

論文 トンネル覆工コンクリート初期ひび割れ解析のためのトンネル坑内 温湿度環境のモデル化に関する研究

中村 明彦*1・國近 光生*2・細田 暁*3・中村 秀明*4

要旨: トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ解析を行うにあたっては、その環境条件として、トンネル坑内の気温や湿度（水蒸気圧）を与える必要がある。トンネル坑内の環境条件は、トンネル坑口からその奥行き方向に温湿度環境が変化するため、奥行きに応じて適切に設定する必要がある。また、トンネル坑内は、施工中は密閉された空間であることから、高さ方向にも温湿度分布が異なっていることが考えられる。本研究では、初期ひび割れ解析での使用を目的に、トンネル坑内の温湿度環境のモデル化を行った。

キーワード: トンネル, 覆工コンクリート, ひび割れ, 乾燥収縮, 外気温, 相対湿度, 水蒸気圧

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの施工段階あるいは施工後1～2年で発生するひび割れの多くは、覆工の機能を著しく損なうものではないが、ひび割れの発生形態によっては、コンクリート片の剥落など第三者に被害を及ぼすなど、構造物の安全性や水密性、耐久性を損なう恐れがある。そのため、これらのひび割れを防止することは、構造物の品質確保やコスト抑制面から非常に重要である。

トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ解析を行うにあたっては、その環境条件として、トンネル坑内の気温や湿度（水蒸気圧）を与える必要がある。トンネル坑内の環境条件は、トンネル坑口からその奥行き方向に温湿度環境が変化するため、奥行きに応じて適切に設定する必要がある。また、施工中は密閉された空間であることから、高さ方向にも温湿度環境が異なっていることが考えられる。

そこで、本研究では、初期ひび割れ解析での使用を目的に、廃線トンネルにおける温湿度の計測結果から、トンネル坑内の温湿度環境を簡易に予測できるモデル式の提案を行った。

2. 廃線トンネルでの温湿度の長期測定

トンネル坑内に冬期発生するつらら防止などのため、トンネル坑内の気温を冬期に計測した例¹⁾や施工期間中のみ計測した例はあるものの、温湿度環境を長期間計測した例は非常に少ない。本研究では、崔らが計測した廃線トンネルでの長期計測データ²⁾をもとにトンネル坑内の温湿度環境について考察する。

2.1 計測が行われた廃線トンネルの概要

計測が行われた廃線トンネルは、中国地方にあるトン

ネル延長が約730m、幅は約3.62～3.80m、高さは約5.24mの廃線トンネルである。トンネルの概要を表-1に示す。温湿度の計測は、2010年6月7日～2011年3月22日までの期間行われている。表-2に各測定期間における坑口の開放状況を示す。

温湿度の計測は、トンネル奥行き方向に8箇所の計測点を配置し行われている。各計測点の高さは地面から30cmである。計測点の配置を図-1に示す。計測点1から4までは北西坑口から、計測点5から8までは南東坑口からの距離で整理する。なお、計測点5から8のデータは、一部のデータが欠損していたり、ノイズが入っていたり、信頼性が劣るため、今回の解析では解析対象に含めない。

表-1 計測した廃線トンネルの概要

項目		具体的な値
トンネル延長		730m
トンネル幅		3.62～3.80m
トンネル高さ		5.24m
トンネル位置	北西坑口	東経：132度12分43秒 (132.211887度) 北緯：34度35分41秒 (34.594778度) 標高：344m
	南東坑口	東経：132度13分00秒 (132.216680度) 北緯：34度35分22秒 (34.589518度) 標高：335m

表-2 計測期間と坑口の開放状況

計測期間	坑口の開放状況	
	北西坑口	南東坑口
6月7日～6月24日	閉鎖	閉鎖
6月25日～10月31日	上部のみ開放	閉鎖
11月1日～11月16日	上部のみ開放	全体の2割開放
11月17日～3月22日	上部のみ開放	閉鎖

※坑口の閉鎖はブルーシート

※11/1～11/16は南東坑口のブルーシートの一部が破損

*1 株式会社テムロ 代表取締役 (正会員)

*2 株式会社森本組 土木本部 博士(工学) (正会員)

*3 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 山口大学大学院 創成科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

