

電柱制振器の応答解析

○[機]網干 光雄 , [機]常本 瑞樹 (鉄道総合技術研究所)

Response Analyses of Damping Device for Electrical Railway Pole
Aboshi Mitsuo Tsunemoto Mizuki (Railway Technical Research Institute)

A damping device for electrical railway pole have invented in order to reduce the vibration caused by an earthquake or passing of trains. This paper describes theoretical analyses of the pole response with the damping device, and experimental results of exciting tests with a real scale pole. It is shown that the stiffness of the steel plate and pole band is necessary to be enough higher than that of visco-elastic object, and it is confirmed that the damping device is effective to reduce the vibration of the real pole in the all direction.

キーワード：電気鉄道，集電，電柱，制振，粘弾性体，損失係数

Keywords：electric railway, current collection, pole, damping, visco-elastic object, loss factor

1. はじめに

架空電車線を支持する電柱は，地震時において曲げ振動が発生し，特に，高架橋と電柱の固有振動数が一致する場合に共振現象により倒壊する恐れがある¹⁾。また，高架橋と電柱・架線の各固有振動数が一致したため過大な架線振動が励起され，走行中のパンタグラフの割り込み・架線断線事故が発生した例や，地震時以外においても，列車通過時の電柱振動により架線に過大な振動が発生し，架線金具の疲労破損等に至る例もある²⁾。

そこで電柱の耐震性能向上及び架線の振動抑制を目的に，電柱に減衰機能を付加して共振周波数付近での振動を抑制する電柱制振器を考案し，これまでに1/2スケールモデルでの実装加振試験を実施しその効果を確認している³⁾。

本論文では，粘弾性体を用いた電柱制振器の特性をモデル化してその応答特性を理論解析するとともに，実スケールモデルによる実装加振試験を実施した結果について報告する。

2. 梁モデルによる応答解析

2.1 運動方程式

ここでは，電柱を片端固定の梁として考える。梁の線密度，曲げ剛性をそれぞれ ρ, EI とすれば，梁の運動方程式は式(1)で表される。

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

この解を $y = A \exp(i\omega t + kx)$ とおいて，式(1)に代入すると，
 $-\rho\omega^2 + EI k^4 = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$

の特性方程式が得られる。ここで， ω, k, i はそれぞれ振動角周波数，波数，虚数単位で，

$$k_1 = \alpha, k_2 = -\alpha, k_3 = i\alpha, k_4 = -i\alpha$$

$$\alpha = \left(\frac{\rho}{EI} \right)^{1/4} \omega^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

とすれば，一般解は次式で表される。

$$y = \left(\sum_{n=1}^4 A_n \exp k_n x \right) \exp i\omega t \quad \dots\dots\dots (4)$$

図1に示すように，電柱の長さを L ，地際からの高さ H に長さ S の腕金を直角に出し，地際との間に制振器を挿入する。制振器は，粘弾性体自体の減衰係数 D_v (速度比例型の粘性減衰) と剛性 K_r が並列に接続され，さらに鋼板および電柱バンド (腕金含む) の縦剛性 K_s が直列に配置されるものとしてモデル化する。

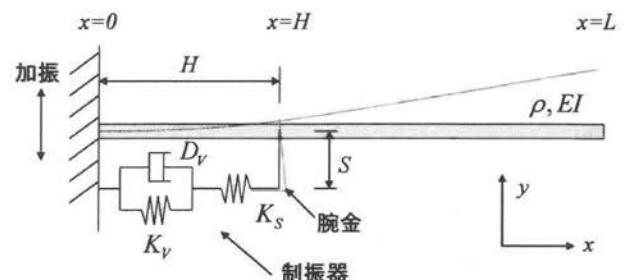


図1 電柱及び電柱制振器の解析モデル

$x=0$ (地際) において, $y=A_0 \exp i\omega t$ の強制変位を与えたとき, 電柱変位 y_a, y_b を式(5)で表す。

$$\begin{aligned} y_a &= \left(\sum_{n=1}^4 A_{an} \exp k_n x \right) \exp i\omega t \quad (0 \leq x \leq H) \\ y_b &= \left(\sum_{n=1}^4 A_{bn} \exp k_n x \right) \exp i\omega t \quad (H < x \leq L) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

