

電車線路設備耐震設計指針の改訂

清水 政利* 原田 智* 室野 剛隆** 坂井 公俊***

Revision of Seismic Design Guideline for Overhead Contact Systems

Masatoshi SHIMIZU Satoshi HARADA Yoshitaka MURONO Kimitoshi SAKAI

The Seismic Design Guidelines for Overhead Contact Systems describes the design method for preventing damage of supports in overhead contact systems by an earthquake. The Design Standard for Railway Structures of Seismic Design was revised in 2012. The dynamic behavior of the supports of overhead contact systems are greatly influenced by the dynamic behavior of the railway structures. Therefore, following the revision of this Design Standard, we have made up a new revision of Seismic Design Guideline for Overhead Contact Systems. This paper reports an outline of the revision.

キーワード：電気鉄道，鉄道構造物，電車線路，地震，耐震設計，支持物

1. はじめに

「電車線路設備耐震設計指針」は、地震による電車線路設備の倒壊や列車の走行空間を支障するような有害な損傷の発生を防ぐことを目標として、そのための設計方法を示したものである。

鉄道構造物についての耐震設計の設計標準である「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」¹⁾が2012年に改訂された。地震時における電車線支持物の挙動は土木構造物の挙動と密接な関連があることや、土木構造物や電車線路設備等を含めた鉄道設備全体の性能について協調を図る必要性から、この改訂に合わせて「電車線路設備耐震設計指針」の改訂を行った。

本報告では、改訂した電車線路設備耐震設計指針²⁾の概要について述べる。

2. 電車線路設備耐震設計指針の策定と改訂の経緯

2.1 指針の策定と改訂の経緯

1978年に発生した宮城県沖地震により、当時建設が進められていた東北新幹線の電車線路設備がコンクリート柱の折損等の多大な被害を受けた³⁾。その多くが高架上の被害であり、土工区間ではほとんど被害がなかった。従来、電車線路設備の支持物の強度設計については地震荷重よりも風圧荷重に主眼をおいていたが、この被害状況により耐震設計の見直しが急務となり、社団法人鉄道電化協

会（現・一般社団法人日本鉄道電気技術協会）に電車線路耐震性研究委員会が設置され、ここでの検討結果が「電車線路設備耐震設計指針（案）」として策定され、1982年に発行された⁴⁾。この指針は、電車線路と土木構造物の動的相互作用を考慮した修正震度法によるものである。

その後、1995年に発生した兵庫県南部地震では、土木構造物が大きな被害を受け、その耐震設計が見直されるとともに、構造物が受ける地震力も大幅に改訂された。電車線路設備の耐震設計は、基本的にそれを支持する構造物の地震力を用いて行うので、この改訂に合わせ、1995年に社団法人日本鉄道電気技術協会に電車線路耐震性研究委員会が設置されて検討が進められ、その結果を基に1997年に耐震設計指針が改訂、発行された⁵⁾。

この指針は、兵庫県南部地震の被害を考慮した当面の措置として1995年に示された土木構造物の耐震設計を基に改訂されたが、1999年に発行された鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）の耐震設計法（ある程度の損傷を許容する塑性設計法）に対応し、損傷した土木構造物の振動状態と電車線柱の振動特性を考慮したものである。

2.2 今回の改訂

その後、国際規格や省令が性能規定化されたこともあり、それに対応すべく、鉄道構造物等設計標準（耐震設計）の改訂作業が進められ、2012年9月に発行された⁶⁾。この標準では、設計に用いる地震動が見直されるとともに、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震での地震動の特徴や被害状況を考慮し、短周期成分が卓越した地震動の設定や、電車線路設備や駅舎などの土木構造物上の付帯構造物の挙動を算定する場合の入力波の与え方、それに基づく設計応答値の考え方が示されている。

* 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

*** 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

特集：電力技術

このような鉄道構造物等設計標準（耐震設計）の改訂内容との整合性をとるため、電車線路設備耐震設計指針（以下、本指針と称す）の改訂に向けた検討を行ったものである。また、改訂にあたっては、近年得られた電車線路の耐震性に関する知見を取り入れることで、耐震性評価の精度向上を図ることとした。

