

新幹線用新型ばねバランサーの開発



塚越 宏* 尋田 伸幸*

当社の東北・上越新幹線で使用されている滑車式バランサーは、ワイヤーの交換や塗油等のメンテナンスに多くの労力を要し、また近い将来、老朽取替時期が到来するので、メンテナンスレスな新型バランサーの開発が求められている。

そこで、1999年からバランサーのメンテナンスレス化と高性能化を目標に、在来線で導入されているばね式バランサーの技術を応用して、新幹線用新型ばねバランサーの開発を進めてきた。その結果、ほぼ満足する性能が得られたので、以下に報告する。

キーワード：狭小トンネル、剛体架線、架線

1 バランサーについて

「バランサー」は「自動張力調整装置」とも呼び、架線（トロリ線など）を常に真直ぐに引張るための装置である。トロリ線を真直ぐに引張ることで、トロリ線と電車のパンタグラフとは常に滑らかに接触し続けることができるので、電車に電気を安定して供給することが可能になる。通常、バランサーは線路1線あたり1～1.6kmにつき2箇所の割合で設置されている。図1に架線と滑車式バランサーとの関係をイメージした概要図を示す。

バランサーは、コンクリートや鉄のおもりで架線を引張る「滑車式」と、ばねの力を利用して引張る「ばね式」

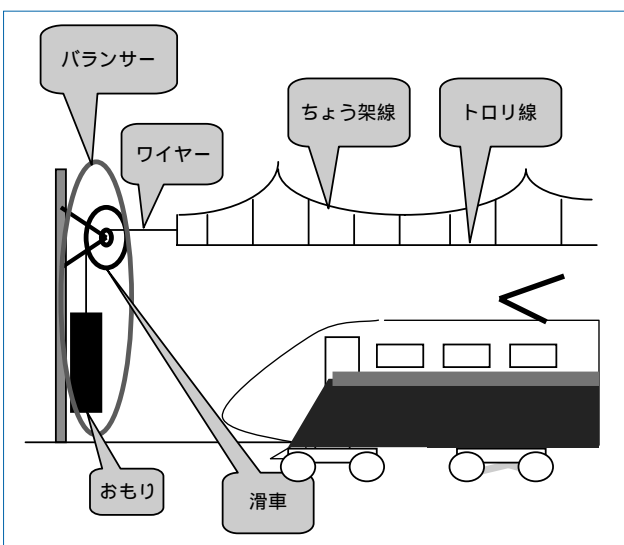


図1：架線と滑車式バランサーとの関係

(これはイメージ図ですので、必ずしも実際の設備どおりになっているとは限りません)

に大別される。図2に滑車式バランサーを、図3にばね式バランサーを示す。ばね式は、ばねとそれらを収納する筒から構成され、外観上は筒にしか見えない。



図2：滑車式バランサー



図3：ばね式バランサー

滑車式はおもりの重力でのみ張力を生み出すので、おもりの高さ位置によらず、ほぼ一定の力で架線を引張ることができる。一方、ばね式はばねの伸縮度合いによって、滑車式よりも架線張力が大きく変化する。超高速運転する新幹線のように高い精度での張力管理が要求される場合には使用できず、そのため従来から滑車式が使用されてきた。

しかし、滑車式は可動部や摩擦部が多く、日頃のメンテナンスに手間がかかるので、メンテナンスレスが最大の特徴であるばね式で、新幹線用を開発することが望まれていた。

2 開発目標

前述のような現状と課題を踏まえて、滑車式に代わる新型ばねバルンサーの開発目標を以下のように定めた。

滑車式と同等の性能を有すること

適用電線長800mで張力変化率を±8%とする。(適用電線長とは、バルンサーが適正に真直ぐに引張ることができる架線の長さのことを言う)

