

新幹線の高速化に向けた 架線設備の最適化



池田 国夫*

新幹線の営業速度の向上に向けては車両の開発のみならず、電車に電気を供給する架線設備についても同様に開発を進めていく必要がある。当所では、FASTECH360試験を始めるに当たり、既設のコンパウンド架線に替わる架線（以下、iコンパウンド架線 [improved compound catenary] と記す）を導入した。

しかし、試験の速度を上げるに従って、架線の高さの変化やパンタグラフの配置方などに起因する、現状の営業速度では問題とならなかった種々の課題が明らかとなった。このため、シミュレーションや現車試験を通じ、これらの課題の克服に取り組んだ結果、360km/h域でも安定した集電を提供できる目途を得られたので、ここに紹介する。

●キーワード：速度向上、電車線、集電性能

1. はじめに

新幹線の標準とされるヘビーコンパウンド架線は、240km/h程での走行が限度とされ、360km/h域での走行試験を進めていくには、相応な改良や開発を施す必要がある。FASTECH360を用いた試験の計画から開始迄に1年しかなく、工期の短縮も踏まえ、架線系の開発に取り組んだ。

2. 高速化に適した架線系

高速化に向けては、良く知られているように (1) 式で表される架線の波動伝播速度 c を向上させることが有効であり、そのため、トロリ線の高張力・軽量化で対処してきた。

$$c = (T/\rho)^{1/2} \times 3.6 \text{ [km/h]} \dots (1)$$

但し、 T ：架線張力 [N]、 ρ ：架線単位長重量 [kg/m]

表1及び図1に当社の新幹線で実際に使用しているコンパウンド架線の例を示す。

表1 新幹線用架線の例

| | 吊架線 | 補助吊架線 | トロリ線 | 走行速度 |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------|
| 張力upヘビーコンパウンド架線 | St180□ 24.5kN | Cu150□ 11.8kN | Cu170□ 17.6kN | 275km/h |
| CSヘビーコンパウンド架線 | St240□ 24.5kN | Cu150□ 9.8kN | CS110□ 19.6kN | 365km/h |

CS：Copper clad Steel contact wire

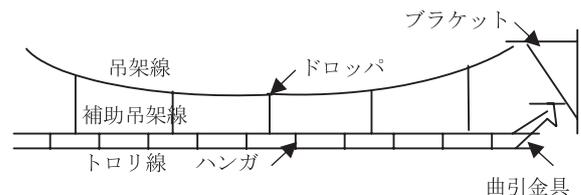


図1 ヘビーコンパウンド架線

表1で「張力upヘビーコンパウンド架線」は、東北新幹線を275km/hに速度向上した際に改良した架線であり、「CSヘビーコンパウンド架線」とは、15年程前に上越新幹線で試験電車「STAR21」を用いて425km/hまでの速度向上を果たした試験の際に改良した架線である。

今回の高速試験でも、CS架線相当の性能が要求される。しかし、改良が必要な区間が仙台～北上間の約60km（60ドラム）にも及び、1年では間に合わないことが危惧された。

3. 架線改良における課題

3.1 集電性能上の課題

FASTECH360試験の基礎データを得るために、2003年に営業車両で行った走行試験にて、360km/hで1,000 μ stを超える著大なトロリ線ひずみ（応力）が観測された。

この要因として、試験車両のパンタグラフ間隔が50mと短いこと、パンタグラフ舟体を一本化したこと、曲線引金具の重量が重いこと等が複合して作用したと考えられた。その中で、補助吊架線張力が低く十分な伝播速度

を確保できていないため、波動の伝播障害を起こしていることも一因と考えられた。

3.2 施工上の課題

STAR21の走行試験を行う際に行ったCS架線の架線改良手法を例にとれば1ドラムの改良に3日掛かっており(表4参照)、今回も同工法によると半年以上要することは明らかで、更に、他の保守作業との競合なども考えると、工期の大幅な短縮が必須であった。

4. 集電性能に優れ改良容易な架線の開発

張力upヘビーコンパウンド架線を360km/h走行可能へとするに当たり、集電性能を向上させつつ、工事を効率的に進めるための要件として、以下の目標を設定した。

- ① トロリ線波動伝播速度を500km/h^{*1}程度とすること
- ② 支持物の改修を省くため、架線の総張力は変更しないこと
- ③ 工期を2/3に短縮すること