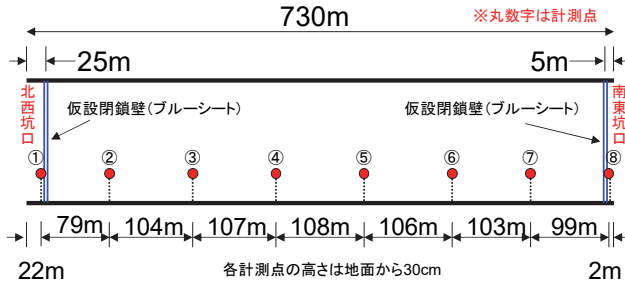


図-1 トンネル坑内の温湿度計測点の配置

2.2 計測結果とその考察

トンネル坑内奥行き方向の気温の計測結果を図-2に示し、相対湿度の計測結果を図-3に示す。計測は10分あるいは30分間隔で行われているが、1年間の傾向を調べるため、日平均気温と日平均相対湿度を求め、日ごとの値をプロットしている。

計測結果からわかるように、気温については、トンネルの奥ほど年変動は小さくなっており、振幅が年間を通して小さくなっている。相対湿度については、夏場はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が低いため、ほぼ90%以上の高湿度であるが、冬場はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が高くなるため、相対湿度は下がっている。

トンネル坑内の気温は、図-2に示すように日によってばらつくため、全体の傾向が把握し難い。そこで、坑内気温の年変動をよりわかりやすく表すため、式(1)に示す余弦関数を用いて、坑内気温を近似した。

$$T = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) \quad (1)$$

ここに、 t は1月1日からの経過日数(日)で、 T は経過日数 t における坑内気温の予測値(°C)である。また、 a_0, a_1 は近似係数であり、 ϕ は位相である。

近似係数の同定は、粒子群最適化(Particle Swarm Optimization)³⁾⁻⁵⁾を用いて、計測点ごとに近似係数と位相(a_0, a_1, ϕ)を最適化(同定)した。同定された近似係数および位相を表-3に示し、それを用いて近似した坑内気温(計測点1~4)を図-4に示す。

余弦関数で近似した気温は計測した気温を良く近似しており、その温度履歴は、トンネルの奥になるほど年変動は小さくなり、ピークとなる時期も遅れている。そこで坑口からの距離と年振幅などの関係を表-4に示す。

表-4より、トンネル坑内の気温は、トンネルの奥ほど一定値に近づき、年振幅は小さくなる。すなわちトンネルの奥ほど気温の日変動や年変動は小さくなり、一定

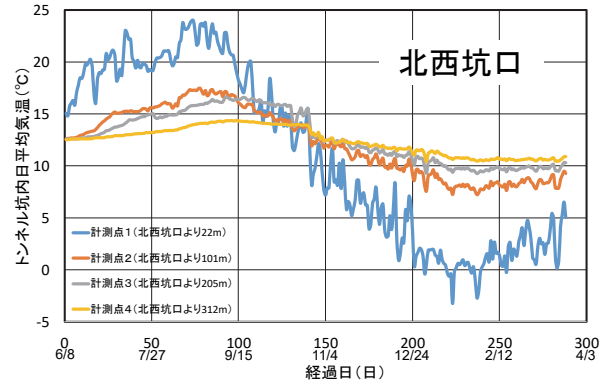


図-2 トンネル坑内気温計測結果

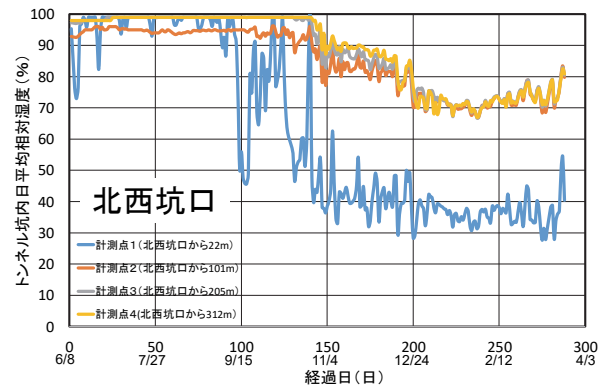


図-3 トンネル坑内相対湿度計測結果

表-3 同定された近似係数と位相

	a_0	a_1	ϕ
計測点1	21.923	10.529	308.983
計測点2	23.866	4.196	293.538
計測点3	24.700	3.214	281.574
計測点4	24.313	1.801	276.451

