

第二東名清水第三トンネル火災実験による 大断面トンネルの防災特性について

The characteristics of fires in large-scale tunnels on fire experiments
inside the Shimizu No.3 tunnel on the New-Tomei Expressway

竹國一也¹⁾・下田哲史²⁾・横田昌弘³⁾

Kazuya TAKEKUNI¹⁾ and Akifumi SHIMODA²⁾ and Masahiro YOKOTA³⁾

The behavior of smoke and flame when a fire breaks out in a large-scale tunnel that have been revealed by a report on fire experiments inside the Shimizu No. 3 Tunnel on the New-Tomei Expressway that is now under construction, and by the results of other experiments march in 2001.

The experiments were carried out for the following reason. Tunnels on the New-Tomei Expressway with three lanes plus shoulder are large-scale tunnels with an inside section area of 115 m². Because this inside section area is about twice that of a two-lane tunnel, it is very important to inspect the smoke behavior and heat diffusion in such large-scale tunnels that differ from those in two-lane tunnels.

Therefore, experiments were carried out in an actual tunnel to clarify the characteristics of fires in large-scale tunnels in order to enact tunnel emergency facility standards for large-scale tunnels.

Key Words : large-scale tunnel, fire experiments, tunnel emergency facility, smoke behavior

1. はじめに

第二東名・名神高速道路は3大都市圏の連携を強化し、全国ネットワークの根幹となる重要路線であり、安全かつ高速走行性の確保を図るため、将来交通量を考え十分ゆとりを有する道路として計画・建設されている。

しかし路線全体が山間部を通過しているため、路線の延長比率で約25%がトンネルで占められ、これらのトンネルは路肩付き3車線で従来の2車線トンネルに比べ2倍以上の内空断面積を有する扁平大断面トンネルとなっている。このためトンネル非常用施設の技術基準策定にあたり、大断面トンネルの特殊性を考慮した火災性状や避難環境確保のための排煙風速、水噴霧設備による火勢抑制・類焼防止効果等の検討、把握が必要となる。

本論文は、平成13年2月26日から3月8日の間に第二東名高速道路清水第三トンネルで実施した大断面トンネル火災実験概要、並びに2車線トンネルとの断面の違いに着目した実験結果について報告するものである。

2. トンネル非常用施設設備設置基準について

我が国における現行トンネル非常用施設に関する技術的基準は、主に2車線トンネルを対象として定められており、これは昭和54年に発生した日本坂トンネル火災事故をはじめとする過去の教訓と建設省（現独立行政法人）

1) 日本道路公団 技術部 道路技術課 課長代理

2) 日本道路公団 技術部 道路技術課

3) 東エン株式会社 施設技術部 施設技術第二課 課長

土木研究所、JH等が行ってきた実トンネル及び模型トンネルによる実験結果¹⁾を反映し制定しているものである。

トンネルの等級は図-1に示すとおり交通量と延長によりAAからDまでの5等級に区分され、表-1に示すとおりそれぞれの等級に応じた施設を設置することが国の技術基準「道路トンネル非常用施設設置基準」で定められている。

一概にトンネル非常用施設の設置基準を海外と比較することは、文化、思想、立地条件や構造等が異なるため困難であるが、我が国は各設備の設置基準を最も明確化しており、また表-2に示すとおり火災発生時における類焼防止等のための水噴霧設備設置基準、排煙設備や避難通路、トンネル情報板設置基準等、いずれの面においても諸外国に比べ充実しているといえる。

3. 実験の目的

現在建設中の第二東名・名神トンネル非常用施設設置基準の策定にあたり、事前に2車線トンネル実験結果を基に大断面化した火災シミュレーション²⁾を実施し、特性として路面付近の避難環境は従来トンネルに比べ良好であるが、風上側への煙の挙動については若干遡上しやすい特性であることが判明した。

しかし、実際の火災時における避難環境を明らかにするには、このシミュレーション検討結果だけでは判断材料が不足しており、実トンネルでの火災実験による検証が必要不可欠との判断から火災実験を実施することとした。

