

中規模地震に対する架線系設備の耐震性能向上対策

原田 智* 網干 光雄** 常本 瑞樹*
 畠山 孝昭*** 室野 剛隆# 坂井 公俊#

Measures against Middle-level Earthquake for Overhead Contact Line

Satoshi HARADA Mitsuo ABOSHI Mizuki TSUNEMOTO
 Takaaki HATAKEYAMA Yoshitaka MURONO Kimitoshi SAKAI

Middle-level earthquakes, which may cause damage not to railway viaducts but to contact line equipment, occur frequently in recent years. The damage to contact line equipment will make train services canceled from half a day to two days. We must show weak pieces in contact line equipment and take adequate measures against these earthquakes. This report describes measures against these earthquakes based on results of damage investigation and analyses of a three-dimensional dynamic simulation in contact line equipment.

キーワード：集電系力学，耐震，架線金具，き電線，AT保護線，高架橋，3次元運動シミュレーション

1. はじめに

電車線路設備の耐震設計に関する研究は、1978年の宮城県沖地震の際に、建設中の東北新幹線において高架橋上の電柱が倒壊したことを契機として始められた。その結果、1982年に電車線路設備耐震設計指針（案）が策定された¹⁾。この指針（案）は、高架橋や盛土などの土木構造物と電柱の固有周期を考慮した修正震度法による耐震設計法であり、主に電柱の倒壊防止を目的としている。その後1995年の兵庫県南部地震では、それまで想定していなかった地震動により土木構造物に甚大な被害が生じたことから、土木構造物の耐震設計標準が改定された。電車線路設備についても1997年に電車線路設備耐震設計指針（案）が改定され²⁾、現在に至っている。現在の耐震設計指針（案）では、兵庫県南部地震に代表される大規模地震に対し、土木構造物が許容可能な範囲で損傷するとの条件の下で、電柱の倒壊防止を目的としている。

一方、最近の地震においては、土木構造物や電柱に顕著な被害がないにもかかわらず、走行中のパンタグラフ割り込みによる電車線の断線、架線金具の破損、き電線等の線条類の断線など架線系設備の被害により、列車の運行が長時間休止する事例が増加する傾向にある。これに対し、電車線路設備の個々の部材について強度協調を図り、効果的に被害を防止する対策が求められている。そこで、電車線路設備の被害調査や運動解析シミュレ

ーションを実施することにより、新幹線の架線系設備について地震に対する弱点箇所を抽出し、このような中規模地震に対して具体的な対策案を検討したので報告する。

2. 地震による架線系設備の被害状況

最近発生した地震に対して、新幹線の電車線路設備についての被害を調査し、その特徴をまとめた。表1に1993～2009年の地震と電車線路設備の主な被害を示す。本調査では新幹線設備を対象としたが、北海道南西沖地震では新幹線共用設備で被害が生じていたため、これも調査対象に含めた。なお兵庫県南部地震については、土木構造物を含めて被害が甚大であることから、今回の調査対象から除外した。最近の地震に対する電車線路設備の被害状況³⁾をまとめると、以下のようになる。

- (1) 地震による被害は、主に高架橋上で発生している。
- (2) 電車線支持物の被害は、主にコンクリート柱根際部の損傷である。また固定ビームの垂下などの被害は、電柱の損傷に伴うものである。
- (3) 電車線の被害は、補助ちよう架線の断線である。これは地震時に電車線の振動振幅が過大となり、パンタグラフがトロリ線と補助ちよう架線の間に割り込み、断線したものと推察される。
- (4) 架線金具の被害は、主にハンガバーの変形・外れ、曲線引金具の変形・折損である。これらの原因は、地震時の電車線の過大な振動であると推察される。
- (5) 電車線を除く線条類の被害では、AT保護線の断線が比較的多い。また、き電線やAT保護線を支持する懸垂がいしの磁器部の破損が認められる。

* 電力技術研究部 電車線構造研究室
 ** 電力技術研究部
 *** 電力技術研究部 電車線構造研究室(現 三和テッキ(株))
 # 構造物技術研究部 耐震構造研究室

