

トンネル内温熱環境シミュレーション検証用模型実験

環境工学研究部 熱・空気流動研究室

主任研究員 斎藤 寛之

1. はじめに

地下鉄道のトンネルは山岳トンネルに比べて自然換気による熱の除去が難しい。この問題に対して、これまで様々な検討と対策が行われており、地下鉄のトンネルには機械換気装置を設置することが現在では標準的とされている¹⁾。エネルギー消費量のさらなる削減を目指す観点から、その機械換気装置や地下駅の冷房装置の必要容量を正確に見積もることの重要性が以前より増していると言える。そのような検討を行うための、地下鉄に特化した流れ・温熱環境シミュレーションプログラムとしては、SES (Subway Environment Simulation)²⁾ などがある。一方で、鉄道総研では新幹線などにも対応できるように圧縮波の影響も考慮したトンネル内圧力変動シミュレーション^{3), 4)}によりトンネル内風速を計算し、そこで得られた風速を入力として、熱の計算を実施するためのトンネル内温熱環境シミュレーション⁵⁾の開発を進めてきた。トンネル内温熱環境シミュレーションの計算精度を調べるための第一段階として、定常理論による理論解との比較を行った。その結果、トンネルに流入する空気温度が時間的に一定とする境界条件を設定した場合、シミュレーションによる計算結果と理論値がほぼ一致することを確認した。しかし、実際の地下鉄道では、換気のために取り入れる外気(境界条件)は日変化・季節変化により温度が変化し、それに伴いトンネル内温度も時間的に変化する。検証のための次の段階として地下鉄トンネル内の熱移動の基本的な部分を再現する実験装置を製作し、トンネル内温度の時間変化について実験結果による計算結果の検証を試みた。本発表ではその検証実験について報告する。

2. シミュレーション手法の検証方法

シミュレーションによる検討を行う際には、そのシミュレーションの計算精度を把握することが重要になる。シミュレーションの計算精度を最終的に評価するためには、境界条件の詳細が明らかにされている現地試験結果とシミュレーション結果の比較が必要である。トンネル内温熱環境シミュレーションの場合、対象とする鉄道トンネルの長さが数キロメートルから数十キロメートルと規模が大きいと、実測において地中温度等の境界条件を把握することは容易ではない。また、性質の異なる地層が複雑に重なるトンネル周囲の地盤の熱物性値を詳細に調べることも困難である。そこで、過去の現地試験結果との比較や新たな現地試験の実施を検討する前に、単純形状模型を用いて精密な実験を行うことにより計算結果を検証することとした。シミュレーションのモデル化の際に採用した、「トンネルの壁面から10m以上離れるとトンネル周囲地盤の温度が時間・空間的に一定となる」という仮定が正しいものとして、トンネル壁面から10m以内の地盤を再現した円筒形のトンネル模型を中心に構成される実験装置を製作した。精密な実験を行うために、再現する現象をトンネル内の基本的な熱移動現象に絞り、単

純な形状および構成の実験装置とした。この実験装置では、トンネル周囲の地盤に相当する部分を熱物性値が既知の均質な材料を使用して再現している。また、トンネル内およびトンネル周囲地盤内の水による熱移動は再現していない。そのようなトンネル模型を用いた模型実験により、トンネルに給気される空気温度を時間変化させた際のトンネル内の温度の時間変化（動的応答）を計測し（図1）、シミュレーションにより計算した温度の時間変化と比較することにより、トンネル内温熱環境シミュレーションの基本的な熱移動計算手法の検証を行った。このシミュレーションの計算精度を 1°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 程度の誤差で調べることを目標として、測定精度の高い温度センサーを使用して実験を行った。

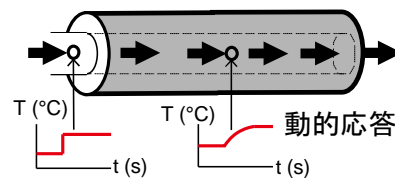


図1 検証実験のイメージ

3. トンネル内温熱環境シミュレーション検証用模型実験

(1) 実験装置

トンネル内温熱環境模型実験装置は、トンネルを模擬した肉厚アクリル円筒（以下、トンネル模型）の内側に外気を模擬した空気を熱風発生機により送風する装置である（図2）。トンネル模型は、外径 150mm、内径 27mm、長さ 5000mm のアクリル製の円筒である。これは小断面単線地下鉄トンネルの駅間 1 区間（長さ 800m を想定）について、トンネル壁体とその周囲の岩または土を一体の均質な地盤とみなし、壁面内側から深さ約

