

## (18) 溶融亜鉛メッキ鋼管を利用した CFT 柱の偏心軸圧縮耐力に関する実験的研究

Experimental study on the strength of the concrete filled hot-dip galvanized steel tube for eccentric compression

田邊成<sup>1)</sup>, 檜崎正尚<sup>2)</sup>, 瀬井圭一<sup>3)</sup>, 岩本亜理<sup>4)</sup>, 塩屋俊幸<sup>5)</sup>, 佐藤孝典<sup>6)</sup>

- 1) 東京電力株式会社, 送変電建設本部, 架空土木グループ(〒110-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)
- 2) 東電ソフトウェア株式会社, 応用技術部, 計数技術グループ(〒110-0011 東京都港区新橋 6-19-15)
- 3) 東京電力株式会社, 千葉支店, 工務部(〒260-8635 千葉県千葉市中央区富士見 2-9-5)
- 4) 東電設計株式会社, 第二土木本部, 送変電土木部(〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)
- 5) 工博 清水建設株式会社, 技術研究所, 構造研究開発部(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
- 6) 工博 清水建設株式会社, 技術研究所, 構造研究開発部(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

The objective of this paper is to apply the concrete filled steel tube(CFT) to column member of the electric power transmission tower foundation.

On the basis experimental results, the design methods of three current design formulae are confirmed reasonable with the N-M interaction curve. And the maximum strength of the CFT composed of hot-dip galvanized steel tube is higher than that of the CFT composed of normal steel tube.

*Keywords: composite column, loading test, maximum strength, hot-dip galvanized steel tube*

### 1. はじめに

鋼管にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管柱 CFT(Concrete- Filled steel Tube)構造は, 鋼管とコンクリートの相乗効果により, RC 柱よりも構造性能(耐力, 変形能力)に優れる場合があることが知られている. 特に, 断面を構成する材料の強度を有効に発揮させることができるために, 高張力鋼や高強度コンクリートを適用することにより断面寸法を小さくすることが可能となる.

山岳地に建設される超高压送電用鉄塔基礎の柱体部と呼ばれる部位は, 鉄塔鋼管材を RC 構造で巻き建てた構造としてきた. この柱体部を, 鋼管内にコンクリートを充填するだけの CFT 構造とすれば, 施工性の向上により合理化を図ることが可能である.

一方, CFT の設計は, 土木学会<sup>1)</sup>(以下, 「PART B」と言う), 日本建築学会<sup>2)</sup>(以下, 「CFT 指針」と言う)およびドイツの「DIN18806<sup>3)</sup>」等の規準書があり, 安全性照査が可能である.

しかしながら, 対象とする柱体部は主として下記の特徴を有しており, これらの規準書の適用性が問題となる.

- ① 適用する地盤条件によって柱長さが短柱から

長柱まで変化する.

- ② 鋼管材に高張力鋼管(STKT590)を使用する. 一方, 充填コンクリートは普通コンクリート(設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>)を使用する.
- ③ 風荷重が支配的であり曲げと軸力の比すなわち偏心量がほぼ一定で荷重が作用する.
- ④ 鉄塔部材の座屈長さは, 部材の取り付け用プレートやフランジによる部材拘束効果によって, 部材の支持点間よりも短くなる.
- ⑤ 柱体部は土中構造物となるために腐食対策のために溶融亜鉛メッキ鋼管を使用する.

本論文は, 柱体部を CFT 構造とするために, 曲げモーメントと軸圧縮力が同時に作用する偏心軸圧縮試験ならびに 1/4 モデルの模型鉄塔引倒し試験を実施し, 従来の設計基準書の適用性について検討したものである. また, 溶融亜鉛メッキ鋼管を使用することによる CFT の耐力増加を確認した.

### 2. 実験の概要

載荷実験は, CFT の偏心圧縮載荷試験と柱体部を付けた模型鉄塔引倒し試験を実施した.

