

# 電柱振動抑制の研究

電力技術研究部

主管研究員 網干光雄

## 1. はじめに

電気鉄道の架線を支持する電車線柱(以下、「電柱」と略す)は、地震時において曲げ振動が発生し、特に鉄道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<sup>1)</sup>。また地震時に高架橋と電柱・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と架線断線事故が発生した例<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。

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手法について研究を行ったので報告する。

## 2. 従来の振動抑制手法

従来の電柱振動抑制手法としては砂詰基礎<sup>1)</sup>が一般的であり、1978年の宮城沖地震以降に高架橋上の電柱基礎に用いられている。安価で振動抑制効果が大きいが、地震後に電柱の傾斜を復元する必要がある場合があり、また砂の流出等の懸念もある。また磁石を利用した動吸振器<sup>4)</sup>も実用化されているが、高所作業を伴う上に電柱の固有振動数に合わせる微細な調整が必要である。そこで今回の検討にあたっては、鉄道現場の施工性、保全性等を考慮して、現用の電柱に減衰を付加する方法で、電柱単独で施工できることを前提とした。また、軽量であり施工性に優れていること、微細な調整を要しないこと、安価で耐候性に優れていることなども考慮した。そこで、微小変位でも減衰効果を得やすい粘弾性体を用いて、これを鋼板で挟んで積層した構造にして電柱下部に取り付ける方法を考案した。

## 3. 梁モデルによる応答解析

ここでは、電柱を片端固定の梁として考える。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 $K_V$ 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2に、電柱の例として鋼管柱( $\phi 355.6\text{mm}$ , 厚さ $6.4\text{mm}$ , 地際上長さ $L=9\text{m}$ )を想定し、制振器の取付高さ $H=1.5\text{m}$ , 腕金長さ $S=0.2\text{m}$ の条件において、制振器の減衰係数を変化させた場合の先端応答倍率を比較して示す。ただし、簡単のため $K_V=0$ ,  $K_S=\infty$ としている。この場合、 $4.4\text{Hz}$ 付近に共振周波数があるが、これは片端固定の梁の1次固有振動数に相当する。制振器の減衰係数 $D_V$ を増大させていくと共振周波数付近の応答倍率は低下するが、ある限度を超えると共振周波数が高周波側へ遷移し応答倍率が増加する。このときの遷移した共振周波数は、制振器取付高さより先端側の部分のみの固有振動数 $6.4\text{Hz}$ に一致する。これは制振器取付高さ位置の変位が、制振器によってほぼ完全に拘束されるためと考えられる。したがってこの制振器には最適減衰値が存在することがわかる。制振器の最適減衰値は、簡易なモデルを用いて近似的に求めると以下の簡略式で

表わすことができる。

$$D_v \cong 0.3 \frac{L^2 \sqrt{\rho EI}}{HS^2} \quad (1)$$

制振器の最適減衰値は、電柱の機械インピーダンス ( $\sqrt{\rho EI}$  に比例) ならびに長さの二乗に比例し、制振器の長さならびに腕金長さの二乗に反比例することがわかる。

図2中に示した  $D_v=1.4 \times 10^7 \text{Ns/m}$  の応答倍率曲線は、当該電柱条件に基づいて式(1)の簡略式から求めた最適減衰値の場合であり、応答倍率の最も小さい最適減衰の状態に近いことがわかる。

#### 4. 制振器の構造と電柱制振特性

図3に、粘弾性体を用いた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。

効果的な制振特性を得るためには、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。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アクリル系粘弾性体を選択した。減衰係数については、式(1)から試算した最適減衰値を目標としたが、施工上における実用的な大きさ、重量、構造等を考慮して、これよりも小さい値となっている。

図4に、今回試作した制振器を取り付けた場合の先端応答倍率の周波数特性を示す。電柱は前述と同じとし、電柱制振器の長さは  $H=1.5\text{m}$ 、電柱バンドの腕金の長さ（電柱中心からの距離）は  $S=0.2\text{m}$  とする。制振器がない場合の応答倍率は最大400倍程度に対して、制振器を取り付けた場合は10～30℃において最大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。