3. 耐震性評価手法の概要と主な改訂内容

3.1 耐震性評価手法の概要

過去の地震の被害および解析によれば、電車線柱の倒壊などの被害の多くは、地震動の大きさ、および土木構造物と電車線柱との共振により生じている。耐震設計においてはこれらの動特性を考慮できる方法とすることが望ましいため、本指針における電車線路設備の耐震性評価は、地震時における土木構造物の性状（振動特性と損傷状態）と電車線柱の振動特性を考慮した耐震設計法を採用している。

高架橋・橋梁上における電車線路設備の耐震設計手法として、図1に示す一体型モデルおよび分離型モデルによるものが考えられる。高架橋・橋梁上における電車線路設備の応答は、支持される土木構造物との動的相互作用を評価するため、一体型モデルを用いた動的解析法を用いることが望ましい。しかし、分離型モデルはこれまでの設計実務における実績も多いため、本指針でも動的相互作用の影響を考慮した上で、分離型モデルを用いた評価を行っている。まず、地盤種別に応じたスペクトル適合波を構造物に入力し、これに対する構造物天端（電柱基礎位置）での動的応答値を求める。次に、この構造物の動的応答値を電車線支持物に入力し、その重心位置における応答倍率を求めて部材に作用する地震時荷重を算定し、部材の耐力と比較する。

3.2 考慮する地震動

本指針では、地震による電車線路設備の倒壊や列車の走行空間を支障するような有害な損傷を防ぐことを目標としており、電車線柱にとって、最も被害が大きくなるような設計地震動（L2地震動）に対して安全性を満足することとしている。

L2地震動は建設地点で想定される最大級の地震動であり、さらに、海溝型地震を想定した「スペクトルⅠ」と内陸活断層を想定した「スペクトルⅡ」に分類される。改訂された鉄道構造物等設計標準（耐震設計）では、L2地震動の標準スペクトルが見直された。また、標準地震動に加えて短周期が卓越した地震動も設定された。

電車線柱と土木構造物は共振すると応答が著しく増幅するが、電車線柱はその構造特性上、地震動の継続時間が長ければ長いほど、さらに応答が増幅する共振過渡応

答の影響を考慮する必要がある。改訂前の指針では、応答加速度が大きいL2地震動「スペクトルⅡ」のみを考慮していたが、地震動の継続時間が長い「スペクトルⅠ」の方が電車線柱の応答加速度が大きくなる場合がある⁷⁾。

また、土木構造物は一般に、地震力が大きくなると塑性化し、塑性化後の固有周期は、塑性前に比べて長周期化する傾向にある。このため電車線柱と土木構造物の固有周期比は地震動のレベルによって変化し、電車線柱の応答は必ずしも大地震時に最大となるとは限らない⁸⁾。