## 2.1 偏心圧縮試験

### (1) 試験計画

500kV 送電鉄塔基礎柱体部の形状と荷重を考慮して、6 体の CFT 試験体と比較のために中空鋼管を 1 体、溶融亜鉛メッキを施さない製管のままの鋼管(メッキ無し鋼管)を使用した CFT を 1 体、破壊断面のコンクリートに意図的に水平の隙間を設けた CFT を 1 体加えた計 9 体の実験を行った。表-1 に試験体一覧を示す。

実験に用いた鋼管は  $\phi 318.5 \times 8$  (STKT590) で、試験体を製作する前に溶融亜鉛メッキを施した。

図-1 に試験体の形状・寸法を示す。JIS12-B 号試験片で実施した鋼材の引張試験結果ならびにコンクリートシリンダーの圧縮試験結果を表-1 に併記する。

破壊断面(図-1 の A-A 断面)に隙間を設けた試験体は、試験体を逆さにし、試験体上端から A-A 断面までコンクリートを打設し、その断面に 5mm の厚さの発泡スチロールを設置した後、残りのコンクリートを打設した。

### (2) 載荷装置および載荷方法

本実験では、図-2 に示すように、柱上端がピン、柱下端が水平ローラーになるように載荷装置を設計した。すなわち、理論的には両端ピンの試験体の半分の長さで試験が可能となる。図-3 に載荷装置の概略を示す。この載荷試験装置は偏心位置に単調圧縮荷重(黒塗り矢印方向)することにより、載荷梁底部に設置したローラーが左方向(白抜き矢印方向)に水平変位する仕組みとなっている。

表-1 試験体一覧

試験体 番号	鋼管 形状	材料強度 N/mm <sup>2</sup>		Lk/D	$\lambda$	偏心量 e (m)	偏心率 m	試験体	隙間の 有無	溶融亜鉛 メッキ
		コンク リート	鋼材(注)							
C10E2	$\phi 318.5 \times 8$ (STKT590)	36.6	593 (547)	10	28	0.2	2.6	CFT	無	有
C15E1				15	42	0.1	1.3			
C15E2-1				15	42	0.2	2.6			
C15E2-2				15	42	0.2	2.6		有	
C15E5-1				15	42	0.5	6.5			
C15E5-2				15	42	0.5	6.5			
C25E2				25	72	0.2	2.6	無	無	
C25E5				25	72	0.5	6.5			
S15E2				15	42	0.2	2.6	鋼管	—	有

注)鋼材の材料試験値は溶融亜鉛メッキ鋼管の値を示す。( )内は製管のままの鋼管の材料試験値を示す

$$\text{偏心率} : m = \frac{e \cdot D/2}{i^2}$$

ここで、e : 偏心量 (m), D : 鋼管径 = 0.3185 (m), i : 鋼管のみの断面二次半径 = 0.11 (m)

$\lambda$  : 細長比  $\lambda = Lk / i$

Lk : 座屈長さ(m)