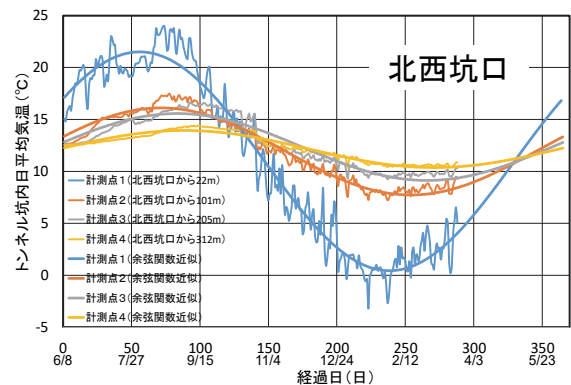


図-4 計測された気温の余弦関数による近似

温度に近づく。また、トンネル坑内の年平均気温も奥ほど高くなっているが、これは不易層や地温勾配の影響と思われる。さらに、最高温度や最低温度が表れる時間(日数)はトンネル奥ほど遅くなっていることがわかる。これは熱が地盤内を伝わるのに時間が掛かるため、時間的なずれが生じているものと思われる。

表-4 坑口からの距離と年振幅・ピーク遅れ

観測点	北西坑口			
	1	2	3	4
坑口からの距離 (m)	22	101	205	312
年最高気温 (°C)	21.5	16.1	15.6	14.0
年最低気温 (°C)	0.4	7.7	9.1	10.4
年平均気温 (°C)	11.0	11.9	12.4	12.2
年振幅 (°C)	10.5	4.2	3.2	1.8
年最高気温の経過日 (日)	56	71	83	89
年最低気温の経過日 (日)	238	254	266	271

3. トンネル坑内気温のモデル化

前章でのトンネル坑内温湿度環境の長期間計測より、トンネル坑内では、奥に行くほど、気温の日変動や年変動が小さくなり、年平均気温が上がることで、年間の最高温度や最低温度の現れる時間も遅れることが計測データより分かった。そこで本章では、初期ひび割れ解析に使えるように、トンネル奥行き方向にこれらの傾向をモデル化する。

3.1 トンネル坑内気温モデル式の提案

近藤は著書⁶⁾の中で深さ z (m)における地中温度は、余弦関数を用いた以下の式で計算できると記している。

$$T_G = A \cos(\omega t - \varepsilon) + T_{ave} \quad (2)$$

$$A = A_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \quad (3)$$

$$\varepsilon = z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} \quad (4)$$

ここに、 T_G は深さ z (m)における地中温度(°C)、 A は深さ z (m)における振幅(°C)、 t は時間(hour)、 ε は深さ z (m)における位相遅れ、 T_{ave} は地表面での年平均温度(°C)である。また、 A_0 は地表面における振幅(°C)、 ω は角振動数(1/sec)、 κ は地中の熱拡散率(m²/sec)である。

つまり、これらの式は、地中での温度振幅は、深さ方向に指数関数的に減衰し、位相遅れは線形であることを示している。なお、他の文献^{例えば 7)}にも地中温度の計算式が示されているが基本的には近藤の式と同じ考えのものが多く。

トンネル坑内は水平方向に掘削され、掘削による空洞があるため、地中温度の傾向とは異なることが予想されるが、初期ひび割れ解析に簡便に用いることを目的としているため、近藤の式を基本にモデルを構築する。構築したモデルを式(5)~(8)に示す。

$$T_z = (T_{ave} + \alpha_z) + A_0 \cdot \beta_z \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_{max} - \gamma_z)\right) \quad (5)$$

$$\alpha_z = K_1(1 - \exp(-C_1 \cdot z)) \quad (6)$$

$$\beta_z = \exp(-C_2 \cdot z) \quad (7)$$

$$\gamma_z = K_3(1 - \exp(-C_3 \cdot z)) \quad (8)$$

ここに、 t は1月1日からの経過日数(日)、 z はトンネルの奥行き(m)、 T_z は経過日数 t における奥行き z の坑内気温(°C)、 T_{ave} は坑口における年平均気温(°C)、 A_0 はトンネル坑口における年振幅(°C)、 t_{max} は気温が最高になる経過日で日本ではおおよそ220日である。また、 α_z 、 β_z 、 γ_z は、式(6),(7),(8)で与えられ、それぞれ年平均気温の補正值(°C)、振幅減少、位相遅れ(日)であり、 K_1, K_3 は比例定数、 C_1, C_2, C_3 はそれぞれトンネルによって決まる係数である。