これらを考慮し、本指針では表1に示す地震動を用いた動的応答値の算定を行っている。

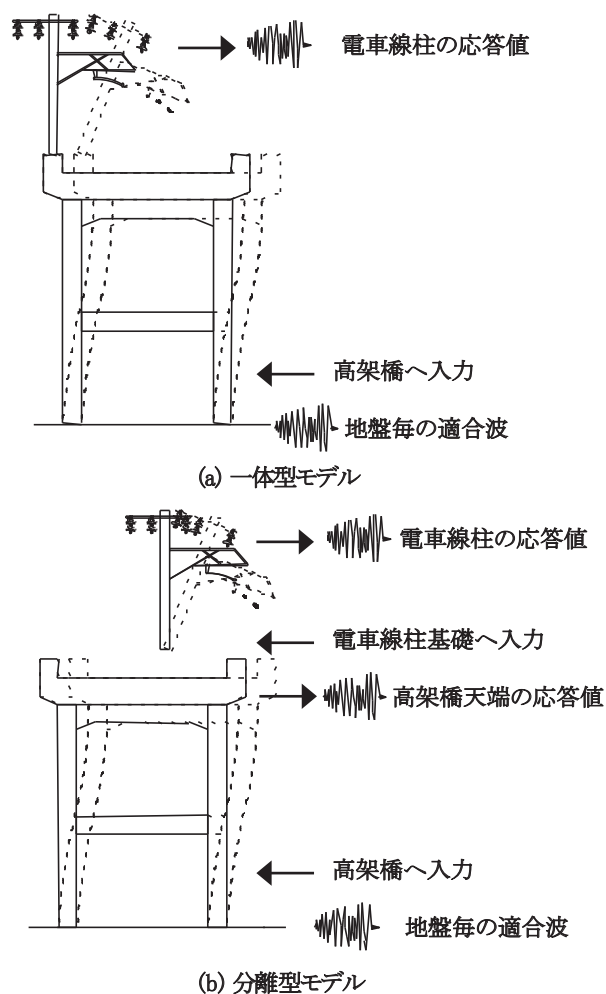


図1 高架橋・橋梁上の解析に用いるモデルの考え方

表1 指針において考慮する地震動

改訂前の指針	本指針
L2地震動 スペクトルⅡ	L2地震動（標準地震動） スペクトルⅠ スペクトルⅡ L2地震動（短周期の卓越した地震動） スペクトルⅠ スペクトルⅡ
※上記地震動の時刻 歴波形を考慮	※上記地震動の0.1～1.0倍（0.1刻み） の時刻歴波形を考慮

3.3 土木構造物の回転振動の考慮

改訂前の指針では、電車線柱へ影響を及ぼす土木構造物の地震時挙動として水平方向の振動のみを考慮していたが、電車線柱の地震時の挙動をより適切に評価するには、図2に示すように土木構造物の水平振動のほか、回転振動を考慮する必要があることが明らかとなった⁹⁾。また、東北地方太平洋沖地震における電車線柱の被害解析により、回転振動の影響を考慮することで、被害状況をより正確に評価できることが確認されている¹⁰⁾。

構造物の回転振動の影響を考慮した電車線柱の応答値算定方法は、改訂された鉄道構造物等設計標準（耐震設計）に示されている。これに基づき、本指針における分離モデルを用いた応答値の算定では、構造物の水平振動から算定される電車線柱の応答値を補正する係数として、構造物の設計情報から回転水平比 k_θ を得ることにより、これを考慮することとした。

3.4 電車線柱固有周期の補正

従来から、高架橋・橋梁上の単独柱（コンクリート柱、鋼管柱）の固有周期については、基礎部が固定であることを前提とし、式(1)に示す片持ち梁の1次固有周期を算定する式により電車線柱の固有周期 T_p を算定している。

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

- T_p ：電車線柱の固有周期 (s)
- f_p ：電車線柱の固有振動数 (Hz)
- L ：電車線柱の長さ（基礎部根入れ除く）(m)
- EI ：電車線柱の曲げ剛性 (Nm²)
- ρ ：電車線柱の単位長質量 (kg/m)

しかし、実際の電車線柱の標準的な装柱時には、き電線、保護線、電車線やそれを支える腕金、ブラケット等の支持部材が添架されているため、式(1)により算定される値と実際の固有周期が異なることが考えられる。これらの添架物の影響を評価した例を図3に示す¹¹⁾。電車線柱のみの場合に比べて、標準的な装柱時には、電車線柱の自重に添架物の自重が加わるため固有振動数が低下する。特に自重の軽い鋼管柱でこの影響が大きくなるため、応答加速度を算定する際にこれらを考慮する必要がある。

また、図4に示す電車線柱の載荷試験結果²⁾によれば、コンクリート柱では、設計荷重からさらに荷重が増加すると、荷重点の変位に対する曲げモーメント（荷重）の変化は直線性が失われており、地震時に想定している設計荷重の2倍の荷重時には、周期の算定時に柱の曲げ剛性の低下を考慮する必要がある。

