼管の素材試験結果

鋼管断面	鋼種	σ_{sy} (N/mm ²)	σ_{su} (N/mm ²)	伸び (%)	試験実施 年度
$\phi 267.4 \times 7.0$	STKT590	555	625	26	平成28年度
$\phi 139.8 \times 4.5$		598	671	22	平成29年度
$\phi 190.7 \times 6.0$		579	630	24	
$\phi 267.4 \times 7.0$		612	689	26	

σ_{sy} : 0.2%off-set降伏耐力、 σ_{su} : 引張強さ
試験片形状 : 12B号試験片 (試験体径 : $\phi 139.8$)
12C号試験片 (試験体径 : $\phi 190.7$ 、 $\phi 267.4$)

表-4 充填材の材料試験結果

充填材	材齢	ρ (kN/m ³)	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	試験実施 年度
軽量型無収縮 モルタル	7日	15.1	31.2	-	平成28年度
	28日	15.0	33.3	7.99	
	32日	15.1	33.9	-	
軽量型無収縮 モルタル	7日	-	44.4	-	平成29年度
	28日	16.1	44.4	11.2	
	34日	16.3	49.7	-	
	58日	16.3	47.8	-	
	7日	-	25.8	-	
気泡 コンクリート	28日	15.1	30.2	12.7	
	41日	15.0	29.8	-	

ρ : 単位容積重量、 σ_B : 圧縮強度、 E_c : 静弾性係数
供試体形状 : $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$

表-5 試験結果の最大耐力と座屈耐力計算値一覧

試験体				試験結果		計算値				試験結果と 計算値の比較	
試験体名	鋼管断面	充填材	座屈長さ L_k (mm)	最大耐力 $P_{\max}$ (kN)	Λ	$n=12$ の場合		$n=20$ の場合		$\frac{P_{\max}}{P_k(n=12)}$	$\frac{P_{\max}}{P_k(n=20)}$
						有効 細長比 $\lambda_e(n=12)$	座屈耐力 $P_k(n=12)$ (kN)	有効 細長比 $\lambda_e(n=20)$	座屈耐力 $P_k(n=20)$ (kN)		
83-40-M-1	$\phi 267.4 \times 7.0$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	3,200	3,986	64	39	4,688	38	3,945	0.85	1.01
83-40-M-2				4,213	64	39	4,688	38	3,945	0.90	1.07
83-40-M-3				4,468	64	39	4,688	38	3,945	0.95	1.13
91-40-M-1	$\phi 139.7 \times 4.5$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	1,700	1,607	62	40	1,519	38	1,311	1.06	1.23
91-40-M-2				1,503	62	40	1,519	38	1,311	0.99	1.15
91-80-M-1			3,400	846	62	79	669	77	611	1.26	1.38
91-80-M-2				808	62	79	669	77	611	1.21	1.32
91-100-M-1			4,250	550	62	99	428	96	391	1.29	1.41
91-100-M-2				579	62	99	428	96	391	1.35	1.48
92-20-M-1	$\phi 190.7 \times 6.0$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	1,150	2,962	63	20	3,101	19	2,643	0.96	1.12
92-20-M-2		モルタル		2,886	63	20	3,101	19	2,643	0.93	1.09
92-20-C		気泡コンクリート	2,300	2,481	63	20	3,101	19	2,643	0.80	0.94
92-40-M-1		軽量型無収縮 モルタル		2,492	63	39	2,726	38	2,346	0.91	1.06
92-40-M-2		モルタル		2,634	63	39	2,726	38	2,346	0.97	1.12
92-40-C		気泡コンクリート		2,188	63	39	2,726	38	2,346	0.80	0.93
92-60-M-1		軽量型無収縮 モルタル	3,450	1,810	63	59	2,102	57	1,852	0.86	0.98
92-60-M-2		モルタル		1,819	63	59	2,102	57	1,852	0.87	0.98
92-60-C		気泡コンクリート		1,712	63	59	2,102	57	1,852	0.81	0.92
93-20-M-1	$\phi 267.4 \times 7.0$ (STKT590)	軽量型無収縮 モルタル	1,600	5,467	61	20	5,827	19	4,856	0.94	1.13
93-20-M-2		モルタル		5,329	61	20	5,827	19	4,856	0.91	1.10
93-20-C		気泡コンクリート		4,443	61	20	5,827	19	4,856	0.76	0.91
93-40-C		気泡コンクリート	3,200	4,172	61	39	5,077	38	4,279	0.82	0.97
93-60-M-1		軽量型無収縮 モルタル	4,800	3,361	61	59	3,827	57	3,317	0.88	1.01
93-60-M-2		モルタル		3,314	61	59	3,827	57	3,317	0.87	1.00
93-60-C		気泡コンクリート		3,102	61	59	3,827	57	3,317	0.81	0.94

