

都市内長大トンネルにおける交通安全・防災対策技術

阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部設計課 中島 隆
 阪神高速道路(株)保全交通部施設管理課 原 秀史
 阪神高速道路(株)大阪管理部システム保全課 田中 憲一

要 旨

平成 25 年 5 月 25 日に供用した 2 号淀川左岸線の正蓮寺川トンネルは都市内長大トンネルであり、閉鎖された空間が長く続くことから明かり部と比べて特別な交通安全対策・防災対策が必要となる。交通安全対策としては、島屋の S 字状の急カーブ対策が求められ、速度超過車両警告システムやシークエンスデザインなどを設置するとともに、トンネル内には出入路の分合流が存在するため、合流支援システムや誤進入及び逆走を防止するシステムを設置した。トンネル内で発生した事故や火災は、トンネル内に設置された各種検知器が感知または非常電話による通報等により、交通管制室で確認され、トンネル警報板等の情報提供施設によりトンネル内の車両に対し注意喚起や避難誘導が行われる。火災発生時は、避難環境を確保するため排煙制御が行われ、火点前方で渋滞が発生している場合は火点上部付近に煙を滞留させておく風速零化(低風速化)制御を行う。なお、本トンネルの全てのジェットファンにはインバータ制御を採用しており、迅速な風速零化が容易となった。

キーワード: 都市内長大トンネル, 交通安全対策, トンネル防災設備, トンネル換気設備

はじめに

平成 25 年 5 月 25 日に開通した 2 号淀川左岸線の正蓮寺川トンネルは、全区間が開削工法で構築された延長 3,569m (ストラット区間 250m 含む) の都市内長大トンネルである。坑口付近の縦断勾配は急であり、S 字状の急カーブやランプ分合流部がトンネル内に存在する。

このように閉塞された空間が長く続き、かつ線形が厳しいことから、トンネル内の交通安全対策や防災計画を立案する際には、特別な配慮が必要であった。

そこで関係機関と協議を進めていく中で様々な検討や実験を行い、新しい技術を取り込んだ対策を行ったので、その内容について報告する。

1. 交通安全対策の概要

トンネル内における事故は、トンネル火災の要因となることから、明かり部に比べて充実した安全対策が求められる。そこで、図-1 および表-1 に示すように多様な交通安全対策を実施した。

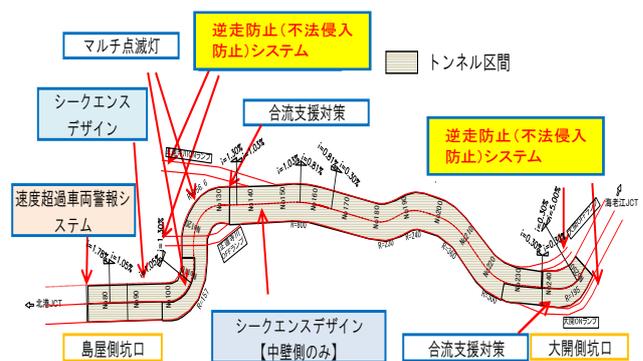


図-1 正蓮寺川トンネルにおける安全対策の配置

1-1 シークエンスデザイン

淀川左岸線の東行きは、5%の下り急勾配を経てトンネルに進入し（島屋側坑口）、その後トンネル内で曲率半径 157m のカーブが S 字状に連続するため、下り勾配で速度が上がり速度超過を認識しないままカーブに進入すると危険である。

そこで坑口部には後述する速度超過車両警告システムを設置して警告を与えると同時に、トンネル内約 350m 区間には 8 号京都線の稲荷山トンネルで採用されたシークエンスデザインを壁面に施し、複合的な速度抑制対策による相乗的な効果を得ることとした。なおシークエンスデザイン（Sequence Design, 以下 SQD と言う）とは、連続的に展開するひとつづきの（走行空間の）デザインのことである。

本トンネルの SQD は、トンネル空間の明色化を目的とした壁面塗装を活用し、縦縞模様から矢印模様に変化させるとともに、その間隔を段階的に狭くすることにより、S 字カーブ進入前に安全に速度抑制を働きかけるものである。速度抑制効果の高い模様形状と出現間隔、飽きの来ない設置長さについては、稲荷山トンネル採用時に得られた知見¹⁾を活用した。デザインについては予備検討で 3 案に絞った上で、社員などからなる計 121 人を被験者としたドライブシミュレータの走行操作結果を分析し、最も速度抑制効果が高いデザイン（図-2, 3, 写真-1）を採用した。