本指針では、電車線柱の固有周期に対して上記のような添加物と曲げ剛性の低下の影響を考慮する補正係数を設けて応答加速度を算定することとした。

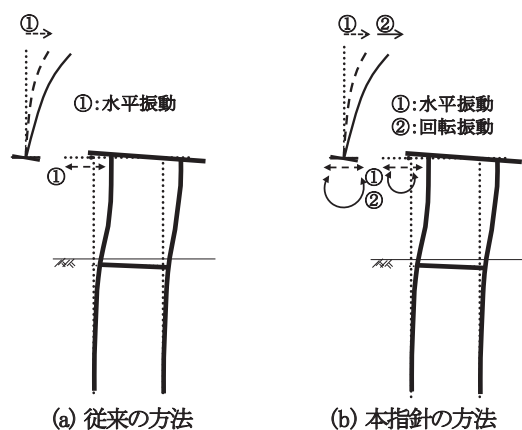


図2 電車線柱への回転振動の入力方法

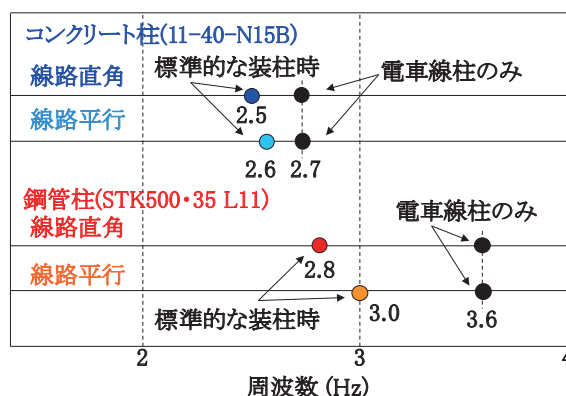
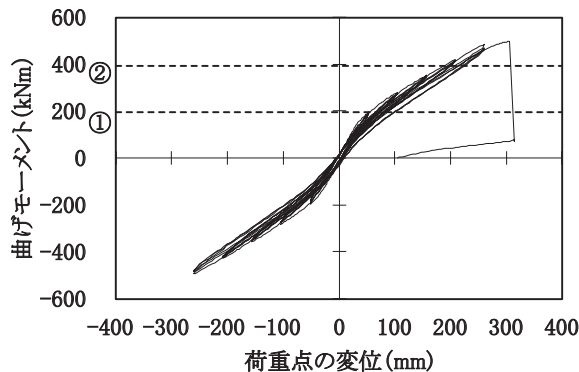
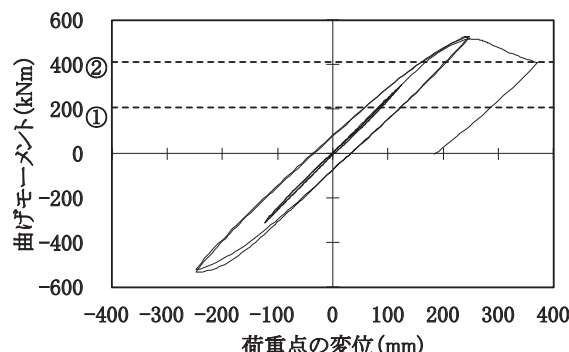


図3 添架物による電車線柱の固有振動数の変化



(a) コンクリート柱(型式:9-40-N20B)



(b) 鋼管柱(型式:9-406.4-6.4)

※ 荷重点は電柱地際から5.775mの位置

※ ①:設計モーメント ②:設計モーメントの2倍

図4 交番載荷試験における履歴曲線の例

4. 改訂した電車線路設備耐震設計指針の概要

4.1 耐震設計の基本方針

電車線路設備の耐震設計では、被害による影響が最も大きい電車線柱を主に考慮することとしているため、地震による電車線路支持物の倒壊や列車の走行空間を支障するような有害な損傷の発生を防ぐことを基本とする。そのためには、電車線路設備と土木構造物との動的相互作用等を総合的に考慮して、各部材の所要強度等の性能を定めるものとする。なお、ここでの動的相互作用とは、地震時における土木構造物の性状(振動特性と損傷状態)と電車線柱の振動特性によっては共振により電車線柱の応答値が大きくなること等を指している。

4.2 電車線路設備の安全性の評価

4.2.1 安全性の評価法

電車線路設備の安全性の評価は、部材等の耐力などの限界値と地震時に生ずる応答値を比較することによって行うこととする。その計算式を式(2)に示す。構造物係数は、土木構造物の評価において一般的に1.0が用いられており、本指針においては、3章で述べた事項等により耐震性評価の精度向上を図ったこと等から、電車線路設備においても一般的に1.0を用いることとした。

$$\gamma_i \frac{P_R}{P_D} \leq 1.0 \quad (2)$$

γ_i : 構造物係数 (1.0 とする)

P_R : 応答値 P_D : 部材等の限界値 (耐力など)

4.2.2 応答値の算定

本指針で採用した電車線路設備の応答値の算定方法は次のとおりである。

- (1) 電車線柱が設備されている土木構造物の構造形式を、電車線柱との共振が生じる可能性のある「高架橋・橋梁」と、その可能性の低い「盛土・切取」との2種類に分ける。
- (2) 高架橋・橋梁上における電車線路設備の応答は、支持される土木構造物との動的相互作用を評価するため、一体型モデルを用いた動的解析法を用いることが望ましい。しかし、分離型モデルはこれまでの設計実務における実績も多いため、動的相互作用の影響を考慮した上で、分離型モデルを用いてもよいものとし、本指針では標準的な方法として、分離型モデル場合の設計法について示している。
- (3) 盛土・切取における耐震設計では、地中にある電柱基礎の非線形挙動を考慮した解析を行う。本指針では設計実務における実績を考慮して、設計地震動に基づいた地盤種別ごとの加速度応答スペクトルを用意して応答加速度を推定し、電車線柱等の断面力を求める静的解析法を標準的な方法として示している。