今回の実験にて検証すべき事項は以下のとおりである。

- ①火災燃焼速度の確認、②火災による煙の挙動と避難環境確認（成層流の形成）、③坑内風速と煙の拡散、④必要な排煙風速、⑤水噴霧設備使用による煙の挙動、⑥水噴霧設備使用による火災抑制効果・冷却効果・類焼防止効果、⑦火災時の坑内圧力分布

4. 実験概要

4. 1 火災の形態・規模

火災実験における火災規模の設定にあたり、大断面トンネルの特性、過去の火災事例、過去の実験結果等について分析を行い火災規模設定に必要な要素を取りまとめた。

(1) 大断面トンネルの特性

第二東名・名神トンネルは従来2車線トンネルに比べて断面は大きく（内空断面積 57 m²→115 m²）、幅員が広い（3車線+フル路肩）ことから、天井部分の蓄煙効果が大きく放熱効果も高いと想定された。

また、事前のシミュレーション結果より、火点風下側は高風速においても路面付近の避難環境が2車線トンネルに比べ良好であるが、火点風上側については若干煙が遡上しやすいということも想定された。

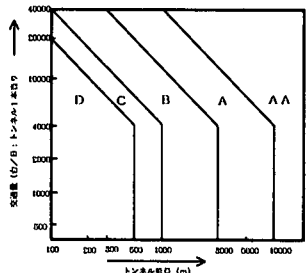


図-1 トンネル等級区分

表-1 トンネル等級別の防災（非常用施設）

トンネル等級		AA	A	B	C	D
通報・警報設備	非常電話	○	○	○	○	
	押しボタン式通報装置	○	○	○	○	
	火災検知器	○	△			
	非常警報装置	○	○	○	○	
消火設備	消火器	○	○	○		
	消火栓	○	○			
避難誘導設備	誘導表示板	○	○	○		
	排煙設備、または避難通路	○	△			
	給水栓	○	△			
その他の設備	無防風面（無防風）	○	△			
	ラジオ放送設備、または拡音機	○	△			
	避難設備	○	△			
	水噴霧設備	○	△			
	監視装置	○	△			

注 ○：原則として設置、△：必要に応じて設置

表-2 トンネル非常用施設の海外設置基準の比較（最上級等級トンネル）

トンネル等級	日本 AA級	フランス 2級	ドイツ L>100m	オランダ ED	スウェーデン SAB
通報・警報設備	非常電話	○	○	○	○
	押しボタン式通報装置	○	—	—	○
	火災検知器	○	—	—	○
	非常警報装置	○	○	—	○
消火設備	消火器	○	○	○	○
	消火栓	○	○	○	△
避難誘導設備	誘導表示板	○	—	—	○
	排煙設備、または避難通路	○	○	一方通行○ 他は△	—
	給水栓	○	○	—	—
その他の設備	無防風面（無防風）	○	○	—	—
	ラジオ放送設備	○	△	○	△
	避難設備	○	—	△	△
	水噴霧設備	○	—	—	△
	監視装置	○	○	△	○

AA級 ○：設置
△：必要に応じて設置
—：設置せず

(2) 過去の火災事例

高速道路・一般有料道路での昭和 38 年から平成 11 年度までの 36 年間におけるトンネル内火災事故実態としては、単独車両による事故が全体の 8 割程度を占めており、整備不良等による出火が半数を占めている。また、車種別では貨物系車両による火災事故が全体の 6 割強となっている。

(3) 過去の火災実験による知見と火災規模

a) 単位火災規模の設定

実験時の単位火災規模の設定について、実車両の燃焼試験とガソリン火皿（一般に大型車両等価火災規模 4 m^2 、過去最大 6 m^2 ）による試験が過去行われており、火災の熱出力（発熱速度）と等価ガソリン火皿面積の関係について図-2 に示すとおり³⁾取りまとめられており、ガソリン火皿 1 m^2 あたり、 2.1 MW として取り扱われている。また諸外国における単位火災規模は 1999 年 P I A R C 資料⁴⁾ に表-3 のとおり記載されている。

