2706 切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波の低減

正 [機] ○佐久間 豊 (鉄道総研) 正 [機] 井門 敦志 (鉄道総研) 林 太郎 (JR 西日本)

Reduction of the Amplitude and Pressure Gradient of the Compression Wave Front Generated by a

Bluff-Nose Train Entering a Tunnel

Yutaka SAKUMA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540

Atsushi IDO, Railway Technical Research Institute

Taro HAYASHI, West Japan Railway Company

Wind tunnel experiments, field measurement, and model shooting experiments have been conducted to study the compression waves generated by bluff-nose trains and devise measures for reducing the waves and aerodynamic drag by preventing the flow separation. Effects of rounded corners of a front end of a bluff-nose train and aerodynamic attachments, as well as those of sidewalls and a hood installed at a tunnel entrance, have been investigated. It is demonstrated that an attachment of fins to the front face of a two-car test train traveling at 120 km/h can reduce the maximum values of pressure gradients of the compression waves by approximately 40 percent, and a 8-meter tunnel entrance hood can reduce those by approximately 70 percent.

Keywords: compression wave, pressure gradient, bluff-nose train, wind tunnel, separated flow, flow visualization, meter-gauge railway

1. はじめに

高速列車がトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波 が発生する.この圧縮波は,坑口や列車端で反射しトン ネル内を往復し,トンネル内の構造物や作業員,列車に 圧力変動を及ぼす.近年,車両性能の向上や線形改良に より在来線でも高速化が進み,切妻型先頭部で端部が角 張っている車両が単線の狭小トンネル坑口に高速で突入 する場合,丸みの大きい車両と比較して,圧縮波の振幅 および圧力勾配が増大する傾向にあることが確認されて いる.この増加の主な原因は,先頭部付近の大規模な流 れのはく離により見かけの車両断面積が増大したためで あることが分かっている¹⁾.

そこで本研究では、圧縮波の振幅および圧力勾配の低 減対策について、車両側および地上側の両面から検討し た.車両側対策では、模型風洞実験および現車(実物車 両)走行試験により、先頭部端部の断面形状(丸み、ま たは、突起物)、成形部長さ等を変化させ、流れのはく離 を効果的に抑制する形状を検討した²⁾.また、地上側対 策では模型実験により、トンネル入口形状、特に側壁(つ い立)および入口緩衝工(フード)について検討した.

2. 車両側対策

車両側の低減対策では、先頭部付近の大規模な流れの はく離を抑制することを目標とした.まず風洞実験³⁾に より、はく離を効果的に抑える先頭部端部の丸み形状お よび突起物形状を検討した.次に、風洞実験で効果を確 認した突起物(フィン)を実物の車両に仮設して走行試 験を実施した.

2.1 風洞実験

2.1.1 概要

実験には大型低騒音風洞(密閉型測定部 幅 5 m×高 さ 3 m×長さ 20 m,鉄道総研風洞技術センター内)を使 用し,タフト法(気流糸法)による車両周りの流れの可 視化,空気抵抗(島津製作所製 ピラミッド形ロードセル 式六分力天秤を使用)の測定を実施した.実験風速 Uは 50m/s に設定した.車両模型の縮尺は 1/5,幅 W は 560 mm である.模型幅を代表長さとしたレイノルズ数 Re は 1.9×10⁶ (Re = U W /v,ここで空気の動粘性係数 v)であ る.この値は,現車のレイノルズ数 Re = 6.2×10⁶ (列車 速度 U = 120 km/h = 33.3 m/s,現車幅 W = 2.8 m)の約 3 分の 1 の大きさである.また閉塞率は約 2.1% (A_{*}/A_{30} = 0.56×0.56 / (5.0×3.0) = 0.021.ここで, A_{*} :車両模型の投 影断面積, A_{31} :密閉型測定部の断面積)である.空気抵 抗係数 C_{D} は, $C_{D} = D / (0.5 \rho U^{2}A_{*})$ で定義する.こ こで,D:抗力 (N), ρ :空気密度 (kg/m³) である.

