送風機制御による地下鉄駅構内の列車風緩和に関する実証試験*

杉原義文*¹, 白鳥敏正*², 松平晏明*²

Train Wind Reduction in Subway Station by Blower Control

Yoshibumi SUGIHARA, Toshimasa SHIRATORI and Yasuaki MATUDAIRA

In a subway station, train winds, which are generated by a train that acts as a piston against the tunnel air, adversely affect passengers or air-conditioning of the station. For reducing the winds, in this study, the air volumes of the blowers at Hikarigaoka Station, which are used for longitudinal ventilation in the tunnels, are dynamically controlled in three ways — increasing, decreasing or increasing-decreasing ventilation tuned to the train transit. The unsteady air velocities are measured in the tunnels and at the staircases, and then the air volumes are estimated. Results show that (i) the time histories of the unsteady air velocities are in good agreement with the existing theory, and (ii) the ratio of the reduced train-wind air volume at the staircases to the air controlled volume by the blowers are about 50% at arrival or 70% at departure.

Key Words: Internal Flow, Unsteady Flow, Subway Station, Train Wind Reduction, Blower Control

1. はじめに

列車が地下鉄トンネル内を走行するとき、そのピストン作用によりトンネル内で列車風が発生し、駅構内に流入、流出する。これが乗降客に風害を与え、同時に熱流動を引き起こし駅部の冷房効果を損なう。これらに関連して、列車風については一次元非定常流の解析と模型実験あるいは実測により報告^{(1)~(4)}されており、また熱流動については列車風、車両排熱、土中放熱等を考慮して行われてきた^{(5)~(7)}。

ところで一部営業を開始した都営12号線では、閉そく率(列車断面積/トンネル断面積)が53%と在来線(都営新宿線では34%)より大きく、従来より強い列車風が発生する恐れがある。このため実際に地下鉄の列車風の測定を行い、緩和手法を検討しておくことは、今後の建設において重要なこととなる。

列車風の低減方法には、車両形状等により発生量を低減すること、ホームドア等により遮ること、および流路を変え逃がすことなどが考えられる。逃がす方法

として、駅とトンネル接合部付近に直接外気に開放した立坑を設置する方法が松平⁽⁸⁾, Sockel⁽⁹⁾らにより提案、検討された。また Sockel は、平行する単線トンネル間に複数の通風路を設置する方法と、トンネル間の駅寄りに通風路と送風機を設置して強制的に列車風を逃がす方法についても検討を行った。しかしながら立坑による方法は、列車風の流動特性を考慮した形状であれば有効であるが、用地上の問題で設置できない場合が多い。トンネル間に複数の通風路を設置する方法では、効果を得るための建設費を考慮しなければならない。また通風路に送風機を設置する方法は、送風機に火災時⁽¹⁰⁾の換気機能等を併せて求めると計画が困難となる。これらの方法を採用できない場合には、別の方法を考えなければならない。その一つの方法として、白鳥・松平らは縦流換気(列車の進行方向に合せたトンネル内の定常換気)を列車に合せて動的に制御する方法⁽¹¹⁾を提案し、模型実験によりその効果を確認している。

以上の背景の下に、本報では模型実験結果を踏まえて開業前の都営12号線光が丘駅において、列車風の測定および縦流換気を行う送風機を動的に制御して駅構内の列車風緩和効果の実証試験⁽¹²⁾⁽¹³⁾を行った。この実証試験より、駅構内各部の空気流動の時間経歴を

* 平成5年10月2日 第71期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成6年10月7日。

*¹ 正員、東京都立科学技術大学大学院 (〒191 日野市旭ヶ丘6-6)。

*² 正員、東京都立科学技術大学工学部。

図 1 駅構造と換気設備

明らかにし、列車風緩和効果の基本となる送風機制御を行わない定常換気時の風量特性を求めて、既存の理論⁽³⁾と比較検討を行う。さらに3種の送風機の動的制御による列車風緩和効果について明らかにすることを試みる。