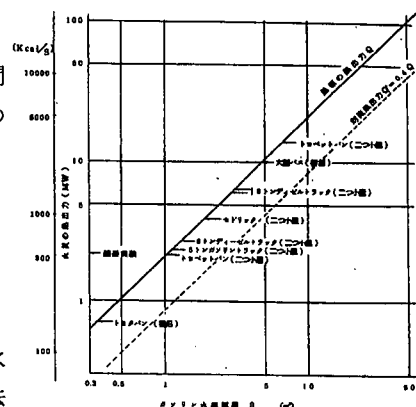


図-2 火源別火災の熱出力と等価ガソリン火皿面積

表-3 単位火災規模の設定

小型乗用車 1 台	2.5MW
大型乗用車	5MW
2～3 台の乗用車	8MW
バン 1 台	15MW
バス 1 台	20MW
一般貨物車両	20～30MW

b) 実験時坑内風速の設定

一方通行トンネルにおける排煙風速の設定については、従来二車線トンネルにおいて火災時に発生する煙の遡上を防止するための必要風速として 2 m/s 程度以上の風速が必要であるとされている。

また、2 車線トンネルにおける過去の火災実験からは排煙風速が $3 \sim 5 \text{ m/s}$ を超えると風下側のトンネル内気流が攪拌され、成層流を成していた煙が乱されトンネル内に一様に広がり、避難環境が悪化してしまうことも観測されている。

しかし、大断面トンネルでは過去に実施されたシミュレーションの結果から、より高風速域においても（風速 10 m/s ）避難環境が確保される可能性のあることが判っている。

大断面トンネルにおける必要な排煙風速の設定にあたり、火災実験において表-4 に示す試験風速にて基礎データを収集し、大断面トンネルの煙の挙動特性を比較検証する。

表-4 実験に用いる坑内風速

風速 0 m/s	大断面トンネルにおける成層流の形成と煙の挙動、降下位置、時間の把握
風速 2 m/s	2 車線トンネルにおける成層流形成限界風速と大断面トンネルにおける煙の遡上状態の比較検証
風速 5 m/s	2 車線トンネルにおける乱流域風速状態と大断面トンネルの特性比較

4. 2 実験ケースと計測・データ収集項目

今回行った火災実験ケースと規模について表-5 に示す。

ガソリン 1 m^2 火皿火災実験は燃焼速度測定を行い、基礎データの収集を目的としている。

ガソリン 4 m^2 火皿火災実験は 2 車線トンネルにおいて過去の実験実績が最も多いケースであり、2 車線トンネルと大断面トンネルとの火災性状の比較検証を目的としている。

ガソリン 9 m^2 火皿火災実験は、大型バス 1 台当たりの火災規模（ 20 MW クラス）に相当するものである。

乗用車 3 台の実験は、水噴霧設備の効果の 1 つである「火源近傍における類焼防止効果」を確認する目的で実施するものである。

大型バス火災は、大断面トンネルにおける実車火災の発煙状況、坑内温度等について過去の実験結果および実車と火皿の比較検証を行うものである。

表-5 火災実験ケース

No	火災規模	水噴霧放水	坑内風速	No	火災規模	水噴霧放水	坑内風速
1	ガソリン1㎡火皿	有り	0 m/s	6	ガソリン4㎡火皿	有り	2 m/s
2	ガソリン4㎡火皿	無し	0 m/s	7	ガソリン4㎡火皿	有り	5 m/s
3	ガソリン4㎡火皿	無し	2 m/s	8	ガソリン9㎡火皿	有り	2 m/s
4	ガソリン4㎡火皿	無し	5 m/s	9	乗用車3台	有り	5 m/s
5	ガソリン4㎡火皿	有り	0 m/s	10	大型バス1台	無し	2 m/s

