

# 論文 RC かん合方式接合構造の耐力性能

井上 尚美\*1・鎌田 則夫\*2

要旨：現在の鉄道高架橋の電柱支持基礎（RCかん合方式接合構造）の縮小化を試みた。その際、基礎の壁厚は 80mm 程度と薄く、電柱の落とし込み深さ（拘束深さ）も 500mm 程度となる。このような構造において、自由振動試験および曲げと水平力に対する基礎の耐力確認試験をおこなった。そして、自由振動試験結果より設計水平震度を算定するための基礎別補正係数 $\Delta_4$ ・ $\Delta_5$ を求め、耐力確認試験結果より基礎の耐力算定式を導き出した。

キーワード：基礎別補正係数( $\Delta_4$ ・ $\Delta_5$ )、押し抜きせん断耐力算定式、薄肉構造、拘束深さ

## 1. はじめに

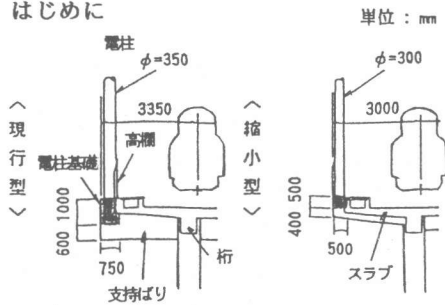


図-1 電柱基礎概略図

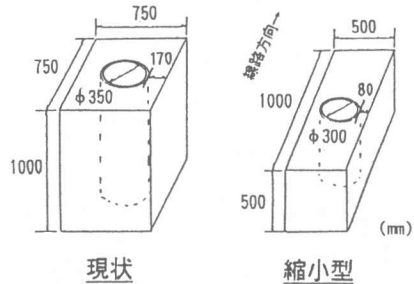


図-2 電柱基礎詳細図

現在の鉄道高架橋の電柱支持基礎は、高欄の外側に独立した梁で支える構造となっている。また、電柱自体の耐震性能上、基礎と電柱との接合部は隙間に砂を詰めた、RCかん合方式接合構造（基礎の開口部に電柱を落とし込んだ形式）となっている。このような構造のため規模も比較的大きく、形状も重々しいものとなっており、電柱支持基礎の張出し部分の用地確保の問題や、高架橋全体の景観を損ねる要因ともなっている。

そこで、電柱基礎を高欄内に収めるために現状よりも細径の電柱を採用し、なおかつ保守用通路の幅も確保できる縮小型電柱支持基礎の検討をおこなった。（図-1, 2 参照）

これまでに、横補強鉄筋の形状・鉄筋量、基礎高さ等を変えた、計7体の縮小型電柱基礎について、その耐力を確認する試験をおこなってきた。その結果、

- ① 定着深さの浅い基礎の破壊モードは、曲げと水平力による基礎上部の押し抜きせん断破壊となる。
- ② その破壊面は、荷重方向に対して、ほぼ 60° となる。
- ③ 基礎頭部の横補強鉄筋の鉄筋量を増やすこと、または基礎高さを多少でも高くすることによって、破壊耐力は増す。

ということが確認された<sup>1)・2)</sup>。

本論文では、壁厚が薄く、拘束深さ（落とし込み深さ）の浅い構造について、

\* 1 : 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 (正会員)

\* 2 : 同 上 (正会員)

- (1) 自由振動試験により縮小型電柱支持基礎の振動特性を把握し、耐震設計に必要なパラメータ（基礎別補正係数： $\Delta_4 \cdot \Delta_5$ ）を求め、
- (2) 耐力確認試験結果より、押し抜きせん断耐力算定式を導き出した。

## 2. 自由振動試験

### 2.1 試験概要

試験の概要について図-3に、試験の対象とした電柱部および基礎部について表-1に示す。表に示すように、基礎高さ（落とし込み深さ）の異なる2種類を対象とした。試験は電柱の頭部を載荷点とし、ロードセルを介して下方に固定点を設けたワイヤーロープをシメラーで緊張することにより、所定の荷重を載荷した。この時点で電柱の変形を測定し、次にワイヤーロープの緊張を瞬時に解放して電柱に自由振動を与え、振動加速度を測定した。載荷は300kgfごとにおこない、電柱設計荷重(1125kgf)、電柱破壊荷重(1800kgf)まで繰り返し載荷をおこなった。

