

分岐・合流部を有するトンネルでの換気計算方法の提案

大成建設（株） 正会員 ○森本 勤、 佐藤 剛、 金子 哲也

1. はじめに

分岐・合流部のない一般的なトンネルでは、「ずい道等建設工事における換気技術指針」¹⁾等を参考に換気計算が行われ、ガイドラインに則った坑内環境が維持されている。しかし、分岐・合流部や枝坑があるトンネルでは期待した換気にならず、追加の換気設備の導入や大幅な設備変更など苦労する場合がある。そこで、本稿では、分岐・合流部を有するトンネルでの換気計算について、簡便に概略の換気量を把握する方法を提案する。

2. 一般的なトンネルの換気計算

2.1 通常の換気計算

分岐・合流部のない一般的なトンネルの場合、上記の「換気技術指針」等を参考にして、以下の手順で計算する。

①所要換気量を各条件で計算し、最大所要換気量 Q_a を求める

（条件：発破後ガス、重機排ガス、切羽作業粉塵、作業者の呼気 等）。

②風管径 D_d を仮に設定し、風管圧力損失 h_d を求める。

h_d = （風管での圧力損失）

$$= \lambda_d \times (\rho / 2) \times (L_d / D_d) \times v_d^2 \times 10^{-3} \quad \text{式 (1)}$$

h_d : 風管の圧力損失 (kPa) λ_d : 風管の圧力損失係数 ρ : 空気の密度 (kg/m³)

L_d : 風管の長さ (m) D_d : 風管の直径 (m) v_d : 風管内の平均風速 (m/s)

③所要換気量 Q_a 、圧力損失 h_d を上回る換気ファンを選定する。



図-1 換気計算概略図-1

2.2 坑道内の換気の戻りを考慮した圧力損失

実際の換気による風の流れは、風管先端から放出後坑内を戻り坑口から排出される。よって、送風ファンによる換気は、風管内だけでなく坑道内を戻る際にも圧力損失が生じる。しかし、通常は、トンネル径は風管径より十分に大きく、坑内風速は小さいため、この圧力損失を無視している。

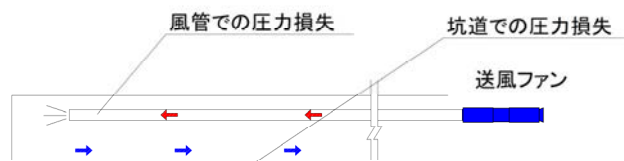


図-2 換気計算概略図-2

h = （風管での圧力損失）+ （坑道での圧力損失）

$= h_d + h_t$

$$= \lambda_d \times (\rho / 2) \times (L_d / D_d) \times v_d^2 \times 10^{-3} + \lambda_t \times (\rho / 2) \times (L_t / D_t) \times v_t^2 \times 10^{-3} \quad \text{式 (2)}$$

h_t : 坑道の圧力損失 (kPa) λ_t : 坑道の圧力損失係数 L_t : 坑道の長さ (m)

D_t : 坑道の直径 (m) v_t : 坑道内の平均風速 (m/s)

分岐・合流部を有するトンネルでは、後述 3. のように分岐・合流部での坑道内の圧力損失により風量が決定されるため、式 (6) に示すとおり坑道内の圧力損失を無視しないことが肝要である。

キーワード トンネル、分岐、合流、換気、連続式、ベルヌーイの式

連絡先 〒450-6047 愛知県名古屋市中村区名駅 1-1-4 JR セントラルタワーズ 47 階

大成建設(株) 名古屋支店 TEL 052-562-7525

3. 分岐・合流部を有するトンネルの換気計算

分岐・合流部があるトンネルの換気を管路における流体の流れと捉えれば、その運動は連続式と運動方程式（損失を考慮したベルヌーイの式）に従う²⁾。例えば図-3に示すような分岐・合流部を有するトンネルにおいて換気を行った場合を考える。換気ファンにより切羽に送った空気は T-1 内を坑口に向かって流れ、T-2 と T-3 に分かれる。この T-2 と T-3 に、どのように空気が分配されるかを以下の計算により求める。