特集：電力技術

- (6) 自動張力調整装置の重錘を支持する部材には変形などが生じており、地震時には重錘が大きく振動していたと推察される。

表1 最近の地震と電車線路（新幹線）の主な被害

発生日	地震名	電車線路設備の被害
1993/ 7/12	北海道南西沖地震	電柱折損等
2001/ 3/24	芸予地震	電柱損傷、曲線引金具折損等
2003/ 5/26	三陸南地震	AT保護線断線、電柱基礎損傷等
2004/10/23	新潟県中越地震	電柱傾斜、可動ブラケット脱落等
2005/ 3/20	福岡県西方沖地震	被害なし
2005/ 8/16	宮城県沖地震	補助ちよう架線断線等
2007/ 3/25	能登半島地震	被害なし
2007/ 7/16	新潟県中越沖地震	曲線引金具折損
2008/ 6/14	岩手・宮城内陸地震	AT保護線断線
2008/ 7/24	岩手県沿岸北部地震	AT保護線断線
2009/ 8/11	静岡（駿河湾）地震	ハンガパー外れ

3. 架線系設備の応答解析

3.1 線条類の振動および機械特性

解析モデルを得るため、き電線やAT保護線などの線条類に用いているより線（HAL:硬アルミより線, ACSR:鋼心アルミより線）の損失係数、および荷重と張力印加時の応力を実測した⁴⁾。主な結果を以下に示す。

- (1) より線の損失係数は、張力が高いほど小さい傾向があり、無次元化張力（引張荷重に対する張力の比）が0.1で損失係数は 1×10^{-2} 程度である（図1）。
- (2) より線外層の素線に生じる応力は、より線を単線と見なした断面積等価モデルに対して硬アルミより線で50～80%程度（図2）、鋼心アルミより線で30～60%程度となる。

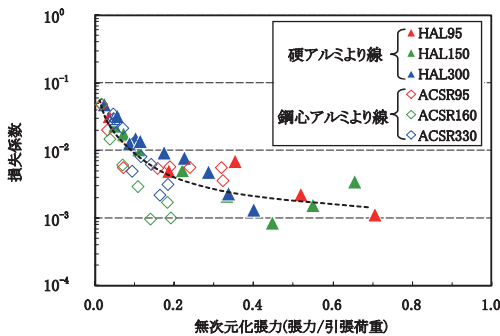


図1 より線の損失係数

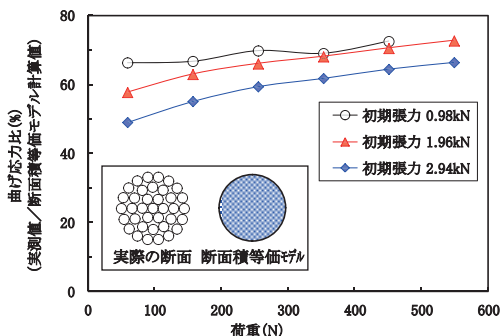


図2 より線の外層線に生じる応力（硬アルミより線 HAL300）

3.2 電柱および電柱基礎の振動特性

研究所内に建植した電柱に初期変位を与えて自由振動試験を行い、電柱の損失係数ならびに振動特性を測定した⁵⁾。なお本測定の電柱基礎は、モルタル基礎および砂基礎である。主な結果を以下に示す。

- (1) 電柱の損失係数は鋼管柱で約0.003、コンクリート柱で約0.02である。
- (2) 砂基礎では、モルタル基礎と比較して電柱の固有振動数が低下し、電柱の損失係数が大きくなる（図3）。この特性は、モルタルヒューズ（砂基礎の最上部にある厚さ20mm程度のモルタル層）がない場合、また電柱に与える初期変位が大きい場合に顕著になる。

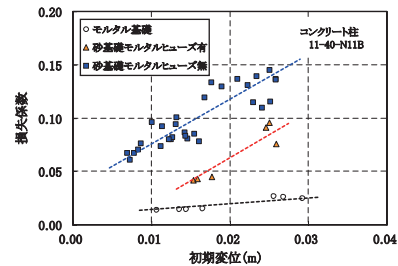


図3 基礎種別による電柱の損失係数の比較（コンクリート柱）

3.3 電車線路の3次元運動シミュレーション

前項の特性試験や架線金具の強度試験⁶⁾などの結果から電車線、き電線、電柱、曲線引金具や引留装置などの構成要素を3次元での運動が可能なモデルとし、各構成要素間の相互作用を含めて総合的な運動を計算するシミュレーション手法⁷⁾を構築した。本手法では、地震動による振動変位を電柱基礎に入力し、各構成要素の応答を解析する。シミュレーション結果の表示画面例を図4に示す。この電車線路の3次元運動シミュレーションを用いて、電柱（コンクリート柱、鋼管柱）に電車線、可動ブラケットやき電線等を付加した際の固有振動数の変化を解析した結果を図5に示す。主な結果を以下に示す。

