



土木研究所資料
第 695 号

第13回 国際道路会議

道路トンネル技術委員会報告書

昭和 46 年 8 月

建設省土木研究所

ま え が き

本資料は、昭和42年11月に東京で開催されたPIARC (Permanent International Association of Road Congresses) の第13回会議 (XIII th World Road Congress) の道路トンネル技術委員会報告 (Report of the Technical Committee on Road Tunnels) の全訳である。

本報告書は、道路トンネルの計画や設計上多くの指針を与える貴重な文献であるが、これの所有者や内容を熟知している人は意外に少なく、かつ、会議の際出席者に配布された日本訳のものは内容に誤解をまねく訳出が多い状況であった。本企画は、かかる状況から行なわれたもので、丁度道路トンネルの技術基準作成が途についた時期でもあり、広範な利用を願ってやまない。

なお、本文は、前トンネル研究室長村上良丸氏が在職中に訳出されたものをほとんどそのまま集録したものであり、序論と本文中の図の説明文のみ今回研究室で訳出した。

昭和46年8月

土木研究所トンネル研究室

常設国際道路会議協議会

Permanent International Association
of Road Congresses

第13回会議 東京1967年

XIII th Congress

TOKYO 1967

道路トンネル技術委員会

報告書

Report of

The Technical Committee

on Road Tunnels

道路トンネル技術委員会委員

委員長

M.J. REROLLE ; Ingénieur général des Ponts et Chaussées,
Président de la 1^{re} Section du Conseil,
Général des Ponts et Chaussées, Ministère de
l'Equipement, Paris (France)

委員

M. CLAES ; Ingénieur en Chef, Directeur des Ponts et
Chaussées f.f., Service du Trafic Routier,
Département, des Travaux Publics, Brussels
(Belgium)

M.A. EGGINK ; Ingénieur en Chef, Chief Director of the
Rijkswaterstaat, Utrecht (The Netherlands)

M.L. FAGGIONI; Président de la V^e Section du Conseil Supé-
rieur des Travaux Publics, Rome (Italy)

M.Y. HIRUMA ; Chief Engineer, Bureau de la Construction,
Nihon Doro Kodan, Tokyo (Japan)

M.J.M. KYLE ; Chief Engineer of the Port of New York Authority,
New York (U.S.A.)

M.H.D. MORGAN; Engineer, Sir William Halcrow and Partners,
Consulting Engineers, London (Great Britain)

M.F. RAMEL ; Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées,
Directeur de l'Organe Technique, Régional de
Lyon (France)

M.R. RUCKLI ; Directeur du Service Fédéral des Routes et des
Digues, Berne (Switzerland)

M.F. VAN HAREN; Ingénieur en Chef, Directeur de Intercommunal
Maatschappij Van de Linker Scheldeoever,
Antwerp (Belgium)

幹事

M.F. RAMEL

目 次

道路トンネル技術委員会委員

序 論	1
1. 土工学	4
1.1 横断面	4
1.1.1 交通に必要な有効空間	4
1.1.1.1 時間容量の考慮	4
1.1.1.2 有効空間の計画	7
1.1.1.2.1 車線の巾	8
1.1.1.2.1.1 自動車道路	8
1.1.1.2.1.2 普通の2車線道路	8
1.1.1.2.1.3 都市トンネル	8
1.1.1.2.2 歩廊及び縁石	9
1.1.1.2.3 空 高	9
1.1.2 換気方式の影響	9
1.1.3 場所の影響	10
1.1.4 施工方法の影響	11
1.2 縦断形	13
1.2.1 山岳トンネル	13
1.2.2 河底都市トンネル	14
1.2.3 高い斜路の一般的欠陥	14
1.3 平面線形	15
1.4 アーチ部および、受台部のコンクリート覆工	15
1.5 覆工の防水	17
1.5.1 伝統的方法	18
1.5.2 覆工防水を行うための最近の方法	18
1.5.2.1 内部防水	18
1.5.2.2 覆工背面での防水	19

1.5.2.3 沈埋式河底トンネル	19
1.5.3 側壁処理方法	19
1.6 中間換気立坑およびギャラリー	19
1.7 車道	22
1.7.1 コンクリート舗装	22
1.7.2 コンクリート上にかけるアスファルト被覆	23
1.7.3 アスファルト舗装	23
1.8 天井および垂直隔壁	23
1.9 種々のギャラリーやダクト	24
1.10 防音	25
1.10.1 内部防音	25
1.10.2 周辺環境に対する防音	26
Ⅱ. 換気	29
2.1 一般原理	29
2.2 自然換気	29
2.3 人工換気	30
2.3.1 トンネルの長さ1km当りの毎分に出る自動車の有害ガス排出量	30
2.3.1.1 車が放出する一酸化炭素排出量 δ_{co}	31
2.3.1.2 車輛密度K	31
2.3.2 道路トンネル内の許容CO濃度 δ_{co}	32
2.3.3 トンネル内の新鮮空気流量	35
2.4 換気方式	36
2.4.1 縦流換気	37
2.4.2 横流換気	39
2.4.2.1 換気の一般計画	39
2.4.2.2 縦方向の給・排気ダクト	39
2.4.2.2.1 所要面積	39
2.4.2.2.2 断面積	40
2.4.2.2.3 横断面内での換気ダクトの設置位置	40

2.4.2.3	換気所	42
2.4.3	半横流換気	42
2.5	換気機	43
Ⅱ	照 明	45
3.1	一般問題	45
3.2	種々の照明区間の輝度特性に関する定義	45
3.2.1	アプローチ部	45
3.2.2	順応部	46
3.2.3	遷移部	47
3.2.4	トンネル基本部	47
3.3	種々の部分での理論輝度の出し方	50
3.3.1	ルーバー	50
3.3.2	地下区間	53
3.3.2.1	一般事項	53
3.3.2.2	照明装置	55
3.3.3	特殊な場合	56
Ⅳ	安全設備	57
4.1	交通安全 (traffic safety)	57
4.1.1	交通信号 (traffic signal)	57
4.1.2	交通監視の恒久設備	59
4.2	空気汚染度合検知器	60
4.2.1	有害ガスの検出	60
4.2.2	不透明度検知器	61
4.2.3	火災感知器	61
4.3	通報システム	61
4.3.1	電話サービス	62
4.3.2	司令室への連絡電話線	62
4.3.3	司令室からの連絡電話線	62
4.4	安 全	62

4.4.1	緊急電源設備	62
4.4.2	火災安全対策	63
V	運 営	64
5.1	土木部門	64
5.1.1	壁の清掃	64
5.1.1.1	種々の方法	64
5.1.1.2	頻 度	65
5.1.2	車道の清掃	66
5.1.2.1	洗 浄	66
5.1.2.2	車道のゴムの掃除	66
5.1.3	事故ないし故障車の除去	66
5.1.4	土木技術者による維持と管理	67
5.2	電気・機械設備部門	68
5.2.1	照明装置の維持と更新	68
5.2.1.1	定期点検と維持作業の頻度	68
5.2.1.2	サービス業務のやり方	68
5.2.2	種々の電気設備	69
5.2.2.1	低電圧設備	69
5.2.2.2	強電圧設備	70
5.2.3	管理要員	71
5.2.3.1	技術要員	71
5.2.3.1.1	行政機関が、運営と維持の全作業をうけもつ場合 (直轄管理)	71
5.2.3.1.2	日常運営のみを直轄、他は民間委託の場合	72
5.2.3.2	監督および料金徴収のための行政職員	72
5.2.4	監視用附属物	73
5.2.5	費 用	73
5.2.5.1	建設費	73
5.2.5.2	運営費	74

附 I	さまざまな馬力のトラックの速度と坂路の長さおよび 勾配との関係.....	77
附 II	換気, 所要新鮮空気供給量の計算.....	80
1.	年代誌概況.....	80
1.1	1920~1925年のアメリカのデーター.....	80
1.2	アメリカの実情とその後の変化.....	81
1.3	最近の研究.....	81
1.3.1	1957年のMont Blancトンネル.....	81
1.3.2	1958年のスイス.....	82
1.3.3	Lyonの研究.....	82
1.3.4	日本の研究.....	88

序 論

道路トンネル技術委員会は、道路トンネルの設備に関する最新の資料を収集し公表するために、スイスの要請によって、1957年7月25日に設立された。これらの資料は、道路トンネルの建設や供用によって提起された問題について、実際の経験か、または、諸外国において行われている研究に基くものである。

この委員会の創立の基礎には二つの根本的な理由があった。

第一には、当初の道路トンネルは、大体、大きな首都圏において見出されるわずかな構造物に限られ、その設計はごくわずかな専門家によった。

自動車交通の発達は、これらの地下構造物が一層発展し、その技術が、高速道路や山岳地帯の主な道路に適用されるであろうことを示した。この交通量の増大は、また、既存のトンネルにおいて欠けていた設備をとりつける必要を生ぜしめた。

こうして、これらの構造物は、例外的ではなくなり、さらに増大する多くの技術者が設備の問題について精通することが重要となった。

第二は、換気の問題についてであり、1957年における知識はアメリカにおけるホーランドトンネルの建設に関して実験により30年前に得られた知識に実際は限られた。

30年間の内燃機関の発達は、一酸化炭素の排出について重要な影響をもたらした、CO以外の他の排出ガスの測定が必要となってきた。

ディーゼル車の出現と発達は、この型の車から排出される種々のガスや煙によるトンネル内の空気汚染について、1957年には予測できなかった影響をもたらした。

要するに、最近の研究結果によって有害ガスの排出と許容量に関するすべての観念を改めることが必要であった。

さらに、これらの問題は種々な特徴をもつ構造物に適用できる資料をうるために、さらに、深く分析することが必要であった。なぜなら、技術者は、その構造物における参考資料がないためにしばしば独自の研究をしなければならないからである。

この報告は、道路トンネルの換気と安全のために必要な手段に関するものである。後者を定義することは困難であるので、道路トンネル委員会は、その性格上、有害なガス排出、許容汚染量、そして、人工換気の重要性について特に注意を払っている。

この分野の最初の研究は、1957年にヨーロッパで始められ、1959年にリオにおける会議の報告において、同委員会は、実験室における研究や実際のトンネルにおいて行われた実験により得られた最初の結果を発表した。

研究と実験は続けられ、その中のいくつかは同委員会の主催のもとに、ヨーロッパのトンネルにおいて行われた。1964年のローマにおける会議での報告は一酸化炭素の排出量と既存のトンネル内におけるその許容量に関する知識についてその進展を発表した。

東京会議におけるこの報告にはこのデータを示し、特に内燃機関に関して、トンネルの換気に必要な物のより確かな評価をするために、技術者を助ける情報を提供する。

ディーゼル車は一酸化炭素以外の煙やガスの排出により、さらに、深く検討しなければならない問題を提起している。しかし、この型の車の割合が比較的低い間は、満足な換気を確実にするためにとるべき手段を与えることは可能である。

トンネルの換気に関する以前の報告と東京大会の報告に含まれるより新しい物につけ加えるに、トンネルの設計と供用に関するその他の問題に合理的な適用範囲を与えることは有益であると思われる。これらの多くの問題は、土木工学、照明や安全および管理設備をも含んでいる。

委員会は、東京大会の報告において、広範で十分な適用範囲を与えようと思う。そして、満足すべき技術や経済的な良い結果を得るために解決しなければならない問題について、全体にわたる考慮をはじめて示す。

終りに、本委員会は、ヨーロッパとアメリカでなされた主な研究をまだ発表していない各委員によって提出された情報を利用した。

最近、本委員会は日本からの代表者の協力をうけた。日本では重要な構造物が建設され、独創的な研究が道路トンネル設備に関してなされた。この資料により、日本の技術に関する最初の情報がえられた。

しかし残念ながら、有用な結論を導くために、日本の技術を他の国の技術と比較するための時間がなく、本報告においては示されない。これについては興味ある結果であり、必ず会議においてなされるであろう。本委員会はこの報告が有用な情報を提供し、広汎で活発な討論がいろいろの国の技術者に関心のある問題についてなされることを望む。本報告に含まれる情報や勧告がある点では単なる指示と思われるであろうこと、および個々の国の実施や特殊性に調和しなければならないことはいうまでもない。

おわりにラメル氏（土木技師長、フランス）に対し特別の謝意を表わす。同氏は受け取った情報を調査、解析し、氏自身の研究結果で補足し、この報告を編集していただいた。

I 土木工学

1.1 横断面

横断面の形状と寸法は次のものに関係している。

- 交通のために必要な有効空間
- 使われる換気方式
- 位置と克服すべき地勢のタイプ
- 施工方法

1.1.1 交通に必要な有効空間 (useful space)

1.1.1.1 時間容量の考慮

土木工学上は、まず第一に、つくるべき、車道の数と車線数が関係する。かくして、種々の使用状態で、トンネルの車道及び車線の実際の時間容量を知ることが必要である。

これに関して、トンネル内の交通流は“Highway Research Board”の“Highway Capacity Manual”1965年版で定義されている、オープン区間での交通流を支配している法則の原理と同じ法則に従うものであると考えられる。

まず第一に、幾何学的条件(与えられた係数を使って)を考慮しなくてはならない。 :

横断面：車線巾、歩廊及び縁石壁 (Keab wall) の巾と、深さ、天井の高さ(低い天井は、圧迫感を与える)

縦断面：アプローチ(斜路)及び勾配—重車輛について影響する—遷移部の状態(見え方と快適さ)高い点と低い点での縦断曲線半径。

平面線形：直線及び曲線区間；Y型交差点の有無、安全上の理由で、見え方は、トンネルでは常に、オープン部分よりおちるので、交差点や、ウィービング区間はトンネルでは、禁止すべきである。交差点が道路トンネル内においてさけられない場合には、その接続は、非常に除々に変化して行くようにし、横方向のよい見え方を確保し、付加車線上で行われるようにすべきであろう。

問題にされているトンネルについて、次の条件を考慮することをもた、必要である：

(1) 使用条件：

- 一方方向交通車道か否か。
- 自由交通流か又は、料金所ないし、入口の信号によって、中断のある交通流か。
- 非常停車が可能か否か。
- その他の規則（速度、車間距離等）
- 長距離交通か又は、主に局地交通か。
- 信号の型式

(2) 環境条件：

- 照明設備からくる見え方、（明るさのレベル、ライトの型式と色、光源の間隔、断面内での輝度比等）
- 道路利用者が非常に気にする天井からの漏水、湿気、煙、刺激臭。

(3) 交通型式：

- 観光用か、商業用か。
- 大型重車輦があるかどうか。
- キャリヤー（Carrier）かセミトレーラーか。
- 長距離交通か、主として局地交通か。

(4) 速度：

④ 長い山岳トンネルでは、速度は一般に低く、勾配が1.5%以上になっておれば、40～60km/時に規制される。最大速度が20km/時のオーブンの重車輦がいると、全部の交通車の速度を、事実上、それと同じ値まで下げる。これが縦断線形をできるだけ平坦にすることを望む重要な理由である。

⑤ 自動車道路では、その自動車道路の特性を、全線にわたって維持するという点で、トンネル内の速度がその自動車道路の設計速度をあまり大巾に下回ってはならない。こうするためには、トンネルの環境改善の努力を惜んではならない。照明、緊急停止用車線、はっきりと見え、よく間隔

をとった側帯 (edge making) 等。

これらの条件が不可能か又は、不十分にしか達成できないなら、速度は、安全の理由で制限されるべきであろう。

◎ 都市内では、構造的に適切な改良をしたとしても、都市道路網に属しているトンネル内での交通は、その道路網と同じ特性をもつこと、換言すれば、40~70km/時の流動と合计数分間の停止とか、5~10km/時の断続流を伴う渋滞の間で変化するという事に直面させられる。

重車輛の速度を求めるには、1965年版、Highway Capacity Manual が参考になる。附1の図8及び9は、このManualのFig 5-1a及びFig 5-1bを転載したのである。これらは、種々の馬力特性(馬力/重量(トン)比)の貨物車の速度に及ぼす、勾配の長さ、と、車の影響を示すものである。図8は6.8馬力/トン の馬力特性を有する貨物車を、図9は、11馬力/トン の貨物車に関するものである。多くの国では、図8に示した速度に耐えられない低い馬力特性の貨物車(4.3馬力/トン ないしそれ以下)があるという事実に注意しなくてはならない。

ヨーロッパの規程では、馬力特性を6馬力にすることが考えられている。

(5) 取付道路 (access road) の容量

これは山岳部では、平面及び縦断線形によるし、都市部には、道路の混雑による。

これらの別々な要素の影響の大小が、種々のトンネル間の容量差を説明するものである。

かくして、トンネル計画と施工においては、次のことが必要である。

一トンネルは、一般に後で改良するのが困難な高価な構造物であるから、そのトンネルが完成された後の将来の可能性を考慮に入れたトンネル外部の交通状態をまず調べる。

一使用される装置の関連で、可能容量を評価する。一般的に言えば、容量に影響する種々の要素の影響を調べ、乗用車、貨物車、大型バス別に勾配の長さとも、又、これらの車輛の種々の混入割合での換算係数をきめるためには、1965年版 Highway Capacity Manualに出ている推算方法が利用

出来よう。1次近似値としては、平面線形、重車輛、換気装置、取付道路の車線からくる減少を除外すれば、次の値が容認出来ると思われる：

① 対向交通を有する山岳トンネル

良好な設備をしたトンネルの容量：1,800～2,000台/時（2車線の合計）

2級（secondary）のトンネルの容量：土木工学的な特性とくに車線壁から車線までの距離、照明と一般的な設備によって非常にかわる。

② 自動車道路トンネル：

分離されたトンネルの各々に、2つの1方向車道がある。

車線当りの平均容量：1,500～1,800台/時（1965年版 Highway Capacity Manualの安定交通流のサービスレベルによる）

既述のように、この値は、配置（layout）、平面線形、重量車の混入割合、考慮すべきサービス水準（理想容量に対する時間交通量の割合）で変わる。与えられた計画に関して、より詳細な、評価をするには、1965年版 Highway Capacity Manual を参考にすればよい。

③ 都市トンネル：

対向トンネル：2車線（各方向1車線）を有する場合は2車線合計2,200台/時 4車線（各方向2車線）を有する場合は、4車線合計5,500

台/時 5車線（1方向2車線、他方向3車線）を有する場合は、5車線合計6,500台/時

これも個々の計画に関しては、1965年版 Highway Capacity Manual を参考にすることができる。

一方向トンネル：自動車道路トンネルと同一値。

1.1.1.2 有効空間の計画（layout of useful space）

（車輛及び歩行者の通る所）

原則としては、交通用に確保する有効空間（車道及び、その横にはなして通っている通路）は、トンネルが入れられている。道路に設けられているものに、出来るだけ近づけなくてはならない。しかし、地下工事は極端に高価であるから、安全及び、速度制限、車頭間隔等のような特別の安全装置を矛盾しないように、可能な断面縮少を調べる必要がある。

