

関越トンネルの換気計画と断面掘削

THE PLAN FOR VENTILATION SYSTEM AND FULL FACE EXCAVATION IN THE KAN-ETSU TUNNEL

稲見悦彦*・藤村弘志**・佐藤和夫***

By Etsuhiko INAMI, Hiroshi FUJIMURA and Kazuo SATO

まえがき

関越トンネルは、上越国境谷川連峰を南北に貫ぬく延長 10.9 km の長大道路トンネルである。工事は昭和 52 年 3 月に着手され、約 8 年の年月を経て、昭和 60 年 10 月 2 日に開通された。このトンネルでは、積極的に新しい技術を取り入れ工事を遂行したが、当時としては最新の技術であったが今日では常識化したものも多い。しかし工事の完成にあたり再度振り返り、このトンネルが直面していた問題点を探り検討を加えることは、今後の長大トンネルの計画・施工に有益であると考え、換気計画と全断面掘削について述べるものとする。

1. 関越トンネルの概要

関越トンネルは、総延長約 300 km の関越自動車道のほぼ中央に位置する。前後は急峻な山岳地帯であり、工事の完成には莫大な工費を必要とする。したがってこの前後、湯沢 IC より月夜野 IC 間の 32 km は暫定二車施工である。長大トンネルでしかも対面交通の場合、大きな問題となるのは火災時の対応である。人命尊重ということを考えた場合、緊急時にはいち早く安全な場所に人を退避させるこ

とが最良であることから、本坑と平行に避難坑を設置することとした。その断面は救急車が通行可能な断面とし兼せて工事中の先導坑として必要な断面を包含するものとした。

本坑と避難坑を結ぶ避難連絡坑の間隔は、火災時における人の行動限界や、諸外国の実状も勘案し、350 m を標準とした。断面は、人が 2 列で行動出来る大きさとしたが、緊急時に要求される行動の敏速さを考えた上で、トンネルの 4 分割点に設けられる 3 本の避難連絡坑は、小型車通行可能な避難坑と同一の断面とした。

本坑の内空断面は、1 種 3 級 A の構造規格を内包することは勿論であるが、長大トンネルの維持ということも考慮し、両側に監視員通路を有するものとした。この監視員通路には、清掃機能を備えた保守点検車の走行を可能とするように、通常の監視員通路の幅員より 15 cm 広い 90 cm とした。また、天井部には、換気の大形ファンを設置可能な様に内空断面を決定した。図-1 にトンネル標準断面、図-2 にトンネル平面の概要を示す。

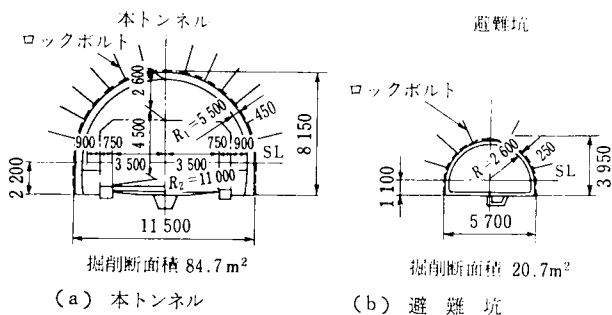


図-1 関越トンネル標準断面

* 日本道路公団東京第二建設局建設部長
(〒160/東京都新宿区西新宿 1-21-1)** 日本道路公団東京第二建設局建設部施設課長
(同上)*** 日本道路公団東京第二建設局建設部工務課調査役
(同上)

