

添架物の影響を考慮した電柱の固有周期算定手法の提案

近藤 優一* 常本 瑞樹 中島 祐樹 金色 貴史 村上 智史
(鉄道総合技術研究所)

Proposal of method estimating natural period of poles with consideration of effect of overhead wires and metal fittings

Yuichi Kondo, Mizuki Tsunemoto, Yuki Nakajima, Takashi Kanairo, Satoshi Murakami,

(Railway Technical Research Institute)

Natural period of poles is an important parameter for evaluation of seismic performances. The natural period of poles installing overhead wires and metal fittings is longer than that of poles. Though the natural period of them for the Shinkansen was evaluated in previous studies, the natural period of them for conventional lines was hardly evaluated. Therefore, we evaluate the natural period of poles under different conditions of poles and overhead wires. Based on the result, we propose a method estimating natural period of poles with consideration of effect of overhead wires and metal fittings.

キーワード：電柱，耐震，固有周期，架線，架線金具

(Pole, Seismic performance, Natural period, overhead wires, Metal fitting)

1. はじめに

電車線柱（以下、電柱）の耐震設計法は、「電車線路設備耐震設計指針・同解説」⁽¹⁾（以下、耐震設計指針）に示されている。具体的には、耐震設計指針に示された加速度応答スペクトルを用いて、電柱の固有周期と高架橋等の等価固有周期の比に応じて、地震時における電柱の応答値を推定する。そのため、電柱の耐震設計においては、電柱の固有周期が重要となる。

線条やそれを支持する金具など（以下、添架物）が取り付けられた電柱の固有周期は、添架物の影響によって電柱単体（以下、素柱）の固有周期に比べて長くなる。電柱の耐震設計では、片持ちはりとして仮定した素柱の固有周期を理論式によって算定し、添架物の影響を補正するための乗率によって電柱の固有周期を算定する。この固有周期補正乗率は、新幹線での使用を想定した電柱（以下、新幹線電柱）の固有周期の解析結果を基に設定されている⁽²⁾。

しかしながら、在来線での使用を想定した電柱（以下、在来線電柱）では、新幹線電柱に比べて線条の総質量が大きく、固有周期補正乗率が適切でない可能性がある。そこで、在来線電柱の固有周期を理論解析によって算定し、電柱振動実験結果と比較した。また、様々な条件の在来線電柱に対して、添架物による固有周期増加率を算出した。その結果を基に、これまでの補正乗率による固有周期算定方法よりも適切に電柱の固有周期を推定できる近似式を提案した。

2. 耐震設計における電柱の固有周期算定方法⁽¹⁾

〈2・1〉電柱の耐震設計 高架橋上の電柱を例として、耐震設計指針に示されている電柱の耐震設計法について概説する。

耐震設計指針には、電柱の応答加速度を推定するための加速度応答スペクトルが用意されている。加速度応答スペクトルとは、電柱の固有周期 T_p と高架橋の等価固有周期 T_{eq} の比 T_p/T_{eq} と電柱の応答加速度の関係を表したものであり、これを用いることで、簡便に電柱の応答加速度を推定することが可能となる。したがって、電柱の応答加速度を推定するためには、電柱の固有周期が重要であることがわかる。

〈2・2〉電柱の固有周期算定方法 素柱を片持ちはりとしてみれば、素柱の固有周期は以下の通りに算定される。

$$T_p = 1/f_p \quad (1)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1.875}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

T_p : 素柱の固有周期(s)

f_p : 素柱の固有振動数(Hz)

L : 電柱の地上長さ(m)

EI : 電柱の曲げ剛性(N・m²)

ρ : 電柱の密度(kg/m³)

A : 電柱の断面積(m²)

電柱の耐震性能を評価する際には、コンクリート柱の場合は 1.1、鋼管柱の場合は 1.2 という乗率を用いて固有周期 T_p を補正する。これは、添架物の質量による固有周期の変化を考慮したものであり、新幹線電柱の解析結果を基に定められたものである⁽²⁾。コンクリート柱に比べて鋼管柱の乗率が大きいのは、コンクリート柱に比べて鋼管柱は軽量であ

るため、添架物の質量の影響が大きくなるためである。

在来線電柱は、新幹線電柱に比べて添架物の総質量が大きいいため、添架物が電柱の固有周期に与える影響も大きく、固有周期補正乗率が適切でない可能性がある。そこで、在来線電柱を対象に、理論解析と振動実験によって電柱の固有周期を評価した。