避難環境の評価・解析、並びに今後予定しているシミュレーション解析を実施する上で必要となるデータの収集を目的として、測定項目は、①坑内風速、②煙濃度、③気流温度分布、④覆工面・気流の境界部分温度、⑤有害ガス濃度、⑥坑内圧力分布、⑦受熱輻射量、⑧ガソリン燃焼速度、⑨煙の挙動、の9項目とした。

5. 実験結果

(1) 燃焼速度の確認

実験ケース NO.1 ガソリン火皿1㎡無風燃焼時の燃料重量減少量測定より、定常燃焼時（点火51秒後から3分間）における平均燃焼速度=4.5mm/minと計測され、ガソリン火皿1㎡の平均発熱量=2.5MWが確認された。また、このときの平均輻射熱量=102W/㎡であった。

ガソリン火皿4㎡無風時（実験ケース NO.2）では、定常燃焼時の平均輻射量=429W/㎡であり1㎡火皿のほぼ4倍であり、他のケースについても燃焼速度=4.5mm/minとして取扱い、関係式-①より火災規模を算出すると熱出力は表-6に示すとおり過去の知見より若干向上していることが判明した。

$$Q = \frac{S \times v}{60} \times q \times Q' \times 10^5 \quad (\text{kcal/sec}) \quad \cdots \text{①}$$

Q : ガソリン火皿面積の熱出力(kcal/sec)

v : ガソリンの燃焼速度 (cm/min) , q : ガソリンの密度 0.7g/cm³

Q' : ガソリンの燃焼熱値 10,800cal/g, 熱出力 1MW=240kcal/sec

表-6 ガソリン火皿の熱出力

火皿面積	本実験結果	過去の知見
1㎡	2.5MW（実験値）	2.1MW
4㎡	9.5MW（計算値）	8.4MW
9㎡	21MW（計算値）	20MW

(2) 坑内温度

ガソリン4㎡火皿、坑内風速2m/s時（実験ケース NO.3）の坑内温度変化について、図-3に示すトンネル天井部、照明ラック部、避難環境部の3箇所で大断面トンネルと過去の2車線トンネル実験結果¹⁾による最高温度上昇値の比較を行った。

天井部は覆工コンクリートへの熱影響、照明ラック部は各設備ケーブル類への熱影響、避難環境部は人体への熱影響を確認するために図-3に示す計測器の配置で測定を行った。

表-7に示すとおり、大断面トンネルは過去の2車線トンネルに比べ、いずれの箇所も上昇温度は低く、火点から離れるほど温度上昇が低い結果であった。

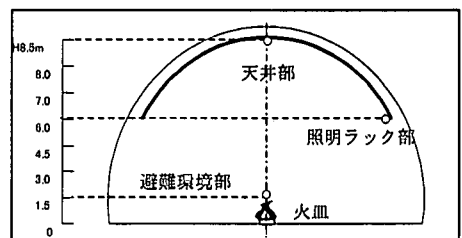


図-3 坑内温度計測器の配置

表-7 トンネル坑内最高温度上昇値

		火点風下 10m		火点風下 20m	
		大断面 TN	2車線 TN	大断面 TN	2車線 TN
天井部	8.5m/6.5m	96℃	145℃	29℃	108℃
照明ラック部	6m/4.8m	97℃	129℃	55℃	89℃
避難環境部	1.5m/1.5m	36℃	41℃	6℃	14℃

これにより、大断面トンネルの放熱効果が検証された。また、照明ラック部周辺温度についても、本実験では火点をトンネル中心に設定した為、危険温度に達することはなかった。

(3) 火災による煙の挙動と避難環境確認

ガソリン 4 m³火皿の無風時（実験ケース N0.2）の煙の対流状況について、大断面トンネルと過去の2車線トンネル実験結果による煙濃度分布結果を図-4に示す。ここで、避難時の歩行視点（路面より $h=1.5\text{m}$ ）に必要な煙の許容濃度は、過去の避難環境評価において用いられている減光係数 $C_s=0.4[1/\text{m}]$ を目安として示す。

