地下空間での付室加圧煙制御における集合縦シャフト設計法に関する研究

DESIGN OF CONGREGATED VERTICAL SHAFT EXHAUST SYSTEM WITH
VESTIBULE PRESSURIZATION SMOKE CONTROL IN UNDERGROUND内堀 友恵^{*1}, 秋山 哲哉^{*2}, 松下 敬幸^{*3}, 藤田 浩司^{*4}, 高田 暁^{*5}*Tomoe UCHIBORI, Tetsuya AKIYAMA, Takayuki MATSUSHITA,
Koji FUJITA and Satoru TAKADA*

This study examined the pressurization smoke control method in the congregated vertical shaft in case of an underground fire. The pressurization smoke control can secure a refuge route by preventing an invasion of smoke to lobby. The congregated vertical shaft exhaust system is a method to shut smoke out of a room. However, it can happen that smoke exhausted from a lower floor leaks from an exhaust opening of an upper floor congregated vertical shaft. Therefore, in this study, for the purpose of grasping the behavior of the leakage of smoke in congregated vertical shaft with pressurization smoke control system, an equation to determine the rate of smoke leakage from the dimension of the building and the behavior of the fire is shown theoretically. Furthermore, a simple method for the design of the shaft setup height and the shaft cross-section area is proposed from the viewpoint of prevention of smoke leakage.

Keywords : *Underground fire, Pressurization smoke control, Vertical shaft exhaust system, Smoke leakage*

地下火災, 付室加圧煙制御, 集合縦シャフト, 漏煙

1. はじめに

火災での人体への被害は、火災よりも煙の伝播によるものが原因であることが多く、適切な煙制御法を設定する必要がある。本論文では、初期火災時の避難経路の確保や盛期火災時の消防活動可能な空間の確保のための煙制御方式として、付室加圧煙制御を取り扱う。

地上での火災であれば、付室に給気した空気によって押し出された煙は火災室や廊下などの開口部から外気に直接排出されると考えることができる。一方、地下空間のような閉鎖的な空間での火災の場合、地上とは違って外部との空気の出入りが限られているため、付室に給気することによって煙が建物全体に広がる可能性がある。そのため、加圧給気と同時に排煙経路も明確にする必要がある。

各階ごとに独立の排煙シャフトを設置する方法では、床面積が限られている地下空間において、シャフトが占める面積が大きくなる問題が発生する。よって、本論文では集合縦シャフト方式により排煙経路を確保する方法について検討する。火災時は火災階の排煙口とシャフト頂部の排出口が開放されて排煙が行われる仕組みであるが、閉鎖障害や誤作動により火災階以外の排煙口が開放された場合、下階からシャフトに排出された煙が上階の開放された排煙口を通じて漏れ出す可能性がある。そのため、集合縦シャフトを用いた排煙

経路の確保は慎重に設計しなければならない。

従来、平面的に広い地下街のような空間でのシャフトを用いた自然排煙の研究^{1) 2)}は行われているが、地下に複数階存在する建物における集合縦シャフトを用いた排煙に関する研究はほとんどなく、シャフトの設計法も確立されていない。

本論文では、排煙経路を集合縦シャフトに頼らざるをえない可能性が大きい地下空間を対象とし、付室加圧煙制御を用いた場合の集合縦シャフトにおける漏煙性状を把握するため、建物形状から漏煙量を推定する式を導く。さらに、漏煙が発生しないようなシャフト断面積や地上からの立ち上げ高さなどの簡易な設計法を提案する。

2. 漏煙量の計算方法

2. 1 計算条件と未知数

集合縦シャフトに接続する排煙口としては、直接火災室から接続するもの、あるいは、廊下から接続するものなどが想定可能である。それらの違いは、シャフトに流入する煙の温度を火災室温度あるいは廊下温度を用いる点である。本論文では、まず廊下接続型シャフトを用いた付室加圧煙制御を検討した後、廊下温度を算定する必要のない居室接続型も同様に考える。

^{*1} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生^{*2} 竹中工務店 修士(工学)

(研究当時 神戸大学 大学院生)

^{*3} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)^{*4} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)^{*5} 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Kobe Univ.

Takenaka Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr. Eng.

図1に廊下接続型シャフトを用いた地下空間の単純にモデル化した断面図を示す。火災階よりも上階において閉鎖障害または誤作動により開放された排煙口が1つあり^{注1)}、シャフトからその排煙口を通じて廊下へ煙が漏れ出した場合の煙及び空気の流れを示している。

本論文では建物の形状や火災条件などが定められた場合を対象とし、未知数を漏煙階での漏煙量 x [kg/s]と火災階付室の階段室への漏気量 y [kg/s]とする。シャフト内平均温度 T_s [K]をパラメータとし、シャフト内温度変化を考慮した漏煙性状の変化を見る。また、地上からの立ち上げ高さ h_2 [m]、シャフト断面積 A_s [m²]もそれぞれパラメータとして変化させ、シャフト形状と漏煙量との関連を調べる。