- (1) 線路直角方向の固有振動数は、可動ブラケット、腕金等の重量を電柱に付加した場合に低下する。この固有振動数の変化量は、コンクリート柱と比較して重量が小さい鋼管柱ほど大きく、付加する重量が電柱天端に近いほど大きい。
- (2) 線路平行方向の固有振動数は、可動ブラケットや腕金の重量を付加した固有振動数に一致する。一方、電車線、き電線等の線条類を付加した影響はほぼ見られないが、これは可動ブラケットや懸垂がいしの支持構造による影響であると思われる。
- (3) 架空地線を腕金あるいは電柱に、懸垂がいし等を介さず直接固定した場合、架空地線が電柱天端部を拘束するため、線路平行方向の固有振動数は比較的大きく上昇する。

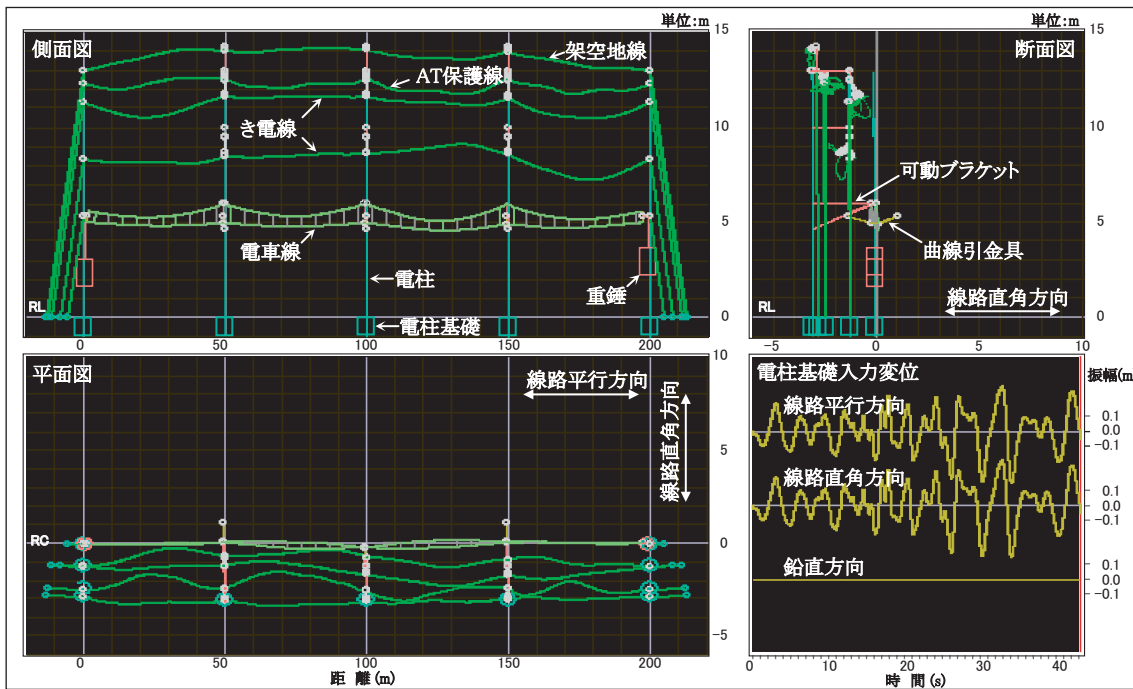


図4 電車線路の3次元運動シミュレーションの表示画面(例)

