

# 耐震性能を向上した曲線引金具の開発

常本 瑞樹\* 山下 義隆\* 和田 一範\*\*  
 小林 武弘\*\*\* 佐藤 修平\*\*\* 池田 国夫#

Development of Pull-off Arm with Improved Seismic Performance

Mizuki TSUNEMOTO Yoshitaka YAMASHITA Kazunori WADA  
 Takehiro KOBAYASHI Shuhei SATO Kunio IKEDA

Pull-off arms of overhead contact lines are required to be lighter in weight for current collection performance, but they are also required to improve seismic performance. However, in order to improve the seismic performance, an increase in mass of the pull-off arms is unavoidable. Therefore, careful consideration is required to achieve both of these performances of the pull-off arm. Hence, in this study, after investigating seismic design specifications of pull-off arm, we tested the structure of pull-off arms using the design. Result of bending strength test showed that the performance of prototype pull-off arms satisfied the proposed specifications. In addition, the result of field test also showed that the current collection performance of the pull-off arms installed on a commercial line was good.

キーワード：電気鉄道，架線，集電，耐震，曲線引金具，高速走行試験

## 1. はじめに

架空電車線（以下，架線）の曲線引金具は，支持点においてトロリ線などの電線の左右方向位置（左右偏位）を一定範囲に保持するための金具である。図1に，新幹線用曲線引金具の例を示す。曲線引金具は，トロリ線などの横張力によって破損しない強さが求められるとともに，トロリ線とパンタグラフ間の集電性能に影響することから，軽量であることが要求される。

近年の地震において，土木構造物に顕著な被害が発生していないにもかかわらず，電車線路設備の破損が発生する事例が増えている。「電車線路設備耐震設計指針」<sup>1)</sup>では，電車線路の耐震性能に関して，L2地震動においても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いる。また，L1地震動においては，速やかに運転を再開することを目標として，電線等の断線，架線金具の破損がなく，パンタグラフの割り込みがないことが耐震目標として提案されている<sup>2)</sup>。曲線引金具以外の電線や金具については性能向上方策によって，この耐震目標を満たす見通しが得られているものの，曲線引金具に関しては性能向上が課題となっていた。曲線引金具の耐震性能向上においては，必要な補強によって等価質量が増加

し，集電性能が悪化することが懸念される。そのため，曲線引金具の耐震性能と集電性能の両立には慎重な検討が求められる。また，新幹線で現在多く使用されている曲線引金具は，外観検査で亀裂が確認できない構造となっていることから，地震時などに亀裂が発生しても，その後の検査において亀裂が発見できない可能性がある。そのため，損傷が外観検査により確認できる構造について検討する必要がある。

そこで本研究では，新幹線用曲線引金具の信頼性向上のため，金具架設時の集電性能の低下を抑えつつ，パイプ接続部補強などによって耐震性能を向上し，かつ外観検査で損傷の発見が容易な曲線引金具を開発した。

## 2. 曲線引金具の性能目標

### 2.1 耐震性能目標

曲線引金具の耐震性能目標について，電車線路3次元シミュレーション<sup>2)</sup>を行い，地震時に曲線引金具に生じる曲げモーメントを推定した。

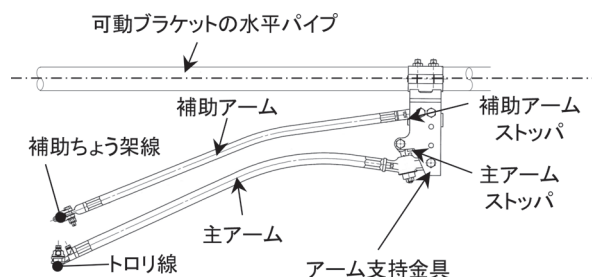


図1 新幹線用曲線引金具の概要 (HC-1-E形)

\* 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  
 \*\*\* 三和テッキ株式会社  
 # 東日本旅客鉄道株式会社

### 2.1.1 計算条件

計算条件は電車線路の耐震目標を提案した際<sup>2)</sup>と同様に、以下の条件とした。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 1.0~3.0Hz (0.5Hz 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 50m, 4 径間で構成し、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