2. 2 廊下温度・シャフト内温度の算定法

実際の火災では、火災発生から時間が経過すると共に廊下温度・シャフト温度は上昇していくが、本論文では与えられた火災室温度に対して、廊下温度については定常温度を用いる。これは、付室ー廊下間の遮煙条件が廊下の定常温度と付室の温度差に対して決定されるためである。一方、シャフト温度については低温から定常温度まで変化させる。これは、漏煙量がシャフト温度の影響を受けるためである。また、シャフト温度が低温の場合を考えることによって、火災初期の場合や火災の規模が小さい場合などを含めるとする。

図2に想定する火災階の断面図を示す。廊下温度算定方法として、地上火災で使用されることが多い佐藤らの方法³⁾では、外気の流入を前提としているために地下には適用できない。本論文では既報⁴⁾で示されている廊下の仮定温度を用いた廊下温度算定方法を、地下に対応させて用いる。ただし変更点として、火災室には廊下以外の接続がないものとし、火災室 - 廊下間の開口部で図2のように双方向の気流を考え、質量収支から開口部を通過する流量を求める。

以下に、廊下へ流入する量 (m_{LC} 、 m_{FC})を求めた後、廊下周りの熱収支を考えて廊下温度 T_c を算定する手順を示す。

① 廊下温度 T_{C1} の仮定

開口部を通過する流量を求めるために、(1)式を用いて火災室温度 T_F [K]から廊下の温度 T_{C1} [K]を仮定する。

$$T_{C1} = \frac{T_F - 273.16}{n} + 273.16 \quad (1)$$

本論文では $n=2.0$ を用いる^{注2)}。

② 遮煙条件の設定

付室と廊下間の遮煙条件より、付室から廊下への流量 m_{LC} [kg/s] は(2)式から求められる。給気される空気温度は外気温度と等しいと考えている。

$$m_{LC} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2 \rho_0 \Delta \rho_{LC} g (h_{n1} - H_{L1})^2} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \quad \Delta \rho_{LC} = \rho_0 - \rho_{C1}, \quad \rho_{C1} = \frac{353.25}{T_{C1}}$$

③ 火災室から廊下への流入量 m_{FC} の算出

火災室から廊下への流出量 m_{FC} [kg/s]、廊下から火災室への流入量 m_{CF} [kg/s]についての質量保存を考え、(3)、(4)式より、中性帯高さ h_{n2} [m]と流量 m_{FC} [kg/s]を求める。

$$h_{n2} = \frac{\frac{1}{\rho_F^3} H_{u2}}{\frac{1}{\rho_F^3} + \frac{1}{\rho_{C1}^3}} \quad (3)$$

流量の等しい領域を1つの領域として定め、それぞれ下記のように領域(A)～(E)とする。

- 領域(A)：流量が m_{LC} の領域
- 領域(B)：流量が $m_{LC} - x$ の領域
- 領域(C)：流量が x の領域
- 領域(D)：流量が y の領域
- 領域(E)：流量が $x + y$ の領域

図1 地下空間断面図

図2 火災階廊下周りの空気の流れ

$$m_{FC} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2 \rho_F \Delta \rho_{FC} g (H_{u2} - h_{n2})^2} \quad (4)$$

④ 廊下周りの熱収支より求められる廊下温度

火災室及び付室から廊下への流入量がすべてシャフトへ排出される条件を考え、廊下周壁への熱損失を考慮した廊下での熱収支より、(5)式から廊下温度 T_{C2} [K]を求める。

$$T_{C2} = \frac{m_{LC} C_p T_0 + m_{FC} C_p T_F + K S_C T_0}{m_{LC} C_p + m_{FC} C_p + K S_C} \quad (5)$$

⑤ 最終的な廊下温度の近似

本来 $T_{C1} = T_{C2}$ となるまで、④で求めた T_{C2} を①の T_{C1} と置き換えて、②から④までの計算を繰り返す必要があるが、簡略化のため(6)式のように廊下温度 T_c [K]を与えることで近似する⁴⁾。

$$T_c = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2} \quad (6)$$

シャフト内定常温度 T_s [K]についても、廊下温度の算定と同様にシャフト周りの熱収支から求めることができる。廊下からシャフトに m_{LC} [kg/s]流入するので、仮定温度は用いる必要がなく、(7)式より T_s を求めればよい。

$$T_s = \frac{m_{LC} C_p T_c + K S_S T_0}{m_{LC} C_p + K S_S} \quad (7)$$

2. 3 漏煙量・漏気量の算定法

以下にシャフトからの漏煙量 x [kg/s]、火災階付室から階段への漏気量 y [kg/s]の計算手順を示す。

① 廊下温度・シャフト温度の定常値の算定

火災室温度・開口の状態より、2. 2項に示した方法で廊下温度 T_C [K]とシャフト内温度 T_S [K]の定常値を求める。

② 遮煙条件の設定

①で求めた廊下温度を用いて遮煙部流量 m_{LC} [kg/s]と遮煙部床面圧力差 ΔP_{LC} [Pa]を(2)、(8)式により求める。

$$\Delta P_{LC} = \Delta \rho_{LC} g h_{n1} \quad (8)$$

③ 圧力収支式の作成

排煙経路(領域(A)(B))、漏煙経路(領域(C)(E))、漏気経路(領域(D)(E))を通過する流量を、漏煙量 x [kg/s]、漏気量 y [kg/s]、遮煙部流量 m_{LC} [kg/s]を用いて表し(図1参照)、地下空間における圧力の収支式を作成する。火災階付室から外気までの2経路(図1実線)と、シャフト内漏煙部分から外気までの2経路(図1破線)で、それぞれ外気で圧力が整合するような圧力収支を考える。

