

3412 オーバーラップ区間におけるトロリ線の反射波低減効果

正[電] ○早坂高雅 (鉄道総研) 正[電]島田健夫三 (鉄道総研)

Reduction of Reflective Wave Propagating on Contact Wire in Overlap Section

Takamasa HAYASAKA Takehumi SHIMADA

Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho Kokubunji-shi, Tokyo

Abstract

We investigated a damper condition for reducing reflective waves at a hard point in overlap sections, and the damper condition was inspected by the catenary-pantograph simulation program. In this report, the theoretical investigation and simulated results for reduction of reflective waves in the overlap sections are described.

Keyword: overlap section, reflective wave, damper, simulation

1. はじめに

パンタグラフと電車線による集電方式は、電車への電力供給の手段として一般的に用いられている。例えばシンプル系の電車線の構造では、ちょう架線が、ほぼ等間隔で設置されている支持点によって支持され、そのちょう架線は約5[m]間隔で設置されているハンガによってトロリ線を吊っている。このような架線の構造上、径間周期及びハンガ周期でトロリ線の剛性変化が生じ、集電時には、この剛性変化を励起源としたトロリ線やパンタグラフの振動が生じる¹⁾²⁾。特に架線振動は、トロリ線やちょう架線上を伝播した後、架線の硬点で反射し、再びパンタグラフへと戻ってくるため、集電性能の悪化が懸念され、さらに敷設架線に数多く存在するオーバーラップ区間では、架線の端部が引留めに固定されているため、架線振動の反射が顕著になることがある³⁾⁴⁾。

オーバーラップ区間にパンタグラフが接近すると、パンタグラフは引留めからの反射波の影響を受け始め、さらにトロリ線を乗り移る際には、トロリ線へ衝撃を与えるため、大きな架線振動を引き起こす。また、その振動は引留めからの反射波の影響により残留振動となって、後続パンタグラフへの集電性能に大きな影響を与える。この架線振動を低減させるための方法として、前述の剛性変化に着目したばねハンガやダンパハンガが考案された⁵⁾。しかしながら、これらは硬点からの反射波に着目したダンパ定数の設定及びその設置箇所の検討は行われていない。

そこで、筆者らはオーバーラップ区間にダンパを設置した場合の反射波低減方法を考え、そのダンパ定数および設置箇所を計算から導き出し、さらにこの方法を用いた場合の集電性能に与える影響を架線・パンタグラフ系シミュレーションプログラム⁶⁾により検証することとした。

2. オーバーラップ区間での集電性能

架線上には、ハンガなど硬点となる箇所が数多く存在するが、特にオーバーラップにおける架線の引留めは、その端部が固定端となっているため、架線上の硬点として代表的な箇所である。ここでは、パンタグラフと架線の引留めが接近するために、硬点からの反射波の影響が顕著になると考えられる。

図1に示すようにオーバーラップ区間を通過するパンタグラフは、A線からB線へ乗り移る際に、B線に衝突するように移行するため、この時発生した波動は引留めで反射し、加振源であるパンタグラフに戻ってくる。この反射波は、加振源となったパンタグラフに直接的な影響を及ぼすだけでなく、その反射波による残留振動が、後続のパンタグラフにも影響を及ぼすと考えられる。

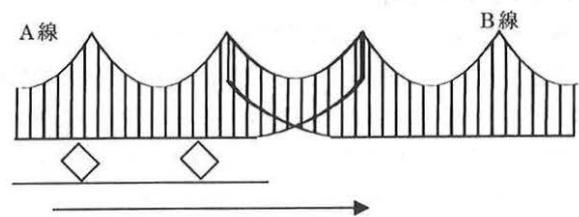


Fig. 1 Pantographs passing through the overlap section

3. 架線とダンパのモデル化

オーバーラップ区間の引留めからの反射波を低減させ、その集電性能をシミュレーションするためには、まず反射波を低減させる方法とそれらのモデル化が必要である。そこで反射波を低減させる方法として、図2のようにオーバーラップの引留め付近で、ダンパの一方をトロリ線に接続し、もう一方は固定されるようにダンパを設