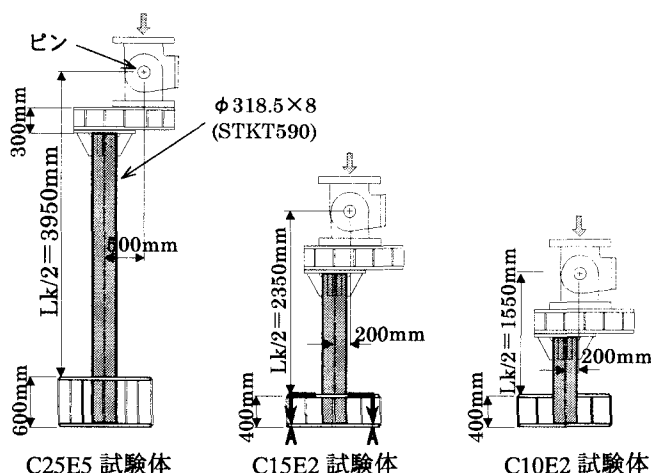


図-1 試験体形状図

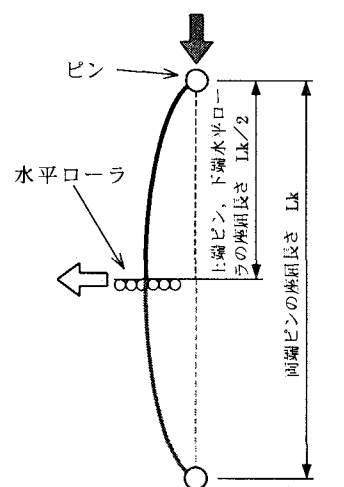


図-2 座屈長さの考え方

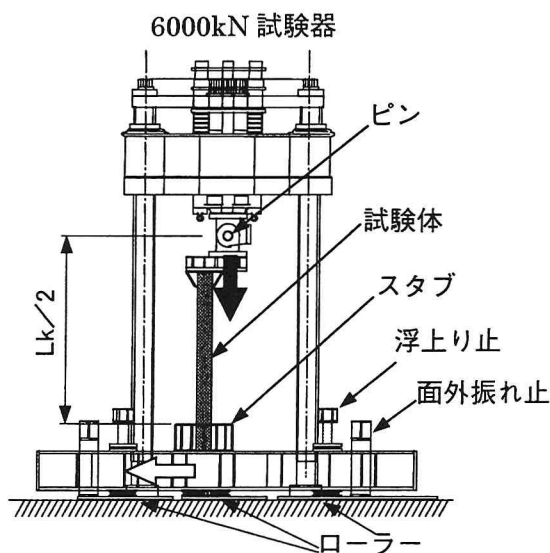


図-3 荷重試験装置

荷重は単調荷重とし、ローラーの水平移動量が300mmを目安として実施した。

## 2.2 鉄塔引倒し試験

### (1) 試験計画

模型鉄塔は図-4 に示すとおり、最下3パネルの鋼管鉄塔にCFT柱体部を設置したものである。柱体部下端は固定した。CFTは鉄塔材と同じφ139.8×4.5(STKT590)の鋼管に高流動コンクリートを充填したものをを使用した。柱体部の細長比は約88である。CFTに使用した鋼管ならびに高流動コンクリ

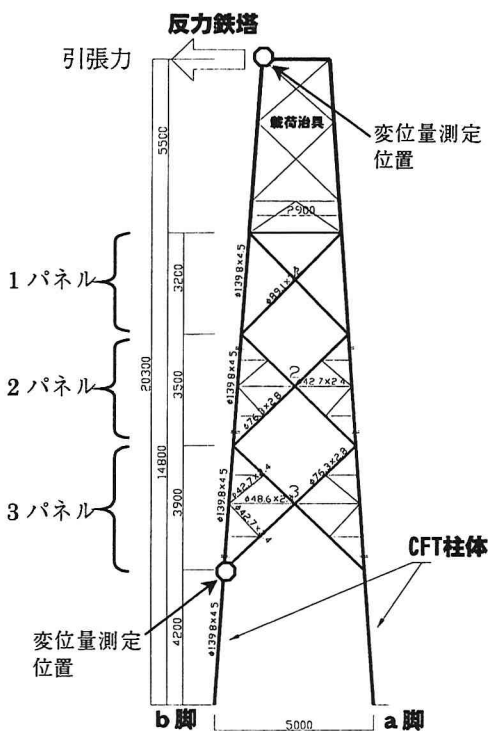


図-4 模型鉄塔構造図

ートの材料試験結果を表-2に示す。

表-2 鋼管ならびにコンクリートの材料試験結果

降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )		コンクリートの圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
引張試験	短柱圧縮試験	
704	708	34.2

### (2) 荷重方法

鉄塔頂部に設置した荷重治具を反力鉄塔を介してワイヤーで引張ることによって行った。CFT柱体に作用する荷重は、図-4においてb脚が圧縮力でa脚が引張力となる。

## 3. 実験結果と考察

表-3 に実験結果を示す。試験体下端の曲げモーメントは、荷重荷重に(偏心量+水平変位)を乗じて求めた。

表-3 試験体一覧

試験体番号	最大荷重 (kN)	水平変位量 (mm)	曲げモーメント(kN-m)	
			天端	下端
C10E2	2324	42	465	562
C15E1	3031	64	303	497
C15E2-1	1962	70	392	530
C15E2-2	1578	100	316	473
C15E5-1	936	91	468	553
C15E5-2	824	116	412	508
C25E2	1331	189	266	518
C25E5	748	220	374	538
S15E2	1381	66	276	367