つまり、上式は、トンネル坑口における年平均気温と年振幅ならびに C_1, C_2, C_3 がわかればトンネルの坑内気温が計算できることを意味する。

3.2 トンネル坑内気温の係数算定

この節では、実測されたトンネル坑内の温湿度計測結果から、式(6),(7),(8)の各係数を算定する。

(1) 年平均気温の補正值

年平均気温の補正は、トンネル奥行き方向に年平均気温が上昇することを表現するものであり式(6)で計算する。地中には不易層と呼ばれ、年間を通じて温度が一定となる領域が存在し、その温度は年平均気温より1~2°C高いと云われている。式(6)は、地中における年平均気温が指数関数的に増加すると仮定したものである。なお、最大補正温度 K_1 は、不易層温度が年平均気温より1~2°C高いことから2°Cとしている。

各計測点における年平均気温を坑口からの距離との関係で整理したものを図-5に示す。計測点4(奥行き312m)は全体的な傾向から外れているものの、その他の計測点については、指数関数的に増加し、トンネル奥ほど年平均温度が高くなっている。計測点4を除いてそれぞれの奥行きについて指数関数で回帰した結果は青鎖線のようになり、 $C_1=0.0104$ となった。

(2) 振幅減少

トンネル坑内の気温は、トンネルの奥ほど一定値に近づき、その振幅は小さくなる。振幅減少率は、気温の振幅が減少する割合である。図-6に坑口からの距離と年振幅との関係を示す。図中の青鎖線は、指数関数で回帰した結果であり、このトンネルの場合は、 $C_2=0.0077$ となった。

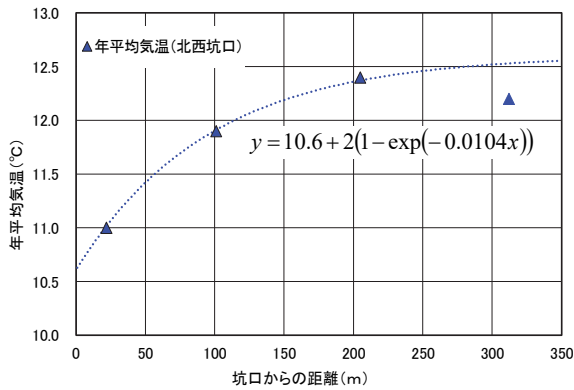


図-5 坑口からの距離と年平均気温

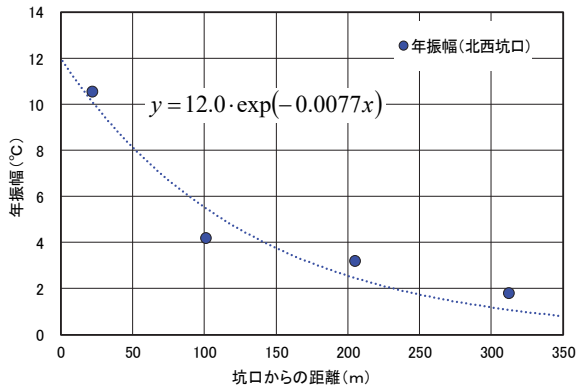


図-6 坑口からの距離と年振幅

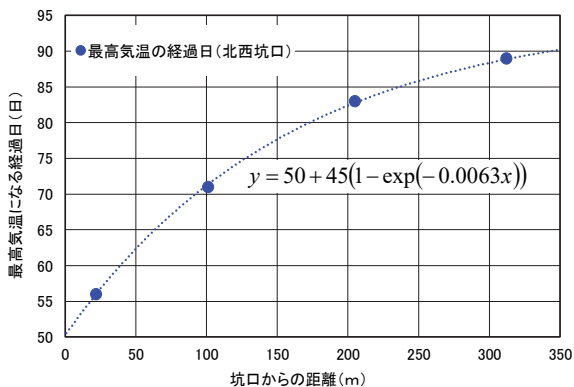


図-7 坑口からの距離と最高気温になる経過日

表-5 坑内気温推定に用いた設定値

変数	設定値	備考
T_{ave}	10.6	坑口年平均気温 (実測値より推定)
A_0	12.0	坑口年振幅 (実測値より推定)
t_{max}	208	最高気温経過日 (実測値より推定)
K_1	2.0	2.0°Cで固定
K_3	45	45日で固定
C_1	0.0104	実測値より算定
C_2	0.0077	実測値より算定
C_3	0.0063	実測値より算定