置するものとしてモデル化を行った。モデル化の前提条件として、ちょう架線とトリ線の方を合わせて、一本の弦と見なすことが出来るとすると、図3のようなモデルとなる。図3は引留めから L [m]の位置にダンパ定数 μ [Ns/m]の両向きダンパを取り付けたものであり、図2のちょう架線とトリ線の張力を T_M [N]、 T_T [N]、ちょう架線とトリ線の線密度を ρ_M [kg/m]、 ρ_T [kg/m]とすると、図3の一本の弦の張力 T [N]や線密度 ρ [kg/m]は

$$T = T_M + T_T$$

$$\rho = \rho_M + \rho_T$$

となる。

またモデルの性質上、図2のダンパの一方をちょう架線に設置した場合も図3のモデルと全く同等になる。

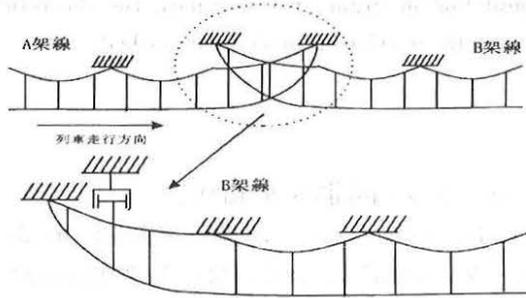


Fig. 2 Installation of a damper at the overlap section

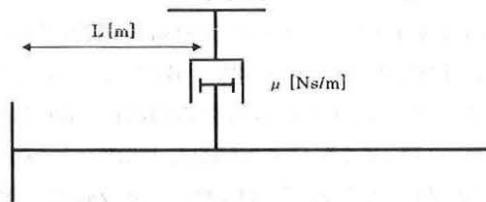


Fig. 3 Mechanical model of a damper-line system

4. 反射波低減条件

図3のようにモデル化された架線・ダンパ系において、図4に示すようにダンパ点を原点とし、ダンパの右側から入射する波を入射波、ダンパを透過する波を透過波、引留めで反射する波を透過波の反射波、透過波の反射波がダンパを透過する波を反射波と定義する。さらにそれぞれの波動の式を以下の式(1)~(4)と定義する。

$$\text{入射波} : A_1 \text{Exp}\{i\omega(t-x/c)\} \quad (1)$$

$$\text{透過波} : A_2 \text{Exp}\{i\omega(t-x/c)\} \quad (2)$$

$$\text{透過波の反射波} : A_3 \text{Exp}\{i\omega(t+x/c)\} \quad (3)$$

$$\text{反射波} : A_4 \text{Exp}\{i\omega(t+x/c)\} \quad (4)$$

ただし、 $A_1 \sim A_4$ は各波動の振幅[m]であり、 t 、 ω 、 c はそれぞれ時間[s]、角振動数[rad/s]、波動伝播速度[m/s]である。

式(1)~(4)を用いて反射波が零になる条件を求めることを考える。

ダンパの左右では、

$$y_1 = A_1 \text{Exp}\{i\omega(t-x/c)\} + A_4 \text{Exp}\{i\omega(t+x/c)\} \quad (5)$$

$$y_2 = A_2 \text{Exp}\{i\omega(t-x/c)\} + A_3 \text{Exp}\{i\omega(t+x/c)\} \quad (6)$$

が成り立ち、ダンパの位置、すなわち $x=0$ では、式(5)及び(6)より

$$A_1 + A_4 = A_2 + A_3 \quad (7)$$

が成り立つ。また引留めの位置、すなわち $x=L$ は固定端であるから式(2)及び(3)より

$$A_3 = -A_2 \text{Exp}(-2i\omega L/c) \quad (8)$$

が成り立たなければならない。さらにダンパ定数を μ [Ns/m]とすると、ダンパの位置での力の釣合い条件から

$$\mu \frac{\partial y_1}{\partial t} \Big|_{x=0} = -T \frac{\partial y_1}{\partial x} \Big|_{x=0} + T \frac{\partial y_2}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (9)$$

が成り立つ。これらの式を反射波が零になるように整理、計算すると、

$$\text{Exp}(2i\omega L/c) = (\mu c - 2T) / \mu c \quad (10)$$

の条件が得られる。この条件式を満たすためには、

$$\mu = \sqrt{T\rho} \quad L = \frac{1}{4f} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (11)$$