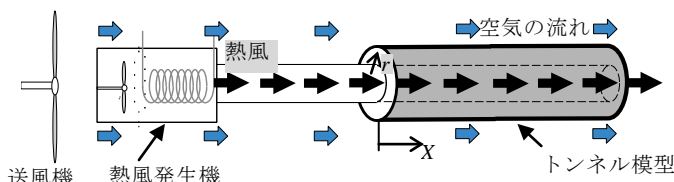


図2 模型実験装置の概念図

10m 以内の部分をも $1/160$ 縮尺で再現したものである。熱風発生機は、取り入れた外気をヒーターにより設定温度まで加熱・温度制御し、一定風速で送風する装置である。熱風発生機の吹き出し口をトンネル模型の開口部にホースにより接続してトンネル内部に加熱空気を送風し、同時に別の送風機によりトンネル模型周囲の空気を強制対流させた。トンネル模型外表面温度は、外気温度の影響により時間変動するが、周囲の空気を強制対流させることによりトンネル模型長手方向の表面温度差を 2°C 程度以下に抑えることができる。当初は、トンネル模型の外表面温度を時間的、空間的に一定に制御することを目標としたが、予備実験結果を踏まえて方針を変更し、時間変動する境界条件を測定し、比較検証のシミュレーションの入力として使用することにより、実験とシミュレーションの条件を一致させることとした。

(2) 測定方法

トンネル内空気温度、トンネル模型外表面温度、トンネル模型内部アクリル温度を測定精度と安定性が高い JIS A 級の 4 線式測温抵抗体を使用して測定した。このセンサーは、例えば、温度 20°C の場合の測定温度の許容差が $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ であり、目標とする測定精度（誤差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度）を満たしている。トンネル内空気温度は、直径 1.6mm のパイプ型測温抵抗体によりトンネル長手方向に 7 点で測定した。トンネル模型内部アクリル温度は、埋め込み型のフィルム型測温抵抗体によりトンネル長手方向に 2 断面において、それぞれトンネル半径方向に 2 点と 3 点、計 5 点で測定した。トンネル模型外表面温度はフィルム型測温抵抗体によりトンネル長手方向に 8 点で測定した。トンネル模型内部を流れる空気風速は、トンネルの中心に簡易型の熱

線風速計を設置し、その位置の風速を計測した。その計測結果と予備実験により得られたトンネル模型内の風速分布から流量を求めた。また、送風機を使用して強制対流させたトンネル模型周囲の風速は、トンネル模型の影響を受け局所的に風向が3次元的に変化することから、3次元超音波風速計により計測した。

(3) 実験手順

まず熱風発生機の設定温度を30°Cに設定し、5時間以上送風を継続した。トンネル模型が、熱的に定常に達したと判断した時点で、設定温度を45°Cまで上げた。その後1時間以上送風を続けた。この間、トンネル内空気温度、トンネル模型外表面温度、トンネル模型内部アクリル温度、トンネル内風速をサンプリングレート5Hzで測定した。トンネル模型周囲風速は別途10Hzで測定した。熱風発生機により発生させたトンネル内の風速は7.3m/sでほぼ一定であった。また、トンネル模型周囲風速の平均値は約0.9m/sであった。

4. シミュレーション手法の概要

トンネル内温熱環境シミュレーションでは、海底トンネルを対象とした温熱環境予測手法⁶⁾に基づき、トンネル内の空気の流れを1次元で、トンネル周囲地盤を2次元軸対称形状でモデル化しており、基本的にはトンネル内空気温度に関する基礎方程式(式(1))とトンネル周囲地盤に関する基礎方程式(式(2))を連立して解くことによりトンネル内の温度の時間変化を計算する。

$$c_a \rho_a A \left(\frac{\partial \theta_a}{\partial t} + U \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right) = h_a S (\theta_{c0} - \theta_a) + A \lambda_a \frac{\partial^2 \theta_a}{\partial x^2} \dots (1)$$

$$c_c \rho_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \right) S + \lambda_c \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} \dots (2)$$

ここで、 A : トンネル断面積、 c_a : 空気の定圧比熱、 λ_a : 空気の熱伝導率、 h_a : 空気と壁面の熱伝達率、 S : トンネル断面周長、 t : 時間、 U : トンネル内風速、 x : トンネル長手方向の距離、 θ_a : 空気温度、 θ_{c0} : 壁面温度、 ρ_a : 空気密度、 c_c : 地盤の比熱、 r : トンネル中心からの半径方向の距離、 θ_c : 地盤温度、 λ_c : 地盤の熱伝導率、 ρ_c : 地盤密度である。

