

減衰機構を付与した電化柱の地震応答加速度の補正手法

原田 智* 豊岡 亮洋**
小野寺 周** 岡部 源太***

A Correction Method for Seismic Response Acceleration according to Catenary Pole with Damping Device

Satoshi HARADA Akihiro TOYOOKA
Meguru ONODERA Genta OKABE

Taking the opportunity of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake occurring, various construction methods for improving the aseismic performance of existing catenary poles have been proposed, because damage such as breakage of catenary poles occurred on railway viaducts. Among them, there is a method of suppressing the response by installing a vibration damping device or the like in the pole. However, the acceleration response spectrum prescribed in current Seismic Design Guidelines for Contact Line Equipment can't be used on this type of pole; It is difficult to evaluate its aseismic performance. Therefore, we proposed a method of changing the aseismic response acceleration according to the damping of catenary pole from the current acceleration response spectrum.

キーワード：電化柱，耐震設計，ダンパ設置，1自由度系モデル，減衰定数，応答スペクトル

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、鉄道高架橋上に建植されていた電化柱が多数折損する被害が生じたことから¹⁾、高架橋上の既設電化柱の耐震性能を向上させる種々の工法が提案されている²⁾。その中には、電化柱にダンパ等を設置して減衰機構を付与する工法があるが、現行の電車線路設備耐震設計指針の計算手法はこの種の電化柱に対応しておらず、その耐震性能評価が困難であるという課題があった。

そこで、上記のような電化柱が有する減衰性能を適切に評価する手法を提案し、1自由度系モデルを用いた評価手法を示した。さらに、電化柱に付与された減衰に対応した応答加速度を算定することによって、現行のG2地盤およびG3地盤における加速度応答スペクトルから、上記の減衰定数に応じて応答加速度を補正する手法を提案した。本稿では、これらについて報告する。

2. 減衰を付与した電化柱の詳細モデル

2.1 電車線支持物のモデル化

電化柱が折損するような被害を防止する観点から、電化柱の振動を抑制して電車線路設備の耐震性能向上を図る種々の対策工法の提案がなされてきた²⁾。その中で、

既設電化柱（主にコンクリート柱）の対策工法においては、電車線など加圧部との絶縁離隔による制約や、施工の容易さなどの点から、電化柱の基部（根際）付近にダンパ等の振動抑制部材を取り付け、減衰を付与する対策工法が提案されている³⁾。しかし、現状の電車線路設備耐震設計指針に基づく計算手法では、電化柱の減衰定数を一定値として応答加速度を算定しており、ダンパ等を設置して減衰定数を増加させた電化柱については、応答加速度をそのまま適用できないという課題がある。

そこで、本稿では、電化柱の基部にダンパを取り付けた構造の対策工法について図1のようにモデル化して振

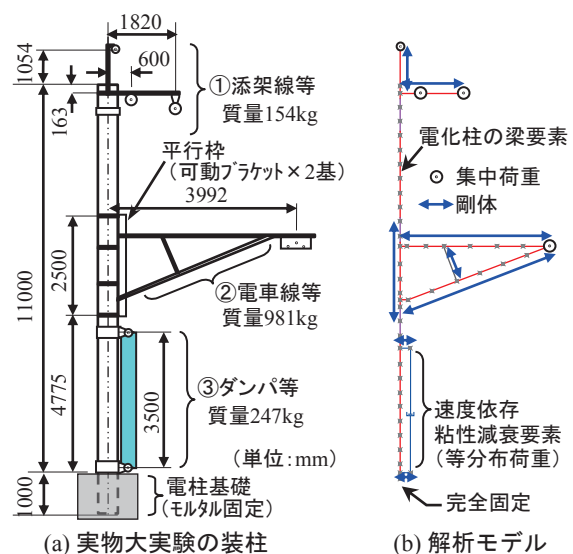


図1 ダンパ等取付電化柱の解析モデル

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
*** 東日本旅客鉄道株式会社

特集：電力技術

動特性を把握し、その減衰定数を評価することとした。電化柱に取り付けたダンパについては速度依存粘性減衰要素とし、剛体を介して電化柱の梁要素と剛結合する構成とした。ダンパの速度・減衰力特性モデルを図2に示す。ダンパを電化柱に近接して設置する構造とするため、ダンパ自体の質量は電化柱基部 3500mm の範囲の梁要素に一様分布させ、等分布荷重としてモデル化した。

