

特集>>> トンネル

ちょうだい

長大トンネルにおける可燃性ガス対策

東九州道 ^{いの は え} 猪八重トンネル南新設工事

生悦住 賢 吾・松 尾 昭 彦

猪八重トンネルは、東九州自動車道の清武～北郷間に位置する2車線の高速道路トンネルである。暫定2車線の対面通行で運用を行うことから掘削断面積 110 m^2 の大断面トンネルである。また、全長 $4,858\text{ m}$ の長大トンネルであることから避難坑トンネルが併設されている。今回、本トンネルの施工中に、事前調査の段階では予想されていなかった可燃性ガス（メタン）が確認され、トンネル内でのガス爆発災害の防止が課題となった。

本稿では、避難坑併設の長大トンネルにおいて実施した可燃性ガス対策について、報告する。

キーワード：山岳トンネル、長大トンネル、可燃性ガス、換気システム、自動警報装置

1. はじめに

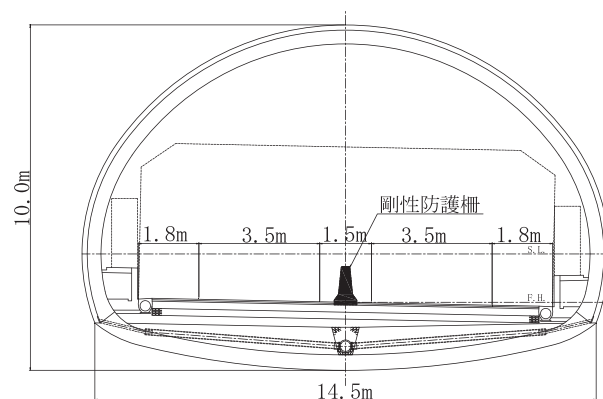
東九州自動車道は、福岡県北九州市を起点とし、大分県と宮崎県を經由して、鹿児島県鹿児島市に至る全長 436 km の高速自動車道である。そのうち猪八重トンネルが位置する宮崎市～日南市北郷町間の 28 km は新直轄方式での事業として国土交通省により整備され、完成後は、東九州の地域のネットワークの形成、

防災道路としての安全性の向上、救命救急医療の高度利用、観光等の産業の発展などに貢献するものと期待されている（図—1）。

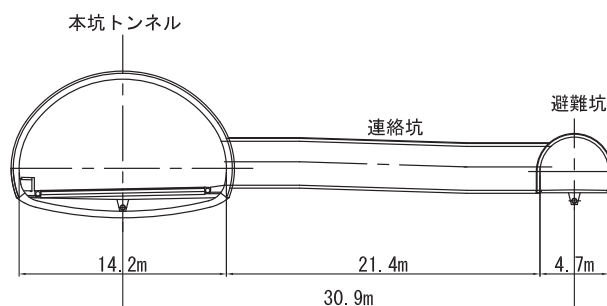
猪八重トンネルは、暫定2車線の対面通行で運用を行うことから掘削断面積 110 m^2 の大断面トンネルである（図—2）。また、全長 $4,858\text{ m}$ の長大トンネルとなることから避難坑トンネルが併設されている（図—3、写真—1）。表—1 に工事概要をまとめる。



図—1 トンネル位置図



図—2 トンネル断面図



図—3 本坑と避難坑の位置関係

本トンネルでは、事前調査の段階では予想されていなかった可燃性ガス（メタンガス）の噴出が掘削中に確認され、トンネル内でのガス爆発の防止が課題となった。

本稿では、可燃性ガス対策として実施した坑内換気対策、ガス調査ボーリング、ガス抜きボーリングなどについて報告する。



写真—1 トンネル坑口部全景

表—1 工事概要

工事名	東九州道（清武～北郷間）猪八重トンネル南新設（一期）工事 東九州道（清武～北郷間）猪八重トンネル南新設（二期）工事
発注者	国土交通省 九州地方整備局
施工者	（株）安藤・間
施工場所	宮崎県日南市北郷町郷之原地内
工期	平成 20 年 3 月 22 日～平成 23 年 10 月 31 日（一期） 平成 23 年 10 月 6 日～平成 26 年 3 月 31 日（二期）
工事内容	本 坑：トンネル延長 $L=2,841$ m, 掘削断面積 $A=110$ m ² 避難坑：トンネル延長 $L=2,126$ m, 掘削断面積 $A=18$ m ² 連絡坑：8 箇所