このとき, (1) $x=0$ における変位が強制変位と一致, (2) $x=0$ において傾斜が0 ($\partial y / \partial x = 0$), (3) $x=L$ においてモーメントが0 ($\partial^2 y / \partial x^2 = 0$), (4) $x=L$ においてせん断力が0 ($\partial^3 y / \partial x^3 = 0$), (5) $x=H$ において変位が連続, (6) $x=H$ において傾斜が連続, (7) $x=H$ においてせん断力が連続という境界条件が成り立つ。さらに(8) $x=H$ において, 制振器の作用力によるモーメント $M \exp i\omega t$ が加わるが,

$$\begin{aligned} M \exp i\omega t &= S \cdot \left[-Z \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=H} \cdot S \right\} \right] \\ &= -S^2 \cdot Z \cdot i\omega \left(\sum_{n=1}^4 k_n A_{an} \exp k_n H \right) \exp i\omega t \end{aligned}$$

であるから,

$$M = -S^2 Z \cdot i\omega \left(\sum_{n=1}^4 k_n A_{an} \exp k_n H \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。ただし, Z は制振器の機械インピーダンスであり,

$$Z = \frac{\frac{K_s}{i\omega} \left(D_v + \frac{K_v}{i\omega} \right)}{D + \frac{(K_v + K_s)}{i\omega}} = \frac{K_s (K_v + i\omega D_v)}{i\omega \{ (K_v + K_s) + i\omega D_v \}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。

以上の境界条件を表す8元連立1次方程式を解くことにより各係数 $A_{a1} \sim A_{a4}, A_{b1} \sim A_{b4}$ を代数的に求めることができるが, これらの係数を数式で表現すると非常に複雑になるので, ここでは数値計算により求める。

2.2 応答倍率等

地際加振時における電柱先端変位の応答倍率 (地際単位加振振幅あたりの電柱先端振幅) は,

$$\beta_1 = \frac{\sum_{n=1}^4 A_{b1} \exp k_n L}{A_0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表される。

制振器間の変位は制振器上部の上下変位 (図1の x 方向)

$$\frac{\partial y_a}{\partial x} \Big|_{x=H} \cdot S$$

であるから, 制振器間変位の応答倍率 (地際単位加振振幅あたりの制振器間変位振幅) は,

$$\beta_2 = \frac{S \left(\sum_{n=1}^4 k_n A_{an} \exp k_n H \right)}{A_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表される。

地際加振時において制振器に作用する力 F (制振器上部腕金に上向きに作用する場合を正とする) は,

$$F = -Z \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y_a}{\partial x} \Big|_{x=H} \cdot S \right)$$

であるから, 制振器作用力の応答倍率 (地際単位加振振幅あたりの制振器に作用する力振幅) は,

$$\beta_3 = \frac{-S \cdot Z \cdot i\omega \left(\sum_{n=1}^4 k_n A_{an} \exp k_n H \right)}{A_0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表される。

電柱地際曲げモーメントは,

$$M = -EI \frac{\partial^2 y_a}{\partial x^2} \Big|_{x=0}$$

であるから, 地際曲げモーメントの応答倍率 (地際単位加振振幅あたりの地際曲げモーメント振幅) は

$$\beta_4 = \frac{-EI \left(\sum_{n=1}^4 k_n^2 A_{an} \right)}{A_0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

で表される。

3. 制振器による電柱制振特性

図2に, 電柱制振器の構造概要図を示す。制振体は, 微小変形でも減衰効果が得られる粘弾性体を鋼板で挟んだ構造とし, この制振体を電柱バンドで電柱に固定する。電柱の曲げ変形が生じた際に制振体が伸縮変形し, 粘弾性体がせん断変形することにより減衰効果を得る。



図2 電柱制振器の構造概要

図1の制振器モデルにおいて, 制振器両端の速度差を v とすると, 減衰要素 (粘弾性体) D_v 両端の速度差 v_v は,

$$v_v = \frac{1}{1 + \frac{K_v}{K_s} + D_v \frac{i\omega}{K_s}} v \quad \dots\dots\dots (12)$$

である。効果的な制振特性を得るためには, 電柱の曲げ振動に伴う減衰要素両端の速度差ができるだけ大きいことが望ましい。すなわち, 粘弾性体の剛性 K_v をできるだけ小さく, 鋼板及び電柱バンドの剛性 K_s をできるだけ大きくしておくことが望ましい。