Fig.1 に風洞実験用車両模型および模型先頭部形状を 示す.屋根面および側面について、タフトは綿糸を用い 約 100mm 間隔で計 385 点を設置した.先頭部の上辺お よび側辺の断面形状,成形部長さ等を様々に変化させた (なお、後尾部角部の丸みは r=0.107 W (r:円弧半径) の形状とした).先頭部は「丸み」、「突起物」の2形状に 関して実験した.「丸み」形状は、先頭部端部の断面形状 を、角、1/4 円弧、1/4 楕円弧 30°,直線 30°とした.「突 起物」形状として、現車の先頭部端部形状を模擬した模 型にフィンを取付けた.フィンについて、レール方向ま たはレール垂直方向に上辺と側辺で独立に変位させて、 車体からの突き出し量が車両限界内に納まり、はく離抑 制に効果的な形状を検討した.

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕



Fig. 1 Model for wind tunnel experiments



(a) Without fins $(C_D = 0.82)$ (b) With fins $(C_D = 0.58)$

Fig. 2 Flow visualization around the front end of vehicle model with or without fins



(a) 1/5-scale vehicle model

(b) Real train

Fig. 3 Attachment of fins to the top and side edges of the front end of the real train

2.1.2 結果

タフトの動きから、はく離の有無等、車体周りの流れ の様子を判定する. Fig. 2に可視化写真の例を示す. Fig. 2 (a) はフィン無し、(b)はフィン有り(本実験条件下で、 車両限界内に納まり、かつ、最もはく離抑制効果の高い 形状の場合、Fig. 1参照)である.これらの写真を例に、 先頭部周りの流れの様子を説明する.

Fig. 2(a) フィン無しの場合について,先頭部付近の上面および側面のタフトは,流れ方向(順方向)に沿って 真直ぐに並んでおらず乱れている.これらのタフトの向 きは,中央部と端部付近でばらつきがあるものの,概ね



(a) Flow visualization using tufts



Fig. 4 Results of test runs of the real train with and without fins

次のようになっている. 先頭から (レールと垂直方向の 列で) 1~5列目 (先頭部からの距離 1.18 W, 以下同様) では流れと逆方向に, 5~7 列目 (1.18~1.54W) では逆 方向から順方向へ変化し, そして, 8列目 (1.71W) 以降 は順方向に, それぞれ向いている. これらのタフトの変 化より, 先頭部側面の角部から流れがはく離しており, タフトの 6 列目 (1.36W) 付近で再付着していると判断 出来る. 一方, Fig. 2 (b)フィン有りの場合について, 上 面および側面のタフトともにほとんど乱れておらず, 流 れ方向 (順方向) に沿って真直ぐに並んでおり, はく離 領域は存在しないことが分かる. このことから, フィン を追加設置することにより, はく離が効果的に抑制され ていることが分かる. なお空気抵抗について, Fig. 2中 に示すように, フィンを設置することにより, C_D は約 30%減 (0.82→0.58) となる.

同様の方法で「丸み」形状についても、その断面の成 形部長さがなるべく短く、かつ、はく離を良く抑える形 状を検討した。その結果、はく離を効果的に抑える先頭 部端部の断面形状は楕円弧または円弧で、その成形部長 さは、車体幅を基準として 7%程度以上が必要であるこ とが分かった。

2.2 走行試験

2.2.1 概要

現車と風洞模型では、車両前面部の形状や突起物の有 無、レイノルズ数など様々な条件が異なる.そこで、風 洞実験で効果を確認したフィン形状 (Fig. 2 (b)) を元に、 走行試験の為に車両限界内に納まるように設計し直した フィン (Fig. 3(a)) を、試験列車 2 両編成の一方の先頭部



(b) Triangular side wall (c) Rectangular side wall

Fig. 6 Schematic experimental configuration of tunnel entrance (1/89-scale model)

に仮設(Fig. 3(b))して走行試験を実施し,流れのはく 離抑制, 圧縮波の振幅および圧力勾配の低減, さらに走 行抵抗低減等の効果を検証した.なおFig. 3(a)の形状で 事前に大型風洞実験を行い大きなはく離が存在しないこ とを確認した.測定項目は,トンネル内圧力,タフト(毛 糸を使用)による先頭部周りの流れの可視化,そして(惰 行法による)走行抵抗である.圧力測定では,坑口から 内部 100m点に圧力変換器(ST研究所製 PD80HA)を設 置した.トンネル長は約 5600m,トンネル突入の目標速 度は 75,95,120km/hの3段階に設定した.タフトは両 先頭部周辺の屋根面および側面に先頭部から約 6mの範 囲に 50cm 間隔で貼り付け,車内および車外からカメラ およびビデオで撮影した.走行抵抗測定は明かり区間で 実施した.

