

ダンパハンガの経年劣化に対する集電性能の評価

佐藤 宏紀* 清水 政利*
早坂 高雅* 常本 瑞樹*

Evaluation Test of Current Collecting Performance of Aged and Deteriorated Damper Hanger

Koki SATO Masatoshi SHIMIZU
Takamasa HAYASAKA Mizuki TSUNEMOTO

Rules on replacement cycle and maintenance method of damper hangers used for the composite type simple catenary system installed in high speed sections of the meter-gauged lines have not been established. Therefore, we investigated deterioration of removed damper hangers used for 25 years and confirmed that there was no significant deterioration of internal parts. By checking their damping performance and performing a line test, it was confirmed that 25 year aged composite type simple catenary system has good current collection performance. Furthermore, by simulating, it was found out that the characteristic change of the damper hanger has not significant impact on the current collection performance at the stage of elapse of 25 years, and it is possible to continue to use the damper hanger.

キーワード：ダンパハンガ、経年劣化、摩擦力、トロリ線押上量、トロリ線ひずみ、離線率

1. はじめに

在来線高速区間の合成シンプル架線は現在経年が25年以上となり、今後金具類の計画的取替が必要になると考えられる。合成シンプル架線は図1のように支持点前後のハンガにダンパハンガと呼ばれるばね要素および減衰要素を持つハンガを適用した架線のことをいうが、ダンパハンガの取替指標や保安全管理方法は明確にされていない。

そこで、経年25年の撤去品ダンパハンガに対し、単体での変位-荷重試験、自由振動試験、および部材の外観、寸法検査を行い、新品との特性差や部材の劣化状況を確認した。また、経年25年と新品のダンパハンガを営業線に架設して走行試験を行うことにより、ダンパハンガの経年による集電性能への影響を明らかにした。さらにダンパハンガの特性変化が集電性能へ与える影響を、架線・パンタグラフ系のシミュレーション¹⁾を用いて検討した。これらにより、今後のダンパハンガの保安全管理方法と取替検討の目安を提案した。

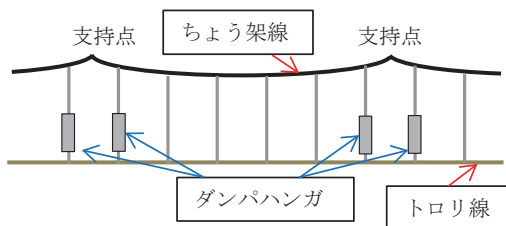


図1 合成シンプル架線

2. ダンパハンガの単体性能試験

2.1 ダンパハンガの構造と効果

トロリ線を下から一定の力で押し上げた時の押上量は、一般に径間中央に比べて支持点付近が小さく、トロリ線をばねとみなした時の等価ばね定数は径間内の位置により変化する。このような径間内での等価ばね定数の不等性は、トロリ線とパンタグラフの間の径間周期の接触力変動を招き、集電性能を悪化させる¹⁾。

図2にダンパハンガの構造を示す。ダンパハンガはコイルばねを内蔵しており、このコイルばねがトロリ線の重量を負担している。このばねの弾性によってハンガ点における架線の等価ばね定数が小さくなるため、ダンパハンガを図1のように支持点前後に適用すると、支持点と径間中央との等価ばね定数の不等性が緩和される。また、ダンパハンガはシリンダ内面としゅう動部材との間の動摩擦力（以後、単に摩擦力）に起因する摩擦ダンパの機能を備えており、架線の振動を減衰させ、離線や共振現象を緩和させる効果がある。

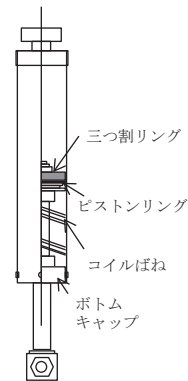


図2 ダンパハンガの構造

* 電力技術研究部 電車線構造研究室

特集：電力技術

2.2 試験項目と供試体

2.1 節に示したダンパハンガを検討する上で、特にダンパハンガのばね定数と摩擦力が重要なパラメータである。そこで、新品および撤去品ダンパハンガ単体について、静的な変位 - 荷重試験を行い、経年によるダンパハンガのばね定数や摩擦力の変化を確認した。さらに経年によるダンパハンガ単体の動的特性の変化を確認するため、自由振動試験を行った。