1-2 速度超過車両警告システム

本システムはトンネル坑口付近で速度を超過して走行する車両に対し、速度超過を警告し、減速を促すものである。車両の速度を計測するセンサと警告表示を行う表示板で構成される。図-4 にシステム構成例を示す。

本システムのセンサには、逆走防止システムや合流支援システムと同じく、遠赤外線カメラによる画像処理方式を採用した。遠赤外線カメラは、雨・霧など天候の影響を受けずに安定した車両検出が可能だけでなく、センサ本体は速度計測範囲から離れた別の場所、例えば表示板と同じ門

表-1 正蓮寺川トンネルにおける安全対策項目

カーブ手前の速度抑制	シークエンスデザイン 速度超過車両警告システム
カーブの安全対策	マルチ点滅灯 壁面の視線誘導表示 ポーラスコンクリート舗装 大型警戒標識
合流部の事故防止	合流支援システム
入出路の誤進入・不法侵入	逆走防止システム(不法侵入防止システム)

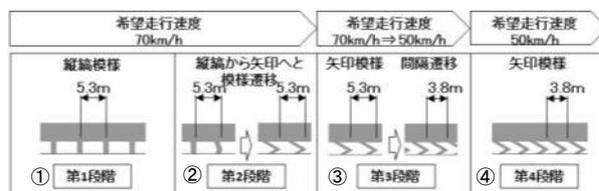


図-2 採用した SQD デザイン

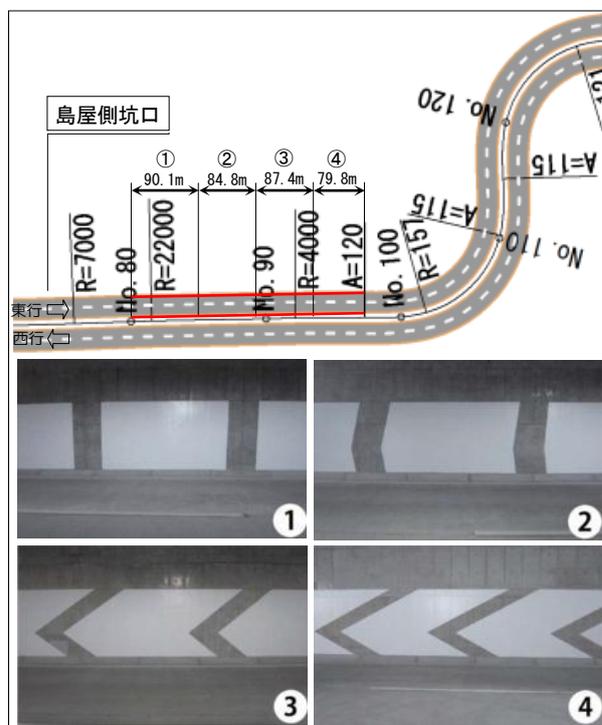


図-3 デザイン配置図 (東行追越側)



写真-1 完成状況 (東行)

型の標識柱などに設置することが可能であるため、供用後の保守も容易である。

センサが速度超過車両を検出すると、写真-2に示す表示板に速度超過と減速を促す内容が警告表示される。表示を見た運転者がブレーキ操作等を行い、トンネルへ進入する前に車両の速度を落とすことにより、トンネル内の急カーブを安全に通過することができる。

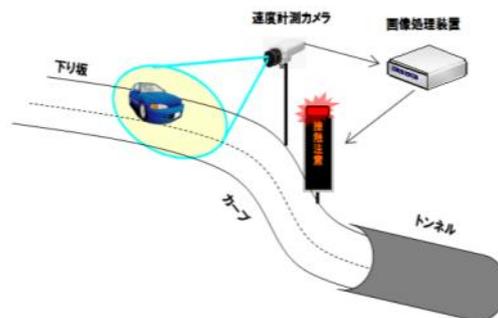


図-4 速度超過車両警告システムの構成例

1-3 合流支援対策

淀川左岸線西行きの大開側坑口付近は本線がカーブで、なおかつ本線と入路はトンネル函体で隔てられているため、本線から入路を視認することができない構造となっている。そのため、入路から低速車が合流する際、本線側の車両は車線変更やブレーキ操作などの回避行動を取ることが非常に困難である。そこで、入路から合流する車両を早期に認知し、余裕を持って入路からの進入車両を回避することを可能とするため、入路側の車両の存在を本線側の車両に知らせる合流支援システムを導入した。