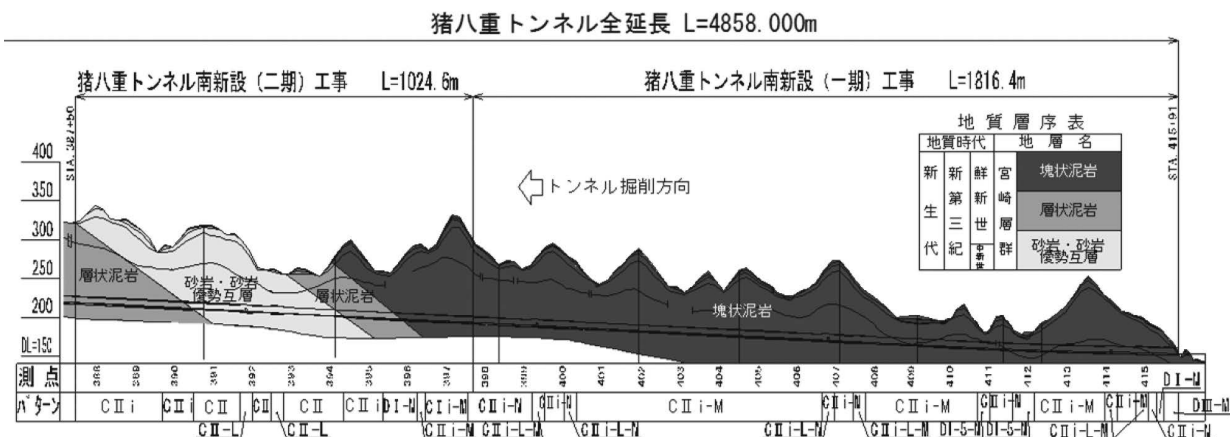
2. 地質概要

猪八重トンネル周辺の地質は、古第三紀（5,000～3,000 万年前）に形成された日南層群と、新第三紀中新世（2,000～1,000 万年前）に形成された宮崎層群を基盤岩とし、その上部に、未固結の崖錐堆積物、崩積土、段丘堆積物、土石流堆積物などが分布している。今回報告する南工区は、大部分が宮崎層群に属している。宮崎層群は、総括的には、基底部に礫岩あるいは粗粒砂岩が存在し、その上部に厚い砂岩および泥岩が重なり、漸次上位に向かって砂岩泥岩互層が優勢となる。南工区のトンネルはこのうち泥岩および砂岩優勢互層域を通過している（図—4）。

3. 可燃性ガスの確認とガス胚胎状況の予測

可燃性ガスは、避難坑の坑口から 420 m 付近を掘削中に初めて確認された。爆薬装薬作業中に装薬孔から異音を確認されたことから、作業を中断し、ポータブルガス検知器でガス濃度の測定を行った。その結果、装薬孔口で最大 71% LEL の可燃性ガスを検知した。ただし、装薬孔口で高い濃度のガスが確認されていても、口元から 30 cm 程度離れた位置では希釈され、可燃性ガス濃度はほぼ 0% LEL となった。また、口元の可燃性ガス濃度も時間の経過とともに低下し、30 分程度で 0% LEL となった。このようなことから、切羽天端付近などでもガスの滞留は認められなかった。

坑内に滞留するほどの噴出ではないが、高濃度の可燃性ガスが確認されたことから、工事を一時中止し、可燃性ガスの出現状況を予測し、対策を立てる必要が生じた。そこで、地山のガスの胚胎状況を把握するため、切羽前方への調査ボーリング等の調査を行うこととした。調査の結果、前方ボーリングで高濃度の可燃