このシミュレーションは、トンネル内およびトンネル周囲地盤内の水による熱移動を考慮する機能を持つが、実験の状況に合わせるためにシミュレーションの機能を制限し、水の影響は考慮しないものとする。地盤温度は、トンネル内壁面から一定距離離れると、地盤温度が変化しない定温度層に達すると仮定しているため、トンネル周囲地盤をモデル化した領域の外表面の境界条件は、時間的、空間的に一定温度となる。ところが、今回開発した模型実験装置の外表面温度は空間的に一定であるが、時間的には変動するため、実験状況に合わせることにした。そのため、模型実験と比較するためのシミュレーションにおいて、トンネル周囲地盤の境界条件として実験で測定した時系列データを入力値として使用することとした。数値計算のために式(1)、(2)の離散化を行うが、トンネル内空気とトンネル模型内部アクリル部分の x 方向の格子点間隔を19mmの等間隔に設定し、270分割した。トンネル模型内部アクリル温度の r 方向の格子点間隔は原則的に内側の格子点ほど短く設定し、0.2mmから8.7mmの不等間隔で16分割した。計算の時間刻みは0.2sに設定した。

5. トンネル内温熱環境シミュレーションの検証

トンネル内温熱環境シミュレーションを検証するために、シミュレーションによる計算結果と模型実験結果を比較する。図3、4にトンネル模型内空気温度およびトンネル模型内部アクリル温度の時系列データの比較を示す。図の横軸に時間、縦軸に温度を示す。熱風発生機の設定温度を30°Cから45°Cに上げる直前から上げたあとのデータである。点線が実験結果、実線がシミュレーションによる計算結果を示す。

図3はトンネル内の空気温度($X=5000\text{mm}$)についてのシミュレーションによる計算結果と実験結果の比較である。トンネル内の空気温度については、実験結果とシミュレーションによる計算結果の差は約0.5°C程度以下であった。

図4はトンネル模型の $X=2250\text{mm}$ 断面、トンネル中心からの距離 r が27mm(トンネル内壁から深さ13.5mm)でのトンネル模型内部アクリル温度の計算結果と実験結果の比較である。トンネル模型内部アクリル温度についても、実験結果と計算結果の差は約0.5°C程度以下であった。

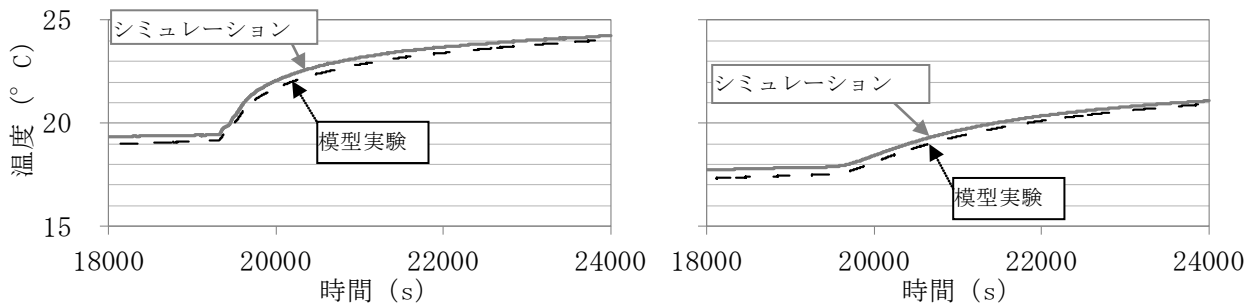


図3 トンネル内空気温度 ($X=5000\text{mm}$) の 実験結果と計算結果の比較
図4 トンネル模型内部アクリル温度 ($X=2250\text{mm}$, $r=27\text{mm}$) の実験結果と計算結果の比較

6. おわりに

トンネル内温熱環境シミュレーションの計算の基本的な部分である、トンネル内の空気とトンネル周辺の地盤の中の熱移動および相互の熱のやり取りを検証するための模型実験を行った。その模型実験と、模型実験を再現したシミュレーションの計算結果から以下のことが明らかになった。

(1) トンネル内温熱環境シミュレーションによる計算結果と模型実験結果の差が約0.5°C以内であることから、シミュレーションによる数値解析の誤差は0.5°C程度である。

(2) 本検証結果を踏まえ、今後、外気温、トンネル内風速の設定方法や、ここでは省略したトンネル流水の影響など、他の誤差要因について検討する必要がある。

文献

- 1) 我満勝輝：地下鉄の換気・冷房の現状と問題点，空気調和・衛生工学，Vol.55，No.3，pp.205～210，1981
- 2) Kennedy, W. D. et.al: Subway Environmental Design Handbook, Vol.II, U. S. Dept. of Transportation, 1976, B27-B39
- 3) 山本彬也：新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気，鉄道技研報告，No.871，1973
- 4) 飯田雅宣，前田達夫：トンネル内圧力変動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.4，No.7，pp.54～62，1990
- 5) 梶山博司：地下鉄道の温熱環境シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.11，No.10，pp.41～46，1997
- 6) 井口裕雄：縦流換気を行う長大トンネルの温湿度，日本機械学会論文集（B編），Vol.51，No. 463，pp. 928～935，1988