各試験に供したダンパハンガの経年と個数、個体番号を表1に示す。個体毎に区別をするため、新品ダンパハンガはNo.1～No.6およびNo.28、撤去品ダンパハンガは在来線に取り付けられていた箇所の電柱番号を参考に起点側から順にNo.7～No.27と番号付けした。各試験に用いた供試ダンパハンガは表1のように試験によって異なる。なお、ダンパハンガ撤去時の累計パンタグラフ通過数は約195万回であった。

表1 試験項目と供試ダンパハンガ

| 試験項目 | 状態 | 経年 | 個数 | 個体番号 |
|--------------------------------------|-----|----|----|-------------------------------------|
| ・単体変位 - 荷重試験 ・単体自由振動試験 ・集電性能試験 | 新品 | - | 6 | No.1～No.6, No.28 |
| | 撤去品 | 25 | 21 | No.7～No.27 |
| ・部材劣化判定調査 | 新品 | - | 3 | No.1～No.3 |
| | 撤去品 | 25 | 11 | No.7,9,11,14,15,19 20,21,22,25 |
| ・単体加振試験 | 新品 | - | 3 | No.5,6,7 |
| | 撤去品 | 25 | 10 | No.10,12,13,16,17 18,23,24,26,27 |

2.3 変位 - 荷重試験

図3に試験機の概要を示す。ダンパハンガの変位は無負荷時の状態を0mm、ストロークが伸長する方向を正とし、荷重は無負荷時を0N、引っ張り方向を正として測定した。

新品および撤去品ダンパハンガで得られた代表的な結果を図4に示す。不連続的に荷重が変化する箇所はダンパハンガ内部に4mm程度のあそび部分が設けられているために生じる。図の稼働範囲は実使用時のストローク変位の上限と下限の間の範囲のことである。撤去品ダンパハンガのピストンロッドの光沢を維持している範囲はピストンロッドとボトムキャップの摺動により粉塵等の付着物が削り取られるためであると考え、後述するように3章の図8に示す撤去品ダンパハンガのピストンロッドの付着物から判断した。

同一変位に対するストローク伸長時（以後、伸長時）とストローク収縮時（以後、収縮時）の荷重は一致せず、ヒステリシスループを描く。ストローク変位が同じ箇所における荷重差は伸長時に働く摩擦力と収縮時に働く摩擦力の向きが逆であるために生じると考え、ダンパハン

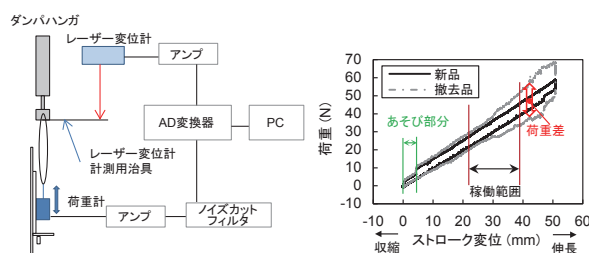


図3 変位 - 荷重試験機概要 図4 変位 - 荷重試験結果

ガの摩擦力は荷重差の2分の1として算出した。

摩擦力はあそび部分を除いた部分の荷重差から求めるが、撤去品の場合は荷重差が変位によって異なり、稼働範囲も撤去品ダンパハンガ毎に異なる。そこで、摩擦力の代表値を最小値、最大値の値から算出することを考え、本報告では摩擦力をストローク変位5mm、45mmの時の各荷重差の平均値の2分の1として算出した。ダンパハンガのばね定数は伸長時の荷重 - 変位グラフの傾きと収縮時の荷重 - 変位グラフの傾きの平均値として算出した。なお、ばね定数の設計値は1000N/mである。

各供試体ダンパハンガのばね定数ならびに摩擦力を表2に示し、新品および撤去品のばね定数と摩擦力の平均値を図5に示す。図5の平均値の上下にはバラツキの程度を示す標準偏差を表示した。