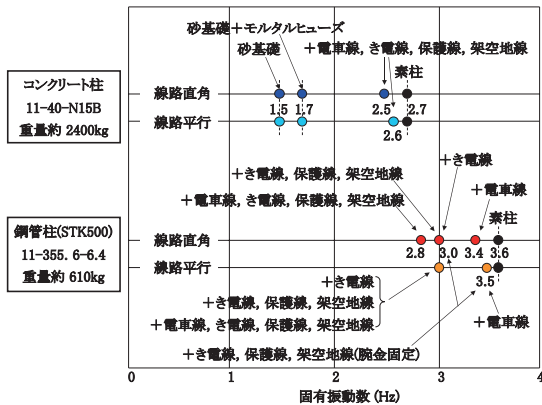


図5 電車線等の付加による電柱固有振動数の変化

4. 地震に対する架線系設備の被害要因解析

4.1 解析条件

架線系設備の被害要因を明らかにするため、電車線路の3次元運動シミュレーションによる解析を行った。解析における電車線路の装柱条件は、現状の新幹線で一般的な装柱とし、エアセクション付近等のき電線が2回線架設されている装柱も考慮して解析を行った。解析における電車線路の装柱条件①～④を表2に示す。解析に用いる地震動は、電車線、き電線などの線条類や架線金具等の架線系設備の被害要因を明らかにするため、中規模地震に相当するL1地震動とした。また電柱が建植されている高架橋の固有振動数を1.0～3.0Hzとし、0.5Hzきざみで計算を行った。なお本解析では、電柱と高架橋と

の連成振動の影響を考慮して計算を行い⁸⁾、電車線やAT保護線、架線金具に生じる変位、応力等を算出した。

表2 解析における電車線路(新幹線)の装柱条件

装柱条件	電車線	電柱	き電線回線数
①	シンプル架線	鋼管柱	1回線
②			2回線
③	ヘビーコンパウンド架線	コンクリート柱	1回線
④			2回線

4.2 架線系設備の被害要因

前項の解析条件で算出した変位や応力等の最大値を、個々の架線系設備に対する破壊荷重等と比較し、被害の有無を判定した。主な解析結果を以下に示す。

- (1) き電線1回線の装柱条件と比較して、き電線2回線の装柱条件では、き電線およびAT保護線に生じる曲げ応力や架線金具に生じる軸力が大きくなる傾向がある。
- (2) L1地震動相当に対して破壊荷重等を超過する、あるいは破壊荷重等の70%を超過し要注意となる項目は、ハンガバーの圧縮軸力、ドロップの圧縮軸力、曲線引金具の曲げモーメント、き電線の曲げ応力、AT保護線の曲げ応力、AT保護線の張力、トロリ線偏位であった。

これらの結果から、前述の被害状況の調査結果で挙げられた架線系設備の主な被害(ハンガバー変形、曲線引金具折損、AT保護線断線、パンタグラフ割り込み)に対する要因をまとめると表3のようになる。

特集：電力技術

表3 架線系設備の被害要因

被害状況	被害要因
ハンガバー変形	電車線の振動による引張・圧縮荷重
曲線引金具折損	電車線の振動により引手アイ金具接続部に生じるモーメント
AT保護線断線	線条類の振動により支持点近傍に生じる曲げモーメント
パンタグラフ割り込み	電車線の振動による過大なトロリ線偏位

5. 耐震性能向上対策の検討

5.1 架線系設備の耐震目標

対策案を検討するにあたり、被害状況の調査および被害の要因解析の結果を考慮し、架線系設備の耐震目標を表4のとおりとした。本検討で対象としているL1地震動に相当する中規模地震に対しては、土木構造物には被害がほとんどなく、補修の必要もないため、速やかな運転再開を達成すべき目標とした。具体的には、電車線やき電線等の断線がなく、パンタグラフの割り込みがないことを目標とした。なお架線金具において、ヘビーコンパウンド架線のドロップ、およびシンプル架線のハンガについては、地震時に圧縮変形（座屈）が生じても徐行による運転再開が可能と考えられるため、これらの変形は許容し、耐震目標の対象から除外することとした。

表4 架線系設備の耐震目標

地震動	架線系設備の耐震目標	土木構造物の状況
中規模地震 (L1地震動相当)	速やかな運転再開 ・架線系の断線なし ・架線金具の破損なし ・パンタグラフ割り込みなし	・補修を必要とせずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない

5.2 ハンガの強度向上

地震時にハンガバーが変形すると、電車線（ちょう架線、または補助ちょう架線）から外れ、パンタグラフ割り込みを誘発することがある。そこで、ハンガバーの径を現行の6mmから7mmにすることで強度の向上を図り、かつハンガバーのループを60mmから80mmに拡大することにより、圧縮荷重に対する変形を抑制する形状を提案した。図6にハンガの現行品と改良案を示す。