ここでは, 制振器の特性として, 表1に示すような目

標値を設定した。粘弾性体の減衰係数及び剛性は、材料及び使用温度で異なる。粘弾性体としては、比較的減衰係数が大きく剛性の小さい特性の材料を選択した。減衰係数は粘弾性体の面積に比例し厚みに反比例するが、制振体の実用的な大きさ、重量、構造を考慮して設定した。鋼板及び電柱バンドの剛性は、粘弾性体の剛性より十分大きいことが望ましいが、実用的な大きさ、重量、構造を考慮して設定した。

表1 電柱制振器の目標特性値 (4.4Hz)

温度(°C)	D_V (Ns/m)	K_V (N/m)	K_S (N/m)
10	1.2×10^7	2×10^8	2×10^8
20	4×10^6	1.2×10^8	
30	2×10^6	6×10^7	

図3～6に、上記特性値を用いた場合の応答倍率等の周波数特性を示す。この場合の電柱として、鋼管柱(φ355.6mm、厚さ6.4mm、地際上長さ9m)を対象としている。電柱制振器の長さは1.5m、電柱バンドの腕金の長さ(電柱中心からの距離)は0.2mとする。粘弾性体の減衰係数、剛性は周波数により変化するが、ここでは一定として計算している。また鋼管柱自体の損失係数は、1/2スケールモデルでの加振試験結果³⁾から $\eta=0.004$ とする。

図3は先端応答倍率を示すが、制振器がない場合400程度に対して、制振器を取り付けた場合10～30°Cにおいて30～40倍程度とおおむね一定であり、制振器なしに比べてほぼ1/10に減少する。温度10°Cと30°Cとでは粘弾性体の減衰係数に1桁近い差があるにも係わらず、応答倍率はほぼ同程度となっている。これは、温度10°Cにおいて粘弾性体の剛性が増加し、その結果、鋼板および電柱バンドの剛性とほぼ同等となり制振効果が低減されることによるものと考えられる。制振効果の低減は望ましいことではないが、温度差による制振効果の差異が少ないという意味では好都合である。なお制振器を取り付けることにより、剛性付加により固有振動数が若干増加する。

図4は制振器間の変位を示すが、地際の加振振幅を1mmと仮定すると、最大で0.3mm程度の変位が生じることになる。このうちの50～70%程度が粘弾性体のせん断変形として加わることになる。

図5は制振器間の作用力を示すが、地際の加振振幅を1mmと仮定すると、最大で 3×10^4 N程度の力が作用することになる。

図6は地際曲げモーメントを示すが、地際の加振振幅を1mmと仮定すると、制振器がない場合には最大で 3×10^5 Nm(当該鋼管柱の許容モーメントにほぼ相当)であるのに対して、制振器を取り付けた場合には 3×10^4 Nmとほぼ1/10に低減することがわかる。