2. 実証試験方法

2.1 駅構造および車両 実証試験を行った光が丘駅(以下当駅という)は図1に示すように、コンコース階とホーム階の地下2層よりなる。地下1階はコンコース階で2箇所の通路で地上に通じている。地下2階はホーム階でコンコースとは2箇所の階段(各断面積は 8.1 m^2)で結ばれ、ホームの左側は単線シールドのトンネル(内径 4.3 m 、トンネル長 1300 m 、断面積 13.6 m^2)で隣駅(練馬春日町)に通じ、右側は箱形複線トンネルで地上に開放されていない地下の車庫に通じている。左右それぞれのホーム端には天井まである隔壁が設けられている。また当駅と隣駅のトンネルとホーム端の接続部分には空間が設けられ、その天井面にトンネルに向けて斜めに送気する送風機 S_1 、 S_2 の送気口と、直角に排気する送風機 E_1 、 E_2 の排気口がある。列車は断面積、 7.3 m^2 、列車長、 99 m で、到着時にトンネル T_1 を S_2 から E_1 方向に、出発時にトンネル T_2 を S_1 から E_2 方向に発車より停止まで自動走行する。

2.2 送風機制御による列車風緩和法 列車風緩和を行うための送風機の制御方法として白鳥・松平らは増加法と減少法を用いた方法を報告しているが、ここでは増減法を追加し、到着時には以下の方法を試みた。

- (a) 増加法： E_1 の風量を増加させる。
- (b) 減少法： S_1 の風量を減少させる。
- (c) 増減法：増加法と減少法を同時に行う。

出発時には、(a)の E_1 を S_1 に、(b)の S_1 を E_1 に読

図 2 送風機の制御パターン

み替えた(a), (b), (c)の3方式を試みた。列車走行に合せて、

- (a)はトンネルからの空気の流入、流出を直接低減し、
- (b)は平行するトンネルに列車風の回り込みを促し、
- (c)は両方の作用により駅部に与える列車風を緩和することにある。送風機 S_1 と E_1 には羽根の角度を変え風量を制御する可変翼軸流式、 S_2 と E_2 には固定翼の軸流式を採用し、定常な状態では4台とも同一風量とした。なお最大風量は $26.9\text{ m}^3/\text{s}$ (100%)で、このときトンネル内に約 2 m/s の縦流換気風速を発生させることができる。

今回設定した送風機の制御は、列車を検知すると自動的に開始する方式とし、列車検知後 1 s より開始し 7 s 間で風量を変化させ、到着時には 70 s また出発時には 77 s その風量を維持した後、 7 s でもとの風量に戻した。風量の変化幅は、増加法では50%($13.5\text{ m}^3/\text{s}$)から100%($26.9\text{ m}^3/\text{s}$)まで、減少法では100%から23%($6.2\text{ m}^3/\text{s}$)まで、増減法では50%より1台を100%に他の1台は23%に変化させた。

以上より制御した積算風量を以下に示す

到着時増加法： 1050 m^3

出発時増加法： 1130 m^3

到着時減少法および到着時増減法：1 600 m³

出発時減少法および出発時増減法：1 750 m³

図2は到着時に、増加法(a)，減少法(b)，増減法(c)を用いた送風機の制御パターンを示す。このときに列車を検知した位置は、隣駅側のトンネル入口より約280 m 当駅に走行した軌道上のL₇で、図2中では、◆で記した。なお出発時の列車はL₆で検知した。

2・3 計測および実験方法 計測は構内19箇所の風速(サーミスタ風速計を使用)について行ったが、ここではトンネル入口付近で断面中心より半径の3/4に位置するL₁、L₂と階段入口で断面中心に位置するL₃、L₄の風速についてのみ評価する。なおトンネルから駅部、