(a) Unmodified

2.2.2 結果

Fig. 4 (a) にタフトによる可視化結果の写真を示す.フィン無しの場合,約6列目,先頭からの距離3m程度, すなわち車体幅(1.0 W)よりやや長い程度の範囲までに 貼られたタフトの多くが流れ方向(レール長手方向)以 外を向いている.このことから,先頭部端部から車体幅 よりやや長い程度の範囲にかけて流れが大きくはく離し ていると考えられる.このはく離の(定常的な)大きさ については,前述の風洞実験の可視化の結果(Fig. 2(a)) とほぼ一致している.一方,フィン有りの場合,ほとん どのタフトが流れ方向を向いており,大きなはく離が存 在しないことが分かる.なお,屋根面のタフトの動きに 関しても,側面の場合と同じような傾向を示すことをビ デオ映像等により確認している.

Fig. 4 (b) に先頭部のフィン有無におけるトンネル内の圧縮波の波形例を示す. 圧力波形は,フィン無しの場合,急激に上昇しピークに達した後,やや減少し,波形がオーバーシュートしている. このオーバーシュートの主な原因は,試験列車先頭部はその端部の丸み (Fig. 4 (a))が小さいため,先頭部周りに大きな流れのはく離が存在し列車の見かけの断面積が大きくなったためと考えられる. 一方,フィン有りの場合は,オーバーシュートが無いことが分かる.

Fig. 4 (c) に突入速度と圧力勾配最大値の関係を示す. 図中の直線は,測定結果を速度3乗則の近似式を用いて 最小2乗近似した結果である. 圧力勾配最大値は,フィン有りの場合,フィン無しと比べて約40%減となる.

(d) Tunnel-entrance hood

Fig. 4 (d) にフィン有無による走行抵抗の比較を示す. 図中の線は実測データを列車速度の二次式で近似した走 行抵抗式を示す.例えば U = 120km/h 時,試験列車 2 両 編成の明かり区間の走行抵抗は,フィン有りの場合,フ ィン無しと比べて約 20%減になる.この走行抵抗の変化 はフィン有無による先頭部形状の変更のみが原因である ことから,この減少分は全て空気抵抗低減量と見なせる.

3. 地上側対策

過去の現地試験および模型実験の比較結果¹⁾から,模型先頭部端部の丸みの状態を現車とある程度合わせることで,現地試験で得られた列車突入時にトンネル内に発生する圧縮波波形の特徴が,模型実験でも定性的に再現可能であることが確認されている.そこで,模型実験により,圧縮波の振幅および圧力勾配の低減に有効なトンネル入口形状,特に側壁または入口緩衝工について検討した.

3.1 模型実験

3.1.1 概要

Fig. 5に発射装置および列車模型の先頭部形状を示す. こ れは過去の模型実験で用いた装置と同じものである¹⁾. 模型縮尺は 1/89 である.発射装置は,上下にある車輪を 高速で回転させ,その間に軸対称形状の列車模型を送り 出し,回転輪による摩擦駆動で加速する方式である.列 車先頭部形状は,はく離を伴った流れを実現するため, その端部を直角 (r=0) とした.列車模型の発射速度は 120km/h に設定した.トンネル模型には,内径 77 mm, 全長 8m の樹脂製の円管を用いた.トンネル模型入口か ら 1 m の位置に設置した圧力変換器(Kulite 社製 XCS-190-5G)によりトンネル内に形成された圧縮波を計 測した.列車とトンネルの断面積比は現地と同じ 0.48, また,模型発射実験に関して地面効果を模擬するために 鏡像の考え方⁴⁰を用いた.列車模型は単線トンネルを想 定してトンネル模型の中心に突入させた.

トンネル模型入口部に側壁または緩衝工の模型(Fig. 6)を設置し、それらの長さや大きさを変化させた. Fig. 6に示すように側壁は三角形(鏡像模型のため、現地に設

Table 1 Ratio of maximum pressure gradients



置する場合は「斜め」形状になる)と矩形の2種類の形 状を検討した.緩衝工は,その一側面のみに調整可能な 開口部を設けた.実物相当で,側壁は長さ/を3mと9m (トンネルと接続する部分の高さh/2は3.4mに固定)に, 緩衝工は,長さを2.5 m, 5.0 m, 7.5 m, 10.0 m (ただし, トンネルに対する断面積比1.40に固定),断面積比を1.27, 1.40, 1.60, 1.80 (長さ7.5 mに固定)にそれぞれ変化さ せた.

