

トンネルに関する今後の課題

大阪大学工学部土木工学科 伊 藤 富 雄

1. はしがき

トンネルの5年先、10年先を見通して、筆者なりに、今後解決もしくは実施すべきと思われる諸問題を取り上げ、それらの解説を試みたのが本文である。また、執筆にあたっては、専門の方々のご参考に資するだけでなく、トンネルが総合的な技術の所産であることと、掲載誌「生産と技術」の性格を考えて、専門外の方々に今後ますますご協力を頂く一助となるように、配慮したつもりである。

しかしながら、近年とりわけ公務多端な筆者のこととて、具体的な資料の提示も十分でなく、単なる構想の記述にとどまったおそれもあり、所期の目的が達せられたかどうか、保障の限りではない。その点あらかじめおことわりしておくとともに、本文の起草にあたって、国鉄の山陽新幹線工事局長であった畏友佐藤康氏から、数々の貴重なご助言を頂いたことを特記して、心から感謝の意を表したい。

2. 鉄道トンネルの長大化

昭和39年に完成した東海道新幹線では、トンネルは全延長の15%程度にすぎなかったが、その8年後に山陽新幹線の新大阪・岡山間が開通したときは、何と35%がトンネル区間になっていた。この15、35という数字の差は、もちろん地形の相違にもよるものであろう。しかし、この事実の裏に、極端ないい方をすれば、「新幹線はトンネルで」といった設計者の願いの秘められていることを、見落してはならない。そのうえ、こうした鉄道のトンネル区間長大化の傾向は今後ますます促進されるものと考えられるのである。その理由はまことに明白で、つぎの3点に要約できると思われる。

1. 用地費が不要となり、土地の有効利用、

自然保護の面で有利である。

2. 騒音、振動、電波障害などのいわゆる公害を発生するおそれがない。

3. 道路トンネルとは違って、排気ガスとスモッグを問題にする必要がない。

しかし、トンネルの最大の欠点は膨大な工費を要することであるといわれている。そこで、つぎに具体的な数字を示しながら、この意見の当否について検討を加えることにしよう。

つぎに示すのは、山陽新幹線の新大阪・岡山間における実績で、したがって、昭和44年ごろの物価を基準とした数字であるが、まず、トンネルの最低の建設費は穂坂トンネルの70万円/mであり、一方最高は六甲トンネルで125万円/mとなっている。しかし後者では、周知のように、地質が極端に悪く、工事上かなりの困難を生じたので、これはむしろ異例に属すると思わねる。こうしたことを考え合わせると、新幹線の複線トンネルの工費は、当時、平均1mあたり95万円程度であったと見れば、さしつかえないようである。ちなみに市街地の地下鉄では、そのころ250万円/m程度を要していたから、山岳トンネルはかなり安くできることになる。

これに対して、トンネルになっていない、いわゆる「明かり」工間はどうかというと、高架区間では、構造物の工費約50万円/mのほかに、当然、建設用地の買収費も必要である。すなわちその幅員は通常13mであるから、地価を2万円/m²とすれば、用地費26万円が加算され、結局、高架区間の工費はほぼ75万円/mということになる。しかし盛土区間はこれよりも安くできる。というのは、用地幅は平均25mに増大するが、構造物が不要になるからで、実際は地価その他を勘案して、高架式と盛土式を使い分けており、一般に後者の方が工費がかなり少なくてすむのである。

このような実績からすれば トンネルと高架の建設費の間には、明らかに20万円/m程度の開きがある。したがって、今後は、トンネル工事の合理化すなわちその工費の節減のために全力を傾注し、さきに述べたトンネルの利点をますます生かすように努力しなければならない。これが将来の大きな課題である。

しかし、トンネル関係者がたとえそのような努力を怠ったとしても、鉄道のトンネル区間長大化の傾向は今後ますます強くなるものと思われる。例えば、最近のように地価が高騰すれば、高架区間の建設費はそれだけ増大するはずであるし、何よりも問題なのは公害の軽減に要する経費である。すなわち、新幹線に沿ってその両側に、側道または植樹帯を設けることも将来は考えるべきであろうが、それらの幅員を左右おのおの5 m、地価を2万円/m²とすれば、これだけで1 mあたり20万円の用地費が加算されるわけである。いいかえれば、山陽新幹線で、あらかじめ上のような対策を実施していたとするならば、すでに、トンネルと高架区間の間に工費の差はなくなっていたはずである。