新品・撤去品ダンパハンガともにばね定数は設計値の±10%以内に収まっており、その平均値は新品と撤去品で顕著な差は見られない。一方、摩擦力の平均値

表2 ダンパハンガのばね定数と摩擦力

| No | 状態 | ばね定数 (N/m) | 摩擦力 (N) | No | 状態 | ばね定数 (N/m) | 摩擦力 (N) |
|----|-----|------------|---------|----|-----|------------|---------|
| 1 | 新品 | 1066 | 3.2 | 14 | 撤去品 | 1041 | 3.5 |
| 2 | 新品 | 1026 | 3.2 | 15 | 撤去品 | 1078 | 4.1 |
| 3 | 新品 | 1037 | 2.7 | 16 | 撤去品 | 1055 | 2.4 |
| 4 | 新品 | 1027 | 2.9 | 17 | 撤去品 | 1071 | 7.1 |
| 5 | 新品 | 1043 | 3.2 | 18 | 撤去品 | 1056 | 3.4 |
| 6 | 新品 | 1025 | 2.9 | 19 | 撤去品 | 1043 | 6.1 |
| 28 | 新品 | 1044 | 3.3 | 20 | 撤去品 | 1032 | 5.3 |
| 7 | 撤去品 | 1085 | 4.1 | 21 | 撤去品 | 1054 | 4.1 |
| 8 | 撤去品 | 1054 | 3.9 | 22 | 撤去品 | 1051 | 2.7 |
| 9 | 撤去品 | 1050 | 4.1 | 23 | 撤去品 | 1049 | 4.3 |
| 10 | 撤去品 | 1021 | 4.7 | 24 | 撤去品 | 1037 | 3.3 |
| 11 | 撤去品 | 1057 | 3.1 | 25 | 撤去品 | 1003 | 3.4 |
| 12 | 撤去品 | 1060 | 3.5 | 26 | 撤去品 | 1033 | 3.3 |
| 13 | 撤去品 | 967 | 4.5 | 27 | 撤去品 | 1032 | 4.3 |

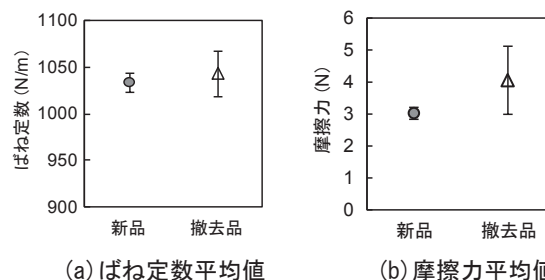


図5 ダンパハンガの新品と撤去品のばね定数・摩擦力の差

は新品ダンパハンガより、撤去品ダンパハンガの方が大きく、新品の場合は2.7～3.2Nの値であったのに対し、撤去品の場合は2.7～7.1Nの範囲で摩擦力がばらついていた。

2.4 自由振動試験

図6に試験機の概要を示す。ダンパハンガイヤー部に4.0kgのおもり（治具・おもり・ダンパハンガピストンロッド部の総重量4.52kg）を載せ、ダンパハンガのストローク上限まで持ち上げてから自由落下させ、変位を測定した。なお、鉛直上方向を正、おもりを载荷時のつり合い位置を変位0mmとして、各供試ダンパハンガ毎に5回の実験を行った。

新品および撤去品ダンパハンガに対して得られた代表的な結果を

図7に示す。新品ダンパハンガの場合、自由振動開始後少なくとも第2極値まで観測されたが、撤去品ダンパハンガの場合、第1極値までで振動が停止する場合が見受けられた。

ここで、試供試体ダンパハンガについて実験を行った際の、初期変位a[mm]と第1極値b[mm]の比a/bで減衰性能を評価することを考える。各供試体ダンパハンガについて5回のa/bの値を求め、それを平均した結果を表3に示した。a/bの値は新品の場合1.7～2.2の間で

