

鉄道電車線柱を対象とした制震ダンパーの開発 および振動台実験による検証

豊岡 亮洋¹・坂井 公俊²・室野 剛隆³・江尻 譲嗣⁴・田中 剛⁵・横川 英彰⁶

^{1,2,3} (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:¹akitoyo@rtri.or.jp, ²ksakai@rtri.or.jp, ³muro@rtri.or.jp

⁴ (株) 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:ejiri.joji@obayashi.co.jp

⁵ オイレス工業 (株) 免制震事業部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000)

E-mail:g.tanaka@oiles.co.jp

⁶ (研究時) オイレス工業 (株) 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南1-6-34)

E-mail:h-yoko44@pwri.go.jp

東北地方太平洋沖地震をはじめとする既往の大規模地震時において、鉄道電車線柱の損傷が多数報告されている。特に、高架橋上に設置された電柱では、高架橋のロッキング振動、および電柱と高架橋振動の共振等により電柱の応答が増幅され、塑性化や折損を生じる可能性があることが指摘されている。電柱や架線等に被害が生じた場合、たとえこれを支持する高架橋自体の損傷が軽微であったとしても、列車の運行再開に長期間を要する恐れがある。そこで本研究では、大規模地震を対象とした電柱の制震ダンパーを開発し、数値解析によりその効果を検証した。また、実大電柱を用いた振動台実験を実施し、本制震装置により電柱の変位応答を大幅に低減可能であることを確認した。

Key Words : Railway pole, vibration control, damper, full-scale shake table test

1. はじめに

鉄道は基礎、構造物、軌道、車両、電力設備などの個別構造が直列システムを形成しており、地震時においてこれらのうち一つでも機能不全が生じると、鉄道システムの機能低下および喪失が生じる危険性がある。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、鉄道電車線柱に倒壊や折損などの被害が多数発生し^(例えば1)、各構成要素のさらなる耐震性向上が鉄道システムの信頼性向上のために不可欠であることを再認識させる契機になった。

ここで、電車線柱の耐震設計においては、高架橋の非線形振動特性を考慮して作用を決定し、これに対して耐力設計を行う手法が一般的に用いられている²⁾。しかし、電車線柱の応答を、大規模地震を受けた際の非線形挙動にまで踏み込んで評価し、またこの応答を積極的に低減する手法については、未だ十分検討が行われていないのが実状であると考えられる。特に高架橋上に設置された電柱は、地震動が

高架橋の固有周期付近で選択・増幅されるため、電柱との共振が生じた場合には電柱に非常に大きな振動が生じ、塑性化や折損が生じる可能性があることが指摘されている²⁾。今次の地震被害をはじめとした既往の被災事例が示すように、電車線柱や架線等に被害が生じた場合、たとえこれを支持する高架橋自体の損傷が軽微であったとしても、列車の運行再開に長期間を要する恐れがある。

以上のような現状をふまえ、大規模地震時における電車線柱の被害を積極的に軽減する耐震対策が必要であると考えられる。このためには、まず電車線柱の動的挙動を精度よく評価可能な数値モデルを構築し、このモデルや振動実験等により対策工法の提案と検証を行う必要がある。このうち、高架橋上に設置された電車線柱の挙動評価手法については、橋梁天端の水平応答加速度および回転応答を考慮することで動的応答を算出する手法³⁾が提案されているが、電柱自体の非線形挙動については、一部載荷試験事例があるものの⁴⁾、動的実験による検証事例は