まず、図1実線部分の2経路について、外気の圧力を火災階付室の圧力を使ってあらわすと(9)、(10)式ようになる。

$$P_1 = P_L - \Delta P_{LC} - \Delta P_{F1} - \Delta P_A - \Delta P_B - \rho_s g(h_1 + h_2) \quad (9)$$

$$P_0 = P_L - \Delta P_D - \Delta P_E - \rho_0 g h_1 \quad (10)$$

外気の同じ高さの圧力は等しいと考え、出口0の圧力を出口1の高さと同じになるよう補正して $P_1 = P_0 - \rho_0 g h_2$ とすると、(9)、(10)式より(11)式が得られる。

$$\Delta P_{LC} + \Delta P_{F1} + \Delta P_A + \Delta P_B - \Delta P_D - \Delta P_E - (\rho_0 - \rho_s)g(h_1 + h_2) = 0 \quad (11)$$

図1点線部分の経路についても同様に、(12)式が得られる。

$$\Delta P_B - \Delta P_{F2} - \Delta P_C - \Delta P_E - (\rho_0 - \rho_s)g(h_2 + h_3) = 0 \quad (12)$$

④ 圧力損失の算定

(11)、(12)式を解くためにはシャフト直管部の摩擦による圧力損失、開口部通過、形状変化による圧力損失を求める必要があり、直管部ではダルシー・ワイズバッハの式((13)式)、分岐・曲がりなどの形状変化部では(14)式を用いる。そのために必要な速度 v は、③で求めた流量を密度と断面積で割ることで求める。

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (13)$$

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (14)$$

なお、形状変化による損失係数 ζ の値は、文献値⁵⁶⁾より求める。

以下では表記の簡略化のため、流量の変わらない領域(図1参照)では(15)式を用いて合成有効開口面積を使用する。

$$\frac{1}{(\alpha A)^2} = \sum_i \frac{1}{(\alpha A)_i^2} \quad (15)$$

合成した有効開口面積を、 $(\alpha A)_A$ 、 $(\alpha A)_B$ …のように表わし、これらの領域に含まれない排煙口部分の有効開口面積を $(\alpha A)_F$ と表わす。例えば領域(A)での圧力損失 ΔP_A は(16)式ようになる。

$$\Delta P_A = \frac{1}{(\alpha A)_A^2} \cdot \frac{\rho_s}{2} \left(\frac{m_{LC}}{\rho_s} \right)^2 \quad (16)$$

他の領域の圧力損失も同様にその領域での密度と通過する流量、有効開口面積を用いて算出でき、(11)、(12)式の圧力損失の項に代入し、 x 、 y について整理すると(17)、(18)式になる。

図3 地下空間の空気の流れ

図4 対象とする地下空間と基本条件

$$\left(\frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{1}{2\rho_s} - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{1}{2\rho_0} \right) x^2 - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{xy}{\rho_0} - \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}x}{\rho_s} - \left\{ \frac{1}{(\alpha A)_D^2} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \right\} \frac{y^2}{2\rho_0} + \left(\frac{1}{(\alpha A)_A^2} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \right) \frac{m_{LC}^2}{2\rho_s} + \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_s} - (\rho_0 - \rho_s)g(h_1 + h_2) + \Delta P_{LC} = 0 \quad (17)$$

$$\left(\left(\frac{1}{(\alpha A)_B^2} - \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \right) \frac{1}{2\rho_s} - \left(\frac{1}{(\alpha A)_C^2} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \right) \frac{1}{2\rho_0} \right) x^2 - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{xy}{\rho_0} - \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}x}{\rho_s} - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{y^2}{2\rho_0} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_s} - (\rho_0 - \rho_s)g(h_2 + h_3) = 0 \quad (18)$$

⑤ 漏煙量 x ・漏気量 y の決定

この二元二次方程式を解いて数値的に x 、 y を求める^{注3)}。

x 、 y は正負どちらの可能性もあるが、本論文では漏煙が発生している状態を問題としているため、 $x \geq 0$ の範囲の解を求める。

また、シャフト内温度上昇に伴い、 y の符号や $x + y$ (出口0での流量)の符号が変わり、地下空間での空気の流れが図3の(i)から(iii)へ変化していく。なお、(9)～(18)式は図3の(i)の場合の式である^{注4)}。

3 計算法の妥当性の検討

3. 1 計算条件の設定

建物モデルとして、図4のような地下空間と基本条件を想定する。

本論文では漏煙が発生しても建物内の温度が変化しない定常状態で計算する。漏煙先の廊下・階段の温度上昇を考慮した場合、シャフト内と漏煙先の温度差が小さくなり漏煙量は少なくなるため、ここでは漏煙先の温度上昇を無視し、安全側の設計について検討する。