また、可動ブラケット部分および腕金部分は剛体としてモデル化した。なお、可動ブラケット部分は平行枠に可動ブラケットを2基取り付けられたオーバーラップ区間の構成とし、電化柱の曲げ変形が地震発生時に比較的大きくなるような条件とした。

トロリ線等の電車線やき電線等の添架線の質量は、50m 径間のヘビーコンパウンド架線に相当する集中荷重とし、それぞれの作用点に配置してモデル化した。

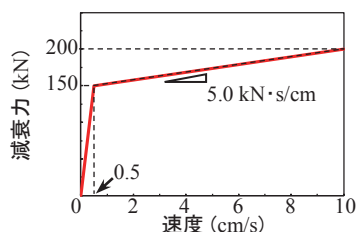


図2 モデル化したダンパの速度・減衰力特性

2.2 詳細モデルを用いた応答解析

図1に示した解析モデルの妥当性を確認するため地震動に対してFEMによる応答解析を実施し、実物大試験体による振動台実験の結果と比較した。地震観測波を入力波とした実物大実験および応答解析に対する電化柱天端の加速度波形を図3に示す。また、入力加速度波に対する電化柱天端の応答加速度波の伝達関数を図4に示す。

図3より、電化柱の応答解析の波形は実験と比較して振幅が若干小さくなるが、実験結果を概ね再現できることがわかる。このように応答解析の振幅が若干小さくなる原因は、応答解析ではダンパと電化柱との取付部材を

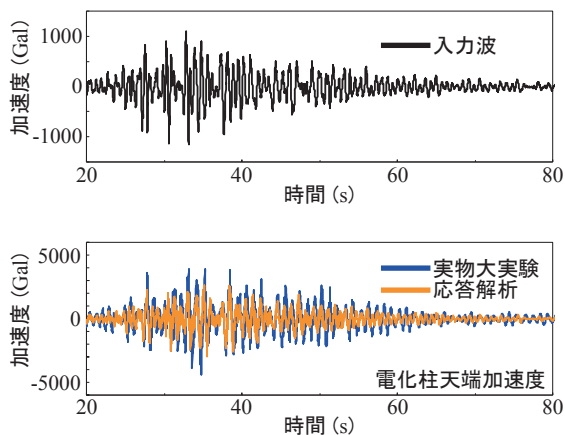


図3 実物大実験と応答解析との加速度波形の比較

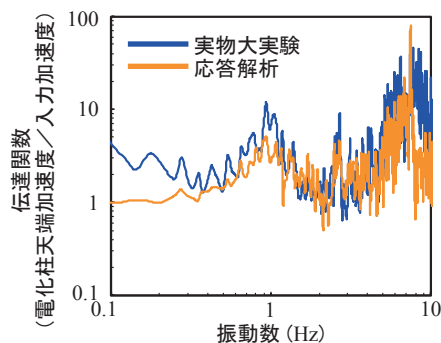


図4 実物大実験と応答解析の伝達関数の比較

剛体としたことから、ダンパによる減衰効果が実物大実験と比較して大きくなったためと考えられる。

また図4より、実物大実験および応答解析の伝達関数において、一次および二次の振動モードの卓越振動数がほぼ一致していることがわかる。また、電化柱の一次モード付近の帯域(0.5Hzから3.0Hz)では、伝達関数が概ね一致していることがわかる。そこで、以降は、図1の解析モデルを基本としてダンパ等を取り付けた電化柱を1自由度系としてモデル化することを試み、続いてその減衰特性について検討する。