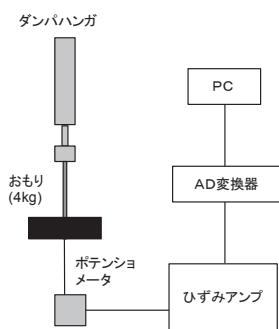


図6 自由振動試験機概要

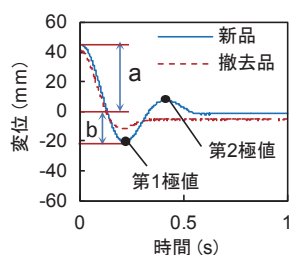


図7 自由振動試験結果

ばらつきは小さいが、撤去品の場合は1.5～13.0の間であり、ばらつきが大きかった。また、撤去品はほとんどの供試体（約8割）でa/bの値が新品より大きい。

ここで、構造が似ている合成素子（合成素子は、ばねおよび摩擦ダンパにより構成されるという意味ではダンパハンガと同じである）を参照すると、JRS35315-1C-14AR3RA2において合成素子を自由振動させた際のa/bの値は十分な減衰性能を持っていることを保証するため1.5以上でなくてはならないとしている。これを勘案すると撤去品のa/bの値は全てのダンパハンガについて問題ない値であると考えられる。

3. ダンパハンガの部材劣化調査

撤去品ダンパハンガに対し、構成部材の変形や腐食、しゅう動部材の異常摩耗の有無等の部材劣化状況を把握するため、外観調査・しゅう動部材の寸法調査を行った。

3.1 外観調査

撤去品ダンパハンガの外観の例を図8(a)に示す。全ての撤去品ダンパハンガについてシリンダ部にはキズや腐食等は確認されなかった。次に、撤去品のピストンロッドを、ストローク下限まで引き出し、表面の状態を調べた。その時の例を図8(b)に示す。ピストンロッドに付着物を確認したものの変形は確認されなかった。

撤去品ダンパハンガのピストンロッドに粉塵等の付着と光沢部分が存在するのは、ダンパハンガロッドが変位する際、ピストンロッドとボトムキャップが接触した箇所のみ、ピストンロッドの付着物が削りとられるからであると考えられる。そこで、ピストンロッドの光沢を維持していた範囲を測定することでおよそその稼働範囲を推定した。

表3 自由振動試験で得られたa/bの値

| No. | 状態 | a/b | No. | 状態 | a/b |
|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| 1 | 新品 | 1.9 | 14 | 撤去品 | 6.2 |
| 2 | 新品 | 1.7 | 15 | 撤去品 | 1.6 |
| 3 | 新品 | 2.2 | 16 | 撤去品 | 1.8 |
| 4 | 新品 | 2.0 | 17 | 撤去品 | 1.5 |
| 5 | 新品 | 2.2 | 18 | 撤去品 | 1.7 |
| 6 | 新品 | 2.0 | 19 | 撤去品 | 4.2 |
| 28 | 新品 | 1.8 | 20 | 撤去品 | 2.7 |
| 7 | 撤去品 | 13.0 | 21 | 撤去品 | 6.5 |
| 8 | 撤去品 | 6.5 | 22 | 撤去品 | 3.1 |
| 9 | 撤去品 | 3.2 | 23 | 撤去品 | 2.4 |
| 10 | 撤去品 | 2.9 | 24 | 撤去品 | 6.0 |
| 11 | 撤去品 | 2.4 | 25 | 撤去品 | 5.9 |
| 12 | 撤去品 | 2.4 | 26 | 撤去品 | 3.8 |
| 13 | 撤去品 | 3.2 | 27 | 撤去品 | 3.7 |

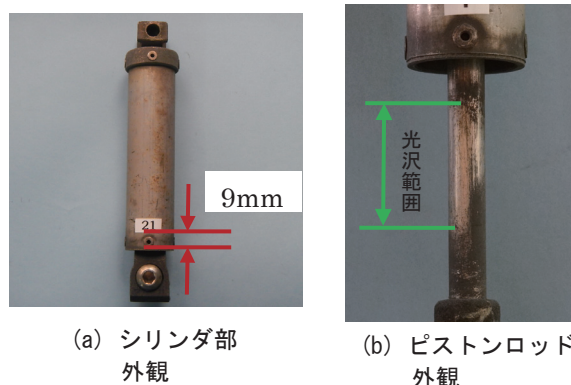


図8 撤去品ダンパハンガの外観調査

特集：電力技術

3.2 寸法調査

撤去品ダンパハンガを分解し、ダンパハンガ内部のしゅう動面を有する部材に対して図9に示す測定箇所を寸法を測定し、設計上の寸法と測定値との差が最も大きかった値を最大摩耗量とした。表4に設計値と11個の撤去品ダンパハンガにおける最大摩耗量および最大摩耗量の平均値を示す。