この条件下でのシャフト内温度に対する漏煙性状を計算する。

3. 2 計算結果及び妥当性の検討

2節の漏煙量計算法により、基本条件でのシャフト内の温度上昇、立ち上げ高さの違いによる漏煙量 x の変化を見る。2. 2項の手順に従って基本条件における廊下温度の定常値 T_c を求めると193℃となり、シャフト内温度の定常値 T_s は190℃となる。漏煙量計算法による結果を図5に示す。また、その妥当性を検討するため、一層ゾーン煙流動計算プログラム η (精算法)で求めた漏煙量 x と比較する。精算法の結果を図6に示す。

図5、6より、50℃以上では漏煙量が0となる立ち上げ高さ(必要立ち上げ高さ)は漏煙量計算法の方が精算法の値よりも大きく、厳しい結果を得ている。また、基本条件から外気温のみを変化させ、夏季(外気温 30℃)、冬季(外気温 0℃)の状態では漏煙量計算法と精算法を比較したグラフを図7、8に示す。外気温が変化しても、漏煙量計算法は精算法より厳しい結果であることがわかる。以上のことからこの計算法は安全側であるといえる。

4 漏煙性状の検討

4. 1 廊下接続型シャフトの場合

図5～8に示すように、シャフト立ち上げ高さを高くしていくにつれて漏煙量は減衰している。よって、漏煙を防止するためには、

図5 漏煙量計算法による漏煙量 (基本条件)

シャフトの断面積が固定された場合には立ち上げ高さが重要な要素となることがわかる。シャフト内温度が高くなるほど、煙突効果の影響が大きくなるためグラフの傾きが大きくなっている。図5の立ち上げ高さ6[m]付近でグラフが交差し、6[m]以上の高さではシャフト内低温時の漏煙量が多くなっている。50℃以下ではさらに傾きが小さくなり、必要立ち上げ高さが高くなることが考えられるので、この条件では立ち上げ高さを高くすることによってすべてのシャフト内温度で漏煙を防止することは困難であるといえる。

次に、基本条件においてシャフト断面積のみを4.0[m²]に変更した時の漏煙量計算法による結果を図9に示す。

図5と図9を比較すると、シャフト断面積4.0[m²]では、必要立ち上げ高さが全体的に低くなっている。また、図5に見られたグラフの交差は図9では見られず、シャフト内温度が上昇するとともに必要立ち上げ高さは単調に増加していることがわかる。シャフト断面積を4.0[m²]にすると、立ち上げ高さを5.5[m]に設定すれば、どの温度状態でも漏煙を防止することができる。

4. 2 居室接続型シャフトの場合

これまで廊下にシャフトを接続した場合について検討してきたが、廊下がなく各階1室空間とした時のシャフトについて考える。基本

図6 精算法による漏煙量 (基本条件)

図7 漏煙量計算法と精算法の比較 (夏季、外気温 30℃)

図8 漏煙量計算法と精算法の比較 (冬季、外気温 0℃)

図9 漏煙量計算法による漏煙量 (断面積 4[m²])

図10 漏煙量計算法による漏煙量 (居室接続型シャフト)

的な手順は同一であるが、2. 2項に示した廊下温度を算定する必要がなくなり、シャフトに流入する煙は火災室温度と同じとして計算する。3. 1項の基本条件において、シャフト内温度の定常値は590℃となる。付室も居室に直接接続されるとしており、遮煙部の温度差が大きくなるので、遮煙条件は廊下接続型よりも厳しくなる。

この条件下で、漏煙量計算法で計算した結果を図10に示す。

図5と図10を比べると、シャフト内温度定常値においては、居室接続型シャフトの漏煙量は廊下接続型シャフトの場合よりも多くなることがわかる。これは、居室接続型シャフトの方が遮煙部流量が多く、シャフト内を流れる流量も多いため、シャフト内の圧力が高くなるのが原因だと考えられる^{注5)}。

4. 3 地下空間の圧力分布

漏煙量に影響を与えるのは、地下空間全体の圧力バランスである。例として、シャフトの立ち上げ高さが変化する場合の圧力バランスおよび漏煙量の変化を考える。図11に、出口1の高さ①の状態でも漏煙が発生する時の圧力分布を実線で示す。漏煙階の高さでシャフトの圧力が階段の圧力より大きいので漏煙が発生している。その状態から立ち上げ高さを出口1の高さ②まで高くする場合を考える。仮に、実線で示した圧力分布のまま高さ②まで外気およびシャフトの圧力分布の線を延ばすとすると、出口1での圧力差が大きくなりシャフトから外気への流量が増えることになるが、遮煙部を通過してシャフトに流入する量は固定しているため、シャフトの流量収支を満足しない。よって、シャフトの圧力は実線の状態よりも低下することになる。遮煙部流量は固定して考えるので、火災階付室はシャフトと同じだけ圧力低下することになる。仮に、階段もシャフトと同じだけ圧力低下したとすると、外気の圧力は変化しないと考えているため出口0での圧力差が小さくなり階段から外気への流量は減ることになるが、火災階での付室から階段への流量と漏煙階でのシャフトから階段への流量は変化しないため、階段の流量収支を満足しない。したがって、図11の点線に示すようにシャフトの圧力低下よりも階段の圧力低下の方が小さくなった状態でシャフト、階段ともに流量収支を満足することになる。このように、シャフトの立ち上げ高さを高くすると、シャフトの圧力低下幅よりも階段の圧力低下幅の方が小さくなり、漏煙階の高さでのシャフトと階段の圧力差は漏煙が起りにくい方向に変化する。