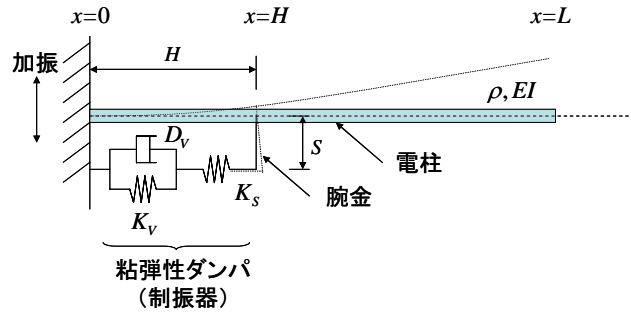


図1 電柱及び制振器の解析モデル

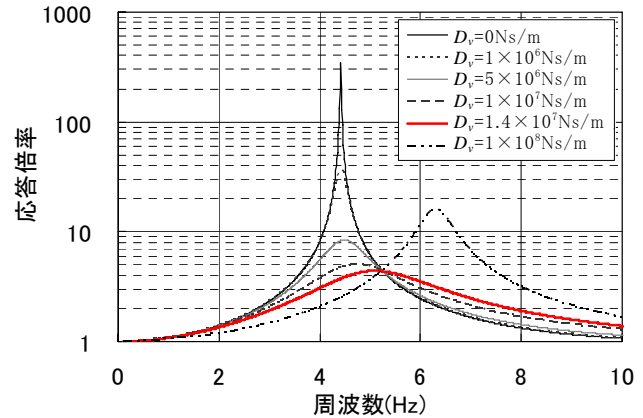


図2 電柱先端変位の応答倍率（計算例）

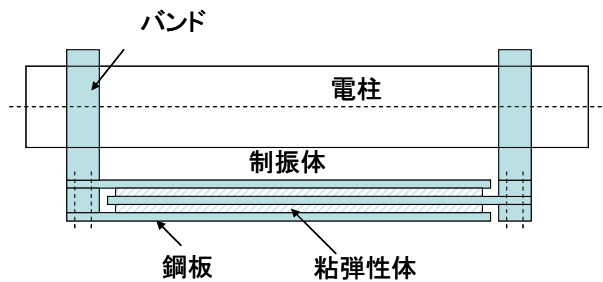


図3 制振器の構造

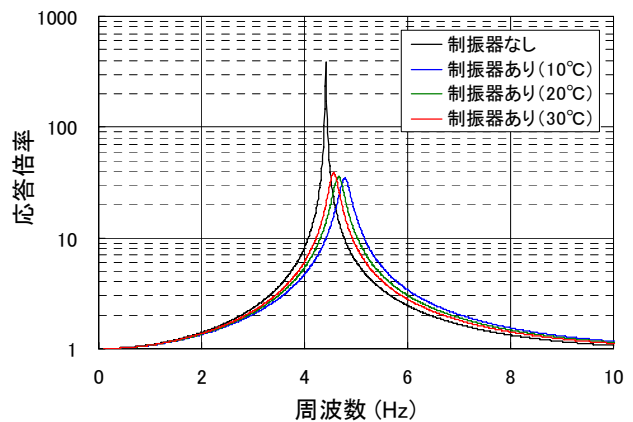


図4 電柱先端変位の応答倍率の比較

### 5. 実スケール電柱での実装加振試験

今回試作した電柱制振器を用いて、実スケール電柱での実装加振試験を実施した。試験電柱は、鋼管柱（ $\phi 355.6\text{mm}$ 、厚さ $6.4\text{mm}$ 、地際上長さ $9\text{m}$ ）とした。制振器は、粘弾性体 $170 \times 1280 \times 1.6\text{mm}$ を3層、鋼板厚さ $4.5\text{mm}$ の4枚構造、全長 $1.7\text{m}$ 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5に試験状況を、図6に電柱先端を加振した後の自由振動加速度波形を示す。損失係数 $\eta$ 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。



図5 実スケール電柱での実装加振試験

### 6. 加振台試験

次に、振動加振台に実物電柱を設置し、電柱下部を加振することによって、制振器の制振効果を確認した。電柱は、コンクリート柱 $10-40-N11B$ （ $\phi 400\text{mm}$ 、基礎上長さ $L=9\text{m}$ ）とし、1本の電柱には制振器を取り付けずに、もう一本の電柱に制振器を取り付けてこれらを同時に加振して比較した。電柱基礎は高架橋での実際の基礎を想定して $1\text{m}$ の深さとし、モルタルを充填して固定した。また電柱

