道路トンネル換気 30 年の歩み*

水野 明哲^{*1}

Road Tunnel Ventilation for 30 Years

Akisato MIZUNO^{*1}

^{*1} Kogakuin University,
1-24-2 Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-8677 Japan

The ventilation technology for road tunnels has been developing for these 30 years. The author always has been involved in this field, and describes various notable aspects of its development. They include 1) the ventilation planning for the Kan-etsu Tunnel, in which ordinary and emergency ventilation for longitudinal tunnel was studied, 2) the emergency strategy for transversely ventilated tunnels, 3) the emergency ventilation simulation for the Yamate Tunnel, which has a complex ventilation structure, etc. The Author describes at the last part of the paper the importance of establishing a safety standard of road tunnels facility in an early stage.

Key Words : Road Tunnel, Tunnel Ventilation, Emergency, Ventilation Control, Tunnel Fire, Safety

1. はじめに

自動車トンネルはある限度を超える延長や交通量のもとでは、走行環境を適切に維持するため機械換気が必要である。代表的な機械換気方式には図 1 の 2 方式があり、比較的短い(延長が 2km 程度以下の)トンネルにおいては縦流換気、長大トンネルにおいては、よりグレードの高い横流換気と使い分けるのが一般的な認識であった⁽¹⁾。

しかし、国内で最大規模の関越トンネル (I 期線; 対面通行; 延長 11km)、恵那山トンネル (II 期線; 一方通行; 延長 8.4km) において、立坑送排気と電気集塵機を併用した縦流換気方式を採用することとなった。これらはいずれも 1985(昭和 60)年の開通であり、国内外を通じて大きな転換点となった。筆者はこの頃から換気検討に加わっており、この 30 年余りの自動車トンネルの換気技術の進展を振り返ってみたい。

2. 関越トンネルの換気計画

2・1 関越トンネルにおける縦流換気方式の採用

筆者が関越トンネル (I 期線; 暫定対面通行) の換気検討委員会に加わったのは 1979(昭和 54)年のことであった。

Fig. 1 Typical mechanical ventilation systems for road tunnels

* 原稿受付 2013 年 7 月 27 日

^{*1} 正員, フェロー, 工学院大学 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2)
E-mail: mizuno@cc.kogakuin.ac.jp

11km という日本で最長の自動車トンネルを、縦流で換気するもので、掘削断面が少なくて済み、建設コストが抑えられる半面、とりわけ火災時の安全確保には細心の検討が必要であった。これに加えて、消費電力が 2 万 kW にも及ぶ換気設備を、平常時にいかに効率的に制御し、最小限の消費電力で必要な換気を行うかも重要な課題であった。関越トンネルは、図 2 に示すように、2 本の立坑、5 か所の電気集塵機室(図 2 は古いバージョンで 6 か所)と、48 台のジェットファン(噴き出し口径 1500 mm)を備えた複雑な換気系を持つトンネルである。まず下り線を開通して暫定的に対面通行トンネルとして供用することになった。

2・2 換気シミュレーション手法の構築

前段階として、圧縮性を考慮して、一方の坑口付近でジェットファンを立ち上げる計算を行い、図 3 を得た。両坑口の風速が階段状に増加していく様子がわかる。しかし、この方法で何百台という移動中の自動車や 48 台のジェットファンを昇圧要素として計算に取り入れるとなると、それは気が遠くなるような作業であり、現実的ではないと判断した。

そこで、圧縮性を無視して、立坑で区切られた 3 つの換気区間のそれぞれについて空気の流れの運動方程式を立て、立坑送排気量と圧力を接続条件として連立させた。空気に働く力は、管摩擦力、交通換気力、集塵機や立坑送気の昇圧力などで、これに両坑口間(換気区間)の差圧をいわゆる自然風として考慮した。

2・3 火災時の避難環境の確保

関越トンネルの避難連絡坑は 350m 間隔で設置されている。火災発生時に道路利用者がそこまで安全に到達できるようにするためには、ファンを止めて慣性に任せていては間に合わない。そこで筆者は、煙の流れを止めるため、ジェットファンを逆転するのが手取り早いと考えた。早速、シミュレーションをしてみると、図 4 に示すように、風速制御開始から 3 分以内に風速をゼロに持っていくことが可能であると確認できた。