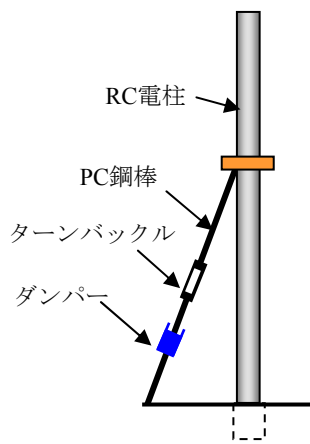


図-1 提案する電柱用制震構造

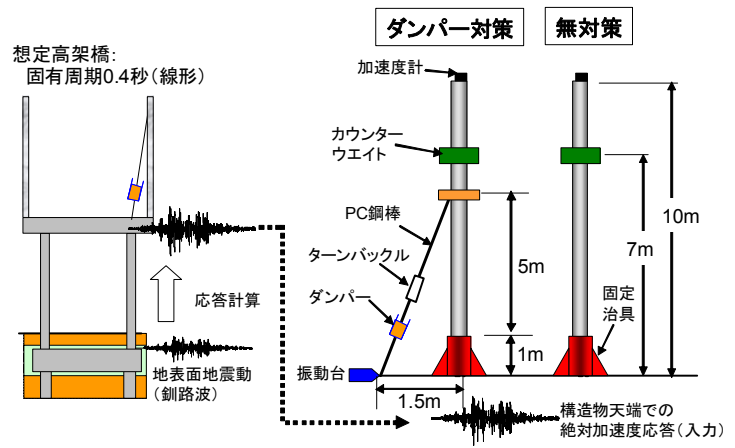


図-3 振動台実験の概要

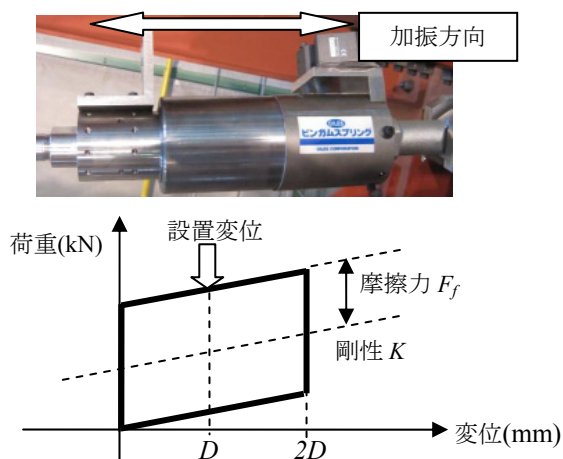


図-2 使用するダンパーの荷重-変位関係

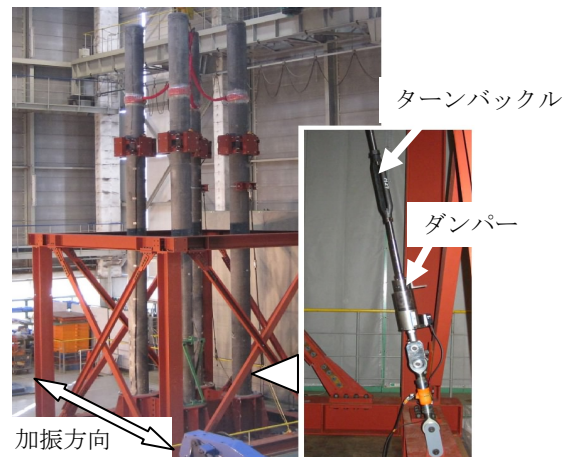


図-4 供試体設置状況

少ないのが現状である。また、被害軽減工法については、現状では鋼板巻き補強による対策が中心であるが、電柱のような塔状構造物は一般に減衰性能が非常に低いため、制震装置によりエネルギー吸収性能を付加する対策も有効と考えられ、粘弾性体を用いたもの⁵⁾やTMD構造を適用した制震構造^{6),7)}などが提案されている。しかし、これらは常時および中小規模地震時を想定しており、大規模地震時を対象とした制震効果はほとんど検討されていない。

そこで本研究では、高架橋上に設置された電柱を対象とし、大規模地震時の耐震性能向上を目的とした制震装置を開発するとともに、実規模電柱を用いた振動台実験を実施し、制震装置による応答低減効果を検証することを目的とする。

2. 電柱用制震構造の概要

本研究では、電柱の制震対策として、図-1のようにPC鋼棒を介して電柱および構造物上に接続することで、地震時の電柱の振動をダンパーのエネルギー吸収により低減させる構造を提案する。ダンパー

としては様々なものが適用可能であると考えられるが、本研究では特殊充填材の圧縮性と流動抵抗性を利用することで地震エネルギーを吸収するダンパーを用いた。このダンパーの荷重-変位関係は、図-2のように摩擦型の履歴に剛性成分が重畳した履歴形状を示す。本ダンパーは剛性成分を有しているため、地震後のダンパーの残留変位を徐々に回復させる自己復元機構を有している。この剛性成分については、コイルスプリングや皿ばね等の機械要素を利用することなく実現している。

また、本ダンパーは変位正方向のみに荷重を發揮する特性を有するため、図-1に示すようにPC鋼棒に連結したターンバックルを用い、図-2のように設置変位Dまでオフセットさせて電柱と接続する。これにより、ダンパーの正負両方向に対してエネルギー吸収を行うことが可能となるとともに、プレテンションが導入されることでダンパー圧縮時のPC鋼棒の座屈の危険性が減少し、PC鋼棒をはじめとする装置全体をコンパクトに製作することができる。

3. 振動台実験による検証

(1) 実験概要

提案したダンパーの制震効果を実験的に検証するため、**図-3**および**図-4**のように、実規模電柱を振動台上に構築して動的加振実験を行った。実験は(株)大林組技術研究所の三次元大型振動台により一方向加振を実施した。試験は高さ10m、直径400mm(呼び名:10-40-T11B)の実規模コンクリート電柱を用いた。この電柱には、 $\phi 10.7$ のPC筋(D種1号)12本、およびD10の鉄筋4本(SD345)がそれぞれ円周方向に等間隔に配置されている。この電柱を、**図-3**に示す高さ1mのシリンダー型固定治具に差し込み、これらを振動台上に設置した。

コンクリート電柱と固定治具の間にはグラウトを注入し、この固定部分でエネルギー吸収が生じないようにした。供試体としては、電柱単体(以下、無対策電柱と称する)、およびこれにダンパー対策を施した電柱(以下、ダンパー対策電柱)を用意し、両者を同時加振することにより動的応答を比較することとした。架線や架線金具の影響は、電柱頂部から3m下がりの位置に5kNのカウンターウエイトを設置することで重量として考慮した。

ダンパーは、**図-3**および**図-4**に示すようにターンバックルおよびPC鋼棒(B種1号呼び26mm・L=1635mm×2本)を介して接続し、電柱とダンパーの軸線が構成する面内方向に1方向加振を行った。ダンパーは実験における設置の都合上、電柱高さ6m位置、振動台上には電柱中心位置から1.5m位置にそれぞれピン結合で設置した。なお、ダンパーの設置位置については、電柱の応答を効率的にダンパーに作用させるためには、可能な限り地表面と平行にダンパーを設置することが望ましいが、特に高架橋上の線路直角方向にダンパーを設置する場合、電柱基部とダンパー設置位置の間の離隔が十分確保できない可能性があるため、ここでは実験における設置条件を勘案して電柱中心位置から1.5m位置とした。この設置位置と制震効果の関係については後述する。