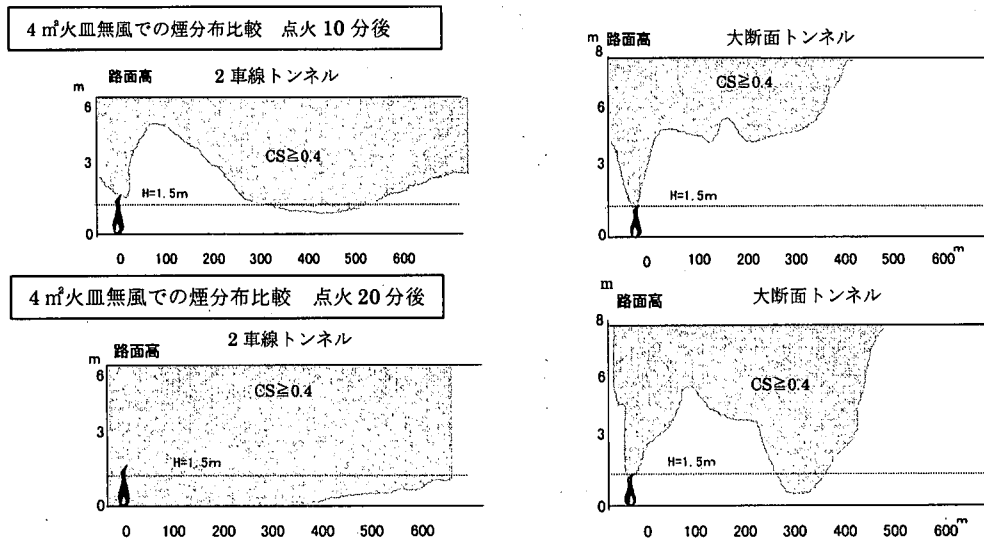


図-4 煙濃度分布比較

図-4より2車線トンネルでは点火10分後から火点遠方500m付近で煙が降下し始めるのに対して、大断面トンネルでは時間経過とともに煙は徐々に降下し始めるものの、点火から20分間程度では避難環境部は危険濃度達することなく火点遠方300m付近で路面から1.5mの高さに煙が降下し始めるという結果を得た。

次にガソリン火皿4 m³、風速2m/s時（実験ケース N0.3）の煙遡上状況比較を図-5に示す。

2車線トンネルでは点火5分後に火点風上約150mまで遡上しているが、大断面トンネルでは9分後に約230mまで遡上した。この理由としては大断面トンネルの場合、2車線トンネルに比べ、断面における熱気流の占める面積割合が相対的に小さくなり、縦流風が熱気流と壁面の間をすり抜けてしまうため遡上し易いと考えられる。

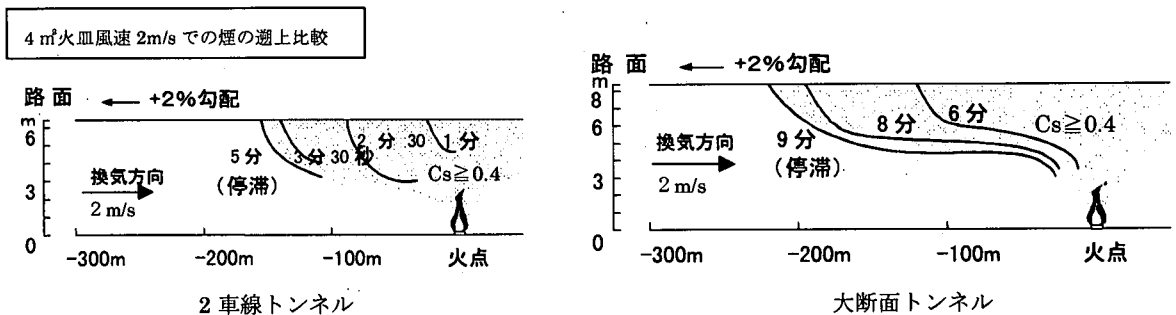


図-5 煙の遡上の比較

ガソリン火皿4 m³、風速5m/s時（実験ケース N0.4）の煙濃度分布について、大断面トンネルと2車線トンネル実験結果の比較を図-6に示す。

2車線トンネルでは、6分後既に煙がトンネル全体に拡散・充満して $C_s > 0.4$ となっているが、大断面トンネルでは煙が路面から高さ2m程度まで $C_s < 0.4$ を保ち避難環境が確保されている。また、火点風上側への煙の遡上も確認されなかった。