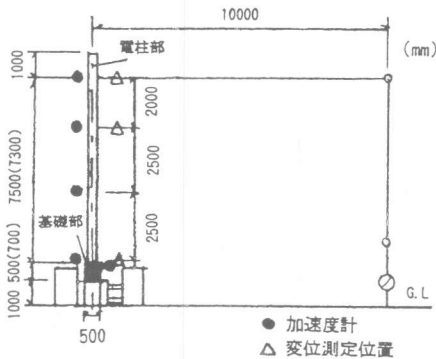


図-3 自由振動試験概要

表-1 試験体一覧表

単位：mm

種類	電柱基礎部			電柱部			
	幅	高さ	落とし込み深さ	品種	径	壁厚	長さ
Type-A	1000	1500	500	9-30-N9B	300	6.5	9000
Type-B	1000	1500	700				

### 2.2 自由振動試験結果

試験により得られた各値について表-2に示す。まず、固有振動数についてであるが、電柱の変位量に伴う変化は見られず、Type-A については 1.21Hz、Type-B については 1.7Hz 程度となった。また、減衰定数に関しては、Type-A については変化が見られず、10%程度となった。一方、Type-B については若干の変化が見られたが、平均値として7%程度の値となった。また、電柱・基礎部ともに、電柱の設計荷重時においては、十分耐力を有していた。

表-2 自由振動試験解析結果

基礎の種類	Type-A	Type-B
固有振動数 (Hz)	1.2	1.7
曲げ剛性 (tf·m)	$1.6 \times 10^3$	$1.6 \times 10^3$
基礎の水平バネ定数 (tf/m)	$1.6 \times 10^3$	$1.6 \times 10^3$
基礎の回転バネ定数 (tf·m/rad)	$4.6 \times 10^2$	$2.9 \times 10^2$
減衰定数	0.1	0.07

### 2.3 応答解析結果

現在の耐震設計は、地震による電柱の被害は構造物と電柱の共振によって生じると考えられることから、電車線路設備設計指針では、構造物と電柱の固有周期によって震度を修正する修正震度法を採用している。これは、電柱の水平震度を、基準水平震度に構造物の種類・地盤種別・電柱の種類などに応じて補正された補正係数を乗じて求める方法であり、式(1)によって表される。

$$k_h = \Delta_1 \cdot \Delta_2 \cdot \Delta_3 \cdot \Delta_4 \cdot \Delta_5 \cdot K_0 \quad \dots (1)$$

$k_h$  : 設計水平震度  
 $\Delta_1$  : 地域別係数  
 $\Delta_2$  : 地盤別係数  
 $\Delta_3$  : 地盤種別ごとに定まる高架橋の応答特性に応じた補正係数  
 $\Delta_4$  : 電車線柱の基礎種別ごとに定まる補正係数  
 $\Delta_5$  : 高架橋と電車線柱の動的相互作用によって定まる補正係数  
 $K_0$  : 標準設計水平震度 (0.2)

ここで、 $\Delta_4 \cdot \Delta_5$ は基礎形式により定められるものである。したがって、縮小型基礎に適合するような $\Delta_4 \cdot \Delta_5$ を決定することが必要となる。そこで、前節の自由振動試験結果から応答解析をおこない、鉄道高架橋と電柱における縮小型電柱基礎の補正係数 ( $\Delta_4 \cdot \Delta_5$ ) を求めた。その結果を表-3に示す。なお、他の補正係数は、すべて最大値を用いている。

表-3 応答解析結果

係数		$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_5$	$K_0$	$k_h$
基礎高	h=500	1.0	1.0	2.8	10.0	0.7	0.2	3.92
	h=700				7.0			2.74

### 3. 耐力確認試験

#### 3.1 試験概要

耐力確認試験は、試験の都合上2つの方法（試験方法A, B）でおこなった。試験概要について図-4に、試験体の違いについて表-4に、また、各供試体の横補強鉄筋配筋図について図-5に示す。