1.1.1.2.1 車線の巾

最小巾 3.5 m が一般に推奨される。右または左に重車輛用の特別な緩速車線がある場合には、これは 0.25 m 余分に拡げられよう。

1.1.1.2.1.1 自動車道路

トンネルが、どちらの区間にも堅固な路肩 (hard shoulder) を有する複式車道につながっておれば、緊急停止車線としての路肩を、横断面形状の不連続性をさけるために、トンネル内にもつくるのが推奨される。

しかしながら、とりわけ、経済的な理由で、この緊急用車線が作られない場合には、そのことを運転車にしらせ、安全措置 (速度制限のような) をとらねばならない。

1.1.1.2.1.2 普通の2車線道路 (各方向1車線)

短いトンネル (2 km 以下) に対する車道は、7.00 ~ 7.50 m の巾になろう。2 km 以上の長さのトンネルでは、150 ~ 750 m 毎に、拡巾され、場所を設けねばならない。それらは、250 m の巾と、25 m の最小長を有さねばならない。この解決法の長所と短所を単に車道巾をますことだけで、こうした拡巾部の全部ないし一部とおきかえる場合と比較して考察すべきである。

延長 10 km 以上のトンネルでは、事故ないし、その他の交通止めの場合に、重車輛が U ターンができるようなトンネル巾を準備しておくことは有効である。

1.1.1.2.1.3 都市トンネル

緊急停止用車線を好む技術者がいる。これは、スペースがないため不可能なことがおおく、また、いかなる場合でも、非常に限定された高価な使用方法になる。さらに、故障した車に有効につかえるように確保しておくことと、補助車線として交通に使わせるようにしておくことは、非常に困難である。故障した車の駐車による不便をへらし、その除去を容易にするために、緊急停止用車線の代りに、例えば、2車線車道を、8 ~ 8.50 m の巾にして、十分な巾員をとらせることは有益である。

1.1.1.2.2 歩廊 (foot ways) 及び、縁石 (wheel kerf)

歩行者の通行は、自動車トンネルでは、一般に禁止される。歩廊は通常管理員だけを対象にしている。この巾は、次のことから決まる：

- 車速をおとす壁の影響をへらす広さ
- 高速の車が縁石にぶつかった時の人間の安全

こうした2つの条件を満たすには、歩廊の最小巾は、0.95 m でなければならない。車道からの高さは、車のドアを開けられるようにするため、16 cm ないし18 cm 以上にはすべきでない。縁石は飛越しができず、視線誘導のよいものが望まれる。

車輪よけのついた約1.00 m の非常に高い歩廊 (New York ベルギーの Onvars, オランダの Rotterdam) は管理員により良い安全を与えられている。

1.1.1.2.3 空高 (Free height)

① 一般には、これは、取付道路をオーバーする橋梁にきめられている細則と一致するであろう。4.5 m の高さが、ヨーロッパの国道に適用されている。イギリスでは、5.00 m になっている。

② 経済的な理由で、下記のようになるなら、ある種の構造物（とくに、都市内では）の空高は、もっと下げることが出来る：

- 高さ制限のない、代替路がある。
- 大型貨物車の通行便益がごく小さいか又は、他の輸送手段がある場合。

③ 自動車道路では、この高さは、橋梁下に一般に適用されているものにする必要がある。

④ 長大トンネルに対しては、特殊な高さのものの護送用に車道の中心部分に沿って4.50～5.00 m の高さを確保するように特別なアーチ形を考慮することができよう。歩廊に近い交通を規制する規則と両立できるなら、もっと低い高さも使うことができよう。

1.1.2 使用される換気方式の影響

後述するように、ダクトに要する要求についての、換気方式の苦しい事情は、非常に重要である。これは換気方式と計画及び、トンネルを設計する時の交通

によって変る。これらの要素が、トンネルの横断面形におよぼす影響は、2.4章で調べられている。しかしながら、換気ダクトの位置と形は、えられる全空間の最適利用を行わねばならない土木設計技術者の決定にかかっていると考えられる。円形トンネル(New YorkのHadson河のような)では、交通に必要な断面積から、換気目的に利用できる2つの弓形部分(segment)がのこっている。上側の部分は使用ずみの空気の排気に、下側は、新鮮空気のとり入れ用に、矩形々状では、許容最大高の問題から横に並べたり(オランダのVelsenトンネル)一方の上に他方をのせたり(オランダのRotterdamのトンネル)してトンネルと一体に施工している。さらに、それぞれの場合毎に、換気用ダクトの寸法(断面)について、土木費と電気・機械の施設費さらには、ダクトの寸法が小さくなる程増加する将来の消費電力費の間の経済的バランスをとることでの最良の解決策について、最適計算を行わねばならない。

1.1.3 場所(site)の影響

含まれている地形のタイプと地質工学的な特性が、横断面形と施工の可能性を条件づける。施工が可能なら、それから、調査と細部の予備測量を行なうことが必要である。

静水圧は、それが高い場合以外は、トンネル断面の形には影響しない。1.1.4に示すように、河底や、海底のトンネルに対して、矩形や円形断面が使われている。

岩質、砂質ないし、粘土質の地勢で、最も普通のトンネル断面は、側壁の有無で半円ないし半楕円になっている：

St: Cloud, Lyon Craix Rousse(フランス), Grand St Bernard
(スイス・イタリー) Dunstein(オーストリア), Belchen Grancia
(スイス)。

巾よりも高さの方が大きい馬蹄形は、強いカーブのあるトンネルとか、土圧が、横方向より、鉛直の方がはるかに大きい場所を使って成功している。換気ダクトは車道下におくことが出来る：Mont-Blanc(フランス・イタリー), San Bernardino (スイス)又、上においたものとしては、Grand St Bernard(スイス・イタリー)

インバートを有する底の閉じた形は、非常に高い土圧の帯水地勢に使われる。
(スイスの Belchen, Lyon Croix - Rousse の Rhone 側入口区間)

掘進場所を決める前に、予備調査(一般には、チューブボーリングで、そして最終的には試掘トンネルで)は、次の事項の合理的推定のできるものでなくてはならない。

— トンネルの上にかかる水の存在と、その水圧及び蓄積量。

— 基礎土の透水性と、排水の可能性。

— 横断面内での膨脹 (Monaco の鉄道トンネルの灰色の泥灰土、ドイツの Stuttgart の Waggenburg トンネルの石膏、スイスの Belchen 等) とか、縦断方向での異った土の動きによる張力のための特別な圧力の可能性。

— 屋根部の変形及び岩層の適用の場合に、穿孔前後の土の中の応力分布。

1.1.4 施工方法の影響

① トンネルの掘進技術は、鉄道トンネルや水力発電所用の給水立坑に使われている技術と、異ったやり方をする必要はない。従って最近これらの工事でえられた経験はどれでも使用できる。

② 岩層地帯の地層が良くても悪くても、短いトンネルに使われる先迫導坑を用いる伝統的な方法は、一般に断面をきめるものではないが、岩層の如何にかかわらず、屋根状の形に適したものである。

③ 河底もしくは、海底のトンネルに対してはそのトンネルが岩中で通る時の、普通の掘削工法の他に、2つの施工方法が使われている。

(1) 推進シールドを使う、圧気削孔工法

水の見方と、シールドの前面にかかる土圧は、少くとも、作業室の圧縮空気の圧力に等しくなくてはならない。しかしながら、その深さは、圧気中で作業員の安全性から約 30 m に制限しなくてはならない。

こうした構造物は、よく、クリープ性の泥土中の適当な深さの所につくられ、一般に円形で2車線トンネルに対して 1.050 m の外径を有している。これが設けられる深さが、より深くなっていることを考えると、その延長は平坦な形の沈埋トンネルの長さより、トンネル外での制限斜路勾配を考慮すると、大きくする必要がある。これらの覆工は元来は、ボルトで互に締め

られた、鑄鉄セグメントからなっていた。今日では、プレハブのコンクリートセグメントを使用している施工者もあり (Paris の l'Etoile と Neuilly 間の急行地下鉄)、一方、鉄製セグメントを引続いて使っている施工者もある: イギリスの Dartford 及び Clyde トンネル。

円形は、推進シールド方法であけられる河底トンネルでよく行なうように屋根の高さが低い時でも軟弱な土中でトンネルにとって、最も経済的な解決法になる。

ヨーロッパ大陸では、Anvers トンネルだけがこの方法の例であるが、U. S. A. (New York の Holland, Lincoln トンネル)、日本 (関門トンネル) 及びイギリス (Clyde トンネル) では、広く使われてきたし今も使われている。

(2) 沈埋工法 (Placing by immersion)

90 m (Havana) から 150 m (Marseille) の長さのトンネルが近く
のドライドック又は、人工的なピットで、ドライ状態でつくられた。横断面形は、円形又は、矩形で、後者の方が、より良い、横安定性を有している。プレハブ部分は、両端を水密にし、水を造船台に入れ、浮いた部分を現場へえい行し、バラストを加え、前もって浚渫しておいた溝 (bortt) の巾に沈める。このトンネルの頂面は、航路条件ないし、海底の流れによって、水底上に出したり出さなかったりしている。

円形は、浚渫トレンチ底とは減少した1面だけの接触をし、その他のスペースは、砂でうめられ、トレンチの両側に盛土をつくることになる。

矩形に対しては、下側のスラブの下全部に砂を吹込むための、特殊な装置がつかわれ、構造物に対して、しっかりした基礎床をつくる。平らな矩形は、浚渫トレンチの高さをへらす。沈設のやり方に関する問題は、次の通りである。

- 浚渫トレンチ底の膨潤と、構造物の設置と埋戻後の不同沈下
- 外側の水と、トンネル内の空気中の間の温度差
- コンクリート中及び、膨脹継手での2次応力

④ 全断面の掘削及び、覆工の打設に関する最近の方法は、種々の問題と、

種々の土のタイプに適用されねばならない。

かくして、ダンプや軌条施設のついた穿孔ジャンボ（前面に、機械穿孔モーターのついている、多段式の、移動作業台）は、種々の形式に採用できる。

（Mont-Blanc, San Bernardino, Grand-Saint, Bernard の馬蹄形の断面）、一方、Robbins の回転機は、円形だけに限定される。このタイプの機械は、硬度クラックの状態、湧水および水圧、切羽の支持等で、あらゆる形の岩に適切とは限らない。

これらの方法の一方又は他方が採用できるなら、その選択は、経済比較にかかってくる。

軟弱地帯に円形トンネルを掘るには、掘進用シールドを使う必要があり、これは、機械掘削の手段をもっていたりいなかったりする。切羽面は一般には、支保工なしで全断面を掘削することはできない位に大きい。掘進シールド機やその他の形式が、軟弱地帯で使用されているが、トンネル施工の近代手法を用いる計画に於ては、経済性を証明してはいない。

平均的な土中で、機械覆工装置の支保工を使うジャッキ掘進のシールドが多少とも平坦な形状の施工に使われている。若干の粘着力を有する軟弱地盤中では、機械的に設置される大型のプレハブセグメントが、広いスパン長の非常に平坦な楕円形に使用される。覆工を設置するには、土の抵抗に応じて、ジャッキで圧力をコントロールしている。（バリーのEtoile 駅 R. E. R. Jacobson 方式）

⑤ 都市地域では、交通の動きを確保する必要性と、近接工事の存在が、場合によって、構造物の型式に影響するような特殊な施工法を導き出すことがある。（Brussels-rue de la loi-Voie Express R. D. Seine - バリー）

1.2 縦断形

1.2.1 山岳トンネル

山岳トンネル計画に於て、トンネル坑口の場所できまる高度条件が、トンネルの長さ全体に影響しない限り、水の流下に必要な、最小勾配（0.25%）を、中央の高い所から、直線ととることが、一般に好まれている。予備調査で、岩

中には、水の浸透がないことを確かめれば、できるかぎり、小さな値の単一勾配（最小0.25）を有するトンネルを設計することができよう。一方、大きな出水が予期されれば、トンネルの勾配と、特に、排水溝の勾配は、増加させて、車道にあふれたり、車道を洗ったりしないように、改善しなくてはならない。基層の良好な排水従って、車道面の確保を保証するために、排水溝は、その溝の中の高い方の水位が、車道の基礎の役目をしている。岩の上面より下になるように設計しなくてはならない。

1.2.2 河底トンネル

種々の地帯での河底都市トンネルは、航行のために要求される深さ（主要港で16～18m）以外の側では、横断面をより高い所にとらねばならない。取付斜路は、できるだけ短くして、形を保持させねばならない。高点および低点で、曲線に接する斜路と勾配は、明らかに短区間で、斜路は常に、スロープが先行しているので、アプローチ道路の勾配と、斜路は、3.5%から4.5%の間にすることができる。（貨物車の速度に及ぼす斜路の勾配と長さの影響についての附のFig 8及び9を参照）

1.2.3 高い斜路（high ramps）の一般的欠陥

大半の計画では、トンネル口の位置と高さについての非常に制限された選択以上のものをとることはないから、高い斜路の使用を含む解決法は、次の理由でさけねばならない：

- 乗用車による一酸化炭素と、重車輛による煙の排出をかなり増大する（この欠点は、余分な換気で始めて、除去される。）
- 重車輛の速度のかなりの減少、従って、トンネル内での、全体速度のかなりの減少。この問題に必要なデータは、Fig 8及び9でわかる。トンネル内での400m以上の長い坂は、2%以下できれば1.5%以下にすべきであることが望ましいこともわかる。これができないなら、既に3車線を有している場所以外には、重車輛用の、付加車線が有益である。
- いかなる場合でも、山岳トンネルの勾配は、そのトンネル以外の隣接道路区間の勾配をこえるべきではない。

1.3 平面線形 (Layout and Plan)

目がくらまないように、内部照明のレベルを十分にすることが困難な、200 m以下のトンネルに対しては、直線配置が、車道上にある障害物をシルエットの形で見えるようにするので、推奨できる。

200 m以上の長いトンネルに対しては、そのトンネル長の大部分に十分な内部照明をつけることができるが、入口と出口には、眩しさの問題があるので、そのトンネルの設計速度に対応する大半径のカーブを入れることは、出口で運転者の向い側の壁面隅に良好な輝度の連続をえさせるので、推奨される。

進入部分は、最大許容速度に対応する、停止距離に等しい長さの間には、直接進入の障害になるものはすべて、とり除いておかねばならない。車道からはなれた駐車地帯を設けて、運転者が、オープン部分に再びなれるようにすることが推奨される。

1.4 アーチ部分及び受台部 (側壁部—abutment) のコンクリート覆工 (な いし化粧 dressing)

断面の覆工は、当然、軟弱土では常に必要であり、また、岩の地質では、少くとも、部分的に、円形断面のいろいろな長さの所に必要である。覆工が省略できるのは、例外的な場合だけで、2線級 (secondary) のトンネルで、空気による侵蝕をうけず、自立できるだけ十分に堅固な硬岩にあるトンネルに対してだけである。(Fig 1a)

覆工は、問題になる場合に応じて、多数の種々な機能を有している：

- 粘性の不足する地盤ないし、時間の経過と共に滑動しがちな地盤の支持
- 空気及び水の浸透による侵食に対する岩の保護
- アーチや側壁部からの洩水に対する、道路利用者や車道の保護；河底トンネルでは、この機能が明らかに、最も重要なものである。岩をくりぬいた山岳トンネルでは、同一地点に絶えず水が滴下することは、(大気中の車道の全表面に、一様にあたる雨の部分とは違って) 表面の被覆材料のはくりをおこす；これは、車道の保持には有害である。
- 岩と直接接するか又は、内法面 (intrados) の所で、排出施設を支持する。

—内部輝度を改善するように、きれいにし、洗浄できる滑らかな表面をつくり上げる。これがこの覆工そのものの表面によってえられたり、金属砕工で処理したり（フランス、イタリアのMont Blanc、スイス、イタリアのGrand St Bernard）、塩化ゴム塗装（rubber chloride paint）の膜を使ったり（Velser 等）、セラミックタイル（ceramic tile）を使ったり、（Holland トンネル、Anvers、Rotterdam、Lyons、St-Cloud）又、ステンレスやアルミニウムのような金属板をはったり、プラスチック材（ポリエステル、塩化ビニール等）をはったりして処理している。

① 厚さの決定

軟弱土の土圧は、岩質地帯に関する圧力よりもよく研究され、より良く知られている。

後者については、いろいろな国で多数の研究があるにもかかわらず、覆工の厚さを算出する、合理的で普遍性のある方法が現在あるとは思われない。岩中の応力の分布と、次の項目に関する覆工にかかる主動土圧の知識をよくするために、全ての国で、特別な努力を行わねばならないことが望まれる：

—使われる岩の掘削方法；この点では、1 回に 5 トンの爆薬装填によって、全断面の掘削をする最近の方法は、先進導坑を使う伝統的な方法より、覆工周囲の岩にはるかに、亀裂を入れることはたしかである。これに関連して、トンネル掘進技術と、岩のクラックの処理に関する、現在の研究は、何らかの改良をもたらすであろうと期待されている。集められた資料は、道路トンネル技術委員会に次のものの情報を提供してくれている。

—使われている支保工システム、とくに、ロックボルトや、近年における、トンネル切羽の直後に直接コンクリートをぶきつける方法。

—トンネル切羽とコンクリート覆工装置の間の距離。

—岩—コンクリート面に使われる技術、それは、空所を水密にするか又は、排水用に使う空所をのこすかのいずれかである。

技術的な知識の現状では、正常の方法を使い、最大限の論理と、慎重さで適用をする。掘った岩の頭部の上には、最小 0.30 ~ 0.40 m の厚さが必要ながことが認められている。これは、最終的な岩圧を考慮することで指示される

ものであり、又、型枠内に、コンクリートを入れ易くするものである。岩の掘削では、できるだけ、表面を正規の形にすることが重要である。若干の国では、固定した支払線 (payment line) まで、完全な請負金額を適用し、これをこえると罰金を課している—すなわち減額して、コンクリート費だけしか支払わないとか、コンクリート作業および掘削作業に対して、減額した単価をつかうことにしている。

掘進河底トンネルに対する覆工の設計も、土圧に関しては同じ不確かさをおこしがちである。沈埋トンネルに対しては、それは鉄筋コンクリート施工方法の問題であり、種々の応力がより良く知られている。これらは静水圧、運搬時の挙動、バラストを加えて、沈設すること等に関係している。

