

山手トンネル坑内高温化の現状分析と換気増風運転による温度低減効果の検証

横浜国立大学 学生会員 ○中村 颯一郎 横浜国立大学 フェロー会員 山田 均
横浜国立大学 フェロー会員 勝地 弘 横浜国立大学 正会員 金 恵英

1.はじめに

都市部の長大地下トンネルの一つである山手トンネルは坑内の高温化が問題となっている。高温化が顕著となる8月は昼夜問わず月平均気温が40℃以上となり、最高気温は48.3℃に及ぶ(図1)。トンネル内部の高温環境による二輪車運転手や点検作業員に対する負担はトンネル内の快適性・安全性を損なう重要な課題であり、これは解消しなければならない。

山手トンネルでは高温化対策の一つとして換気ファンの増風運転が平成25年度から実施されてきた。しかしながら、増風運転による温度低減効果が定かでないことに加え、年間数億円の高いコストが課題となり改善が必要とされている。そこで、首都高速道路(株)との共同研究により、本研究では換気ファン増風運転の温度低減効果定量化とコスト削減を目的として現場計測、熱収支解析、3次元熱流体解析を実施、複数視点から目的達成を目指した。

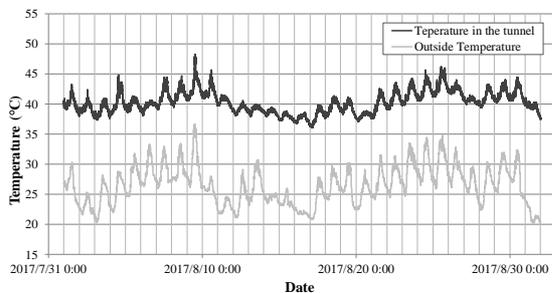


図1 坑内気温の推移 - 最高気温観測地点

2.現場計測

現状把握及び、熱流体解析の境界条件設定のために首都高速道路(株)の各種観測データを整理・分析した。加えて、本研究チームにて二度の現場計測を行った。観測データから図2のように山手トンネルの内回り、外回りともに年間を通してトンネル下流側での温度上昇が顕著であることが確認された。加えて、図3に示すサーマルカメラによるトンネル躯体温度分布の計測から、車両走行部分の面状熱源

を確認し、熱流体解析モデルに適用した。

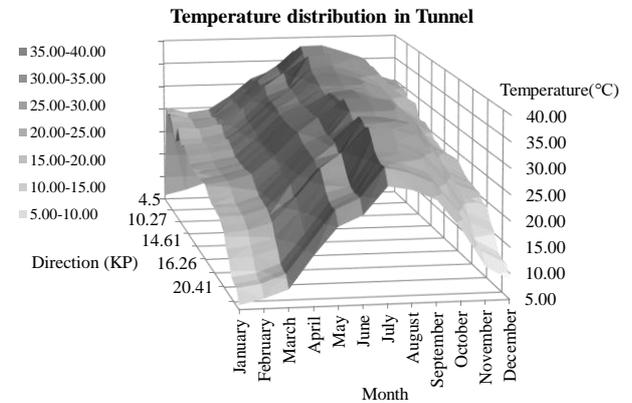


図2 トンネル内温度概要 - 内回り年間分布

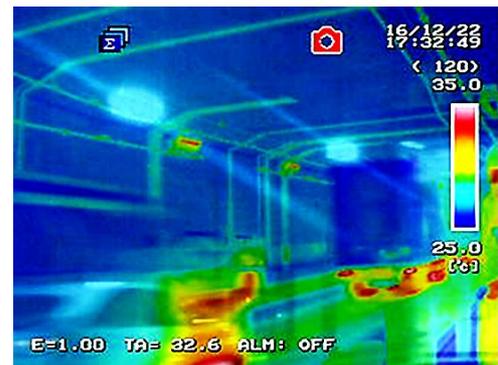


図3 トンネル内温度分布 - サーマルカメラ

3.熱収支解析

熱収支解析では坑内温度に支配的に作用する要因を特定するために、熱力学第一法則に基づき、坑内温度を順次算定する一次元の解析を行った。熱収支解析の結果と実測値の比較を通して坑内温度に対して支配的な要因を交通排熱量、車線軸方向風による熱移動量、横流換気による熱移動量、空気-躯体間熱移動量の4つと特定した。

交通排熱量は実測されている交通量と既往の報告¹⁾から求めた1台当たりの排気エネルギー量との積をとって算出している。縦横換気による熱移動量は実測値の各換気質量風量と各気温から算出した。空気-躯体間の熱移動量は山手トンネル内回りに5