### 2.1.2 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および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アーム支持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-1-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 180mm, 下方向 150mm, 補助アームでは補助ちょう架線が標準位置から下方向 100mm (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 0.90kN・m, 最大約 0.40kN・m, 補助アームが下方向で最大約 0.25kN・m である。同様に、L2 地震動スペクトル I では主アームが上方向と下方向のどちらも最大約 1.45kN・m, 補助アームが最大約 0.60kN・m であった。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う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。

### 2.1.3 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

表 1 耐震性能目標検討に用いた電柱条件

No.	条件	種別	地上長さ [m]
1	(a)	コンクリート柱 11-40-N15B	10
2	(b)	コンクリート柱 14-40-N20B	13
3	(c)	鋼管柱 STK500・35・11・6.4	10
4	(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

No.	条件	架線	電線 (標準張力)		
			トロリ線	補助 ちょう架線	ちょう架線
1	(a)	高張力ヘビー コンパウンド架線	GT-SN170 (19.6kN)	PH150 (9.8kN)	St180 (24.5kN)
	(b)				
2	(c)	CS シンプル架線	GT-CS110 (19.6kN)	—	PH150 (19.6kN)
	(d)				

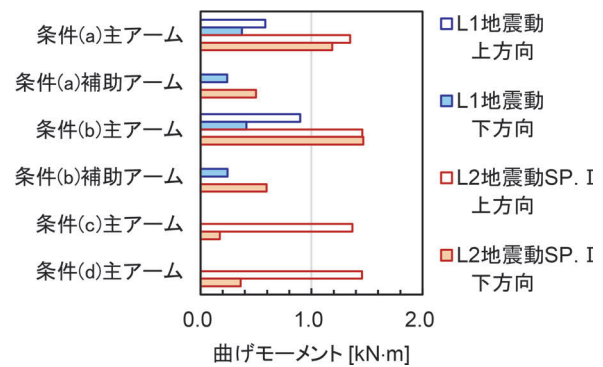


図 2 曲線引金具に生じる曲げモーメント計算結果

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。

#### ・曲げモーメント

前項のシミュレーションは地震時の応答が大きい傾向の加振条件で行ったが、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、構造物の応答すなわち電柱基礎部への入力が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 L1 地震動での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 1.0kN・m, 0.5kN・m, 補助アームは下方向 0.3kN・m とした。

#### ・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曲線引金具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

トッパが効いてトロリ線に著大な応力が生じる可能性がある。200km/h 程度の徐行運転が可能にすることを考えると、図4の架線・パンタグラフ運動シミュレーション結果から支持点におけるトロリ線押上量は15mm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、シミュレーション結果に対して余裕を考慮し、前述の曲げモーメントを経験した後に30mm以上のトロリ線押し上がりが可能なこととした。現行品 HC-1-E 形の主アームは、トロリ線が標準位置から上方向180mmでストッパが動作することから、残留変形は150mm以内となる。

## 2.2 集電性能目標

曲線引金具の集電性能目標設定に関しては、曲線引金具の等価質量が増加することにより集電性能が低下することから、耐震性能向上による曲線引金具の等価質量増加をどの程度まで許容できるかを検討することになる。そこで、架線・パンタグラフ運動シミュレーション<sup>3)</sup>を用いて、曲線引金具の等価質量が集電性能に与える影響を検討した。

### 2.2.1 曲線引金具の等価質量

曲線引金具の電線位置における等価質量  $m_e$  [kg] は、式(1)により近似できる<sup>4)</sup>。

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

ここで、 $l$ 、 $\phi$ 、 $m_k$  は、それぞれ曲線引金具の長さ [m]、引角度 [rad]、各構成部材の質量 [kg] 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 [m] である。現行品 HC-1-E 形の等価質量は、主アームが1.08kg、補助アームが0.76kg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）が良好となる。

### 2.2.2 計算条件

計算対象架線は300km/h超で営業運転されている区間の架線とし、高張力ヘビーコンパウンド架線（表2のNo.1）と、表3に示した360km/h用に提案されているコンパウンド架線（以下、「360km/h対応コンパウンド架線」と記す<sup>5)</sup>とした。図3に、パンタグラフの力学モデルを示す。なお、パンタグラフの押上力は、静押上力（54N）と揚力（走行速度300km/hで約35N）を加えて計算した。