滑車式と同等の寸法であること

カセット方式とすることで、交換工事を容易なものにする。

滑車式と同等の寿命であること

おおむね30年以上とする。

本論文ではこの3つの中から主として、技術的に最も困難であり、達成までに時間を要した「滑車式と同等の性能」について述べる。

この目標に対する具体的な取り組みとしては、従来型ばねバルンサーの機能向上(張力変化率の低減、摺動抵抗の低減)が挙げられる。

3 仕様の検討

3.1 バルンサーの設計

新たなばねバルンサーを設計するにあたっては、まず、ストローク(温度変化による架線伸縮量に対応できるばねバルンサーの伸縮範囲のことを言う)及びばね本数の検討が必要である。

3.1.1 ストロークの検討

ストロークの計算で用いる設備条件としては、弊社管内では長野新幹線や東北新幹線(盛岡~八戸)において導入されている高速走行対応のCSシンプルカテナリ設備

を適用した。線条は、ちょう架線はPH150mm²(硬銅より線)、トロリ線はCS110 mm²(銅覆鋼トロリ線)で、標準張力は各電線ともに19.6kNである。その他の条件としては、気温変化量は60、電柱間距離は標準的な距離である50m、適用電線長は滑車式と同等の800m、とした。

以上の数値を、弊社の設備設計標準で定められた計算式(1)にあてはめた結果、電線伸縮量は632mmと算出された。そこで、ストロークは余裕を見て640mm(±320mm)に決定した。

$$\frac{l}{L} = \Delta \theta \alpha - \frac{T_1 - T_2}{EA} - \frac{(Mg)^2 S^2}{24} \left(\frac{1}{T_2^2} - \frac{1}{T_1^2} \right)$$

- Δθ : 温度変化量
 - A : 計算断面積
 - T₁ : 最高張力 (N) T₂ : 最低張力 (N)
 - E : 弾性係数 (N/m²)
 - α : 線膨張係数 (単位無し)
 - A : 断面積 (m²)
 - M : 単位重量 (kg/m)
 - S : 径間 (標準の50mとする)
 - g : 重力加速度 (9.80665m/s²)
 - L : 電線伸縮量 (m) l : 電線長 (m)
- (1)

3.1.2 ばね本数の検討

設計上の張力変化率を4%と5%の2通りを選び、ばね本数と各部の寸法を算出した結果を表1に示す。

表1: バルンサーの仕様検討案

	案1	案2
ばねの段数	3段	3段
張力変化率(設計値)	±5%	±4%
外径[mm]	435	435
標準長さ[mm]	2636	2984
ばね使用本数	15本	18本
質量[kg]	930	1050

張力変化率が±4%の場合は、重量が1tを超えて重くなり、ばね本数増加による摺動抵抗の増加が懸念されたので、案1を採用した。試作品の概要を図4と図5に示す。

設計値と実測値で張力変化率が異なる理由としては、次のことが挙げられる。実測時はばねバルンサーを使用時の状態に設置するが、そうすることでばねバルンサー本体の筒にばねがその自重により接してしまう。すると、そこに摺動抵抗が発生して、張力変化率は設計値よりも

悪化してしまう。

摺動抵抗と張力変化率の算出は大変困難であるので、試作品の性能検証試験により、最終的な張力変化率を決定している。



図4：試作品の概要

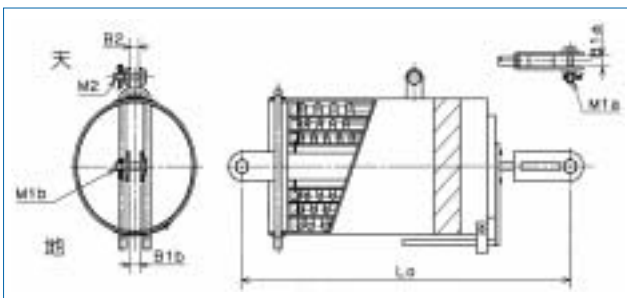


図5：試作品の概要

3.2 摺動抵抗低減の検討

基本仕様が決まったので、次に摺動抵抗の低減に向けた取り組みについて述べる。加えて、期待寿命についても述べる。

3.2.1 本体の表面処理

バルンサー本体の表面処理は通常は溶融亜鉛めっき (HDZ70) であるが、摺動抵抗低減の点から、溶融アルミめっきや溶融アルミニウムめっきを候補に挙げた。

溶融アルミめっき (HDA2: 120g/m²) は合金層が非常に固く耐摩耗性に優れていることから、摺動抵抗低減が十分期待でき、耐食性も優れているので、30年の寿命が期待できる。また、溶融アルミニウムめっきは亜鉛めっきと溶融アルミニウムめっきの中間的な特性であるが、後者と比較した場合、後者の方が摺動特性で勝っている。