4.2.3 部材の限界値

部材等の限界値は、耐力や変形などの定量評価が可能な指標により算定する必要がある。一般には、電車線柱の設計計算では、部材を線形材料として取り扱うため、その場合は耐力を限界指標とする。部材等の耐力は、使用する材料の強度と部材の諸元をもとに算定するのがよいが、設計の簡便さと安全性を考慮して、一般的に設計値の2倍を用いることとする。

電車線柱に用いるコンクリート柱は、その破壊荷重を設計値の2倍以上とすることが「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の解釈基準に示されていること、3.4節で示した電車線路用の標準的なコンクリート柱と鋼管柱の載荷試験結果では、破壊荷重が設計荷重の2倍以上を有していたことから上記の数値とした。

4.3 高架橋・橋梁上における電車線柱等の設計

4.3.1 設計方針

電車線柱の耐震設計においても土木構造物の耐震設計と同様、電車線柱の降伏後の非線形領域の変位(じん性)を適切に評価することが合理的であると考えられる。しかしながら、現時点では、高架橋・橋梁上における電車線柱の非線形性を考慮した応答値の算定法等が一般的には確立されていないため、本指針では電車線柱を線形弾性体としてモデル化し、電車線柱の耐力が応答値から算定される断面力を上回るように設計するものとした。

図5に高架橋・橋梁上における電車線柱の一般的な耐震設計手順を示す。まず、土木構造物と電車線柱の条件を設定する必要があるが、土木構造物条件として示した①から④は構造物の設計時に算定されるため、電車線路設備の設計者も容易に得ることができる。

本指針では、土木構造物と電車線柱の条件に応じて、電車線柱の重心位置における水平応答加速度を算定して地震作用力を推定し、電車線柱の強度等を照査する。

4.3.2 電車線柱の固有周期

高架橋・橋梁上の単独柱(コンクリート柱、鋼管柱)については、式(1)により電車線柱の固有周期 T_p を得ることができる。なお、本指針では、門型支持物についての固有周期算定方法も示している。

3.4節で示したように、線条類や金具等の添架物の影響と電柱の曲げ剛性変化の影響を考慮して耐震性評価の精度を向上するため、表2に示す電車線柱固有周期の補正係数を設けた。水平応答加速度を算定する際の電車線柱の固有周期は、式(1)により得られた固有周期にこれらの係数を乗じたものとする。

4.3.3 水平応答加速度

高架橋・橋梁上の電車線柱の耐震設計に用いる応答加速度は、表3に示す地盤種別および電車線柱種別に応じて作成した加速度応答スペクトルを用いて、電車線柱の

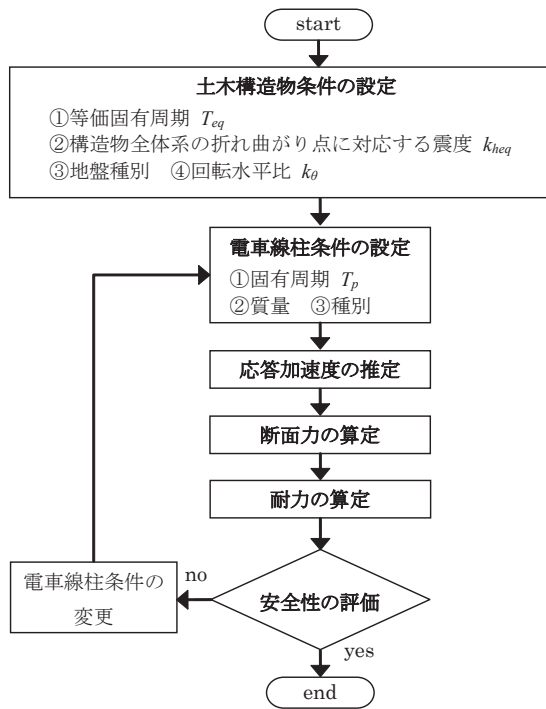


図5 高架橋・橋梁上における耐震設計手順

表2 電車線柱固有周期の補正係数

電車線柱種別	添架物の影響	剛性低下の影響
コンクリート柱	1.1	1.0 ~ 1.5
鋼管柱	1.2	1.0

固有周期 T_p と高架橋・橋梁の等価固有周期 T_{eq} の比 (T_p / T_{eq}) により算定するものとする。この際に用いる電車線柱の固有周期は、表2の補正係数を考慮したものとする。