② 若干の施工勧告

トンネル覆工の打設に関する種々の方法の記事が、この報告書に含まれている。地下でのコンクリートの製造と打設は特別な注意と監督がいることをここで強調する。これは、実際には、時として困難ではあるが、重要なことであり、次のことが関係している：粒度 (grading) 分離しないこと、正しい水量。これらは、コンクリートを後日の性質に重大な影響を持つもので実際には、欠点をなおすことは不可能である。

面の性質は外観という観点からと、換気ダクトに使う面の粗度という点の両方から重要である。一般に新しいコンクリートの圧力で変形しない剛な金属型枠が要求される。

1.5 覆工の防水性

原則として、トンネルの外側弧面 (extrados) は次の影響をさけるために乾いていなくてはならない。

—冬の氷結：石材の劣化、タイル面の持上り、車道上の結氷、天井に、氷柱の生成

—同一点に、水が落ちることによる車道面の被覆材料の破壊

—湿った壁に、質のわるいほこりや、すすが集ること、このためには、コンクリートをできるだけ水密なものにすることが推奨される。これは、添加剤を

使用したりしなかったりしてできるかぎり最良の締固り度がえられるように、前以って、骨材の粒度を研究することで行うことができる。打設コンクリートの水量の厳密な規制と相まって、これが、コンクリートの不透水性と無クラックを最もよく保証するものである。壁に出てくる水を最終的に乾燥することは、多くの場合、経済的で不可欠な補助手段である。

種々のやり方が使われている：

1.5.1 伝統的な方法

原則として、出てくる水とたたかうというより、その水を逃がしてやることである。これは、次のようになっている。(Fig 1b)：

—コンクリートを打設する時、コンクリートと岩の接触面に、排水装置（乾いた石、多孔質の土器等）を設けておく。

—その他の場合には、岩中のクラックないし、コンクリートと岩の接触面のような部分に、コンクリートを入れる。注入管をのこしておき、アーチの内側弧面（intrados）にまで出しておく。こうしたチューブは、覆工コンクリートがセットし、型枠を除去した後、セメント注入を行うものである。その作業には、大きな注意が必要である。低圧を使うべきで、注入セメントの過程は、コントロール孔をつかって進めねばならない。

—最後に、コンクリート中のクラックを通しての漏水問題があれば、小さな表面排水溝を設けるか、または、静水圧が低いなら、一般的な（SIKA）表面化粧を行うこと。表面排水は、約3 cm径のプラスチックないし、ゴムの管が入れられるだけの深さにクラックの上のコンクリートに溝をつけ、それから非常に微粒の防水モルタル（SIKA）でカバーしてつくる。コンクリートがセットし始めた時、このチューブを長手方向に引き出し、数cmの孔を表面下にのこし、この孔が断面の底部にある排水溝に、漏水を導くようにする。こうした排水は、石灰やその他のものの堆積で時々つまるので、その時には、このやり方を更新する必要がある。

1.5.2 覆工防水を行うための、最近の方法

1.5.2.1 内部防水

耐圧一次コンクリート覆工に対しては、瀝青系防水層が使われる、それが

ら、静水圧に十分耐えられる厚さの二次コンクリート覆工が打設される。

(バリー-Metro-Seine, スイスのBaregg トンネル (Fig 2b))

1.5.2.2 覆工背面での防水

掘削した岩の上で、吹きつけられたグナイト層(岩面を4~5 cm厚でカバーしたもの)の上に防水層をおく、この防水層は次のものから成っている:

一吹きつけアスファルトコート(スイスのMuhlehorn トンネル), m^2 当り費用47 F。(Fig 2a) :

一ガラス繊維を使った樹脂(resin)およびポリエステルの数層(スイスのLopper およびSan Bernardino トンネル, グナイト(gunite)を含めた m^2 当り費用75 F, それから, この防水工上に, 通常コンクリート覆工が打設される。

1.5.2.3 沈埋式河底トンネル

防水シェル(shell)を, 鋼板または, アスファルト材で外周をカバーしてつくる。

1.5.3 ごまかした側壁処理方法 (Fig 3)

完全な覆工防水をあきらめ, コンクリート中に, 少量の漏水をゆるすもので, 表面に若干の白い花粉状(bloom)が生じている。しかし, 軽いコンクリート材の板ないしパネルを, 壁の前8~20 cmの距離に建て込む, この空間は, 側溝への水の排出をゆるし, 漏水の目に見えない影響と, 覆工上に, 石灰堆積物のつもることを, さけるものである。この方法は, 新しいものではなく, 最近, また使用されるようになってきた。

これは, 外観を改善するが, 漏水を止めるものではなく, 一般に側壁の経済的な, 防水工を先行させなくてはならない。(スイスのSan Bernardino, Lopper, Mosi, LyonのFourviere 計画)

1.6 中間の換気用立坑およびギャラリー(坑道)

換気用坑道と所要電力をへらすために, 新鮮空気ないし, 使用すみの汚染空気の吸引のできる中間立坑が掘られることがある。(垂直でも水平でも許される) 立坑は, 鉛直に対して5~10°をこえなければ, その施工は容易になるし, こ

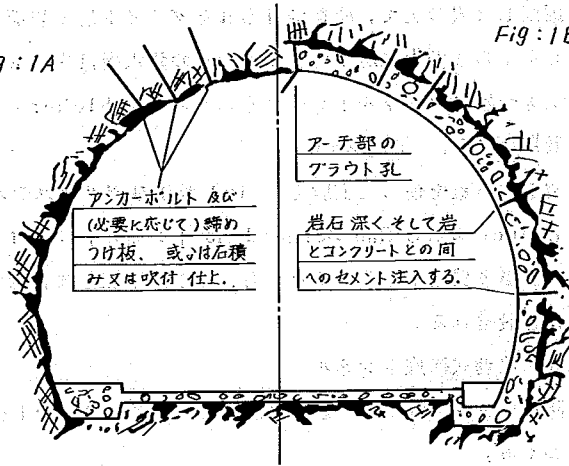
横断図

覆工なしのトンネル

伝統的な防水をした
トンネル

Fig: 1A

Fig: 1B



覆工 背面

Fig: 2A



横断図
覆工の中での防水工

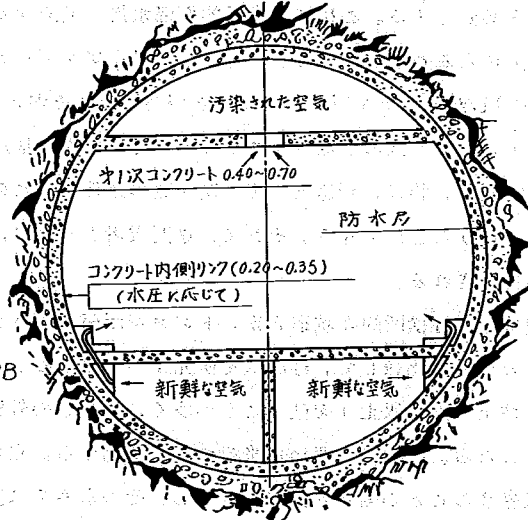


Fig:2B

内装工・技術

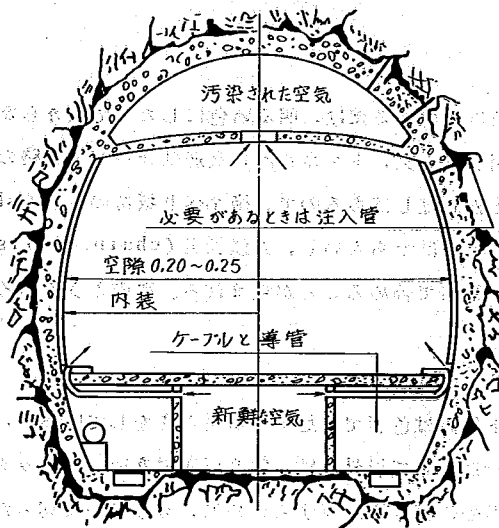


Fig3

の水平面との傾斜が 40° 以下なら、斜坑に同じことがいえる。

高さが大きい所での上方から又は底からの立坑の掘進は、既に水力発電所で使用している方法を必要とする。これは、横断的な滞水層に遭遇するところでは、非常に困難な作業になることが多くあり、時としては、アンダーカット(Lyon-Croix-Roussé)したり、土を凍結させることが必要なことがある。こうした立坑が非常に長いと、高さと共に困難さをますので、その費用を推定するのが難しい。多くの局地的要素、特に、到達地点での進入路の条件が、この作業に影響し、いろいろな方法を使うことができる。それで、専門業者と一緒に、精密な費用研究をすることが推奨される。

また、取付横坑を含む横断的な坑道とか、トンネル断面に組込まれた、長手方向の坑道のような代案と比較して、経済値を研究すべきである。立坑を掘削すると、不透水層(粘土とか泥灰土)を破ることが多く、立坑壁の外側沿いに水のおこしをおこすことになる。同様に、悪い水平打つぎに基因する。立坑覆工の貧弱な“防水性”は根絶することが困難な漏水をおこし、その水みちは換気坑道におよぶので、非常に困ることになる。これは凍結状態の時に、悲惨な結果をまねく。(化粧をゆるめたり、持ち上げたり、天井に氷をつくったり等する)

1.7 車 道

トンネルの車道は、できるだけ、明るい色にしないでならないので、最小の照度で、良く照明する。又、トンネル内の交通はオープン道路のように自由でなく、減速や、停止がしばしばあるので、横すべり抵抗のある(skid-resistance)路面にしないでならないし、連鎖衝突(chain collision)をさけるために、最小可能距離で停めることが望まれる。次のようないろいろな方法が採用できる：

1.7.1 コンクリート舗装

コンクリート舗装は色彩で満足できる明るさをしているが、全体の土木工事計画の完全な一部として以外には、使うべきでない。クラック発生をさけ、ジョイントでの路面の連続性を維持するために、カッターで切った目地やプレストレスのような必要な予防手段を講じておかねばならない。梁や、床版はさけね

ばならない。白さをよくするために、いろいろな製品が使われることがある。

(m^3 当り 3.5 Kg の酸化チタン, オランダの Velsen)

1.7.2 コンクリートの頂面にかけるアスファルト層

この解決方法は、発生する路面の高低差を直すが、最小被覆厚 5 ~ 6 cm を要し、付着についての予防手段を必要としている。輝度を改善するために、いろいろな製品が使われている。(シリカ, 又はアルミニウム)

1.7.3 掘削した岩の表面においた砂利(連続粒度)基層(base course)上のアスファルト舗装

オープン道路でのこの種の舗装に対する通常の規定の他に、被覆層(carpet)の移動やクラックの発生をさけるために、路盤(subgrade)の深い排水を考慮しなくてはならない。このため、横に設ける排水溝は、道路基面より低くしなくてはならないし、又、排水層を、掘削した岩の上に設けねばならない。圧力を有する漏水があれば、それをとらえて、縦断方向の溝に導かねばならない。車道の形状と一体にしたり、わけて設置したりする普通の(飛び越えをしない)縁石を設けねばならない。これは、車道を洗浄するために使った水が、歩廊(foot way)の下排水溝に流れ込むための出口がついていないとではない。これらの溝は、洩水の排出に必要なものと、共同されることが多い。降雨がないので、交通によって生じる堆積物が路面を滑りやすくすることのないように、しばしば地下車道は洗浄する必要がある。

1.8 天井および垂直隔壁

横流換気トンネルでは、天井および交通空間部分の上または下の水平床ないし、アーチ形の天井(Vault)がよく使われている。

プレハブのエレメントで施工したり、しなかったりするが、アーチの中につくられた細長い溝(slot)の所で、主構造体に支持されるか、または、ピンで固定されたコンクリートの受台(catch piece)で支持される。中央では、仕切壁になる吊具を使って、アーチ型天井に支持させることができる。(必要がなければ行わない。)

寸法と配筋は、トンネル内の空気圧とその減圧による最悪の載荷重の形で算出

される。管理員に対しては、 m^2 当たり平均 1.00 kg の荷重が適当のようである。しかしながら、もっと高い局部荷重を支えねばならないこともある。

新鮮空気と汚染空気ダクトの間には、圧力の増加があるので、換気ダクトは、外部に対してもまた、ダクト相互に対しても、気密でなくてはならない。ダクト、エレメント間と同様に、主装置との接合部での気密を永久に保つために、適切な装置を使わねばならない。収縮および高速循環をする換気の空気によって生じる温度変化によるコンクリートの直線的な変形を考慮しなくてはならない。これは、周辺のコンクリートおよび外側の地山の温度が殆んど一定な冬期において、とくに大切である。

スムーズな天井は、ほこりがつきにくい、リブのついた天井は経済的である。それは、交通に対して音の自然の絶縁材となり、広いトンネル（2車線以上）では、車線上に直接照明器具をとりつけられるようにし、これは、照明の均一性と、運転者への最適の誘導に最もよい位置である。普通のコンクリート天井より薄い金属をはさんだ天井は、トンネルの全体高をへらすために使われることがある。

種々の換気坑道の垂直仕切りは、より軽い材料でつくられるが運転時には、必ずしも同時になっていない空気圧の上下に横方向で耐えられるようにしておかねばならない。従って低圧（200パスカル以下）に対しては、ファイバーセメント板を使うことができる。より高い圧力に対しては、コンクリート板を使わねばならない。

1.9 種々の坑道 (gallery) やダクト

車道の下にある坑道の上床版は、勿論、許容する交通の最大進行 (rolling) 荷重で設計しなくてはならない。この端部は、主構造体に固定されたり (Autwerp, Rotterdam, Stuttgart) 自由支承 (Amsterdam, Lyon の Fourvière) したりする。水密継手の実施に当っては、収縮とコンクリートの温度と異った温度の空気によって生じる温度変化に起因する長手方向の線的な変形差を考慮しなくてはならない。特殊な場合（例えば、深い土塊）には、又、例外的なやり方としては、ベース上のネオブレーンの滑動板上にのせた独立の換気ダクト（ブレイブのこともあるし、そうでないこともある）によることもできる。

(Mont Blanc)。

覆工の変形差による応力は、外部プレストレス法（固定受台）、ないし、内部ケーブルによるプレストレス法によって避けられる。

建設時には、横断面内に、次の事項に対する用意をしておかねばならない：

—地質によって量の変わる漏水の通路、車道の洗淨ないし消火の際の水と共に、

縦断形の低点からの水の排出通路；

—公益サービス用（電気機、電信機等）の種々の導管（conduit）やケーブル、とくに都市地域では、これは長期計画上、基本的に重要である；トンネルに使用する電力ケーブルとその他のもの（換気プラント用の電力の供給、中継、遠隔操作、遠方監視（telemetry）等）。

液体燃料ないしガス管は、原則として禁止される。稀な場合に、もれや、爆発の危険に対する防護方法についての特別な研究をした上でのみ、承認されるものである。坑道（galleries）の寸法と設計を決定する前に、与えられたトンネルに特有の全ての要求物（現在および将来）の調査を、施工業者と通信事業者と共同して行わねばならない。新しい要求が手おくれになってから、施工者にもこまられることがよくあるが、實際上、後になってのダクトの拡張は、トンネルが供用されると、不可能かまたは、非常に高価なものとなる。

1.10 防 音

音を防ぐのに2つのタイプが考えられている：

—使用者に対するトンネル内部のもの

—周辺環境に対するトンネル外部のもの

1.10.1 内部防音（sound insulation）

トンネルは、まさしく音響パイプ（sound pipe）である。できるだけ、アプローチの大気中の状態に近づける目的で、若干の重交通のあるトンネルで、交通騒音の伝播と吸収の状態を改善するための試みが、最近行われるようになってきている。これは音響レベル（sound level）と残響時間の減少である。（この残響時間は、その終点で、聴覚上のエネルギーが、百万分の1に減る時間であり、これが、閉塞空間の共鳴（resonance）を特徴づけるもの

である。)

これは、トンネルでは、(普通の構造では、7-10秒のオーダー)、オープン(1秒の数百分の1)よりはるかに高く、車の距離を運転者が判断するのにさまたげとなるため、安全性をへらす。

さらに、音響レベルの減少は、トンネル内に、しばしば長時間滞在する管理員にとって有益である。Lyon-Croix-Rousse(1952年フランス)や、Le Havre(1955年、フランス)およびCoen(1966年、オランダ)の諸トンネルは、天井ないし、側壁または、その両方に、聴感上の観点からの処置が施されている。表面の処理は、横断面の形と、材料のタイプ(Hertz(毎秒1サイクル)共鳴器、音響パネル、セル状材料等)に関係している。当委員会が出しているトンネル資料集が有益な参考となろう。

残響時間の減少についてえられた結果がFig 4に示されている。

こうした改善は、必要な工事費の項で考慮されている。1966年のオランダのCoenトンネルでは、35フローリン/㎡、1950年のフランスのLyon-Croix-Rousseでは、22フラン/㎡。

1.1 0.2 トンネル周辺の環境に対して必要な防音

都市内では、換気所が出す騒音は、その地域に許容されている限度内に保たせねばならない。次のことが推奨される：

一周辺騒音(background noise)(交通、工場等)と、その地域の工事開始前の1日中の、それらの変化の調査をすること。

一その地域で許されている騒音レベルを調べること。

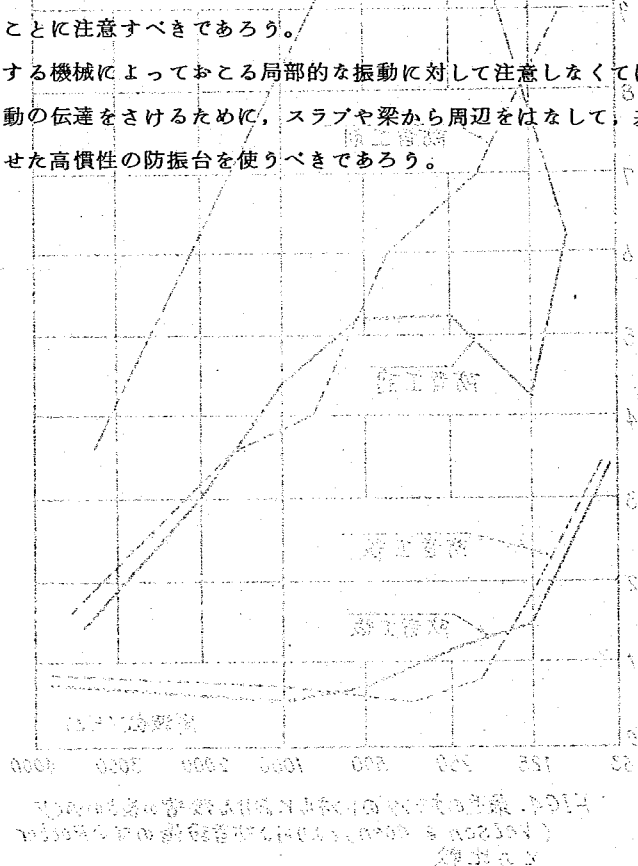
許されるレベル、救済方法(絶縁装置等)および、それに対応する空気回路(air circuit)内での荷重損失を、音響学の専門家と討議しなくてはならない。