3. 1 自由度系モデルによる減衰評価

3.1 電化柱の1自由度系モデル

本章では、ダンパ等取付による減衰付与の効果を定量的に評価するため、実物大実験の結果に基づき電化柱の振動特性を評価した上で、耐震性能評価への適用が可能な1自由度系モデルに対する減衰定数を同定する。具体的には、無対策電化柱に対するダンパ等取付電化柱の減衰定数の増加分を算定することで、ダンパ等取付による減衰付与の効果を評価する。

図5に電化柱の1自由度系モデルの概要を示す。図1に示す詳細モデルによる固有値解析の結果から、質量 m は1次モードの振動に対応する有効質量である 2200kg とした。電化柱の弾性および減衰特性はそれぞれ、ばね要素(剛性 k) およびダッシュポット要素(減衰係数 c_p) で表現し、ダンパ等取付電化柱についてはさらにダッシュポット要素(減衰係数 c_d) が付与されるものとして表現した。

3.2 ダンパ等取付による減衰性能の定量評価

前節で構築した1自由度系モデルに対して、固有振動数および減衰係数をパラメータとした動的解析を多数実施し、実物大実験と応答解析で振動台-電化柱天端における伝達関数のフィッティングを行った。なお応答解析では、入力波として実物大実験で用いたのと同じの地震動波形を用いた。伝達関数のフィッティングは、バンド幅 0.05Hz の Parzen window による平滑化処理を行った

後、1次モードの振動に対応するピーク値が一致するようフィッティングし、固有振動数および減衰係数を算定した。この減衰係数を耐震性能評価に用いられている減衰定数 h に換算し、ダンパ等取付電化柱に対するダンパ等取付電化柱の減衰定数の差分を求めることで、ダンパ等取付による減衰付与の効果を定量的に評価した。

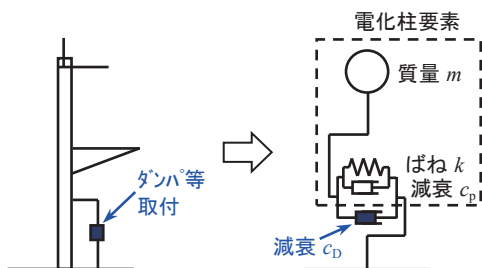


図5 電化柱の1自由度系モデル

3.3 無対策電化柱の周波数特性

無対策電化柱の伝達関数を図6に示す。図6(a)は入力波の最大振幅が比較的小さい175Galの結果を示し、図6(b)は最大振幅が比較的大きい750Galの結果を示している。1次モードの固有振動数は図6(a)において約1.6Hzであったが、図6(b)では約0.8Hzと低下しており、実物大実験における入力波の振幅増大に伴う電化柱の損傷による影響が見受けられた。1次モードの振動に対して伝達関数をフィッティングした結果、減衰定数 h は175Galで0.013、750Galで0.014となった。

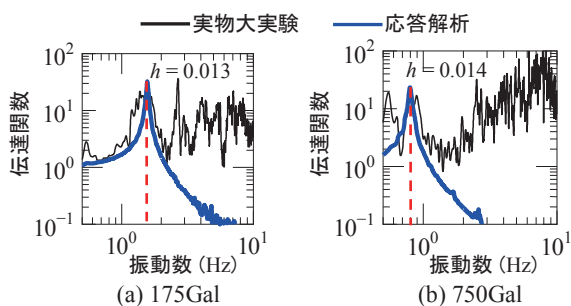


図6 無対策電化柱の伝達関数

3.4 ダンパ等取付電化柱の周波数特性

ダンパ等取付電化柱の伝達関数を図7に示す。図7(a)は入力波の最大振幅が比較的小さい175Galの結果を示し、1次モードの固有振動数は図7(a)において約1.7Hzであったが、図7(b)では約1.0Hzと低下しており、実物大実験における入力波の振幅増大に伴う電化柱の損傷による影響が見受けられた。1次モードの振動に対して伝達関数をフィッティングした結果、減衰定数 h は175Galで0.017、750Galで0.032となった。