(2) 計測項目

電柱の動的挙動を測定するため、電柱頂部、および頂部から高さ方向に2.5m間隔で数点加速度計を設置した。また、ダンパーの軸方向に対してロードセル及びレーザー変位計を設置し、ダンパーの荷重-変位関係を直接計測した。これらの測定結果をもとに、主に電柱頂部の絶対加速度応答、および電柱頂部と振動台との相対変位応答を比較することで、ダ

ンパーの効果を検証することとした。なお、電柱頂部と振動台の相対変位についてはこれを直接測定することができなかったため、電柱に大きな残留変位が生じないことを前提に、電柱頂部と振動台の相対加速度波形を2回積分することにより求めた。

(3) 電柱の動的振動特性

地震波加振試験に先立ち、電柱単体の振動特性を把握するためのインパクト加振を実施し、自由振動波形を用いて電柱の弾性固有周期および減衰定数を同定した。その結果、無対策電柱については、弾性固有周期0.32秒、減衰定数は0.6%、ダンパー対策電柱については、弾性固有周期0.25秒、減衰定数は0.3%であった。このように電柱自体の減衰性能は非常に低く、特にダンパー対策を行っていない場合、地震時に塑性変形を生じる可能性があると考えられる。また、ダンパー対策電柱で固有周期および減衰定数が無対策電柱よりも小さくなっているのは、PC鋼棒およびダンパーに導入した初期張力により電柱の振動が抑制されているためと考えられる。

次に、非線形応答を示す電柱に対してダンパーを設計するため、電柱の降伏モーメントおよび塑性域における履歴挙動を表現可能なモデルを設定する。このため、本実験と同様の条件で別途ホワイトノイズによる加振試験を実施し、電柱の動的挙動を説明できるパラメータを電柱モデルの非線形特性として設定することとした。電柱の解析モデルは、**図-5**に示すように固定治具上端～電柱頂部の挙動をはりモデルにより表現し、非線形特性として剛性劣化バイリニア型履歴(二次剛性比0.3)を有するM- ϕ モデルを仮定した。質点重量は電柱9m分の重量(17.7kN)を1m間隔で均等配分し、実験条件と同様に付加重量5kNを高さ6m位置において考慮した。

以上のモデルを用い、解析による電柱頂部の絶対加速度応答が実験結果と整合するよう、初期剛性と降伏モーメントを非線形最小二乗法により同定した結果、降伏モーメントとして $M_y=60$ kN-m、弾性曲げ剛性 $EI=5.8 \times 10^4$ kN-m²のパラメータが得られた。

図-6にはこれら同定されてパラメータを用いて電柱頂部～振動台加速度の伝達関数を計算したものを実験結果と比較して示す。この図から、設定したパラメータ及びモデルにより電柱の1次および2次モード付近の挙動を精度よく表現できていることがわかる。また、この弾性曲げ剛性と**図-5**のモデルを用いて電柱単体の弾性固有値解析を実施したところ、1次モードの固有周期は0.33秒となり、先のインパクト加振試験の結果ともほぼ整合しており、以下では実験

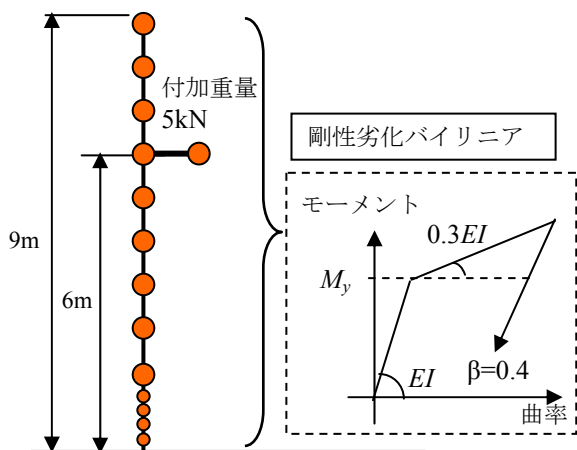
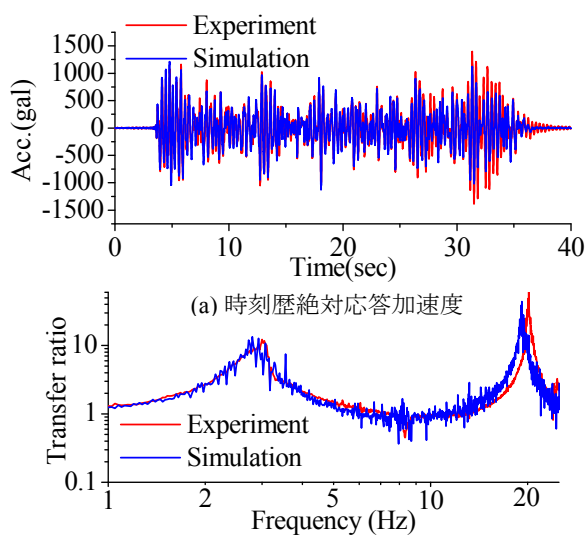


図-5 無対策電柱の動的解析モデル



(a) 時刻歴絶対対応加速度
(b) 振動台～電柱頂部伝達関数
図-6 電柱頂部加速度応答比較
(ホワイトノイズ 700gal)