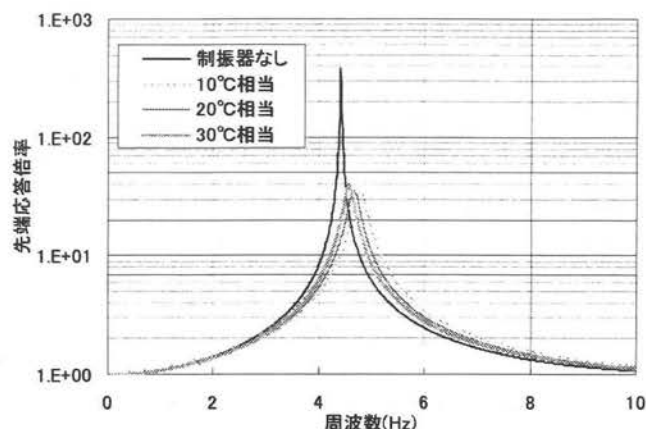


図3 先端応答倍率の周波数特性

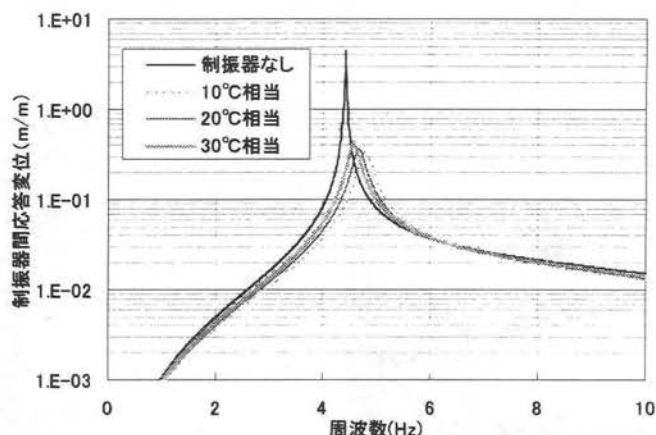


図4 制振器間応答変位の周波数特性

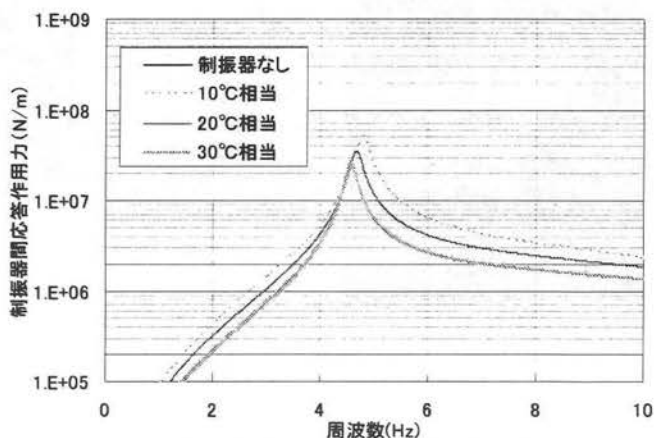


図5 制振器間応答作用力の周波数特性

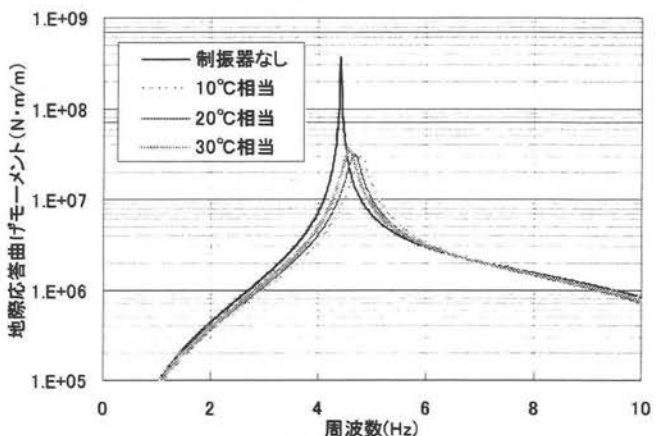
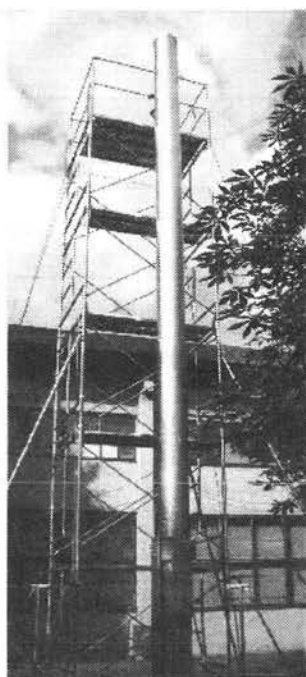


図6 地際応答曲げモーメントの周波数特性

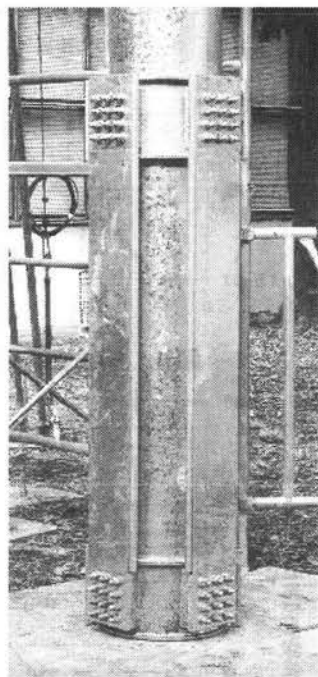
4. 実スケールモデルでの実装加振試験

次に、前章で示した特性の電柱制振器を試作し、実スケールモデルでの実装加振試験を実施した。試験体は、鋼管柱（ $\phi 355.6\text{mm}$ 、厚さ 6.4mm 、地際上長さ 9m ）とし、1次固有振動数は約 4.4Hz である。制振器は、粘弾性体 $170 \times 1280 \times 1.6\text{mm}$ を3層、鋼板厚さ 4.5mm の4枚構造、全長 1.7m の制振体を直交面に各1体、計2体を取り付けた。試験方法は、電柱先端を加振した際の自由振動波形から損失係数を算出して評価した。