加速度応答スペクトルはG1からG5地盤について作成し、3.2節の表1に示したL2地震動について、その標準の波形を0.1～1.0倍(0.1刻み)した時刻歴波形を考慮している。G0地盤についてはG1地盤、G6、G7地盤についてはG5地盤の加速度応答スペクトルを用いてよいこととする。電車線柱種別はコンクリート柱(減衰5%)、鋼管柱(減衰2%)とした。図6に作成した加速度応答スペクトルの例を示す。

算定した水平応答加速度 A_h から、式(3)を用いて土木構造物の水平振動と回転振動を考慮した電車線柱の水平応答加速度 A' を算定し、線路直角方向の評価に用いる。

$$A'_h = A_h \times (1 + k_\theta \times L) \quad (3)$$

k_θ : 回転水平比

L : 電車線柱の長さ(基礎部根入れは除く)(m)

4.3.4 鉛直応答加速度

鉛直方向の応答加速度は、地盤種別に応じて地表面設計地震動の最大加速度の1/2を考慮することとした。

表3 地盤種別

地盤種別	地盤区分	地盤固有周期 T_g (s)	スペクトルの作成
G0	岩盤	—	—
G1	基盤	—	有り
G2	洪積地盤など	～0.25	有り
G3	普通地盤	0.25～0.5	有り
G4	普通～軟弱地盤	0.5～0.75	有り
G5	軟弱地盤	0.75～1.0	有り
G6	軟弱地盤	1.0～1.5	—
G7	極めて軟弱な地盤	1.5～	—

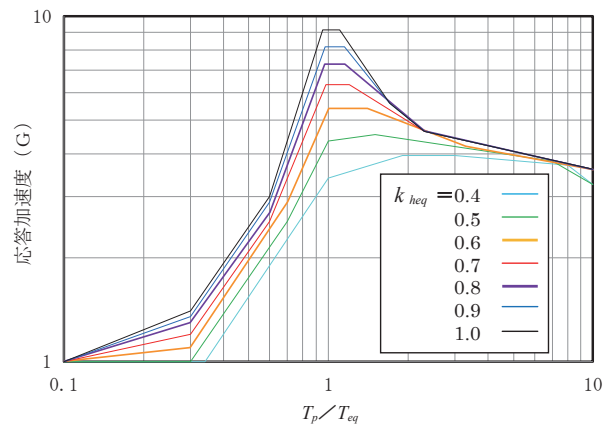


図6 加速度応答スペクトル(G3地盤, 鋼管柱)

4.3.5 断面力の算定

電車線柱の耐震設計において考慮する断面力は、式(4)により算定される地際におけるモーメントとし、この地際における曲げモーメントが4.2.1項の安全性の評価法により電車線柱の破壊強度以内であることを確認するものとする。電車線単独柱の荷重算定における例図を図7に示す。ここで、電車線柱の耐力は4.2.3項の部材の限界値より算定するものとする。なお、線条類の質量については、その1/2について考慮することとする。

$$\begin{cases} M = A_h g \sum mh \pm (1 + A_v) g \sum mr \pm (1 + \alpha) \sum ph & (\text{線路直角}) \\ M = A_h g \sum mh & (\text{線路平行}) \end{cases} \quad (4)$$

M : 地際モーメント (Nm)

A_h : 水平応答加速度 (G) A_v : 鉛直応答加速度 (G)

g : 重力加速度 (m/s^2) m : 質量 (kg)

h : 水平荷重の作用高さ (m)

r : 鉛直荷重の作用位置 (m)

p : 電車線の横張力 (N)

α : 電車線の張力の変動率 (0.3)