3. 電柱の固有周期算定式と電柱振動実験

〈3・1〉電柱の固有周期算定式 図 1 に示すように、添架物を有する電柱を二つの質点が付加された片持ちはりとして仮定して電柱の固有周期算定式を導出する。このような片持ちはりの曲げ振動変位 y の一般解は式(3)の通りとなる。

$$\begin{cases} y_a = \left(\sum_1^4 A_n e^{k_n x} \right) e^{i\omega t} & (0 \leq x \leq h_1) \\ y_b = \left(\sum_1^4 B_n e^{k_n x} \right) e^{i\omega t} & (h_1 \leq x \leq h_2) \\ y_c = \left(\sum_1^4 C_n e^{k_n x} \right) e^{i\omega t} & (h_2 \leq x \leq L) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、

$$k_1 = a, k_2 = -a, k_3 = ia, k_4 = -ia \quad (i: \text{虚数}) \quad (4)$$

$$a^4 = \frac{\rho A}{EI} \omega^2 \quad (\omega = 2\pi f_{pw}) \quad (5)$$

とする。ここで、 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_4$ は、境界条件によって得られる 12 元 1 次方程式を解くことで求められる係数である。また、 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_4$ が非自明な解を持つという条件により、電柱の固有振動数 f_{pw} が求められる。しかしながら、この 12 元 1 次方程式の厳密解を得ることは困難であるため、数値解析によって電柱の固有振動数 f_{pw} を求めることとした。これの逆数をとることで電柱の固有周期 T_{pw} を求めることができる。

〈3・2〉電柱振動実験 電柱の振動実験を実施し、自由振動波形から固有周期を評価した。これと前節の電柱の固有周期算定式による計算結果と比較した。

(1) 実験条件および計算条件

図 2 に電柱振動実験の全体概要図を、図 3 に測定対象とする電柱の装柱図を示す。また、表 1、表 2 に測定対象の電柱と電柱に取り付けられた線条の諸元をそれぞれ示す。電柱には、一般的に使用されていないが、添架物の質量の影響が大きくなるように、軽量なアルミニウム合金製の中空円管 (以下、アルミ柱) を用いることとした。線条には、在来線で一般的に使用されるものを用いることとした。なお、径間長は 50m とした。

振動実験は、電柱を人力により振動させ、天頂部に取り付けた加速度計によって自由振動波形を測定した。振動方向は線路平行方向および線路直角方向とし、得られた測定波形から固有周期を評価した。また、実験条件として、素柱、

電車線のみを取り付けた状態 (電車線のみ)、すべての線条を取り付けた状態 (一般装柱) の 3 条件とした。

比較のための電柱の固有周期算定式による計算条件として、電車線や可動ブラケットの等価質量 (以下、電車線等価質量 m_1) やき電線、配電線および腕金の等価質量 (以下、き電車等価質量 m_2) は、文献(2)の結果を基に決定した。また、電車線高さ h_1 は可動ブラケットの取付位置の中間点とし、き電線高さ h_2 は、腕金の取付位置とした。

(2) 実験結果および計算結果

表 3 に各条件における固有周期の実験値と、算定式による計算値を示す。なお、表には固有周期を計算する際に用いた等価質量の値も併せて示している。表 3 より、添架物の増加に伴い、固有周期も増加することが確認できる。また、各条件において、固有周期の計算値は実験値と近い値となっ

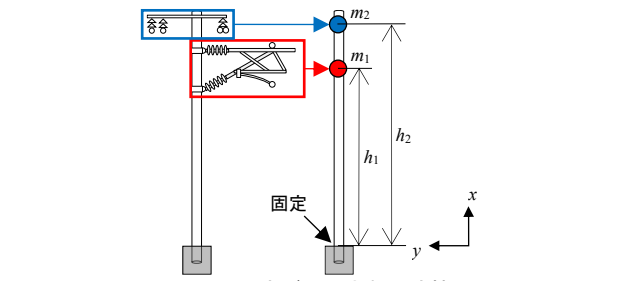


図 1 二つの質点が付加された片持ちはり

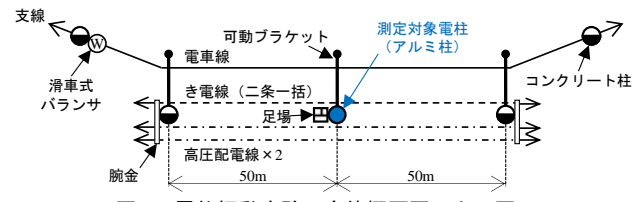


図 2 電柱振動実験の全体概要図 上面図

材質	アルミ合金 (A6082-T6)
外径(mm)	350
曲げ剛性 $EI(N \cdot m^2)$	1.08×10^7
単位長質量 $\rho A(kg/m)$	29.4