結果から同定した非線形特性をダンパーの設計を行う際の検討モデルとして用いた。

(4) 入力地震動

電柱が設置された高架橋に地震動が作用した場合、地表面地震動は高架橋の固有周期付近の成分が選択・増幅されて電柱に作用することになる。そこで、図-3に示すように、高架橋を想定した1自由度構造物に地表面地震動を作用させた計算を行い、得られた構造物の絶対加速度応答を振動台への入力地震動として用いた。本研究では高架橋の振動が電柱と共振して損傷する状態を対象とするため、高架橋は線形とし、高架橋の固有周期としては無対策電柱が塑性化した後に共振に近い挙動を生じさせることを想定して電柱の弾性固有周期よりも若干長周期側の0.4秒とした。構造減衰は10%を設定した。地震動

は、1993年釧路沖地震における釧路海洋気象台記録NS成分を用い、高架橋上の最大加速度レベルを1300gal程度（地表面で500gal相当）まで漸増させて加振を行った。この地震動は継続時間が比較的に長いので、電柱に継続的に繰り返し変位を作用させることを意図して選定した。

(5) ダンパーの設計

ダンパーの設計では剛性 K 、摩擦力 F_f 、および変位 D を設定する必要がある。ここで、ダンパーに発生する荷重が電柱の応答により生じる慣性力と比較して過大もしくは過小な場合、ダンパー部分は固定もしくはフリーの状態に近くなり、いずれの場合も十分な振動エネルギー吸収を行うことができない。

そこで、先に設定した電柱の動的解析モデルと入力地震動を用い、ダンパーの特性をパラメトリックに変化させて動的解析を行い、今回の試験条件において最適なダンパーの特性を求めた。入力地震動としては先述の釧路波を加速度調整したものを用い、電柱基部の最大応答塑性率を求めた。なお、実験ではこの釧路波の入力レベルを740gal（地表面レベルで300gal相当）まで増加させて実験を行った。これは、無対策電柱を塑性域まで応答させると同時に、実験上の安全性の観点から電柱が急激に損傷しない条件として設定しており、事前解析によれば電柱頂部の変位応答は約150mmとなった。そこで、この入力レベルに対して最も制震効果を発揮するダンパーの諸元を探索した。ダンパーの設置位置は図-3に示す実験条件と同様に設定した。

なお、本ダンパーの剛性要素は、常時におけるPC鋼棒の張力の保持、および地震後の残留変形の低減を目的に導入しているため、地震時挙動を把握する今回の検討においては、エネルギー吸収性能に直接関係する摩擦力のみを設計パラメータとして変化させた。剛性については、ダンパーを人力で設置できる程度の寸法および重量としたときに、使用する流体の特性やこれまでの製作実績等を勘案して $K=500\text{kN/m}$ とした。また、ダンパーの設計最大変位は、上記の入力レベルにおいて無対策電柱の応答解析を実施したところ、ダンパー設置位置（電柱6m位置～電柱基部1.5m位置）における最大変位量が $\pm 20\text{mm}$ となったため、ダンパーの減衰効果および製作性を考慮して $D=15\text{mm}$ とした。

図-7には、釧路波の地表面加速度レベル、およびダンパーの摩擦力を変化させたときの基部の最大応答塑性率を、無対策電柱における最大応答塑性率で基準化して示す。この図から、応答を最小化するダ

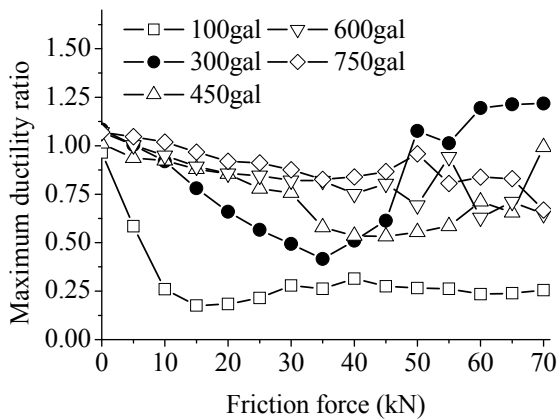


図-7 ダンパー摩擦力と電柱基部最大塑性率比
(釧路波入力：無対策電柱の応答=1)

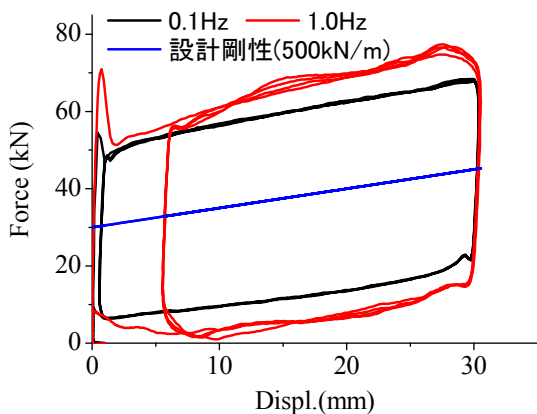


図-8 単体加振による性能試験結果

ンパーの摩擦力の最適値は入力加速度レベルによって異なっているが、今回実験で想定する地表面加速度300galの条件においては、摩擦力として30～40kN程度を与えることで電柱基部の損傷を最小化できる可能性があることがわかる。