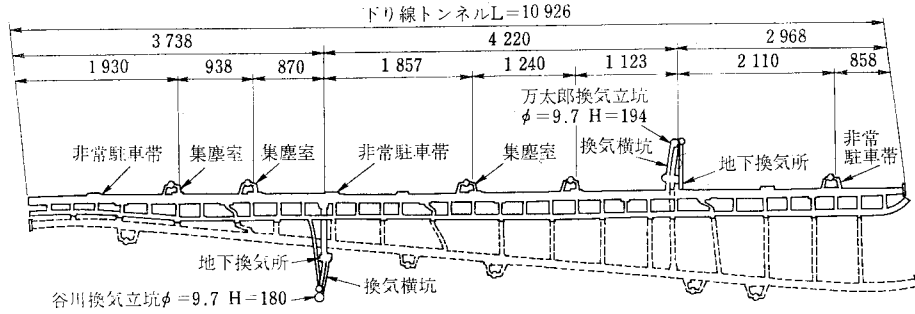


図-2 関越トンネル平面図

2. 換気計画

(1) 新しい換気方式の立案

道路トンネルの基本的な換気方式は、図-3 に示すように、現在では横流式と縦流式の二種類に大別され、3000m を超すような長大トンネルでは、極端に交通量の少ない場合を除き、換気用立坑の数やその他技術的な制約から横流式の換気方式を採用することが常識とされてきた。この換気方式は制御系が単純で換気効果も良好であるが、縦流式に比較するとトンネル全長にわたり送排気ダクトを必要とし、トンネル断面も大きくなるため、建設費が大となる傾向にある。

また、トンネルの維持管理費は他の道路区間に比べてかなり高く、その中でも換気用動力費が占める割合が高いこと、および山間地の高速道路の建設が進むにつれてトンネルの管理延長が急激に増加する傾向にあることから、換気設備の建設、管理のコストを低減化する工夫の必要性が高まり、さらに昭和 48 年頃の石油危機に端を発した省資源の社会的な要請がこの換気方式の再検討に拍車をかけた。

このような状況の下で、通行車輛による交通換気力を有効に利用できる縦流式換気の長大トンネルへの適用に大きな関心を持たれ、関越トンネルの換気方式として、電気集じん機を利用する立坑送排気縦流方式が立案された。この方式を実現するにあたっての問題点は、a) トンネル換気用としての電気集じん機の実用化(処理風速、効率、寿命、保守性)、b) 対面交通における火災事故発生時の対応、等であり、これらについて各種実験、試作を繰り返した結果、実用上良好な換気システムが構築された。

(2) 換気計画の概要

この新しい換気計画は次のとおりである。車道内風を一方通行時の交通方向である水上坑口から湯沢坑口方向に流し、排気ガスによる煤煙濃度が設計値に到達する位

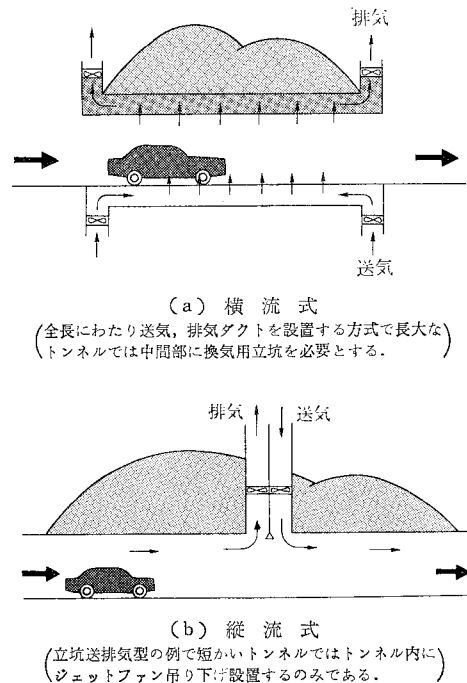


図-3 換気設備の基本方式

置に集塵室を配置して集塵機により浮遊煤塵を捕集する。集塵室を経て光学的な見え方が改善された空気を再度車道内に送り、これを繰り返して集塵機では改善されない一酸化炭素等のガス濃度が設計値に到達する立坑地点で、トンネル内外の空気を入れ替えるものである。

すなわち、将来の一方通行の交通換気力を利用し、また、集塵機によりトンネル内空気を再利用することが出来るため、横流式に比較して換気動力の大幅な削減が可能となるわけである。

(3) 電気集塵機の開発

換気用立坑の数と設置位置は、谷川岳付近が上信越高原国立公園で自然環境の保全という制約から、万太郎谷と谷川本谷の2ヶ所に限定され、前述のように3分割された換気区間の中間部で煤煙濃度が設計許容値に達して