要するに、鉄道のトンネル区間の長大化には、今後ますます拍車がかかり、新神戸駅のように駅だけが地上に顔を出したり、新幹線の窓から見えるのは、ほとんど青い海、緑の山々で家並は目に入らないような時代が、すぐそこまで来ているように思われる。いやそれどころか、駅舎だけを地上につくり、それと地下のプラットフォームとの間にエスカレーターを設けて、乗客の送迎を行なうような駅も、そのうちに出現することであろう。

3. 道路トンネルの換気

同じトンネルでも、道路トンネルとなれば事情が一変し、その長大化の前途には、排気ガスという大きな障害が横たわっている。すなわち、換気設備の問題さえなければ、九州や四国へ橋をかけて渡るより、トンネルを掘る方が有利なことは明らかであり、また東京湾、大阪湾の海岸ぞいに、いわゆる湾岸道路をつくり、いくつかの河口を横断するような場合にも、橋よりトンネルの方が経済的である。ところが、延

長500m、時間交通量2000以上に達すると、換気設備が必要となり、その経費は、延長・交通量の増大とともに激増するため、現在、道路トンネルでは、その延長を3 km程度にとどめるのが、常識のようになっている。こうして、道路トンネルは文字通り伸び悩みの状態にあるといえるのである。

それでは、何ゆえに換気設備に巨大な経費がかかるかを、ご参考までに説明しよう。まず、昔鉄道トンネルで排煙のために用いられていた縦流式、すなわちトンネルの軸方向に直接送風を行なう方法では、煤煙の濃度が坑内で著しく不均一になる欠陥は、いかんともしがたいことであった。そこで考えられたのが、現在多くの長大道路トンネルで採用されている、いわゆる横流式換気方式である。その大要を説明するために示したのが図1で、これは、わが国最長の

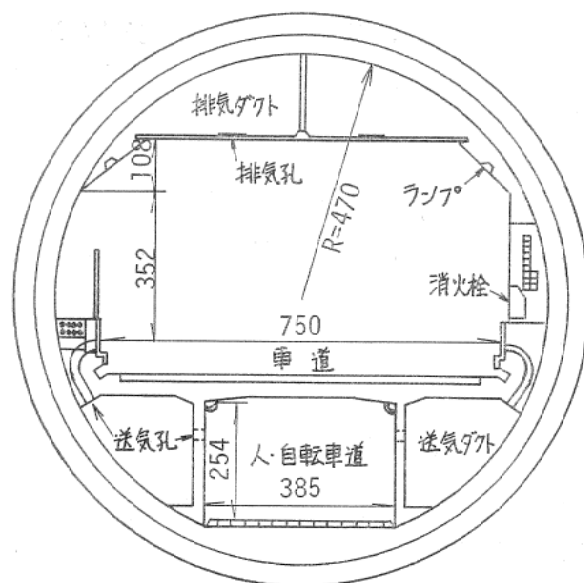


図1 関門国道トンネルの断面

関門国道トンネル(延長3461m)の断面図である。図からわかるように、ファンによって送入された新鮮な空気は、送気ダクトから路側の送気孔を経て、路面にほぼ垂直かつ上向きに流れ、ここで汚染されたのち、頂部の排気ダクトを通過して、坑外へ排除されるようになっている。しかし、この図からも明らかなように、送気ダクトと排気ダクトがトンネルの全内空断面積に対して占める比率は相当なものであり、そのうえ、トンネルが長くなるほどこの比率は増

大する。そしてついには、道路のためにトンネルを掘るのか、エアードクトのために掘っているのか、わからないようになってしまうのである。また、ファン、機械室、吸気塔、排気塔などの設備費、ファンを運転する経常費なども、やはりトンネルの長大化に伴って激増する。