この結果を基に、ダンパーの目標摩擦力として $F_f=30\text{kN}$ を設計条件とした。図-8には、ダンパー単体で実施した最大変位30mmの三角波加振試験結果を示す。このように、加振周波数1Hzでは速度効果により若干履歴が膨らんでいるが、製作したダンパーは、所定の減衰特性および剛性を発揮していることがわかる。なお、振動台実験においては、ダンパーを図-3および図-4の形で接続し、圧縮・伸張側の双方に対してダンパーが作用するように、実験開始前に変位15mmまでターンバックルで初期変位を与えた状態で加振試験を行った。

4. 実験結果と考察

ここでは、無対策電柱およびダンパーが比較的大きく応答した実験結果として、ダンパーの設計に用

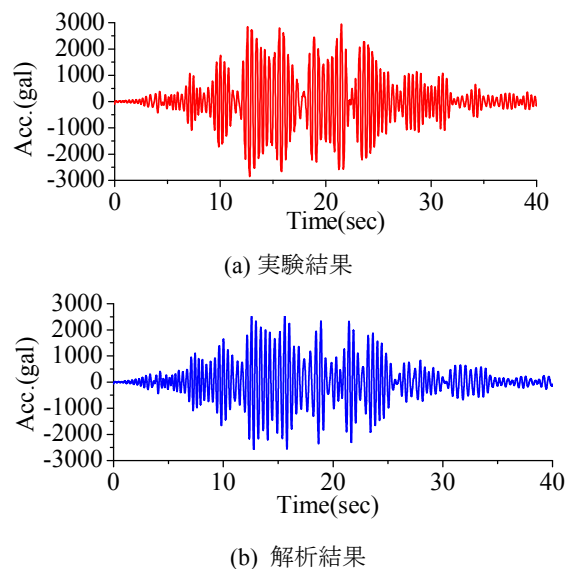


図-9 無対策電柱頂部の絶対加速度比較

いた釧路波740gal入力（地表面レベルで300gal相当）に着目してその結果を以下に示す。ただし、振動台の動特性の関係で、実際に振動台上で生じた最大加速度は932galであった。

まず、図-5で設定した無対策電柱の非線形モデルの妥当性を検証するため、振動台上で計測した入力を用いて計算した電柱頂部の絶対加速度応答を、実験結果と比較して図-9に示す。両者を比較すると、実験結果の方が解析結果と比較して20秒付近で若干減衰が小さい傾向が見られるが、最大加速度や全体的な波形の形状等については良好な整合性を示しており、図-5のモデルにより無対策電柱の非線形挙動を表現できているものと考えられる。

次に、ダンパーの制震効果を確認するため、無対策およびダンパー対策電柱の実験結果について、電柱頂部の絶対加速度と電柱頂部～振動台の相対変位の関係を比較したものを図-10に示す。この図から、無対策電柱は塑性化による剛性の低下が観察され、頂部で187mmの最大変位を生じている。電柱の履歴応答は原点指向に近い性状を示しているが、これは電柱内に配置されたPC筋の剛性による復元力のためと考えられる。このように、今回対象とした電柱では電柱自体の減衰性および塑性化時のエネルギー吸収性能のいずれも小さく、大規模地震時には大きな損傷を受ける可能性があることが分かる。

これに対しダンパー対策電柱では頂部の最大変位が無対策電柱の約30%の55.9mmに抑制され、電柱本体の剛性低下も限定的であることが分かる。この低減効果は事前にシミュレーションにより求めた図-7における低減効果よりも若干大きい

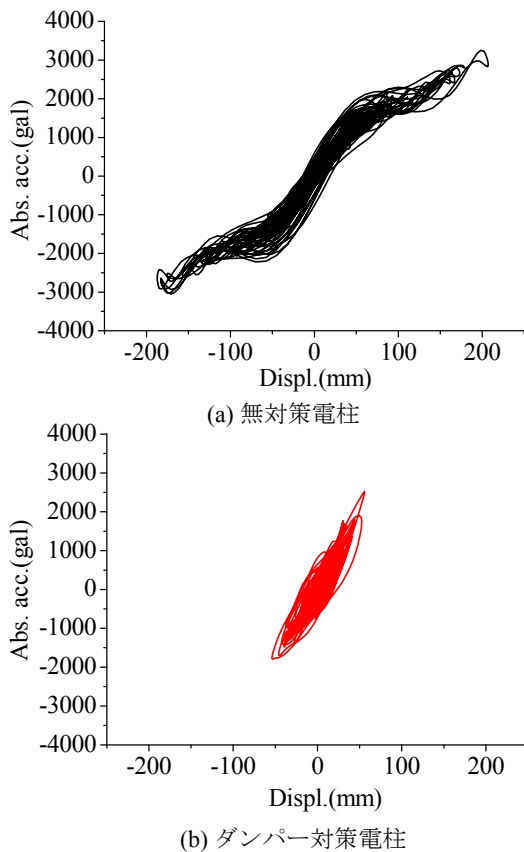


図-10 電柱頂部の絶対加速度～相対変位応答

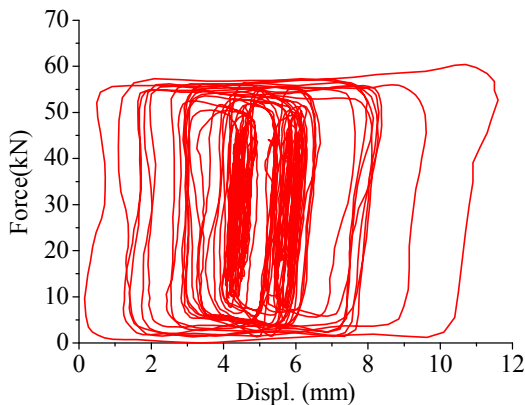


図-11 ダンパーの荷重-変位応答

振動台に実際に入力された加速度が解析で想定したレベルよりも大きいため、実験では電柱変位がより大きく生じ、ダンパーのエネルギー吸収もこれに応じて大きくなったためと考えられる。