上記で同定した無対策電化柱の減衰定数 h は、電化柱自体の損傷を含めた電化柱全体系の減衰定数を示し、ダ

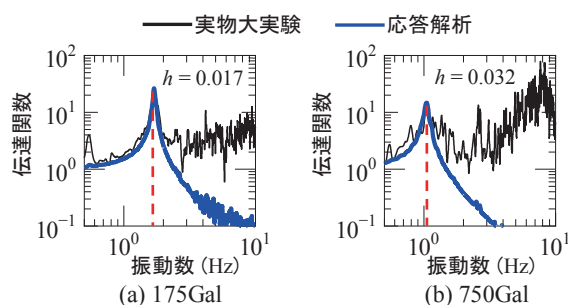


図7 ダンパ等取付電化柱の伝達関数

ンパ等取付電化柱については、電化柱自体の損傷に加えダンパ等取付による減衰付与の効果を含めた電化柱全体系の減衰定数を示している。そのため、それぞれの加振レベルにおいて無対策電化柱に対するダンパ等取付電化柱の減衰定数 h の増加分が、ダンパ等取付による減衰付与の効果と見なすことができる。

図1に示したダンパ等取付の条件では、ダンパ等取付による減衰定数の増加分は175Galで0.004、750Galで0.018となり、比較的大きな地震に相当する750Galの加振では減衰定数が約0.02増加することがわかった。

このように、無対策電化柱およびダンパ等取付電化柱の詳細モデルから1自由度系モデルをそれぞれ求め、さらに1自由度系モデルを用いて実物大実験の伝達関数のフィッティングを行い両者の減衰定数 h を比較することによって、ダンパ等取付による減衰付与の効果を定量的に評価できると考えられる。

4. 減衰に応じた加速度応答スペクトルの作成

4.1 応答加速度算定の条件

ダンパ等取付電化柱の応答加速度は、現行の電車線路設備耐震設計指針において加速度応答スペクトルを作成した際と同様の条件において、前章で説明した1自由度系の応答解析を実施することによって得た。応答解析において、地盤種別は一般的な表層地盤と考えられるG2地盤、およびG3地盤とした。応答加速度の算定条件を表1に示す。この条件により得られた応答加速度について、固有周期比 T_p / T_{eq} (T_p : 電化柱の固有周期, T_{eq} : 高架橋の等価固有周期) ごとに平均化した値から、電化柱の加速度応答スペクトルを作成した。

4.2 加速度応答スペクトルの例

表1の条件で作成した加速度応答スペクトルの例を図8に示す。図8は地盤種別をG3、高架橋の降伏震度を0.6とした条件に対して、ダンパ等の取付を想定して電化柱の減衰定数 h を増加させた場合の加速度応答スペクトルを示したものである。また、参考として、表1の条件で電化柱の減衰定数 h を0.05とした場合の加速度応答スペ

特集：電力技術

クトルもあわせて図8に示している。なお、この減衰定数0.05という値は、電車線路設備耐震設計指針でダンパ等のない無対策コンクリート柱の加速度応答スペクトルを求める際に用いた値であり、一般的なコンクリート構造物の減衰定数を参考にして採用した値である。