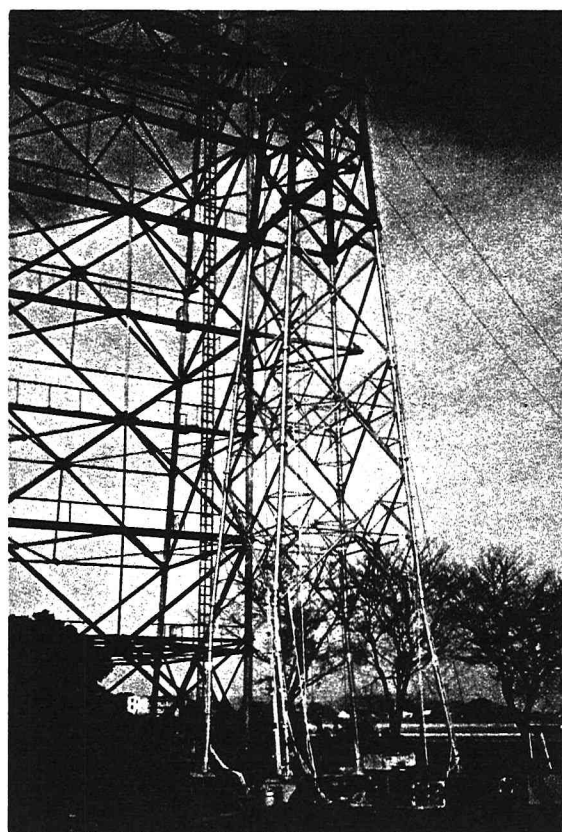


写真-1 荷重試験後の模型鉄塔全景

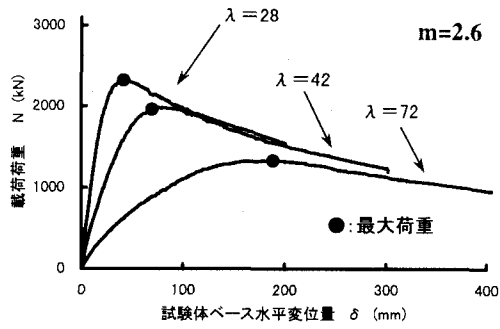


図-5 載荷荷重-水平変位関係(m=2.6)

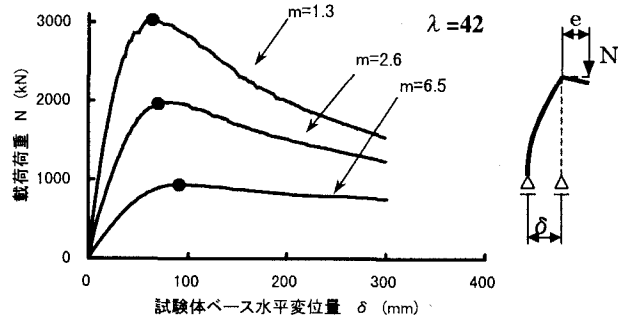


図-6 載荷荷重-水平変位関係( $\lambda=42$ )

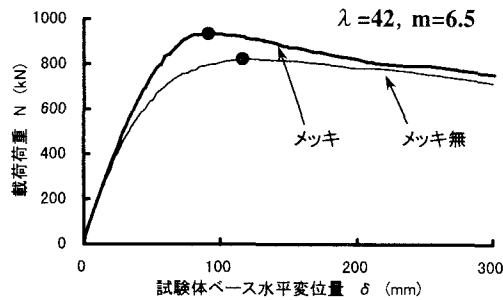


図-7 溶融亜鉛メッキによる耐力増加

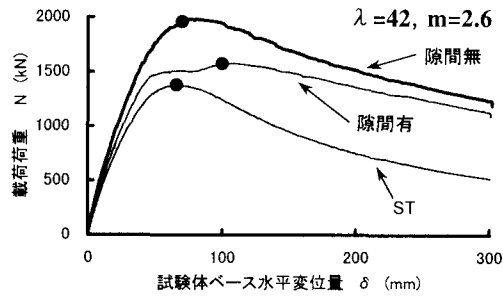


図-8 隙間による耐力低下

### 3.1 偏心圧縮試験

#### (1) 細長比の耐力への影響

図-5 に溶融亜鉛メッキ鋼管を使用した CFT の偏心率が同じで細長比を変化させたときの載荷荷重(N)一試験体下端水平変位( $\delta$ )関係を示す。最大耐力は細長比が長くなるにつれて低下し、耐力時の変位は大きくなる傾向を示す。