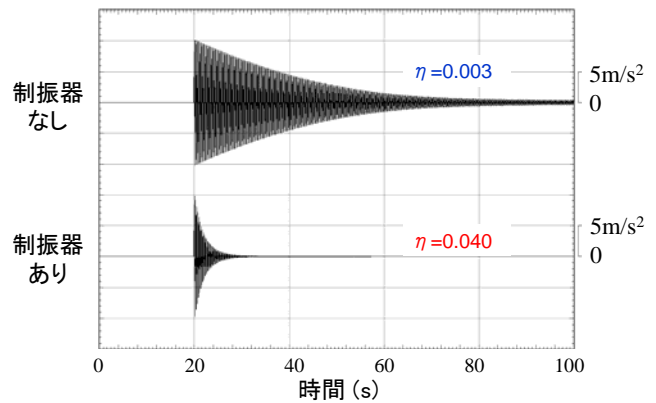


図6 電柱先端の自由振動加速度波形

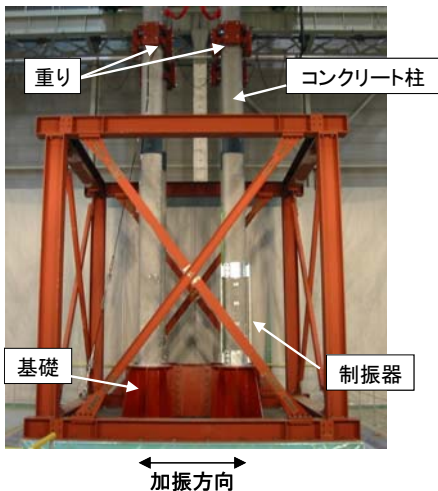


図7 加振台における加振試験

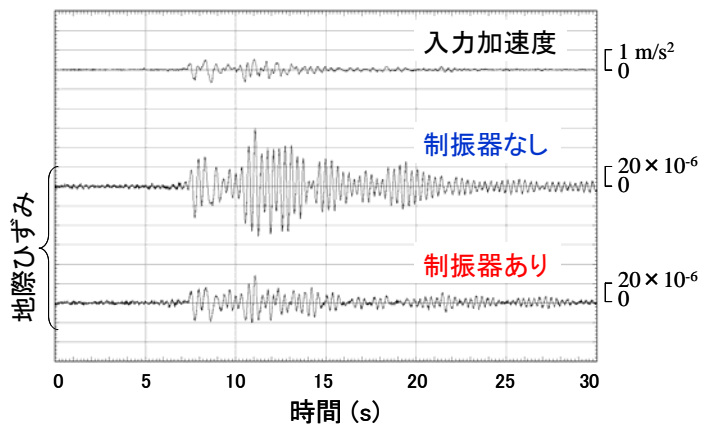


図8 電柱地際におけるひずみの比較

には、架線重量に相当する500kgを基礎高さ6.5mの位置に取り付けた。制振体は前章での加振試験と同じものを用いたが、加振方向に制振器を2体正対させて取り付けた。図7に、試験状況を示す。図8に、試験結果の一例として、兵庫県南部地震の1/10振幅波形を入力した際の電柱地際のひずみ波形を示す。制振器を取り付けた場合には、取り付けない場合に比べて最大で約1/2に低減している。今後は、電柱種別に応じた減衰性能を有する制振器について検討を行うとともに、耐候性等について検証を行う予定である。

## 7. 地震時の電車線路の振動解析

電車線路は、電柱の他、電車線、き電線、保護線、架空地線など構成要素が多様でしかも複雑な動的相互作用を及ぼし合うことから、電柱単体のみならず電車線路全体の運動解析を行って電柱振動抑制の効果を評価する必要がある。現在、これらの相互作用を含めて運動計算ができる3次元運動シミュレーション手法<sup>5)</sup>を開発して解析を始めている。一例として、図9に、電車線やき電線等を全部添架した状態において地際を加振した時の電柱先端の応答倍率の計算例を示す。線路平行方向、線路直角方向い

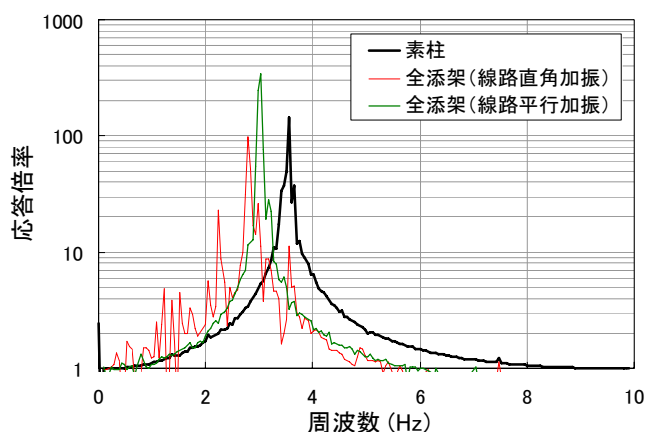


図9 シミュレーションによる応答倍率計算例  
(鋼管柱φ355.6mm、厚さ6.4mm、地際上長さ10m)

ずれの場合も固有振動数は素柱のそれとは異なり、また線路直角方向加振の場合は電車線やき電線等の波動の影響を受けて様々な周波数にピークが見られる。今回考案した制振器は、このように線条添架によって電柱の固有振動数が異なっても制振効果が期待できる点で有利である。

## 8. あとがき

電車線柱の減衰性能向上のため、粘弾性ダンパによる制振方法を考案し、梁モデルによる電柱制振特性を解析するとともに、制振器を試作してその制振効果を確認した。今後は、線条の損失係数の実測や架線金具のモデル化などを行い、シミュレーション精度の向上を図るとともに、電車線路全体の振動解析を進めて、電柱振動抑制の影響解析や線条・架線金具等の弱点箇所抽出とその対応策について研究を進める予定である。

## 【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) 西 健太郎，多胡正章，大浦 泰，藤井保和，網干光雄：電車線路設備の耐震性向上対策検討，JRAIL2008，pp. 213-214，2008
- 3) 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，pp. 286-287，2007
- 4) 袖山 博，五十幡直文，砂子田勝昭：電車線路支持物（コンクリート柱）用制振装置に関する研究，日本機械学会D&D97，1997年7月
- 5) 網干光雄，大浦 泰：地震時における電車線路の運動シミュレーション，平成20年電気学会産業応用部門大会，No. 3-16，2008年8月