駅部から地上に流れる方向を正の風速、風量とする。

実際の施設を利用した実験では、結果が直接的である反面、外乱要素をすべて取り除くことは困難である。本測定においても駅間の圧力差が原因と考えられる自然発生的な気流が認められた。その結果短時間内での測定では高い再現性を得ることができたが、数hにわたる計測では自然発生した気流の影響が現れた。そこで、到着列車と数min後の出発列車を一組として、短時間内に条件を変えた測定を順次行った。

3. 試験結果

3・1 定常換気時 まず始めに送風機制御による

図3 風速の変化

列車風緩和を行わない場合、すなわち定常換気時の結果について述べる。

図3に50%の送風量で約1 m/sの縦流換気が発生させたトンネル内を列車が走行したときの各点の風速値を示す。図3(a)の到着時(トンネルT₁を隣駅から当駅へ走行)と図3(b)の出発時(トンネルT₂を当駅より隣駅へ走行)に区別し、列車の走行速度曲線とL₁～L₄における風速の実測値および両階段の平均風速を示す。走行曲線上、走行開始点s、列車先端がトンネル入口に達した点i、出口に達した点o、停止点sp、および出発時で隣駅からの走行開始点Nsと次駅での停止点Nspを記した。

まず到着時について、列車が隣駅(練馬春日町)を出発してトンネルT₁に進行するにつれL₁に風速の変化a-bが現れ、同時に平行するトンネルT₂に対向流が発生する。トンネルを出て当駅に到着しても、なお減衰流れd-cが続く。L₁でのb-dは、センサ側方を列車が通過しているときの変化であり、a₀よりaまでは隣駅の遠方より隣駅に走行したことで、当駅に現れた影響である。トンネルに対向する階段部L₃と背面するL₄でも同様な変化を示すが、減衰流れはL₃に強く現れている。なおeは階段部直下を列車が通過したときに生じた階段間の干渉による。

出発時について、列車風はL₂にf-gとなって現れ、そのときT₁に対向流が発生する。また列車がトンネルを出ると直ちに減衰を始める。h-fはL₂の側方を列車が通過しているときであり、隣駅より次の駅に走行した影響はL₃とL₄での平均値のj-kによく現れている。

トンネル→ホーム→コンコース→地上へと流れる気流はすべて階段を通るので、試みに2箇所の風速の平均値で評価してみると、最大風速は到着時3.3 m/sでL₁の37%、出発時3.1 m/sでL₂の44%程度となる。

次に駅の冷房効果に影響を与える風量について評価する。ここで風量は、測定風速を平均風速と考え、断面積を乗じて算出している。また図3のb-d間とh-f間は列車通過時の影響を除くため直線で補間した。

表1と表2に、列車先頭がトンネル入口に達した点iより出口oに達するまで、出口oより停止spまでおよび停止後の各領域を点iよりの経過時間で区分した積算風量を示す。右の欄は、参考としてホームを中心とした流入量と流出量の残差をのせた。この残差には、トンネルT₃の積算風量を含む。到着時の変化は、次駅への走行がないためほぼ単独到着の変化といえるが、出発時の領域(3)には、隣駅より次駅に走行した変化を含む。

ここで到着時と出発時を比較してみる(走行トンネ

表1 積算風量(到着時)

Region	L1 m ³	L2 m ³	L3+L4 m ³	Residue m ³
(1) 0~ 83 s from (i) to (o)	7,870	-1,820	3,520	2,530
(2) 83~110 s from (o) to (sp)	1,870	- 780	620	470
(3) 110~200 s since (sp)	3,280	-1,770	620	890

表2 積算風量(出発時)

Region	L1 m ³	L2 m ³	L3+L4 m ³	Residue m ³
(1) 0~ 76 s from (i) to (o)	2,200	-6,130	-3,190	-740
(2) 76~ 99 s from (o) to (sp)	880	-1,710	- 700	-130
(3) 99~200 s since (sp)	1,750	-3,520	-1,050	-720