なお、開発品はトンネル以外での使用を想定しているので、アルミのアルカリに対する腐食は考慮していない。

以上より、バルンサー本体の表面処理として、溶融アルミニウムめっきを採用することとした。

3.2.2 ばね表面の塗装

ばね表面の塗装について、摺動抵抗の低減に加え、耐食性と経済性についても重視して調査した。その調査結果を表2に示す。

表2：ばね塗装の種類とその比較

種類	特徴	実用例
アミノアルキド樹脂 + アルキコート	<ul style="list-style-type: none"> 一般的な塗装。実績多数 上塗りは焼き付け塗装 	従来のばねバルンサー
エポキシ系塗料A	<ul style="list-style-type: none"> 潤滑添加剤入り 熱硬化型液体 耐食性、潤滑性、耐摩耗性に優れる 	車軸トラニオンジョイント、スプリング

エポキシ系塗料Aは潤滑添加剤が配合されており、摩擦係数が大変低いという特徴がある。また耐食性の面でも、一般的なエポキシ系塗料より優れている。実用例を見ても、実績が多く、信頼性も高いことがわかる。

以上の調査より、ばね表面の塗装材はエポキシ系塗料Aに決定した。

4 工場内試験

以上の検討結果を踏まえて、新型ばねバルンサーを試作した。そして次に、試作品の性能を検証するため、工場内試験を行ったので、以下に主な試験項目とその結果について述べる。なお、試作品数量は3体である。

4.1 耐荷重試験

試作品に対し、標準張力(19.6kN)より5%増やした張力よりもさらに2.5倍の張力を3分間加えた後、試作品本体の異常の有無を確認する。試験の概要を図6に示す。

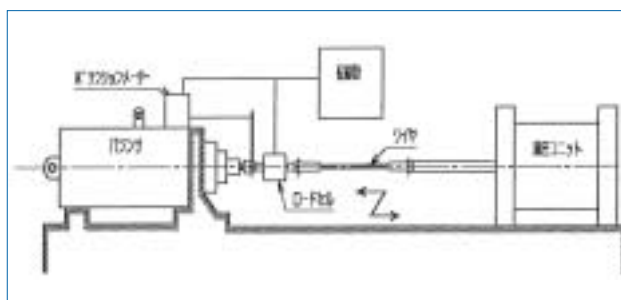


図6：耐荷重試験の概要

4.2 繰返し荷重試験

まず試作品に徐々に張力を加え、最大規定ストローク (+320mm) まで伸ばす。次に、最小規定ストローク (-320mm) まで縮めるというパターンを繰り返す。繰返し回数が10回目、20回目、30回目での最大及び最小規定ストロークにおける張力を測定する。試験の概要は図6と同様である。

4.3 クリープ試験

試作品を最大規定ストローク分に加え、さらに予備ストローク分まで最大限に引き出して30分間そのまま保持した後、前項の繰返し荷重試験を行い、ばねのへたりによる性能低下の有無を確認する。

