研究報告

自然換気塔を持つトンネルの換気性状に関する風洞模型実験 Wind tunnel experiments on ventilation of access tunnel for car passage with natural ventilation tower

村上 周三^{*1} 加藤 信介^{*2} 高橋 岳生^{*3}
Shuzo MURAKAMI Shinsuke KATO Takeo TAKAHASHI
金 永徳^{*4} 長谷川 功^{*5}
Young duk KIM Ko HASEGAWA

1. はじめに

建設が予定されているT空港旅客ターミナルは自動車のアクセス道路が円弧状建物の凹部に沿ってトンネル状に建物に取り囲まれている。このため、乗用車、バス等のアクセス車輛から排出される排気ガスによるトンネル内の空気汚染が懸念される。そこで、トンネルの換気性状を把握する目的で風洞模型実験による検討を行なった。

検討対象のトンネルは、排煙を考慮した自然換気促進用の竪穴換気塔を持つとともに、自然換気による換気量の不足を補うために機械給気設備が設けられている。

風洞実験では風力換気の性状を明らかにするために、平均風圧係数分布、風力換気による換気回

数、風力換気と機械換気が同時に作用する場合の換気回数、建物周辺の風速分布、レーザーライト

記号

- N : 換気回数 $\{=q/(V \cdot C)\}$ (回/h)
 n_L : 模型の縮率
 n_U : 風速の縮率
 n_N : 換気回数の縮率
気流の相似条件が満足されているとすれば $n_N = n_U / n_L$
 Z : 高さ (mm)
 U_H : 基準風速 (模型がない状態における軒高 (23.4m) の風速) (m/s)
 q : トレーサーガス吹出量 (cc/s)
 V : トンネル容積 (m³)
 C : 空間平均濃度 (ppm)
 C_p : 風圧係数
 $\{=(P_u - P_s)/(\gamma \cdot U_H^2/2g)\}$
 P_u : 模型の各点での静圧 (mmAq)
 P_s : 基準静圧 (模型がない場合の模型軒高の静圧) (mmAq)

-
- *1 東京大学生産技術研究所, 教授
Prof. of Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo
*2 東京大学生産技術研究所, 助教授
Associate Prof. of Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo
*3 東京大学生産技術研究所, 技官
Technical staff of Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo
*4 東京大学大学院生
Graduate student, Univ. of Tokyo
*5 前・東京大学生産技術研究所受託研究員, 三井建設(株)技術研究所
Technical Research Laboratory, Mitsui Construction Co. Ltd.
(本稿受理: 平成元年12月7日)

Fig.1 建物形状と実験風向
(Airport terminal building and wind direction studied)

Fig.2 トンネル部分平面図
(Detailed plan of access tunnel for car passages)

Fig.3 西立面図 (凹サイド) (West elevation)

シートによる流れの可視化を行なっているが、本文では、円弧という特殊な建物形状により生じる風力換気の事例として、平均風圧係数の分布と換気回数の結果について報告する。

2. 対象建物の概要

対象建物の配置をFig. 1に示す。対象建物は東に凸の円弧状で、南北526m、東西261m、軒高23.4mである。検討対象とするトンネルは建物1階の凹サイドの円弧に沿って配置され、長さ約200m、幅24m、高さ4.7mである (Fig. 2, Fig. 3)。トンネルには天井から屋上にいたる2つの竪穴自然換気塔 (内法断面13.8m×3.4m、高さ24.5m) が設けられており、第2種換気 (機械給気、自然排気) が準備されている。実験ではこれらを併せて再現している。

3. 実験概要

3.1 相似条件

換気回数の相似条件は、換気回数、模型、風速の縮率を n_N 、 n_L 、 n_U と表し、気流の相似条件が満足されているとすると、 $n_N = n_U \cdot n_L^2 / n_L^3 = n_U /$

Fig.4 実験で用いた接近流の鉛直プロファイル
(Profile of mean wind speed and turbulence intensity of approaching wind)

n_L となる。実験では $n_U = 2$ としている。

3.2 使用風洞と気流

東京大学生産技術研究所所属の測定断面1.8m×1.2mの境界層型風洞である。気流は計画地が空港で、周囲が平坦な地形であることを考慮しFig. 4に示すように平均風速鉛直分布のべき指数が1/7の乱流境界層にしている。

Photo.1 模型の設置状況 (風向W)
(Scale model set in wind tunnel
;wind direction N)

3.3 模型

対象建物を縮尺1/400で模型化した。写真1に風洞内に設置した模型を示す。模型には風圧測定孔の他、トンネル内に換気回数測定のためのトレーサー濃度測定用の管およびトレーサーガス吹き出し口 (6φ, 5ヶ所) を設置している。また、機械換気を模型化 (風量の相似比を一致させる) するためトンネル側壁に空気吹き出し口 (内径6φ) を10ヶ所設けている (吹き出し空気の流れがトンネル内の気流分布に大きな影響を与えないように吹き出し口前方にバッフル板を設置している)。