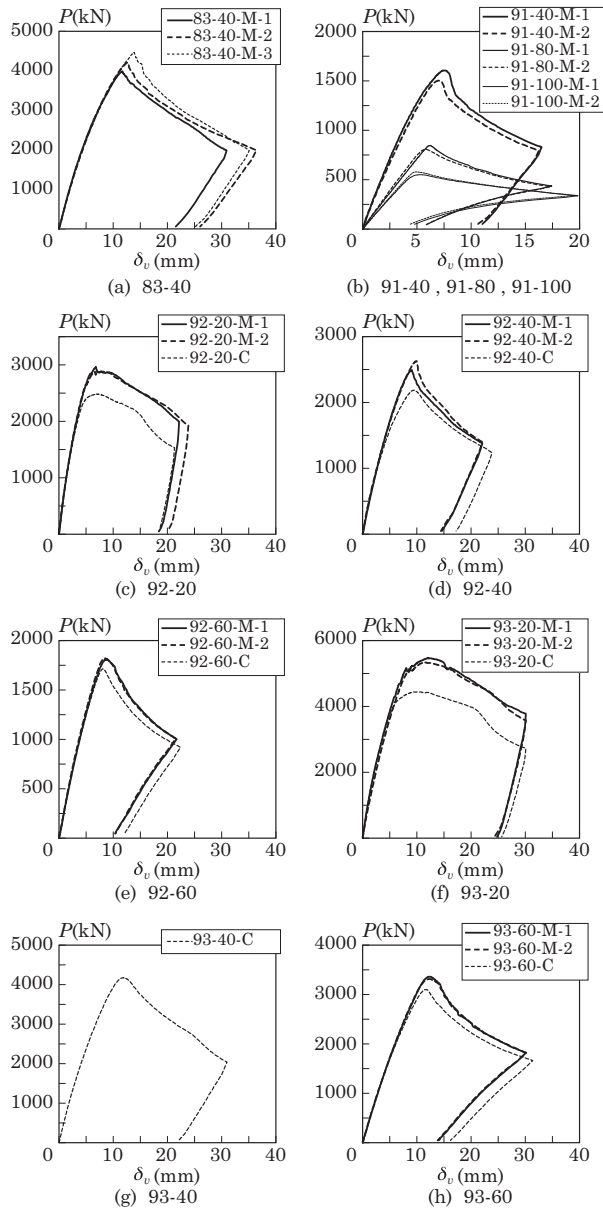
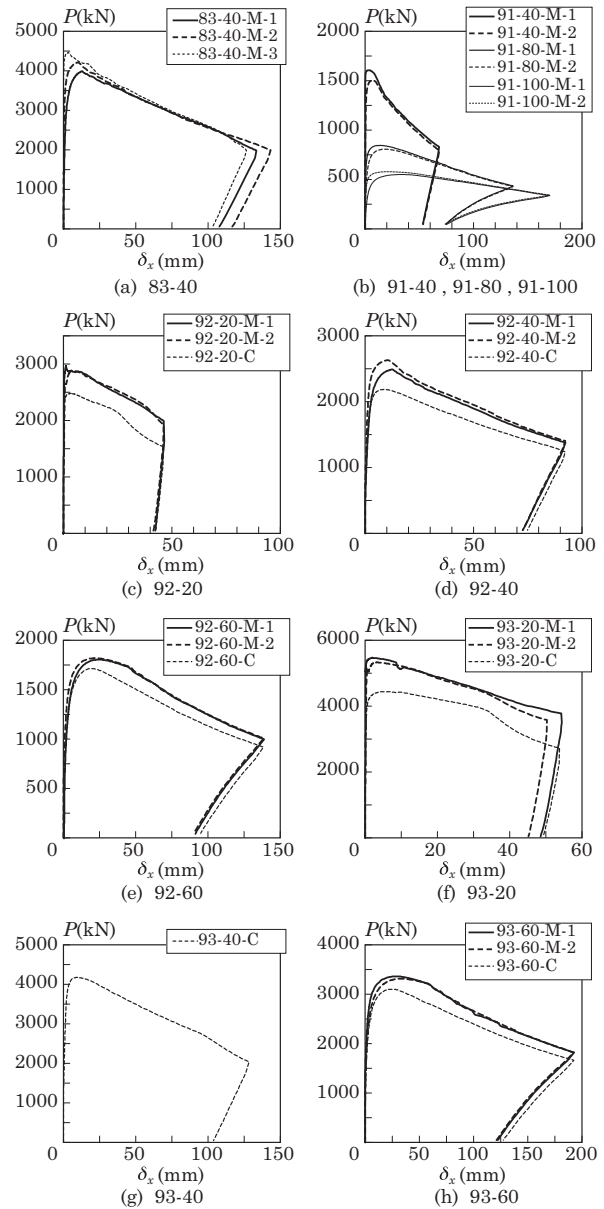
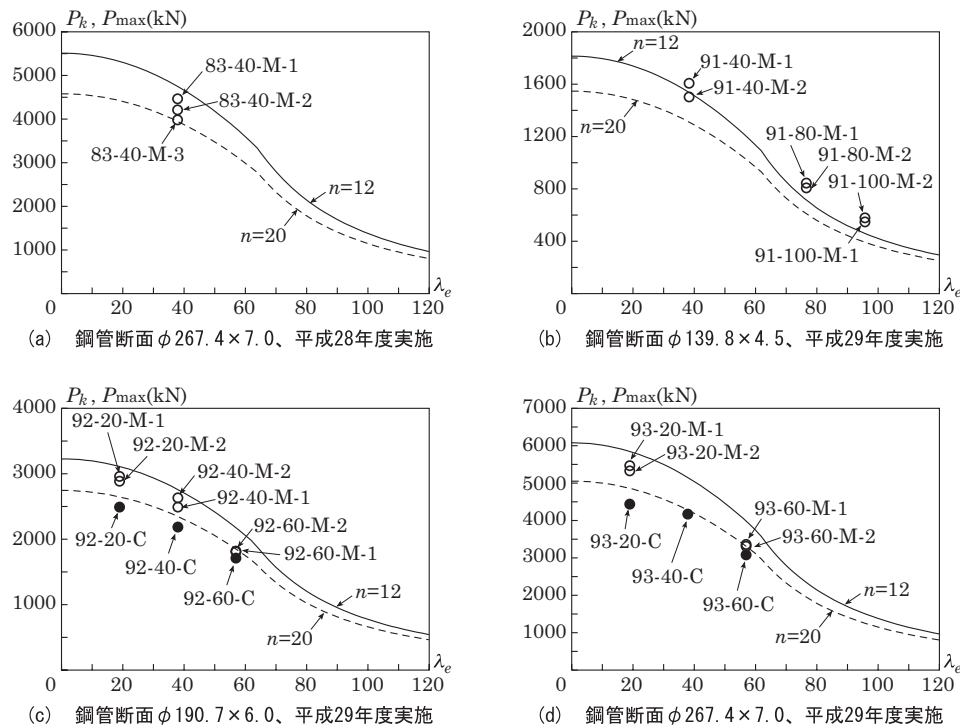
図-3 軸圧縮力 P と軸方向変形 δ_v の関係図-4 軸圧縮力 P と中央たわみ δ_x の関係