図—4 トンネル地質縦断面図

性ガスが確認され、可燃性ガスは一過性のものではなく、今後も引き続き噴出する可能性が高いと判断した。一方で、いずれの調査孔でも可燃性ガスの噴出は数分～数時間で治まっており、また、切羽からの湧水もほとんどないことから、メタンの突発的な大量噴出の可能性は小さいと考えられた。

4. 可燃性ガス対策

切羽前方の調査ボーリング等の結果から、引き続き可燃性ガスの噴出が発生すると考えられたため、トンネル掘削再開に向けて、下記の可燃性ガス対策を実施した。

- ・可燃性ガス対応の換気設備の導入
- ・監視・警報システムの導入
- ・安全管理体制の策定
- ・ガス調査ボーリング
- ・ガス抜きボーリング

(1) 可燃性ガス対応の換気設備の導入

可燃性ガス対策のうち換気に関しては、可燃性ガスの濃度を十分に希釈できる換気容量を確保することが求められる。換気容量を確保するための坑内風速に関する記述は、ずい道等建設工事における換気技術指針¹⁾や、山岳トンネル工事に係るセーフティ・アセスメントに関する指針・同解説²⁾などに記されており、望ましい風速として0.5～1.0 m/s程度の値が示されている。本工事においては、可燃性ガスの胚胎状況の予測から、メタンガスの大量噴出や突出は想定しがたく、後述する調査ボーリング・ガス抜きボーリングなどを併用することを考慮し、坑内風速を0.5 m/s以上を確保することとして、換気設備の見直しを行った。

避難坑併設トンネルでは、経済性などから坑道換気方式による換気を行う場合もある。しかし、本トンネルでは、可燃性ガス確認以前から坑内環境や施工性等を重視し、本坑・避難坑それぞれ単独での全線送気方式による風管換気（希釈封じ込め方式；送気・集じん式）を採用していた。換気における可燃性ガスの対策に当たっては、換気方式を含めて再検討を行った。表一2に坑道換気方式と風管換気方式による再検討結果を示す。比較検討の結果、換気方式については変更せず、送気設備の容量を増強することで対応するものとした。

坑内風速0.5 m/s以上を確保するために送気量を増大したことから、集じん機位置でのエアカーテン効果を確保するために、集じん機的能力もあわせて増強す

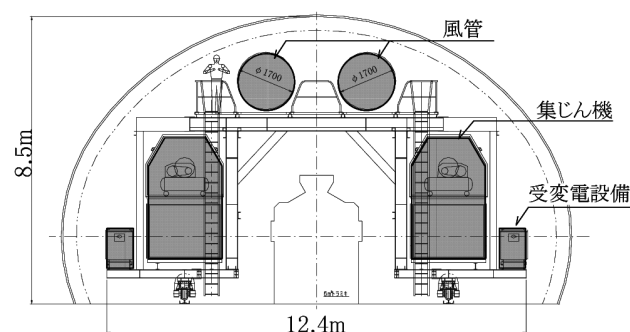
表一2 換気方式の比較検討（再検討）

	①坑道換気	②風管換気 (希釈封じ込め方式)
坑内風速 0.5 m/s の確保	避難坑から本坑への送気のために、2箇所の連絡坑を用いる必要がある △	送気装置の大容量化で対応可能 ○
粉じん濃度 の確保	避難坑に設置できる集じん機の大きさの制約から、避難坑の汚染空気を本坑の切羽に送る恐れがある △	坑外からの送気、坑内での集じんにより、特に問題ない ○
可燃性ガスの大量 噴出時の対応	換気設備が坑内にあるため、電力遮断により換気不能となる ×	坑内の電力を遮断し、坑外の送風機により換気可能である ○
経済性	②より1割程度安価 ○	①より1割程度高価 △
その他	可燃性ガス地山における実績がない △	多くのトンネルで実績がある ○
総合評価	×	○