図-11には、実験で測定したダンパーの荷重-変位関係を示す。この図から、ダンパーは設計で想定したバイリニア型の履歴性状を示し、安定したエネルギー吸収が行われていることが分かる。

以上の結果から、提案するダンパー対策を行うことで、今回実験を行った条件では電柱の変位応答を大きく抑制することが可能であると考えられる。

なお、上記の試験を行った後に更に最大加速度を増加させて加振を行ったが、ダンパーが設計最大変

位量をオーバーして応答したため実験を終了した。実験後に電柱を目視観察したところ、曲げに伴うひび割れが、固定治具上端から約2～3mまでの範囲で100mm～200mmの間隔で観察されたが、電柱内のPC鋼棒の軸力によりひび割れは閉じた状態であった。また、ダンパー対策電柱においては無対策電柱と比較してひび割れ本数は少なかった。さらに、無対策電柱、ダンパー対策電柱いずれにおいても、折損や顕著な残留変形などの大きな損傷等は観察されなかった。これは電柱内のPC鋼棒が芯材の働きをして残留変位を抑制したためと考えられる。実際、実験後に電柱を破砕解体した際も、PC鋼棒に顕著な損傷はみられなかった。

このように、今回の実験ではダンパーの有無による塑性応答の低減効果については確認できたが、折損のような大規模被害が生じる状態まで無対策電柱を加振することができなかった。これについては、別途静的試験等によりPC鋼棒が破断するような領域まで载荷を行い、これと数値解析を組み合わせたい検討を行う必要がある。ただし、無対策電柱においては電柱自体の損傷は軽微であったが、図-10(a)に示すように最大加速度で3G近く、最大変位で187mmの応答が生じており、実際の構造で制震対策等を行わない場合、電柱基礎部の損傷や架線の切断、付帯物の落下等により機能損傷を生じる可能性があると考えられる。

5. 想定高架橋周期が制震効果に与える影響

実験の結果、ダンパーを導入することにより、無対策電柱と比較して大幅に応答を低減可能であることが確認されたが、インパクト加振試験によれば、ダンパー対策電柱と無対策電柱の弾性固有振動数が異なっているため、高架橋と制震対策電柱の固有周期が異なることによる非共振化の方が、ダンパーのエネルギー吸収よりも応答低減に影響した可能性もある。この場合、高架橋の固有周期によっては実験とは異なり応答が増大する可能性もあるが、今回の加振試験は想定高架橋の固有周期を0.4秒と固定して試験を行ったため、これらの実験結果のみから構造物と電柱の非共振化とダンパーのエネルギー吸収の影響を定量的に分離することは難しい。また、入力波の特性やダンパーが有する剛性成分が、実験における変位応答抑制に寄与した可能性もある。

そこで、釧路波の地表面最大加速度を300galで固定し、高架橋の固有周期を変化させて電柱の動的解析を行い、電柱への入力地震動の卓越周期とダンパ

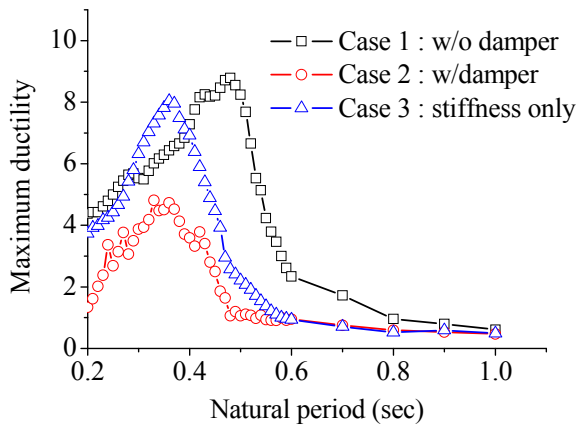


図-12 高架橋固有周期と最大応答塑性率の関係
(釧路波 300gal 入力の場合)

一のエネルギー吸収の関係を検討した。解析に用いたモデルは、電柱については図-5、ダンパーについては図-2のモデルをそれぞれ用いた。また、ダンパー取り付け位置は、今回の実験と同様に電柱高さ6m点、地上部1.5m離れの点に設定し解析を実施した。

解析は、無対策電柱 (Case1) およびダンパー対策電柱 (Case2) に加え、ダンパーの剛性による影響を検討するため、ダンパー要素を線形ばね要素に変更し、剛性として図-14の最大変位11.4mmにおける等価剛性(=5276kN/m)を与えたケース (Case3) についても実施した。すなわち、高架橋周期を変えた場合に、無対策電柱 (Case1) の応答を基準として、ダンパーの制震効果 (Case2) および等価剛性による応答低減効果 (Case3) を定量的に検証した。