写真-1 試験後の変形状況

2.3 最大耐力と座屈耐力計算値との比較

図-5に、JEC式(式(1))によって求めた座屈耐力計算値 P_k と有効細長比 λ_e の関係を示す。実線は鋼管と充填材のヤング係数比 n を12とした場合であり、破線は $n=20$ の場合である。また、図中には試験結果の最大耐力 $P_{\max}$ をプロットしており、○は充填材が軽量型無収縮モルタルの場合、●は充填材が気泡コンクリートの場合である。なお、 $P_{\max}$ のプロットに用いた有効細長比 λ_e は、表-5の $n=20$ の場合とした。

鋼管断面が $\phi 139.8 \times 4.5$ の試験体は充填材が全て軽量型無収縮モルタルであるが、座屈試験の最大耐力 $P_{\max}$ は試験体91-40-M-2を除いて $n=12$ の座屈耐力計算値 $P_{k(n=12)}$

図-5 座屈耐力計算値 P_k と有効細長比 λ_e の関係

を上回る結果となった。一方、鋼管断面が $\phi 190.7 \times 6.0$ と $\phi 267.4 \times 7.0$ で充填材が軽量型無収縮モルタルの場合、座屈試験の最大耐力 $P_{\max}$ は $n=12$ の座屈耐力計算値 P_k ($n=12$)以下となったが、試験体92-60-M-1と92-60-M-2を除けば $n=20$ の座屈耐力計算値 P_k ($n=20$)を上回っている。試験体92-60-M-1と92-60-M-2の $P_{\max}$ を P_k ($n=20$)で除した値はいずれも0.98であることを踏まえれば、ヤング係数比を20とした座屈耐力計算値 P_k ($n=20$)は、充填材に軽量型無収縮モルタルを採用したMC鉄塔支柱材の座屈耐力の下限と考えられる。

充填材が気泡コンクリートの場合、座屈試験の最大耐力 $P_{\max}$ はいずれも充填材が軽量型無収縮モルタルの場合よりも小さく、 $n=20$ の座屈耐力計算値 P_k ($n=20$)に対する $P_{\max}$ の割合は0.91～0.97であった。