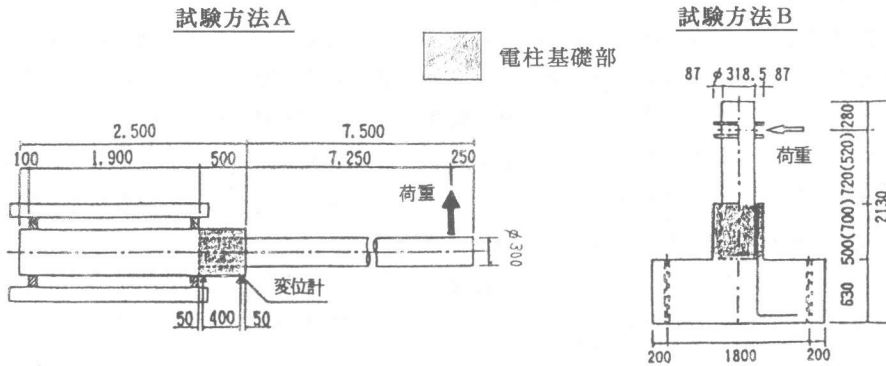


図-4 試験概要図

表-4 試験体の違い

試験方法	電柱基礎の違い	電柱部長さ (m)	接合部
A	補強鉄筋の形状・鉄筋量	8.0 #1	ポリウレタン系樹脂充填#2
B	基礎高さ、座板付	1.5	砂詰め

#1: 実物大

#2: ばね定数 2 tf/m

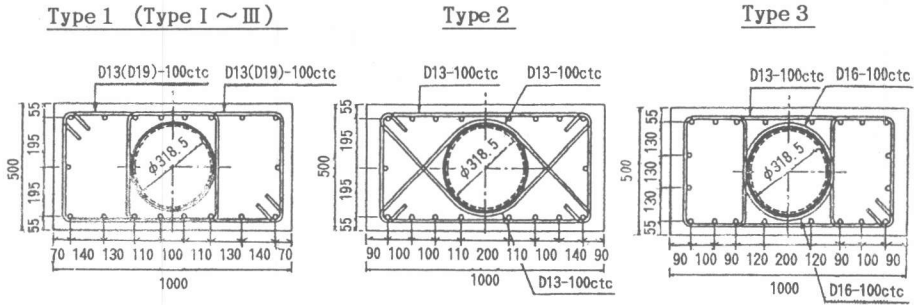


図-5 供試体の横補強鉄筋配筋図

試験方法Aは、横補強鉄筋形状・鉄筋量の異なるタイプ (Type1~3) について、実物大の電柱を用い、基礎を寝かせた状態で0.2tf ピッチで載荷した。試験方法Bは、基礎高さ・横補強鉄筋量の異なるタイプ (Type I ~ III) について、実際よりも長さの短い電柱を用いて2tfピッチで載荷した。供試体はともに電柱部・基礎部からなり、載荷する電柱は基礎の耐力を確認する目的から、設計荷重に耐えられるSC杭(φ=318.5mm)を用いた。また、形状保持と電柱建て込み精度の確保の点から、鋼管(φ=335.6, t=7.9)を内型枠として用いた。なお、座板付としたものは耐力の増加をはかるため、型枠鋼管の底に鉄板を取り付けたものである。また、配筋についてであるが、Type I ~ IIIは、Type1と同様の配筋形状で、軸方向鉄筋・横補強鉄筋とも D19 を用いたものである。試験時には、基礎のひびわれ発生荷重、電柱設計荷重、基礎設計荷重時のひびわれ状況を確認し、破壊に至るまで載荷をおこなった。

### 3.2 基礎発生応力から求まる断面力

耐力確認試験では、現在の地震時設計耐力に対し、縮小型電柱支持基礎がどれほどの耐力を有するかを確認するわけであるが、試験方法Bにおいては載荷点と基礎上面(地際)との距離が短いため、水平力に大きな差が生じ、2つの試験結果をそのまま比較することはできない。そこで、地際発生モーメントを重視し、そのモーメントを発生させるような水平力(載荷荷重)を求め、以下に示すような考え方(図-6)のもとに、曲げと水平力が作用した際に基礎に発生する応力から断面力を算定し、比較することとした。

試験方法A :  $M = 2.8 \text{ tf m}$ ,  $H = 3 \text{ tf}$  【電柱の地震時における地際発生モーメント<sup>3)</sup>】

試験方法B :  $M = 2.8 \text{ tf m}$ ,  $H = 38.89 \text{ tf}$  ( $h=500 \text{ mm}$ ),  $H = 53.85 \text{ tf}$  ( $h=700 \text{ mm}$ )