さらに、保持期間を4週間に大幅に延長した場合におけるばねのへたりや性能低下の有無を確認する。

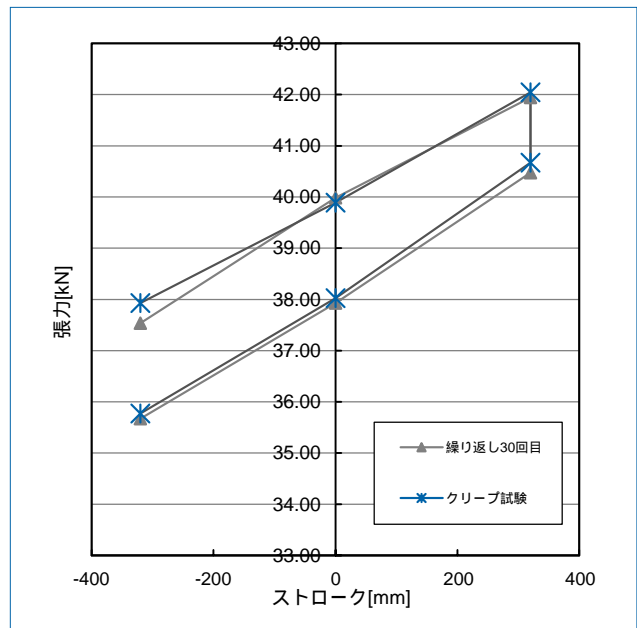


図7：ヒステリシスチャート

張力変化率は20回目で17.25%にまで上昇したが、引き続き、繰返し荷重試験を続けたところ、30回目では16%にまで低減するという結果になった。繰返し荷重試験の回数を重ねていくと張力変化率が徐々に低下し、概ね16%程度になると安定するという傾向が見られた。

5 試験の結果

5.1 耐荷重試験

耐荷重試験の結果を表3に示す。表3より、3体の試作品全てについて、耐荷重試験後に異常はない、という良好な結果になった。

表3：耐荷重試験結果

試作品	試験荷重 - 3分間[kN]	試験結果
1	102.90	異常なし
2		異常なし
3		異常なし

5.2 繰返し荷重試験

試作品番号3番の繰返し荷重試験の結果を表4に、その張力変化を表したグラフを図7に示す。

表4：繰返し荷重試験の結果

試験項目	ストローク mm	往行		復行		往復 %
		kN	%	kN	%	
10回目	-320	37.73	-3.75	35.67	-9.00	16.50
	0	39.98	2.00	38.02	-3.00	
	320	42.14	7.50	40.77	4.00	
20回目	-320	37.53	-4.25	35.28	-10.00	17.25
	0	39.98	2.00	37.73	-3.75	
	320	42.04	7.25	40.47	3.25	
30回目	-320	37.53	-4.25	35.67	-9.00	16.00
	0	39.98	2.00	37.93	-3.25	
	320	41.94	7.00	40.47	3.25	

5.3 クリープ試験

保持時間30分間のクリープ試験の結果を表5に、張力の変化を表したグラフを前述の図7の中に示す。張力変化率は、最大でも±16%程度であり、3つのどの試作品においても良好な結果であった。

保持期間40日間のクリープ試験については、クリープ試験終了後に荷重試験を実施したが、ばねのへたりもなく、3つのどの試作品においても性能の低下は認められず、良好な結果であった。

表5：クリープ後の荷重試験結果

No.	ストローク mm	往行		復行		往復 %
		kN	%	kN	%	
1	-320	37.24	-5.00	35.38	-9.75	16.00
	0	40.08	2.25	37.73	-3.75	
	320	41.65	6.25	40.47	3.25	
2	-320	37.53	-4.25	35.87	-8.50	15.75
	0	39.79	1.50	38.12	-2.75	
	320	42.04	7.25	40.67	3.75	
3	-320	37.93	-3.25	35.77	-8.75	16.00
	0	39.89	1.75	38.02	-3.00	
	320	42.04	7.25	40.67	3.75	

6 工場内試験の考察

6.1 耐荷重試験

試験結果には異常が見つからなかった。従って、試作品は通常使用時においては、想定し得る環境条件に対して、十分に耐えられることがわかった。

6.2 繰り返し荷重試験

まずここで、表6に繰り返し荷重試験の回数と摺動抵抗の低減量の関係を示す。

表6：繰り返し荷重試験の回数と摺動抵抗の低減量

繰り返し回数	試作品1	試作品2	試作品3
1回目	17.25%	16.75%	17.50%
30回目	16.0%	15.75%	16.0%
摺動抵抗低減量 %	-1.25%	-1.00%	-1.50%