表-4に示す充填材の材料試験結果によれば、ヤング係数 E_c は気泡コンクリートが最も大きく、平成28年度の軽量型無収縮モルタルが最も小さい。JEC式では、充填材のヤング係数 E_c が大きい(ヤング係数比 n が小さい)ほど座屈耐力 P_k は大きくなるが、座屈試験の結果はJEC式の傾向と異なっている。すなわち、図-5 (c)、(d)に示す充填材が気泡コンクリートの場合の $P_{\max}$ は、充填材を軽量型無収縮モルタルとした場合に比べて小さく、有効細長比 λ_e が小さいほどその傾向は顕著となっている。これは、気泡コンクリートの圧縮強度 σ_B が軽

量型無収縮モルタルよりもかなり小さいことが要因と考えられ、降伏応力の高い鋼管に圧縮強度が相対的に小さい充填材を用いているためである。

座屈耐力 P_k を求めるJEC式では、充填材のヤング係数は考慮されるが圧縮強度は考慮されない。そのため、今回の軽量化では座屈試験によって最大耐力を確認し、試験結果とJEC式とを比較することにより、MC鉄塔支柱材の座屈耐力をJEC式により評価可能であることを確認する手法を用いた。座屈試験の結果、充填材が気泡コンクリートの場合に $P_{\max}/P_k$ ($n=20$)は0.91～0.97とやや低い結果となったが、いずれの充填材を用いてもヤング係数比を20としてJEC式により座屈耐力を評価することに問題はないと判断している。

3. おわりに

本稿では、充填材に軽量型無収縮モルタルおよび気泡コンクリートを採用した場合の支柱材の座屈耐力を把握するとともに、座屈耐力 P_k の算定に用いる n 値を20とすることの妥当性を確認するために行ったMC鉄塔支柱材の座屈試験について述べた。

充填材が軽量型無収縮モルタルの場合、ヤング係数比を20とした座屈耐力計算値 P_k ($n=20$)に対する座屈試験の最大耐力 $P_{\max}$ の割合 ($P_{\max}/P_k$ ($n=20$)) は0.98～1.48となった。一方、充填材が気泡コンクリートの場合には、

$P_{\max}/P_{k(n=20)}$ は0.91～0.97とやや低い結果となったが、いずれの充填材を用いてもヤング係数比を20として座屈耐力を評価することに問題はないことを確認した。

【参考文献】

- 1) 電気学会電気規格調査会編:JEC-127 送電用支持物設計標準, 電気書院, 1980.8

【付録】

送電用鉄塔の設計に用いられる送電用支持物設計標準の座屈耐力計算式は、式(1)で与えられる。

$$P_k = \sigma_k \times A_e \quad (1)$$

$$\sigma_k = \begin{cases} \sigma_y \left\{ 1 - 0.352 \left(\frac{\lambda_e}{\pi \sqrt{E_s / \sigma_y}} \right)^2 \right\} & (0 \leq \lambda_e \leq \Lambda) \\ \frac{1.5 \pi^2 E_s}{2.2 \lambda_e^2} & (\lambda_e \geq \Lambda) \end{cases}$$

$$\lambda_e = \frac{L_k}{r_e}, \quad \Lambda = \pi \sqrt{\frac{1.5 E_s}{2.2 \times 0.6 \sigma_y}}$$

$$r_e = \sqrt{\frac{I_s + I_c / n}{A_s + A_c / n}}, \quad A_e = A_s + \frac{A_c}{n}, \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

σ_k : 座屈応力、 σ_y : 鋼管の降伏応力

L_k : 座屈長さ、 λ_e : 有効細長比

Λ : 有効細長比 λ_e の境界値

r_e : 充填鋼管の等価断面2次半径

A_s, I_s : 鋼管の断面積と断面2次モーメント

A_c, I_c : 充填材の断面積と断面2次モーメント

A_e : 充填鋼管の等価断面積

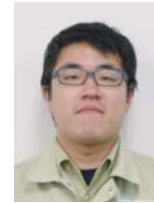
E_s : 鋼管のヤング係数、 n : ヤング係数比

E_c : 充填材のヤング係数

【執筆者】



*1 大山 卓也
(OHYAMA Takuya)



*2 水口 一義
(MIZUGUCHI Kazuyoshi)



*3 野村 憲一郎
(NOMURA Kenichiro)



*4 重本 広志
(SHIGEMOTO Hiroshi)



*5 滝下 昌洋
(TAKISHITA Masahiro)



*6 本田 和哉
(HONDA Kazuya)



*7 内川 啓
(UCHIKAWA Kei)