



2.1 計算条件

計算条件は、電車線路の耐震目標<sup>2)</sup>を提案した際と同じ条件とした。電車線路の耐震性能を全体的に評価するための加振条件は、応答が大きくなる傾向がみられた条件を選定し、線路直角方向は全柱同位相、線路平行方向は隣接柱反位相での同時加振とした<sup>2)</sup>。

- 地盤条件 G3 地盤
- 構造物条件
  - ・減衰定数 0.10
  - ・固有振動数 1.0~3.0 Hz (0.5 Hz 刻み)
  - ・降伏震度 0.4
  - ・骨格曲線 バイリニア (第2 勾配比 0.05)
  - ・履歴特性 Clough モデル ( $\beta=0.2$ )
- 電車線路設備条件

架線は径間長 50 m で、4 径間で構成して、中央の支持点を評価対象とした。電車線路設備条件は以下の 4 条件とした。表 1、表 2 に電柱と架線の諸元をそれぞれ示す。

- (a) コンクリート柱，高張力ヘビーコンパウンド架線，き電線 1 回線
- (b) コンクリート柱，高張力ヘビーコンパウンド架線，き電線 2 回線
- (c) 鋼管柱，CS シンプル架線，き電線 1 回線
- (d) 鋼管柱，CS シンプル架線，き電線 2 回線

2.2 計算結果

図 2 に、地震時に曲線引金具に生じる曲げモーメントの計算結果を示す。同図には、曲線引金具が上方向と下方向に変位した場合に生じた曲げモーメントの最大値をそれぞれ示している。曲線引金具に生じる曲げモーメントは、曲線引金具の動作抑制のための引手金具のストップ位置で最大となる。新幹線用曲線引金具 HC-I-E 形のストップは、主アームではトロリ線が標準位置から上方向 180 mm，下方向 150 mm，補助アームでは補助ちょう架線が標準位置から下方向 100 mm (上方向はストップなし) で動作する。

図 2 より、曲げモーメントの計算結果は、L1 地震動では、主アームが上方向と下方向でそれぞれ最大約 0.90 kN・m，最大約 0.40 kN・m，補助アームが下方向で最大約 0.25 kN・m である。補助アームは上方向のストップがないため、上方向の曲げモーメントは生じない。また、条件(c)と条件(d)は、L1 地震動において主アームがストップにあたらない範囲で動作しており、曲線引金具に曲げモーメントが生じなかった。

2.3 耐震性能目標の設定

電車線路の耐震目標<sup>2)</sup>では L1 地震動において速やかに運転を再開することを目標としている。これより、曲線引金具の耐震性能目標は、L1 地震動に対して破損(折損・破断等)がないこと、また速やかな運転再開が難しいような変形を生じないこととした。仕様としては、曲げモーメントと変形性能について検討した。

表 1 耐震性能目標検討に用いた電柱条件

条件	種別	地上長さ [m]
(a)	コンクリート柱 11-40-N15B	10
(b)	コンクリート柱 14-40-N20B	13
(c)	鋼管柱 STK500・35・11・6.4	10
(d)	鋼管柱 STK540・40・14・6.4	13

表 2 耐震性能目標検討に用いた架線条件

条件	種別	トロリ線	補助 ちょう架線	ちょう架線
(a)	高張力ヘビー	GT-Sn170	PH150	St180
(b)	コンパウンド架線	(19.6 kN)	(9.8 kN)	(24.5 kN)
(c)	CS シンプル架線	GT-CS110	—	PH150
(d)		(19.6 kN)		(19.6 kN)

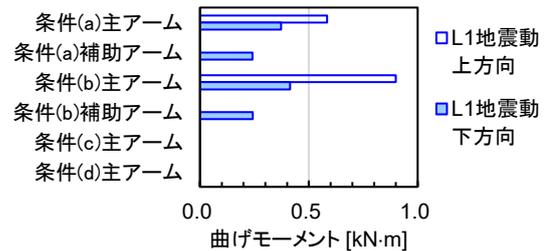


図 2 曲線引金具に生じる曲げモーメント計算結果

(1) 曲げモーメント

前節のシミュレーションでは、地震時の応答が大きくなる傾向がある条件で加振しているものの、実際の設備においては高架橋種別や電柱種別が多様であり、また架線条件も線種や張力の違いなどがある。また、近年の構造物の耐震補強実施状況や地震被害状況を鑑みると、降伏震度が前記の条件よりも大きい場合も想定され、その結果、電柱基礎部への入力すなわち構造物の応答も増加する可能性がある。そこで、曲線引金具に生じる曲げモーメントの耐震性能の仕様としては、図 2 の計算結果に対して余裕をみて、主アームは上方向と下方向でそれぞれ 1.0 kN・m、0.5 kN・m、補助アームは下方向 0.3 kN・m とした。