### 2.2.3 計算結果

曲線引金具の等価質量が集電性能に与える影響について、架線・パンタグラフの運動シミュレーションにより求めた支持点におけるトロリ線の押上量とひずみの計算結果を図4に示す。高張力ヘビーコンパウンド架線の

320km/h 走行時よりも360km/h 対応コンパウンド架線の360km/h 走行時のほうが、等価質量による影響が大きかったことから、同図には360km/h 対応コンパウンド架線の結果のみを示している。なお、今回の計算条件において離線は発生しなかった。図4より、主アームの等価質量の影響について評価すると、トロリ線押上量については等価質量による差が認められないが、トロリ線ひずみについては特に300km/h超の高速域において影響がみられる。等価質量が大きいくほどトロリ線ひずみが増加しており、速度360km/hにおいては現行品 HC-1-E 形の場合を基準としたトロリ線ひずみの増加量が、等価質量1.2kg、1.4kgではそれぞれ4%、10%となる。一方、補助アームの等価質量の影響に関しては、今回計算した条件内ではトロリ線の押上量、ひずみのどちらに対しても大きな影響が認められなかった。

### 2.2.4 集電性能目標の設定

今回の開発においては、現行品 HC-1-E 形架設時に対するトロリ線ひずみ増加量が5%以下であればほぼ同等と考えることとし、前項の架線・パンタグラフ運動シミュレーションの結果より、主アームについては、集電性能の観点から等価質量を1.2kg以内とすることとした。また、補助アームについては、トロリ線押上量やトロリ線ひずみに対する等価質量増加の影響がほとんどなかった

表3 架線条件（360km/h 対応コンパウンド架線）

No.	電線（標準張力）		
	トロリ線	補助ちょう架線	ちょう架線
1	GT-PHC110 (19.6kN)	PH150 (12.7kN)	St180 (21.6kN)

項目	値
質点質量 $m_1$ [kg]	0.6
質点質量 $m_2$ [kg]	11.8
ばね定数 $k$ [N/m]	10750
ダンパ減衰定数 $c$ [Ns/m]	81 (両向き)
静押上力 $P$ [N]	54

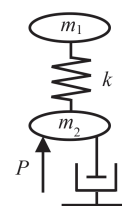
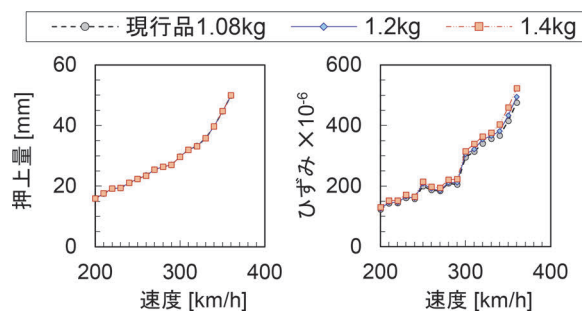


図3 パンタグラフの力学モデル



(a) トロリ線押上量 (b) トロリ線ひずみ: 上面引張

図4 曲線引金具の等価質量が集電性能に与える影響

ことから、集電性能面からの仕様として等価質量を1.0kg 以内にとすることとした。

### 2.3 曲線引金具の性能目標まとめ

以上で検討した曲線引金具の性能に関わる仕様をまとめて表4に示す。曲線引金具の開発においては、曲線引金具の長さ、トロリ線の引角度は現行品 HC-1-E 形と同じとする。