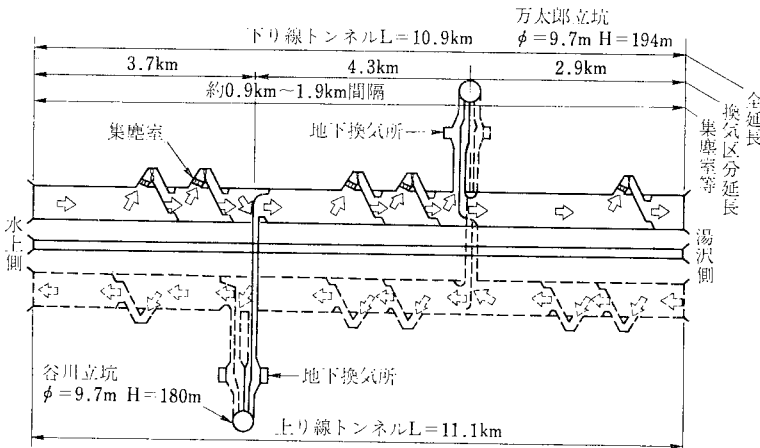


図-4 換気計画図

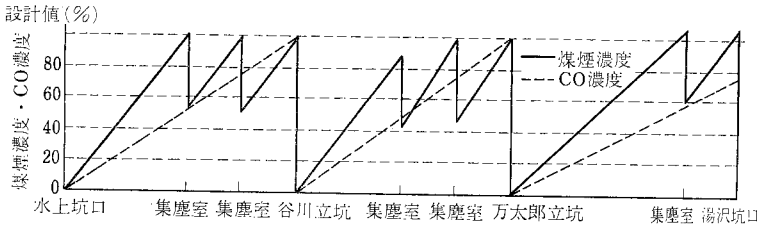


図-5 濃度分布図

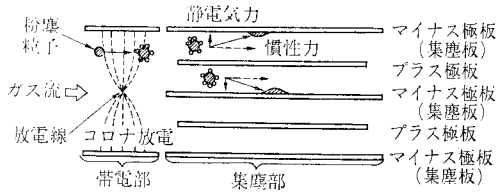


図-6 電気集塵機の原理

しまう。このため、本トンネルに縦流換気方式を適用するためには、電気集塵機の実用化の成功が不可欠となる。電気集塵機をトンネル換気用として使用するための条件は、処理風速が速いこと、排気ガス環境下でも故障の少ないこと、無人運転が原則であるため捕集した煤塵払い落とし等の保守が容易に行えることである。試作を重ねた結果実用上満足できる性能を得られたので、以下にその概要を示す。

集塵機の原理は図-6に示すように、帯電部と集塵部から構成されており、帯電部では11kVの直流電圧が放電線に印加されてコロナ放電が発生し、集塵部では5.5kVの直流電圧がプラス極板に印加されている。煤煙粒子が空気流に従って帯電部に流入すると、コロナ放電中のプラスイオンと結合し、粒子はプラスに帯電される。この帯電された粒子が後段の集塵部内に流入すると極板間の電界の中でマイナス極板に付着する。処理風速と集塵効率の関係は、主としてこれらの直流電圧値、極

板の間隔、極性の選択等の組み合わせに影響され、開発した実用機では、処理風速が7m/sで80%以上の集塵効率が得られている。

極板に付着し、堆積した粉塵はある量を越すと極板より再び空気中へ飛散するため、この現象が生じる前に堆積した粉塵を払い落とす必要がある。この払い落とし方式には、水を吹き付ける方式と高压空気を吹き付ける方式があるが、払い落した後の粉塵の廃棄処理が容易な高压空気方式を採用した。すなわち、払い落としを行う場合は、集塵機前後のダンパを閉め、吸引ダンパを開けてエアブロー装置のノズルより高压空気を極板に吹き付けて粉塵を払い、バグフィルタで回収する構造となっている。

(4) 換気制御方式

道路トンネルの換気指標としては、CO(一酸化炭素)とVI(煤煙透過

率)が用いられており、通行車輛台数により常に変動する排ガス量に対して最小運転費でトンネル内のこれらの指標値を維持するには、換気風量を自動制御する必要がある。換気に必要な電力は、換気風量のほぼ3乗に比例するため、最適風量に抑制しなければ運転電力は大幅に増加する。