#### (2) 偏心率の耐力への影響

図-6 に細長比が同じで偏心率を変化させたときの N- $\delta$  関係を示す。最大耐力は偏心率が増加するに従って低下する。変位量は、偏心率が大きくなってもほぼ一定値となっている。従って、最下端断面に作用する  $P\delta$  曲げモーメントは、偏心率の増加に従って小さくなっている。

#### (3) 溶融亜鉛メッキ鋼管の耐力増加

柱体部に防錆の目的で実施する溶融亜鉛メッキによる鋼管の強度・変形特性の変化を把握することを目的として、製管のままの鋼管(メッキ無)を使用した CFT との比較検討を実施した。図-7 に亜鉛メッキ鋼管とメッキ無し鋼管を比較した結果を示す。同図に示すとおり、溶融亜鉛メッキ鋼管を使用することにより、下記の効果が確認された。

- 1) 最大耐力で約 14% の増加が確認された。
- 2) 曲げ剛性が高くなり、水平変形量が押さえられる。

載荷試験に先だって実施したメッキ有、無鋼管の引張材料試験および鉄塔引倒し試験に先だって実施したメッキ有鋼管の短柱圧縮試験、引張材料試験結果から確認された傾向を述べる。

- 1) メッキ有鋼管の引張降伏点強度は、メッキ

無鋼管に較べて増加する。

- 2) メッキ有鋼管の短柱圧縮試験で得られた降伏点強度は引張材料試験の降伏点強度とほぼ同等である。

#### (4) 破壊断面に設けた隙間による耐力低下

図-8 に破壊断面に隙間を設けた試験体と通常の試験体を比較した結果を示す。隙間を設けた試験体は通常の試験体に較べて最大耐力が低下し、鋼管の最大耐力に近づく。

隙間を設けた試験体の載荷荷重は、変位量が 50mm(載荷荷重 1300kN)程度で増加しなくなるが、その後変位量 80mm 程度で再度増加し、最大耐力になっている。これは、50mm 程度の変位量において隙間の影響により鋼管に近い挙動で最大耐力を迎えようとするものの変位量約 80mm の段階で圧縮側の隙間が閉塞し CFT としての挙動に移したためと考えられる。この傾向は、試験装置の性能から決まる最大変位量付近(300mm)では隙間の有無による荷重差が少なくなることからもうかがえる。

#### (5) 軸力-曲げモーメント関係(N-M 関係)

図-9 に最大荷重時の N-M 関係を示す。曲げモーメントの実験値は、載荷荷重に偏心距離を乗じた値となっている。また、同図には主な 3 つの規準書(「PART B」, 「CFT 指針」, 「DIN」)で計算した N-M 相関曲線を示した。各規準書の計算方法は下記の通りとした。

- ・ コンクリートの圧縮強度および鋼管の引張材料試験結果をそのまま設計強度とした。
- ・ 全ての材料係数ならびにコンクリートに乗じる低減係数を 1 として計算した。