しゅう動部材の摩耗に関しては限界値が特に定められているわけではないが、最も摩耗が大きいボトムキャップでも最大摩耗量は0.48mmであり、設計値の最小直径10.06mmに対して5%以下である。後述のように集電性能に大きな影響が認められないので摩耗量は問題ない範囲であると考えられる。

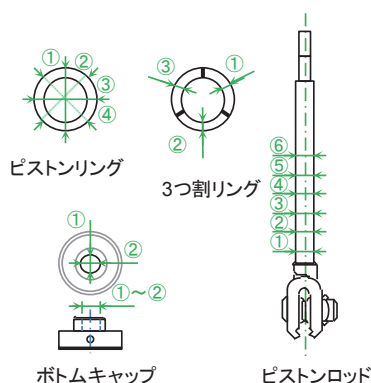


図9 ダンパハンガ寸法測定箇所

表4 摺動部材の最大摩耗箇所と最大摩耗量

| 部材名 | 最大摩耗を示した撤去品ダンパハンガ No. | 設計値 | 最大摩耗測定値 | 最大摩耗量 | 平均値 |
|---------|-----------------------|-------|---------|-------|------|
| | | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) |
| ピストンリング | No.11, No.25 | 29.85 | 29.72 | 0.13 | 0.06 |
| 3つ割リング | No.22 | 4.45 | 4.27 | 0.18 | 0.12 |
| ピストンロッド | No.8 | 10.00 | 9.91 | 0.09 | 0.04 |
| ボトムキャップ | No.8 | 10.06 | 10.54 | 0.48 | 0.38 |

4. 集電性能試験およびトロリ線摩耗状況確認

ダンパハンガ単体での試験では、撤去品と新品ダンパハンガの特性に差が見られた。そこで、ダンパハンガ単体の特性変化が集電性能へ与える影響を検討するため、営業線において試験列車による集電性能評価を行った。また、経年25年の合成シングル架線におけるトロリ線の状態を確認するため、軌陸車上でトロリ線の摩耗測定を行った。

4.1 地上測定

図10に架線へのセンサ類取り付け概要を示す。パンタグラフの走行に伴うトロリ線の支持点押上量ならびにダンパハンガのピストンロッドのストローク変位はポテンシオメータにより測定し、トロリ線ひずみはトロリ線に貼付したひずみゲージにより測定した。測定区間の径

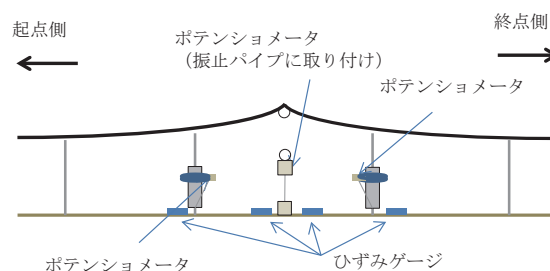


図10 架線へのセンサ類取り付け概要

間長は60mでありダンパハンガは支持点前後のハンガに適用した。

試験箇所は合成シングル架線の単線区間であり、試験車はシングルアームパンタグラフ3台（パンタグラフ間隔63.9m）を搭載した8両編成の車両である。試験箇所における走行速度は130km/hである。シングルアームパンタグラフの方向は、上り走行がなびき、下り走行が反なびきである。走行は2日間行い、1日につき上下走行それぞれ2回ずつ計4回行った。1日目の測定後に測定区間を含む11径間のダンパハンガを全て新品に取り替え、1日目の測定を撤去品ダンパハンガ条件、2日目の測定を新品ダンパハンガ条件として車両走行時のトロリ線支持点押上量、トロリ線ひずみ、ピストンロッドのストローク変位を測定した。