キーワード コスト管理, 品質管理, 熱流体解析, CFD, 横流換気, 縦流換気

連絡先 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL045-339-4041

箇所、外回りに3箇所設置された熱流束計の実測データから算出している。各計測点における6月の平均熱移動量とトンネル深さを図4に示す(ただし、躯体が吸熱する方向の熱移動を負の方向としている)。図4からトンネル深さと躯体吸熱量が比例関係にあることが確認された。また、熱収支解析の結果から、普通車排熱量と大型車排熱量の比、躯体吸熱量が車両排熱量の約10%~80%であること等を明らかにした。

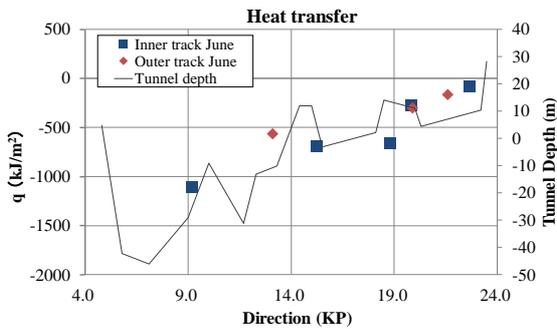


図4 躯体吸熱量とトンネル深さの関係

4.熱流体解析

本研究における熱流体解析ソフトはStarCCM+を使用している。本解析モデルは非圧縮流体を対象とした3次元定常解析であり、乱流モデルはRANSの二方程式モデルである修正k-εモデルを使用している。また、前述の4つの要因に着目すると共に、本研究チームで実施した長期現場計測から得られた知見(舗装部分の面状熱源、ダクト-フリー間のキャリブレーション等)を境界条件に適用した。車両交通による排熱量と空気-躯体間の熱移動量は熱収支解析同様に算定し解析領域に与え、各風速と風量は実測値を境界条件として設定した。解析領域は温度上昇の激しいトンネル坑口から1000mを対象範囲とし、解析結果と実測値との比較から妥当性を検証した。支配方程式は式(1)~(3)に示す連続の式、運動量の式、エネルギーの式の3式である。ただし、 \mathbf{u} :速度ベクトル、 t :時間、 ρ :空気密度、 p :圧力、 μ :空気の粘度、 T :温度、 α :熱拡散率、 S_h :単位質量当たりの熱発生率、 c_p :定圧比熱である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + \frac{S_h}{c_p} \tag{3}$$

妥当性の検証されたモデルに対して、横流換気風

量と縦流換気風量(車線軸方向風速)を変化させたパラメトリックスタディを実施した。無風状態の解析ケースの坑内温度が平均9.13°C上昇する解析結果から換気の有用性を確認し、縦流換気を増風させた解析ケースから縦流換気増風による温度低減効果は薄いことを明らかにした。また、横流換気風量を変化させた場合の断面平均気温と人が感知する高さにおける気温をまとめた表1、人が感知する高さにおける気温のトンネル坑口から1000mの分布を図5に示す。横流換気風量が大きければ大きいほど断面平均気温は低下する一方で、横流換気風量60m³/secと120m³/secでは感知位置における温度には変化がないことが明らかとなり、横流換気風量は60m³/secが推奨されることを確認した。

表1 横流換気の影響一覧

横流換気風量	0m³	30m³	60m³	120m³
断面平均気温	29.3°C	29.0°C	28.7°C	28.2°C
感知高さ平均気温	27.4°C	27.2°C	27.0°C	27.1°C

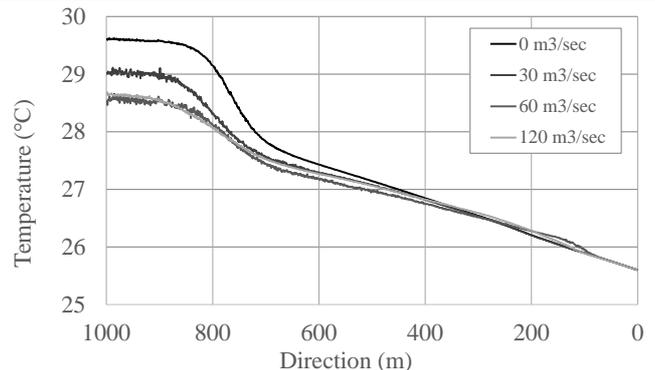


図5 感知高さにおける気温の変化

5.結論

熱収支解析よりトンネル坑内温度を決定する主要因4つを特定し、普通車排熱量と大型車排熱量の比、躯体吸熱量が車両排熱量の約10%~80%であることを明らかにした。熱流体解析から換気の有用性と縦流換気増風対策の効果は薄いことを確認し、横流換気風量は60m³/secが推奨されることを明らかにした。以上より、換気ファン増風運転の温度低減効果定量化とコスト削減の一助となる材料を示すことができた。

参考文献

- 1) 環境省. 都市における人口排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書, 環境省報告書, pp74, 2004
- 2) 中山 顕; 桑原不二朗; 許国良. 熱流体解析—基礎から数値シミュレーションまで—. 共立出版, 2002