^{*1}: 列車速度 ≤ 波動伝播速度 × 0.7~0.8が望ましい

①を満たすため、トロリ線は170mm²から110mm²へと細径(軽量)化し、張力は17.6kNから19.6kNへと上げた。

②について、架線総張力53.9kNを維持するには、吊架線と補助吊架線の合計張力を下げねばならない。CS架線では、吊架線張力はそのままだに補助吊架線張力を下げることとしたが、補助吊架線の伝播速度不足を誘発する。

また、トロリ線が軽くなるにも関わらず吊架線の張力を保持したため、トロリ線高さを保つために全てのドロップの交換が必要となり、施工に多くの手間を要してしまっていた。

そこで、トロリ線軽量化に見合う分だけ吊架線張力を落とし、ドロップ交換を不要とする手法を試みた。併せて、この低減分を補助吊架線に充当し、伝播速度を試験速度(360km/h)並みに向上させ、集電性能の向上をも図った。

(2) 式にカタナリ曲線の弛みDの算式を示す(図2参照)。

$$D = x \cdot (S - X) \cdot \rho / 2T \dots (2)$$

但し、S: 径間長、T及びρ: (1) 式と同じ

トロリ線の110mm²化により架線系単位長重量が4.33kgから3.83kgとなるため、(2) 式から、吊架線張力は

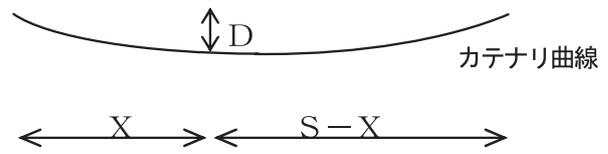


図2 架線の弛み

21.6kN程度とするのが望ましい。

表2に今回の試験用のi-コンパウンド架線の仕様を示す。

表2 i-コンパウンド架線の仕様

| | 吊架線 | 補助吊架線 | トロリ線 | 走行速度 |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|
| i-コンパウンド架線 | St180 [□] 21.6kN | Cu150 [□] 12.7kN | Cu110 [□] 19.6kN | 360km/h |

5. 改良架線の施工性及び集電性能の検証

5.1 施工性

まず、張力upヘビーコンパウンド架線(施工前)とi-コンパウンド架線(施工後)のドロップ長を検証した。径間長50m場合での比較を表3に示す。

表3 ドロップ長の比較

| | 第1 | 第2 | 第3 | 第4 | 第5 |
|-----|----------|-------|-------|-------|----------|
| 施工前 | 1, 118mm | 856mm | 768mm | 856mm | 1, 118mm |
| 施工後 | 1, 119mm | 856mm | 768mm | 856mm | 1, 119mm |

他の径間長でもその差は数mm以内に収まる。従って、ドロップ交換が不要となることから、施工方法を表4に示す様に「CSコンパウンド架線」に比べ大幅に簡略化することができた。

表4 架線改良工程の比較

| | CSコンパウンド架線 | i-コンパウンド架線 |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|
| 1日目 | | ①1,2号ヨーク取替 |
| | | ②新トロリ線延線(110 [□]) |
| | ①曲引金具取替 | ③プレストレッチ |
| 2日目 | ②新ドロップ取付 | ④ハカ、曲引等取付替 |
| | ①1号ヨーク取替 | ⑤旧トロリ線巻取(170 [□]) |
| | ②新トロリ線延線(110 [□]) | ⑥オーバーラップ調整 |
| 3日目 | ③プレストレッチ | |
| | ④ハカ、曲引等取付替 | ①曲引金具取替 |
| | ⑤旧ドロップ切断撤去 | |
| 4日目 | ⑥旧トロリ線巻取(170 [□]) | |
| | ⑦オーバーラップ調整 | ②架線調整 |
| | ⑧可動ブケット線上下 | |
| 5日目 | ⑨ドロップクリップ取外 | |
| | ⑩架線調整 | |