る必要があった。検討の結果、大型の集じん機(2,400 m³/min 級) 2台を並列配置することで、効果的な発生粉じんの封じ込めを期待できると判断し、集じん機の増設により対応することとした。

一般に、集じん機は運搬用の台車に搭載し、切羽の進捗に応じて、牽引して前方に移動する。しかし、坑内に並列配置した2台の集じん機をこのような方法で移動するには、作業に多大な労力を要し、狭い坑内では安全性にも問題があると判断された。そこで本トンネルでは、この問題に対して、集じん機2台を搭載して自走可能なガントリー型の集じんシステム台車を導入することとした(図一5、写真一2)。集じんシステム台車には、切羽電源用の受変電設備、延伸する高圧電線なども搭載し、切羽後方の設備を集約して、集じん機の移動と同時に移設できるものとした。

なお、当初計画では、坑内の集じんは、電気式集



図一5 集じんシステム台車



写真—2 集じんシステム台車

ん機により行う計画となっていた。しかし、電気式集じん機は静電気力を用いた集じん方式であり、直流高電圧によるコロナ放電により帯電させた粉じんを、電極間に通過させて捕集する。そのため、火源となりうることから可燃性ガス環境下での使用は不適であり、フィルター式集じん機に変更することとした。

表—3 に本工事で採用した坑内換気設備の一覧を示す。

表—3 坑内換気設備一覧

	名称	諸元・規格	機関出力 (kW)	台数	風量 (m ³ /min)
本坑	送風機	反転軸流式 2,000 m ³ /min 4.9 kPa	110 × 2	2	4,000
	集じん機	フィルター式 2,400 m ³ /min 級	160	2	4,800
避難坑	送風機	反転軸流式 500 m ³ /min 5.4 kPa	30 × 2	2	1,000
	集じん機	フィルター式 500 m ³ /min 級	37	1	500

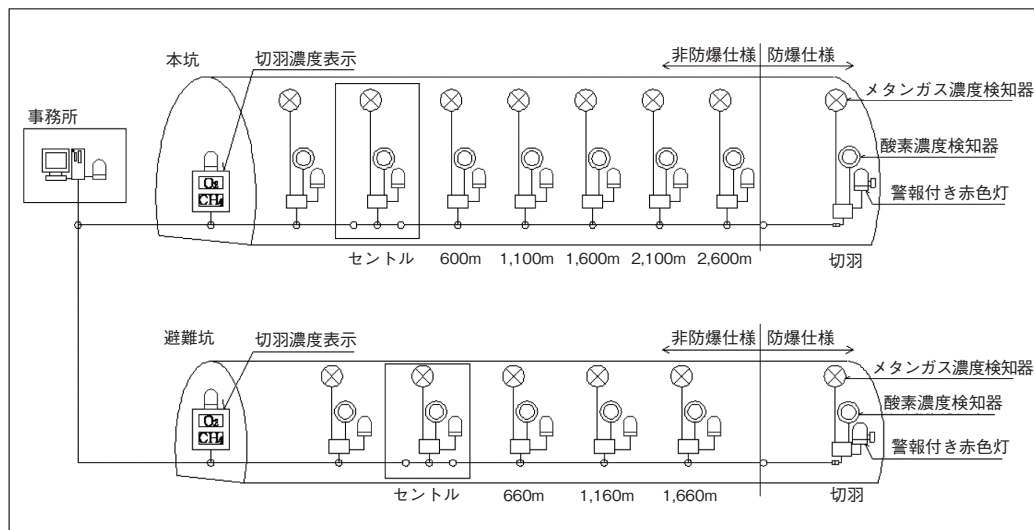
(2) 監視・警報体制の確立

可燃性ガスの発生状況を把握し、坑内の安全を確認するため、自動計測・監視・警報システムを導入した。以下にシステムの概要を示すとともに、図—6 にシステムの概要図を示す。