こうした研究は、取入口と排出口の間の距離を増したり、それが普通の位置にあげられているのを、一緒に配置がえしたりするようなことがよくあるので、計画にとって不可欠のことである。別な場合として、防音装置を設けられるように、換気機とその外端口の間の距離を増すようにすることもできよう。一般に、空気回路は、音力(sound power)の吸収と、回路中の空気

負荷 (air charge) の最少損失が調和して、できるだけ経済的に設計されねばならない。

都市内では、換気機ないし、別な換気機関の干渉から生じる全部の音のスペクトルに含まれているすどい音 (pure sound, サイレン等) の伝播に留意することも必要である。提案されている道路構造物が、都市開発の一部になっている時は、地下の交通騒音も考慮しなくてはならないことがある。全ての場合、防音は、基本的には、使用する装置の慣性 (inertia) の問題であることに注意すべきであろう。

回転する機械によっておこる局所的な振動に対して注意しなくてはならない。振動の伝達をさけるために、スラブや梁から周辺をはなして、基礎まで独立させた高慣性の防振台を使うべきであろう。



Ⅱ 換気

2.1 一般原理

自動車の排気煙は、数多くのガス（一酸化炭素、炭化水素：メタン、エタン、エチレン、アセチレン、プロピレン（ C_3H_6 ）、ブタン（ C_4H_{10} ）、ブタジエン（ C_4H_6 ）、ペンタン（ C_5H_{12} ）、ヘキサン（ C_6H_{14} ）、ヘプタン（ C_7H_{16} ）、オクタン（ C_8H_{18} ）、ベンゼン（ C_6H_6 ）。多環式炭化水素：ベンゾ（ $\frac{3}{4}$ ）ピレンーベンゾピレン 1-12-硝酸塩酸化物等）を含んでおり、その中には懸濁状になったスズ、鉛、燐化合物（若干の高級ガソリン中）硫黄等の粒子がはいっている。これらは、通常、毒性があり、臭いがし、目や呼吸器官を刺激する。運転者はトンネルを通る時、こうした物質を吸うことをさけねばならない。さらに、交通安全上よい視界が必要である。すなわち、これは、常に、快適な視界を保っているきれいで透明な大気のことを意味している。その大気は、また、排気ガスの臭いをもっていない。

こうした条件を守ることが、運転者の緊張（tension）をやわらげることになり、基本的な安全要素の本質である。

今日までのところ、こうした成果は、外気をとり入れて希釈（dilution）することで得られている。トンネル空気中の有毒成分を、フィルター装置と閉回路換気を使って直接吸収することは、効率、費用および寸法の点で、また、道路トンネルでは、実用化されていない。

排気煙中に含まれる唯一の有毒ガスではないが、一酸化炭素は、一般的な汚染の代表と考えられている。というのは、このガスの量と、トンネル内にある他のガスの間には、一定の比例関係があるからである。ディーゼル車混入率 2.0% 以下の交通があるトンネルの場合に見られうるように、この比例関係はディーゼルトラック率で変化する。

2.2 自然換気

自然の縦方向換気が道路トンネルにあることは多い、これは通常、両口部の大気条件の差（気圧、温度、湿度、風等）に起因している。しかし、気象条件の絶えまない変化は、大半の時間にわたって、こうした自然換気を不安定なものにし

ている。数時間にわたる風によって区切られる方向の反転がしばしばおこる。

かくして、ある期間、数時間にもわたって、道路トンネル内の自然換気は、 $3 \sim 5 \text{ m/s}$ のオーダーの縦方向風速に達することがあり、排気ガスを希釈するのに、十分であろうと考えられる程になる。しかし、風の時に、自動車によっておこされる空気のピストン効果が、自然風の縦方向の動きの代用になれるごく短いトンネルの場合以外は、こうはならない。

人工換気なしで設計できる地下の道路構造物の最大長をきめる確実な一般公式はない。

のべる価値のあるケースとしては次のものがある：交通が一方向のみに使っており、したがって入口での空気の取り込みより“自動換気”が生じているトンネル—許される最大長は僅かに大きくなりうる；

その末端部が通常、動的な風圧をうけていない取付斜路のある河底トンネル；

反対に、坑口が丘の斜面に向って吹きつける風の動的エネルギーの変化によっておこる圧力の増減にさらされており、その値は箇所毎に変わるような、多少とも高い丘の下でのトンネル。

しかしながら、この問題は、まず、風の方角、速度、頻度に関する正確な観測と、広範囲の地形測量を行った上で、計算と模型実験によって、とくことができ。空気力学の一般原理を使い自動車による空気の引き入れを考えねばならない。

後者に関しては、PIARCの道路トンネル技術委員会が出した調査資料 (Documentation Survey) 149 頁を使わねばならない。

一般的な目安としては、長さが 2000 m から 2500 m を超えるトンネルで、重交通量をうけねばならないものに対しては、人工換気を考慮せねばならない。

2.3 人工換気

希釈に必要な新鮮空気流量を計算するためには、汚染量と混合された空気中の許容濃度を知っておかねばならない。

2.3.1 トンネルの長さ 1 km 当たりの毎分に出る自動車の有害ガス排出量 (L/km/min)

既述の通り、考えられる代表的な汚染は、一酸化炭素である。与えられた距

離について、自動車が出すこの量は、それ自体が次のものの函数である：

—与えられた速度に対する毎分当りのリットル数で表わされる各車の放出 q_{co} の単位量；

—与えられた瞬間での、トンネル長 1 km にいる車の数、これは一般には 1 km 当りの車の密度 K と呼ばれている。

これらの値を確定するには、次の諸点を考慮せねばならぬ：

2.3.1.1 車が放出する一酸化炭素排出量 q_{co} ：

1) 一酸化炭素の放出値は、道路上で、車の実際の使われ方と手入れ状態で、しかも現実の交通条件下での走っている自動車の出すものでなければならない。使われている速度および、交通の流動性が大きい時と小さくなった時のことを考慮せねばならない。これらの要素は、実験室での研究結果に比べて CO 排出量に、重大な増加をきたすことがよくある。

2) 考慮する数値は、正確なものとするためには、個々の車についてではなく、統計的に求めなければならない。

3) ディーゼル重車輛は、ガソリンエンジンの車より、一酸化炭素の含有量は低い。しかし、ディーゼルエンジンははるかに大きな気筒容量を有しており、したがって、はるかに大きな排気量を出すので、重車輛の出す CO 量は小型車の出すものと同一オーダーであることが実際に証明されている。それ故、放出される CO 量の算定に当っては、これら両型式の車輛は、等しいとする。

4) 種々の割増係数：とくに斜路と勾配、および標高：これらの割増係数には、水平部での平均車輛の基本値を適用しなくてはならない。

q_{co} および、種々割増係数に関する数値の決定には、もっとも新しい決定的な研究が参考になる。附録 2 に、道路トンネル技術委員会が推奨する値が出ている。

2.3.1.2 車輛密度 K (Density of occupation) (1 車線 1 km 区間に、同時に存在する車輛台数で、汚染問題の検討に十分なだけの数分間 (1965 年版 H. C. M では 5 分間) について算出した平均値) これは次のものの函数である：

1) 道路のタイプ(自動車道路, 幹線道路, 都市内道路等), すなわち, これらの道路は, 違った使われ方をしており, 道路構造物に関する交通流の可能程度が異っているからである。

2) 構造物横断面内での考えている斜線の位置(左, 右ないし中央車線) すなわち, それぞれの車線内での車は, 異った条件(追越, 一定速度等)で走行しているからである。

3) 車種構成(大型車(商業車), 軽ないし高性能車等の率)

4) 道路の縦断線形(斜路, 勾配, 曲線半径), とくに, 大型車の比率が高い交通の場合。

5) 他の同様な構造物でえられた経験から求めた予測できる実際の速度(true speed)。概して, 車の運転者は, 前の車が速度を下した時, 衝突しないように, ブレーキをかけるため, 自分の車と, 先行する車の間に安全距離(車間距離 headway)をとっている; この距離は, 速度によって変り, また, 各トンネルでの運転条件(車線巾, 横方向の障害物, 照明等)にも関係している。

6) 将来の交通予測からきまる時間交通量。非常に交通密度が高い場合には, 運転者の行動自由度はほとんどなくなり, 互いに密着した状態になることには明らかである。

計画用のK値で選ぶため, 供用中の道路トンネルおよびトンネルのない野外道路(open road)で行われた最近の交通解析を参考にすることができよう。この点に関しては, 1965年版 Highway Capacity Manualに横方向の障害物, 重車輛の混入率, 縦断線形等についての有益な情報が出ている。

附録2に, 現在, 道路トンネル委員会として, トンネルの換気研究にあたって容認出来ると思われる数値を掲げている。示されている車の密度値は, 参考程度にすぎず, 個々の特殊ケースでは, Highway Capacity Manualの方法に従って変化させ, 恐らく, 若干のトンネルに対しては, 特殊な係数を採用しなくてはならないだろう。

2.3.2 道路トンネル内の許容CO汚染度 δ_{co}

これは, その値の決定が, 直接的には, 使用者や, 管理員の安全に関係して

おり、間接的には、運転者に供与すべき環境の快適性に関係しており、さらに後者は、交通条件に影響するものであるため、複雑なものである。

一般的な意味で、トンネル内の大気が確保しておかねばならない安全性は、次の事項に関係している：個人の健康、これは、一時的にもせよ、決して損われてはならない；また運転者が、オープン野外的におけるよりも、もっと注意しなくてはならない地下の環境の中で、自分の車を事故なしに、十分、運転できるだけの状態（レベル）になるように、運転者の知覚および反射能力が、いかなる状態ないし、原因の場合にあっても、正常に働くようにしておくこと。

自動車の排気中には、多少とも有害なガスおよび固形ないし液状の粒子が含まれている。ずっと以前から一酸化炭素が、最も危険であると認められてきている。また、これ以外の有害成分は、普通COの量に比例している（ごく僅かな変化はあるが）ことも知られている。したがって、他のもの、測定よりはるかに容易な、このガスだけの測定で、全体の毒性が代表されると考えられている。

全世界の衛生学者達が、長い間一酸化炭素の人体への影響を研究している。1920年代に米国で、ニューヨークのHollandトンネルの換気をきめるために、徹底的なテストが行なわれた。このテストの結果一酸化炭素の時間と共に累積する影響が確認され、さらに、頭痛、動悸、めまい、はき気、病状等のような苦痛と血液—一酸化炭素量の種々の度合（血液中におけるCO/Hbの比率）の関係をはっきりさせることができた。他の成分（酸化窒素、硫黄ガス等）の毒性の限界もまた、種々の国際衛生学会の大会ではっきりさせられてきている。しかしながら、運転者の知覚および反射能力に対する一酸化炭素の影響を若干の国で研究するようになったのはごく最近のことである。

その他の種々のものも研究の対象になってきている：

—大気圧の低下によって、それに馴化しない運転者に、一酸化炭素による症状に加えて、軽い酸素欠乏症をおこすことになる、高度の影響。これは過敏な視力を鈍らせ、トンネル内では、かえって良い影響になる網膜の酸素欠乏症をひきおこすことがある。

—アルコールとタバコの影響

—CO の作用に関連する種々の器官の機能障害の考慮（貧血、心臓障害等）

一般に、長いトンネルでも、運転者は、ごく短時間しかトンネル内にはいないので、CO の吸収は極めて僅かである。しかしながら、トンネル内で、もっと長い時間過すことになる、故障とか事故の場合を考えねばならない。

同じことは、もっと強力に、維持作業員に対して、適用される。すなわち、彼らの場合は、作業時間中のトンネルの汚染度を徹底的にへらすか、夜間だけに作業を限定するか、または、一連のチームを編成して、各チームの作業時間を、数時間だけにするかで解決することとなる。

特殊な専門分野に関する全ての問題を詳述することは、ここではできない。これに関しては、PIARCの道路トンネル技術委員会が出した調査資料集 (Documentation Survey) に詳細な情報が出ている。

環境の快適度は、ディーゼル車混入率が20%以内のトンネルでは、許容 δCO 量とも、関連している。事実；見え方を規制する光束の吸収率が、煙や有色ガスの成分としか結びつかないのなら、一酸化炭素の平均量と煙の比率は、実際には、ディーゼル車の混入率に関連しているので、CO 率に比例するとして十分である。

眼を刺激するガスや、トンネル使用者に非常に敏感に感じる臭いを有するガスについても同じことがいえる。これらの基準に目に見える煙を加えた所までが、そのトンネルがよく換気されているかどうかを示す点であるとされている。

δCO と快適さのこの関係は、多くの要素で変化するが、とくに：

- 交通量中に占めるディーゼル車の割合；
- その路線に使われているディーゼル車の重量；
- 同一含有量で、見え方を修正することになる湿度条件；
- ピーク交通の発生頻度と継続時間、これは、短い時間で例外的な強度のこともあり、系統的で長時間にわたることもある。

このように、トンネル計画に適用すべき一酸化炭素の限界率は、トンネルの性格、交通の車種構成、および多少の程度での、使用者の快適性に関する要求によって変化する。

実施上の観点から、ディーゼル車混入率が20%以内の時の、30番目交通量（年間に30時間だけ、これ以上の時間交通量がある）に対して、次の値を推奨する。この推奨値は、トンネルのサービス内容に基くものである：
—都市トンネル：

(a) 通常の使用状態： $\delta_{co} = 70 \sim 100 \text{ ppm}$ 、ディーゼル車の率が20%をこせば、結果的にはこの値はへらされることになる；

(b) 予期できない事情（たとえば衝突）から生じる偶発的なピークとか停車状態は、断続的な交通の動きを惹起する： $\delta_{co} = 250 \text{ ppm}$

—山岳トンネル：

(a) 通常の使用状態、 $\delta_{co} = 100 \text{ ppm}$	} ディーゼル車の率が20%をこせば、結果としてこれらの値を減らすことになる。
(b) 30番目交通量以上に対する最高限度値、 $\delta_{co} = 150 \text{ ppm}$	

(c) 予知できない事情（例えば衝突）からくる。

偶発的にピーク交通： $\delta_{co} = 250 \text{ ppm}$ ただし、最高継続時間は、15分間とする。

これらの値と、1 km以内の構造物には250 ppm、3 km以上には200 ppmとした、スイス専門家のもの(1)との間には、矛盾はない。何故なら、スイスの値は、30番目時間交通を50%もこすことがよくあるような極端に高いピーク交通に関するものであるからである。またそれらは、ディーゼル重車輛の一酸化炭素排出については、仮想値を使って求めた設計値になっている。これらの仮想値は、ディーゼル車の煙の排出を考慮する際には非常に主要であるが、実際には、ディーゼル車の一酸化炭素放出量は、ガソリン車のものと、同一オーダーである。この点については、十分詳しく附録2に出ている。

高い標高の所のトンネルに対しては、高度が一酸化炭素の汚染限度を低下させるような、2次的な酸素欠乏症を惹起するという影響も考慮することが必要なようである。これは、標高3,350 mの所にあるStraight Creekトンネルについて、最近アメリカが行った研究から出てきている。

2.3.3 トンネル内の新鮮空気流量

(1) Die Lüftung der Autotunnel Nr 10 ETH Zurich

すでに、2.3.1.1, 2.3.1.2および2.3.2で求めた、 K , q_{co} , δ_{co} の数値を使えば、 δ_{co} を希釈するのに必要な恒久新鮮空気流量は考えている速度で、3.50 m 車線の1 km当り、毎秒、

$$Q_{AF} = \frac{K \times q_{co}}{\delta_{co} \times 60 \times 10^3} \text{ m}^3$$

となる。

附録2は、計算を示し、種々の速度と種々のタイプのトンネルに対して、水平部換気量 $Q_{AF} = 17.5 \text{ l/s/m}$ からえられる δ_{co} の例を掲げている。

普通の方法で、 $\delta_{co} = 100 \text{ ppm}$ の希釈をするためには、速度約5.5 kmで、水平部をはしる普通車は、下記の新鮮空気量を必要としている：

$$Q_{AF} = \frac{30 \times 10,000}{1,000 \times 60} = 5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{台}$$

事実、この値は、種々の要素（配分の不均一性等）を考慮し、煙に対する良好な透明度を確保するために、 $3.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{台}$ （ロッテルダム）から、 $7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{台}$ （アストワーズ）の範囲で変化している。

斜路、高度（ガソリン混合物したがってCOの単位排出量の増加をきたす。断続ないし連続した除行（これもまたスタート毎にあるいは加速毎にガソリン混合物の量をます）を考慮するような若干の場合には、この流量を増すことが絶対に必要であることに注意すべきである。

2.4 換気方式

3つの形式が使われてきており、依然として適切である：

一縦流換気：空気はトンネル内で縦方向に環流する。

一横流換気：空気の希釈と排出は、交通に使われている空間内で、横断的に行なわれる。

新鮮な空気は、外の大気から、縦方向のダクトを通して、縦断的に供給され、普通車道の僅か上方におかれている送気吹出口から、トンネルに沿って車道空間内に分配される。使用済の空気は普通、天井にある排気孔を通してトンネルの上

の方の部分から引き出し、縦方向のダクトを通して、外気中へ排出する。実際には、トンネル両坑口での外気圧には、通常差があるので、大半の横流換気トンネルでは、使用済の空気のかんりの量が、そのトンネルの坑口を經由して、排出される縦方向の空気の流れて発生していることが多い。この効果は一方交通のトンネルでは、自動車による空気の引込みと押し出しのため強くなっている。この問題は後で吟味する。

(使用済の空気) / (新鮮な空気) の比は1に等しいはずであるが、若干の技術者は、1よりも小さくできる、と考えている。(モンブラントンネルでは、 $\frac{1}{2}$ に等しいとしている。)

一半横流換気：新鮮な空気を供給し、分配する。

ダクトだけを有する；使用済の空気は、交通流の動きによって、トンネル内の空間を縦方向に排出される。

混合方式も採用されている。例えば

— Clyde トンネル (英国) では、換気は、大半の時間については、横流タイプであるが、ピーク時には、半横流式換気もある。

— Coent トンネル (オランダ) では、通常の換気は、縦流方式によっている。し

かし、トンネルが2方向交通に使われている時、ないし、一方のチューブが、作業をするために閉鎖される場合には、補助の半横流方式が使われる。

2.4.1 縦流換気

これは最も簡単な換気方式であるが、軽い車輛がトンネルにはいった瞬間に、はげしくて、危険な突風をうけることのないように、縦方向の許容風速を制限せねばならないので、短いトンネルにしか採用できない。一般には、この風速は 8 m/s をこえないようにする。