図-12には、Case1~3それぞれについて、電柱基部の最大応答塑性率の比較を示す。このうち、Case1とCase3の比較から、剛性要素を導入したCase3の場合、無対策電柱の応答がピークとなる高架橋固有周期0.5秒付近では応答抑制効果がみられるが、今回実験を行った0.4秒付近では無対策電柱とほとんど同等の応答を示していることが分かる。また、剛性の付与により振動系全体の共振周期が低下するため、0.35秒付近で別のピークが生じ、この付近の周期では無対策電柱と比較して逆に応答が増大する傾向が見られた。

これに対して、Case2のダンパーを導入した場合、共振周期はCase3に近い領域で生じているものの、ダンパーの付加減衰によるエネルギー吸収効果により、広帯域にわたって応答低減効果が得られることがわかる。以上から、地震時において電柱に作用する地震動の卓越周期が時々刻々変化する場合においても、提案するダンパー対策が有効に機能する可能

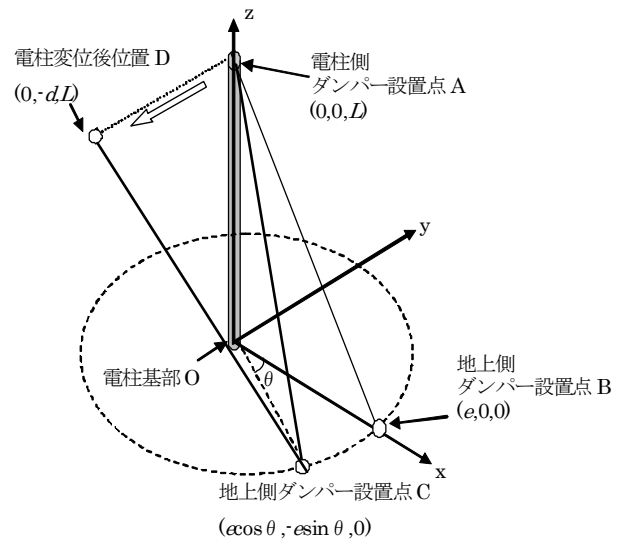


図-13 電柱とダンパーの配置

性があることを確認した。なお、入力地震動の特性が応答に与える影響についても別途検討しており、入力地震動を変えた場合でも同様の傾向が得られることを確認している⁸⁾。

6. ダンパー設置位置と制震効果の関係

振動台実験では、図-3に示したように、ダンパーの軸線と電柱がなす平面 (以下、ダンパー平面) に対して、地震動を並行に入力して実験を行っている。これは、電柱側および地上側のダンパー設置位置が決まった場合に、最も電柱の変位を効率的にダンパーに伝達する配置となっている。一方で、実際の構造においては、高架橋の振動特性や地震動の特性等により、必ずしも電柱の振動方向とダンパー平面が一致しない場合があると考えられる。また、電柱損傷時に伴う建築限界支障を防止することを目的とした場合、電柱の線路直角方向に対する振動を抑制する必要があると考えられるが、線路直角方向では軌道設備等の関係から、ダンパーの地上設置点を電柱基部から十分離すことが難しい可能性がある。

そこで、図-13のように座標軸を設定して電柱およびダンパーの電柱側・地上側固定点を配置し、ダンパー平面OABと電柱軸線OAの位置関係に応じて、電柱頂部の変形がどの程度ダンパーに伝達されるかについて検討を行った。すなわち、図-13において、電柱側におけるダンパー取り付け位置で電柱に水平変位 d が生じ、頂部の位置がAからDに変位した場合を想定すると、ダンパーの相対変位 $\delta_d (=DC-AC)$ に対する電柱の水平変位 d の比 D_r は、幾何学的な関係から次式により与えられる。

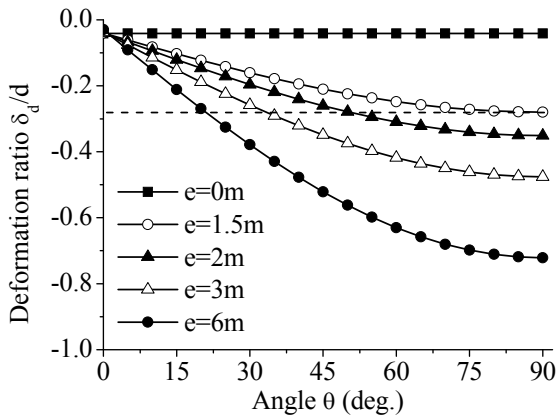


図-14 電柱設置位置と変位倍率 D_r の関係

$$D_r = \frac{\delta_d}{d} = \frac{\sqrt{(e \cos \theta)^2 + (-e \sin \theta + d)^2 + L^2} - \sqrt{e^2 + L^2}}{d} \quad (1)$$

ここに、 L および e はそれぞれ電柱側、地上側における電柱基部とダンパー設置位置の距離を表す。また、 θ は図-13のようにダンパーの軸線と電柱が構成する面OACと電柱の振動方向のなす角であり、 $\theta=90^\circ$ において振動台実験と同じ条件となる。式(1)に示す変位比 D_r は、電柱の変位量をダンパーの変位量に換算する係数となる。なお、簡単のため、電柱の弾性変形および塑性変形は全て電柱基部において代表させ、電柱自体は剛体変形するものとし、また水平変形に伴う鉛直変位についてはその影響は小さいと考えて考慮していない。