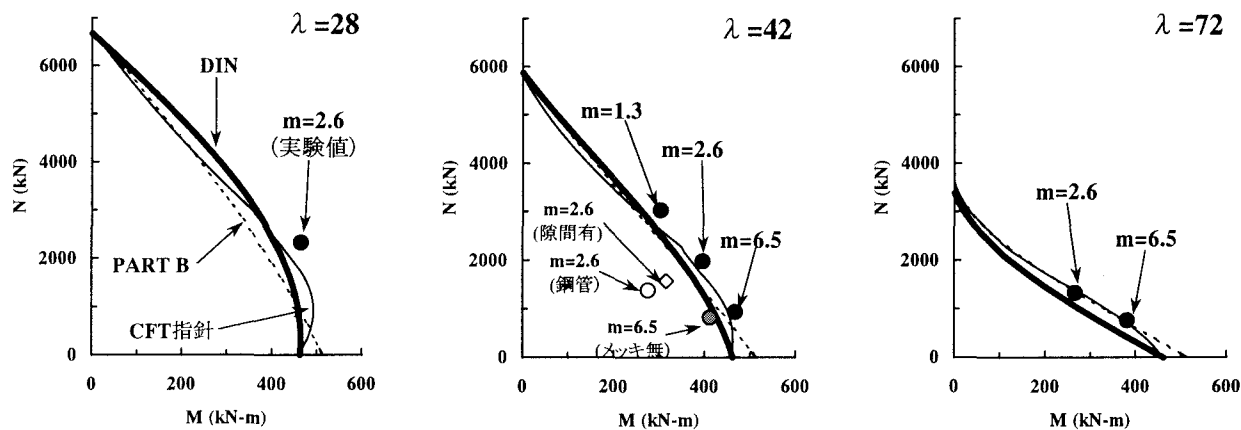


図-9 試験体頂部におけるN-M相関関係

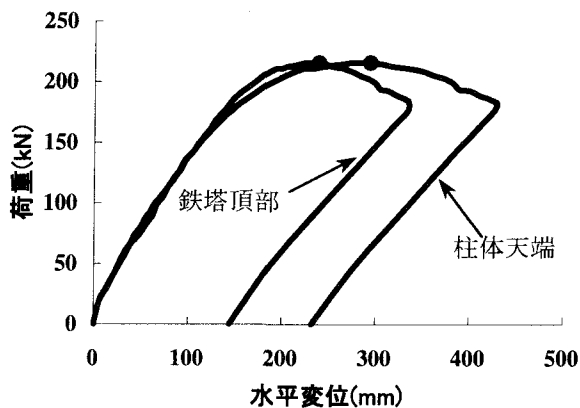


図-10 載荷荷重と鉄塔変位量の関係

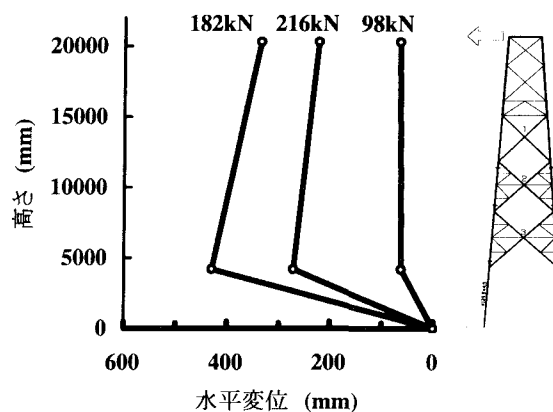


図-11 荷重毎の変位分布

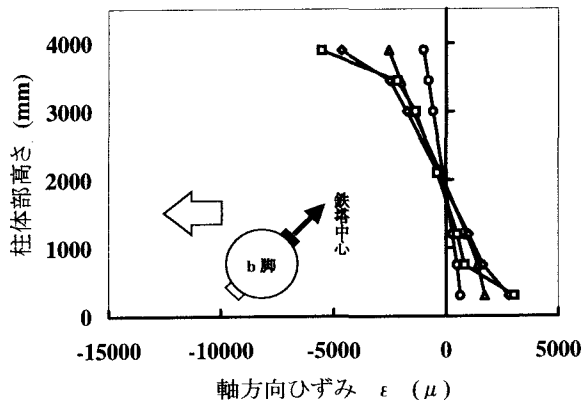
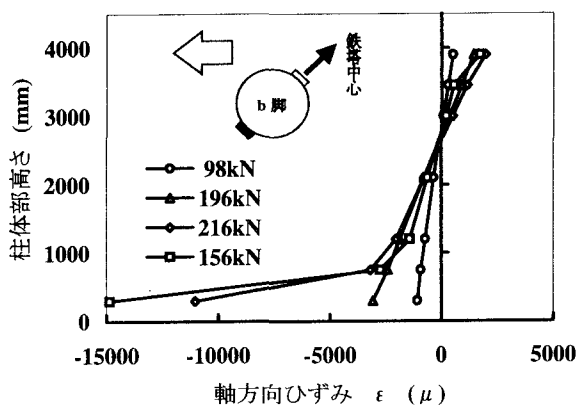


図-12 b脚CFT柱体部の荷重毎のひずみ分布

- ・ 曲げモーメントは、断面耐力に式(1)に示す  $P$   $\delta$  曲げモーメントを考慮した値とした。

$$M_U = M_B \cdot (1 - P_v / P_{crv}) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $M_U$ ：載荷点における曲げモーメント、 $M_B$ ：破壊断面における曲げモーメント、 $P_v$ ：圧縮荷重、 $P_{crv}$ ：オイラーの座屈荷重である。