縦方向の空気流をおこすために使われている機械的方法は次の通りである：

- (a) 開口部に噴射管のあるもの、この開口部に換気プラントが設けられている；
- (b) トンネル沿いに分布し、交通空間の外側に設置された昇圧機 (booster) によるもの。この装置の2組のもの、間隔は、お互いの作用が他方に到達する前に消失できるように、少なくとも $40 \sim 50\text{ m}$ は離さねばならない；したがっ

て、これらの数と出力は、減衰(muffling)後の全体速度を $6 \sim 8 \text{ m/s}$ にするという理由で、制限される。(ただし、一断面に数個のファンを使用することはさしつかえない。)

(a) 方式: Rendsburg (ドイツ), Coen トンネル (オランダ), Le Havre, Saint Etienne (フランス)

(b) 方式: Schiphol トンネル (オランダ), Limfjord (デンマーク), San-Bernardino および St. Gothard (スイス) への取付道路にある若干のトンネル。

トンネル内での流体の摩擦抵抗は、トンネルの長さの3乗で増加する。この計算には、運動量の法則が適用される。使用者の快適性という明らかな理由で、噴射速度は、 25 m/s 以下におさえるべきである。このタイプの換気は、比較的短い ($600 \sim 800 \text{ m}$) かまたは、交通量の少ないトンネルにしか適さない。さらに、交通の動きによって伝達されるエネルギーのかなりの効果が対向交通のトンネルでは、縦流換気を低能率のものとする。一方向の交通流は、それだけで状況によっては、高い車速で、 $5 \sim 7 \text{ m/s}$ のオーダーに達する縦方向の空気の流れを発生し、したがって、必要な換気の相当部分を確保することになる。それ故、人工換気が補助的な換気になる場合もある。これはとりわけ、自動車が停止した場合に、適切な換気を維持できるだけの能力にしておけば十分である。

河底トンネルの入口と出口には、低い位置(レベル)にあるので、外部の風の影響が、重要になることはあまりない。この条件が満たされない時には、採りうる2つの方法がある:

(1) 風の作用から生じる対向風圧を打消すだけの適当な増加を換気力の中に見込んでおく;

(2) 噴射機が端部に設けられている時は、反対側の噴射機を使うことによって、また、昇圧機(booster)が使われていない時は、外気の方にあわせて、それらの昇圧機(booster)の方向をかえることによって、人工換気の方を逆転させる。かくして、トンネル内の気流方向は、交通もしくは強風の方に向き立ち向かうことは(低速度の場合は除く)決してない。従って、一方向トンネル

ル内で自動車が発火した時、その燃えている車より後の車輛群には、煙がかかることはない。これらの車輛群は、トンネルの中がUターンできるだけのものであれば、通常脱出できよう。前方にいる車は、規定された最小車間距離を遵守しておけば、焰母と煙の伝播は、瞬間的なものではなくまた、普通は高い位置でおこるものであるから、一般に、問題なく、離脱できる。

2.4.2 横流換気

2.4で定義づけられたこの方式に対しては、次のことが必要である。

一換気装置をおく位置と、各装置が担当するトンネル区間の長さを求め、全体的な換気骨組みをきめる；

一1.1で規定される要素を、トンネルの対応断面に考慮する。

2.4.2.1 換気の一般計画 (general scheme)

これは、計画設計者 (project designer) の仕事で下記の種々のパラメーターを変化させたいくつかの試算を行った後に始めて漸近法 (successive approximations) によって、最終結論がえられるものである：換気所 (station) の間隔、ダクトおよび立抗の断面、これに対応する換気力の決定、運転時間の将来ののびとの関連での、建設費と維持費の評価。費用最小の計画案を選出しなければならない。このために最初の費用を軽減するには、漸増型式の換気装置を研究できることが多い。しかし、モーターや換気機を後日とりかえること、特に、その耐用年限 (15ないし20年) がきた時に交換することは十分容易でありかつ正当なことであるが、同時に、トンネルの横断面は変更不可能なものであることにも留意すべきである。トンネルを使いながら、それを拡巾することは、普通、不可能である。トンネルの横にうらして、中間の換気立抗を後日掘削することは、若干の注意を払えば、常に実施可能であると判断されているが、この考え方の真実性は、まだテストされたことはないようである。

2.4.2.2 縦方向の給・排気ダクト

2.4.2.2.1 所要面積

縦方向の許容風速が重要な要素である。これに関しては、この通路の建設費 (掘削と覆工) を考慮せねばならないので、厳密な指示を与えること

はできない。場合によって、15から25～30m/sの速度がつかわれている。

2.4.2.2.2 断面形

土木技術上からの偶発的な要請と、全ての不要空間(dead space)を利用する必要に応じて、単純な矩形から、曲線三角形までの実に多種多様な形状が使われている。しかし、等面積では、角ばった断面の方が、正方形ないし、円形断面よりはるかに、流体力学上の代表寸法(hydraulic diameter)が小さく、このことは、それだけ換気所要力をますことに注意せねばならない。

2.4.2.2.3 横断面内での換気ダクトの設置位置

これは下記の条件を満たすなら、どこにでもおける：

— 交通流の影響をうけている空間につなぐ小さな2次導管(secondary conduit)は、その長さが大きすぎたり、その形が複雑すぎると一般に高価になるので、これに過大な出費をしないように、容易にとりつけられること；

— 実験上、1925年にHollandトンネル(横流換気をした最初のアメリカのトンネル)に使った配置は、良いものであることが証明されている；新鮮な空気は断面の底部からはいり使用済みの空気は、頂部から排出される。

この選択は、主として次のことを考慮して行われたものであること想起するのが大切である：

— 排気ガスは、150℃から300℃の間の温度で排出され、それらは、煙と一緒に上昇する傾向があるのでトンネルの頂部から引き出すのが論理的である。

— 火事の場合、ガスと煙は断面の頂部にあつまり、頂部から排出すれば、これらが縦方向にひろがるのがさけられる。

重交通をうけている都市トンネルでは、自動車が濁乱流の形でまきちらすエネルギーは、かなりなもので、換気の取入れおよび排出装置よりも大きく空気を乱すので、この伝統的な配置は、密度の高い都市内交通

のトンネルでの必要性は低い。若干の2車線トンネルでは、壁の上部で空気を横方向に吸引できる可能性が見込まれており、どの場合も火事の際は、煙を断面の上の部分から吸引することとなっている。断面底部の“有効な高さ(usable level)”の所に導管をつかつて新鮮な空気を吹き込むことは常に、推奨できるようである。

空気の供給および排出ダクトと、それらの交通空間へのそれぞれの吹き出し口および吸引口は、負荷損失(loss of load)をへらし、費用を節減するためには、できるだけ近接させねばならないが、避けられない土木工学的な理由で、給気ダクトと排気ダクトが、それぞれの交通空間への接続孔から、遠くはなれて設けられているトンネルの例がまだ沢山ある。

経験上、下記の配置が使われてきていることを示している：

1) 新鮮空気ダクトは下方に、排気ダクトは上方に：

New York のトンネル(U. S. A)； Antwerp (ベルギー)，
Stuttgart (ドイツ)のWaggenburg トンネル，関門トンネル(日本)，
Clyde トンネル(イギリス)，San Bernardino (スイス)

2) 全ダクトを底部に：Mont-Blanc (フランス・イタリア)，
Dartford (イギリス)，IJ アムステルダム(オランダ)，Mersey
(イギリス)

3) 全ダクトを頂部に：Lyon-Croix-Rousse (フランス)，
Durnstein (オーストリア)，Grand St. Bernard (スイス・イタリア)，
Belchen (スイス)，Grancia (スイス)，Baregg (スイス)

4) 同じトンネルで、トンネル区間が地下か水底かによって、上にしたり下にしたりしたダクト(Rotterdam オランダ)

5) 主として、河底トンネルで、航路底以下での高さの節減と不必要な掘削深をさける必要から、交通空間の両側の横においたダクト：Deas
Island (カナダ)，Havana (キューバ)，Velsen (オランダ)

6) 2つの車道の間の中央においたダクト：

Coen トンネル(オランダ)，Goteborg (スウェーデン)

車道よりも天井をつくる方が安いので、掘進トンネルでは、普通、車道の上方のダクトが推奨される。

円形トンネルで、車道の上と下に余裕がある場合には、これが普通、換気用につかわれる。沈埋トンネルでは、フラットな形状が一般に使われており、横、または中央位置のダクトが推奨される。

2.4.2.3 換気所 (Ventilation plant) は、立坑上方の大気中かまたは、トンネル坑口におくことができる：それはまた、ダクトへの供給点の上方ないし、側方におくこともできる。

この選択は、その箇所および環境条件による。雪の多い地方では、高い標高の所は、換気所は、電気を平坦な地表からとらねばならないので、非実用的なことが多い：このため、Grand St. Bernard (スイス・イタリー) や San Bernardino (スイス) のように、立坑の底部に換気所をおくことがある。

都市内では、建築学内考慮をはらっても、換気所はかなり騒音を出すことになるようである。このため換気所を地下に埋設することが多い：こうすると、振動と騒音の問題が楽になり、換気機と外部の吸気室ないし、排気室の間の防音装置用の空間がふえることになる。

しかしながら、可能な所なら、大気中に換気所を設けることが、建設にも維持にも費用が少なくてすむので推奨される。

2.4.3 半横流換気

ここでの事情と問題が、横流換気でとらえたものと同じなら、これは、恐らく、わずかに簡単になりまた換気用の縦方向ダクト (conduit) が1体 (single) ですむのでやすくなるだろう。

この方法が適用出来るトンネルの長さは、縦流換気の場合に適用したのと同じ条件で制限される。交通空間での使用すみの空気の縦方向風速は入口で、自動車に急激な抵抗を伝えないという理由から 8 m/s (例外的には 10 m/s) をこさないようにすべきであると、現在の所、判断されている。

これと関連して、末端部 (坑口附近) での大気の乱動や強風があると、計算や経験で示されているように、使用すみの空気が全部、一方の端からのみ強制

排出される結果が起りうることに注意せねばならない。したがって、このことから、縦流方式用の長さの制限を使わねばならない。例外的な場合には、縦方向の過度の風速を制限するために、使用ずみの空気の一部を吸引することの可能性を検討することができる。これが、既にのべたとおり、Mont Blanc トンネルの場合である。

研究されている若干の計画では、状況によって変えられる混合方式が検討されている；“横流—半横流”と呼ばれ、次のように使う：

(1) 通常の状態では、トンネルにダクトで新鮮な空気を配分し交通空間の使用ずみの空気は、直接吸引する；この一種の呼吸室(breathing bay)はアーチの頂部に点々とおかれ、これをリンク状に立坑まで導き、換気所の排気機に連結する。

(2) 火災の場合には、縦方向の送気ダクトの半分にある換気機の方向を逆転させて、その特別区間では、送気ダクトを煙の排出ダクトにかえる。

2.5 換気機

原則として、換気機のタイプの限定選択は、その建造者の裁量に任かせるべきである。時として、換気契約の入札前に土木工事が先行することがあり、計画とトンネル施行に責任を有する技術者達や、換気請負者が設計する前に、換気ブラントの選択決定をせざるを得ないことがよくある。従って、こうした人達は、主なる装置の所要条件と可能度について知っておく必要がある。

換気機の2大分類としての渦巻型(centrifugal)とらせん型(helicoidal)には、原理的にいって、主として合計圧力からきまる適用分野がある。

0 ~ 200 mmCE (約 2000 パスカル) : らせん型換気機
200 mmCE 以上 : 渦巻型換気機

しかしながら、この2つの形式の換気機の間制限は、国によって、その製造者と製造者自身の研究で、かわりうるものである。中間範囲では、どちらにするかのためらいも止むをえない。計画の原案ができたらずきに、換気機のメーカーに相談することが常に肝要である。一般に選択上の規準は次の通りである：

(1) 換気基地をつくるためにえられる空間(space)、および空気回路(air

circuit)中に換気機を設置するための容易さ。この観点からは、らせん型式のものは、興味ある長所を有している。というのは、流線型のモーターがついていて、空気の流れの中に直接、おくことができるからである。一方、渦巻型式のものは、高さが不足している所とが、スタート時に方向変換の必要がある所では有利である。

(2) 音響学的な力(Acoustic power)と音のエネルギーのスペクトル分数(spectral spreading)この問題は、回転速度の問題に結びつく。同じ性能を与えれば、最低の回転速度を有する換気機が、低い周波数で、最大のエネルギーを放出し、地域住民の聴感度を最少限にする。したがって低速度の換気機の方が一般には好ましい。若干の換気機は締めつけられるような感覚をおこす程になるが、同一圧力なら20倍もの高い流量を出すことができるものがある。いかなる場合でも、これは、デリケートな問題である。というのは、普通の大型の消音装置の効率は、低周波数の時は、比較的弱く(180ヘルツで20デシベル減少)、平均周波数の時に増大し、約1000ヘルツで最高に達する(40デシベルの減少)。

(3) トンネル内の汚染度に応じて、流量を連続的にかえる可能度：この点では大型のらせん型式のものが、両方の羽角度と回転速度をかえられるので、渦巻型のものよりすぐれている。流量の連続的な変化より、監督費がへり、交通需要によく比例する換気ができる。連続性こそ、良好な規則的換気を確保する唯一の方法である。わずか2ノッチか4ノッチしかない固定した率間の流量範囲は非常に重要である。というのは、理論的には理想的な流量は、2つの固定ノッチの中間に普遍存在しているし、また、最大値と最小値で作動する自動装置は急激に、一方から他方へ変わるものだからである。これは装置をこわすような不安定性につながるものである。(何回ものスタートや急激な停止、不完全接触等)

渦巻型換気機では、回転速度の変化によって連続的な流量変化は、かならずしも、良好な出力にはならず、種々の乾式ないし、三相式整流器(周波数の変化など)のついた可変速直流モーターのような附属装置に、多額の費用(購入および維持のため)を要する。

(4) 並列運転を要する場合の換気機の安定性。この点では、渦巻型の方がすぐれている。これらの種々な点は多数の変形方法や、解釈の仕方があって、この種の設備の専門官に調べてもらわねばならない。

Ⅲ 照 明

3.1 一般問題

道路トンネルでは、微妙でしかも難しいことの多い特殊な照明問題が提起されている：

—外部と内部の輝度の差は、（たとえ強力な照明があっても）常に非常に重要である。（その比は、1：2000以上のオーダーである）照明施設は、運転者が外からトンネル内にすぐはいれて、しかも同時に良好な視野を保っているようにする必要がある。

—地下構造物の内部では、感覚上の鋭敏さや、空間的な方向感覚の減衰がある。これは、視野内の物体面での輝度の分布が一層様になっていること（コントラストのないこと）、多少とも大気がヴェールをかぶったような状態になること、交通騒音がより強いこと、および、運転者の注意が要求されることのためである；

—地下照明施設の機能発揮や、維持および保管に影響する条件が難しいものである。すなわち、時として高温度と組合うこともある高湿度のことが多いこと；洗浄剤を入れた清掃水の使用；透明部分にたまるほこりとディーゼル車の機関ガスの混合物に起因する脂っこい附着物；ほとんど半永久的に機能発揮させておくこと；および交通止めすることは不可能なことがしばしばあるため、装置に近づくことが難しいことなどがあげられる。

3.2 種々の照明区間の輝度特性に関する定義

運転者の見え方に関する問題は、トンネルからの運転者の位置で変化する。したがって、下記のようにして決める若干の部分（Fig 7 参照）に区分することができる：

3.2.1 アプローチ部（構造物の外側）

夏の晴天時には、トンネルの入口付近の外部では、 $8,000 \text{ cd/m}^2$ 程度の輝度（平均反射率 0.20 なら、125,000 ルックスに相当する）がある。運転者の前で、トンネルは“黒い穴”のように見え、車道上の細部を運転者が見るこ

とは、視野周辺部と中心部の間のかかなりの輝度差のために、できなくなる。かくして、この輝度構造から、目の機能は、順応状態で使える限界以下にならざるをえないことがしばしばある。この理由で、アプローチ部分からトンネルの入口までは、次のようにすることが推奨される：路面は黒くすること、遮光用の木を植えること：横に壁体があれば黒色にすること。明色で反射度の強い材料で、トンネル入口をつくることは、さけるべきである。

3.2.2 順応部 (adaptation zone)

外部の高輝度 L_1 (夏は $8,000 \text{ cd/m}^2$) から、内部輝度 L_3 ($5 \sim 30 \text{ cd/m}^2$) に進むためには L_1 の $10 \sim 13\%$ の輝度 L_2 の中間部分を入れねばならない。この輝度レベルは、運転者がトンネル外にいてその眼がアプローチ部分の輝度レベルに適合していて、しかも同時に、この順応部分内でも、適当な見え方ができるようにものでなくてはならない。

異なる輝度レベルへの順応は、3つの独立した因子に関係しており、しかもそれらは、同時に作用する：

- (a) 瞳孔径の変化、正確には、瞳孔の順応；
- (b) 網膜感度；
- (c) 網膜にうつった映像の持続性；

すべての国々の照明専門家が、輝度 L_1 と L_2 の間の関係を、コントラスト C で定義するための、数多くの実験を行っている。(Fig 5) 見え方の基準は一般に、背景と輝度コントラスト C を有する $20 \times 20 \text{ cm}$ の立方体を観察者の 75% が認めねばならないとしている。

“P”は眼が、トンネル内部の低い輝度レベルに順応を開始する点である。順応部始点までの距離は、その部分の形状や、規制ないし制限および色採に関係している。

順応部の長さは、その始点から、運転者が承認されている進入速度をとっているとき、車の制動距離をとれるだけの距離の所にあるトンネル内の物体を識別できるだけのものでなくてはならない。例えばフランスでは、この値を 100 km/h の時は、 120 m にしており、それは次式によっている。

$$D = \frac{V^2}{100} + \frac{V}{5}$$

但し、摩擦係数 0.4、運転者の反応時間 3/4 秒としている。

(註 1) "Recommendations on Tunnel Lighting" March 1963 年

— "Nederlandse Stichting voor Verlichtings-Kunde" の公共照明委員会

— 野外照明に関する勧告, March 1965 年

— Association Francaise de l'Eclairage, 52 Brd. Malesherbes
Paris 8e

3.2.3 遷移部 (Transition zone) — (Fig. 7)