5. 漏煙防止のための簡略なシャフト設計法

前節までは、様々な条件における漏煙量について計算したが、シャフト設計時は漏煙が発生しないようなシャフト形状を求める必要がある。本節では、2節で示した圧力収支式をもとにして、漏煙を防止することのできるシャフト断面積と立ち上げ高さ、付室への必要給気量を簡略に算出できる式を提案する。

5. 1 必要給気量について

(17)、(18)式に漏煙量 $x=0$ の条件を代入すると、(19)、(20)式のように漏気量 y と立ち上げ高さ h_2 の連立方程式となる。2式から h_2 を消去すると(21)式となる。

図11 漏煙発生時の圧力分布と立ち上げ高さの影響
(漏煙先の圧力は同じ高さの階段の圧力と同じと仮定)

$$-\left\{\frac{1}{(\alpha A)_D^2} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2}\right\} \frac{y^2}{2\rho_0} + \left\{\frac{1}{(\alpha A)_A^2} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2}\right\} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_s} + \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_c} - (\rho_0 - \rho_s)g(h_1 + h_2) + \Delta P_{LC} = 0 \quad (19)$$

$$-\frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{y^2}{2\rho_0} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_s} - (\rho_0 - \rho_s)g(h_2 + h_3) = 0 \quad (20)$$

$$y^2 = 2\rho_0(\alpha A)_D^2 \{ \Delta P_{LC} + \Delta P_A + \Delta P_{F1} - (\rho_0 - \rho_s)g(h_1 - h_3) \} \quad (21)$$

$$\text{ただし、} \Delta P_{F1} = \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_c} \quad (22)$$

ここで、シャフト直管部を通過するときの摩擦損失 ΔP_A は、開口部を通過するときの圧力損失よりも極めて小さいので無視する。この近似によって、漏煙が発生しやすいより厳しい条件となって漏煙防止設計を行う上では安全側となる。

また、必要給気量を求める際は、 y の値が最も大きくなるシャフト内温度が低い状態を想定するので、 $\rho_s = \rho_0$ とする。この時の図3における流れのパターンは(i)の状態となり、 y は正として考える。したがって、(23)式から y を求める。また、必要給気量は(24)式から求める。

$$y = \sqrt{2\rho_0(\alpha A)_D^2 (\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC})} \quad (23)$$

$$m_a = m_{LC} + y \quad (24)$$

5. 2 必要立ち上げ高さについて

5. 1項と同様にして、今度は漏気量 y を消去し、立ち上げ高さ h_2 を求める式を導く。5. 1項と同じ圧力損失の近似を行うと、漏煙を防止するための必要立ち上げ高さは(25)式で表わされる。

$$h_2 = \frac{m_{LC}^2}{(\alpha A)_S^2 2\rho_s \Delta \rho g} - \frac{\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC}}{\Delta \rho g} Z + (h_1 - h_3)Z - h_3 \quad (25)$$

$$\text{ただし、} Z = \left(\frac{(\alpha A)_D}{(\alpha A)_E} \right)^2 \quad (26)$$

断面積を固定したときは、(25)式で算出された h_2 以上の立ち上げ高さを設定すれば、定常温度での漏煙を防止することができる。

5. 3 シャフト断面積について

4節で述べたように、シャフト断面積 A_S が小さいとグラフが交差し、シャフト内温度低温時の必要立ち上げ高さ h_2 が高くなる。これは低温時に漏煙を防止することが困難なことを意味している。そのため、シャフト断面積を設定する際にシャフト内温度の上昇に伴い、

必要立ち上げ高さも単調増加するように考える必要がある。すなわち、シャフト内密度が小さくなるにつれて5. 2項の方法で求める必要立ち上げ高さが単調に増加すればよいので、(25)式を ρ_s で微分し、 $\frac{\partial h_2}{\partial \rho_s} \leq 0$ となればよい。このとき、(27)式を得る。

$$\frac{m_{LC}^2}{2(\alpha A)_s^2 g} \frac{2\rho_s - \rho_0}{\rho_s^2} - \frac{\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC}}{g} Z \leq 0 \quad (27)$$

ここでは、シャフト内の密度 ρ_s は外気空気密度 ρ_0 と等しいとして取り扱う。 $\rho_s = \rho_0$ としてシャフト断面積について解くと(28)式となり、シャフト断面積の条件が算出される。

$$A_s \geq \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{m_{LC}^2}{2(\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC}) Z \rho_0}} \quad (28)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\sum \zeta + \lambda \frac{L}{D'}}}, \quad D' = 2\sqrt{\frac{(\alpha A)_s}{\pi}}, \quad (\alpha A)_s = \sqrt{\frac{m_{LC}^2}{2(\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC}) Z \rho_0}} \quad (29)$$