また、図6のハンガについて、強度等の試験を実施し

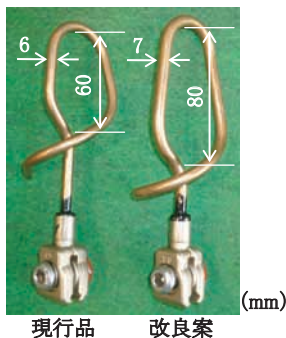


図6 ハンガの耐震対策

表5 ハンガの性能比較

		現行品	改良案
ハンガバーの形状	直径 (mm)	6.0	7.0
	断面係数 (mm ³)	21.2	33.7
	断面係数比	1.0	1.6
質量 (kg)		0.195	0.210
質量比		1.0	1.1
最大引張荷重 (kN)		2.6	4.3
最大圧縮荷重 (kN)		1.1	1.7

た結果を表5に示す。改良案の引張および圧縮荷重は、ともに現行品と比較して増加しており、改良案の強度向上が確認された。なお改良案は、ハンガバーの形状変更に伴い、現行品と比較して質量が約10%増加するが、架線・パンタグラフシミュレーションの結果から、これに伴う集電性能の低下はほぼないことを確認している。

5.3 曲線引金具の強度向上

地震被害調査、および電車線路の3次元運動シミュレーションを用いた被害要因解析により、アルミパイプと引手アイ金具との圧縮接続部が電車線の上下振動により破損し、曲線引金具が折損したものと推定された。地震時に曲線引金具が折損すると、当該箇所列車が進入してパンタグラフを破損させ、さらには電車線の断線を誘発する可能性が高くなる。そこで、曲線引金具の強度を向上させるため、圧縮接続部の断面形状を見直し、2段階の圧縮接続方式について検討した。曲線引金具の改良案の外観、および圧縮接続部の詳細を図7に示す。また、改良案の強度試験等を実施した結果を表6に示す。現行品と比較して、改良案の破壊荷重は約8倍に増加しており、改良案の強度向上が確認された。なお改良案は、現行品と比較して質量が約10%増加するが、これに伴う集電性能の低下がほぼないことを架線・パンタグラフシミュレーションで確認している。



図7 曲線引金具圧縮接続部の強度向上

表6 曲線引金具の性能比較

		現行品	改良案
引手アイ金具 アルミパイプ 接続箇所	断面形状 (mm)	φ 17.8	φ 38 × t2.9
	断面積 (mm ²)	249	320
	断面係数 (mm ³)	554	2610
	断面係数比	1.0	4.7
質量 (kg)		2.93	3.09
質量比		1.0	1.1
等価質量 (kg)		1.08	1.09
下方向破壊荷重 (kN)		2.0	15.9

5.4 き電線・AT保護線の断線対策

5.4.1 補強巻線

き電線やAT保護線は、電柱の比較的高い位置に架設されているため、地震時に振動振幅が大きくなりやすく、支持点近傍で過大な曲げ応力が生じ、断線する可能性がある。この曲げ応力を緩和するため、支持点を中央とした約2mを補強巻線で覆う対策について検討した。補強対象となるき電線やAT保護線には硬アルミより線が用いられているため、補強巻線はアルミ覆鋼線とし、その曲げ剛性は補強対象のより線に対して約7倍とした。この補強巻線を硬アルミより線HAL150に用いた場合の曲げ応力緩和効果について確認した試験結果を図8に示す。この結果から、HAL150に生じる曲げ応力は、補強巻線を用いることにより約1/3に緩和できることを確認した。

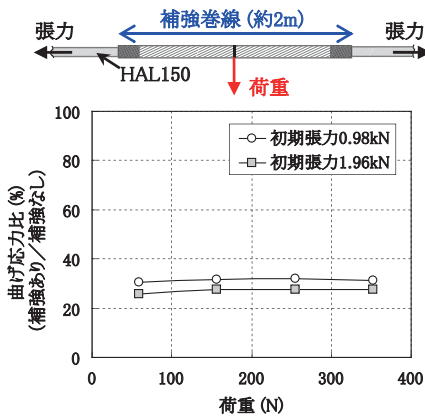


図8 補強巻線による曲げ応力緩和

5.4.2 2点支持金具

前項の補強巻線と同様に、硬アルミより線に生じる曲げ応力を緩和する支持構造として、2点支持金具について検討した。現状、き電線やAT保護線は1点で支持された構造になっているが、2点支持構造に変更することにより、地震時に生じる曲げ応力の低減が可能になると考えられる。2点支持構造の支持間隔についての解析結果を図9に示す。この結果から、より線に作用する荷重の間隔を0.5m (図9のLを0.25m) とすることにより、曲げモーメントが1点支持構造 (L=0m) の約1/2になることがわか