本システムは、入路側の車両を検出する遠赤外線カメラを用いたセンサおよび本線側の車両に対して合流車両の存在を知らせる表示板で構成される。図-5にシステム構成を示す。入路側車両のおおよその位置を提供するため、センサと表示板はそれぞれ2台、センサの検出範囲と表示板の位置がトンネルの壁を隔てて概ね同じ位置となるよう設置した。写真-3にトンネル本線に設置されている表示板を示す。



写真-2 表示板設置状況と警告表示の内容

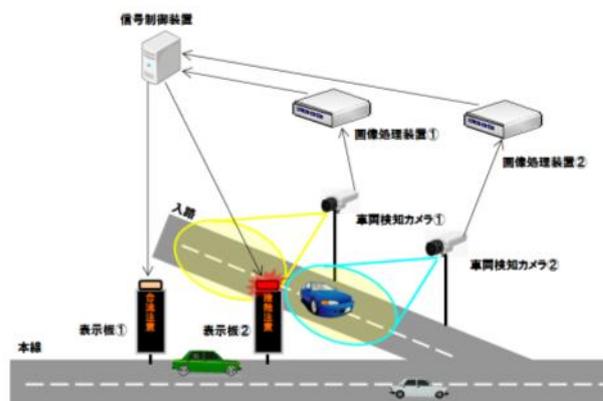


図-5 合流支援システムの構成

1-4 逆走防止システム

トンネル区間に設けられた2箇所のランプの勾配が、接続する平面街路からの下り坂となり、トンネル内へ進入し易いこと、かつ出路は料金所もなく物理的な侵入措置ができないことから、交通管理者から逆走・誤進入対策が要請されていた。また平面街路接続部には交差点があり、歩行者や自転車等によるランプへの誤進入の可能性があった。



(a)合流車両がない場合の表示イメージ (b)合流車両検知時の表示イメージ

写真-3 表示板の表示内容

ひとたび高速道路本線に歩行者や自転車、逆走車が進入し、事故等が発生すると、トンネルという閉鎖空間のため、大惨事に発展する懸念があった。そこで必要な対策について検討を行い関係機関と協議した結果、各出入路の街路接続付近に逆走防止システムを設置することとした。

本システムは、歩行者や自転車、逆走車を検出する遠赤外線カメラを用いたセンサ、並びにこれらの誤進入者（車）に対して警告を行う表示板と拡声装置で構成される。図-6 にシステムの構成を示す。

センサで歩行者や自転車、逆走車を検出すると、現地に設置した写真-4 に示す拡声装置と表示板により、事前登録した警告音声と文字情報により自動で注意喚起を行うとともに、交通管制室に警報が届き、監視卓のモニターでセンサが捉えた現地映像を確認できるシステムとなっている。また、現地の状況に応じて警告音声と文字情報の表示内容を交通管制室から手動で変更することも可能である。

2. トンネル防災・換気設備

正蓮寺川トンネルは、東行線の東側坑口付近に大開換気所、西行線の西側坑口付近に島屋換気所を配置し、トンネル内のジェットファンと連動することで、トンネル内を換気するとともに、大気環境対策としてトンネル坑口からの排ガスを含むトンネル内空気の持ち出しを抑制している。

トンネル防災計画の策定に際しては、トンネル区間に上下線とも入路と出路が各1か所あること、S字カーブの存在やランプトンネルの縦断勾配が急勾配であることなどについて留意する必要があった。