横流式では、送気と排気が車輛の流れと直角の方向に

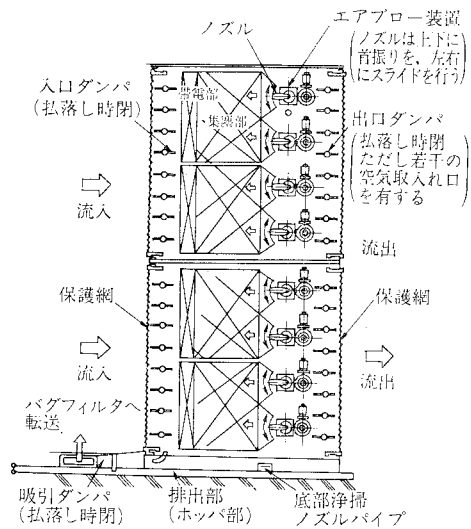


図-7 電気集塵機の構造

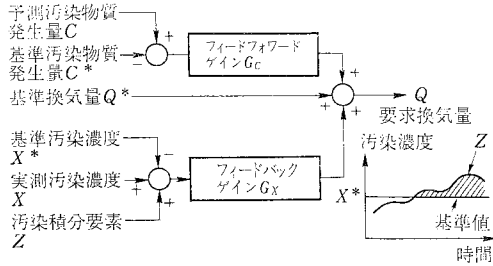


図-8 換気制御基本方式

行われ、排出ガスは短時間で排気されるため換気制御は単純な系によるシミュレートも可能であるが、縦流式では排出ガスが車道を縦に流れるためガス濃度の移動が当然ながら縦流となって制御の遅れ時間が大きい。また2ヶ所の立坑によって分割される3換気区間の圧力均衡を保持するという必要条件に対し交通流が外乱となるという特徴があることから制御系は複雑となる。特に、関越トンネルではしばらくの間対面通行であるため、通行車輛のピストン力が換気方向とは逆向きに作用することもあり、通行車輛台数、車速あるいは上下交通量比率等からトンネル内圧力を計算して圧力制御を必要とする。

図-8 に示すように、関越トンネルでは、フィードバックループをバックアップとして有するフィードフォワード制御方式を換気量の制御方式として採用している。主なフィードフォワード要素としては、交通量の計測値からの短期交通量予測に基づく排出ガス濃度予測値で、フィードバック要素としては、計測される交通量、CO、VI、風速値である。この制御系の実行設備としては、基本的には換気量は立坑部地下換気所の軸流ファン、および集塵装置に分担させ、各々の換気区間の圧力均衡は1500mm径のジェットファンに分担させる構成である。

交通量の把握、予測については種々の工夫を取り入れているが、その主なものは10分単位の交通量を予測する手法である。交通量の推移は離散時刻系で時々刻々と変化する動的な系であり、これを自己回帰モデルを使い、動的な状態を逐次的に最小分散推定していくというコンピューター処理に適した方式を採用している。

対面交通時の縦流換気方式の制御で大きな問題点は、火災事故発生時の対策である。すなわち、火災発生地点をさみ両側に車輛が停止しているため、一定方向に強制的な排煙ができないことである。火災発生時で最も重要な対策は利用者の避難であることは明らかであり、強制排煙の困難さを考慮して、避難専用のトンネルに通ずる非常口を従来の設置間隔の半分である約350m間隔に設置した。避難環境を確保するための換気機の運転方法は大きなテーマであり、数々の条件を与えてのシミュレーション検討を行った。この結果、自然風の測定、交通流の挙動による圧力分布の変動の推定を基礎にして、

ジェットファンの組み合わせ運転を行い、トンネル内の風速を零値に収束させる制御方法を開発した。これは平常時の制御よりもさらに外乱条件が大である複雑な制御系で、シミュレーション結果が実際のトンネルでどの程度利用できるかという問題点があったが、トンネルの供用開始に先き立ち、大型車の実走行によるテストや大型バスの実車燃焼テストの結果、実用上十分にタフな制御系であることが検証された。

これらの換気制御は、道路トンネルの管理に適したセンサー技術やコンピューターの利用技術の進歩により可能となったものであるが、開通後の交通量と換気効果との関連等の追跡調査を加えることにより、さらに効果的な最適値制御が可能であると思われる。