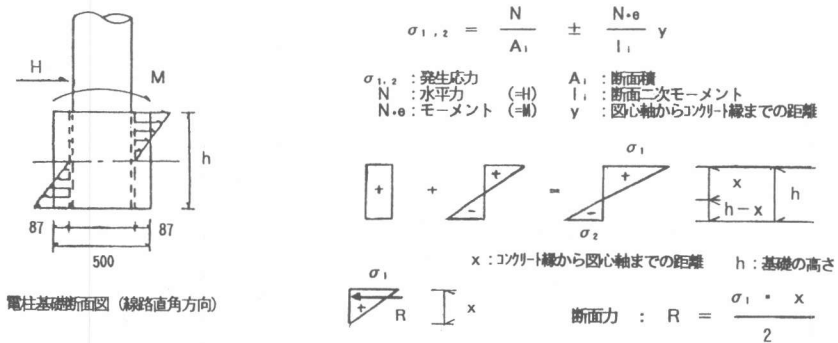


図-6 考え方の式および図

### 3.3 「押し抜きせん断耐力」算定式

はじめに、今回のような、薄肉でしかも拘束深さの浅い構造の破壊性状である「押し抜きせん断破壊」について述べる。

図-7に破壊時のひびわれ状況を示す。最初のひびわれは、①基礎上面に荷重方向に平行にはいり、②つづいて同じ上面に電柱の周囲から斜めひびわれが発生する。そして、最終的にその斜めひびわれが進行し、基礎の上部が押し出される状態で破壊にいたる。

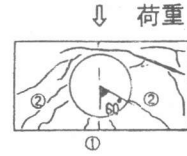


図-7 ひびわれ状況

試験の結果、破壊は前述のような押し抜きで生じたため、面部材の設計押し抜きせん断耐力の算定式と、棒部材の設計せん断耐力算定式をもとに、次のような算定式によって押し抜きせん断破壊に対する設計耐力を求めた。

$$V = V_c + V_s \quad \dots (2)$$

- $V$  : 押し抜きせん断耐力 (kgf)  
 $V_c$  : 横補強鉄筋を用いない部材の受け持つ耐力 (kgf)  
 $V_s$  : 横補強鉄筋の受け持つ耐力 (kgf)

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad \dots (3)$$

- $\beta_d$  :  $4\sqrt{100/d} \leq 1.5$        $u_p$  : 設計断面の周長で、荷重面から  $d/2$  だけ離れた位置の周長  $u+2d$  (cm)  
 $\beta_p$  :  $3\sqrt{100p_c} \leq 1.5$        $p_c$  : せん断引張鉄筋比で、2方向の鉄筋に対する平均値とする  
 $\beta_r$  :  $1 + 1/(1+0.25u/d)$        $f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $f_{pcd}$  :  $0.6\sqrt{f'_{cd}}$   
 $u$  : 荷重面の周長  $a+2b$  (cm)  
 $d$  : 有効高さ (cm)

$$V_s = A_s / \sin \alpha \cdot f_{wy} \cdot z / s \quad \dots (4)$$

- $A_s$  : 基礎高さ半分までのせん断補強鉄筋の総断面積 (cm<sup>2</sup>)       $\alpha$  : 横補強鉄筋が荷重直角方向となす角度 (°)  
 $f_{wy}$  : 横補強鉄筋の設計引張降伏強度で4000(kgf/cm<sup>2</sup>)以下とする       $z$  : 軸方向鉄筋の純かぶり (cm)  
 $s$  : 横補強鉄筋の配置間隔 (cm)

なお、この設計計算式における、荷重面の周長 ( $u$ )・横補強鉄筋の総断面積 ( $A_s$ )などは、破壊面が荷重方向に対してほぼ  $60^\circ$  となることや、基礎の上部に応力が集中することなど、試験結果をもとに決定した。各値のとり方について図-8に示す。