2-1 トンネル防災設備

(1) 全体計画

本トンネルは延長 3,569m の都市内長大トンネルであり、そのうち西側には延長約 250m のストラット区間を有する。

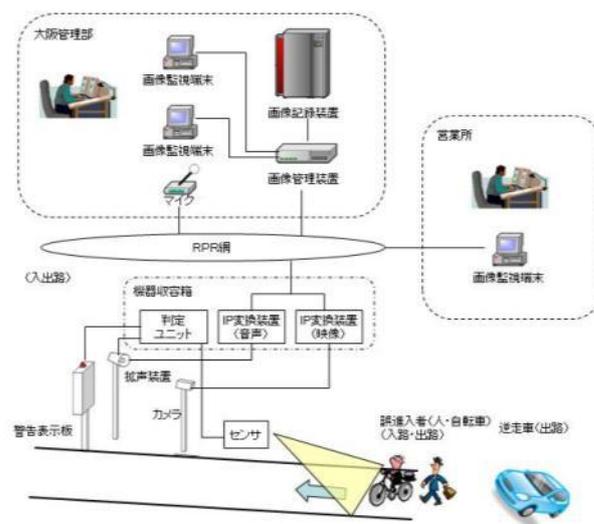


図-6 逆走防止システムの構成



写真-4 センサと拡声装置（左）及び表示板（右）

トンネル延長及び計画交通量から、本線トンネル区間およびランプトンネル区間ともにトンネル等級 AA 級の防災設備を設置している（表-2）が、更なる安全性の向上のため、いくつかの新たな設備も設置した。

またストラット区間は、上面開口部が狭まっているために、火災時にトンネルと同様の危険性が考えられることから、他団体の設置事例を参考に A 級の防災設備を設置した。

(2) 防災設備概要

平成 20 年度から 21 年度まで大和川線トンネル防災安全委員会を開催し、非常口の配置などの避難誘導設備の検討、火災時の排煙の検討などを行ったが、正蓮寺川トンネルについても大和川線と

同様に大阪都市再生環状道路を形成する長大トンネルであることから、上記委員会の議論を踏まえて検討を行った。設備概要を図-7 に示すとともに以下で設備の特徴を紹介する。

1) 消火器・消火栓・水噴霧設備

トンネル内には消火器・消火栓・水噴霧設備などの消火設備を設置している。消火栓・水噴霧設備の水源となる主水槽および消火ポンプは島屋受電所内に設置し、上下線トンネル全体に配水している。

水噴霧放水ヘッドは、管理部門で開発した水噴霧点検装置(特許第 5166361 号)で点検できるよう、全てのヘッド部にアタッチメントを設置し、供用後の維持管理を考慮している。また噴霧制御は、従来において①禁水性物質の漏洩がないこと、②避難者がいないことを確認のうえ、交通管制室の防災卓で防災要員の手動による放水としていたが、放水開始の遅れが懸念されることから、淀川左岸線建設に伴うトンネル防災中央装置の改修にあわせて、制限時間内に放水停止釦を押さなければ自動放水する方式に変更した。

2) トンネル防災カメラ

西行線 84 台、東行線 86 台全てのトンネル防災カメラの画像をリアルタイムに処理し、交通の妨げとなる車両の停止・低速・渋滞・避走(落下物)などの事象判定を行い、交通管制室の防災卓モニターに該当カメラとその前後のカメラの映像を自動的に表示して管制員をサポートする。また、渋滞事象や交通量データは、トンネル換気システムに送られ、トンネル換気制御に使用される。

3) ランプ部早期火災発見対策

ランプ部は、縦断勾配が大きくトンネル断面が小さいため、火災時に煙の充満が早いので、早期に火災を検知するために押釦式通報装置を増設するとともに早期煙検知システムを設置した。

4) トンネル警報板

トンネル入口警報板をトンネル本線並びに入路の各坑口手前に設置し、またトンネル内の非常駐車帯にもトンネル内警報板を西行線 8 箇所、東行線 9 箇所に設置した。これらの警報板と、ラジオ