表6より、繰り返し回数1回目では試作品間の摺動抵抗の差が最大で0.75%であったが、繰り返し回数30回目では最大でも0.25%であり、大幅に小さくなっていることがわかる。表6には記していないが、各試作品の摺動抵抗は繰り返し回数20~30回目ではほぼ一定に落ち着いてきていた。概して、繰り返し回数1回目より30回目の方が摺動抵抗は小さくなっており、その幅も30回後で1.0%~1.5%の低減量であった。

3体の試作品で張力変化率が15.75%~16%となっていることを考えると、張力変化率 $\pm 9\%$ 未満、という性能での実用化は可能であると考えられるが、 $\pm 8\%$ の目標をクリアすることは困難であると思われる。

よって、目標達成に向けて、さらなる改良を進めたので、第7項に詳細を記す。

6.3 クリープ試験

保持時間30分間のクリープ試験後と繰り返し荷重試験30回後の張力値を比較しても、最大及び最小荷重値共に値が低下しておらず、さらに保持期間40日間のクリープ試験後でも性能低下が見られなかったことから、この条件ではばねのヘタリはなく、試作品は期待する性能を維持しているものと考えられる。

7 改良の概要

前項で述べたとおり、摺動抵抗低減に向けた取り組みが若干不十分であったので、目標達成に向けて、新たに下記のような改良案を考えた。

改良案

ばね表面に塗布するグリース材を、さらに潤滑性に優れたものに変更する。

改良案

内筒のフランジ外周に溝を彫り、常に適正なグリース量となるようにする。

改良案

フランジ表面の材質を変更する。

ここで、ばねバランサーにおけるフランジはどのようなものであるのかを図8に示す。フランジとは、内筒の端部において直近の内筒と接しており、ばねが存在する空間を確保し、ばねが伸縮する際に筒同士がスムーズに動けるようにするためのものである。

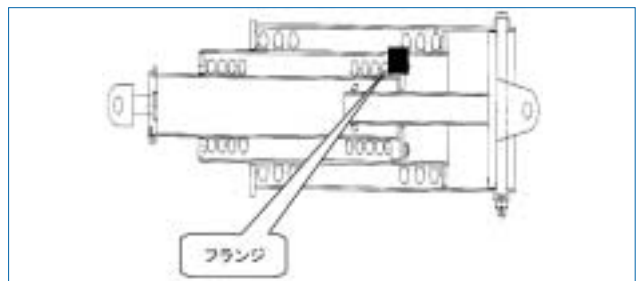


図8：ばねバランサーのフランジ

7.1 グリースの検討（改良案）

新たなグリースとして、衝撃・高荷重用グリースを選んだ。試作品の外筒は435と大きく、外筒とその内側のフランジの接触面積が大きいことから、グリースの粘性抵抗が発生していると考えられる。

従って、粘度が小さく流動しやすいグリースを選定し、摺動抵抗低減を目指した。また、粘度が下がるとグリースが摺動面から逃げてしまうので、高い面圧力下でも逃げにくい性質を持つ極圧グリースとした。