(2) 変形性能

曲線引金具の変形については、特に主アームの塑性変形による残留変形が大きい場合に、上方向の残留変形では列車走行時に引手金具側がパンタグラフと接触する可能性や、下方向の残留変形では列車走行時に動作抑制ストップが効いてトロリ線に著大な応力が生じる可能性がある。200 km/h 程度の徐行運転が可能であることを考えると、架線・パンタグラフの動的挙動シミュレーション結果<sup>3)</sup>から支持点におけるトロリ線押上量は 15 mm 程度となる。そこで、曲線引金具の変形性能の仕様としては、曲げモーメントの仕様値を経験した後に、シミュレーション結果に余裕を持って 30 mm 以上はトロリ線が押し上がり可能なこととした。現行品 HC-I-E 形の主アームは、トロリ線が標準位置から上方向 180 mm でストップが動作することから、残留変形は 150 mm 以内となる。

表3 曲線引金具の耐震性能に関する仕様

名称	ストッパ位置における曲げモーメント [kN・m]	変形性能
主アーム	上方向 1.0 以上 下方向 0.5 以上	30 mm 以上 押し上がり可能
補助アーム	下方向 0.3 以上	

3. 性能目標を満たす曲線引金具の検討

提案した耐震性能および集電性能を満足するための仕様を満たす曲線引金具の具体的な構造を検討した。

3.1 耐震性能評価

図3に示すように、曲線引金具を直線の形状としたはりと仮定し、曲線引金具の曲げ強度を検討する。ここで、電線側 A 点を自由端、アーム支持金具側 B 点を回転支持、ストッパ位置を上下方向に単純支持とする。現行品 HC-1-E 形では、図4のように折損事例としては引手金具のパイプ接続部で発生している。ここで、パイプ接続部の破壊曲げモーメント  $M_0$  は、引張強さ  $\sigma$ 、断面係数  $Z$  のとき、次式で表される。

$$M_0 = \sigma Z \dots\dots\dots(1)$$

引手金具は材質がアルミ青銅 CAC702 (引張強さ  $\sigma$  は  $490 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ )、折損箇所の直径は主アーム、補助アームのどちらも 17.8 mm であるから、破壊曲げモーメント  $M_0$  は約 0.27 kN・m となる。また、このときに前章で耐震性能に関わる仕様として定めた破壊時のストッパ位置における曲げモーメント  $M_s$  は、 $M_0$  に  $L_s / L_0$  を乗じて約 0.28 kN・m となる。同様に、補助アームでは破壊時のストッパ位置における曲げモーメント  $M_s$  は約 0.28 kN・m となる。主アーム、補助アームのどちらも表3の仕様を満たしていないことがわかる。

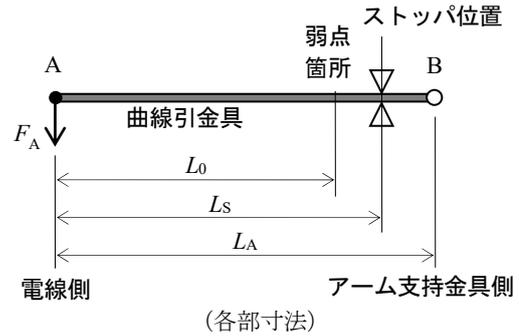
3.2 耐震性能向上方策の検討

曲線引金具の耐震性能向上のため、現行品 HC-1-E 形を基準にして、図5に示すように耐震性能向上方策を検討した。方策の検討では、製造コストなどを考慮して、材質の変更はしないこととした。表4に、主アームに耐震性能向上方策を適用した場合の破壊時のストッパ位置における曲げモーメント、質量、電線位置における等価質量を比較して示す。