図11に例として新品条件・撤去品条件それぞれに対して上り走行試験を2回行った時のトロリ線支持点押上量の最大値および支持点トロリ線ひずみの最大値・最小値を平均した値を示す。トロリ線支持点押上量は新品の方が少々大きいもののその差はわずかである。また、支持点トロリ線ひずみの値にはほとんど差は見られない。

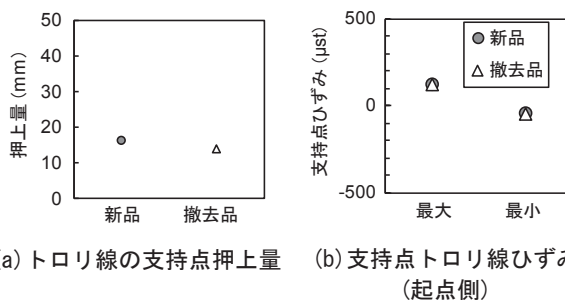


図11 試験列車による走行試験結果（上り走行平均値）
設定走行速度：130km/h

4.2 車上測定

図12に示すように試験車両屋根上に集電状況監視用カメラ、電柱位置センサ、光学式離線測定用のファイバヘッド、パンタグラフ用照明を設置し、集電状態の監視および電柱位置（走行位置確認用）、光学式離線率の測定を行った。ダンパハンガ条件を1日目と2日目に変更

した11径間の区間を評価対象箇所とした。例としてこの区間で測定した上り走行2回の離線率平均値を図13に示す。なお、離線率は第3パンタグラフの測定結果である。

撤去品ダンパハンガの方が離線率がやや大きいものの、離線率の目安値5%に対して十分に小さく、良好な性能を維持していると言える。

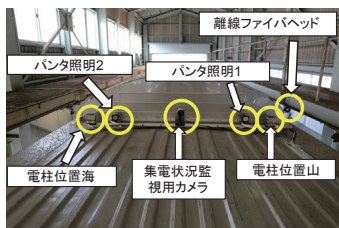


図12 車上測定装置
取り付け状況

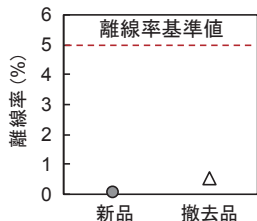


図13 離線率測定結果
(上り走行)
設定走行速度：130km/h

4.3 トロリ線摩耗測定

4.1節に示した地上測定区間を含む3ドラムのトロリ線の残存直径を測定した。例として3径間のトロリ線摩耗測定結果を図14に示す。トロリ線の残存直径はコネクタ位置で大きく低下し、摩耗が進んでいることが分かるが、それ以外の箇所では特に目立った摩耗の進行は見受けられなかった。測定した各ドラムにおいて、コネクタ点とオーバーラップを除く箇所における最大摩耗量と平均摩耗量およびこれらの比（摩耗量比）を求めた。これを表5に示す。

摩耗量比には特に目安となる値はないが、新幹線では概ね2以上が観測されており²⁾、今回の測定結果はこれに比べて十分小さいことから、合成シンプル架線のトロリ線摩耗状態はコネクタ箇所を除いて良好であり、経年

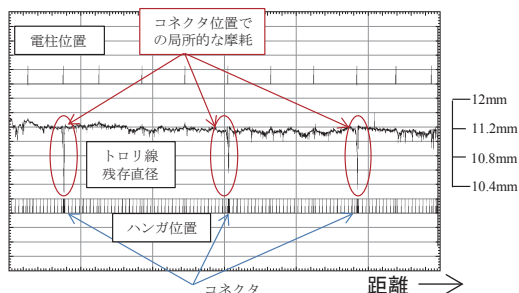


図14 トロリ線の摩耗測定結果

表5 各ドラムのトロリ線摩耗量比

| ドラム名 | 最大摩耗量 (mm) | 平均摩耗量 (mm) | 摩耗量比 (最大摩耗量/平均摩耗量) |
|------|------------|------------|--------------------|
| ① | 1.57 | 1.22 | 1.30 |
| ② | 1.78 | 1.27 | 1.40 |
| ③ | 1.53 | 1.32 | 1.16 |