(3) 位相遅れ

最高気温や最低気温が表れる日数はトンネル奥ほど遅くなっている。これは地盤表面の熱が地盤内を伝わるのに時間が掛かるためである。図-7に坑口からの距離と

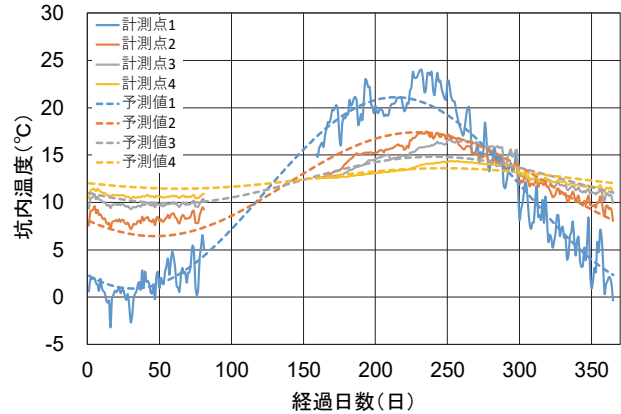


図-8 坑内気温の実測値と予測値の比較

最高気温になる経過日との関係を示す。図中の青鎖線は、指数回帰した結果であり、このトンネルの場合は、 $C_3=0.0063$ となっている。

また、気温が最高になる経過日 t_{max} は、日本ではおおよそ220日であるが、本トンネルの坑口では、6月7日から50日経過した日が最高気温になる経過日となっており、このトンネルでは $t_{max}=208$ となる。

3.3 算定値を用いたトンネル坑内気温の予測

算定された係数を用いて、トンネル坑内気温の予測を式(5),(6),(7),(8)で行い、実際の計測結果との比較を行った。設定した数値の一覧を表-5に示し、実測値との比較を図-8に示す。

予測値は、比較的良く予測できているが、計測点2では予測値の振幅が大きくなっており、計測点4では予測値の振幅が小さくなっている。これは図-6からわかるように指数減衰による振幅減少が回帰と実測で差があるためである。

C_1, C_2, C_3 はトンネルによって決まる係数であり、本研究では計測結果をもとにこれらの係数を定めているが、新設トンネルでは計測結果がないため、これらの値をあらかじめ予測しておく必要がある。信頼性できる値を得るためには、今後種々のトンネルで様々な条件での計測データの蓄積が必要不可欠であるが、本研究と同規模のトンネルでは、一般的な傾向はトンネルごとにそれほど大きく変わることはないため、本研究での値が係数設定での参考値となる。

本研究での主目的はモデル式を提案することであるため、一例での検討結果では係数の値そのものの信頼性は十分とは云えないが、モデル式の妥当性は検証できた。

3.4 外気温予測モデルを利用した坑内気温の予測

著者等は、位置の情報である経度 $E(x)$ 、緯度 $N(y)$ 、標高 $H(z)$ と時間の情報である1月1日からの経過日数 $D(t)$ を入力することにより任意の地点における任意の日(経過日数)の外気温(日平均気温の30年平年値)を求める

表-6 外気温予測モデルへの入力と出力

入力	北西坑口	経度	132.21194 (132度 12分 43秒)
		緯度	34.59472 (34度 35分 41秒)
		標高	344m
出力	坑口年平均気温 T_{ave}	12.9°C	
	坑口年振幅 A_0	11.8°C	
参考	加計 アメダス 観測点	経度	132.32 (132度 19分 12秒)
		緯度	34.61 (34度 36分 36秒)
		標高	210m