上に述べたような無駄な経費増を阻止するには、どうすればよいのであろうか。その一つの方法として、送気・排気の風速を大にせよという提案があるかも知れない。けれども、抵抗の増加、ファンの容量・価格・運転費などを合わせると、風速の増大によるダクトの面積の縮小が、決して換気設備全体の最適化につながらないのである。これに対して長いトンネルの中間に換気塔を設け、いわゆる換気長を短縮する方法は、場合によっては確かに有用であり、わが国でもすでにいくつかの実施例がある。しかし問題になるのは海底トンネルの場合である。すなわち、船の衝突事故は必ず起こると考えねばならないので、その被害を避けるには、換気塔をきわめて強固にする必要があるが、それはまた、水深数10mの海底から海面上かなりの高さにまで達する長大なものなのである。そうすると今後は、換気塔をつくらずに海底から排気のみを噴出させてはどうかという案も頭に浮ぶ。けれども、これはまだ、筆者の単なる構想にすぎず、実現性についてはあまり自信がない。

上のような現状を注視すると、マスクー法の規制のみに頼らず、抜本的な排気ガス対策の樹立が不可欠であると考えられる。そこで筆者は、汚染された空気を坑内で浄化して循環させれば、従来の換気量の一部または全部がカットできるかも知れないと考えた。ただし、トンネルでは、COの許容限度をおよそ250ppmに押えているので、排気管から出た直後ならばいざ知らず、このような低濃度のガスの浄化は一層困難ではないか、と予想していた。そして専門家に意見をうかがったところ、いまただちにそのような装置をつくるのは不可能であるが、COを吸着する新材料、あるいはCO酸化のための新しい触媒がそのうち見付かるであろうから、実現の見込みは十分あるとのことであった。一日も早くすぐれた浄化装置の開発されることを

願ってやまない。

筆者が考えたいま一つの対策は、つぎのようなものである。それは、トンネル内ではエンジンをとめ、自動車を他の動力によって移動させようとするもので、いわば、現在もしくは将来画期的な浄化装置が開発されるまでの最後の手段である。自動車の移動方法としては、パンコンベヤーまたは電動台車に乗せるとか、車線の中央を移動するチェーンにフックをつけ、それでけん引する方法とか、色々考えられるであろうが、詳細は専門家にお任せするほかはない。しかしこの方法の難点は、湾岸道路のように、トンネルと明かりが連続する場合、自動車がトンネルで停滞し、交通事故発生危険も増大することである。けれども、ポートアイランドとか海上空港への連絡トンネルのように、道路がいわば行きどまりになっていたり、トンネルがきわめて長い場合には、上のような障害は少ないかも知れない。

4. 防火対策

昭和42年3月、三重・滋賀の県境にあたる国道1号線の鈴鹿トンネルで、自動車の火災事故が発生し、世間を騒がせたことがある。筆者はその直後、建設省の依頼で現地調査におもむき、全焼したトラック13台の惨状をまのあたりにし、事故の重大さを痛感するとともに、まだなま温いライニング・コンクリートについて、強度・中性化などの試験を行なった。その結果、コンクリートの劣化は、予想通り、内面から精々数mm程度の小範囲にとどまり、トンネル自体はほとんど被害を受けていないことが明らかになった。こうしたことは鉄道トンネルについてもまったく同様で、周囲の地山への放熱とライニングの熱容量が大なることに起因するものと思われる。要するに同じコンクリート構造物であっても一般にトンネルでは、火災による被害が建築物よりはるかに軽微なのである。

このような事実からすれば、トンネル内の火災事故を論ずる場合には、当然、出火・類焼の防止と人命の保護にのみ重点をおけばよいことしかし、道路トンネルについては比較になる。問題が少ない。なぜならば、自動車は、鉄道