曲線引金具の電線位置における等価質量  $m_c$  は、次式により近似できる<sup>4)</sup>。

$$m_c = \frac{\sum_k m_k (x_{2k}^2 + x_{2k} x_{1k} + x_{1k}^2)}{3l^2 \cos^2 \phi} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $l$ 、 $\phi$ 、 $m_k$  は、それぞれ曲線引金具の長さ、引角度、各構成部材の質量である。また、 $x_{1k}$ 、 $x_{2k}$  は、曲線引金具の各部材の両端点と、アーム支持金具側の回転中心からの距離である。現行品 HC-1-E 形の等価質量は、主アームが 1.08 kg、補助アームが 0.76 kg である。この等価質量が小さいほど集電性能 (離線、トロリ線ひずみ) は良好となる。



(各部寸法)

	主アーム	補助アーム
$L_A$ [m]	1.120	1.084
$L_S$ [m]	1.049	1.041
$L_0$ [m]	1.002	1.018

図3 曲線引金具に生じる曲げモーメントの計算概要

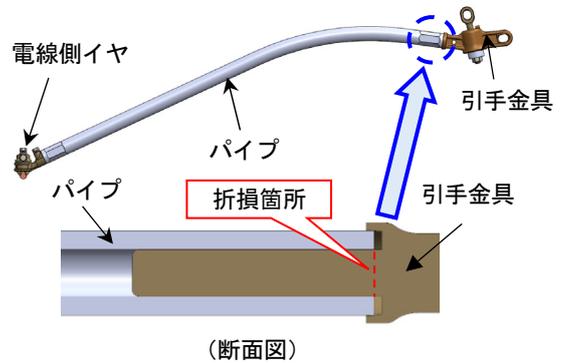


図4 曲線引金具 HC-1-E 形の折損箇所

① パイプ接続部補強

現行品 HC-1-E 形が地震時などに破損しているパイプ接続部の補強方策として、図5に示す二段圧縮<sup>2)</sup>を適用した。図4のように現行品 HC-1-E 形では、パイプの内側で亀裂が発生するため、外観検査により亀裂の確認が困難である。これに対して二段圧縮では、図5のように弱点箇所はパイプ部となり、パイプの外側で亀裂が発生するため、外観検査による亀裂の確認が可能となる。パイプは材質がアルミ A5052 (引張強さ  $\sigma$  は  $235 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ )、直径 32 mm、厚さ 7 mm である。この場合では、破壊時のストッパ位置における曲げモーメント  $M_s$  は現行品の 2 倍以上となるが、耐震性能の仕様である 1.0 kN・m は満たしていない。

② パイプ接続部補強+パイプの補強

パイプ接続部の二段圧縮による補強に加えて、パイプの寸法を変更することにより強度向上した。パイプの入手しやすさを考慮して寸法を選定し、直径 40 mm、厚さ 5 mm のパイプを用いた場合には耐震性能の仕様を満足することがわかる。等価質量は 1.42 kg となり、現行品 HC-1-E 形の 3 割程度大きくなる。

③ パイプ接続部補強+引手金具の補強・延長

パイプ接続部の二段圧縮による補強に加えて、パイプ寸法を変更せずに、引手金具を補強した。破壊時のストッパ位置における曲げモーメントの仕様を満たすため、図3の

電線から弱点箇所までの距離  $L_0$  を 0.653 m とした。等価質量は 1.17 kg となり、現行品 HC-1-E 形の 1 割程度大きくなるものの、②の方策よりも等価質量の増加を抑制できる。

以上の検討結果より、パイプ接続部の補強に加えて、引手金具を補強して延長する方策を採用して、開発を進めることとした。補助アームについても、表 5 に示すように、主アームと同様にパイプ接続部と引手金具を補強して延長することとした ( $L_0$  を 0.635 m)。ストップ動作範囲は、主アーム、補助アームとも現行品 HC-1-E 形と同様とした。図 6 に、試作した曲線引金具の外観図を示す。

4. 試作品の性能確認試験

試作した耐震性能を確認するため、曲げ強度試験を実施した。表 3 の曲げモーメント仕様値まで载荷した後、除荷して残留変形を確認した。

図 7 に示す曲げ強度試験の結果より、主アーム、補助アームとも、表 3 の曲げモーメント仕様値まで破壊しなかった。また、主アームは、除荷後の残留変形は変形性能の仕様値 150 mm 以内であった。以上より、試作品は耐震性能の仕様を満足していることを確認した。