上表の様に、概ね3日要していた張替が2日で可能となった。なお、吊架線張力の変更(引留ヨークの取替)に

は、パートナー会社が特別の治具を提案し、施工時間の短縮を図っている。

張替前後の様子を電気軌道総合試験車のデータで比較したところ、張替後に殆ど調整を行わずとも、架線高さ・偏位など張替前の状況を良く再現することが確認されている。

5.2 集電性能

工期の短縮に加え、補助吊架線の張力上昇によってトロリ線応力の低減を目指しているが、その効果をシミュレーションにより検証した。図3~4にその結果の一部を示す。

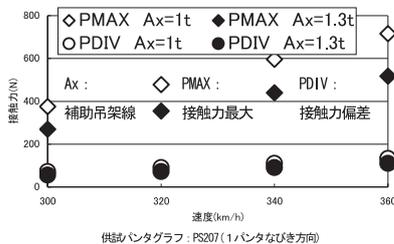


図3 接触力のシミュレーション結果

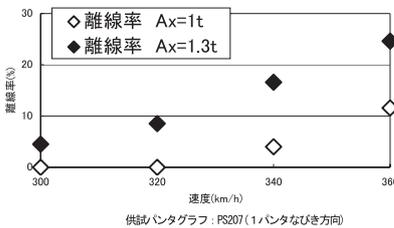


図4 離線率のシミュレーション結果

シミュレーションでは、図3の接触力と同様に、トロリ線押上量も最大70mmから35mm程へと大幅に小さくなり、トロリ線への疲労被害（応力）も軽減可能と思われる。

一方、図4のように離線率は増加するものの、許容範囲の30%以下には収まる。なお、離線は稼働部質量を低減した「多分割すり板」の採用で大幅に減することが確認されており、実際には数%程度へ低減可能と期待できる。

6. 安定した集電を阻害するものは？

6.1 架線高さの変化

試験開始後、危惧された離線も含め、集電状況は良好に推移していたが、速度の向上に伴って、図6に示すように、ある特定の区間（ドラム）にて離線が急増する事象

が発生した。本試験では、従来困難とされてきた1パンタグラフでの走行に挑んでおり、離線の低減は克服せねばならない命題である。

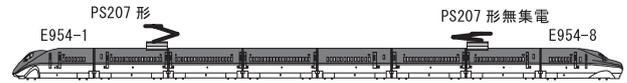


図5 速度向上試験時の列車編成

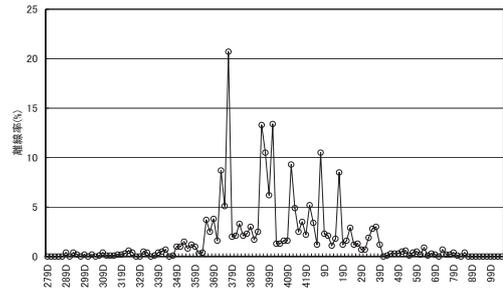


図6 360km/h域での離線率測定結果

離線の大きな特定区間の特徴として、支持点間周期での大きな離線が見受けられた。そこで、支持点間内の架線の高さ変化によるものではと注目し、ドラム^{※2}毎の架線高さの変化と離線率とで対比を行った（図7参照）。

※2：架線の引留から引留までを1単位とし、ドラムと言う

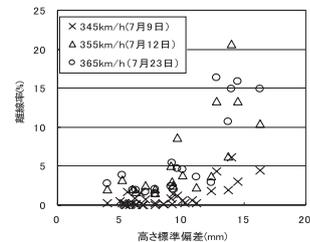


図7 トロリ線高さの標準偏差と離線率の関係

そこで、検測車のトロリ線高さチャートで確認すると、偏差はプレサグに起因することが分かった（図8参照）。



図8 検測車のトロリ線高さチャートの抜粋

シミュレーションによっても、360km/h域に達すると、30mm程のプレサグによって、離線が急増することが確認されたので、急遽、プレサグ^{※3}を解消する工事を行った。