図7に試験状況を、図8に電柱先端を加振した後の自由振動加速度波形を示す。また図9に、加振方向別の損失係数を比較して示す。なお加振初期変位はいずれも 10mm 程度である。



(鋼管柱全景)



(電柱制振器)

図7 実スケールモデルでの実装加振試験

損失係数は、制振器のない場合の約 0.003 に対して、制振器を取り付けた場合は約 0.040 とおおよそ10倍に増加しており、制振器の制振効果が明瞭である。このことから、地際加振時の先端応答倍率も約 $1/10$ に低減するものと期待でき、前章での解析結果とほぼ同様な結果が得られた。

制振器の取り付け方向に対して加振方向を変えても損失係数はほぼ同じ値が得られた。このことから、電柱振動の全方向に対する制振効果が期待できる。

5. まとめ

粘弾性体を用いた電柱制振器をモデル化してその応答特性を理論解析するとともに、実スケールモデルによる実装加振試験を実施した。主な結果は、以下のとおりである。

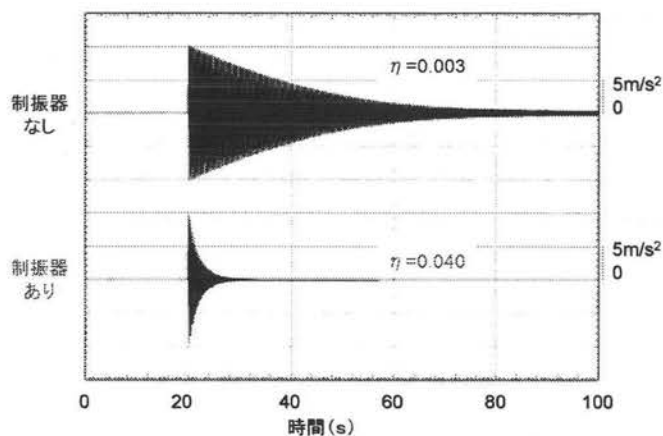


図8 電柱先端の自由振動加速度波形の比較

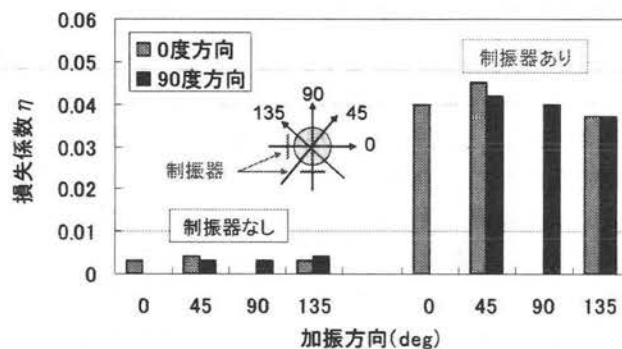


図9 加振方向別損失係数の比較

- (1) 粘弾性体を鋼板で挟んだ構造の制振器をばね及び減衰要素でモデル化して、電柱の応答特性を導出した。
- (2) 効果的な制振効果を得るためには、粘弾性体の剛性をできるだけ小さく、また鋼板及び電柱バンドの剛性をできるだけ大きくすることが望ましい。
- (3) 鋼管柱を想定した応答解析を行い、制振器を取り付けた場合、先端応答倍率は約 $1/10$ に低減することなどを確認した。
- (4) 実スケールモデルの鋼管柱を用いて実装加振試験を行い、損失係数が約10倍に増加すること、また電柱振動の全方向に対してほぼ同等の制振効果があることを確認した。
- (5) 今後は、架線の添架された実電柱において、列車通過時の振動抑制効果などを確認する予定である。

参考文献

- 1) 電力設備耐震性調査研究委員会：電車線路設備耐震設計指針（案）・同解説及びその適用例，1997
- 2) 鈴木公一朗，池田国夫，関 忍，森田洋介：長野新幹線支持物振動箇所におけるコネクタ振動特性等の研究，平成19年電気学会全国大会，2007
- 3) 網干光雄，大浦泰，五十幡直史，中村正治，砂子田勝昭，松岡太一：電柱制振器の基礎検討，平成20年電気学会全国大会，2008