### 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5に示すように、曲線引金具を直線のほりに置きかえて、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、ストップ位置を上下方向に単純支持とする。現行品 HC-1-E 形では、折損事例としては図6のように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  $M_0$  [N・m] は、引張強さ  $\sigma$  [N/m<sup>2</sup>]、断面係数  $Z$  [m<sup>3</sup>] のとき、式(2)で表される。

$$M_0 = \sigma Z \quad (2)$$

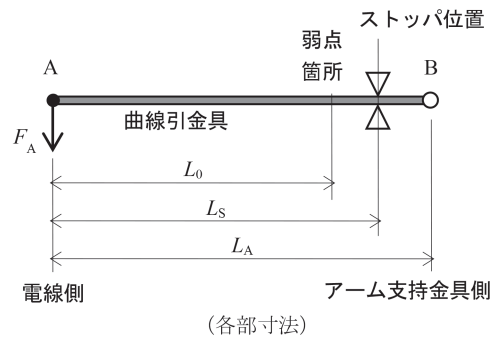
引手金具は材質がアルミ青銅 CAC702 (引張強さ  $\sigma$  は  $490 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>)、折損箇所の直径は主アーム、補助アームのどちらも 17.8mm であるから、破壊曲げモーメント  $M_0$  は約 0.27kN・m となる。また、このときに前章で耐震性能に関わる仕様として定めた破壊時のストップ位置における曲げモーメント  $M_S$  は、 $M_0$  に  $L_S/L_0$  を乗じて約 0.28kN・m となる。同様に、補助アームでは破壊時のストップ位置における曲げモーメント  $M_S$  は約 0.28kN・m となる。これより主アーム、補助アームのどちらも表4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7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、材料の入手性、製造コストな

表4 曲線引金具の仕様

名称	耐震性能		集電性能 等価質量 [kg]
	ストップ位置における 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	30mm 以上 押し上がり可能	1.2 以下
補助アーム	下方向 0.3 以上		1.0 以下



(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5 曲線引金具に生じる曲げモーメントの計算概要

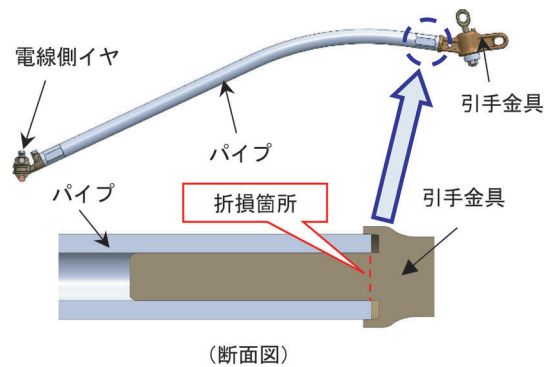


図6 曲線引金具 HC-1-E 形の折損箇所

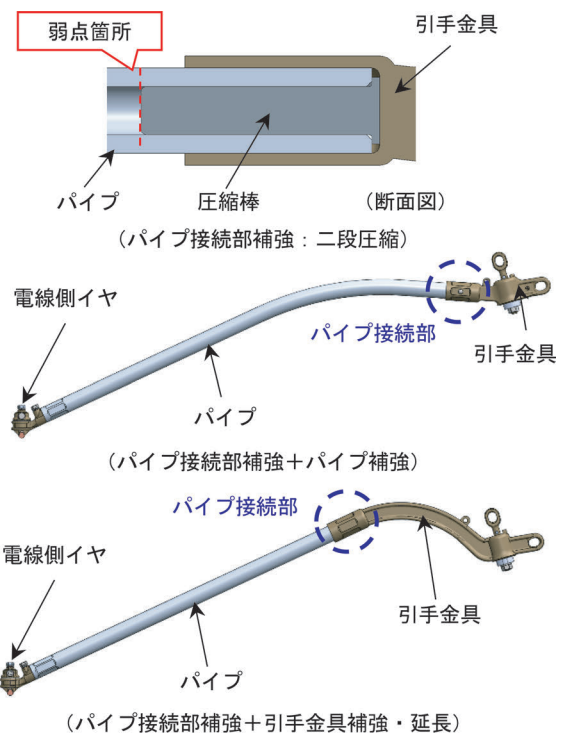


図7 曲線引金具の耐震性能向上方策概要

などを考慮して、材質の変更はしないこととした。表5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プ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。