線種	型式	張力 (kN)
ちょう架線	St135	19.6
トロリ線	GT-M170	9.8
き電線	Al510×2	6.87
高圧配電線	Cu38×2	1.96

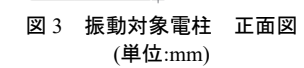


図 3 振動対象電柱 正面図 (単位:mm)

条件	線路平行				線路直角			
	固有周期(s)		等価質量(kg)		固有周期(s)		等価質量(kg)	
	実験値	計算値	m_1	m_2	実験値	計算値	m_1	m_2
素柱	0.19	0.17	-	-	0.19	0.17	-	-
電車線のみ	0.20	0.21	33.8	-	0.26	0.25	100	-
一般装柱	0.25	0.26	33.8	45.3	0.27	0.30	100	45.3

ていることが確認できる。

4. 添架物の影響を考慮した電柱の固有周期

電柱の固有周期算定式を用いて添架物による電柱の固有周期増加率 T_{pw}/T_p を計算した。その結果を基に、近似式による電柱の固有周期算定手法を提案する。

〈4・1〉 計算条件 様々な在来線電柱に対して添架物による電柱の固有周期増加率を計算した。計算は添架物の影響が大きい線路直角方向のみを行うこととした。なお、比較のため、新幹線電柱に対しても計算を行った。

図 4、図 5 に計算対象とする装柱図を示す。また、表 4 に電柱に添架される線条種別と計算に用いた等価質量を示す。在来線電柱として在来線①～⑤の 5 種類、新幹線電柱として新幹線①、②の 2 種類の装柱を設定した。在来線①は、標準的なシンプル架線の装柱とした⁽³⁾。在来線②は、在来線①の装柱を基に、コンパウンド架線の装柱として設定した。在来線③～⑤は、在来線①の装柱を基に、き電ちよう架線にアルミや銅のより線を用いたき電ちよう架式電車線の装柱として設定した。また、新幹線①、②は標準的なコンパウンド架線とシンプル架線の装柱とした⁽⁴⁾。

表 5 に電柱諸元を示す。電柱種別はコンクリート柱、鋼管柱、アルミ柱の 3 種類とした。コンクリート柱と鋼管柱は、一般的に使用される型式を選定した。アルミ柱は、在来線電柱および新幹線電柱として十分な許容モーメントを有する断面の中空円管 3 種類を設定した。なお、それぞれの許容モーメントは 65kN・m、124kN・m、304kN・m である。

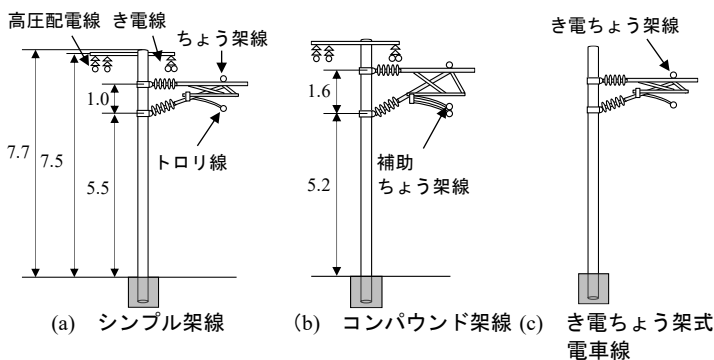


図 4 計算対象とする在来線電柱の装柱図(単位:m)

〈4・2〉 計算結果 図 6 に電柱の単位長質量と固有周期増加率の関係を示す。図 6 より、電柱の単位長質量が小さいほど固有周期増加率が大きくなる傾向であった。また、単位長質量や装柱の違いによる固有周期増加率の変化量は、アルミ柱が最も大きく、コンクリート柱が最も小さい。これは、軽量の電柱の方が相対的に添架物の質量が大きくなるためである。