3. 全断面掘削

(1) 工法の選定

掘削工法を決定する最大の要因は、地山の良否である。谷川連峰には、清水トンネル、新清水トンネル、大清水トンネルの3本の鉄道トンネルが掘削されており(図-9)地質の情報源となったが、特に大清水は最も良い情報源であった。計画段階におけるボーリングは、11孔約1700m、弾性波探査は19kmであるが、中間部の4.3kmは実施していない。これらの情報をもとに計画時に推定された地山区分は、表-1のとおりであり良好な岩区分のI、IIが大部分を占めている。

地山区分に密接な関係があり、掘削の難易を左右する

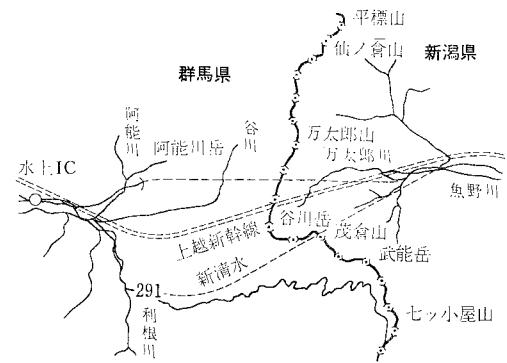


図-9 関越トンネル付近概要図

表-1 関越トンネル岩区分

岩区分	調	査	実	績
I	6440 m	59.2%	4408 m	40.5%
II	2105	19.3	5031	48.7
III	1675	15.4	920	8.5
IV	665	6.1	526	2.3
計	10885 m	100.0%	10885 m	100.0%

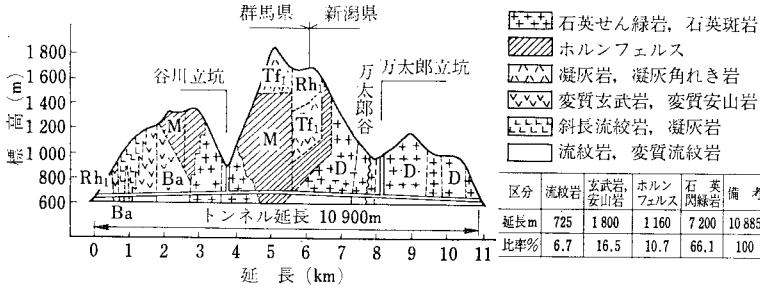


図-10 地質概要図

ものに、湧水の多寡がある。湧水量の予測は、高橋の方法を用い、3本の鉄道トンネルの実績も考慮して恒常湧水を求めたものである。この場合近接する大清水トンネルの影響の無い場合、有る場合のケースを求めている。この結果は、大清水トンネルの影響を考えた場合で、水上方で 14.4 m³/min、湯沢方で 7.9 m³/min である。一方、集中湧水は、破碎帯に賦存する水を自由水として求めたものであり、最大で水上方で 3.2 m³/min、湯沢方で 2.1 m³/min 程度と推定された。

地質の実績を 図-10 に示すが、水上方の変質玄武岩、変質安山岩部には、断層破碎帯があり、集中湧水もこの区間に多いことが予想された。しかし避難坑先進ということから、水抜効果と、本坑で問題が起きた場合、避難坑側からの補助手段を期待し得るということから全断面掘削工法に踏みきったものである。なお坑口部の崖錐部は側導坑先進工法で掘削した。

(2) 全断面掘削工法推進の補助

全断面掘削は、大型の機械を使用し、掘進速度の向上を画ることにつくる。この主旨に沿って、掘削には、わが国で始めて本格的に油圧式掘削岩機を備えたジャンボを用意し、ずりの積込搬出にも大型重機を使用した(表-2)。ずり出し方式は、補助トンネルがレール方式、本