4 m²火皿風速 5m/s での煙分布比較 点火 6 分後

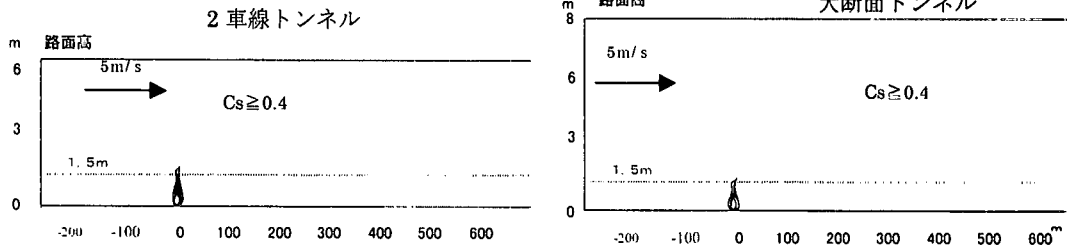


図-6 風速 5m/s 下の煙の比較

他に、実験ケース⑧、⑨、⑩より得られた結果は次のとおりである。

- ・ ケース⑧ 高風速下において、水噴霧放水による隣接車両への類焼防止効果が確認できた。
- ・ ケース⑨ 国内で初めて 9 m²ガソリン火皿実験を実施したが、避難環境については過去の 2 車線トンネル実験での 4 m²火皿実験結果と大きな違いは見受けられなかった。
- ・ ケース⑩ 過去の 2 車線トンネル実験よりトンネル天井部の温度上昇値が 100～130℃程度高くなっており、バス使用部材の変化（天井部材が鉄板製からアルミ合金へ）により天井部が焼失し炎が立ち上がったことが原因であった。バス火災の形態が変化していることが検証された。

6. おわりに

本実験の結果、下記のとおり事前に実施された大断面トンネルシミュレーションにおいて想定されていた結果とほぼ一致することが確認された。

- 1) 火災時の坑内温度は無風時及び有風時ともに、2 車線トンネルに比べて低く、大断面トンネルの放熱効果の優位性が確認された。
- 2) 煙の挙動について、火点風下側の避難環境は煙の降下位置の違いはあるものの大断面トンネルの方が降下するまでの時間が長いことより、避難許容時間が長く確保されることにつながり、避難環境という点で優位であると考えられる。
- 3) 火点風上への遡上は、低風速時に大断面トンネルの方が生じ易い状況であったが、天井部の蓄煙効果が大きいため路面付近の避難環境部に影響はなかった。
- 4) 坑内風速 5 m/s 程度の高風速時においても火点風下側の煙は、坑内断面に拡散せず路面付近の避難環境は確保されている。

以上より、火災時における大断面トンネルの避難環境は従来の 2 車線トンネルに比べ、蓄煙効果や希釈効果が高く優位であることが検証された。

今後は、水噴霧設備の使用による煙の挙動および避難環境の変化について検証を行い、実験では検証不可能であった様々な条件下でのシミュレーション解析を進め、更なる避難環境の評価を行い、大断面トンネルに対応したトンネル非常用施設設備基準を策定する予定である。

参考文献

- 1) トンネル内自動車火災時の対応手法に関する研究報告書 高速道路調査会 昭和 60 年 12 月
- 2) 第二東名・名神高速道路トンネル火災時の避難環境に関するシミュレーションによる検討 川端・王・八木 空気調和・衛生工学会論文集 No. 74, 1999. 7
- 3) トンネル内通報設備に関する調査研究報告書 高速道路調査会 昭和 55 年 10 月
- 4) 1999 PIARC Committee on Road Tunnels (C5) Fire and Smoke Control in Road Tunnels