①パイプ接続部補強（表5のNo.2）

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7に示す二段圧縮<sup>2)</sup>を適用した。現行品 HC-1-E 形では、図6のように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7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32mm、厚さ7mmである。この場合、破壊時のストップ位置における曲げモーメント  $M_s$  は  $0.71 \text{kN}\cdot\text{m}$  と現行品の2倍以上となるが、耐震性能の仕様である  $1.0 \text{kN}\cdot\text{m}$  は満足しない。

②パイプ接続部補強+パイプ補強（表5のNo.3）

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40mm、厚さ5mmのパイプを用いた場合には破壊時のストップ位置における曲げモーメント  $M_s$  は  $1.06 \text{kN}\cdot\text{m}$  で耐震性能の仕様を満足した。しかしながら、等価質量が  $1.42 \text{kg}$  となり、集電性能の仕様である  $1.2 \text{kg}$  以内を満足しない。

③パイプ接続部補強+引手金具補強・延長（表5のNo.4）

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。破壊時のストップ位置における曲げモーメントの仕様を満たすため、図5の電線から弱点箇所までの距離  $L_0$  を  $0.635 \text{m}$  とした。これにより等価質量が  $1.17 \text{kg}$  となり、集電性能の仕様

を満足した。

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は表6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  $0.635 \text{m}$ )。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8に開発した曲線引金具の外観図を示す。以上の方策により、主アーム、補助アームとも耐震性能および集電性能の仕様を満足し、かつ亀裂などの損傷が外観から確認可能となる。

4. 曲線引金具の曲げ強度試験

開発した曲線引金具の耐震性能を確認するため、曲げ強度試験を実施した。表4の曲げモーメント仕様値まで載荷した後、除荷して残留変形を確認した。

図9に示す曲げ強度試験の結果のように、主アーム、補助アームとも表4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  $150 \text{mm}$  以内であった。以上より、開発品は耐震性能の仕様を満足していることを確認した。



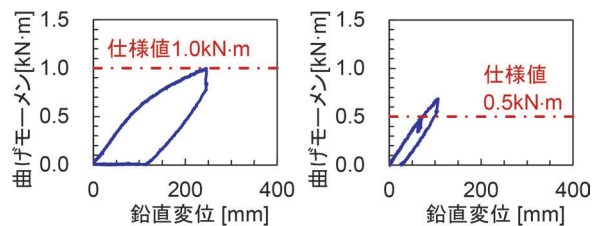
図8 曲線引金具開発品外観写真

表5 耐震性能向上方策による主アームの性能比較

No.	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]
1	なし(現行品 HC-1-E 形)	0.28	2.90	1.08
2	パイプ接続部補強	0.71	3.10	1.09
3	パイプ接続部補強 パイプ補強	1.06	3.80	1.42
4	パイプ接続部補強 引手金具補強・延長	1.09	3.80	1.17

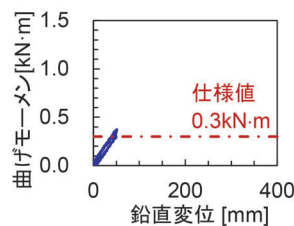
表6 耐震性能向上方策による補助アームの性能比較

No.	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]
1	なし(現行品 HC-1-E 形)	0.28	1.60	0.76
2	パイプ接続部補強 引手金具補強・延長	0.61	2.60	0.83



(主アーム：上方向)

(主アーム：下方向)



(補助アーム：上方向)

図9 曲線引金具開発品の曲げ強度試験結果

## 5. 営業線における架設試験

開発した曲線引金具を営業線に約1年間架設し、動特性測定等を実施した。架設した架線は、360km/h対応コンパウンド架線（表3のNo.1, 東北新幹線 古川・くりこま高原間 下り 379 ドラム, 引留区間長 1412m）である。架設した支持点は5箇所であり、すべて明かり区間である。なお、測定箇所の曲線引金具は、主アームがHC-1-E形よりも軽量のLC-1形（等価質量0.76kg）、補助アームがHC-1-E形であった。