る。2点支持金具の試作品を図10に示す。なお本試作品については、より線把持部のすべり試験および強度試験を行い、所期の性能を有することを確認している。

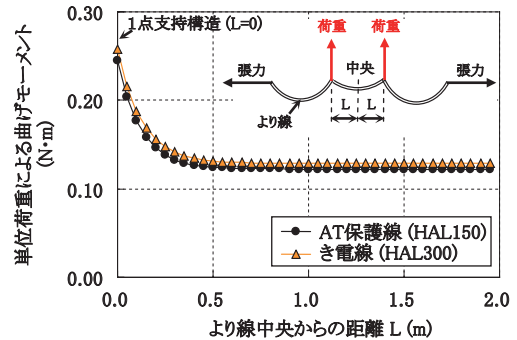


図9 2点支持構造による曲げモーメント低減

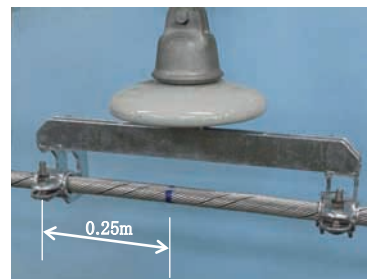


図10 2点支持金具の外観

5.4.3 鋼心アルミより線の採用

き電線やAT保護線の断線を防止するため、硬アルミより線の代わりに鋼心アルミより線を用いる対策案を検討した。これらのより線を断面積等価モデルと見なし、張力と同時に曲げ変形を加えた場合に、外層線に生じる曲げ応力を算出した結果を図11に示す。図11は、鋼心アルミより線ACSR160と硬アルミより線HAL150に生じる単位荷重あたりの曲げ応力を示すものである。この結果から、ACSR160に張り替えることにより、同じ張力で架設したHAL150に対して、地震時に生じる曲げ応力を約60%に低減することができると考えられる。

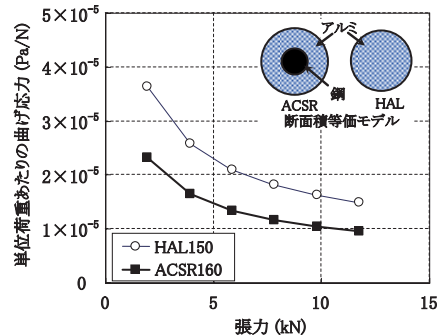


図11 鋼心アルミより線の曲げ応力

5.5 支持物の門形化

エアセクション付近等のき電線が2回線架設されている単独柱の装柱では、電柱の高さが13~14m程度になるため、電車線、き電線やAT保護線等の振動、および

特集：電力技術

電柱根際の曲げモーメントが地震時に過大になる傾向がある。複線区間で上下線に電柱がある場合には、上下線の電柱を固定ビームで結合して門形化し、支持物全体系としての剛性を高めて振動を抑制する対策案が考えられる。支持物の門形化の装柱例を図12に示す。

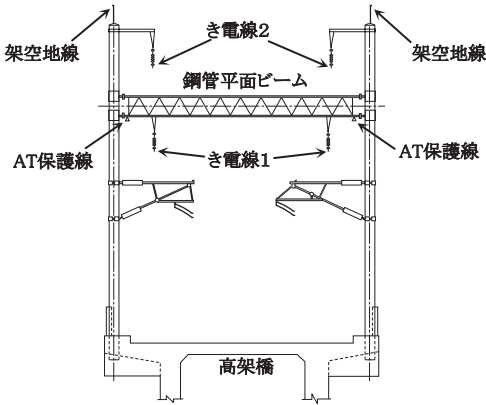


図12 支持物門形化の一例

6. 耐震対策の効果

対策案の効果を確認するため、4章の解析と同じ装柱条件①～④(表2)で電車線路の3次元運動シミュレーションを実施し、各設備の応答値を算出した。解析では、前述のハンガ、曲線引金具、補強巻線、2点支持金具、き電線・AT保護線の鋼心アルミより線化の各対策案を全て導入している。また、き電線が2回線となる装柱条件②および④では、上記に加えて支持物の門形化も導入している。対策前後の強度判定結果を表7に示す。表7において○印、×印、△印はそれぞれ許容値の70%未満、許容値以上、許容値の70%以上の応答が各評価項目で算