3.1.2 結果

Table 1に実験結果の一覧を示す.各対策の低減効果は, 無対策坑口(緩衝工無し, Fig. 6 (a))の圧力勾配最大値 を基準として「圧力勾配低減比」として表した.最初に 側壁,次に緩衝工の結果について以下に説明する.

斜め側壁について, 圧力勾配低減比は, 側壁長さが長 くなるほど低減する. 3m で約 12%減, 9m で約 16%減 である. 矩形の側壁について圧力勾配低減比は, 側壁長 さ 3m と 9m の場合でほとんど同じであり, 約 18%減で ある. 以上の結果より, 長さ 9m 程度までの側壁の圧力 勾配低減比は, 高々20%減であることが確認出来る.

Fig. 7 (a) に, 圧力勾配低減比と緩衝工長さとの関係を 示す. 全閉(開口部無し)緩衝工の場合, 圧力勾配低減 比は, 緩衝工長さが約 3m以上の場合でほぼ一定になり 約48%減である(なお先頭部に大きなはく離の無い新幹 線では, 全閉緩衝工の場合,約10m以上でほぼ一定にな る⁵⁾). 緩衝工開口部を調整した場合,約8m以上で73% 減である.

Fig. 7 (b) に, 圧力勾配低減比と緩衝工断面積との関係 を示す. 全閉緩衝工の場合, 圧力勾配低減比は, 緩衝工 断面積が大きくなるにつれてほぼ一様に減衰し, 緩衝工 断面積/トンネル断面積=1.6以上で 60%減となる. 緩衝 工開口部を調整した場合, 1.4~1.6 でほぼ最小になり 73%減となる. この 1.4~1.6 で最小になる傾向は, 新幹 線の場合と同様である. Fig. 8に緩衝工の最適開口部の実 物例 (Fig. 7 (a)の「一〇一」に対応)を示す. 最適開口 パターンはスリット形状であることが分かる. また, Fig. 9に, Fig. 8に対応する圧力 p および圧力勾配 dp/dt の波形 例を示す. 圧力 p の波形について, 緩衝工無しの場合, オーバーシュートが観測されており, 現地試験で得られ



Fig. 8 Side view of the hoods with optimized windows



Fig. 9 Pressure and pressure gradient (1/89-scale model)

た特徴(Fig. 4 (b))が定性的に再現されている. 緩衝工 長が長くなるにつれ, 圧力上昇のピーク値が減少し, か つ, それに要する時間が延びている. そして, それに伴 い, 圧力勾配最大値が小さくなることが確認出来る.

4. おわりに

トンネル突入時の圧縮波の振幅および圧力勾配の低減 対策について,風洞実験,走行試験,模型実験により, 車両側および地上側の両面から検討した.その結果,次 のことが示された.

(1) 先頭部端部の断面形状が楕円弧または円弧で,それらの成形部長さが車体幅を基準として 7%程度以上の時,流れのはく離が効果的に抑制される.

(2) 先頭部へのフィン設置により流れのはく離が抑制 され,その結果,トンネル突入時に圧力が一旦大きく上 昇する現象が無くなり,走行抵抗も低減する.

(3) 大きなはく離を伴う列車先頭部のトンネル突入時 に発生する圧縮波について,その振幅および圧力勾配の 低減対策として入口緩衝工が有効であることを確認した. 長さ 8m 以上(実物換算時)の緩衝工により,圧力勾配 最大値は無対策時の約70%減になる.

参考文献

- 佐久間豊,宮地徳蔵,福田傑,飯田雅宣:鈍い形状の 列車先頭部がトンネルに突入する時に形成される圧 縮波,日本機械学会年次大会講演論文集 2006(2), pp.349-350, 2006.
- Sakuma, Y., Ido, A., Iida, M. : Reduction of the compression wave in a tunnel and aerodynamic drag of a bluff-nose train, Proc. of 13th International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.473-486, 2009.
- 佐久間豊,井門敦志: 在来線車両先頭部における流 れのはく離抑制に関する風洞実験,鉄道総研報告, 22巻5号, pp.5-10, 2008.
- 4) 田中靖幸,飯田雅宣,菊地勝浩:単純な形状の模型を用いてトンネル突入時の圧縮波形成を模擬する方法:列車中心軸の偏心と地面の影響,日本機械学会論文集(B編),69巻683号,pp.1607-1614,2003.
- 小澤智:トンネル出口微気圧波の研究,鉄道技術研 究報告, No.1121, 1979