3.4 実験条件

実験風向は卓越風向 (S, N) を含む7風向とする。実験風向をFig. 1に示す。換気回数を求める実験における建物条件はTable. 1に示している。ただし、自然換気塔の開閉は風向Sについてのみ行なっている。

3.5 測定

模型上の圧力は、各測定孔からビニールチューブで微差圧変換器 (MKS バラトロン) に導き、模型設置の影響を受けない位置における風洞内基準静圧 (風洞床から $h=520\text{mm}$, これは模型を設置しない場合の模型設置位置における模型軒高の静圧に等しい) との差圧を測定する。風圧係数は風洞

Table.1 実験条件
(Variations of model tests for
natural and mechanical ventilation)

自然換気塔	開, 閉 (換気塔 上部閉鎖)
機械換気量	機械換気無し の条件時の風力換 気量に対する比 率で0, 1/2, 1, 2

床から $h=58.5\text{mm}$ (実スケールで24.3mの建物軒高) の平均速度圧で定義した。圧力測定点はトンネル内、自然換気塔を主に合計206点である。換気回数は一様拡散を仮定したトレーサーガス法 (便宜的に一様拡散濃度をトンネル内平均濃度と同一と仮定) により測定し、トレーサー (C_2H_4) 濃度の測定にはFIDを使用している。なお、トンネル内のトレーサーガスサンプル点は65点である。

4. 実験結果

4.1 風圧分布の性状

4.1.1 風圧係数分布の概要

円弧状建物の主要断面における平均風圧係数の分布をFig. 5~Fig. 7に示す。これらの図において、断面1, 2は建物北側で、図の左側が凸サイド、右側が凹サイドを表わしている。また、断面3, 4は、建物の南側で、図の左側が凹サイド、右側が凸サイドを表わしている。断面5, 6, 7はトンネルを含む建物中央部分であり、図の左側が凸サイド、右側が凹サイドを表わしている。また、断面5, 7では換気塔を含んでいる。

(1) 風向E (Fig. 5)

正面から風を受ける凸サイド外壁では建物中央部分で0.5程度の正圧になり、円弧外周に沿って、その絶対値は小さくなり、建物端部 (断面1, 4) では-0.1程度の負圧になっている。凹サイド外壁は全面にわたり負圧を示し、建物中央部では-0.4程度で、その絶対値は南北とも円弧に沿って、建物端に行くに従い小さくなる。屋根面は全面にわ

たり負圧を示し、建物中央部風上側で-1.0程度の大きな値になっている。トンネル内は-0.5程度の負圧になる。その絶対値は、凹サイド外壁の負圧の絶対値よりもわずかに大きく、他の風向に比べても大きくなっている。自然換気塔内は南北とも同程度の負圧（-0.6程度）になり、その絶対値はトンネル内よりもわずかに大きい。

(2) 風向S (Fig. 6)

凸サイド外壁は風向側（断面3，4）の南面で

0.3程度の正圧を示し、北側に行くに従って負圧の側に移行し、北側（断面1，2）ではわずかに負圧になっている。凹サイド外壁は北側で0.4程度の正圧になり、建物中央から風背側の南面に行くに従い負圧に移行し、断面4では-0.3程度の負圧になっている。円弧の凹サイドでは上空風と逆向きの流れが生じていることが考えられる。屋根面は風上側で-0.8程度の大きな負圧になるが、中央部では小さい。凹サイド中央部にあるトンネル内は、

Fig. 5 風圧係数 (風向E)
(Wind pressure coefficients; wind direction E)

Fig. 6 風圧係数 (風向S)
(Wind pressure coefficients; wind direction S)

凹サイド外壁の風圧分布に対応して0.1程度の正圧になっている。自然換気塔内は全面にわたり-0.1程度の負圧になり、南北とも同程度の値を示す。

(3) 風向W (Fig. 7)

凹サイド正面から風が吹くため、風背になる凸サイドでは負圧になる。その絶対値は建物端の断面1,4で大きく、中央部で小さい傾向を示す。また、その絶対値は他風向に比べて大きい。凹サイド外

壁は全面にわたり正圧で、その絶対値は中央部で0.8程度の値になり、南北とも建物端に行くに従って小さくなる傾向を示す。屋根面は建物中央部風上側で-0.8程度の比較的大きな負圧になる。トンネル内は凹サイド外壁の風圧係数に対応して0.2程度の正圧で、他風向に比べて大きい値を示す。自然換気塔内は-0.2程度の負圧になり、トンネル内との圧力差が他風向に比べて大きくなっている。

Fig. 7 風圧係数 (風向W)
(Wind pressure coefficients; wind direction W)

4.1.2 トンネル内と自然換気塔の風圧係数差 ΔC_p

トンネル内の平均風圧係数 (自然換気塔近傍の測定点の平均値) と自然換気塔内の平均風圧係数 (自然換気塔内壁の風圧係数の平均値) の差を “トンネル内-自然換気塔内” の風圧係数差として Fig. 8 に示す。 “トンネル内-自然換気塔内” の風圧係数差は南側、北側ともに、風向に関わらず正になり、トンネル内空氣が自然換気塔に吸引される。その絶対値は風向により異なり、凹サイドが