この部分では、輝度は、順応部の L_2 値から、徐々に減少し、最後に、トンネル本体の L_3 値になる。

運転者の目は、良好な見え方を保ちながら、これに順応すべきである。これは順応現象で、即時のものではなく、動的な性格を有している。

この順応過程に関する難しさは、主として網膜の残像に起因しており、常に知覚作用を阻害するだけでなく、運転者に不安感をあたえ、不快感をおこすものである。

Fig 6 に、順応時間の評価がしてある。遷移部の長さ (眼の順応速度による) は、車の速度に関係している。

これは、Fig 5 から、次のようにして求まる：

— 輝度 ϕ — 順応時間曲線 (Fig 6) は、車速 (m/s) によって、Fig 7 の AB 曲線 (輝度 ϕ — 順応延長) のようになる。この始めの縦距 100% は輝度 L_1 に対応するものである。

— 遷移部の長さは、縦距 $\frac{L_2}{L_1}$ および $\frac{L_3}{L_1}$ に対応する C および B 点の横軸の距離差に等しい。

3.2.4 トンネル基本部 (zone of the tunnel proper)

この部分では、輝度は概ね $3 \sim 30 \text{ cd/m}^2$ で、一定している。詳細は、あとにする。

内部の明さの輝度 L_2
(cd/m^2)

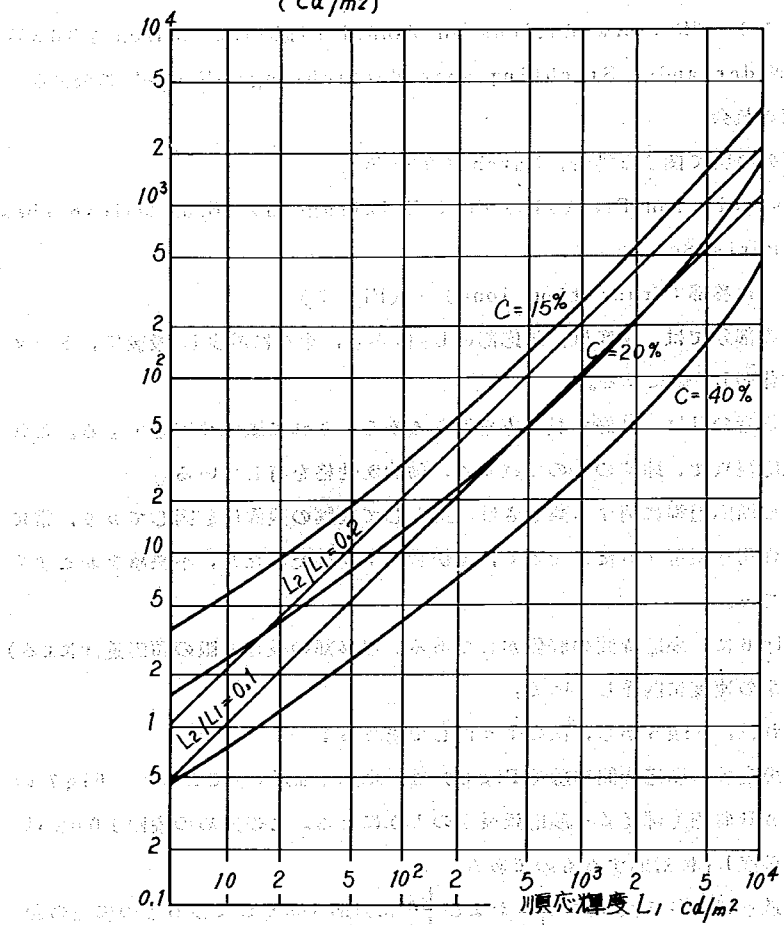


FIG 5: コントラスト C の函数としてのアプローチ部分の
 L_1 と明亮部分 L_2 の間の関係

明るさL_iの強度減少 %

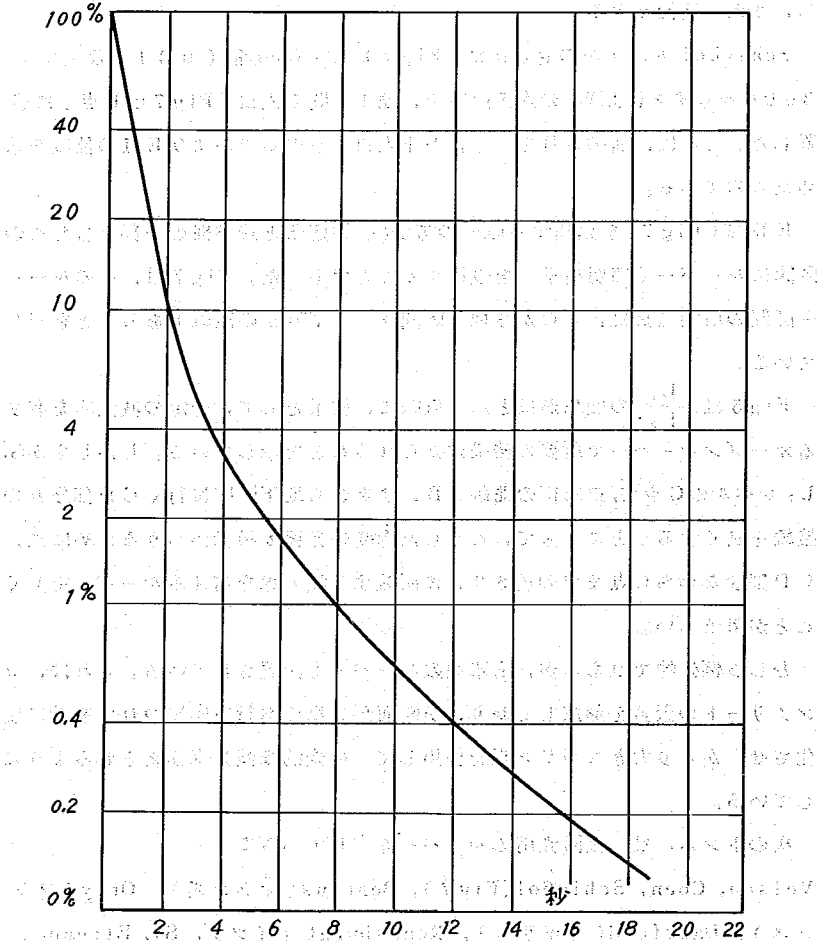


FIG 6 : 明るさの減少に調整されるようになる目の時間

3.3 種々の部分での理論輝度の出し方

3.3.1 ルーバー

順応部および遷移部に、高い出力の人工照明をつけることは実用的でもないし、また、高価すぎる。

Schiphol トンネルの場合には (Fig 7), 300 cd/m^2 (0.31 の反射率で, 3,000 ルックスに相当) の人工照明を, 地下区間の入口 (Fig 7 の D 点) に設置した。これは, 曲線 AB をかき, 地下入口からの C 点および E 点の位置を求めたものである。

ED 部 (Fig 7) を処理する唯一の方法は, 順応部と遷移部の一部を含むこの区間にルーバー (照明格子) を設置することであった。Fig 7 は, このルーバー区間の所望延長は, 入口から地下区間まで 170 m の距離であることを示している。

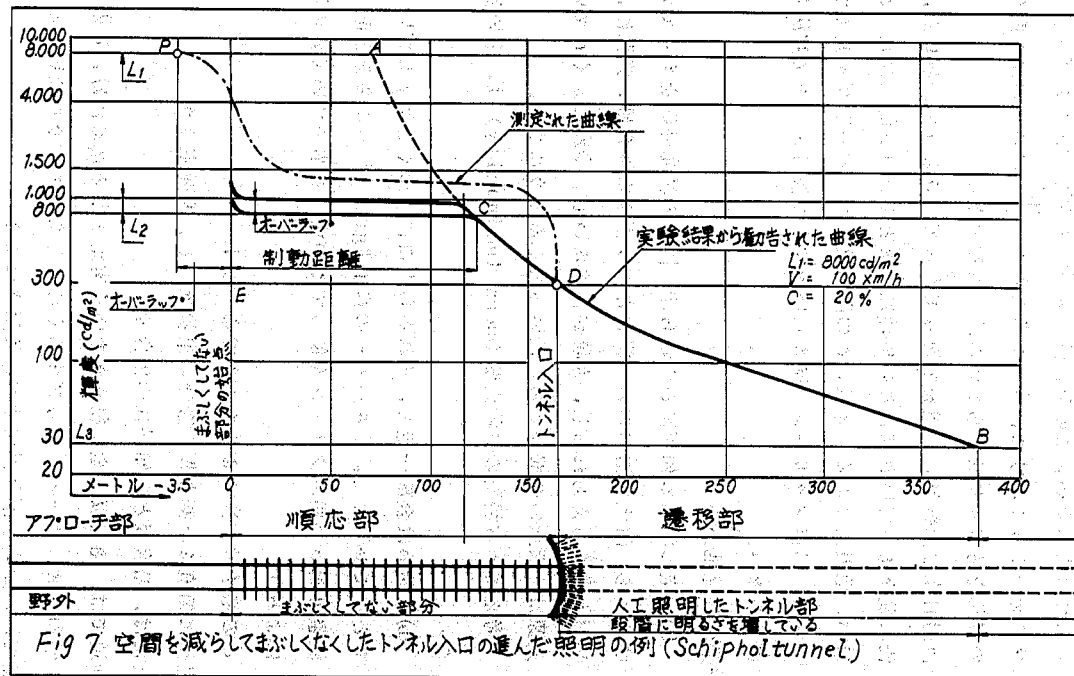
Fig 5 は, $\frac{L_1}{L_2}$ の関係がほとんど直線で, 結果として, 一定の減光率を有するオープンルーバーで所要の結果がえられることを示している。しかしながら, L_2 レベルの C 点で, 遷移部の曲線 AB, すなわち地下区間に行く CD 部分との接続を良くすることによって, こうした輝度の光源太陽光からうするためには, CD 部すなわち C 点までの約 50 m に漸減する減光率を有するルーバーをおくことが望ましい。

むしろ例外的ではあるが, 閉塞型のルーバーも設置されている。これは, コンクリートの天蓋を形成しており, 横断面形を車の進行方向につれて有効に変化させ, かなり大きなガラス板を併用して, 可変的な減光率がえられるようにしている。

次のトンネルは, 太陽光用のルーバーを有している:

Velsen, Coen, Schiphol (Fig 7), Benelux (オランダ), Orly (フランス), Dartford (イギリス), Rendsburg (ドイツ), St. Etienne (フランス)。Schiphol トンネルのルーバー部分は, 上述のデーターと一致している。Le Havre のトンネル (フランス) は, 閉塞型の天蓋ルーバーを有している。

道路トンネル技術委員会は, ルーバーに関して, 次のような推奨をする:



1 幾何学的な観点から：

一直射日光の光線は、けっしてルーバーの小割り板を通して、車道までたっしてはならない。この条件は、太陽図で太陽の動きをプロットしたグラフをつくっておけば、難なく満たされる。⁽¹⁾ トンネルの傾き度合や周辺の様相を考慮せねばならないのは、当然である。

一直射日光の光線は、車道を横切って入ってはならない。坑口が、その両側に壁をもっていれば、この条件は、ほとんど自動的に満たされる。坑口が、地表面にあるときは、この問題は、ルーバー区間を長くするか、または、鉛直スクリーン（壁なし植樹）を設けることで解決しなくてはならない。

2 光学的見地から、

(a) 空の状態の如何にかかわらず、同一の減光係数をもっていること。すなわち、晴天で雲のない、紺青という極端な場合は、光源は、その大半が太陽からえられるし、太陽が、雲ないし、濃霧でかくれている時は、光源は、天球の全部分から、はいってくるようにする。

考えている場所の平均光度 (mean luminosity) は、重要項目である。

(b) 始めは全部一定で、それから入口に近づくとき減少していく減光率をとっておくこと。（ルーバーの格子“grill”の寸法を修正するか、調整可能な上側スクリーンを使ってこの格子を閉めていくかのどちらかによる）

この格子は、次のようなものであろう：

- 完全に鉛直な小割り板（蜜蜂の巣状ないし、交差梁）か
- または、鉛直板と、傾斜板の組合せ

赤道では、鉛直板は全く役立たない；有効とするためには、この小割り板は、傾斜させ、オーバーラップするものにしなければならないだろう。

極点では、鉛直小割り板だけが、使用されよう。

こうした2つの両極端の中間地点では、無数の型式が可能である。全部の小割り板を鉛直にとりつける場合には、その高さは、緯度に従ってへる。

Only および St. Etienne (フランス) トンネルでは、ルーバー区間は、比較的短く、約 50 m であるが、減衰させる遷移部分を有していない；これらは、フレームに支持された高さ 40 cm の高い小割り板を有する 2 つの直交構造物という簡単なものからなっている。

— 南北の鉛直小割り板は、東西の弱い入射光線用で、約 50 cm 間隔である。

— 南側からの強い入射光に対しては、小割り板は 4.5° に傾斜させる。

それ故、ルーバーの小割り板が向いている方向は、トンネルの方向とは、無関係である。この小割り板は、一般に、金属（陽極酸化処理をしたアルミニウム、ステンレス鋼など）か、または、プラスチック材料（フランスの Porte de Charenton）からつくられており、約 1.0 m^2 が自立できるシートになっている。

上述のデーターは、主として、自動車道路トンネルに関するものである。交通速度がおそくなる建物地域では、ルーバー設置に対する条件は、明らかに有利になるといえよう。

3.3.2. 地下区間

3.3.2.1. 一般事項

地下区間では、150 時間使用後でチェックする日中最大の照明レベルは、トンネルのタイプによって次のようになる：

— 自動車道路トンネル：最小 $1.0 \sim 2.0 \text{ cd/m}^2$ は $100 \sim 200$ ルックスでえられる；

— 都市内トンネル： $5 \sim 10 \text{ cd/m}^2$ は、 $50 \sim 100$ ルックスでないし、長さによって、例外的には 150 ルックスでえられる。（最小長に対し最大値）

— 山岳トンネル： 5 cd/m^2 は $30 \sim 50$ ルックスでえられる。

ランプの劣化や、清掃から次の清掃までの間でのトンネル内部のよごれ、さらには冬季の温度低下を考慮する時は、これらの値が多少下っても許容される。

トンネル内の車道路面は、できるだけ明るい色にすべきで、路面のコーティングに加えると反射率をます材料ができています。

昔つくられたトンネルの天井は、建設当時は、裸電球から出る光線の連続

した2次反射と組合って、車道に有効な照明を与えるような良い反射率を有していた。しかし、ススが天井につくため、天井からの反射率を高く保っておくことは、大部分のトンネルで、困難であり、高価であることがすぐ明らかになっている。滑らかな表面（うわぐすりを塗った陶製タイル）が必要で、しばしば洗わねばならない。（週に2回）

最近建設されたトンネル（Velsen, Lyon, Marseille）では、光束を、灯具内部の反射板で、車道とトンネル壁に向けさせるゴミのはいらない密閉式灯具を設置する方が、はるかに簡単であることを証明している。この灯具のうち、きれいにする必要のあるごく一部分は、ガラスカバーの小表面だけである。良い反射率は、手による定期的な洗浄で容易にえられ、全体結果にかなり貢献し、適当な輝度があれば、自動車を輪郭だけで（シルエットで）、はっきりと見るができるようになる。しかし、車道表面にあたる光束に対して何の貢献もしない天井の維持に時間をかけることは、無役であり、金の浪費である。事実若干の照明専門家達は、黒い生地天井の方が、非常にキラキラする天井より、運転者の目に安らぎを与えると信じている。

灯具の維持に関する問題（5.2.1.2節で扱っている）から、夜間の多くて2～3時間以外はほとんど連続して重交通のある短いトンネルの内部に、進入用の横通路（lateral galleries, 2 m×1 m）を設けるような場合が出てきており、この横通路に、電力ケーブル、ランプおよび外側の壁に設置するアルミニウムの反射板を納めている。この反射板は、覆工壁の上端まで達するか、または、上側の半分だけを、覆っているツヤ消しガラスの表面に光束を反射させるもので、発光壁（luminous wall）として知られているものを形成している。（バリのAsmieres, Port de Pantin, Right Bank 高速道路）。天井や覆工壁、鏡から発する放散光は、適切に維持されておれば、快適な照明状態をつくるものである。しかしながら、こうした構造の費用は、横通路が、トンネルの幅に無視できない増加を加える場合には、普通の構造より、かなり高いものとなる。換気方式からも数本の横通路が必要な場合には、余分な出費をさけるために、いろいろな解決法が見出されることがある。（バリのRight Bank 高速道路では、照明装置用通路が、送気ダク

トの上にある。)しかしながら、電力費は一般に、かなり高くなる、というのは、非常に間接的な光の供給源になっているため、輝度は、必然的に弱くなっている。それ故、発光壁や横通路による照明方式は、一般的なものではなく、原則として市街地で生じる非常に特殊な場合にだけ考慮すべきものである。(後述の5.2.1.2節で見るように、もっと面倒でなくて、同じ結果がえられる別な方式が研究されている。)

3.3.2.2 照明装置

次の勧告をする：
連続的に、ないしは間隔をあけて配置した灯器(ランプ)の列による照明は、一般に、温度やほこりによって非常に影響され易いので、封入型の照明装置をとることが推奨される。

その装置は次の要求を満たすものでなくてはならない：

- この解決法をえらぶ時には、車道や歩道面だけでなく、覆工壁面でも、よく分散された光源になるように分布すること(最小の均斉度は0.8)。
- 効率的な光源
- 運転者の視野に影響するまぶしさの量を最小にすること
- 保証つきの適切な材料を使うことで、常にこうした状態を保っておくこと
- 一般にトンネル内で見られるような湿気状態で、耐食性を有していること
- 鏡が光源から独立しておれば、その鏡に防塵カバーをつけて、鏡の汚れをふせぐこと。

この装置は、トンネル断面の下記の位置にとりつけられる：

- 上側の主空間ゲージ(headroom gauge)から最少0.25mの位置(幅および高さ)
 - 2車線または4車線のトンネルでは、歩道(foot path)上か、または、各車線上に数列にしておくかのいずれかである。
 - 4車線以上を有するトンネルでは、施工や維持に特別な困難さがあって、実現できない場合以外は、数列にして各交通車線上におく方がよい。
- 長いトンネルでの維持作業は、ピーク時間以外の時に、上昇式の作業台があ

る車輛を使って、車道から直接行か、または、比較的短い円形トンネルでは、高い所にある歩廊から行いが、この方法には、装置の追加出費がはいる。

3.3.3 特殊な場合

長さ約100m程度の非常に短いトンネルでは、高レベルの照明を全長にわたって設備しても、不連続性の影響を、完全になくすことは困難なので、効果的な照明を設けることが非常に難しく且つ高価である。