この、当時としては常識に反するような提案は、思いのほかトントン拍子に進み、日の目を見ることとなった。技術を大切にする当時の道路公団の姿勢に感謝と敬意の念をもったものである。

Fig. 2 Outline of the ventilation system for the Kan-etsu tunnel

Fig. 3 Air velocity in the tunnel by the analysis with compressibility

Fig. 4 Air velocity in the tunnel after an accident with jetfans reversely rotated (simulation)

開通直前の 1985(昭和 60)年 8 月にはバスを燃焼させるなど大規模な現地実験が行われたが、図 5 に示すように数値計算の通りに風速が減衰し、その正しさが証明された。この結果には、提案者としての面目が保たれたという安堵感とともに、技術者として感動を覚えた。火災時の数値シミュレーション結果を 1985 年に⁽²⁾、火災実験との比較を 1988 年に⁽³⁾ヨーロッパで発表している。

2・4 平常時の換気制御効率化

関越トンネルの換気設備は総容量約 2 万 kW と膨大であるから、適切な制御をおこない、換気の動力費を削減することは必須であった。そこで、実際に近い交通のマクロモデルを用いて非定常計算を行い、必要な換気レベルを維持しつつ、最低限の動力費で済むような運転の方法を検討した。

煤煙でいえば、立坑と電気集塵機の直前でそれぞれ許容値寸前となるような運転が一番経済的なのであるが、時間的変動があるなかで、立坑ファン、電気集塵機、ジェットファンをそれぞれどんな割合で運転すればよいかはなかなかの難問であった。しかし、交通フィードフォワードと煤煙フィードバックを組み合わせたレギュレーター制御によってかなりの省エネを達成することができた⁽⁴⁾。

3. 横流換気の風速ゼロ化

関越トンネルで採用された、縦流換気対面通行トンネルの火災時に縦流風速をゼロ化するという考えは、その後同様の検討が肥後トンネルなどでも行われ、検討手法がほぼ確立された。しかし、まだ都市部で適用されていた横流換気においても、同様の風速ゼロ化が可能かどうか気になっていた。

そこで筆者は、換気区間が複数ある場合には、図 6 に示すように火災区間の前後で送気・排気のインバランス制御をおこなうことにより、ある程度縦流風速の制御が可能であろうと考え、横流換気における縦流風の運動方程式を確立して⁽⁵⁾、シミュレーションを行った⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

Fig. 5 Comparisons of air velocities by measurements and simulations

Fig. 6 Principle of the imbalance control; a way to control the longitudinal air velocity in transversely ventilation tunnels

この考え方は、国内では名古屋高速道路の東山トンネルや首都高の山手トンネルの火災対応に応用された。また、2007(平成19)年11月にフランスとイタリアの国境に位置するフレジュストンネルを訪問した際には、現地の技術者の説明で、同トンネルで火災時のためにインバランス制御が使われていることを知った。

4. 外乱予測最適制御

関越トンネルで行ったジェットファンによる風速ゼロ化制御は避難環境確保のために重要であった。しかし、風速をフィードバックしてファンの運転台数を決めるのは、旧来のPID制御が用いられていて、制御性能が思わしくなかった。筆者は、制御対象が速度であることに着目し、ニュートンの運動の第1法則を思い起こせば、容易に最適制御の考え方が導入できることに着目し、数値シミュレーションにより、図7のようにその有効性を実証した⁽⁸⁾。

しかし、実際のトンネルに適用すると、期待通りの性能は得られなかった。その原因は、風速計測時に平滑化が行われ遅れが生じていることによるものであった。

5. 横流複雑換気トンネルの解析

1990年代後半から東京の山手通り(環状6号線)の下に中央環状新宿線が計画され、長大トンネルが建設されることになった。後に山手トンネルと命名されるこのトンネルは、延長10kmに及ぶ大規模トンネルであることに加えて、途中でランプなどの分岐合流を多数含む複雑な横流換気トンネルである。

このような重交通量の都市内トンネルの安全を図ることは重要な課題であるので、筆者らは複雑換気系に対する運動方程式(連立常微分方程式)を構築し⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、3章で述べたインバランス制御⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いて、渋滞時の火災に対して縦流換気の場合と同様に縦流風速0化を目指すという立場で検討を行った。山手トンネルは、縦流換気を行う品川線と接続される予定であり、平常時換気、非常時換気とも、より複雑な換気系になるため、今後に向けてさらなる検討が望まれる。