ルは到着時L₁と出発時L₂を比較、平行するトンネルは到着時L₂と出発時L₁を比較)。領域(1)の平行するトンネルと階段部ではほぼ一致するが、走行トンネルと残差に違いを認める。列車がトンネルを出た後の減衰する流れにおける領域(2)ではほぼ一致しており、領域(3)においても出発時の階段部に隣駅より次駅に走行した影響が現れるがほぼ一致している。領域(1)では列車の走行速度曲線の違いにもよるが、列車がL₁とL₂を走行したことによる、流入と流出で流動特性が異なるようである。

3・2 定常換気時の結果と理論の比較 列車風の理論解析には、非定常一次元流れとして、特性曲線法を用いた山本⁽²⁾の方法、部分的に圧縮性を取り入れ常微分方程式で解く森井⁽³⁾の方法等が報告されている。

ここでは森井の方法による理論式と測定値(図3の到着時L₁の平均値と出発時L₂の平均値)の比較を行ってみる。トンネル内の気流速度を与える基本式[文献中式(22)]には、次に示す減衰項 $F(t)$ を付加する。

$$F(t) = -\rho_0 \left(\frac{\lambda}{2D} + \frac{\xi}{L} \right) V(t) |V(t)|$$

$V(t)$ はトンネル内風速、 λ はトンネル壁面での摩擦抵抗係数、 D はトンネルの水力直径で、 ρ_0 は空気密度、 ξ は風速の動圧分(1.0)と入口抵抗係数 ξ_n を合せた等価抵抗 $\xi = (1.0 + \xi_n)$ である。

閉そく率、トンネル長 L 、列車長(2・1節参照)および走行速度曲線(図3)は実際の数値を用い、 $\lambda = 0.025$ 、 $D = 4.16$ mとして $\xi = 1.5$ と $\xi = 5.0$ について計算を行

った。なお $\zeta=1.5$ ($\zeta_m=0.5$) とすると急縮小の抵抗係数を与えたことになり、トンネルの両端を開放したときに当たる。

図4に比較結果を示す。本実験における到着時と出発時の流動特性の違いを記述する項を与えていないこと、トンネル入口端と出口端の圧力を一定として解いていることなどにより完全には一致しないが、計算結果は実測値の特徴をよく反映しているといえる。

図4 理論値との比較

3.3 列車風緩和 列車風緩和のために送風機制御を行った場合を次に述べる。

図5は、定常換気の場合の風量 $\dot{Q}_s$ と送風機制御を行った場合の風量変化 $\dot{Q}_c$ との差 $\Delta\dot{Q}$ を示す。 $\Delta\dot{Q}$ が正で駅部の緩和効果を高め、 $\Delta\dot{Q}$ が負で緩和効果を損なうこととして、到着時では $\Delta\dot{Q}_a = \dot{Q}_s - \dot{Q}_c$ 、出発時では $\Delta\dot{Q}_d = \dot{Q}_c - \dot{Q}_s$ とした。図5中の太線は増加法を細線は増減法を表し、それぞれ数回の制御を行った平均値である。 L_3 と L_4 での値を見ると、送風機を制御したことにより $\Delta\dot{Q}_a$ は増加して到着時には階段口よりコンコースへの風量は低下し、また一方出発時においても、コンコースより階段口への風量が低下していることがわかる。このとき L_1 と L_2 での $\Delta\dot{Q}$ は到着時、出発時ともに減少する。

到着時の L_1 での減少はトンネルからの流入量の増となり、 L_2 での減少はトンネル内からの流出量の減となる。この結果、駅部への流入量が増え緩和効果を損なう。同様に、出発時の L_1 と L_2 での $\Delta\dot{Q}_d$ の減少は駅部からの流出量が増え緩和効果を損なう。ちなみに送風機制御時の階段部における風速の低減値を求めると、到着時：0.7～1.0 m/s、出発時：1.0～1.7 m/sとなる。

制御した風量は各経路の風量を変化させるため、送

(a) 到着時 ($\dot{Q}_s - \dot{Q}_c$)

(b) 出発時 ($\dot{Q}_c - \dot{Q}_s$)