4.4 盛土・切取における電車線柱の設計

盛土・切取における電車線柱は、電柱基礎の塑性領域における挙動を考慮して耐震設計を行う。図8に示す耐震設計手順により、電柱基礎の損傷程度に応じた電車線

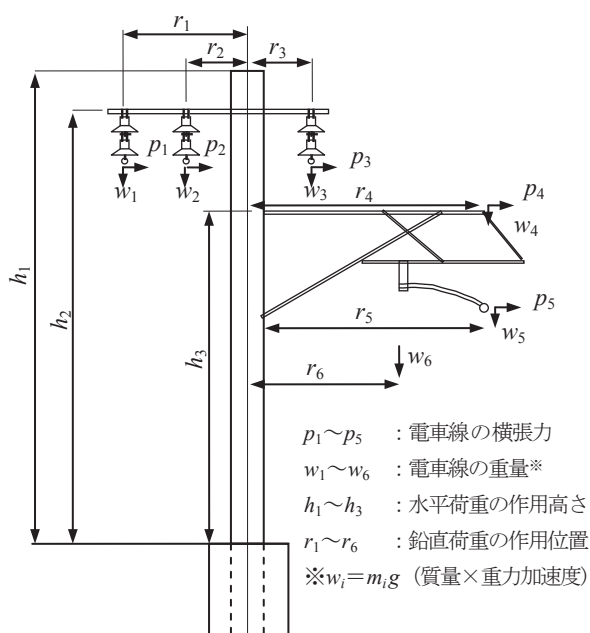


図7 電車線単独柱の荷重算定における例図

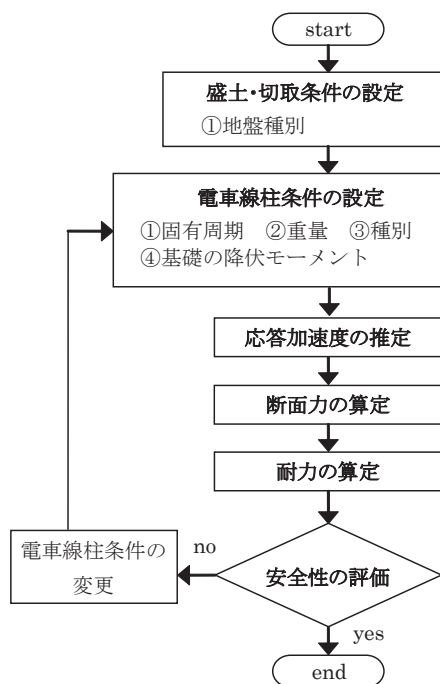


図8 盛土・切取における耐震設計手順

柱の地震時荷重を算定して強度等を照査する。

盛土・切取における設計手順は従来の指針と同様であるが、3.2節で述べた考慮する地震動の変更に対応するため、電車線柱種別に応じた加速度応答スペクトルを改訂した。

5. おわりに

「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」の改訂内容との整合性をとり、近年得られた電車線路の耐震性に関する知見を取り入れることで、耐震性評価の精度向上等を図るため、「電車線路設備耐震設計指針」の改訂を行った。本指針には、電車線路の標準的な装柱に応じた耐震性評価の計算例を掲載しており、設計実務の一助となれば幸いである。

また、3章で述べた土木構造物上の電車線柱の挙動を算定する場合の考え方等については「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」に詳細が記載されているので、参考にされたい。

本指針の改訂にあたり、ご指導、ご協力頂いた皆様にお礼申し上げます。

文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012
- 2) (公財) 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
- 3) 東北新幹線大宮盛岡間電気工事誌：日本国有鉄道東京電気工事局，1983
- 4) 電車線路設備耐震設計指針（案）・同解説，およびその適用例：社団法人鉄道電化協会，1982
- 5) 電車線路設備耐震設計指針（案）・同解説，およびその適用例：社団法人日本鉄道電気技術協会，1997
- 6) 佐藤勉：鉄道構造物に関する設計標準の最近の動向，鉄道総研報告，Vol. 26, No.11, pp.1-4, 2012
- 7) 加藤尚，室野剛隆：長継続時間地震動が電車線柱～構造物の地震応答に与える影響，強振継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム講演概要集，pp.31-34, 2012
- 8) 室野剛隆，加藤尚，豊岡克洋：地震動の入力レベルが高架橋と電車線柱の共振現象に与える影響評価，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.68, No.4, pp.I_418-I_422, 2012
- 9) 今村年成，他：電車線柱 - 高架橋連系系の地震応答特性，第 29 回土木学会地震工学論文集，pp.1182-1190, 2012
- 10) 網干光雄，他：新幹線電車線路設備の地震時動的シミュレーションによる被害状況の考察，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，TER-12-11, 2012
- 11) 原田智，他：中規模地震に対する架線系設備の耐震性能向上対策，鉄道総研報告，Vol. 26, No. 6, pp.29-34, 2012