25年の段階であってもダンパハンガの経年によるトロリ線摩耗への悪影響は特に認められなかった。

5. 経年による集電性能変化予測

経年によるダンパハンガ単体の摩擦力変化が集電性能に及ぼす影響をシミュレーションにて検討する。検討に用いたシミュレーションプログラムは、ダンパハンガの減衰機構を粘性ダンパにより表現したモデルで計算を行うため、ダンパハンガの減衰能を粘性減衰としてモデル化することを検討する。

図15は加振試験(1~5Hz)を行った際の1サイクル当たりの消費エネルギー比(新品1Hz時基準)の平均値測定結果である。ダンパハンガの減衰能が摩擦のみによる場合は周波数に関わらず消費エネルギーは一定となるはずである。しかし、消費エネルギー比は加振周波数に対して比例的に増加する。したがって、ダンパハンガの減衰能を粘性減衰としてモデル化することは妥当であると思われる。いま、図16に示すようにダンパハンガを質量 m にばねの復元力(ばね定数 k)、粘性抵抗(減衰係数 c)、摩擦力 F が働く系としてモデル化する。変位 x の正負はストロークの伸長方向を正とする。この時、ダンパハンガの変位は以下の方程式で表される。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx + F(x, v) = 0$$

図17に自由振動試験結果と、ダンパハンガの減衰能を摩擦力のみでモデル化($c=0$)した場合と粘性減衰のみでモデル化($F=0$ とし、測定値の初期変位 a [mm]/第

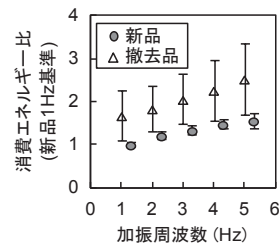


図15 加振試験結果

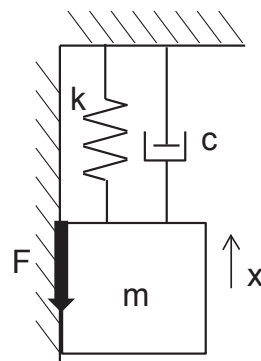


図16 ダンパハンガの計算モデル

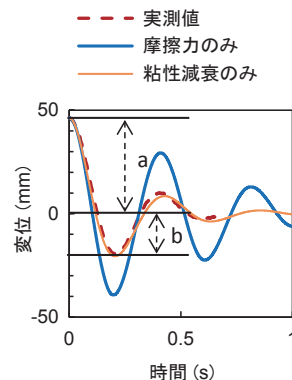


図17 測定結果と計算結果との比較

表6 シミュレーション条件

| | 線条 | 線種 | 張力 (N) |
|-------------------------|---|-------|--------|
| シンプル架線 | ちょう架線：M | St90 | 9800 |
| | トロリ線：T | GT110 | 9800 |
| 径間長 50m | | | |
| 合成シンプル架線 | ちょう架線：M | St90 | 9800 |
| | トロリ線：T | GT110 | 9800 |
| 径間長 50m, 60m | | | |
| 速度条件 | 130km/h | | |
| パンタグラフ条件 | 押上力：59N, 揚力係数 4×10^{-4} (なびき) $N \cdot h^2/km^2$ | | |
| | 舟体等価質量 m1:9.4kg m2:11.6kg | | |
| | 復元ばね定数 k1:9200N/m | | |
| | 質点間ダンパ定数:0Ns/m | | |
| | 枠組みダンパ定数:100Ns/m (片効き) | | |
| パンタグラフ数 3個, 間隔:40m, 60m | | | |

一極値 $b[mm]$ から粘性減衰に換算した値をみかけの粘性減衰とする) した場合の計算結果を示す。ダンパハンガの減衰能を摩擦力のみでモデル化した場合の計算結果は実測と一致しないが、減衰能を粘性減衰のみでモデル化した場合の計算結果は測定結果と良く一致した。以上のことからダンパハンガの減衰能を粘性減衰によりモデル化することが合理的であることがわかる。なお、自由振動試験により得られたダンパハンガのみかけの粘性減衰は新品の場合 30Ns/m であり、撤去品の場合は 20 ~ 90Ns/m であった。