図8において減衰定数 h を0.05とした場合の応答加速度に対して、減衰定数 h を0.06, 0.07, 0.10, 0.12とした場合について応答加速度の比をそれぞれ求め、これらを固有周期比 T_p/T_{eq} (0.4, 1.0, 2.3)ごとに曲線で表した結果を図9に示す。図9より、固有周期比が1.0となる条件で減衰定数を0.05から0.06に増加させると、応答加速度が約0.75倍になることがわかる。一方、同様に減衰定数を0.05から0.06に増加させると、応答加速度は固有周期比が0.4となる条件で約1.0倍、固有周期比が2.3となる条件で約0.89倍となることがわかる。このように、高架橋と電化柱が共振すると考えられる固有周期比が1.0となる条件では、固有周期比が0.4, 2.3となる場合と比較して応答加速度の低減率が大きくなることがわかる。

表1 電化柱の応答加速度の算定条件

①	地震波	L2地震動スペクトルⅠ、L2地震動スペクトルⅡそれぞれの振幅を0.1～1.0倍(0.1刻み)した波形
②	地盤種別	G2, G3
③	高架橋	等価固有周期 T_{eq} 0.1～1.5秒(0.01秒刻み)、降伏震度 k_{heq} 0.4～1.0(0.1刻み)
④	電化柱	固有周期 T_p 0.2～1.0秒(0.01秒刻み)、減衰定数 h 0.06, 0.07, 0.10, 0.12

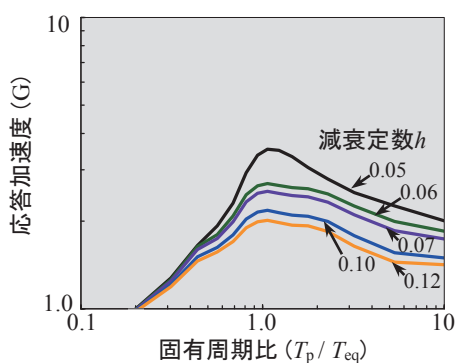


図8 電化柱の加速度応答スペクトルの例 (地盤種別：G3, 高架橋の降伏震度 k_{heq} ：0.6)

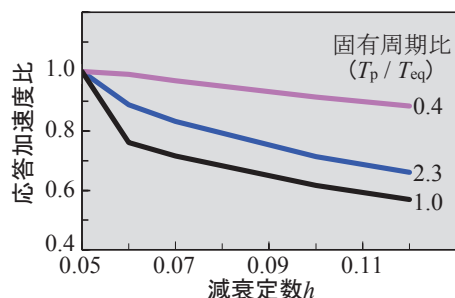


図9 減衰定数の増加による応答加速度の低減 (地盤種別：G3, 高架橋の降伏震度 k_{heq} ：0.6)

5. 減衰定数に応じた応答加速度の補正手法

5.1 応答加速度の補正係数

電車線路設備耐震設計指針における無対策のコンクリート柱(減衰定数 $h = 0.05$)の応答加速度に対して、減衰定数を0.07に増加させた場合について応答加速度の比(以下、補正係数)を求めた結果の例を図10, 図11に示す。高架橋の降伏震度に相当する k_{heq} を0.1刻みで0.4から1.0とした条件に対して、G2地盤およびG3地盤における応答加速度の補正係数を求めた結果を図10および図11にそれぞれ示している。

高架橋と電化柱が共振すると考えられる固有周期比が1.0付近の領域で、応答加速度の補正係数の値が小さくなっている。この領域における高架橋と電化柱の組み合わせでは、ダンパ等取付の減衰付与により電化柱の応答加速度が大きく低減することがわかる。このことは、高架橋と電化柱が共振すると考えられる領域では、固有周期比の僅かな変化に対して応答加速度の補正係数が大きく変動することを示している。そのため、高架橋や電化柱の固有周期を高精度に算定する必要があり、実際の設備に対して固有周期比の差が僅かでも存在すると、補正して得られる応答加速度が実際の値とは大きく異なり、応答加速度を過小(危険側)に見積もってしまう可能性がある。