図10、図11に、測定結果を示す。図10は、開発品を架設した379 ドラムと、このドラムと隣接した現行品LC-1形が架設された2 ドラム（377,381 ドラム）について、試験車両を用いた高速走行試験での離線率を示している。開発品を架設したドラムの離線率は、現行品LC-1形が架設されたドラムとほぼ同等であり、目安値である10%以下<sup>6)</sup>であった。図11(a)は、同一支持点において、営業列車E5系+E6系（最高速度320km/h）が走行した際の開発品架設時と現行品架設時の支持点トロリ線ひずみを比較して示している。トロリ線ひずみは、開発品架設時と現行品架設時ではほぼ同等であり、目安値 $500 \times 10^{-6}$ 以下<sup>6)</sup>であった。また、図11(b)は、試験車両を用いた高速走行試験での開発品架設時の支持点トロリ線ひずみである。トロリ線ひずみは走行速度360km/h未満では目安値以下である。一方、360km/h以上の速度では目安値より大きい値も観測され、最大 $600 \times 10^{-6}$ 程度である。トロリ線のひずみ目安値は硬銅ト

ロリ線の疲労特性に基づいて設定されており、本架線で用いられているPHCトロリ線は硬銅トロリ線よりも耐疲労性が大幅に向上している<sup>7)</sup>ことから、目安値を $1000 \times 10^{-6}$ 以下<sup>5)</sup>として管理されており、観測された値は問題ない範囲と考えられる。

開発品を架設した区間（約200m）について、約1年の架設期間後にトロリ線摩耗状況を調査した結果、トロリ線の局部摩耗など異常な摩耗進行は認められなかった。

## 6. まとめ

新幹線用曲線引金具の信頼性向上のため、金具架設時の集電性能の低下を抑えつつ、パイプ接続部補強などによって耐震性能を向上し、かつ外観検査で損傷の発見が容易な曲線引金具を開発した。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目標について、破壊曲げモーメントの仕様として、主アームは上方向と下方向でそれぞれ1.0kN・m、0.5kN・m、補助アームは0.3kN・mとすることを提案した。また、変形性能の仕様として、この曲げモーメントを経験した後に、30mm以上のトロリ線押し上がりを可能にすることを提案した。
- (2) 曲げ強度試験により曲線引金具開発品の性能を評価した結果、主アーム、補助アームのどちらも耐震性能の仕様を満足することを確認した。
- (3) 曲線引金具開発品を営業線に架設して動特性測定を実施した結果、開発品架設時の集電性能は、現行品架設時とほぼ同等であることを確認した。また、約1年間の架設期間において、トロリ線の局部摩耗など異常な摩耗進行は認められなかった。

## 文 献

- 1) 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），Vol.78, No.789, pp.1470-1484, 2012
- 3) 網干光雄：動特性計算による架空電車線凹凸の評価法，電気学会論文集D, Vol.131, No.2, pp.388-395, 2013
- 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
- 5) 池田国夫，西健太郎，栗田健：新幹線の営業速度向上に対応した集電系の開発，電気学会論文集D, Vol.131, No.2, pp.388-395, 2011
- 6) 鉄道総合技術研究所編：電車線とパンタグラフの特性，研友社，1993
- 7) 菅原淳：高強度と高導電性を兼ね備えたPHCトロリ線，RRR, Vol.66, No.4, pp.14-17, 2009

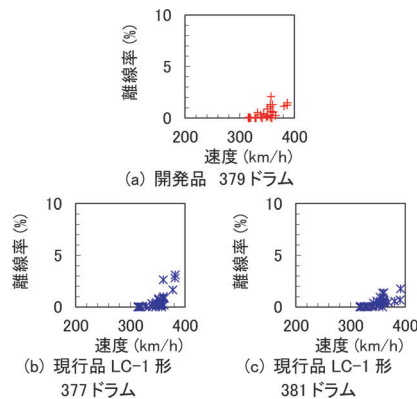


図10 動特性測定結果（離線率，試験車両）

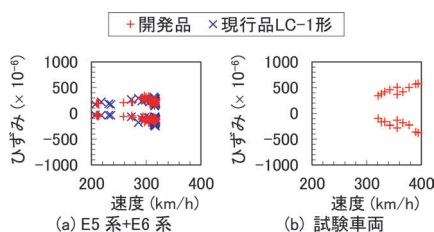


図11 動特性測定結果（支持点トロリ線ひずみ）