の条件が得られ、式(11)の2式を同時に満たす必要がある。

ところで、パンタグラフとダンパの関係を考えて、式(11)には、ドップラー効果に関する式を導入する必要があることがわかる。

一般に架線の固有振動数 f [Hz]は、 C を波動伝播速度 [m/s]、 S を架線の径間長 [m]、 α を架線の構造で決まる定数とすると、

$$f = \frac{\alpha C}{2S} \quad (12)$$

で与えられるから、ダンパから見た波動の振動数 f' [Hz]は

$$f' = \frac{C}{C+v} f \quad \text{or} \quad f' = \frac{\alpha C^2}{2S(C+v)} \quad (13)$$

である。したがって式(11)の $f \rightarrow f'$ として式(13)を代入すると、

$$\mu = \sqrt{T\rho} \quad L = \frac{S(C+v)}{2\alpha C} \quad (16)$$

となる。

ここで、式(11)や(16)は、図5に示すような特徴を持っており、例えば、1つの周波数(図5では1[Hz]を例としている)に対して、その周波数を持つ反射波を完全に零とすることができる。

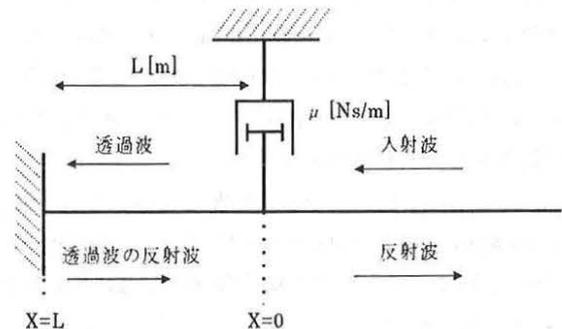


Fig. 4 Definitions of each propagating waves in the overlap section

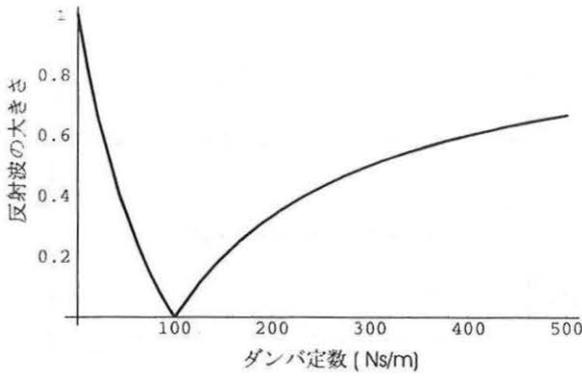


Fig. 5 The dependence of amplitude of the reflected wave on damper constant (frequency 1[Hz])

5. 架線・パンタグラフ系

シミュレーションプログラムによる検証

式(16)で与えられた条件を架線・パンタグラフ系シミュレーションプログラムに導入し、反射波が集電性能へ与える影響に関して検証した。なおシミュレーション条件は、表1に示すような直流区間に多く用いられているヘビーシンプル架線を想定し、パンタグラフの配置は、図6のように想定した。またシミュレーション中の走行速度は120[km/h]である。ただし、図6のパンタグラフの配置で、パンタグラフ間隔40[m]が先頭になるものをA走行とし、パンタグラフ間隔60[m]が先頭になるものをB走行とした。またダンパに関しては、ダンパ定数が150、300、450、600[Ns/m]の片効き及び両効きそれぞれに対して、トロリ線設置の場合とちょう架線設置の場合を検証し、その設置箇所は、パンタグラフの接触力変動が大きくなるB線側とし、B線の引留めから32、36、41[m]の位置に設置する事とした。さらにシミュレーションの離線率と接触力の最大値は、図7に示す区間で計算することとした。

次にシミュレーションを実施した条件を表2に示す。表中のA及びBは、それぞれパンタグラフの条件であるA走行、B走行を示している。またT及びMは、それぞれダンパのトロリ線設置の場合とちょう架線設置の場合を示しており、S及びWは、それぞれダンパを片効きにした条件と両効きにした条件を示している。

Table 1 Simulation parameters

ちょう架線の線種及び張力	St135、 1.09 [kg/m]、 19.6 [kN]
トロリ線の線種及び張力	GT170、 1.51[kg/m]、 14.7 [kN]
径間長及び径間数	50 [m] 7径間
ハンガ間隔	5 [m]
パンタグラフ数及び形式	5個 WPS27C
パンタグラフの静押上力	59 [N]
ダンパ	両効き 片効き
ダンパ定数	150 300 450 600 [Ns/m]