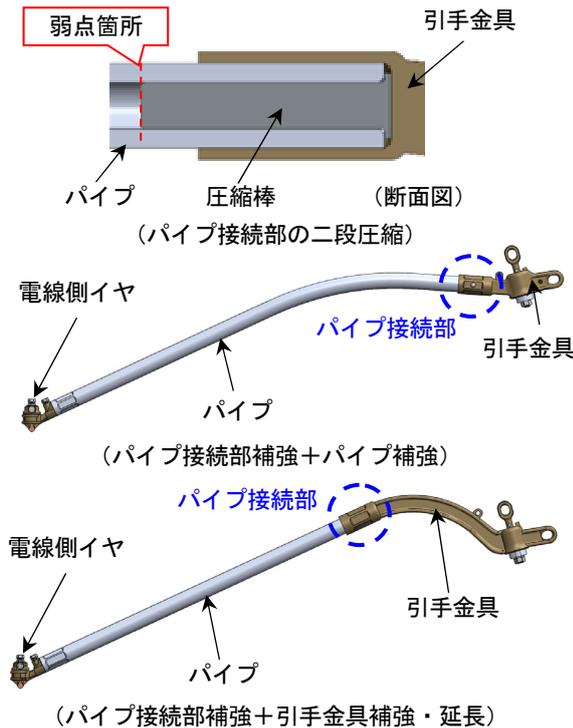


図 5 曲線引金具の耐震性能向上方策概要

表 4 耐震性能向上方策による主アームの性能比較

補強方策	ストップ位置における曲げモーメント [kN·m]	質量 [kg]	等価質量 [kg]
なし(現行品 HC-1-E 形)	0.28	2.90	1.08
パイプ接続部補強	0.71	3.10	1.09
パイプ接続部補強 パイプ補強	1.06	3.80	1.42
パイプ接続部補強 引手金具の補強・延長	1.09	3.80	1.17

表 5 耐震性能向上方策による補助アームの性能比較

補強方策	ストップ位置における曲げモーメント [kN·m]	質量 [kg]	等価質量 [kg]
なし(現行品 HC-1-E 形)	0.28	1.60	0.76
パイプ接続部補強 引手金具の補強・延長	0.61	2.60	0.83



図 6 曲線引金具試作品外観写真

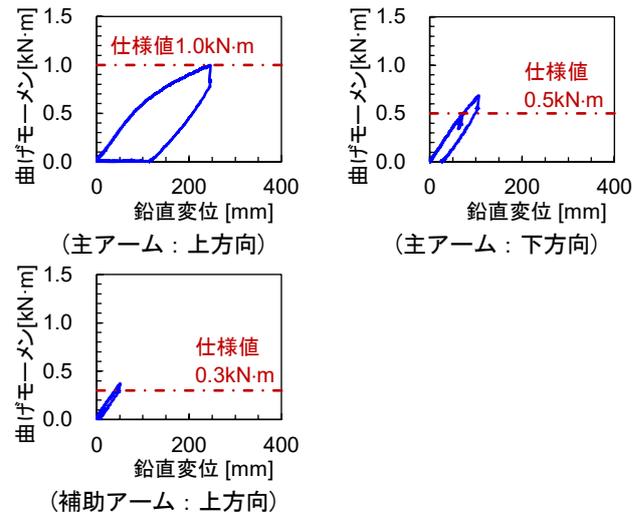


図 7 曲線引金具試作品の曲げ強度試験結果

5. まとめ

耐震性能を向上し、かつ外観検査で損傷が発見可能な曲線引金具を検討した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 曲線引金具の耐震性能に関する仕様を提案した。
- (2) 耐震性能向上方策を検討し、曲線引金具の試作品を製作した。
- (3) 曲げ強度試験により、曲線引金具の試作品が提案した仕様を満足することを確認した。

参考文献

- 1) 公益財団法人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。
- 2) 網干光雄，常本瑞樹，甘利智：地震時における電車線路の動特性解析と耐震性向上策，日本機械学会論文集（C編），pp.1470-1484，2012。
- 3) 常本瑞樹，清水政利，入倉佳祐，森本大観，山下主税，池田国夫：速度 300km/h 超に対応した高速シンプル架線の開発，鉄道総研報告，Vol.33, No.6, pp.17-22，2019。
- 4) 網干光雄，池田国夫，平亘：曲線引金具の等価質量評価法，平成 21 年電気学会全国大会，5-078, p.5-127, 2009。