また、図 6 には耐震設計指針に示された固有周期補正乗率も示している。図 6 より、在来線電柱の場合、既存の補正

表 5 電柱諸元

(a) コンクリート柱				(b) 鋼管柱			
幹在区別	型式*	曲げ剛性 EI (×10 ⁷ N・m ²)	単位長質量 ρA (kg/m)	幹在区別	型式*	曲げ剛性 EI (×10 ⁷ N・m ²)	単位長質量 ρA (kg/m)
在来線	35-N50	2.25	121	在来線	216.3-t8.2	0.60	42.1
	35-N65	2.30	122		267.4-t9.3	1.30	59.2
	35-N75	2.34	123		318.5-t9.5	2.27	72.4
	35-N90	2.74	152		355.6-t6.4	2.21	55.1
	40-N110B	4.07	167		355.6-t9.5	3.19	81.1
新幹線	40-N130B	4.48	190	406.4-t9.5	4.81	93.0	
	40-N150B	4.57	192	355.6-t6.4	2.21	55.1	
	40-N200B	5.01	220	355.6-t7.9	2.69	67.7	
※型式は(外径 cm)-(設計モーメント N・m)を表す				新幹線	355.6-t9.5	3.19	81.1
(c) アルミ柱					355.6-t12.7	4.15	107
幹在区別	型式*	曲げ剛性 EI (×10 ⁷ N・m ²)	単位長質量 ρA (kg/m)		406.4-t6.4	3.31	63.1
在来線	350-t5	0.565	14.6		406.4-t7.9	4.05	77.6
	350-t10	1.08	28.8		406.4-t9.5	4.81	93.0
新幹線	400-t20	3.03	64.5	406.4-t12.7	6.28	123	
	※型式は(外径 mm)-t(厚さ mm)を表す						

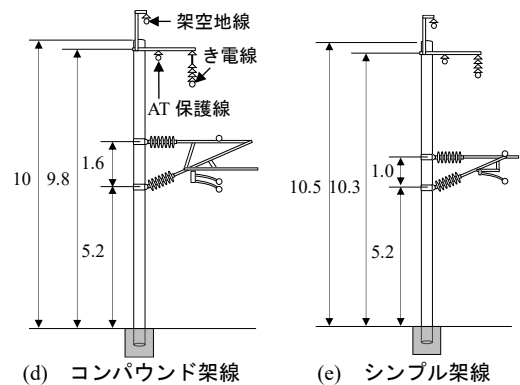


図 5 計算対象とする新幹線電柱の装柱図(単位:m)

表 4 線条種別と等価質量

種別	在来線①	在来線②	在来線③	在来線④	在来線⑤	新幹線①	新幹線②
	シンプル架線	コンパウンド架線	き電ちよう架式電車線			コンパウンド架線	シンプル架線
ちよう架線	St90	St135	SB-TACSR/AC980	SB-TACSR/AC980	PH356×2	St180	PH150
補助ちよう架線	-	PH100	-	PH100	-	PH150	-
トロリ線	GT110	GT-M170	GT-M170	GT-M170	GT-M-SN170	GT-SN-W-170	GT-PHC110
き電線	Al510×2	Al510×2	-	-	-	Al300	Al300
高圧配電線	Cu38×2	Cu38×2	-	-	-	-	-
AT 保護線	-	-	-	-	-	Al150	Al150
架空地線	-	-	-	-	-	St55	St55
電車線等価質量 m_1 (kg)	91	114	127	132	170	204	170
き電車等価質量 m_2 (kg)	47	47	-	-	-	46	46

乗率よりも今回計算した固有周期増加率の方が大きい傾向にある。これは前述したように、固有周期補正乗率が新幹線電柱の解析結果を基に設定されているためであり、在来線電柱を耐震設計する場合には、後述の方法を用いて固有周期を算定する方が適切であると考えられる。

〈4・3〉 固有周期算定手法の提案 在来線電柱の固有周期を適切に推定するための固有周期算定手法を提案する。そのために、図 6 に示した電柱の単位長質量と固有周期増加率の関係を装柱ごとに近似式で表すこととする。

ここで、片持ちはりの先端に集中質量 m_c がある場合の固有振動数 f は以下の通りに表される⁽⁵⁾。

$$f \cong \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1.9}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A \left(1 + \frac{m_c}{0.23\rho AL} \right)}} \quad (6)$$

式(6)における $m_c/(0.23L)$ は、先端の集中質量が片持ちはりの曲げ振動に影響を及ぼす等価単位長質量と考えられる。式(6)を参考に $m_c/(0.23L)$ に相当する単位長質量を m_a として、電柱の固有振動数 f_{pw} の近似式を以下の通りに仮定する。

$$f_{pw} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1.9}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A \left(1 + \frac{m_a}{\rho A} \right)}} \quad (7)$$