(28)式より、シャフト断面積は、火災階での付室からシャフトまでの圧力損失($\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC}$)、火災階と漏煙階の位置関係(Z)、遮煙条件(m_{LC})、シャフトの曲がりや分岐といった形状(α)によって決まることがわかる。(28)式により算出される断面積の条件に加えて、(25)式の立ち上げ高さ以上に設定することで、すべてのシャフト内温度での漏煙を防止することができる。

5. 4 シャフト設計の手順

5. 1項から5. 3項までの検討に基づき、実際の漏煙防止のためのシャフト設計の手順を示す。

- ① 廊下温度、シャフト内平均温度の定常値の算出
2. 2項に示した手順を用いて、廊下温度 T_C とシャフト内温度 T_s の定常値を予測する。
- ② 遮煙条件の設定

付室と廊下または居室との間の遮煙条件を設定し、(2)、(8)式を用いて遮煙部流量 m_{LC} と遮煙部床面圧力差 ΔP_{LC} を得る。

- ③ 遮煙条件・建物条件・開口条件によって決まる値の算出

(22)、(26)式より開口での圧力損失 ΔP_{F1} と Z を算出する。

- ④ シャフト断面積の決定

②、③で算出された値を用いて、(28)式の条件を満たすようにシャフト断面積 A_s を設定する。

- ⑤ 必要立ち上げ高さの算出

①～④でのシャフト断面積を(25)式に代入して、シャフトの必要立ち上げ高さ h_2 を算出する。

- ⑥ 必要給気量の算出

(23)式より漏気量 y を求め、(24)式より必要給気量 m_a を求める。

5. 5 シャフト設計例

5. 4項の手順に従って、3. 1項のシャフト断面積以外の基本条件における、漏煙を防止するためのシャフトの立ち上げ高さと断面積、付室への必要給気量を、廊下接続型シャフト、居室接続型シャフトについてそれぞれ算出したものを表1に示す。

表1より、居室接続型シャフトの方が、廊下接続型シャフトよりも漏煙防止に必要な断面積はやや小さい。その理由を検討するため、シャフトに流入する煙の温度(廊下温度、または火災室温度)と最小

表1 漏煙防止のためのシャフト設計

接続形態(シャフトへの流入温度 [°C])	遮煙部流量 m_{LC} [kg/s]	断面積 A_s [㎡]	立ち上げ高さ h_2 [m]	必要給気量 m_a [kg/s]
廊下接続型 (193)	10.2	3.7	5.8	24.6
居室接続型 (600)	13.7	3.2	9.5	36.4

図12 最小シャフト断面積

図13 必要立ち上げ高さ

シャフト断面積の関係((28)式で等号の場合)を、図12に示す。シャフト断面積と廊下温度の関係を簡単に表わすことができないため、廊下温度を数値的に変化させた場合の結果を示している。

図12より、シャフトに流入する煙の温度が高い方(居室接続型)が最低シャフト断面積は小さくなることから、(28)式において、遮煙部流量 m_{LC} の増加よりも、遮煙部からシャフトまでの圧力損失($\Delta P_{F1} + \Delta P_{LC}$)の増加の影響が大きいことがわかる。

一方表1より、それぞれの最低シャフト断面積の値を用いて求めた必要立ち上げ高さは居室接続型排煙シャフトの方が高い。この理由を検討するため、(25)式より最小断面積における必要立ち上げ高さとシャフトに流入する煙の温度との関係を図13に示す。断面積と同様に、廊下温度を数値的に変化させた場合の結果を示している。

図13より、シャフトに流入する煙の温度が高くなるにつれ、必要立ち上げ高さは増加している。なお、排煙口面積を0.5[㎡]から5.0[㎡]まで、遮煙部開口面積を1.5[㎡]から5.0[㎡]まで、 Z の値を0.2から1.0まで(地下2層の建物から地下10層の建物まで)変化させた場合でも、必要立ち上げ高さは単調増加になることを確認した。

6. まとめ

本論文では、地下空間の火災時における煙制御方法として付室加圧煙制御を用いた場合の集合縦シャフトにおける漏煙性状を検討し、集合縦シャフトの設計法を提案した。

本論文で示した漏煙量計算法の結果を精算法による結果と比較し、安全側であることを確認した。漏煙量計算法によって様々な条件における漏煙を検討し、シャフト内温度変化による漏煙量を算出した。その結果、十分な大きさのシャフト断面積がないと、シャフト内温度が低い時の漏煙を防ぐのが困難であることがわかった。

漏煙量計算法に基づいて、シャフト内高温時の漏煙量が低温時よりも常に多くなるようなシャフト断面積の条件を示し、漏煙を防止するためのシャフト断面積及び地上立ち上げ高さを決定するシャフト設計法を提案した。