- ①本坑、避難坑ともに坑口近くの断面拡幅部（TD160 m 付近）に固定式ガス検知器（酸素・メタン）を設置し、掘削の進捗に伴い、500 m 毎に増設した。
- ②本坑、避難坑ともに切羽直近に防爆型の半固定式ガス検知器（酸素・メタン）を設置し、トンネル掘削進行に伴い移動した。
- ③本坑、避難坑のセントルに半固定式ガス検知器（酸素・メタン）を設置し、覆工作業の移動に伴い移動した。
- ④計測結果は、オンラインで現場事務所の PC と結び、リアルタイムでモニターに表示した。また本坑、避難坑の両坑口部に電光掲示板で切羽のガス濃度を表示した（写真—3、写真—4）。
- ⑤計測値が管理基準を超えた場合、検知場所、坑口および現場事務所に設置した回転赤色灯および警報器が作動するようにした。

(3) 管理基準の策定

安衛則第 389 条-8 では、30 % LEL（1.5Vol %）を労働者の退避基準濃度としている。本工事では、より安全側である 20 % LEL を全作業中止・退避基準とし、5 % LEL を一次警戒基準、10 % LEL を二次警戒基準とした。表—4 に本トンネルで採用した可燃性ガス濃度の安全管理基準を示す。



図—6 警報システム概要図



写真—3 現場事務所パソコンモニター



写真—4 坑口部電光掲示板

のガス胚胎状況を確認するための長尺調査ボーリングと、切羽近傍のガス胚胎状況をより詳細に確認するための短尺調査ボーリングの2種類を併用することとした。

長尺調査ボーリングとして、本坑、避難坑の両切羽で、ドリルジャンボを使用して孔径 $\phi 75$ mmのノンコアボーリングを行った。削孔長は30 mとし、調査区間をラップさせるために、トンネル進行25 m毎に調査を繰り返した。ボーリング本数は、本坑、避難坑ともに断面当たり1孔とした。図—7に実施位置を示す。

ガス濃度の測定は、穿孔ロッドを継ぎ足す3.0 m毎に調査孔口元で実施した。測定により、30% LEL以上のガス濃度を検出した場合は、調査ボーリングを中止して後述するガス抜きボーリングを実施した。なお、穿孔時は、大量のガス噴出に備え、局所ファンによる希釈を行った。

短尺調査ボーリングは、本坑の機械掘削区間で実施した。ドリルジャンボを用いて切羽前方に4.5 m(ロッド1本分)穿孔し、ボーリング本数はトンネル1断面当たり3本とした。短尺調査ボーリングはトンネルの1サイクル掘進毎に行った。また、本坑の発破掘削区間および避難坑(全線発破掘削)は、短尺調査ボーリングの代わりに、爆薬装薬孔を使用してガス濃度の測定を行った。

(4) 施工時の調査ボーリング

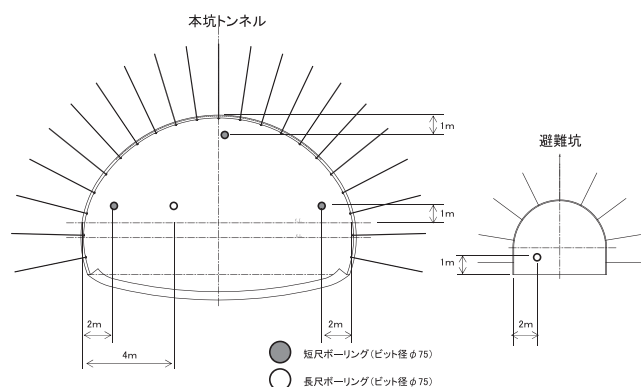
トンネル掘削を進める前には、調査ボーリングを実施し、事前に可燃性ガスの胚胎状況を確認することとした。調査ボーリングは、切羽前方の比較的長い区間