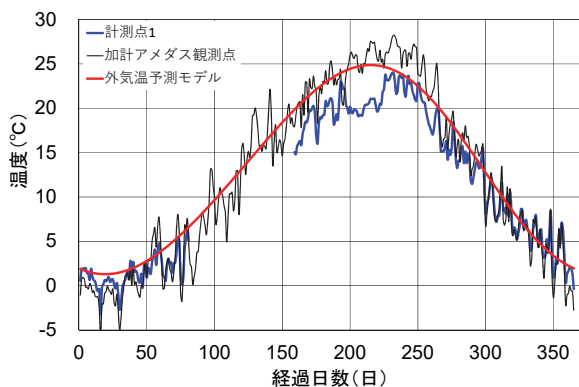


図-9 外気温予測モデルの妥当性

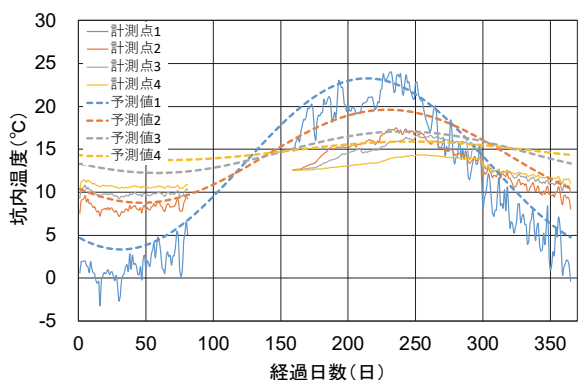


図-10 坑内気温の実測と予測値との比較

モデルを構築している^{8),9)}。初期ひび割れ解析を行う際に、過去に施工された構造物について検討する場合は、既に実測された気温があるが、新設構造物の場合には実測された気温が存在しないため、過去の気象観測記録から類推する必要がある。著者等が3.1節で提案した坑内気温モデルを使うためには、坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 を設定する必要がある。そこで、著者等の外気温予測モデルにトンネル北西坑口の緯度、経度、標高を入力し、年間の気温履歴から坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 を算出した。外気温予測モデルへの入力値とその出力結果を表-6にまとめる。また、外気温予測モデルの妥当性を確認するため、算定された外気温とともに、北西坑口に近い計測点1の実測温度と北西坑口から一番近くにある加計アメダス観測点の同期間における観測温度を図-9に示す。なお、北西坑口と加計アメダス観測点の標高が異なるため、標高差に気温減率

0.0065 (°C/m) を掛けたものをアメダス観測温度から減じて標高差の影響を除いている。図-9より外気温予測モデルは、計測点1や加計アメダス観測温度と比べ全ての期間において温度が少し高めに算出されているが、外気温は年ごとにばらつくため、30年平年値との多少の差はやむを得ないものとする。

参考のため、外気温予測モデルから算出された坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 を用いて、坑内温度を再度算出する。なお、坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 以外の値は、表-5の値を用いた。予測結果を図-10に示す。

外気温予測モデルでは、坑口の年平均気温が高めに算出されているため、全体的に坑内温度が高く予測されているが、年振幅等は、外気温予測モデルから算出した値とほぼ同様であり、新設構造物の場合には外気温予測モデルの算出結果を利用可能である。

4. トンネル坑内相対湿度のモデル化

4.1 トンネル坑内相対湿度の概要

トンネル坑内の相対湿度は、図-3に示すとおりであるが、夏場はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が低いため、ほぼ90%以上の高湿度であるが、冬場はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が高くなるため、相対湿度は下がっている。相対湿度 RH (%) は、式(9)に示すように水蒸気圧 P_v (hPa) を飽和水蒸気圧 P_s (hPa) で割ったものである。また、温度 T (°C) と飽和水蒸気圧との関係は、Tetensの式¹⁰⁾を撰氏に換算した式(10)で表すことができる。

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (9)$$

$$P_s(T) = 6.1078 \exp \left\{ \frac{17.27(T - 0.01)}{T + 237.29} \right\} \quad (10)$$

飽和水蒸気圧 P_s は、ある温度において空気中に含むことができる最大の水蒸気圧であり、温度が高いほど、大気中にたくさん水分を含むことができる。

トンネルにおいて、夏場は坑内よりも坑外の気温が高いため坑外の水蒸気圧は大きい。坑外の空気が坑内に流れ込み、気温が低下すると飽和水蒸気圧は小さくなり、飽和水蒸気圧を越えた水分は結露する。このため、坑内の水蒸気圧はほぼ飽和水蒸気圧に等しくなり、相対湿度は100%に近くなる。一方、冬場は坑内よりも坑外の気温が低いため坑外の水蒸気圧は小さい。坑外の空気が坑内に流れ込み、気温が上昇すると飽和水蒸気圧が大きくなるため、相対湿度は小さくなる。

4.2 トンネル坑内相対湿度モデル式の提案

著者らの文献9)の論文にも示したが相対湿度は水蒸気

圧と気温が関係するため、ばらつきが大きい。特に計測点1は、ブルーシートの外側に位置するため、風の影響などを受けてばらつきが大きくなっている。図-3に示すように奥行き100m以上の計測点2,3,4は相対湿度が比較的安定しているが、計測点1はかなりばらついており、信頼性が劣る。そこで、相対湿度の解析は、奥行き100m以上について行う。