一方、パンタグラフを載せ替えたところ^{※4}離線状況は大

※3：パンタグラフによる押上を見込んで架線にたるみを設けておくこと

※4：主枠をシングルアームとし、すり板に多分割形を用いて追随性を向上させた低騒音パンタグラフへと載替

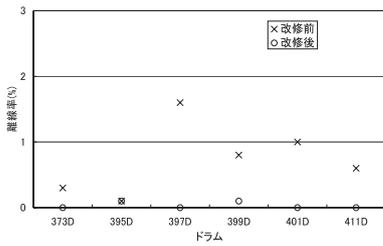


図9 プレサグ解消前後の離線率測定結果

幅に改善されたが、更に、図9に示すように、プレサグ解消工事後は離線率がほぼ零となり、その効果が確認できた。

プレサグは、本来、集電性能を向上するものとして導入されて来たが、300km/hを超える高速域では、架線高さは極力一定に保つ方が、より望ましいことがわかった。

6.2 パンタグラフ間隔と力学特性

当社で最高速を提供している営業車では、新幹線専用車と新在直通車を併結していることから、同様に2つの編成を併結して試験を行った。

編成の略図を図10に示す。パンタグラフには先に述べた低騒音形を使用している。

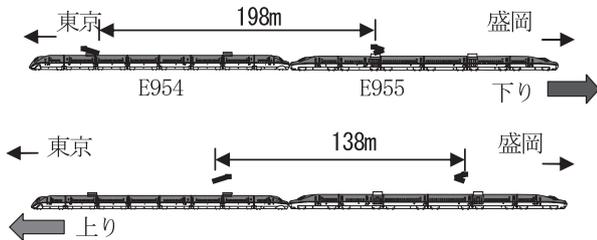


図10 試験車の編成略図

この編成で試験を行ったところ、離線の状況に興味深い結果が得られた。

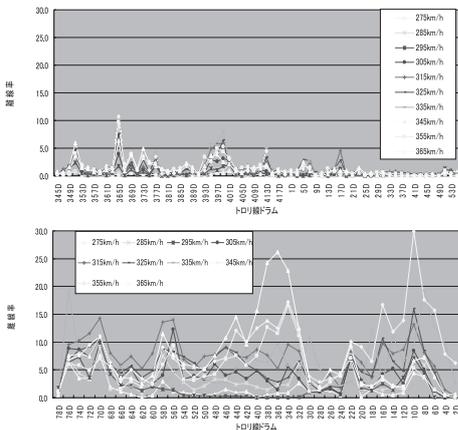


図11 離線率測定結果 (上：下り走行、段：上り走行)

図11から、下り線の360km/h域では、一部でオーバーラップ構成の不具合等から離線率が良好とされる10%を超過したものの、概ね、数%以下で、離線時間も数十ms以下と良好であった。一方、上り走行時は、離線時間は100ms以下ではあるものの、離線率は止むを得ない状況とされる30%に肉薄してしまった。

この下りと上り走行で離線の状況が大幅に異なる要因として、パンタグラフの間隔の違いによるものではと着目し、その改善に向けて検証を進めた。

シミュレーションを行ったところ、図12に示すように138mなるパンタグラフ間隔では、後続パンタグラフはトロリ線に対して微かな接触状態にあり、275km/hを超えると離線しやすい状況にあると分かった。

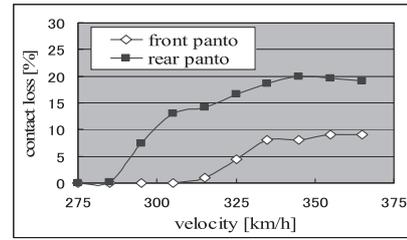


図12 138m間隔での離線率シミュレーション結果

そこで、集電パンタグラフを図13のように変更し、パンタグラフ間隔が及ぼす影響を評価する試験を行った。

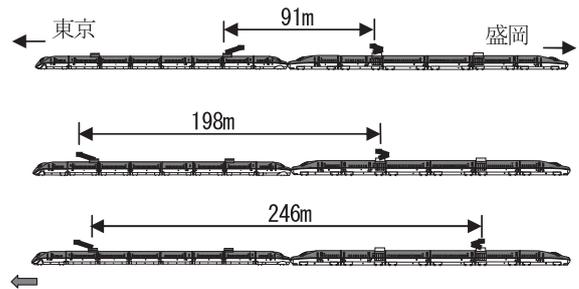


図13 集電パンタグラフ変更による間隔の違い

- ・7号車panto—15号車panto：138m (上り線通常間隔)
- ・7号車panto—12号車panto：91m (最短間隔)
- ・2号車panto—12号車panto：198m (下り線通常間隔)
- ・2号車panto—15号車panto：246m (最長間隔)