固有振動数と固有周期が逆数の関係であることを考慮すると、式(2)、(7)より、添架物による電柱の固有周期増加率 T_{pw}/T_p は以下の通りに近似できる。

$$\frac{T_{pw}}{T_p} \cong \sqrt{1 + \frac{m_a}{\rho A}} \quad (8)$$

ここでは、図 6 に示したコンクリート柱と鋼管柱の固有周期比の計算結果から、最小二乗法により m_a を推測することとする。

表 6 に装柱ごとに推測した定数 m_a を示す。また、例として、 m_a が最大となる在来線②と、最小となる新幹線②について、算定式と近似式による電柱の固有周期増加率の計算結果を図 7 に示す。図 7 より、近似式は算定式の結果をよく近似できていることがわかる。また、近似式はコンクリート柱と鋼管柱の計算結果を基に設定したものであるが、アルミ柱の計算結果ともよく一致している。

したがって、電柱の材質や形状に関わらず、近似式を用いることで電柱の単位長質量に応じて固有周期増加率を推定できる。これまでの補正乗率の代わりに、推定した固有周期増加率を素柱の固有周期に乗じることにより、より適切に添架物を有する電柱の固有周期を推定することができると考えられる。

表 6 より、在来線電柱の中では、 m_a は在来線②のコンパウンド架線が最大となり、在来線③～⑤のき電ちよう架式電車線が比較的小さい。き電ちよう架式電車線ではき電線等が取り付けられておらず、シンプル架線やコンパウンド

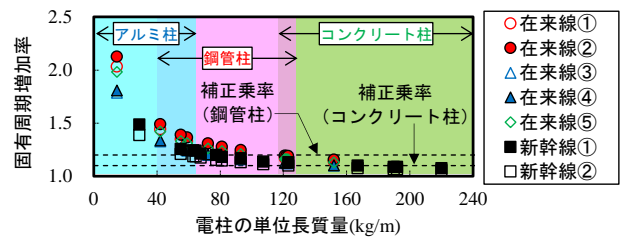


図 6 電柱の単位長質量と添架物による固有周期増加率の関係

表 6 各装柱の m_a

装柱条件	m_a
在来線①	45.6
在来線②	51.4
在来線③	32.0
在来線④	33.2
在来線⑤	42.8
新幹線①	32.0
新幹線②	25.6

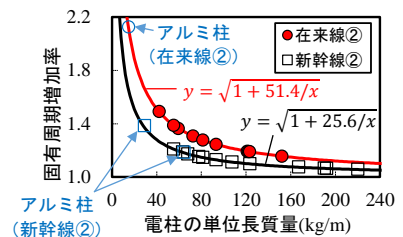


図 7 添架物による固有周期増加率近似式

架線では電柱の天頂部近くにき電線等が取り付けられている。一般に、電柱の天頂部近くに取り付けられた質量の方が電柱の固有周期に与える影響が大きいため、き電ちよう架式電車線よりもシンプル架線やコンパウンド架線の m_a の方が大きくなると考えられる。

5. まとめ

在来線電柱を対象に、添架物を有する電柱の固有周期を理論解析によって算出し、振動実験の結果と比較した。また、添架物による電柱の固有周期増加率を計算し、その結果を基に、近似式による電柱の固有周期推定手法を提案した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 添架物を有する電柱の固有周期について、理論解析による計算結果と振動実験による実験結果を比較すると、両者は近い値となることを確認した。
- (2) 添架物による電柱の固有周期増加率は、電柱の単位長質量が小さいほど大きくなることがわかった。また、固有周期増加率は、新幹線電柱に比べて在来線電柱の方が大きいことがわかった。
- (3) 上記(2)の結果を基に、添架物による電柱の固有周期増加率を推定する近似式を装柱ごとに提案した。これにより、添架物を有する電柱の固有周期を適切に推定することができる。

文 献

- (1) 鉄道総合技術研究所：電車線路設備耐震設計指針・同解説，2013
- (2) 網干光雄，常本瑞樹：地震時における架線振動の影響解析—電柱固有振動数への影響—，電気学会研究会資料，交通・電気鉄道研究会，TER-09-50，pp.27～32 (2009)
- (3) 日本鉄道電気技術協会：電気工作物（電車線路）設計施工標準，2005
- (4) 日本鉄道電気技術協会：電気工作物（新幹線電車線路）設計施工標準，2005
- (5) 谷口修：振動工学，コロナ社，1978