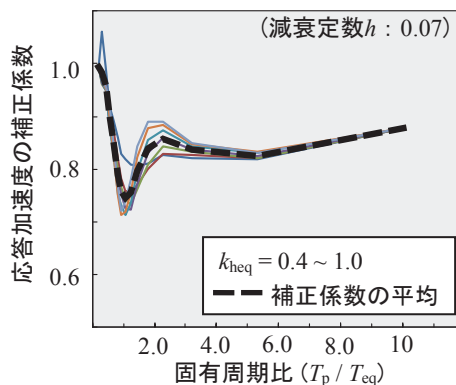


図10 応答加速度の補正係数の例 (G2地盤)

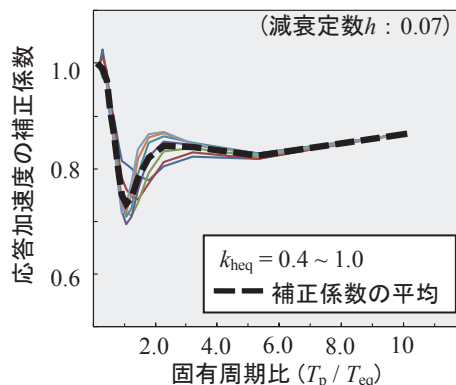


図11 応答加速度の補正係数の例 (G3地盤)

そこで、高架橋と電化柱が共振すると考えられる領域 ($0.8 \leq T_p / T_{eq} \leq 2.0$) では、補正係数を平坦な直線（固有周期比が 2.0 以上の領域における平均値）で近似することとし、図 12 および図 13 に示すように折れ線で補正係数を定める方法を提案する。図 12 および図 13 は、図 10 および図 11 の条件における応答加速度の補正係数を点 (0, 1.0) と点 (0.8, 0.84) を直線で結び折れ線によってそれぞれ示したものである。この折れ線を用いて、電化柱の減衰定数に応じた応答加速度を算定する場合には、高架橋と電化柱が共振すると考えられる領域では応答加速度を多少大きく見積もることになる。しかしながら、一般的に、設計者は高架橋と電化柱が共振する条件での使用を避けるようにすべきであり、提案する折れ線による応答加速度の補正手法は、加速度応答スペクトルを用いた設計において有効な手法であると考えられる。

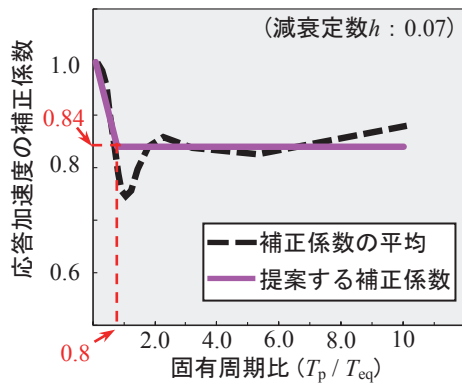


図 12 提案する応答加速度の補正係数の例 (G2 地盤)

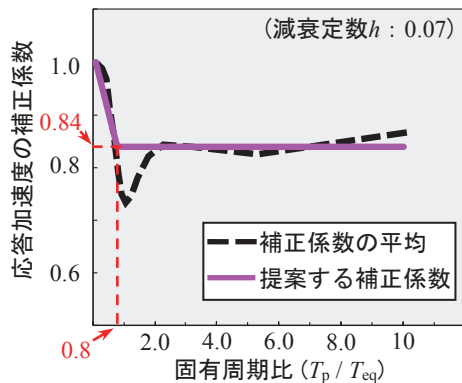


図 13 提案する応答加速度の補正係数の例 (G3 地盤)

5.2 応答加速度の補正手法

5.1 で述べた全ての条件に対して、ダンパ等により減衰を付与された電化柱の応答加速度について、減衰定数を 0.05 とした場合の電化柱（一般的な無対策のコンクリート柱）を基準として、応答加速度の補正係数を求めた結果を図 14 に示す。図 14 は、横軸を固有周期比 T_p / T_{eq} (T_p ：電化柱の固有周期、 T_{eq} ：高架橋の等価固有