7.2 グリース溝の検討（改良案）

前項と同じ理由から、グリースの流動性を高める必要性が高いと考え、グリースが逃げるための溝をフランジに設けた。図9に溝付きフランジの概要を示す。

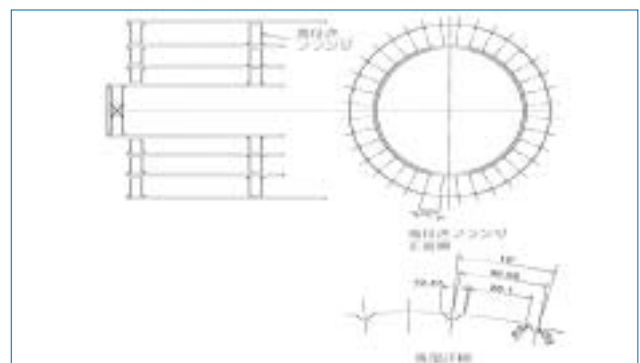


図9：溝付きフランジの概要

7.3 フランジ材質の検討（改良案）

フランジ、パイプ共に溶融アルミめっきを使用しており、同質材料同士の摺動となっている。一般的に同質材料同士では摺動抵抗が高くなると言われている。従って、フランジ材質の変更により、摺動抵抗低減を図った。材料は硬いもの（SUS）と柔らかいもの（FBシリーズ材料。主成分はPTFE、Al₂O₃、Zn）を選定した。FBは表面形状がアルミめっきとほぼ類似しているが、高い面圧にも耐えらると思われたので、選定した。

8 工場内試験と結果

改良を施した試作品に対して、繰り返し荷重試験を実施した。

8.1 グリース変更の試験結果

グリース変更後の繰り返し荷重試験（10回～30回）の結果を表7に示す。繰り返し荷重試験30回後の張力変化率は18.25%であり、悪化していた。

表7：グリース変更の試験結果

試験項目	ストローク mm	往行		復行		往復 %
		kN	%	kN	%	
繰り返し 作動試験 10回目	-320	37.24	-5.00	34.79	-11.25	19.50
	0	39.89	1.75	37.34	-4.75	
	320	42.43	8.25	40.38	3.00	
繰り返し 作動試験 20回目	-320	37.24	-5.00	34.59	-11.75	19.00
	0	39.59	1.00	37.14	-5.25	
	320	42.04	7.25	40.18	2.50	
繰り返し 作動試験 30回目	-320	37.34	-4.75	35.18	-10.25	18.25
	0	40.18	2.50	37.24	-5.00	
	320	42.34	8.00	40.38	3.00	

8.2 フランジ形状変更の試験結果

繰り返し荷重試験では、張力変化率は前述のグリース変更時よりもさらに悪化する結果となった。

8.3 フランジ材質変更の試験結果

繰り返し回数が増えるほど、張力変化率は悪化する結果となった。

9 改良案に対する考察

9.1 グリース変更について

グリース変更の試験結果では、張力変化率は30回後でも18.25%となって悪化している。これは、グリース粘度

を下げたことにより、グリースがバルンサー筒本体表面の荒れた肌に食い込んでしまい、グリースの機能が発揮されていないためであると考えられる。

従って、グリースについては粘度が高いもの（現状のグリース相当）が適当であると考えられる。

9.2 フランジ形状変更について

フランジ形状変更の試験では、フランジに溝を掘ってグリースの流れをスムーズにするつもりであったが、結果的に接触面圧を上げてしまい、グリース変更のみの場合よりも、張力変化率が悪化してしまった。

従って、フランジ形状変更については、溝掘り加工は効果がないことがわかった。また、フランジ形状については面圧を下げる物が良いと考える。

9.3 フランジ材質変更について

フランジ材質をSUSとした場合、張力変化率は繰り返し荷重試験回数が多くなるほど悪化していた。この理由として、フランジがパイプ内面の突起により、かじってしまっていることが原因であると考えられる。

FBの場合、張力変化率は約16%と、他と比べて良い結果を出している。また、ストロークと張力との関係を示した折れ線グラフが滑らかであることから、現在のフランジ形状（溝無しフランジ）がFBの摺動特性を生かしていると考えられる。

従って、形状をいろいろと変更しても、これ以上の良い結果を得るのは難しいと考えられ、形状は特に変更しなくても良いことがわかった。HDA 2（溶融アルミめっき）での通常のフランジ形状における張力変化率も約16%となっていることから、FBはほぼ同等の性能であると考えられる。