(5) ガス抜きボーリング

調査ボーリング孔で30% LEL以上の可燃性ガス(孔口から噴出する濃度)が確認された場合、調査ボーリ

表—4 可燃性ガス濃度の安全管理基準

メタンガス濃度		管理基準	警報	坑内作業	火気の使用	電源対策	ガス濃度測定	換 気
Vol%	%LEL							
5 (爆発下限濃度)	100	入坑禁止基準	避難警報 (連続音・赤色灯の点灯)	入坑禁止	作業中止	坑内電源の遮断	自動測定のみ	換気増強
1.5 (法規制濃度)	30	退避基準		作業中止・退避				
1	20							
0.5	10	二次警戒基準	警戒警報 (断続音・赤色灯の点滅)	警戒体制 作業継続		制限なし	測定強化 発生源の調査	換気点検・改善
0.25	5	一次警戒基準						
0	0	平常作業基準	なし	定常作業	作業届出		通常測定	通常換気



図ー7 調査ボーリング実施位置

ングを中止し、ガス抜きボーリングを実施した。なお、ここで設定した 30% LEL 以上のガス濃度は、ガスが送風により希釈される前の一時的な値であり、法規制の坑内可燃性ガス濃度の 30% LEL とは異なるものである。

ガス抜きボーリングは、過去の施工事例等から 1 孔あたりのガス抜きボーリングの有効範囲を半径 1.0 m と考え、調査ボーリング孔から上下左右に 1.5 m 離れた位置 4 箇所で行った。調査ボーリングと同様に可燃性ガス濃度の測定を穿孔 3.0 m 毎に実施し、30% LEL 以上の濃度を検出した場合は、さらに追加のガス抜きボーリングを行った。追加のガス抜きボーリングは、最初に実施した 4 箇所のガス抜きボーリング孔からさらに 1.5 m 離れた位置 3 箇所に行った。

なお、穿孔中は、調査ボーリングと同様に、局所ファンによる希釈を行った。

5. 施工結果

本トンネルでは、施工延長のほぼ全線にわたって可燃性ガスが確認され、特に宮崎層群の塊状泥岩層区間では 20% LEL 前後の濃度の可燃性ガスが継続して確認された。この区間では、概ね一様にガスが確認され、場所によるガス濃度や噴出量、噴出時間の変化は小さかった。また、断層帯や背斜構造など事前に可燃性ガスの噴出が多くなると予想された区間においても、ガス濃度や噴出量の変化は確認されなかった。なお、土被りによって、ガスの噴出状況が異なる傾向があり、土被りが 30 m 以下の場合では可燃性ガスはあまり検出されなかった。

6. おわりに

山岳トンネルの施工では、トンネル計画段階で可燃性ガスの正確な胚胎位置や胚胎量を把握することは難しい。このため、本工事で実施した切羽からの連続した先進調査ボーリングは、工事を安全に進める上で効果的であった。

本工事では、圧力を伴うような大量の可燃性ガスの噴出は確認されなかったため、換気能力の増強とガス抜きボーリングを中心とした対策により、施工時の安全を確保することができた。高濃度の可燃性ガスが大量に発生し、換気による安全な濃度までの希釈が困難な場合には、本工事で実施した対策より上位の対策が必要となる。噴出する可燃性ガスを直接坑外の安全な場所まで誘導・放出する対策や、機械・設備の防爆対策、早期覆工といった噴出抑制対策などが有効と考えられ、状況に応じた対策を実施する必要がある。

謝 辞

最後に、本工事の施工に際しては、国土交通省宮崎河川国道事務所の皆様はじめ、関係各位に多大なご指導・ご協力いただいたことを報告するとともに御礼申し上げます。

J C M A

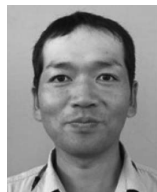
《参考文献》

- 1) 建設業労働災害防止協会 新版「ずい道等建設工事における換気技術指針 2012.
- 2) (株)日本トンネル技術協会 山岳トンネル工事に係るセーフティ・アセスメントに関する指針・同解説 1997.

【筆者紹介】



生悦住 賢吾 (いけずみ けんご)
㈱安藤・間
名古屋支店 土木部
課長



松尾 昭彦 (まつお あきひこ)
㈱安藤・間
九州支店 土木部
主任