図-14には、電柱側設置高さ L を実験と同じ6mとし、地上側の設置位置 e および θ を変化させて計算した変位比 D_r を示す。この図から、加振方向とダンパー平面が垂直な場合は、ほとんどダンパーに変位が生じないことが分かる。また、振動台実験を行った条件 ($e=1.5\text{m}$ 、 $\theta=90^\circ$) では、電柱の水平変位量の約3割がダンパーに作用することになるが、これについては図-10(b)の頂部応答を高さ6m位置に比例配分した値 (約36mm) と図-11における最大応答変位量の関係から概ね妥当な数値と考えられる。

一方で、この振動台実験と同じダンパー変形量を確保するためには、図-14中の点線で示すように、 $e=2\text{m}$ とした場合で $\theta=50^\circ$ 程度、 $e=3\text{m}$ とした場合で $\theta=30^\circ$ 程度を確保すればよいことがわかる。

このことから、線路直角方向 (y 軸) に対して必要な設置距離を確保できない場合でも、地上側の設

置点を線路方向 (x 軸) に回転移動することで、線路直角方向に平行にダンパーを配置した場合と同等の制震効果を得られる可能性があることが分かる。

なお、以上の検討は、電柱の変位 d が与えられた条件下におけるものであり、同じダンパー配置に対して電柱の変位 d をより低減させるためには、ダンパーのエネルギー吸収性能を向上させる必要があり、これは実際の適用条件を考慮した数値解析等により検討する必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、高架橋上における電車線柱の耐震性向上を目的とした制震ダンパーを提案するとともに、実大規模電柱を大型振動台で同時加振し、電柱の動的振動特性および制震効果の確認を行った。また、電柱と高架橋の固有周期の関係、およびダンパーの設置方法が応答低減効果に与える影響を検討した。本研究により得られた成果を以下に示す。

- (1) 実規模のコンクリート電柱を対象に、インパクト加振試験や振動台を用いたホワイトノイズ加振試験を行い、コンクリート電柱の動的非線形特性を表現するはりモデルおよび履歴パラメータを同定した。このモデルを用いて地震波加振試験の結果を再現したところ、電柱頂部の絶対加速度応答において実験結果と良好な一致が得られた。
- (2) ダンパーとPC鋼棒より構成される電柱の制震装置を提案し、その効果を検証するため振動台を用いた動的加振試験を行った。その結果、釧路海洋気象台記録NS成分740gal入力 (地表面レベルで300gal相当) が固有周期0.4秒、減衰10%の高架橋に作用したことを想定した場合、電柱頂部の最大変位応答を、無対策電柱の約30%に低減する効果が得られ、提案する機構によればダンパーのエネルギー吸収により制震効果を得ることが可能であることを明らかにした。
- (3) 電柱と高架橋の固有周期の関係が制震効果に与える影響を数値解析により検討した結果、今回使用したダンパーでは、そのエネルギー吸収効果により、高架橋の固有周期によらず無対策電柱よりも電柱基部の応答塑性率を低減可能であることを明らかにした。このことから、大規模地震時において電柱に作用する地震動の卓越周期が時々刻々変化する場合においても、提案するダンパー対策が有効に機能する可能性があることを確認した。
- (4) ダンパーを実際に設置することを想定し、ダン

パーの設置位置と電柱振動方向の関係が、ダンパー変形量に与える影響を幾何学的な検討から明らかにした。その結果、電柱の線路直角方向の振動に対してダンパーの制震効果を発揮させることを想定した場合、線路方向に地上側の設置点を回転移動することで、線路直角方向に平行にダンパーを配置した場合と同等の制震効果を得られる可能性があることを明らかにした。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，2011.
- 2) 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.
- 3) 坂井公俊，室野剛隆，今村年成：電車線柱と橋脚の相互作用の簡易な耐震評価法の提案，土木学会第63回年次学術講演会，pp.253-254，2008.
- 4) 海原卓也，小林薫，葉山佳秀：PC電化柱の振動特性に関する実験的研究，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集V-403，pp.806-807，1998.
- 5) 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 No.24，Vol.2，pp.6-17，2010.
- 6) 飯田毅，河野健二，飯田久雄，立石一真：チェーンダンパーを有する照明柱の地震応答特性，土木学会地震工学論文集Vol27，No.20，pp.1-4，2003.
- 7) 尾畑守夫，森尻涉，島崎洋治：転動型制振装置の照明柱に対する制振効果，土木学会論文集Vol.766，I-68，pp.339-350，2004.
- 8) 豊岡亮洋，坂井公俊，室野剛隆，江尻讓嗣，田中剛，横川英彰：鉄道電車線柱用制震ダンパーの開発と振動台実験による検証，構造工学論文集Vol.57A，2011.

DEVELOPMENT OF THE VIBRATION REDUCTION DAMPER FOR A RAILWAY POLE AND ITS VERIFICATION USING SHAKE TABLE

Akihiro TOYOOKA, Kimitoshi SAKAI, Yoshitaka MURONO, Joji EJIRI,
Go TANAKA and Hideaki YOKOKAWA

In this research, response reduction method for a mast on a railway viaduct is proposed by means of the viscous-type damper. The effectiveness of the proposed countermeasure was investigated by the shaking table tests, in which real-scale masts with and without dampers were mounted and excited by an expected motion on a hypothetical viaduct. It is confirmed that the damper could reduce the displacement at top of the mast by 70% from that without damper. It is also clarified through numerical simulations that the proposed damper has a capability to reduce response of a mast, regardless of the natural period of a viaduct.