表-2 主要機械一覧表

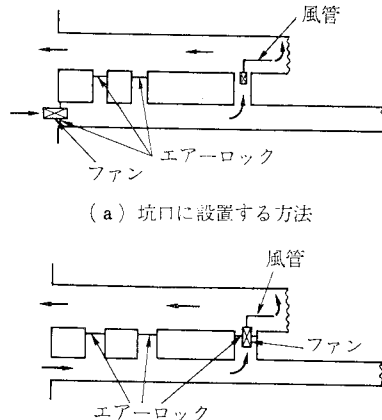
項目	本 坑	
	水 上 側	湯 沢 側
掘 削	油圧式8ブームガントリー ジャンボ L=5.85 m f=3.47 m	油圧式8ブームガントリー ジャンボ L=5.57 m f=3.30 m
ずり 積 込	仮置: ロードホールダンプ 7.6 m ³ 積込: トラクタショベル 2.7 m ³ ×1 (サイド バケット)	トラクタショベル 4.2 m ³ (サイドバケット)
運 搬	ダンプトラック 20 t	ダンプトラック 15 t
コンクリート 打 設	コンクリートポンプ 60 m ³ /h	コンクリートポンプ 60 m ³ /h
型 わ く	全断面自走式スチール フォーム l=12.5 m	全断面自走式スチール フォーム l=12.0 m

注: L=ガイドセルの長さ, f=ドリフト可能フィード長さ,
l=型わく長さ。

坑はタイヤ方式である。トンネルでタイヤ方式を採用する場合、常に問題となるのは換気と路盤の保持である。特に長大トンネルのずり運搬は、所要動力が大きくなり大量の換気が必要とする。関越トンネルにおいては、所要換気量は、使用機器排出の NO₂ の許容値を 5 ppm とするものとし算出した。この結果、4 200 m³/min の

換気が必要とすることが判明した。ここで避難坑を利用した坑道換気を行うことになる。坑道換気の長所は、送風断面が大きいので、圧損が小さく動力が小さくて済むことにあり、特に大風量の場合に有効である。また局扇換気区間を除き風管が不要であり、漏風が少なく、風管の保守も不要である。関越トンネルでは、避難坑と、避難連絡坑が適当な間隔であったことが幸いしている。坑道換気の場合、風門の管理が特に重要であることはいうまでもない。避難坑、本坑のいずれを送気側とするかについては、議論のあった所であるが、切羽に早く新鮮空気を送ることを優先し避難坑送気とした。送風機の設置箇所としては、坑口あるいは連絡坑が考えられるが(図-11)、坑口に風門のない方が工事用車輛の通行に支障がないこと、送風機に風管を接続すれば風管換気することも可能であることから、連絡坑に設置した。

換気量を低減させるには、使用重機の総馬力を少なくすることが有効である。水上方では、坑口より 1 450 m からずり出し方式を、二次搬土方式に変更した。これは、切羽のずりを、ロードホールダンプで積込運搬し、切羽後方 110 m に仮置き、ここで 1.6 m³ のショベルで積込み、切羽とは無関係に搬土する方式である。これを湯沢側の切羽連動のずり搬出方式と比較すると 図-12



(b) 連絡坑に設置する方法

図-11 送風機設置箇所

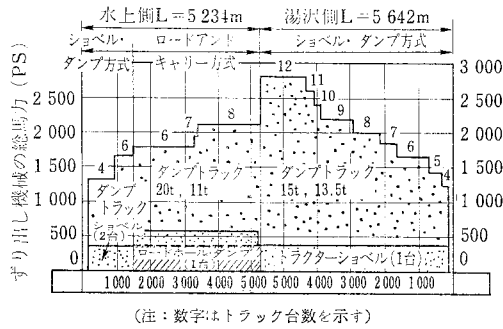


図-12 坑口からの距離とずり出し機械の総馬力

のようになり、所要馬力数が少なくなっており、換気量低減に有効であった。この方式は、サイクルタイムの短縮を目途としたものであったが、サイクルタイム短縮までにはいたらなかったが、省エネ・省力を実現するものとなっている。サイクルタイムの短縮には、搬土能力の増大を検討する必要があるものと考えられる。

路盤保守の方法としては、アスファルトによる仮舗装(路盤厚 150 mm, アスファルト厚 75 mm)を行った。仮舗装の実施は、ずり運搬のスピードアップ、運転手の疲労の低減、トラック走行による濁水発生抑止効果等がある。異常出水の際に路面を流下させる考えで全面舗装を考えたが、湧水の少ない場合は、走行必要幅で十分であるし、最終的に舗装段階にどう取り扱うかを十分に検討し、材料、構造を決める必要がある。関越の場合は、アスファルト分は除去し、路盤材は、現地で粒度を調整後路盤材の一部として使用した。

