

覆工コンクリートの養生判定に対するトンネル内温湿度の予測方法について

清水建設 正会員 ○鈴木 圭一
 清水建設 フェロー会員 今津 雅紀
 清水建設 正会員 藏重 幹夫

1. はじめに

トンネル現場においては、覆工コンクリートのひび割れ等を防ぎ、高品質なコンクリートを打設するために、打設後すぐに養生剤を塗布したり、養生シートや養生バルーンで覆うなどの対策がとられることが多い。これは粉じん対策として換気風量が増加したことなどで、従前よりも坑内が乾燥しやすく、外気温が下がる冬期には水和反応に必要とされる相対湿度 80%RH 以上が保てなくなるためである。本報告では、とくにバルーンなどで覆う際に、外気温度や湿度に対する養生区間および養生期間を判定するのに活用できる、簡易なトンネル内温湿度予測式を提案する。計算時の換気方式としては送気方式を想定した。すなわち、図1のように風管により切羽付近まで外気を送風し、それが本坑内を坑口に向かって放出されるものとする。切羽から覆工コンクリート打設（セトル）位置までは吹き付けコンクリートとし、その表面は十分に湿っているものとする。つぎに壁面と気流との熱移動と湿気移動をモデル化し、熱量と湿気に関する収支式を解くことで、打設部付近の温度および相対湿度を求めるものである。

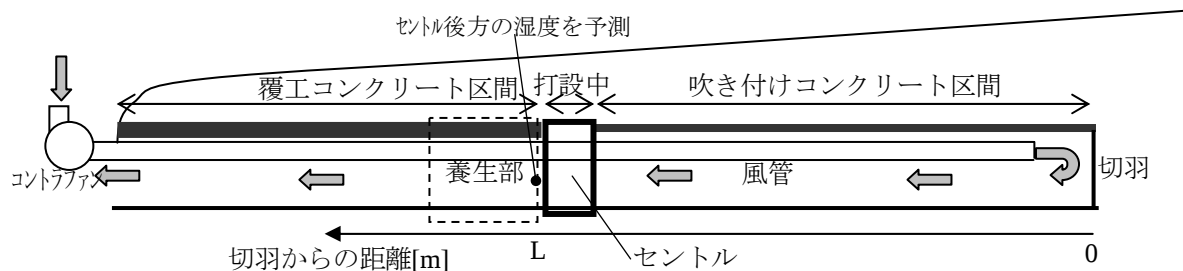


図1 計算対象のイメージ

2. 温度予測式

任意の地点におけるトンネル壁と坑内気流との熱量収支を考える。壁体温度が定常であると仮定すると、気流から壁面への熱流束 q_c [W/m²]は熱貫流率 $K=(1/h+l_c/\lambda_c)^{-1}$ [W/K/m]と気流と定温度層の温度差 T_a-T_{wb} から次式で表される。

$$q_c = K(T_a - T_{wb}) \quad (1)$$

ただし h は対流熱伝達率[W/K/m²]、 l_c はコンクリートの厚さ[m]、 λ_c はコンクリートの熱伝導率[W/K/m]。ここで定温度層とは坑内の影響を受けないほぼ一定温度と考えられる層であるが、一般に山岳トンネルでは湧水の影響で吹き付けコンクリート裏面まで一定温度としても大きな誤差がないと考えられるため、ここでは吹き付けコンクリート裏面を定温度層とした。定温度層の温度に関してデータがある場合はそれを用いればよいが、そうでないときは、近くの気象台での年間平均気温から、対象領域の上部の地表面の年間平均気温を推定し（標高が100m上がると0.6℃低下）、さらにそこから土被り分の地温上昇（100mあたり2~3℃）を加えたものを用いる。また温度 T_0 の気流は、坑内を進むにつれて壁面より暖められ、 $T_{a,L}$ まで温度上昇するとして、風速 u [m/s]の気体が対象領域 $0 \sim L$ [m]を通過する時間 (L/u) における以下の熱収支式が成り立つ。

$$c_p \rho A (T_{a,L} - T_0) = (Q_{in} - \bar{q}_c S) \frac{L}{u} \quad (2)$$

ここで添え字 L は地点 L での値、 0 は切羽付近の値、 c_p は空気比熱[J/kg/K](=1000)、 ρ は空気密度[kg/m³]、 A はトンネル断面積[m²]、 Q_{in} は坑内の単位長さあたりの発熱速度[W/m]、 S はトンネル周長[m]である。また $\bar{q}_c$ は対象領域内における q_c の平均値であり、 T_{wb} を対象領域で一定、 $T_a=(T_{a,L}+T_{a,0})/2$ と仮定すると、