余弦関数を用いた相対湿度のモデル式を式(11)に示す。

$$RH_z = RH_{ave} + A_z \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_{max})\right) \quad (11)$$

ここに、 t は1月1日からの経過日数(日)、 z はトンネルの奥行き(m)、 RH_z は経過日数 t における奥行き z での坑内相対湿度(%)、 RH_{ave} は年平均相対湿度(%)であり、 A_z は相対湿度の年振幅(%)、 t_{max} は位相でおおよそ220日である。年平均相対湿度 RH_{ave} および年振幅 A_z は、トンネルの奥行きによって変わる値である。

計測点2,3,4について年平均相対湿度、年振幅を求めた結果を丸めたものを表-7に示し、その値を用いて予測した相対湿度を図-11に示す。予測した相対湿度は実測の相対湿度と良い対応を示しており、この予測式での近似が可能である。しかしながら、今回の設定値は、トンネル奥行き100~300m程度を対象としており、さらに一例での計測結果での値である。信頼性の高い設定値を得るには、種々のトンネルのデータを蓄積し、解析を行う必要がある。

4. まとめ

本研究は、トンネルの初期ひび割れ解析での利用を念頭に、トンネル坑内の温湿度環境のモデル化を行った。一例での検討であるため、係数の値そのものの信頼性は低いものの、温湿度環境を算定するための計算式の構築や外気温予測モデルの利用について道筋をつけることができた。今後は、計測データを蓄積し、適切な係数値を算出し、トンネルの設計に役立てたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、近畿大学工学部建築学科の崔軍教授には、トンネル坑内温湿度データの提供をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

また、本研究はJSPS 科研費 15K06165(研究代表者：中村秀明)の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 須藤敦史, 三上 隆, 岡田正之, 河村 巧: 寒冷地トンネル内の気温変動について, トンネル工学研究論

表-7 坑内湿度推定に用いた設定値

計測点 (奥行き)	設定値		
	計測点2 (101m)	計測点3 (205m)	計測点4 (312m)
年平均相対湿度 RH_{ave} (%)	85	90	95
相対湿度の年振幅 A_z (%)	15	20	25
経過日数 t_{max} (日)	220		

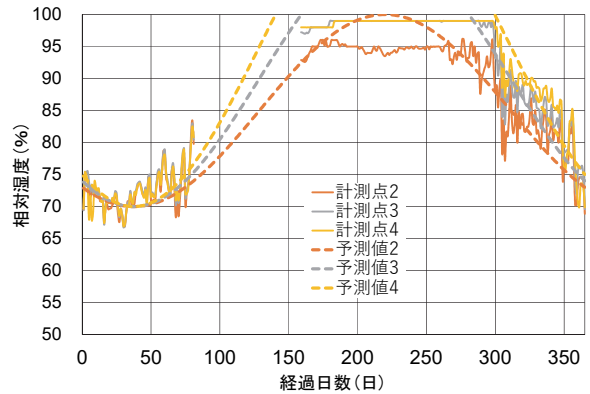


図-11 坑内相対湿度の実測と予測値との比較

文・報告集, 第10巻, pp.251-256, 2000.11

- 2) 長谷川健, 崔軍, 湊政樹, 恩庄亜美, 橋本康平: 廢線トンネルの熱環境に関する長期測定, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 34, pp.131-132, 2010.
- 3) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.: *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- 4) Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle swarm optimization, *Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.
- 5) 中村秀明, 王桂萱, 江本久雄, 宮本文穂: Particle Swarm Optimizationによるマスコンクリートの熱伝導逆解析, 土木学会論文集E, Vol. 62, No. 1, pp. 107-118, 2006.
- 6) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, p.150, 1994.
- 7) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, pp.72-73, 1986.
- 8) 中村秀明, 中村明彦, 河村 圭: マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの精度向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1273-1278, 2013.
- 9) 中村明彦, 國近光生, 河村 圭, 中村秀明: コンクリート構造物耐久性評価のための気象環境条件のモデル化に関する研究, 土木学会論文集E2, Vol.72, No.3, pp.288-303, 2016.
- 10) Murray, F. W.: On the computation of saturation vapor pressure, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, pp. 203-204, 1967.