シャフト設計法を居室接続型シャフトと廊下接続型シャフトの両方について比較検討し、シャフトへの流入温度や遮煙条件による、シャフト断面積や立ち上げ高さへの影響を明確にした。

表2 nの値による廊下温度の違い[℃]

Tf	n=2			n=3			n=4			n=5		
	Tc1	Tc2	Tc	Tc1	Tc2	Tc	Tc1	Tc2	Tc	Tc1	Tc2	Tc
600	300	89	194	200	117	159	150	139	144	120	156	138
650	325	91	208	217	121	169	163	143	153	130	162	146
700	350	93	222	233	124	179	175	148	161	140	167	153
750	375	95	235	250	127	189	188	152	170	150	172	161
800	400	97	248	267	130	198	200	155	178	160	176	168

注

注1) 通常、火災階以外の排煙口が開放されることは生じないと考えられるが、防災上はフェールセーフの観点から機械の誤作動や閉鎖障害などをあえて想定することが必要である。本論文で取り扱う問題において、一番厳しい状況というのはすべての排煙口が開放された場合であるが、このような事態まで想定することは過剰であると考えられる。本論文では、火災階以外の排煙口が1つだけ開放されるという状況を考え、その条件下で最も不利側の設定となる最上部の排煙口の開放を想定する。2つ以上の排煙口が開放された場合は、一番上の排煙口からの漏煙量を0にする条件を満たすと、すべての排煙口で漏煙を防止することができる。ただし、その場合は一番上以外の開放された排煙口からシャフトへの流れが発生することも考慮してシャフトでの流量収支を考える必要がある。

注2) 本論文の廊下温度算定では、既往の研究⁴⁾の算定法を地下の建物に対応させて、火災室には廊下以外の接続はなく火災室ー廊下間開口部に双方の流れが発生するというように変更しているため、廊下温度を仮定するとき(1)式で用いるnの値について再検討した。与えられた火災室温度 T_F に対して、nの値を2から5まで変化させた時の仮定した廊下温度 T_{C1} 、本文2.2項②から④の手順で求められる1回目の廊下温度 T_{C2} 、近似により求めた廊下温度 T_C について比較したものを表2に示す。

地上の条件ではn=2程度で T_{C1} と T_{C2} が近い値となり妥当であると考えられる⁴⁾が、地下の条件ではn=4程度が妥当となる。n=2とするとn=4とするよりも廊下温度 T_C は高くなるが、廊下温度が高いほど(2)式で求める遮煙するために必要な流量は多くなり厳しい条件になるため、本論文ではn=2を用いることとする。

また、廊下表面積、熱貫流率の値によって廊下温度が変化すると考えられる。本論文では地中の壁材はコンクリートを想定した。壁の外側は土であるが、土の熱容量と比べて火災は短時間の現象と考え、壁の外側は外気温度と同じに維持されるとして取扱った。本論文の検討例では、廊下表面積は100[m²]、熱貫流率は2.1[W/m²K]を用いた。廊下の表面積が大きくなるにつれて廊下温度は低くなるが、表面積が1000[m²]まで大きくなっても廊下温度の変化は7℃程度なので、火災状況の不確定さや建築物の相違を考えると、本論文で用いた近似が許容されると判断した。

注3) この2式を連立して解くために、GRAPESというグラフ作成ソフトを用いた。シャフト内密度と立ち上げ高さをパラメータとして、それら以外の具体的数値を代入した2式のグラフを作成し、図3で示した条件の範囲にある交点を読み取り、解(x,y)を得る。具体的にはまず、図3(i)の流れを考えて解(x,y)を求め、条件の範囲(y≥0)に解がなくなると(ii)、(iii)に移るといった方法で求める。なお、シャフト設計で必要給気量を算出する時については、5.1で述べるようにyは正と考える。

注4) 図3の(ii)、(iii)の状態のときは(11)、(12)式での圧力損失の符号が変わり、(17)、(18)式は以下になる。

(ii)のときの(17)、(18)式

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{1}{2\rho_S} - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{1}{2\rho_0} \right) x^2 - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{xy}{\rho_0} - \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}x}{\rho_S} \\ & + \left\{ \frac{1}{(\alpha A)_D^2} - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \right\} \frac{y^2}{2\rho_0} + \left(\frac{1}{(\alpha A)_A^2} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \right) \frac{m_{LC}^2}{2\rho_S} + \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_C} \\ & - (\rho_0 - \rho_S)g(h_1 + h_2) + \Delta P_{LC} = 0 \\ & \left(\left(\frac{1}{(\alpha A)_B^2} - \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \right) \frac{1}{2\rho_S} - \left(\frac{1}{(\alpha A)_C^2} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \right) \frac{1}{2\rho_0} \right) x^2 \\ & - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{xy}{\rho_0} - \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}x}{\rho_S} - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{y^2}{2\rho_0} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_S} \\ & - (\rho_0 - \rho_S)g(h_2 + h_3) = 0 \end{aligned}$$