図-7 正蓮寺川トンネル防災設備イメージ図

表-2 トンネル防災設備一覧表

諸元	トンネル名	正蓮寺川		
		西行(上り)線	東(下り)線	
トンネル延長 (m)		3,569 内ストラット (250)	3,569 内ストラット (250)	
トンネル等級区分		AA (ストラット部: A)		
共用年月		H25.5		
通報・警報装置	防災受信盤	1		
	非常電話	49	49	
	押釦通報装置	83	81	
	火災検知器	190	195	
	非常警報装置	(トンネル坑口)	2	2
		(トンネル内)	8	9
(補助器)		1(坑口)	1(坑口)	
番号機	-	-		
消火設備	消火器	162	158	
	消火栓	81	79	
避難誘導設備	誘導表示板	64	65	
	排煙設備	有	有	
	避難連絡坑	-	-	
	非常口	12	11	
	その他設備	給水栓	(トンネル内)	21
(トンネル坑口)			4	4
水噴霧設備		72区画	71区画	
無線通信補助設備		有	有	
ラジオ再放送設備		有	有	
拡声放送設備		有	有	
トンネル防災カメラ		84	86	
無停電電源設備		有		
非常用予備発電設備		有		
緊急車出入口		有	-	
Uターン路		有(坑外2/坑内1)		
非常駐車帯		7	8	
消火水槽 (m ³)		島屋(受)約400 大開約120(ダクト冷却兼消防水利)		
消火ポンプ		島屋受電所: 200kW×1台		
路面排水ポンプ	島屋: 15kW×3台 大開: 11kW×3台			
突発事象検出装置	有 (画像処理装置)	有 (画像処理装置)		
速度管理システム	-	有(1か所)		
トンネル火災表示板	18	19		

再放送設備や拡声放送設備により、トンネル内での火災または事故等非常事態の発生をドライバーに知らせる。

また、トンネル内の情報提供は、トンネル防災中央装置と連動しており、情報提供区間を発災車線と反対車線、発災車線では交通状況(非渋滞時あるいは渋滞時)に応じて、発災区間とその前方区間および後方区間に区分して設定し、各区間の状況に応じた情報提供を可能としている。

5) トンネル火災表示板

渋滞時には、非常駐車帯手前であっても前方車両等によりトンネル内警報板の視認が困難なことが想定されるため、トンネル火災表示板を上下線全線に渡り設置した。

火災が発生した際、非渋滞時には火点より上流側のみトンネル火災表示板を点滅させ、渋滞時には発災車線全線のトンネル火災表示板を点滅し、迅速な避難を促す。

また、火点の位置や渋滞の有無に応じて、トンネル内警報板・トンネル火災表示板の制御をトンネル防災中央装置にて一元的に行えるようにしている。

6) 非常口

正蓮寺川トンネル地上部には 22 ヶ所の非常口上屋を建設し、避難階段によりトンネル内から脱出した際の地上出口となる(図-8)。火災時に避難者がトンネル内の非常口扉を開けた際、非常口上屋の回転灯が一定時間点灯することにより、駆けつけた消防隊がいち早く発見できるようにしており、迅速な消火活動や避難者の救助活動を支援することができる。また、有事の際、トンネルから地上への避難時に煙にまかれずに全ての非常口上屋に地上からの新鮮空気を送り込む非常口ファンも設置し、トンネル防災中央装置にて一元的に運転を行えるようにしている。

2-2 トンネル換気設備

(1) 全体計画

正蓮寺川トンネルの換気制御には 2 箇所の換気所の排風機と全 34 台のジェットファンを用いる

(図-9)。これらジェットファンには、インバータ制御方式を採用した。

ジェットファンのインバータ制御は、神戸長田トンネルにおいて、当社が全国で初めて複数台のジェットファンを制御するために開発したものである²⁾。従来の台数制御に比べ、起動特性や運転特性に優位な点が多く、インバータ制御を行うことにより適正風量での運転が可能となるため、換気所の排風機との組み合わせにより、消費電力量の削減が可能となる。