Fig. 8 トンネル内と自然換気塔の風圧係数差
(Difference of mean wind pressure coefficients between the values at natural ventilation tower and those in access tunnel)

風上側となる風向Wの場合最大で0.4程度の値を示すが、凹サイドが風背となる風向Eの場合や建物対称軸（東西軸）に直角の風向となるN、Sの場合0.1程度で比較的小さい。

4.1.3 トンネル入口内外の風圧係数差

南側、北側それぞれのトンネル入口内外の風圧係数差（外側の平均値－内側の平均値、Fig. 2の測定点参照）をFig. 9に示す。風向Wの場合、トンネル入口内外の風圧係数差は自然換気塔による吸引のため、南側、北側の入口とも正の大きな値を示す。一方、風向Eの場合、自然換気塔周辺と南北トンネル入口は、いずれも同程度の風圧を示し、トンネル入口内外の風圧係数差も小さい。また、風向SSEの場合、トンネル入口内外の風圧係数差が南側のトンネル入口では負に、北側では正になり、上空の風向とは逆向きの流れがトンネル内に生じている。トンネルが円弧の凹サイドにあるため、円弧に沿う上空風とは逆の流れの影響を受けているものと考えられる。なお、風向Sで自然換気塔を閉じた場合、トンネル入口内外の風圧係数差は換気塔を開けた場合に比べ、南北とも絶対値が大きくなっている。

Fig. 9 トンネル入口前後の風圧係数差
(Difference of mean wind pressure coefficients between outside and inside at entrance of access tunnel)

4.2 換気回数N

4.2.1 風力換気のみの場合

空港気象台（観測高さ8.2m）の風速1m/s時の換気回数を実物換算値²⁾でFig. 10に示す。自然換気塔が開の条件では、風向Wの場合、Fig. 8、Fig. 9に示す自然換気塔関係の風圧係数差の絶対値は他の風向に比べて大きく、換気回数は最大の17回/hになり、自然換気塔の吸引の効果が表れている。一方、トンネルが風背側になる風向Eでは風圧係数差は小さく、換気回数は最小の4.8回/hになっている。風力換気のみによる換気回数の風向による変化は、“トンネル内－自然換気塔内”の風圧係数差（Fig. 8）の変化と良く対応している。風向Sの場合、自然換気塔を閉じると換気回数が増加する。この風向の場合、トンネル内の流れは主に北側入口から流入し自然換気塔から流出するが、換気塔を閉じた場合、トンネル内の流れは北から南に向かうスムーズな一方向流となる。自然換気塔の閉鎖による換気回数の増加は、流れの変化による通風経路の流量抵抗の変化と開口に働く風圧力の変化が複合して生じたものと考えられる。

4.2.2 機械換気併用の場合

機械換気と風力換気が同時に作用した場合の実

Fig. 10 風力換気のための換気回数
(Air exchange rate with wind force converted into full scale)

Fig. 11 機械換気併用時の換気回数
(Air exchange rate with wind and mechanical force converted into full scale)

実験結果をFig. 11に示す。換気回数は機械換気量の設定値の増加に対応して増加している。換気回数の増加の割合を機械換気がない場合の風力換気量 (Fig. 10) と機械換気量の設定値 (風力換気による換気量の1/2, 1, 2倍) の単純和と実験値の比としてFig. 11(b)に示す。換気回数の増加の割合は、機械換気の設定値の増加とともにやや減少する傾向を示す。その値は風向により多少のバラツキがあるが、風力換気と機械換気の設定値が1:2の場合で20%程度である。

5. まとめ

南北に長い円弧状建物の凹サイド中央部に配置された車輛アクセス用トンネルの換気性状を風洞

実験により検討した。実験結果から、以下のことが明らかになった。

①トンネル入口内外の風圧係数差は、トンネルが円弧状建物の凹サイドに位置するため風向により大きく変化し、上空の風向と逆向きの流れがトンネル内に生じることがある。

②自然換気塔内は風向によらず負圧を示し、トンネル内空気が吸引される。このため、風速1m/s (観測高さ8.2m) に対し、換気回数は風向Wで最大の17回/h、風向Eで最小の4.8回/hが得られる。

③ (トンネル内-自然換気塔内) の風圧係数差と換気回数の、風向による変化はよく対応し、風向に関わらず自然換気塔からの流出を示し、風力換気においても自然換気塔が効果のあることを示している。

④風力換気と機械換気が同時に作用する場合、実験値は各々の単純和よりもやや減少する傾向を示すが、その値は風力換気量と機械換気量の設定値が1:2の場合で20%程度である。

謝辞 本研究を行なうに当たり、(株)日建設計、奥田泰一氏、並びに(株)北海道日建設計、吉岡功氏、奥村純英氏他の各位から多大のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋岳生, 村上周三, 加藤信介, 大和田淳: 大空間の自然換気に関する研究 (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986
- 2) 高橋岳生, 村上周三: 大型ドーム内部の換気回数に関する風洞模型実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 1981