車両のように連結されてはならず、自力で個々に退避することが可能なうえに、前に述べた通り、道路トンネルはもともと延長が短いからである。また、たとえ長大であったとしても、そのときには、前記の横流式もしくは後述の半横流式換気装置があらかじめ設置されているので、それを活用して、出火車両付近の排気孔のみを開き、強制換気を行なうようにすれば、出火車両の火はあおられるであろうが、排煙および類焼防止の面で、大きな効果が期待されるのである。さらに、前記鈴鹿トンネルの事故が教訓となって、その後、消火栓・非常電話のトンネル内への設置、トラックの消火器携帯の励行など、きめこまかい防火対策も進んでいる。ただ心配なのは、自動車の運転手などに対する信頼度の問題で、交通事故とかエンジンの過熱による火災の発生、あるいは万一の場合、不特定多数の人々が適切な処置をとり得るかなど、いわば人災的要素の多いことが懸念されるのである。

しかしながら、鉄道トンネルにとっては火災は大問題であり、記憶も生々しい北陸トンネルの事故は、われわれにとって大きな警鐘であったといえる。とくに、既述のように、鉄道のトンネル区間が増大することになれば、それに伴って、火災がトンネル内で発生する確率もまた増大し、例えば山陽新幹線の新大阪・岡山間で火災事故が発生したとするならば、3件のうち1件はトンネル内で起こると覚悟せねばならないのである。

それではいかなる対策をとるべきであろうか。結論を先にすれば、その本命は、車両そのものの防火対策であると思われる。すなわち、第1に、地下鉄もしくは新幹線の車両のように不燃質かつ加熱しても有毒ガスを発生しない材料を使用することである。これは、現在でも経済的にそれほど大きな負担をかけるとは思われないが、今後さらに安価で良質な材料の開発されることが望まれるのである。第2の対策は発火源に対する措置であって、モーターその他の加熱発火しやすい電気機器類を、車両の床下に分離し、かつそれらを新幹線の車両に見られる防雪用のスカートのごときもので包み、万一の場合、火があおられないようにすることであ

る。しかし平常時には、このスカートのために放熱が妨げられるようなことがあってはならない。しかし、このようにして車両に改良を加えるとしても、最後に問題として残るのは実施方法である。すなわち、新造車両として順次投入して行くのならば簡単であるが、例えば、国鉄の関係車両を短期間のうちにすべて改良するのは、経費その他を考えると、至難のわざである。ところが、北陸トンネルの悲劇の一因は、ここにあったと思われるのである。

つぎに運転上の対策について考えよう。もし上記のようにして車両の改良が行なわれれば、長大なトンネルの入口で火災が発生しても、その列車は、大事に至らぬうちにトンネルを脱出しようと思われる。すなわち、新幹線最長の六甲トンネル16,250mをその付近の時速120kmで通過するのに約8分、在来線最長の北陸トンネルでは、13,872mを時速70kmで約12分かかることになるが、この程度の時間ならば、類焼のおそれはあまりなからうというわけである。しかし不幸にして、後続の車両に引火の危険を生じたならば、直ちに車掌がそれらを切り離せばよく、さらに万全を期して、出火車両そのものを引き続き離すならば、前後の車両は出火車両から隔離され、もはや何も問題は起こらないであろう。これに対して、車内から発火したときには、さらに処置が簡単である。すなわち、消火器による初期防火が可能であるし、万一手におえなくなっても、その車両から乗客を退避させ密閉してしまえば、列車が10分程度走行しても、後続車両類焼の危険性は、きわめて少ないと思われるのである。要するに、トンネル内で火災が発生した場合には、あくまでもトンネルを脱出するように心掛けるべきであって、その意味において、新幹線の運転規程は正しいといえるが、在来線についても、上記の原則を適用すべきである。ただし類焼の危険を生じたとき上述の処置をとることを忘れてはならない。

以上は、車両ならびに運転に関する対策であるが、最後に、本筋であるトンネル自体の問題を取り上げることしよう。これについては、北陸トンネルの事故当時、かなり多くの迷論がマスコミをにぎわしたものである。例えば、長

大トンネルでは、工期短縮のためおよそ3, 4 km ごとに斜坑または立坑が設けられ、工事完了後もそれらが残っているから、乗客を斜坑へ誘導すればよいという。しかし年寄、子供が長い斜坑の急こう配をかけ上るのは容易なことではなく、まして立坑は登ることができない。いやそれより問題なのは、火災時に斜坑が煙突になることで、わざわざ危険な煙突の中へ逃げ込めというのかと反論されれば、一言もないであろう。また、ファンで煙を追い出せという人であっても、前記の縦流式では、かえって火をおおることになったり、風下に逃げる人は悲惨な目にあい、風上に向かう人が風にさからって走らねばならぬことに気が付かない。あるいは、スプリンクラーを設けようといわれても、架線が生きておればテッドアースの危険があり、そのほかにも難点の多いことを考えると、それに賛成することはできない。どうも世の中には、無知無責任な発言が多すぎるようである。