表7 解析による強度判定結果

設備名	評価項目	L1地震動 対策前				L1地震動 対策後			
		装柱条件				装柱条件			
		①	②	③	④	①	②	③	④
トロッパ	張力	○	○	○	○	○	○	○	○
	偏位	○	○	×	×	○	○	△	△
補助ちよう架線	張力	○	○	○	○	○	○	○	○
	張力	○	○	○	○	○	○	○	○
ハンガ	軸力(引張)	○	○	○	○	○	○	○	○
	軸力(圧縮)	×	×	○	△	△	○	○	○
	軸力(引張)	○	○	○	○	○	○	○	○
ドロップ	軸力(引張)	○	○	○	○	○	○	○	○
	軸力(圧縮)	○	○	×	×	○	○	×	×
	上下モーメント	○	○	×	×	○	○	○	○
曲線引金具(主)	軸力(引張)	○	○	○	○	○	○	○	○
	軸力(圧縮)	○	○	○	○	○	○	○	○
	上下モーメント	○	○	×	×	○	○	○	○
曲線引金具(副)	軸力(引張)	○	○	○	○	○	○	○	○
	軸力(圧縮)	○	○	○	○	○	○	○	○
	上下モーメント	○	○	○	○	○	○	○	○
き電線1	張力	○	○	○	○	○	○	○	○
	曲げ応力	○	○	○	△	○	○	○	○
き電線2	張力	○	○	○	○	○	○	○	○
	曲げ応力	○	△	△	△	○	○	○	○
AT保護線	張力	○	○	○	×	○	○	○	○
	曲げ応力	△	×	△	×	○	○	○	○
架空地線	張力	○	○	○	○	○	○	○	○
	曲げ応力	○	○	○	○	○	○	○	○

※○：許容値の70%未満，△：許容値の70%以上，×：許容値以上，■：対策後改善

出されたことを示す。また対策後の解析結果において、緑色の部分は対策前より改善した項目(×-○, △-○, ×-△)を示している。対策案の導入により、ドロップの圧縮軸力を除いた全ての項目で許容値以下になることがわかる。以上のことから、中規模地震に対する架線系設備の耐震目標を達成する見通しが得られたと考える。

7. おわりに

中規模地震で生じている曲線引金具の折損やAT保護線の断線など架線系設備の被害に対して、被害調査や新たに構築した3次元運動シミュレーション手法により、弱点箇所を明らかにし、その具体的な対策案を提案した。これらの対策案の導入により、中規模地震に対する架線系設備の耐震目標を達成できる見通しが得られた。なお大規模地震に対する電車線路設備の耐震性能向上対策については、現在検討を進めている状況である。

謝辞

本研究を進めるにあたり実施した「地震時における架線系の信頼性向上に関する検討会」で協力いただいた皆様に感謝の意を表す。

文献

- 1) 電車線路耐震性研究委員会：電車線路設備耐震設計の研究報告書(電車線路設備耐震設計指針(案)・同解説)，鉄道電化協会，1982
- 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，鉄道電気技術協会，1997
- 3) 原田智，網干光雄，清水政利：最近の地震に対する電車線路設備の被害報告，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，pp.23-28(TER-10-046)，2010
- 4) 網干光雄，常本瑞樹：より線の減衰特性，日本機械学会D&D講演論文集，533，2010
- 5) 網干光雄，甘利智，畠山孝昭：電車線柱および基礎の振動特性，電気学会交通・電気鉄道研究会資料，pp.11-16(TER-11-003)，2011
- 6) 網干光雄，常本瑞樹，中村登，小林武弘：地震に対する架線金具の強度特性，第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2010)講演論文集，pp.473-476(S7-4-6)，2010
- 7) 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手法，平成20年電気学会産業応用部門大会講演論文集，pp.III-179-III-182(3-16)，2008
- 8) 今村年成，坂井公俊，室野剛隆：電車線柱と橋梁の相互作用の簡便な耐震評価手法の提案，土木学会年次学術講演会概要集 第1部，Vol.63，pp.253-254(I-127)，2008