大きな交通量のない山岳トンネルとか、非常に短い自動車道路トンネルの場合には、人工照明を設けなくても、少くとも、平坦で真直ぐな線形にすれば、トンネルの出口の明るさにより障害物をシルエットとして見ることはできよう。

一方、長いトンネルで、その路線条件に合致した半径を有する出口側の平面曲線は、一般に、下記のことに対して、非常に満足すべきものがある；

一トンネルの内部から、出口のより大きな輝度の見える距離をかくすことは、

それが運転者に、まぶしさということからの困惑をなくすものである。

一車の進行方向に向って凹んだ覆工壁に、漸次輝度がましてくるようになって

いる。

さらに、トンネル出口の右側に（ヨーロッパは右側通行につき）、斜めにさす夕日の光線についての特別な研究をすることが、推奨される。

事実、太陽が空の低い位置にある時、その光がトンネルの中に、かなりさし込むことがよくあり、これがおこる時には、運転者に与える影響は非常に重大で、突然おこると、それまで、内部の人工照明になれていて運転者は、そのまぶしさに順応するだけの時間的余裕がほとんどなく、明らかに、安全上危険となる。

この研究は、上述の太陽図を使い、オープン部に出てくる時に見えるトンネル外端の地勢様相を地表で測量することによって処理できよう。

かくして、もし、この恐ろしい太陽光線を、さえぎるような自然の地勢が都合よくあれば、坑口の位置を僅かにかえることですむかもしれないし、また、もしそれがなければ、ある距離から、樹木の列を植える防護をし、人工的なカーテンをつくることができよう。

IV 安全設備 (Safety Installation)

これは、次のことに関するものである：

- 交通 : 適当にそう呼ばれている (交通信号機)
- トンネル内の大気 : (ガス検知器, 見え方指示器)
- 通信 : 電話, 拡声機, 信号中継 (signal relays) 等
- 安全 : (消火器, 電源切断)

4.1 交通安全 (Traffic safety)

4.1.1 交通信号

トンネルが数百メートル以上に長い時およびとくに、市街地にあれば、一般に、安全で快適な交通状態を確保するためにある程度の用意をすることが必要である。オープンな大気中での環境と非常に異なるトンネル内に入って行こうとする時、運転者は、事実、常に若干の不安を感じる：それ故、運転者に信頼感を与えねばならないこと、および、オープンの所にいる時よりも、よけいに誘導の助けを与えねばならないことが重要である。

自動車道路では、緊急停車帯がないため、こうした準備は必要であろう：大きな交通量の都市トンネルの場合には、その容量をますために、省略される。

それ故、大半の道録トンネルに次のものがある：

(a) 運転者が常に、2組の信号灯を見うる 60 m (New York) から 150 m および 600 m (Mont Blanc トンネル) の間で変化する規則的な間隔での交通信号 (青, 黄, 赤)。長いトンネルのこうした信号の存在だけが、運転者が放り出されていないこと、および司令室につながっている信号システムが、交通状態の監視をしていることを示している。

2車線以上を有するトンネルでは 3.50 m 幅の各車線上に信号をおくことが、しばしば役に立ち、また、必要である。

交通信号は、トンネルの管理上、作業が行われ、1車線ないしそれ以上が交通止めされていることを示すのに非常に有益である。

(b) 次の事項に関する恒久的な、または、一時的な (手動ないし、自動操作

の) 照明式交通信号:

- 速度制限 (最高および場合によって最低):
- 場合によって, 車間の最小車頭距離 (headway):
 - New York では 23 m
 - Lyon では 30 m
 - Mont Blanc トンネルでは 100 m
- さらにまた, 隣接車線に横切って入ることの一時的な禁止
(車線変更の禁止) (高速交通用のトンネル)

New Yorkのトンネルの入口の横には, 所要交通の流れと方向に応じて操作される一時的な信号用に照明式のパネルが使われており, 必要がない時には完全に黒く消えている。同様なシステムが, オランダの若干のトンネルで使われている。

非常に交通量の多いトンネル(1日40,000台以上)では, 車線間のウィーピングを禁止する連続塗装線を用いることが推奨される。このウィーピングは, トンネル内では, けっしてオープン部分のように見え方が良くはないので, 事故の原因となるからである。

交通密度 (1マイル当りの車両台数)と維持すべき速度を自動的にコントロールする装置が, 交通流の監視の目的で, 使われることがある。

(New Yorkおよびオランダ)

交通信号灯に用いられているのと同じ色を操作員が, トンネル内の交通状態を容易につかめるので, 司令室に使用すべきである。(交通量の大きな都市トンネルとか, 非常に長い山岳トンネル)。

例外的な環境(方向の変更, 車線の閉鎖等)での交通処理の方法とやり方についての研究が推奨される。わきよせれることを指示する交通信号灯は, はっきりと見えるようにすべきで, あいまいであってはならない:

前方の信号が防護構と同じようにあかるく照明されておれば, より大きな安全度を保証するだろうし, これがある距離からはっきりと見えないと, 防護構に運転者が衝突することがよくある。

しかしながら, 通常的环境では, 入口でも, また, トンネルの内でも, あま

り多くの交通信号灯や、交通信号がありすぎないことが推奨される。とくに入口では、禁止標識や強制標識は、進入道路沿いに分散させれば、もっと効果的であろう。

一般的には、停止距離以内ではっきりと見えねばならない交通信号灯（とくに、そのおかれる高さ、色のコントラスト）と、種々の照明式交通信号は、道路標識にかんする Geneva の国際会議で定められたものに一致するタイプでなければならない。トンネル用の特別な記号（symbol）は、当然国際的な承認のために、正規の機関に提出しなくてはならない。

トンネルに、中央司令室があれば、中間におかれた信号コントロール所の設備は使用している信号のチェックパネルと同様にすることが推奨される。

4.1.2 交通監視用の恒久設備

故障のため、道路トンネル内に停止する車の数は非常に大きい。（50,000台/Km 当り 1～30 台）

20,000 台/日の交通密度を有する長さ 2 Km のトンネルでは、1 日平均 1 台の故障車が数えられる。経験によれば、自分の車が故障した運転者が、トンネル内に配置されている警報信号器や電話を使って、司令室にしらせてくることはまれである。（もちろん、このことは、こうした設備の必要性を減ずるものではない。）

大きな交通量のあるトンネルでピーク時に、1 台の故障は、1 交通車線に完全な混雑を発生させる。交通が少ない時には、故障した車は、照明系統の故障のため、側方灯がつかず、事故の原因になることがあるが、そうでなくても多少とも、見え方の上で障害物になる。

この両方の場合において、管理者は、必要な交通信号（前方のもの、または、その地点のもの）を出し、それからその車の修理に伺ったり、それをひき出したりできるように、できるだけ早く、情報をつかむことが重要である。

大きな交通量のある都市トンネルでは、限定回路のテレビが迅速な監視にとって有益であることが証明されている。150 m から 200 m の間隔でテレビをおくことによって、監視員は、トンネル内に余儀なく行くことなしに、交通がどのように進行しているかを、一目で見ることができる。司令室には、各カ

カメラ毎の受像器や、1台だけの受像器が設置され、手動ないし密度が最も高くなっている所と車速が最低になっている所を自動的にえらぶものがある。しかしながらテレビだけでは、停止した車の場合の直接の警報発令を保証するものではない。多勢の観察員を使うことは、困難であり高価である。さらに、カメラの連続使用は高価である。(1時間3フラン)交通が停止する時に警報を発する報知システム(alarm system)は、まだ実験段階である。使用されている検知器には、レーダー、光電セル、“ループ”のものがある。

山岳トンネルでは、連続した600mの長さ部分に分割して、レーダー遷移感知器(radar transition detector)をすえ、司令室の受信板に情報をつたえることで、交通の流れを追跡し、車が故障した時を見ることが可能である。(Mont Blanc トンネル)

4.2 空気の汚染検知器

4.2.1 有害ガスの検出

これまで一酸化炭素含有量のコントロールだけが、行なわれている。しかしながら、ある特別な場合、とくに、ディーゼルエンジンの車が、圧倒的な所では、 NO_2 とか硫黄化合物のような他のガスの検出で行うことが必要かもしれないということを、無視することはできない。(New YorkのLincolnトンネルでテストが行われた)

次のような適切な注意がはらわれておれば、一酸化炭素検出器を操作する方法については、何ら規制は加えられない。

- 製作者が、他のガスと湿気の良くない影響をなくし、容認できる値にまでへらすため、しばしば調整とテストをし(少なくとも数日間)さらに、測定がほとんどすぐできる位までに、計器の慣性(inertia)をへらしておくこと。
- 装置を設置する者は、次のことをなくさねばならない:
 - 純局部的な、ないし、一時的なよごれに注意すること。
 - 司令室へ伝達される汚染値についての情報に有害な影響。

検知器の間隔は、トンネルのタイプによって、100mから1000mまで

の間で、広汎にかわる。

4.2.2 不透明度検知器 (Opacity detectors)

与えられた光束 (luminous flux) のトンネル内の空気中での伝達における減少を測定し、それによって、透明度の推定ができるタイプの器具の市販品がある。

下記に示す所要事項にできるかぎり一致する装置しか使用すべきでないことを推奨する：

- 運転者の視線が、150 m から 200 m 前方をみていると推定される時と同一状態での大気中の透明度を測定すること：
- トンネル内では大量に存在しており、油のしみこんでいるほりによって影響されにくい部品（セルやランプ）を有し、いかなる時でも、その性質の変化が認められない特性をもっていること。（その性質を考慮する場合は別である。）
- 容易に再現できたり、または、望ましくは恒久的に、基本標準値との不透明度の関係が、自動的に測定されるシステムを有していること；ないし、より良くは、不透明度 0 に対する照査光線を有すること；
- 瞬間的な読み値は、一般に、運転者の真の見え方をあらわすものでないで数秒間（例えば 5 秒）に対する平均の読みであること。

不透明度検知器は、10.0 m ～ 50.0 m まで変化する間隔でおかれる。ディーゼル車の割合が、交通の 8 % から 15 % の時には、不透明度と CO 濃度の間には密接な関係があるという観点で、若干のトンネルでは、不透明度計の組織的な使用は、不可欠のことではないと考えられている。

4.2.3 火災感知器

若干のトンネルでは、非常に沢山使っている火災感知器が（New York のトンネル）、火災が発生した時に、通常の拡声器に自動報知する。

4.3 通報システム

これは、交通信号について指摘した状態において、一般に必要である。

それは、400～500m以上の長さのトンネルだけに関係するものである。

4.3.1 電話サービス

長いトンネル(500m以上)で、下記事項の処理には、ある間隔で設けられた壁の凹所(壁ガン)に電話をおかねばならない。(片側だけで約100～300m間隔、各歩廊上に交互に配置し、非常に明瞭にわかるようにする。)

1. — 事故の時の運転者
2. — トンネルの維持管理員

4.3.2 司令室への連絡電信線

- トンネル内の交通信号灯からのもの
- 汚染度検出器の読みのもの
- 瞬間ないし、5分間での、与えられた方向の別の交通量のもの

4.3.3 司令室からの連絡電信線

- 各トンネルに対する照明システム
 - 交通信号
 - 場合によって、換気機が種々の状態で運転されるシステム
- 大量の通信が、略号連絡システムで可能になることが指摘されている。

4.4 安全性

これは次のことに関連している。

4.4.1 緊急電源設備 (Emergency electrical power supplies)

照明回路は、瞬間的に作動する(1/2～1/4秒以下)普通の低電圧代替装置を有する数個の電源を有していなくてはならない。というのは、高電圧の供給が再開されるには、通常、数秒間を要するからである。

数個の互に連絡されていない電源(独立電源)がえられない時には、少なくとも、照明回路の1/2を確保できる最良の方法を、代替照明器(stand-by lighting unit)ないし、一群の蓄電池のいずれかを使って、考慮しなくてはならない。

4.1で規定した照明式交通信号用の電力回路と、4.3で規定した伝達回路は、数を2倍にし、横断面内でわけて設けることがむしろ好ましい。これらは、換

気および照明用の緊急電源とは独立させて、瞬間に作動する一組の緊急用蓄電池ないし、それと同等なシステムをそなえた自動直接作動の安全装置（ $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ 秒以下）を常に組込んでおくべきであろう。

換気に必要な電気回路を応援すべきであると考えるときには、一般に最大出力の $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ に等しい電力を、1分から2分間出せば十分である。

4.4.2 火災安全対策 (Fire safety precautions)

可搬式消化器を、一般人が使用するために100～500m間隔である壁の凹所においておかねばならない。消化器が動かされた位置が、自動的に司令室に伝達される指示装置も採用されている。消化器は、火を有効に処理できるガスだけを排出することが、完全に保証されているタイプのものでなくてはならない。

若干の、非常に交通量の大きいトンネル（とくにNew York）では、トンネル内に、自動押ボタン式の設備が、緊急操作計画に従って、設けられており、警官や、トンネル管理員が使うことにしている。

火災車を処理するために、消化装置を特別にそなえた車両が、迅速に到着（5分以内）できるに必要な配置をしなくてはならない。

このサービスは、次のことでなされねばならない：

- 恒久的なトンネル管理用の分遣隊によるか。
- または、近隣の消防署に特別配置をするかである。

V 運 営 (operation)

5.1 土木技術面

5.1.1 壁をきれいにすること。

交通の多い (bvsy) 都市トンネルのタイル張り壁面は、その照明に対する効果の有効性を確保するために、定期的に掃除をしなければならない。

5.1.1.1 使われている種々の方法

ガソリンやディーゼル油の不完全燃焼からくる煤煙の中のほこりや、すすは、脂ぎっており、物に強力に附着し、それは、かたくなって、ホースの散水では、簡単に取除くことが出来ないので、洗浄剤の使用は、本質的に絶対必要である。

長さ数百メートルのトンネルでは、掃除は機械的に行わねばならず、その使用システムは、トンネルの型式と壁表面のタイプに関係している。

使用する洗浄剤は、有効なものでなくてはならないが、トンネルの設備に腐蝕の危険を与えたり、清掃員がやけどする危険のない十分、中性のものでなくてはならない。

水にまぜた洗浄剤は、散布器 (spray bar) を使って掃除すべき壁表面に撒布される。この散布器は、一般に道路用水槽車の上に、壁の覆工の形と、天井にもタイルが張ってある場合には、アーチ形になった天井の形にあうように、のせられている。しかしこの方法による天井の掃除は容易でなく、トンネルによっては、これをあきらめている。

この第1段の作業を行った時、一般には、単なる撒布だけでは、満足な結果を得がたいので、機械的なブラシを使わなくてはならない。

この目的用に、特別に装備された車輛にのっている回転ブラシを使用している。(Antwerp, Lyon, Le Havre, Rotterdam)。この機械的なブラシがけをしてすら、満足でない場合がよくあり、人力で、電気研磨器を動かして、精力的にブラシがけして完成させねばならないことがある。

3番目の作業として、水槽車からの水を高圧で散布する作業があり、それから、ゴムぞうきんやスポンジを使って、乾かすことが非常にしばしばある。

洗浄後に見られる照明レベルの改善は、どのトンネルでも、利益をもたらすものである。

ゴム入りペイントで塗装した滑らかなコンクリート壁を有するトンネル（Velsen）では、ゴムぞうきん型式が使われている。

最近つくられたオランダのトンネルでは、完全自動掃除方法が使われている。このシステムは、スプレーのついたチューブからなっており、そのチューブはトンネルの全長にわたって、壁の上の方に取付られている。少量の洗浄剤（1%）を含んで水で毎日洗うと、壁はきれいなままになっている。洗浄作業は、100mの区間で行われ、2分から4分間使っている。（使用水の1m当りの量は、6ℓ/分である。）このシステムの利点は、交通流に、何等障害を与えないことである。

トンネルの壁と、天井をどの色にすべきかの問題は、明色か暗色かの決定の問題である。前者は、一層ひんぱんに維持する必要があるし、後者の維持は、より長い間隔でよい。前者は、照明を反射し、トンネル内部の見え方を改善するし、後者は、反射がないか又は、ごく僅かで、照明を吸収する。このため照明の程度を増加する必要がでてくる。

洗浄出来るペイントで塗装しただけのコンクリート壁を有するトンネルでは、持続効果を有し、ほこりがつかないなら、コンクリートが完全に無湿気（dry）な時ないし、それが出来ない場合には、コンクリート上に、防水コートを実施した上で、暗色を適用すべきことが本質である。

粗なコンクリート壁のトンネルは、きれいにすることが難しい。この粗な表面には、脂ぎったすすがたまり、ブラッシをかけてもきれいにならない。

5.1.1.2 頻度

洗浄の頻度は、主として、交通強度と局地条件に関係している。交通が多くなる程、頻ばんに、掃除が必要となる。

次の例が引用される：

Antwerp（35,000台/日）

— 毎月1回：壁、天井と同時に、排水溝及び下水溝を、横から機械で掃除する。

— 毎月1回 : 横から、機械的なブラッシで掃除する。

— 3ヶ月に1回 : 機械的なブラッシによる天井の完全清掃。

— 6ヶ月毎に、1週間かけて、ポンプ所の3つの貯水槽の清掃。

Rotterdam (75,000台/日)

— 二週間に3晩

Lyon (60,000台/日)

— 二週間に3晩

5.1.2 車道の清掃

5.1.2.1 洗 浄

トンネルの車道は、オープンの所の車道のように、雨で周期的に清掃されることはない。自動車エンジンの油だめおよびギアボックスからしみ出してくる脂状の堆積物と同時に、燃料の不完全消費から生じるすすを含んだディーゼルエンジンの排気からの残滓堆積物を除くために、車道は人工的に洗浄しなくてはならない。すなわち、この脂状物質はタイヤのグリップ(grip)力をへらして、有害なものだからである。

車道は普通、交通にあまり不便を与えないように、覆工壁と同時に洗浄する。洗浄頻度は交通量と同時に、車道路面のタイプに関係しており、当然、さめの細かい路面の方が、清掃が容易である。それ故、清掃上の観点からは、セメントコンクリートの路面と、最近の横すべり抵抗を有する密粒型アスファルトの路面の間には、殆んど選択差はない。

5.1.2.2 トンネル車道からのゴミの掃除

これは、主として輸送形態の性質に関係している。砂や砂利を運搬している時は、使用車輛は一般に、漏出防止をしていないので、毎日頻ばんに機械的な掃除を行わねばならない。事実、車輪で接線方向の牽引力ではねとばされた石は、それがトンネルの壁にはねかえされ、車の窓ガラスに危害を加えがちであるから、トンネル内では危険である。