それぞれの間隔での離線率は図14の通りである。なお、走行速度は275km/hで、後続パンタグラフでの結果を提示している。

集電状況が良好であった順に並べると、

$$91m \geq 198m > 246m > 138m$$

となる。

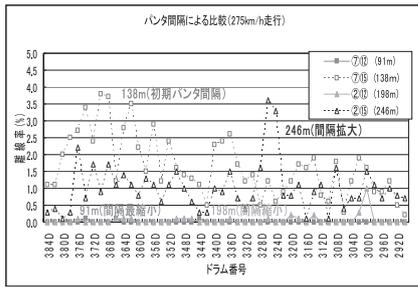


図14 パンタグラフ間隔の違いによる離線率の変化

波の伝播や反射等との関係もあり、必ずしもパンタグラフ間隔を広げれば良い訳ではないことが分かる。

更に、それぞれのパターンでのパンタグラフの特性に着目すると、後パンタグラフは、91mと198mは反なびき^{※5}方向であるのに対し、246mと138mはなびき方向での使用となっている。すなわち、パンタグラフ間隔のみならず、パンタグラフの向きによる空力特性の違いなどパンタグラフの特性が大きく寄与することが推測できる。

※5：進行方向←に対し、>となる向き

なびき方向では、十分な揚力を得ることができずトロッポ線への押付力不足から、離線が多発していると懸念されることから、後続パンタグラフの静押上力を上昇し、試験を行うこととした。

54Nから74Nへと上昇させると図15のシミュレーション結果から分かるように、138mでも概ね、良好とされる10%程度まで改善可能と期待できた。

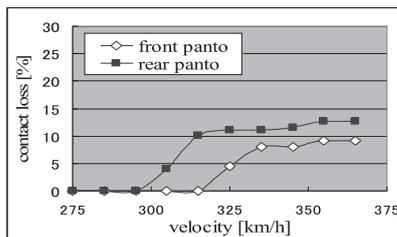


図15 静押上力を上昇した場合のシミュレーション結果

図16は、こうした状況下での離線率の結果である。

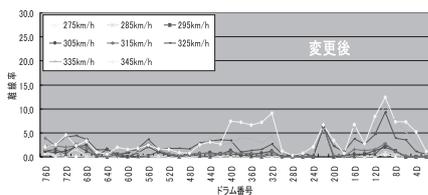


図16 静押上力上昇による離線率の改善効果

シミュレーション結果と同様に、離線率は概ね、10%以下に低減することができ、図11と比較すると、大きな

改善効果が確認できた。

7. 高速用シンプル架線の高速適性は？

ここまで、コンパウンド架線下での試験について紹介してきたが、ここからは、整備新幹線区間に採用されているシンプル架線下での試験を紹介していく。

シンプル架線はコンパウンド架線に比べ、径間内でのばね定数（パンタグラフの押上力と架線のあがり量との比）の変化が大きい。更に、パンタグラフ通過後に大きな残留振動を有するなど固有の構造的な特性から、集電状況の悪化が懸念される。

ばね定数を均一化し、残留振動を低減させるには、減衰機能を有するばねハンガ（以下、ダンパハンガと記す）の挿入が有効と成り得る。

図17は、50m径間での計算例を示したものであるが、支持点に近傍のハンガ（支持点～2.5m、7.5m地点）での値が著しく大きくなっており、ここにダンパハンガを挿入することによって、径間内ではばね定数をほぼ均一化できることが分かる。

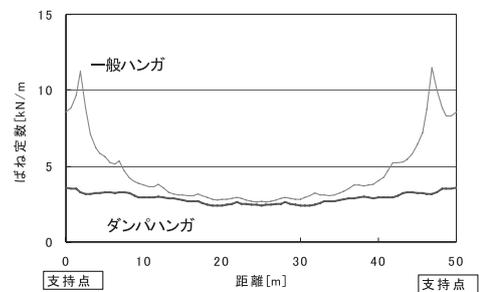


図17 径間内でのばね定数の分布(整備新幹線用シンプル架線での一例)