10 電車への電力供給（集電性能）へ与える影響有無の調査

以上の試験結果より、張力変化率±9%は達成できたが、目標の±8%は達成できなかった。そこで、実用化時を想定して実際の設備に取り付けた場合、この1%の差が電車への電力供給（一般的には集電性能と言う）にどのような影響を及ぼすのかを調査した。

10.1 集電性能の評価指標¹⁾

架線の張力が変化した場合の集電性能の評価指標としては、一般的に以下の3つが挙げられる。

波動伝播速度と離線率

波動伝播速度とは、電車走行時にパンタグラフが引き起こす、架線を伝わる波の速さのことである。波動伝播速度はトロリ線の張力が高いほど、もしくはトロリ線の単位重量が軽いほど、速くなる。この波動伝播速度が高いほど、高速走行に適している。

また、電車が走行中にトロリ線とパンタグラフが離れていて、正常な集電（電力供給）がなされていない時間の、全走行時間における割合を離線率と言う。離線率を低く抑えるためには、列車の走行速度は波動伝播速度の70%以下が望ましいとされている。

多数パンタグラフ編成電車における架線共振

パンタグラフが1編成に複数個ある電車の場合、架線共振度合いは波動伝播速度の変化量に比例する。

トロリ線高さの変動

張力の変化によってトロリ線の高さも変動し、今までは水平であったトロリ線に、微小な凹凸が発生することで離線率が増大し、集電性能に影響を及ぼすことがある。

10.2 設備条件

対象とする架線設備は、「3.1.1ストロークの検討」でも述べたとおり、新幹線CSトロリ線シンプルカタナリとし、以下の条件で計算した。

- ・トロリ線はCS110mm²、ちょう架線はPH150 mm²、張力は各19.6kN
- ・走行速度は現行最高速度の275km/h
- ・電柱間隔は標準的な50m
- ・張力変化率は、±8%と±9%の2ケース

10.3 計算結果

設備条件を基にして、張力変化率と波動伝播速度を計算した結果を表8に示す。

表8：張力変化率と波動伝播速度

張力変化率	- 9 %	- 8 %	± 0 %	+ 8 %	+ 9 %
張力[kN]	17.8	18.0	19.6	21.2	21.4
波動伝播速度 [km/h]	497.1	499.8	521.1	541.6	544.1
70%の値 [km/h]	348.0	349.9	364.8	379.1	380.8

10.4 考察

波動伝播速度と離線率

張力が低く、波動伝播速度も低い領域の方が集電性能上で不利なので、その領域で比較検討した。

その結果、張力変化率が-8%と-9%の波動伝播速度の差は2.7km/hであり、70%を乗じた値でもその差は1.9km/hと僅かであるので、離線率にも大きな変化は無いと考えられる。

従って、集電性能には影響を与えないと考えられる。

多数パンタグラフ車における架線共振

張力変化率がマイナスの領域である方が、波動伝播速度の変化率が大きいので、-8%が-9%になった時を比較検討した。

その結果、0.9946倍の変化量であり、ほぼ1倍であるため、架線共振に与える影響はないと考えられる。

トロリ線高さ

張力が低く、架線が弛むことで集電性能が悪化する領域で比較した。その結果、張力が変化した場合のトロリ線高さは1~2mm下がる程度であった。

従って、トロリ線高さの変化による集電性能への影響は無いことがわかった。

10.5 集電性能確認のまとめ

以上より、張力変化率が±8%から±9%になっても、集電性能に与える影響は無いと考えられる。

11 おわりに

今回の研究開発では、結果的に当初の目標を達成できなかったが、従来型のばねバルンサーと比較すると、張力変化率を±15%から±9%へと大幅に低減させることができた。さらに、シミュレーションにより集電性能への影響有無を調査したところ、特に影響ないことがわかった。結論として、新型ばねバルンサーは新幹線設備への適用が可能であることがわかった。

そして、この新型バルンサーは新幹線用として実用化され、先般開業した東北新幹線盛岡~八戸間で採用されるに至っている。

今後もテクニカルセンターでは、メンテナンス作業とメンテナンスコストの低減を目指して、引き続き研究開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 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年5月