各トンネルの風量を Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、各坑道での圧力損失を h_{t1} 、 h_{t2} 、 h_{t3} 、 h_{t4} 、坑口の送風ファンの圧力を P とする。2.1 の①と同様に所要換気量 Q_a を与えれば、 $Q_a = Q_1 = Q_4$ となる。ここで、T-2 と T-3 で連続式を、T-1 から T-4 において T-2、T-3 経由のそれぞれで損失を考慮したベルヌーイの式を適用する。連続式とベルヌーイ式を連立することにより、 Q_2 、 Q_3 を算定できる。

$$\text{連続式より} \quad : \quad \bullet Q_a = Q_2 + Q_3 \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{ベルヌーイの式より} \quad : \quad \bullet \text{T-1} \rightarrow \text{T-2} \rightarrow \text{T-4} \quad P - h_d - h_{t1} - h_{t2} - h_{t4} = 0 \quad \text{式 (4)}$$

$$\bullet \text{T-1} \rightarrow \text{T-3} \rightarrow \text{T-4} \quad P - h_d - h_{t1} - h_{t3} - h_{t4} = 0 \quad \text{式 (5)}$$

式 (2)、(4)、(5) より

$$h_{t2} = h_{t3}$$

$$\begin{aligned} \lambda \times (\rho/2) \times (L_2/D_2) \times (Q_2/(15\pi \times D_2^2))^2 \times 10^{-3} \\ = \lambda \times (\rho/2) \times (L_3/D_3) \times (Q_3/(15\pi \times D_3^2))^2 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad \text{式 (6)}$$

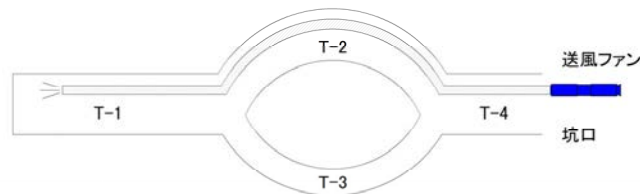


図-3 分岐・合流があるトンネル概略図

式 (6) より、T-2 と T-3 とで圧力損失が同じという結果になる。

一例として、 $L_2=1000\text{m}$ 、 $D_2=10\text{m}$ 、 $L_3=800\text{m}$ 、 $D_3=5\text{m}$ 、所要換気量 $Q_a=2000\text{m}^3/\text{min}$ とすれば、

$$\begin{aligned} 2000 &= Q_2 + Q_3 \quad \rightarrow \quad Q_3 = 2000 - Q_2 \\ (L_2/D_2^5) \times Q_2^2 &= (L_3/D_3^5) \times Q_3^2 \\ \rightarrow (L_2/D_2^5) \times Q_2^2 &= (L_3/D_3^5) \times (2000 - Q_2)^2 \\ \rightarrow (1000/10^5) \times Q_2^2 &= (800/5^5) \times (2000 - Q_2)^2 \\ Q_2 &= 1669 \text{ m}^3/\text{min}, \quad Q_3 = 331 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

上記の結果より、T-3 の直径は T-2 の直径の 1/2 であるのに対し、T-3 の換気量は T-2 の換気量の 1/5 程度となる。分岐・合流が複数個所あるような場合は、未知数が Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ・・・と増えるが、必ず同じ数の方程式が成立するので、全ての未知数を求めることができる。

4. おわりに

以上、一次元の解析ではあるが、手計算レベルの簡便な計算で、分岐・合流部を有するトンネルでの換気について所要換気量を把握する方法を提案した。本手法を実際のトンネル工事に適用し換気ができることを確認している。以下に、本手法のポイントを整理する。

- ・分岐・合流部を有するトンネルの換気計算は、風管での損失だけでなく坑道での損失を考慮することが肝要である。
 - ・連続式と損失を考慮したベルヌーイの式を連立することにより、分岐・合流部を有するトンネルの風量を算定することができる。
 - ・坑道の長さの (1/2) 乗に、坑道径の (5/2) 乗に比例して、各坑道の風量は分配される。
- これを参考に分岐・合流部を有するトンネル現場の換気計画で役立てられると幸いである。

参考文献： 1) 「令和2年粉じん障害防止規則等改正対応版 ずい道等建設工事における換気技術指針」
建設業労働災害防止協会
2) 水理学 吉川秀夫著 等