図5 送風機制御による風量の変化

図 6 風量変化の比

風機で制御した積算風量(2・2節参照) R_F と各点における変化した積算風量 R_L の比 $R_v = R_L/R_F$ よりその配分を求めてみた。積算は制御の開始より終了までの時間とし、増加法、減少法、増減法について行った。

図6の風量変化の比でみると、 L_1 と L_2 での値が低いほど両階段(L_3 と L_4 での合計)での値が高い。また両階段では、増加法(a)は減少法(b)と増減法(c)に比較して高く、送風機の風量変化が効果的に現れたことになる。ただし低減量では制御した積算風量が大きい(b)と(c)は、(a)を上回る。階段部でこの比を送風機制御による低減割合とすると、到着時:43~60%, 出発時:54~82%の値となる。

到着時に比べ出発時の効果が高いのは、吹出し流れ(到着時の流入)と吸込流れ(出発時の流出)という条件の違いによるものと思われる。到着時におけるトンネル出口からの流入は、ホーム端に達しても噴流に近い流れ(タフトの観察より)である。ここにおいて風量変化により行う、列車風の直接低減あるいは回り込み作用は、出発時と比較して異なることが考えられる。

ところで既報告の模型実験によれば、階段部の低減率は、到着時、出発時とも80%程度であった。模型実験で高めに示されているのは、模型実験はホーム両側への同時到着とホーム両側からの同時出発の条件で行われているのに対し、本実験は単独到着と単独出発であり、駅部の片側に列車の走行していないトンネルがあること、また模型実験の排気口が流入する気流に向いていることなどの違いと考えられる。

以上より流入、流出する気流特性を考慮した排気口と送気口の形状は、送風機制御による列車風緩和の効

果を高める可能性があり、同時に定常な縦流換気を有効に行ううえでも重要なことと考える。また同時到着および同時出発に発生する高い風速に対し、ホーム端に配置した4台の送排風機を制御すれば実用的な手法となり得るといえる。

4. む す び

列車風の測定と列車風の緩和を目的として、実際の駅構内において気流の測定を行い、トンネル換気用の送風機を列車に合わせて制御する増加法、減少法、増減法を用いて緩和効果を実証的に示した。

その結果次のことがわかった。

(1) 定常換気における結果 列車運行に伴う非定常流の時間経歴と風量特性を明らかにし、既存の理論の妥当性を確認するとともに今後の検討に用いる資料を提供できた。

(2) 送風機制御による結果 階段口における列車風の低減割合(階段口の低減風量/送風機制御風量)は、到着時で50%, 出発時で70%程度を得た。

本研究の測定は、東京都交通局と日立プラント建設(株)で行い、その測定資料の提供を受けてまとめたものである。関係者の多大な協力を得たことを記して、謝意を表す。

文 献

- (1) Woods, W. A. and Pope, C. W., *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 7(1981), 331.
- (2) 山本, 鉄道技術研究報告書, No. 1230(1983).
- (3) 森井・澤・榎本, ながれ, 12(1993), 423.
- (4) 梶山・飯田・前田, 鉄道総研報告書, 7-7(1993).
- (5) Barrow, H. and Pope, C. W., *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Proc. 6th Int. Symp.*, (1988), 79.
- (6) 白鳥, 第24回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (1990), 105.
- (7) 柳下・若宮・山中, 機論, 55-509, B(1989), 101.
- (8) 松平秀雄・森井・澤, 第18回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (1984), 41.
- (9) Sockel, H. and Krönke, I., *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Proc. 5th Int. Symp.*, (1985), 139.
- (10) Grant, G. B., Vardy, A. E. and Davies, P. A., *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Proc. 6th Int. Symp.*, (1988), 527.
- (11) 白鳥・松平・ほか2名, 機論, 58-546, B(1992), 182.
- (12) 杉原・白鳥・松平・ほか3名, 機論, No. 930-63, C(1993), 146.
- (13) 杉原・白鳥・松平・ほか3名, 第28回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (1994), 93.