しかし、それならば専門家らしい対策を示せといわれても、工費その他のことを考えると、これぞという名案が浮ばないのは残念である。精々なしうることは、いわゆる半横流式の換気設備を簡素化し、非常用に転用する程度ではないかと思われる。すなわち、トンネルの頂部に排気管を設置して、それに一定の間隔で吸気孔を設け、出火した列車が停止して最寄のボタンを押せば、その地点の吸気孔のみが開き、同時にファンが連動して回転を開始し、それによって排煙をさせようというわけである。そのほか、トンネル内に水道管と消火栓を設置するのも一案であろうが、それよりはむしろ、列車に多数の化学消化器を常備しておいた方が有効なように考えられるのである。

5. 2層式トンネル

建物は古くから2階建、3階建になっているのに、道路や鉄道は、いまだに高架式とか立体交差が精一杯で、本格的な多層式のもの、わが国にもまだその例がない。その理由としては荷重の巨大なこと、地震に対する顧慮、あるいは、とくに道路の場合には地上権の問題など、色々挙げられるであろうが、道路とか鉄道は一

層式に限るという固定観念でもあるのか、いまなお、2本のトンネルを並列して建設するのが常識のようになっている。

ところが、並列トンネルにはつぎのような欠点がある。すなわち、二つのトンネルをあまり接近して掘削するのは危険であるから、通常、それらの中心間隔は、トンネルの幅員の2倍以上とすることになっているが、そうすると、鉄道にしろ道路にしろ、トンネルの前後には、その中心線に必ずSカーブを入れなければならない。しかし、Sカーブが運転上不都合なことは明らかであり、そのうえ、坑口付近で2本の路線にはさまれた土地、はほとんど利用の道がなく、その用地費が無駄になる。こうした欠点は、急こう配の谷と尾根が並列し、路線がそれらと直角にトンネルと明かりの連続で通過するような場合には、一層顕著になるはずである。さらに、2層式トンネルの長所として2本のトンネルを掘るより、たとえ断面は大きくても一つだけ掘削する方が、経済的だと予想されること、トンネル内に構造物をつくっても、それに対する地震力の影響は、地上の構造物よりかなり小であること、などが挙げられるのである。

筆者は、以上のようなことを考えて、10年以上も前に、2層式トンネルの計画を提案したことがある。しかしこの計画も、外国にその例もなく、自信をもって実施できないとかいう、わけのわからない理由で、日の目を見ず、残念な思いをしたことであつた。もっとも当時は、新幹線とか高速道路の建設がまだ緒についたばかりで、くわしく検討する余裕も、2層式にする必要性も乏しく、いわば時代が悪かったのであろう。ところが最近では、その後における技術の進歩、過去の工事に対する反省などもあり、ようやく2層式トンネル実現の気運が高まって来たようである。

それではつぎに、2層式トンネルの概要を説明することにしよう。まず、その断面の一例を示すと、図2のごとくである。これは、上下各2車線の道路を、中央のスラブを境にして上下2層に配置したもので、高速道路の比較的短いトンネルを対象としている。これらの上下両線は、トンネルの前後で、隣接したまま逐次レベ

ルを変え、坑口で上下に重なるように取付けられる。スラブの構造は、その両端を側壁に剛結し、かつ、トンネルの軸方向に設けた桁と脚柱で中央を支持するのがよいように思われる。なお、図2と名神高速道路の標準的なトンネル2本とについて、掘削断面積を比較すると、ライニングの外縁で囲まれる部分は、図2の方が多少大であるが、その外方の余掘りを考えに入れれば、大小関係が逆になるようである。