また、トンネル内で火災が発生した場合、火点前方で渋滞が発生していなければ煙を前方に流す



図-8 非常口の施設構成

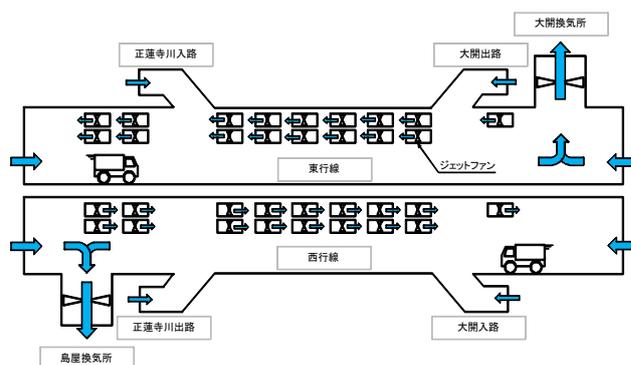


図-9 トンネル換気系統図

前方排煙制御とし、火点前方で渋滞が発生していれば火点上部付近に煙を滞留させておく風速零化（低風速化）制御を行うことも、インバータ制御を採用することにより容易となる。

(2) 安全対策

トンネル内で火災が発生した場合に道路利用者が安全に避難できるかを検証するため、3次元火災シミュレーションを実施した(図-10)。

風速零化制御時には、火点上部に煙の層が時間とともに厚みを増していく中で、道路利用者が避難できるかを確認し(図-11)、避難できない結果となった場合には非常口の配置計画を見直すなどの対策を講じて避難環境を確保した。

(3) 維持管理対策

正蓮寺川トンネルのジェットファンは、トンネル内空気の持ち出し抑制として使用されるため、24時間稼働する。

ジェットファンは、車線上に設置されていることから、点検時には車線規制が必要となる。そのため、点検の合理化・効率化を目的としてジェットファンの異常振動を早期検知できるように全ジェットファンに振動計を設置し、常時状態監視を行えるようにした。

振動計を設置することにより、従来の路面からの目視点検では困難であったアンカーの緩みや回転翼の欠損などを振動計の信号を遠隔監視することにより車線規制を伴わずに把握でき、また今後のオーバーホール計画検討にも期待される。

(4) 換気制御

平常時の換気の目的は、トンネル坑口およびランプトンネル坑口からのトンネル内空気の持ち出しを抑制しつつ、トンネル内の煤煙透過率・一酸化炭素濃度を設計基準値以下にすることである。

これを達成するため、制御手法として交通流収集装置からの交通量データを元にして煤煙発生量を予測し、必要換気量を決定する交通量予測制御をベースとし、これにトンネル内の煤煙透過率(VI値)、一酸化炭素濃度(CO値)、風向風速値(AV値)から必要換気量を決定するフィードバック制御を採用した。各排風機とジェットファン