(iii)のときの(17)、(18)式

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{1}{2\rho_S} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{1}{2\rho_0} \right) x^2 - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{xy}{\rho_0} - \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}x}{\rho_S} \\ & + \left\{ \frac{1}{(\alpha A)_D^2} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \right\} \frac{y^2}{2\rho_0} + \left(\frac{1}{(\alpha A)_A^2} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \right) \frac{m_{LC}^2}{2\rho_S} + \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_C} \\ & - (\rho_0 - \rho_S)g(h_1 + h_2) + \Delta P_{LC} = 0 \\ & \left(\left(\frac{1}{(\alpha A)_B^2} - \frac{1}{(\alpha A)_F^2} \right) \frac{1}{2\rho_S} - \left(\frac{1}{(\alpha A)_C^2} - \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \right) \frac{1}{2\rho_0} \right) x^2 \\ & + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{xy}{\rho_0} - \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}x}{\rho_S} + \frac{1}{(\alpha A)_E^2} \frac{y^2}{2\rho_0} + \frac{1}{(\alpha A)_B^2} \frac{m_{LC}^2}{2\rho_S} \\ & - (\rho_0 - \rho_S)g(h_2 + h_3) = 0 \end{aligned}$$

注5) 廊下接続型、居室接続型シャフトに関わらず、想定された遮煙部流量よりも多くの流量が遮煙部を流れる可能性がある。遮煙部流量が多いほど火災階廊下ー付室間での遮煙は安全側になるが、本論文の取り扱う問題ではシャフトの圧力が高くなり、漏煙が多くなる場合がある。漏煙を防止するには、5節に述べるシャフト設計の際に、遮煙部を通過する想定流量を遮煙条件の流量よりも大きくして計算すればよい。なお、本論文では遮煙条件の流量として固定している。

【記号】

A_S : シャフト断面積[m ²]	B : 開口幅[m]
C_p : 定圧比熱[J/kg・K]	D : 等価直径[m]
g : 重力加速度[m/s ²]	H_L : 開口下端高さ[m]
H_u : 開口上端高さ[m]	h_n : 中性帯高さ[m]
h_1 : 火災階から地上面までの高さ[m]	
h_2 : シャフトの地上からの立ち上げ高さ[m]	
h_3 : 漏煙階排煙口下端から地上までの高さ[m]	
K : 熱貫流率[W/m ² K]	L : 直管部長さ[m]
m_a : 付室への給気量[kg/s]	m_{FC} : 火災室ー廊下間流量[kg/s]
m_{LC} : 遮煙部流量[kg/s]	ΔP_A : 領域(A)での圧力損失[Pa]
ΔP_B : 領域(B)での圧力損失[Pa]	ΔP_C : 領域(C)での圧力損失[Pa]
ΔP_D : 領域(D)での圧力損失[Pa]	ΔP_E : 領域(E)での圧力損失[Pa]
ΔP_{F1} : 火災階排煙口での圧力損失[Pa]	
ΔP_{F2} : 漏煙階排煙口での圧力損失[Pa]	
ΔP_{LC} : 遮煙部床面圧力差[Pa]	P_L : 付室の絶対圧[Pa]
P_0 : 出口0での絶対圧[Pa]	P_1 : 出口1での絶対圧[Pa]
S_C : 廊下内表面積[m ²]	S_S : シャフト内表面積[m ²]
T_C : 廊下温度[K]	T_{C1} : 廊下の仮定温度[K]
T_{C2} : 求められる廊下温度[K]	T_F : 火災室温度[K]
T_S : シャフト温度[K]	T_0 : 外気・付室・階段の温度[K]
v : 流速[m/s]	x : 漏煙量[kg/s]
y : 漏気量[kg/s]	α : 流量係数
$(\alpha A)_F$: 排煙口有効開口面積[m ²]	$(\alpha A)_S$: シャフト有効開口面積[m ²]
λ : 摩擦係数	ρ_C : 廊下内空気密度[kg/m ³]
ρ_F : 火災室内空気密度[kg/m ³]	ρ_S : シャフト内空気密度[kg/m ³]
ρ_0 : 外気・階段・付室の空気密度[kg/m ³]	

参考文献

- 1) 宮崎早苗，渡部勇市，山田常圭：地下施設の堅坑による自然排煙について，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.129-130，1995
- 2) 武盛功太，長谷見雄二，森山修治：地下広場の自然排煙による火災安全計画，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.267-270，2007
- 3) 佐藤雅史，田中哮義，若松孝旺：火災室及び廊下の温度の簡易予測式，日本建築学会構造系論文集 第 489 号，pp.137-145，1996.11
- 4) 松下敬幸，松添高次，久次米真美子，田中哮義：盛期火災時の加圧煙制御システムにおける給気量の簡易算定法，日本火災学会論文集 vol.51 NO.1，pp.11-25，2001
- 5) 社団法人 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧(第 12 版) 3 空気調和・設備設計篇，pp.287-313，1993
- 6) 松下敬幸，寺井俊夫：階段加圧時の気流性状の実測，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.197-200，1985
- 7) 日本建築センター：煙流動及び避難性状予測のための実用計算プログラム解説書(一層煙流動計算)，1990

(2009年3月10日原稿受理，2009年7月29日採用決定)