同図より下記の傾向が確認された。

- 1) 溶融亜鉛メッキ鋼管を使用した CFT の断面耐力は、鋼材の引張降伏点強度を用いて算定可能である。
- 2) 3 つの基準書は、高張力鋼管に普通コンクリートを使用した CFT の設計耐力を精度良く推定可能である。
- 3) 隙間の有る CFT の最大耐力は、鋼管と同程度と考えて設計する必要がある。

### 3.2 鉄塔引倒し試験

#### (1) 頂部の引張荷重と柱体部変位の関係

模型鉄塔頂部の引張荷重は、図-10 に示すとおり 216kN 載荷した段階でピークとなり、その後、柱体部天端が 430mm(鉄塔根開きの約 10%)となるまでまで載荷を続けたが、急激な荷重低下は見られなかった。この時、鉄塔は倒壊までに至らなかった。(写真-1, 図-11 参照)

#### (2) CFT の曲げモーメント分布

図-12 に圧縮脚となる b 脚の柱体部のひずみ分布を示す。同図より、最大荷重までは荷重増加に対してどの位置においても同程度のひずみの増加率となっている。最大荷重以降は、最下端および最上端のひずみだけが急激に増加する傾向を示し、中間のひずみは逆に減少している。これは、最下端と最上端のいずれかに塑性ヒンジが形成されたためと考えられる。柱体部に作用する曲げモーメントは、最大荷重まではほぼ柱中心で反転する逆対称曲げモーメント分布となっている。

#### (3) N-M 関係

図-13 に実験値と、「DIN18806」に準じた耐力式で計算した N-M 関係を比較した結果を示す。

同図の実線は、座屈長さ  $L_k$  を 4.2m( $\lambda=88$ )として全体座屈による低減と  $P\delta$  曲げモーメントを考慮した値である。本郷ら<sup>4)</sup>の実験によれば、鋼管鉄塔の座屈長さは部材の支持点間距離よりも短くなる。同図の点線は、柱長さによる全体座屈を考慮する前の全塑性耐力である。同図より、実験値は「DIN18806」の計算値よりも安全側の値であり、全塑性耐力よりも小さくなっている。

これは、座屈長さが支持点間距離よりも短くなっていること、本実験がどちらかと言えば曲げモーメントが卓越する領域( $m=4.0$ )のために全体座屈の影響

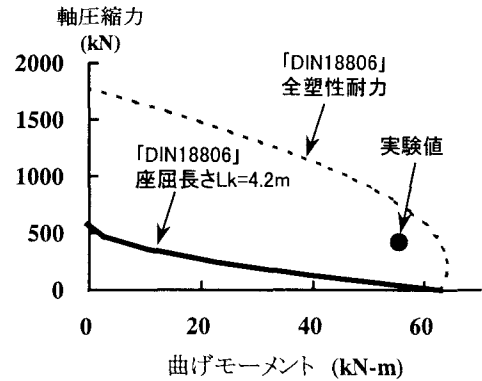


図-13 CFT 柱体の実験値と計算値の N-M 相関関係の比較  
響を受けにくかったためと考えられる。

### 4. まとめ

本研究は、溶融亜鉛メッキされた高張力鋼管を使用した CFT の偏心軸圧縮耐力について実験的に検討したものである。まず、中空鋼管：1 体、CFT：8 体について実験を行い、既往の 3 つの規準書による計算値と実験値の比較から、これらの規準書が鉄塔基礎柱体部に適用可能であることを確認した。また、溶融亜鉛メッキの耐力増加、破壊面の隙間による耐力の低下を確認した。

さらに、模型鉄塔の引倒し試験から既往の規準書の適用性が確認された。

### 謝辞

本研究は、栗田章光教授(大阪工業大学)、前川宏一教授(東京大学)に御指導を賜った。ここに、深く感謝致します。

- 1)土木学会；鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，平成 9 年版
- 2)日本建築学会；コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，1997 年制定
- 3)DIN18806, Teil1: Tragfähigkeit von Verbundstützen, Berechnung und Bemessung, Sept. 1980
- 4)本郷榮次郎，深沢隆，鈴木正嘉，小川正浩，高木雄二，石田交広；鋼管鉄塔の座屈長さ係数に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1999.9