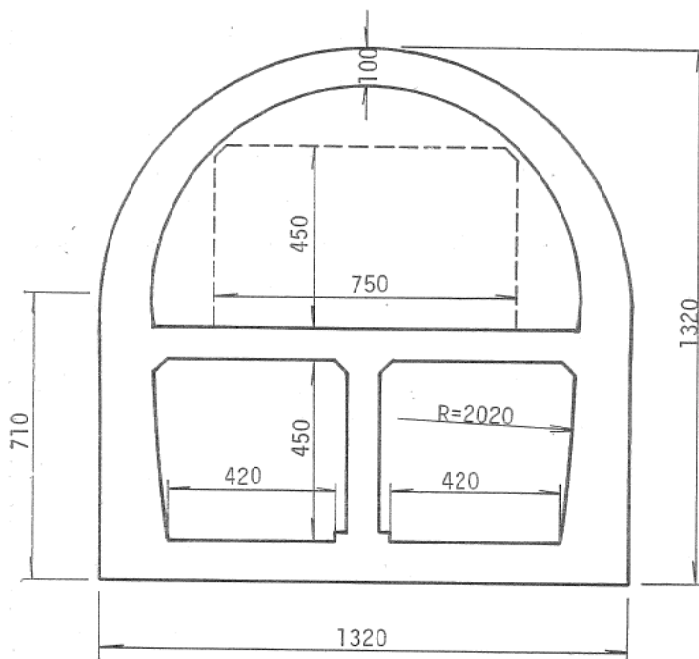


図2 2層式トンネルの断面

つぎは施工法であるが、いわゆる側壁導坑方式(サイロット工法, Side pilot method)を採用して、まず側壁を完成するのが最もよいと思われる。その後は、山がよければ、上部半断面を掘削してアーチのコンクリートを打設し、ついで中央部のインバート、脚柱、スラブ、残りのインバートの順で、工事を完了する。しかし地山が軟弱で側圧の大なる場合には、上部半断面の掘削に先立ってスラブを完成し、それによってサイドスラストを受けるようにすべきであろう。

6. トンネルボーリングマシン

これまでトンネル技術者は、ボーリング・発破・ずり出し・支保工・ライニングという一連の作業を、多数の作業員とともに、細心の注意を払いながら繰り返して来た。こうした技術者

にとって、機械によるトンネルの自動掘削は長年の夢であり、その夢をかなえるために開発されたのが、トンネルボーリングマシン(TBM)である。この機械は、要するに、カッターヘッドを前面に押しつけ、それを回転させることによって、地山を破碎または切削するものである。これを用いる場合の長所としては、発破のように周辺の地山をいためることがないので、工事の安全性が高いこと、余掘りがほとんどな

くライニングの工費を節約しうること、労務費の節減、作業がスムーズに進めばきわめて能率が高いこと、などが挙げられる。

しかしその反面、TBMは、つぎに列举するような数多くの課題をかかえている。

(1) 機械そのものが非常に高価で、今後トンネル断面を規格化し他への転用をはかるとしても、やはりコストダウンの努力を続ける必要がある。

(2) 強度が $1,000 \text{ kg/cm}^2$ 以上の岩石に対しては、とくにカッターの摩耗が激しく、その経費が増大するので、カッターおよび掘削機構の改善が望まれる。

(3) 現在は、円形断面のトンネルしか掘削できず、トンネルの使用目的によってそれが欠点となるから、今後は、円形断面以外の掘削も可能な機械を開発する必要がある。

(4) 堅岩を対象とする場合、大断面の掘削は困難であるが、わが国では、機械の能力に余裕を見込まず、大断面を無理して掘削しようとする弊害がある。

(5) 地質の変化に対する順応性がきわめて乏しく、湧水、軟弱土、玉石まじりの普通土などに出会えば、掘削不能に陥る。とくにわが国では地質の変化がはなはだしいので、前記不良地山の固結工法などの確立、融通性に富んだ機種の開発に努める必要がある。

要するに、TBMについては、将来に残された課題があまりにも多く、まだ主導的な役割を果たすまでに至ってはいない。とくに、上記(5)の問題が重大で、これが、今後わが国におけるTBMの死命を制するのではないかと思われるのである。