周期) とし、縦軸を電化柱の応答加速度の補正係数として表したものである。

減衰を付与された電化柱の応答加速度の折れ線近似した補正係数について、図 12 および図 13 で示すように地盤種別 (G2, G3) による大きな差は見られず、さらに減衰定数を変えても地盤種別による大きな差は見られなかった。そこで、ここでは、G2 地盤および G3 地盤について同一の折れ線で補正係数を定める方法を提案する。G2 地盤、および G3 地盤において、電化柱の減衰定数 h を無対策コンクリート柱に対応する 0.05 から 0.06, 0.07, 0.10, 0.12 へそれぞれ増加させた場合について、応答加速度の補正係数を示す折れ線を求めた結果が図 14 である。

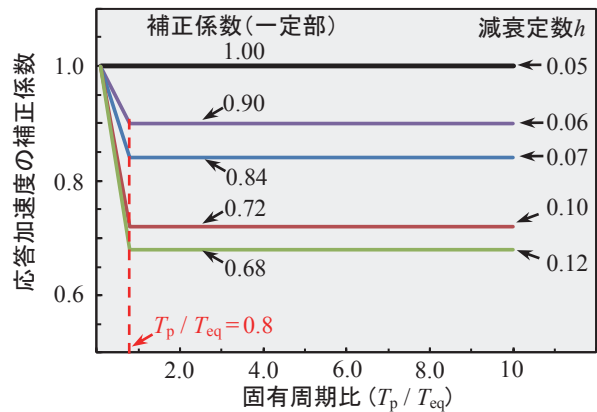


図 14 提案する応答加速度の補正係数 (地盤種別 G2, G3)

6. 現行指針に基づく耐震性能評価への適用

6.1 電化柱の減衰定数同定手法の提案

現行の電車線路設備耐震設計指針では、3 章で述べたように、加速度応答スペクトルの作成に 1 自由度系モデルを用いている。減衰を付与された電化柱の減衰定数については、電化柱の実物大振動台実験を実施し、さらに実験の結果得られた周波数特性から、現行の電車線路設備耐震設計指針と同様の 1 自由度系モデルの周波数特性と比較して減衰定数を同定することが望ましい。ダンパ等により減衰を付与された電化柱について、減衰定数の増加分を同定する手順を図 15 に示す。

現行の電車線路設備耐震設計指針に記載されている加速度応答スペクトルを用い、減衰を付与された電化柱の耐震性能を評価する場合は、無対策電化柱（既存電化柱）の減衰定数を振動台実験等から求め、減衰を付与された電化柱の減衰定数と比較して減衰定数の増加分を算定する必要がある。その後、求めた減衰定数の増加分に現行の電車線路設備耐震設計指針における減衰定数 0.05（一般的な無対策のコンクリート柱の減衰定数）を加算した

値を評価対象の電化柱が有する減衰定数と見積もり、その減衰定数に応じて図 14 より得られる補正係数を現行の加速度応答スペクトルから求めた応答加速度に乗ずればよい。