キーワード トンネル施工、覆工コンクリート、品質向上、温度、湿度

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設技術研究所 応用工学グループ keichi@shimz.co.jp

$$\bar{q}_c = K \left(\frac{T_{a,L} + T_{a,0}}{2} - T_{wb} \right) \quad (3)$$

さらに式(3)を式(2)に代入し、整理して、以下の $T_{a,L}$ を求める式を得る。

$$T_{a,L} = \left[\frac{L}{c_p \rho A u} \left\{ Q_{in} + K \left(T_{wb} - \frac{T_{a,0}}{2} \right) S \right\} + T_0 \right] / \left(1 + \frac{KSL}{2c_p \rho A u} \right) \quad (4)$$

(表側の) 壁面温度 $T_w[^\circ\text{C}]$ は $q_c = K(T_a - T_{wb}) = h(T_a - T_w)$ より求められる。なお切羽付近の気流は外気をファンの動力により、風管を通して送り込まれたものである。ファンの発熱および風管での摩擦等の熱の吸収を考慮すると、 T_0 は外気温度 $+2^\circ\text{C}$ 程度と思われる。また今回の検討からは除いたが、吹き付けコンクリートによる壁面と、土壌の路盤面には若干の温度差が考えられるため、今後の課題としたい。

3. 湿度予測式

任意の地点における壁面と坑内気流との湿気収支を考える。壁面から気流への透湿量 $w[\text{kg/s}]$ は平均湿気伝達率 $h_w[\text{kg/m}^2\text{s/Pa}]$ と気流と壁面の水蒸気分圧 f_a , f_w の差から次式で表される。

$$w = h_w (f_w - f_a) \quad (5)$$

気流は坑内をながれるにつれて壁面から透湿量を受けるために絶対湿度 $x[\text{kg/kg}']$ が増加する。対象領域が $0 \sim L[\text{m}]$ のとき湿気の収支式を以下に示す。

$$\rho A (x_L - x_0) = (W + \bar{w}S) \frac{L}{u} \quad (6)$$

W は単位長さあたりの水蒸気発生量 $[\text{kg/m}]$ 、 $\bar{w}$ は対象領域における壁面への透湿量の平均値であるが、計算の簡素化のため、式(5)の f_a には切羽付近の $f_{a,0}$ を代用する。これは坑口付近に向かい温度上昇(水蒸気圧の低下)と水蒸気吸収が同時に起こるため、それらが打ち消しあってそれほど w が変化しないことを考慮している。また $f_w = (f_{w,L} + f_{w,0})/2$ とする。したがって

$$\bar{w} = h_w \left(\frac{f_{w,L} + f_{w,0}}{2} - f_{a,0} \right) \quad (7)$$

吹き付けコンクリートの壁(および路盤)を濡れ面とすれば飽和状態のため、飽和水蒸気圧の計算式より $f_w = 6.11 \times 10^{7.5 \times (T_w/T_w + 273)}$ とする。さらに式(7)を式(6)に代入し、整理して、以下のように地点 L における絶対湿度 x_L を求める式を得る。

$$x_L = \frac{L}{\rho A u} \left\{ W + h_w \left(\frac{f_{w,0} + f_{w,L}}{2} - f_{a,0} \right) S \right\} + x_0 \quad (8)$$

なお切羽付近の絶対湿度 x_0 は、外気の絶対湿度と同じと考えられるため、外気温度および外気の相対湿度から求める。つぎに x_L から水蒸気分圧 $f_{a,L} = P x_L / (0.622 + x_L)$ (P は大気圧 $[\text{Pa}]$)、気流温度 $T_{a,L}$ から飽和水蒸気圧 $f_{s,a,L} = 6.11 \times 10^{7.5 \times (T_{a,L}/T_{a,L} + 273)}$ を求め、相対湿度 $\phi_{a,L} = f_{a,L} / f_{s,a,L} \times 100[\%RH]$ が得られる。

4. 温湿度予測式におけるパラメータに対する課題

本モデルでは対流熱伝達率 h と平均湿気伝達率 h_w が重要となる。 h については各種の理論式、実験式が提案されているが、簡易なものとして建物の屋外側壁面との温熱計算等でよく用いられるユルゲスの実験式 $h = 3.9v + 5.8[\text{W/K/m}^2]$ (v は風速 $[\text{m/s}]$)がある。それに比べ平均湿気伝達率 h_w では十分な研究がないが、Lewiseの関係による $h_w = 7.16h [10^{-9} \text{kg/m}^2\text{s/Pa}]$ が適用できると考えられる。ただしこの関係式は壁面の濡れている部分の比率を1とした場合であるため、部分的に乾いている場合では配慮が必要となる。もっともこれらの値がトンネル現場に適用される際の精度については検証されていない。さらに坑内の発熱速度 Q_m や水蒸気発生量 W は発破や吹き付けなどの工程で生じるが、定量的な測定データは皆無と考えられる。そのため、今後は実際のトンネル現場において計測データを収集し、モデルの検証と改善に努めたい。