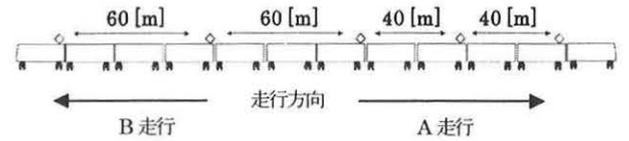


Fig. 6 Pantographs arrangement

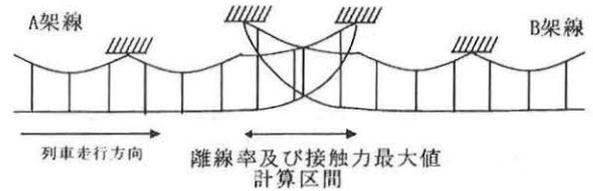


Fig. 7 The calculated sections of the contact loss rates and the maximum contact forces

Table 2 Simulation conditions

番号	ダンパ定数	ダンパ設置位置
A(B) - 0	0	なし
T(M)S(W)A(B) - 1	150 [Ns/m]	32 [m]
T(M)S(W)A(B) - 2	150 [Ns/m]	36 [m]
T(M)S(W)A(B) - 3	150 [Ns/m]	41 [m]
T(M)S(W)A(B) - 4	300 [Ns/m]	32 [m]
T(M)S(W)A(B) - 5	300 [Ns/m]	36 [m]
T(M)S(W)A(B) - 6	300 [Ns/m]	41 [m]
T(M)S(W)A(B) - 7	450 [Ns/m]	32 [m]
T(M)S(W)A(B) - 8	450 [Ns/m]	36 [m]
T(M)S(W)A(B) - 9	450 [Ns/m]	41 [m]
T(M)S(W)A(B) - 10	600 [Ns/m]	32 [m]
T(M)S(W)A(B) - 11	600 [Ns/m]	36 [m]
T(M)S(W)A(B) - 12	600 [Ns/m]	41 [m]

6. 計算結果

表3は、架線・パンタグラフ系シミュレーションプログラムによる離線率の計算結果からダンパを設置しない場合と、A走行において各パンタグラフの離線率の総和が1[%]以下であったものを選び出したものである。またA走行と同じダンパ条件におけるB走行の離線率の結果も示している。この結果から、反射波を低減するだけで、離線率を大幅に低下させることが確認される。

次に図8及び9に第5パンタグラフの接触力変動(A走行のみ)を示す。この結果からも反射波を低減させることによるパンタグラフの接触力変動を抑えることができ、集電性能の向上が確認される。

7. おわりに

本論文では、反射波が集電性能に与える影響について、シミュレーションを用いて検証した。検証方法はオーバーラップの引留め付近にダンパを設置するものとし、これをモデル化する事で反射波の低減条件を導き出し、さらにその条件を架線・パンタグラフ系シミュレーションプログラムに導入することによって実施した。この結果から、反射波を低減させることにより、離線率及びパンタグラフ

とトロリ線の接触力変動の減少が確認され、反射波が集電性能へ与える影響とオーバーラップ区間での集電性能の改善方法に関する知見を得ることが出来た。

今後は、得られた結果を実設備に近い形で試験が出来る集電試験装置で検証し、オーバーラップ区間での集電性能の改善方法に関して、さらに検証する予定である。

Table 3 The results of simulation (contact loss rates)

離線率 [%]	パンタグラフ				
	番号	第1	第2	第3	第4
A-0	6	0	0	9	18
B-0	6	12	19	0	0
TSA-9	0	0	0	0	1
TWA-9	0	0	0	0	0
TWA-14	0	0	0	0	0
TWA-15	0	0	0	0	0
MWA-6	0	0	0	0	0
MWA-8	0	0	0	0	0
MWA-9	0	0	0	0	0
MWA-10	0	0	0	0	0
MWA-13	0	0	0	0	0
MWA-14	0	0	0	0	0
MWA-15	0	0	0	0	0
TSB-9	0	1	1	2	0
TWB-9	0	0	1	3	0
TWB-14	0	0	0	3	0
TWB-15	0	0	0	3	0
MWB-8	0	0	0	3	0
MWB-9	0	0	1	3	0
MWB-10	0	0	0	3	0
MWB-13	0	0	0	3	0
MWB-14	0	0	0	3	0
MWB-15	0	0	0	3	0