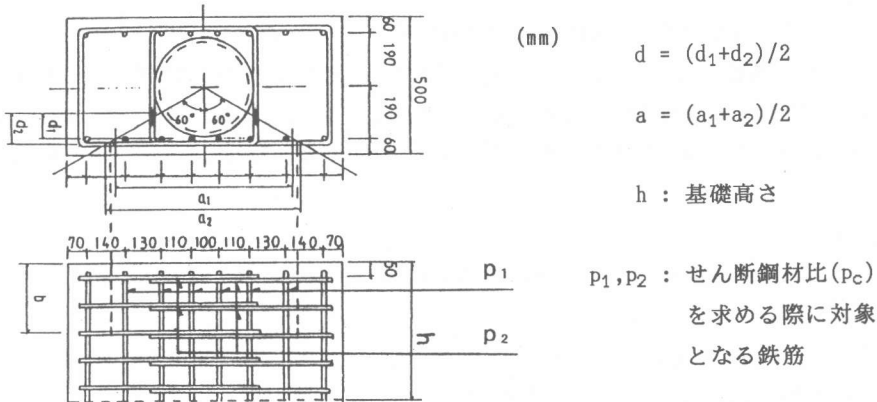


図-8 各値の取り方

### 3.4 試験結果

試験結果と算定式による計算結果について表-5に、ひびわれ発生状況について図-9に示す。

表-5 試験結果と計算値

Type	供試体の種類	$f'_{ck}, f_{wy}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$As/sin\alpha$ (cm <sup>2</sup> )	斜め $\theta$ M'	実験値 R(tf) M(tf·m)	計算値 Rd(tf)	R/Rd
1	h=500, 刹	524, 3990	5.07	9.75	66.97 [21.39]	67.69	0.99
2	h=500, 刹	485, 3990	7.17	7.50	68.79 [21.97]	66.06	1.04
2'	h=500, 刹	416, 3990	7.17	7.50	57.67 [18.42]	62.34	0.93
3	h=500, 刹	379, 3888	16.30	9.00	88.55 [28.28]	70.50	1.23
I	h=500, 砂	441, 3770	11.46	8.25	78.79 [16.56]	76.39	1.03
II	h=700, 砂	400, 3770	17.19	8.70	87.54 [18.98]	75.74	1.16
III	h=700, 板	382, 4024	22.92	9.57	89.41 [19.45]	135.87	0.66

h : 基礎高さ 刹 : 刹クリン系樹脂充填 砂 : 砂詰め 板 : 砂詰め、座板付き  
 $f'_{ck}$  : コンクリート圧縮強度  $f_{wy}$  : 横補強筋の降伏強度  
 $As/sin\alpha$  : 基礎高半分までの横補強筋 M' : 斜めひびわれ発生モーメント (tf·m)  
 R : 実破壊耐力 M : 実破壊モーメント

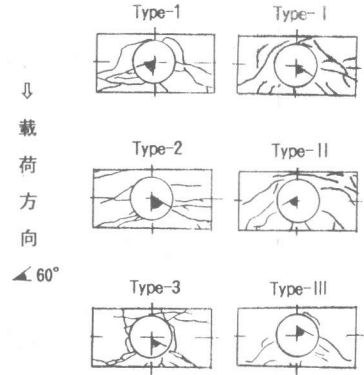


図-9 ひびわれ発生状況

表中のType-1～3は試験方法A、Type-I～IIIは試験方法Bによるものである。また、Type-2とはType-2と同様の配筋のものである。表に示すように、算定式による計算結果と実験結果の値は、ほとんど一致することが確認された。その中で、Type-IIIのみ差がでていますが、これは他の供試体はすべて横補強鉄筋が降伏して破壊に至ったのに対し、Type-IIIは鋼管の底に取り付けた鉄板が軸方向鉄筋を押し出し、横補強鉄筋よりも先に軸方向鉄筋が降伏して破壊してしまったため、耐力があがらなかったものと思われる。

### 4. 結論

- (1)耐震性能上、基礎高さ700mmのものが良い結果が得られた。
- (2)このような構造において、曲げと水平力が作用し、押し抜きで破壊する場合の破壊耐力は、式(1),(2),(3)により算定できるものと思われる。よって、設計の際には、通常の曲げ・せん断のほか、この押し抜きに対する検討もおこなう必要があると思われる。

### 参考文献

- 1)鎌田・渡辺・井上：RCかん合方式電柱基礎の耐力性能、土木学会第49回全国大会、V-436、P872～873
- 2)鎌田・井上：縮小型電柱支持基礎の耐力性能、土木学会第22回関東支部、III-70、P350～351
- 3)東日本旅客鉄道(株)：鉄道建造物設計標準解説 H5.10  
 鉄道総合研究所編：鉄道建造物設計標準・同解説 コンクリート建造物 H4.10