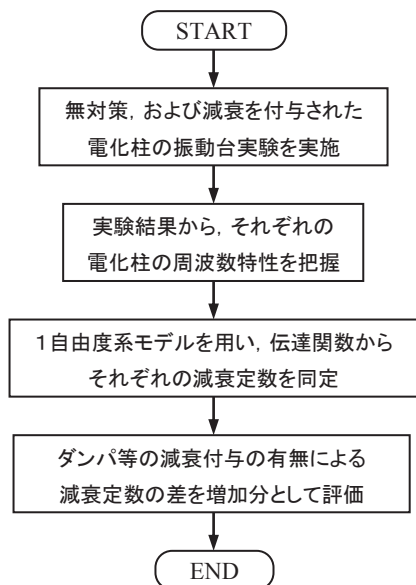


図 15 提案する電化柱の減衰定数の同定手順

6.2 応答加速度の補正の手順

現行の電車線路耐震設計指針に基づいた評価手法では、地震時におけるコンクリート柱の損傷に伴う剛性低下により、その固有周期が 1.0 倍から 1.5 倍までの範囲内で最大の応答加速度を用い、電化柱の曲げ破壊に対する安全性を評価している⁴⁾。また、トロリ線などの電線類やそれらの支持物の重量によって、コンクリート柱の固有周期が 1.1 倍になることを想定している⁴⁾。したがって、電化柱の減衰定数に応じた補正係数により応答加速

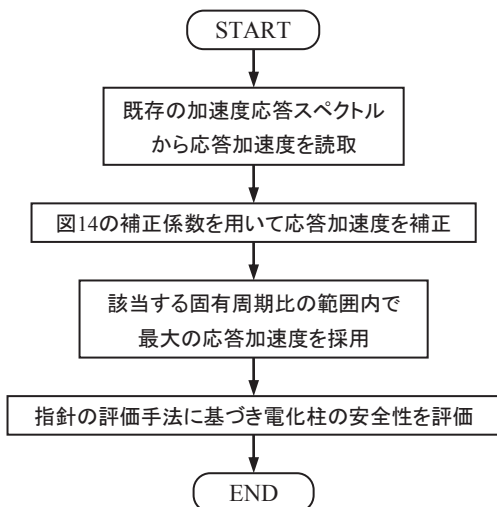


図 16 応答加速度補正手法による耐震性能評価手順の提案

度を補正する際にも、上記の固有周期の範囲内で応答加速度が最大となる補正值を用い、地震に対する電化柱の安全性を評価する必要がある。提案する現行の加速度応答スペクトルから応答加速度を補正して電化柱の耐震性能を評価する具体的な手順を図 16 に示す。

7. おわりに

本稿では、現行の加速度応答スペクトルから電化柱の減衰に応じて応答加速度を補正する手法を提案した。本手法を用いることにより、種々の減衰に応じて電化柱の耐震性能評価が可能になると考えられる。以下にまとめを記す。

- (1) 電化柱の基部にダンパ等を設置した構造に対して、実物大振動実験と応答解析の周波数特性を比較することによって、ダンパ等取付による減衰定数の増加分を定量的に評価する手法を示した。
- (2) ダンパ等取付により減衰定数を増加させた電化柱について、現行の電車線路設備耐震設計指針と同様の 1 自由度系モデルを用いた計算方法により、G2 地盤および G3 地盤の加速度応答スペクトル作成した。
- (3) 一般的な無対策のコンクリート柱（減衰定数 0.05）の加速度応答スペクトルを基準として、ダンパ等取付によって減衰定数を増加させた電化柱の応答加速度の補正係数を、折れ線によって表現することを提案した。
- (4) ダンパ等取付による電化柱の減衰定数の増加分を用いて、現行の電車線路設備耐震設計指針の加速度応答スペクトルから応答加速度を補正し、耐震性能を評価する手法を提案した。

文 献

- 1) 甘利智, 毛利哲, 岩井中篤史, 池田国夫, 佐藤孝一, 小田桐史晃, 山崎猛志, 古山幸男, 中島志穂, 那須聡, 西脇篤, 林屋均, 松浦和史: 東日本大震災における新幹線電力設備の被害状況と傾向分析, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道研究会, pp.13-18, 2012
- 2) 原田智, 酒井大央, 坂井公俊, 室野剛隆: 大規模地震時の電車線柱挙動解析モデルと被害低減手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.10, pp.41-46, 2013
- 3) 網干光雄, 常本瑞樹: 粘弾性ダンパによる電車線柱の振動抑制手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.2, pp.17-22, 2010
- 4) 電車線路設備耐震設計指針・同解説, 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター, pp.4-14, 2013