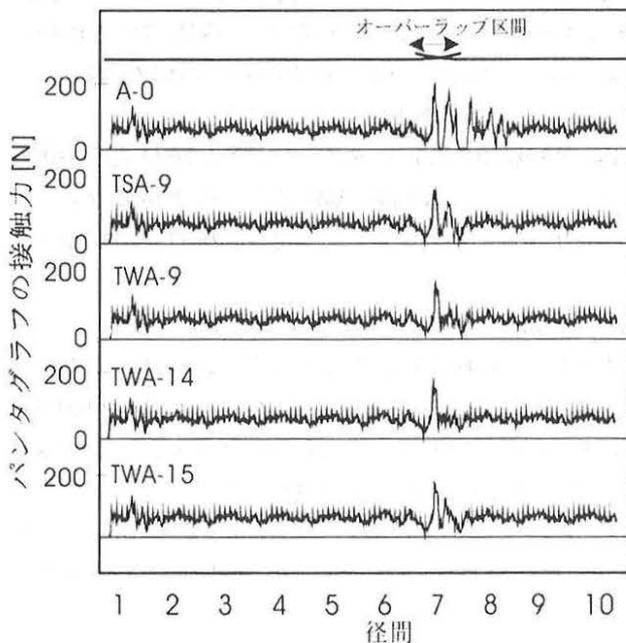


Fig. 8 The contact force fluctuation in case of five pantographs (A-0~MWA-7)

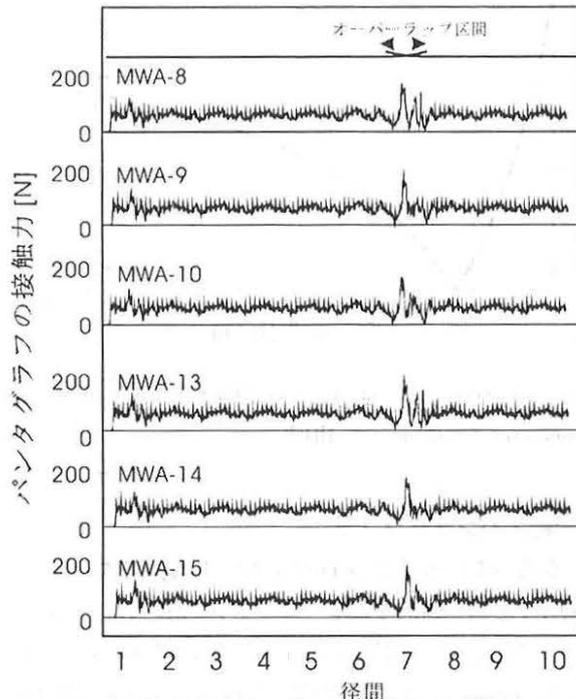


Fig. 9 The contact force fluctuation in case of five pantographs (MWA-8~MWA-15)

参考文献

- (1) 真鍋克士「架線・パンタグラフ系の径間周期運動挙動の解析」鉄道総合技術研究所報告、Vol.7 No.10、1993.10
- (2) 鉄道総合技術研究所編「電車線とパンタグラフの特性」pp.47~88 研友社 1993
- (3) Wu, T. X. and Brennan, M.J. Analytical study of pantograph-catenary system dynamics. Submitted to J. Vehicle System Dynamics, 1997
- (4) 山本大弘・武内一男・石井順「オーバーラップ箇所における集電性能の改善について」J-RAIL、S2-4-3、2001.12
- (5) 早坂高雅・吉澤武司「オーバーラップ区間でのトロリ線反射波低減に関する検討」電気学会産業応用部門大会、No.116、2002.8
- (6) 早坂高雅「オーバーラップ区間におけるトロリ線の反射波低減効果の検証」電気学会全国大会、No.5-248、2003.3
- (7) 網干光雄・中井一成「高速化における架線系の防振技術」鉄道総合技術研究所報告、Vol.9、No.9、1995.9
- (8) 真鍋克士・有本弘「架線振動のコンピュータシミュレーション(第1報)」鉄道技術研究所速報 No.70-74、197