(3) 支 保

支保としては、岩質 I, II に対しロックボルト (L=2.0 m, φ=25 mm, 全面接着型) を計画した。当時は、まだ NATM が全面的に採用されていなかったが、ボルトはかなり使用されており、大清水でも使用されていた。当時は打込型が多かったが、管理の容易と確実性の面から、全面接着型としたものである。また落石防止に菱形金網を併用した。

巻厚についても検討を加え、ロックボルトの使用を考え合せ、岩質 I, II については 45 cm とした。

支保の実績を表-3 に示す。本坑における使用率は全体の 1/3 にとどまっている。これは非常駐車帯は岩質によらずすべて鋼製支保工としたこと、湯沢方には山はね区間があり安全のため

鋼製支保工を用いたことと、水上側では湧水が多かったことにもよるが、岩質 II に対し、ロックボルトの使用率が低かったことによる所が大きい。II の岩質は、亀裂が多く目ばなれが多く、ロックボルトの単独使用の限界がこの辺にあるものと思われる。補助坑の使用率も表-3 に示してあるが、ボルト長は 1.5 m であり径、接着方式は本坑と同様である。

(4) 掘削実績

地質の項で述べたように、水上側の変質玄武岩、変質安山岩は、予想通り破砕帯も多く全体に亀裂も多いものであった。特に湧水については、予想をはるかに上まわるものであった(図-13)。特に変質玄武岩ないしは変質安山岩質に多く、被圧水のため装薬もままならぬ箇所もあった。1940 m 付近では、水抜き坑掘削、水抜きボーリング等を実施し 16 m 間に 2 ヶ月を要している。湧水は堅硬岩の石英閃緑岩に入ってから続き、谷川直下

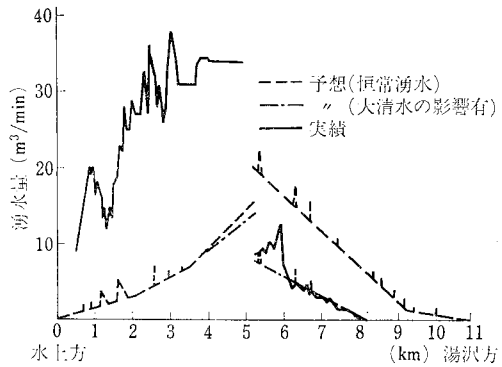


図-13 トンネル湧水予測と実績

表-3 支保上種別による掘削延長比

区 分	支 保 工		水 上 側		湯 沢 側		計			
	型式	種 類 (本)	間隔 (m)	延 長 (m)	延長比 (%)	延 長 (m)	延長比 (%)	延 長 (m)	延長比 (%)	
本 坑	標準部	A	RB(13)	1.5	1736.7	37.6	1695.2	42.5	3431.9	(39.9)
		B	RB(63)	1.2	48.3	1.1	177.2	4.4	225.5	(2.6)
		C ₂	H-200	1.0	2832.2	61.4	2118.9	53.1	4951.1	(57.5)
	山はね	L	H-200	0.9	413.7		255.6		669.3	6.1
		B ₂	H-200	1.2			1038.1		1123.3	10.3
		L	H-200	0.9			85.2			
その他				212.1		271.8		483.1	4.4	
				5243		5642		10885	100	
補 助 坑	A	RB(7)	1.5	2346.4	49.3	4748.8	76.8	7095.2	64.8	
		RB(9)	1.5	850.4	17.9	949.5	15.4	1799.9	16.5	
	B ₂	H-125	1.5	585.4	67.2	5698.3	92.2	8895.1	81.3	
		H-125	1.2	620.5	25.3	96.6	1.6	585.4	11.9	
	C ₂	H-125	1.2	360.3	7.5	385.1	6.2	745.4	6.8	
					4763	100	6180	100	10943	100