Fig. 7 Improved results by optimal control with disturbance estimation compared with the standard PID control(left)

6. トンネル換気に関する海外との交流と今後

筆者にとって初めての国際学会参加は 1982(昭和 57)年 3 月、イギリス・ヨークで開催された BHRA(注 1)主催の第 4 回トンネル換気国際会議(ISAVVT)であった。その頃、日本からは一部のメーカーが参加する程度で、欧米諸国が政府機関や研究所から多数の参加者を送り込んでいたのと対照的であった。筆者はその後、ISAVVT には、ほぼ毎回参加し、2011 年 5 月にダンディー(スコットランド)で開催された第 14 回には大学院生と参加し、研究発表⁽¹¹⁾を行うとともに、多くの知人たちと旧交を温めることができて喜ばしいことであった。

我が国は、とりわけ防災・安全に関してヨーロッパに学ぶべき点も多いと考えられ、今後さらに交流が深まることが望まれる。とりわけ、1999 年に発生したモンブラントンネル火災を機に、ヨーロッパの安全基準が強化されたこと⁽¹²⁾を受けて、わが国でも対応を早急に行うことが望まれる。

この 30 年あまりにわたってご指導いただいた方々、またトンネル換気の実現に貢献された関係諸氏に敬意を表するとともに感謝申し上げたい。

注 1 : BHRA は British Hydromechanics Research Association の略で、当時英国の半官半民の研究組織として流体力学に関連するさまざまな分野の国際学会を主催していた。その後民営化されて、BHR Group と呼ぶようになり、今日に至っている。

ISAVVT(International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels)を 1973 年から 3 年に一度開催している。

文 献

- (1) 日本道路協会編, 道路トンネル技術基準(換気編)・同解説 平成 20 年改訂版, (2008), p.38-45, 日本道路協会.
- (2) Mizuno, A., Ohashi, H., Nakahori, I. and Okubo, N., "Emergency Operation of Ventilation for the Kan-Etsu Road Tunnel", *5th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (1985), pp. 77-91.
- (3) Mizuno, A., Ohashi, H., Ishidaka, T., Nakahori, I., Kimura, S. and Fujimura, H., "Practical test of emergency ventilation combined with bus firing at the Kan-Etsu Tunnel", *6th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (1988), pp. 353-366.
- (4) Ohashi, H., Mizuno, A., Nakahori, I. and Ueki, M., "A new ventilation method for the Kan-etsu road tunnel", *4th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (1982), pp.31-47.
- (5) Mizuno, A. and Kanoh, T., "On the one-dimensional equation of motion for the numerical simulation of transversely ventilated road tunnels", *3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, (1999), pp. 19-22. (以下の論文(6)(7)と時間的に前後するが、方程式を最終的に確立したのは本論文である)
- (6) Mizuno, A. and Ichikawa, A., "Possibility of controlling longitudinal air flow velocity in emergency for a transversely ventilated tunnel", *7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (1991), pp. 349-364.
- (7) Mizuno, A. and Ichikawa, A., "Controllability of longitudinal air flow in transversely ventilated tunnels with multiple ventilation divisions", *1st International Conference on SAFETY IN ROAD AND RAIL TUNNELS*, (1992), pp. 425-437.
- (8) Mizuno, A., "An optimal control with disturbance estimation for the emergency ventilation of a longitudinally ventilated road tunnel", *3rd Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement, and Visualization*, (1991), pp. 393-399.
- (9) 西馬功泰, 後藤幸夫, 福嶋秀樹, 水野明哲, "複雑トンネルにおける換気システム設計のための空気力学モデル", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 68, No. 675 (2002), pp. 2990-2996.
- (10) Makino, M., Sangu, M., Itou, T., Yachi, S. and Mizuno, A., "The ventilation system and emergency simulation of Shinjuku Tunnel", *11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (2003), pp. 465-481.
- (11) Hagiwara, M., Mizuno, A., Tsutaki, T. and Takahashi, K., "Study by numerical simulation on the breathing effect in a semi-underground Highway with Beams and a roof above it", *14th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Tunnels*, (2011), pp. 563-576.
- (12) "Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network", *Official Journal of the European Union*, (2004).