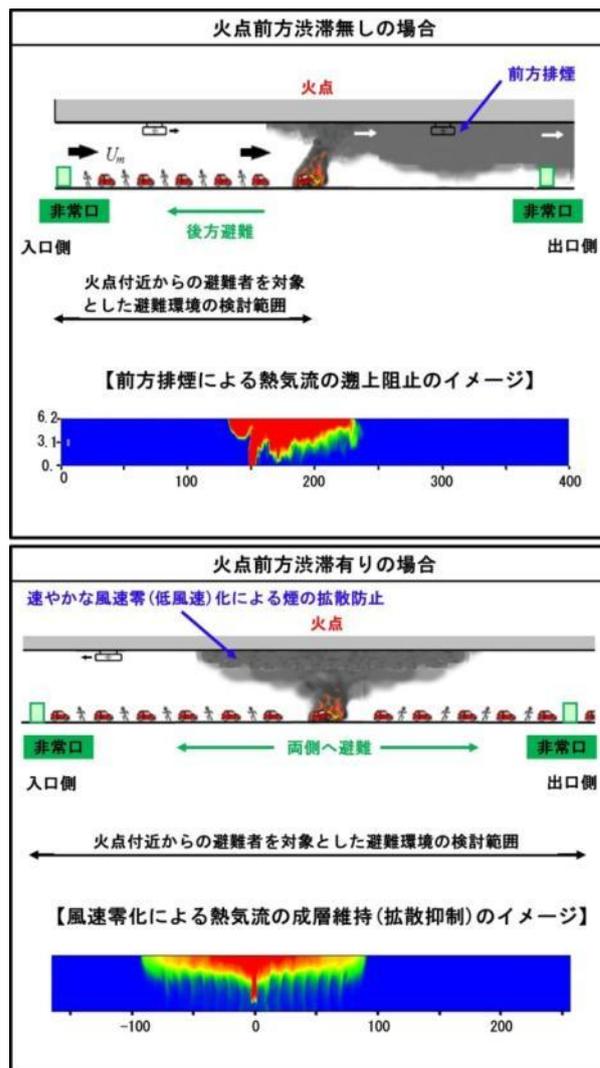


図-10 火災時の換気運用イメージ

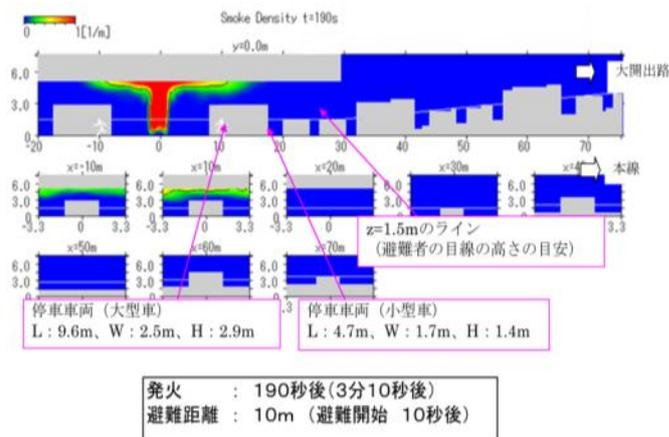


図-11 3次元シミュレーション結果の一例

の運転パターンは、常時最適な運転となるように、複数ある運転パターンの中から消費電力量が最も低くなる運転パターンを選択しており、経済性を考慮した換気機の運転を実現した。(特許第

5577380号)

また、火災時の換気制御においては、渋滞の有無を交通管制データによって判断し、渋滞有りの場合は風速零化制御（風速目標値： $\pm 0\text{m/s}$ ）、渋滞なしの場合は前方排煙制御（風速目標値： $+2\text{m/s}$ ）を行えるようにした。このときの換気機運用方法は火点に応じて決められており、かつトンネル上部に滞留している煙をかき乱さないよう原則として火点前後 500m 以上離れたジェットファンのみを運転することにより風速制御を行う。いずれの場合も火点付近の風向風速を常時監視しながら無段階での風速制御を行うことで風速整定時間が数分となり、高精度かつ応答性の良い制御を実現した。（特許第 5462317 号）

おわりに

本稿は都市内長大トンネルである正蓮寺川トンネルにおける、交通安全・防災対策の取り組みについて報告した。今後の運用においてはこれら対策の効果を検証するとともに、さらなる安全性向上に反映させる必要がある。

最後に、トンネル内に設置した各カメラの画像処理技術のうち移動体を追尾する技術は、東京大学上條研究室で開発された時空間 MRF (Markov Random Field) を活用した。関係者には深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩里泰幸, 藤井康男, 足立幸郎, 玉川大: シークエンスデザインを用いたトンネル坑口の交通安全対策の検討, 技報第 24 号, pp. 88-95, 2007.
- 2) 加藤宗彦, 原秀史, 弦巻淳: 神戸長田トンネルに適用した換気システムの概要, 阪神高速道路第 43 回技術研究発表会論文集, pp. 219-222, 2011.

TRAFFIC SAFETY AND DISASTER PREVENTION MEASURES FOR A LONG URBAN TUNNEL

Takashi NAKASHIMA, Hidefumi HARA and Kenichi TANAKA

The Shourenji-gawa Tunnel on the Hanshin Expressway Yodogawa-Sagan Route is a long cut-and-cover urban tunnel. The long-extended closed space with severe alignment required special measures for safety and disaster prevention. A sharp curve was provided with overspeed warning system and sequence-design wall painting. Branching and merging points were equipped with systems for merging assistance and prevention of wrong lane driving. In addition to detectors and emergency phones, smoke control system was installed to secure safe evacuation environment in case of fire. Inverter-driven jet-fans enable reducing wind velocity to nearly zero in case of fire with heavy traffic congestion.

中島 隆



阪神高速道路株式会社
建設事業本部
大阪建設部 設計課
Takashi Nakashima

原 秀史



阪神高速道路株式会社
保全交通部施設管理課
Hidefumi Hara

田中 憲一



阪神高速道路株式会社
大阪管理部システム保全課
Kenichi Tanaka