そこで、岩手一戸トンネル～二戸駅間の一部にダンパハンガを導入し、その効果の確認を行った。

トロッポ線押上量、ひずみの結果の一例をそれぞれ図18、図19に示す。

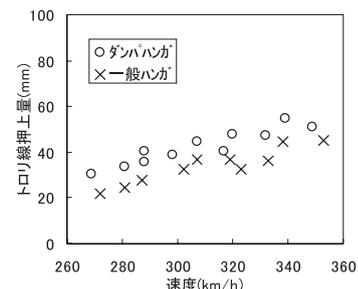


図18 トロッポ線押上量 (明かり区間)

トロリ線押上量は、図17からも明らかな様に支持点でのばね定数が小さくなるダンパハンガ有の方が大きな値を示しているものの、いずれも、目安値100mm内には収まっている。

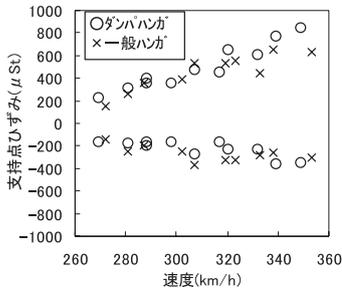


図19 トロリ線ひずみ (明かり区間)

一方、ひずみについては、ダンパハンガの有無で明確な差異は見受けられなかった。一般的には、押上が大きいとそれに起因する曲げ応力(ひずみ)は大きくなるが、ここではばねの弾性効果が働いているものと考えられる。

但し、ここで注意しなければならないのは、300km/hを超えると、目安となる500μひずみを超えてしまうことである。

この対策には、コンパウンド区間に導入したと同等な軽量型曲引金具への取替や、疲労特性に優れたPHCトロリ線 (Precipitation-Hardened Copper Alloy Trolley Wire: 析出強化型銅合金トロリ線) への張替などが有効となる。

次に、離線率の結果を図20に示す。

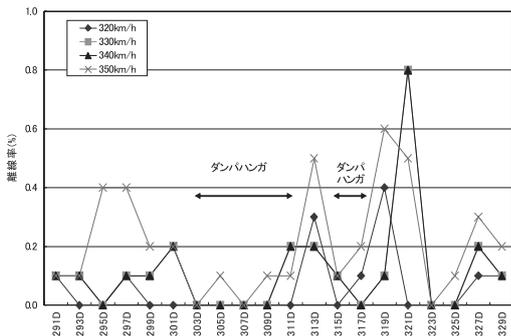


図20 離線率

離線に関しては、ダンパの有無に関わらず、数%以下と良好であった。

8. メンテナンスの今後

最後になるが、今後のメンテナンスの動向について少々触れてみたい。

8.1 トロリ線の張替周期

FASTECH360での試験の結果から、営業速度320km/hを実現するために、トロリ線は170mm²を継続使用し、張力を17.6kNから19.6kNへと上げて対処していくこととなる。このため、許容される摩耗量が少なくなってしまう、短命化が危惧される。

一方、トロリ線と摺動するパンタグラフ数が少なくなる(1編成1パンタグラフとなることから、「はやて・こまち」を例に取れば4個→2個へと半減)ことから摺動機会が減少することにより、延命化も期待できる。

当面は、その相反する関係の効果が注目される。

8.2 新たな設備診断手法

近年、光センサ技術の進展などから、高電圧の加圧部での測定も容易となり、パンタグラフと架線との接触力を測定する技術が、多分割すり板でさえも確立されてきている。

接触力の把握が可能となれば、

- ・定点でしかできていなかったトロリ線に発生する応力の測定が連続的に可能となること
 - ・夜間やトンネル内でしかできていなかった離線の測定が昼間でも可能となること
 - ・オーバーラップ構成の不具合など設備不整の把握が可能となること
 - ・トロリ線摩耗の進捗予想が可能となること
- など、新たな設備診断の実現が期待できる。

9. 終わりに

2005年から3年近くに亘って走行試験が繰り返されてきた。この結果が、迎え来る320km/hへと営業速度を向上していくのに反映され、今、まさに設備の改良が進められている。これまで、試験の実施に伴いご協力頂いた、仙台、盛岡、秋田各支社の電力課、電力技術センターを始めとする関係の方々には御礼を申し上げます。

一連の試験を通じ、既に360km/h域でも安定した集電を達成する目途を得ることができた。本稿は、その時に向けて、後世へと貴重なデータを伝えるべく紹介するものである。