RB: ロックボルト, H: H 型钢, () は標準部の比率

(水上坑口より約 3600 m) を過ぎようやく湧水は少なくなる。一方湯沢方は、ほぼ予想通りの湧水量といえる。この差は一つには大清水トンネル掘削の影響の度合の強弱によるものと考えられる。すなわち湯沢方は大清水の影響が大きく(大清水トンネルは、水準的にみると関越より約 180 m 低い位置に掘削され、平面的には、斜交しており、湯沢方の坑口から約 1400 m 地点で交差する。図-9 参照) 水系も万太郎川が近接しているのみである。一方水上方は、大清水トンネルの影響圏をはなれ、水系も谷川と阿能川の間位置している。大きな山容を適度の亀裂と保水の役割を有する断層群よりなる地帯を始めて掘削したことにより大湧水となったものと思われる。大清水トンネルにおいても、清水トンネルを新清水トンネルの影響の少ない水上方においてより大量の湧水があったことから類推出来る。湯沢方においては、大清水トンネルの影響が強く、滞溜水が減少して定常状態に近いものだったと考えられる。湧水の減少の状況を見ると湯沢方では早く定常状態になるのに対し、水上方では定常状態に達するまでに時間を要していることから前述のような状況であったことが推察される。最終的な恒常湧水としては、水上方が約 14 m³/min、湯沢方で 4 m³/min であり、予測と大差はないと思われるが、集中湧水に大きな差があったと考えられる。

以上のような諸条件下で、トンネルは掘削されたのであるが、最終的な進行を表-4 と 図-13 に示す。湯沢方では、土被りが 750 m を越えた所(坑口より 4.3 km より 1.1 km 間) から山はねが発生したことを条件の中に加えねばならない。これを見ると、全断面掘削としては、まずまずの成績だったと考えられる。湯沢方の岩質 I の区間(約 1.7 km) で長孔発破(1 発波長 1.5 m~3.0 m)を試みてい

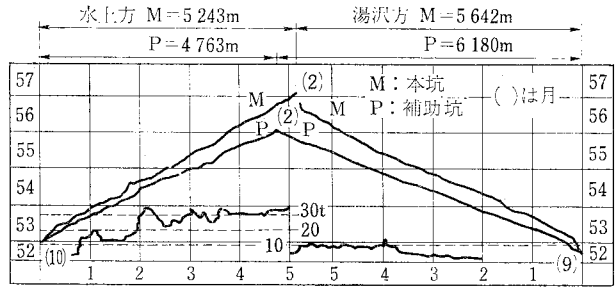


図-14 本坑・避難坑進捗と湧水

表-4 平均月進

区 分	水 上 側	湯 沢 側
本 坑	109.5 (49~171)	125.3 (40~196)
補 助 坑	132.2 (2~201)	156.0 (30~207)

() は最小, 最大の月進

る。この長孔発破のサイクルと、普通発破区間のサイクルとを 1 m 当りのサイクルとして比較すると、その優位性が認められている。

あとがき

10.9 km のトンネルの完成には、冒頭に述べたように 8 年半の年月を必要とした。その時点時点の新しい技術、工法を採用した訳であるが、トンネル技術の方も進歩しているのであって、往時の最新の技術は、今日では常識となっているものも多い。しかし、長大トンネルの完成は総合的な技術の上に立っているものであり、向上の意欲が新しい技術を生むことは必然であり、この意味で関越はモニュメントたり得ると考えている。

(1986.1.10・受付)

●学会新刊案内●

社会資本整備の財源

土木計画学シンポジウム
No. 19 (1985.12.5)

B 5判 オフセット印刷 220 ページ 4 000 円 (〒 300)

- [内 容] I. 費用負担の考え方 ①各種公共サービスの特質 ②社会資本サービスの受益と負担
 II. 各種施設整備の財源 ①道路 ②空港 ③下水道 ④港湾 ⑤治水
 III. 話題になっている負担方式の例 ①掛川新幹線駅 ②共同溝 ③関西空港 ④ポートアイランド ⑤土地信託 ⑥特定地方交通線
 IV. 新しい負担方式を求めて ①新線開発の開発利益と吸収対策 ②鉄道整備による開発利益の還元の方策 ③税制, 負担金, 用地特例の比較 ④規制・誘導・事業組み合わせ方式と負担・資金構成 ⑤地方負担のあり方に関する提案 ⑥欧米からの教訓 [付録] 第 18 回シンポジウム (1984. 7. 12~13) 補遺・都市の土地利用モデル