シミュレーション条件を表6に示す。電車線は合成シンプル架線とシンプル架線、パンタグラフは一般的な在来線で用いられるシングルアームパンタグラフとし、パンタグラフ数は3台とした。走行速度は130km/h、径間長(凡例記号S)を50mまたは60mとし、パンタ間隔(凡例記号P)を40mまたは60mとした。

図18にダンパハンガの粘性減衰を変更した時のトロリ線支持点押上量、支持点およびダンパハンガ点のトロリ線ひずみ、および第2パンタグラフ(最小接触力が3パンタグラフ内で最小)の最小接触力のシミュレーション結果を示す。図18より、ダンパハンガの粘性減衰が経年により変動しても、トロリ線の支持点ひずみやトロリ線の支持点押上量およびパンタグラフの最小接触力の値に対して問題となる変化を生じない。

このことは4章の営業車を用いた走行試験の結果において新品ダンパハンガ条件と撤去品ダンパハンガ条件でトロリ線の支持点押上量、トロリ線の支持点ひずみおよび離線率にほとんど差が見られなかったことと一致する。

以上の結果より現時点(経年25年)では、ダンパハンガの経年劣化により列車走行時の集電性能へ問題となるような影響を与えるとは考えにくく、今後もダンパハンガの継続的な使用が可能であると考えられる。

6. ダンパハンガの保守管理方法

在来線高速区間の合成シンプル架線の累計パンタグラフ通過数はJIS2201に定められた金具の振動試験の加

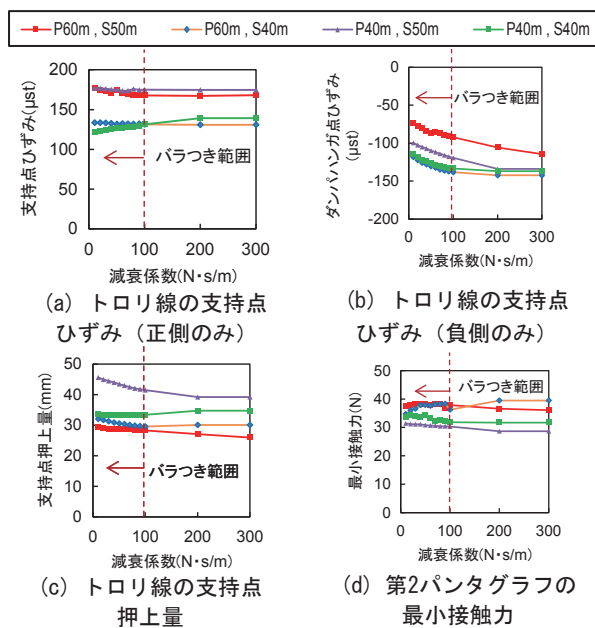


図18 ダンパハンガの減衰係数が集電性能に与える影響

振回数である200万回に近い。しかし、経年25年の現時点ではダンパハンガの経年劣化により、列車走行時の集電性能へ問題となるような影響を与えるとは考えにくい。したがって、現段階ではダンパハンガを直ちに取り換える必要はなく、今後も継続的な使用が可能であると考えられるが、念のため定期的な詳細検査(部材調査等)を行うことを推奨する。

7. まとめ

経年25年(累計パンタグラフ通過数約195万回)の撤去品ダンパハンガに対して各種調査を行い、経年の影響を調べた。その結果、内部部材に劣化等は確認されず、単体では減衰性能の変化が見られるものの、走行試験では良好な性能を維持していることを確認した。さらにシミュレーションにより、ダンパハンガ単体の減衰性能変化による集電性能への影響は経年25年の現段階では認められないことを示した。したがって今後ともダンパハンガの継続的な使用が可能であると考えられるが、念のため定期的な詳細検査を行うことを推奨する。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：電車線とパンタグラフの特性, pp.1-17, pp.3-1 ~ 3-31, 1993
- 2) 原田智, 清水政利：CSシンプル架線におけるトロリ線摩耗の特徴と局部摩耗対策, 鉄道総研報告, Vol.20, No.9, pp.30-31, 2006