5.1.3 こわれた車ないし立往生した車の故障

故障ないし事故のため、緊急用の停止車線がないので、交通車線上に停止した車は、最少限のおくれで、除去しなくてはならない。というのは、交通量の

多いトンネルでは、こうした車は、とくに入口の所でつよく感じる反感をうけて、交通の流れをひどく妨げるものだからである。そうした車は、危険にさらされており、どんな状況下でも、現場での修理が出来ても機械的に危険だから許されない。

大きな都市トンネルでは、交通に障害となる車の除去が、非常に重要なサービス業務である。よく訓練された管理員と運転者からなる要員と、発生する如何なる事態にも対処出来る完全装備が必要である。警官の援助も、しばしば必要である。

次の2つのケースがおこりうる：

第1のケースは、単なる故障ないし、無視出来る被害しかない小さな事故である。この除去は、緊急の場合に使われる入口に常駐している軽車輛によって行われる。牽引装置のついた軽車輛を、恒常的な故障サービス用にもっておき、交通流と一緒に、動かしておくことは、救助をまつために時間消費を相当へらし、非常に有益であることがしばしば証明されている。

第2のケースは、重大な事故ないし、重車輛の故障で、その除去には、15～20トンないしそれ以上の揚力を有するクレーンのついた特別に強力な車輛が必要である。

故障車サービス業務を組織化するには、若干の方法がある：トンネル管理者ないし、特定部局に属する職員によるもの：警察ないし消防署によるもの、又は、専門会社によるもの。

5.1.4 土木技術者による維持と管理

トンネル構造物の管理、とくに、クラックや過度の漏水、天井のアーチや覆工に目に見える変形が発生したり、材料に異常な変化が起る徴候が出たり、よく分らない理由で例外的な力（膨脹、過度な動き等）があったりした時の管理。

車道の維持：これは交通を、止めることが出来ないので、難しいことが多く、さらに、夜間に行わねばならない方がはるかに多く、又、急速にかたまる材料（cement fondu, 冷間混合物等）を使わなくてはならない。

塗装線及び道路記号の維持

排水溝の維持、水が石灰を含む時、とくに、溝の断面が小さい時には、規則

的な掃除がしばしば必要である。入口広場 (platform) の維持 : 車道及び導入装置 (reception device) :

もし、なだれ防護装置があれば、その検査、排水ドレーンが、立入り出来て、覆工や井戸 (well) の表面防水がある場合等の定期的修理、漏水の凍結から生じた被害が、井戸内及び天井の換気ダクトで発生するのをさけえなかった時の修善。

5.2 電気機械的な設備

5.2.1 照明装置の維持と更新

5.2.1.1 定期的な点検及び、小さな維持作業回数の頻度

古くなった電球は、それらが、照明の連続性を中断するいやらしさをおこす前に、とりかえねばならない。このためには、大きなトンネルでは、毎日か、もっとそれ以上に点検しなくてはならないことが推奨される。

電球は、同時に、全部使えなくなることはないので、各回路毎に、どれ位長く電球が使える状態にあったかの記録をとっておき、交換すべき日付を、各電球を使う時に普通保証されている点燈時間数から推定すべきである。

5.2.1.2 採用されるサービス業務の方法

これは、構造物のタイプと交通量でかなり変わる。ずい分昔につくられたトンネルでは、歩廊上に又は、覆工壁に、St. cloud (フランス) トンネルのように、3.80 ~ 4.00 m の高さか又は、New York の Holland トンネルの設計に基く多くのトンネルのように、天井と壁によつて形成された隅角部の何れかに、組織的にとりつけられた単一管照明燈が一般に使われていた。こうして配置すれば何時でも、交通を止めずに、それに近づくことが出来た。もっとも最近につくられた若干のかなり長いトンネルでは、この照明配置は修正されている。

事実、次の事をのべている :

チューブや電球、装置の交換を、歩廊に隣接した、横車線沿いに動くローリー (lorry) の上昇式作業台上に直接のせて運ぶ方が、トンネルの入口に、それらをつんでおいて、歩廊沿いに手で運ぶよりも、容易で、早く、且つ費

用がやすかった。

現場で、チューブを交換するために、チューブのケースをあけることは、作業員が十分に注意し、手袋をしていても内部にはこりを入れてしまうことが多く、従って、鏡の反射力をへらすことになる。(1cmの厚さで、ほこりの層が、反射装置をおおっていることが、洗浄の時にしばしば認められている。)それ故、工場で掃除され、再組立された、標準装置からなる可動式の気密保持部を有する装置で、全体を組織的にとりかえる方が好ましい。

この維持作業の機械化と取付け方法は、車線上に直接、装置を設置することを可能にした。というのは、この操作は、単一の垂直位置から行われるためである。この変化の効果は、照明の度合を僅かに、改善し、隣接する覆工壁の基礎を、よりはっきりと示すようになり、(安全の観点から優れている)車道上に設けて、連続的な誘導燈(イギリスの Dartford トンネル)ないし、非連続的な誘導灯(フランス〜イタリア、Mont Blanc)になるようにした。

安全上の理由で停止した車があることが望ましくない交通量の多い都市トンネルでは、現在、いろいろなやり方が試みられており、それは、このために横に凹所をつくらなくても、常に、照明装置に近づきうるものである：当然、そのタイプは、許される上方空間(headroom space)に関係している：足場通路(gangway)、移動橋、折りたたみ式の足場等。

5.2.2 種々の電気設備

5.2.2.1 低電圧設備

操作原理に精進している専門技術者による設備の機能度(serviceability)と、装置の全部品とした。たまにしか使わない部品の検査を最低1年に1回行うこと。

更にとくに：

電磁リレー器を含む設備に対しては、スパークをおこす電流があるので、行われた作動回数が1千万回から1億回(製造所と電流の強さによって)の間になった時に、これらの機器の組織的な交換。

静的なリレー器(static relays)を含む設備に対しては、製作者の要

求にかかわりなく：最少1年に1回の組織的な、スイッチギア（パルス発信器：セレクター等）の検査と、情報の伝達を行う計器をトンネルに正しく納めている附属装置の検査並びに、とくにそれらがうけている外的な条件の点検（湿度、ショック等）：検知器に対して：

- 交通の通過量検知器：その方法は、オープンの所で使われている検知器に対すると同様で、その精度については、しばしば、人力によるチェック（少くとも毎日）をしなくてはならない。又、とくに、路面に、埋込まれておれば、湿度の影響を、こうむりやすいので、チェックしなくてはならない。
- 一酸化炭素からの汚染検知器：そのスケールの、零点（zero setting）のチェックをしばしば行うこと。（設置したら2～3日毎か又は毎日）零点は窒素のびんで、任意点は実験室で用意した混合物を入れた標準びんでチェックする。又、若干の計器では、飽和点で完全にまちがった読みを発生することになる水蒸気の影響に対する感度のチェックをする。
- 不透明度の検知器：光束を発する（投光器）又は、それをうけとる部分の透過部の掃除、実験室で、キャリブレーションしたスクリーンでのキャリブレーション、霧やもやがなく、又、交通もない空気がきれいな時（例えば、夜間）に0のチェックをすること。

記録装置に対して：ペン（又は、それに代って使われる印字装置）の定期的な点検と、ロール紙のとりかえ。

電話に対して：蓄電池及び自動再充電装置の定期的な点検、種々の接触部分の検査、トンネル内に散在する緊急電話の作動の定期的点検。

5.2.2.2 強電圧設備

種々の非常警戒用装置、高圧及び低圧の標準型緊急装置、場合によっては、非常警戒用部品の定期点検（設備の複雑度によって1ヵ月から3ヵ月）及び、出来れば、装置が適切に動くのをたしかめるために一層きびしい非常事態の模擬テスト。

恒常的な使用において、コントロール用及び警報用装置を、法律で要求し

ていない国では、電線の絶縁度の定期点検（トンネル内の湿度によって、1カ月から6ヶ月）。

点検の回数は、しばしば故障があるような時には、ふやさねばならない：種々の接触ブレーキ（contact breaker）の接触性の定期点検（3ないし6ヶ月）：

変圧器誘電体の状態検査と、製造者の指示がなければ、5ないし10年毎に、この更新ないし再調整を行うこと。

地勢が花崗岩の所で、しかも、その上に薄い堆積層があるという状態の所では、気候の変化で接地抵抗をチェックする。（3ヶ月毎）

一般に、工場施設への送電とそこでの電力使用に関する全ての公式の法律法令ならび、人命の安全にかんする法令については、厳重に遵守しなくてはならない。この点で、こうしたことについて経験のある人達を指名して、責任をもたすべきことを指摘する。

5.2.3. 管理要員

5.2.3.1 技術要員

トンネルの多様性という観点で、勧告はごく一般的なことしか出来ない。

しかしながら、非常に複雑なことの多い設備を運転するのに要求される要員の不可欠な技術的資格については、どんなに力説しても、強調しすぎることはない程である。

現在のトンネルを運営している方法には2通りある。その第1の場合には、運営と維持の全作業を政府機関か又は、そのトンネルを施工した会社が行っている。第2の場合には、上述の政府機関は、トンネルの毎日の運営についてだけ責任をもち、その他の事項は、民間機関にゆだねている。

5.2.3.1.1 第1の方法の場合には、行政機関に、必要なプラントと要員がおかれている。これは、“直轄機関（direct authority）”として、単に警察権と場合によっては税関権についても責任をもつ政府機関が運営する（料金の徴収、交通の監視と規制）だけでなく、土木技術者と電気関係の係員をおいて、維持もしている。この人達は、トンネルの運営上の種々の設備に対する要求が、最小の出費で、最良かつ最新のサービスをする上で

肝要なものかどうかを十分に注意して、改善と近代化をしている。

しかしながら、比較的多数のいろいろな要員を必要とし、しかも若干の高度の専門業務は、確かに外部の専門家に移託しなくてはならない。(レーダーのコントロール、若干の検知器等)。

この方法は、アメリカのHollandトンネル、Lincolnトンネル及び、若干のヨーロッパのトンネル(例えば、Antwerp)の運営に使われている。

連続的なサービスを確保するには、その仕事を8時間交代制にわけることがあり、このことは、休憩と休暇の期間をとると、各業務毎に、5人が必要であることを意味している。この配置は、あらゆる不慮の事態に対して、素速く、確実に、完全なサービスをすることは、明らかに保証しているが、一方、運営費がかなり高い。

5.2.3.1.2 第2の方法を採用する時は、とくに、労力の点では、出来るかぎり広汎に、自動化を使い、トンネルの通常業務に必要な、最小限度の要員数にしぼることで、運営費の最大限の節減を目標にしている。

それ故、維持と修繕は、必要な装置をもっていて、しかも、現地で入手出来るようになっていられる専門会社のサービスに頼らねばならない。

この2つのシステムの何れを選ぶかは、そのトンネルと、交通の重要度、地理的位置及び、そのトンネルの運用に関するサービス事項の一般的感覚によって変るだろう。

PIARCで出版した“道路トンネル委員会の資料と研究”の中に、運営費に関する若干のトンネルの有益な情報が出ている。

5.2.3.2 監督及び料金徴収のための行政職員

この要員は重要度は、下記のことに関係している：

- トンネルの重要度。一般に小さな山岳トンネルでは、都市トンネル程のスタッフは要しない。
- 採用した運営方法(上述の方法1ないし2)
- 料金徴収には、多数の経験職員を要するので、有料制か否か。若干

のトンネルでは、1人の徴収員が、1時間に100～600台の車を処理している。重量や車輛数ないし車台の巾で、特別に区別された料金为数グループに限定されておれば、その場合だけ完全な自動化が可能である。

— 交通の監督のために、警察—国ないし地方自治体—が出してくれる援助の量。しかしながら、この警官を、トンネルの技術的な設備について知識を有し、かつ、緊急の場合にとる方法を知っているトンネル管理員で補強することが、殆んど常に必要である。

この管理員は、警官とは違う制服をきて、警官と共同して、公的な告発や法律違反に関する全ての事項を処理しなくてはならない。

若干の交通量の多いトンネル（New Yorkのトンネル）では、警官と管理員の班は、難しい事態（交通混雑、火災等）に対処するように、特別に訓練されている。

5.2.4 監視用附属物（Supervisory accessories）

監視は、次のように行われる：

— トンネル内に恒久的におかれた、交通の見えるガラス窓を有するキャビン（cabin）から、ピーク時に人を配置して行うか。

— 又は、このキャビンの他、あるいは、キャビンとは無関係に、通路（pathway）沿いに、非常に迅速に走れるオートバイまたは、特殊な機械に乗った巡回員（patrol-man）によって行われる。

5.2.5 費用（Costs）

5.2.5.1 建設費（Construction costs）

この報告の第1章でのべた非常に多くの工事方法、とくに、いろいろな地盤で遭遇する岩の掘削にかんする特別な困難のために、さらには、コンクリートで表面を仕上げねばならない覆工や天井があるかどうか、出水が重大なものかどうか、施工用の中間導坑の必要性及び、トンネル沿の間隔（interval）で、換気所を設置するかどうかによって、トンネルの費用は、大巾に変化する。

しかしながら、表面処理工、照明、人工換気を有する2車線のトンネルは、

1 km 当り、2～3,000 万フランのオーダーであることを指摘することで、関係者があまり有利すぎる推定をする指標にしてはならない。2 車線の水底トンネルに対しては、この数値は、5,000 万フランに達する。

あまり重要でない山岳トンネルで、設計がもっと簡単で、表面処理工を有しないもの（あるいは、部分的にしかしていないもの）は、もっと安く建設出来る。

5.2.5.2 運 営 費

人工換気を必要としないトンネルに対しては、含まれる工費は、土木工事費（表面防水工、車道等）だけであるが、それは一般に、評価することが難しい。しかし、それは、オープンノ所の車道の費用より、表面の防水対策を含めて、つねに車道維持についての厄介な作業にあうようにしなければならない数えきれない程の要求があるため、つねに非常に高くなっている。照明はたとえ限定照明であっても一不可欠なことが多い。

構造物が、一定の重要度を有している時には、照明の出費は重要項目になり、極端な照明強度範囲の割合は、交通レベルの割合範囲より自由度が少ない。入口の強化照明だけが、トンネル外部の明るさ、すなわち、気象条件に影響される。しかしながら、有効と思われるレベル以下に下げることが、推奨できない。というのは、良い照明は、疑いなく、道路安全上の、最も重要な因子だからである。なすべき最善のことは、この出費がどのくらいであるべきかを、できるだけ正しく推定することである。これは、種々のトンネルでまた、そのトンネルが都市トンネルであるか否かによって異なるが、トンネルの主部分に対しては、4500 時間から 6500 時間、入口部の強化照明に対しては、1500 時間から 2500 時間の期間の、最大消費電力量から、かなり正確な結果をうるので、理論的に、算定できる。この問題について、多くのトンネルでは、夜間の照明度が強すぎて、ある程度のまぶしさを起こしていることを述べねばならない。それゆえ、この点での節約は、安全を損うことはないであろう。

人工換気を有するトンネルに対しては、換気用の電力費があるが、これは普通、照明の費用より低い。トンネルのタイプによって、年間 200 時間か

ら1500時間の間で変化する最大電力消費量に対応する種々の範囲の電力費に基いて、第1近似値がえられる。(というのは、低い範囲での電力消費量は、急激におちるからである。)

運営と管理のための維持専門職員の経費もまた、小さな構造物に対しては低いが、大きな構造物に対しては、その安全を確保するための交通のコントロールと指導上、大きな額になる。この問題について、下記のトンネルの運営費が示されている。

年間費(1965年)	長さ(m)	
Artwerp (ベルギー)	1,769	2,565万ベルギーフラン
Rotterdam (オランダ)	1,073	1,455,400フローリン
Velsen (オランダ)	808	517,000フローリン
Lyon-Croix-Rousse (フランス)	1,780	1,400,000フラン
Saint-Cloud (フランス)	822	500,000フラン

PIARCが出版した道路トンネル技術委員会の“資料および研究”には、もっと詳細な情報が出ている。

附 I

いろいろな馬力の貨物自動車の速度に関する，坂路の長さおよび勾配の影響

$$P_s = \frac{\text{馬力}}{\text{重量 (ton)}}$$

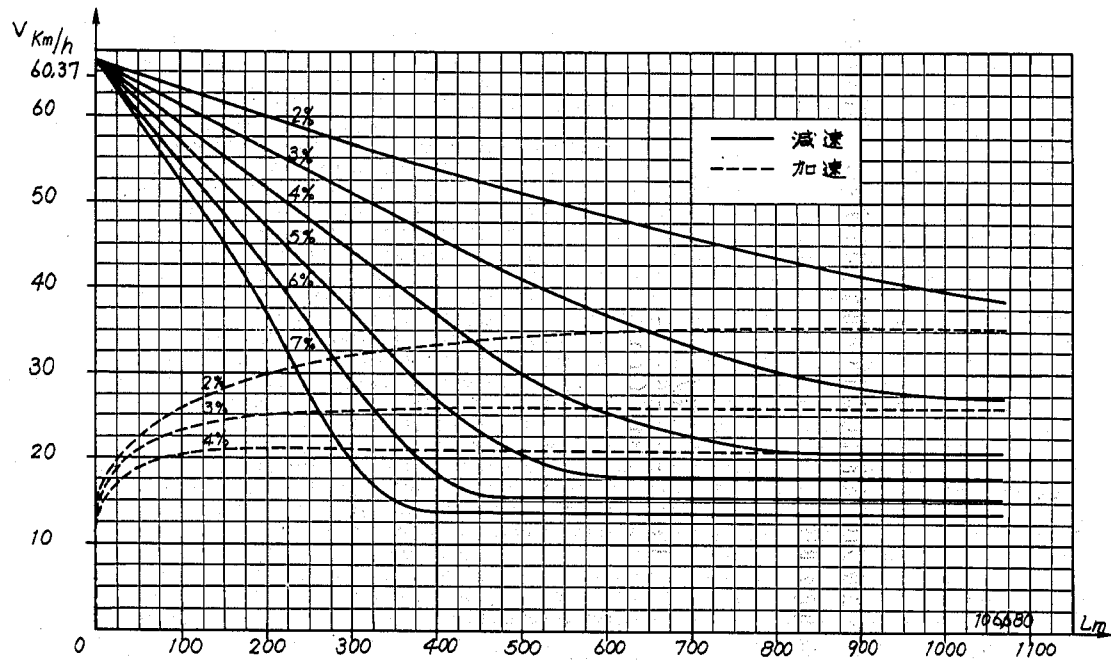
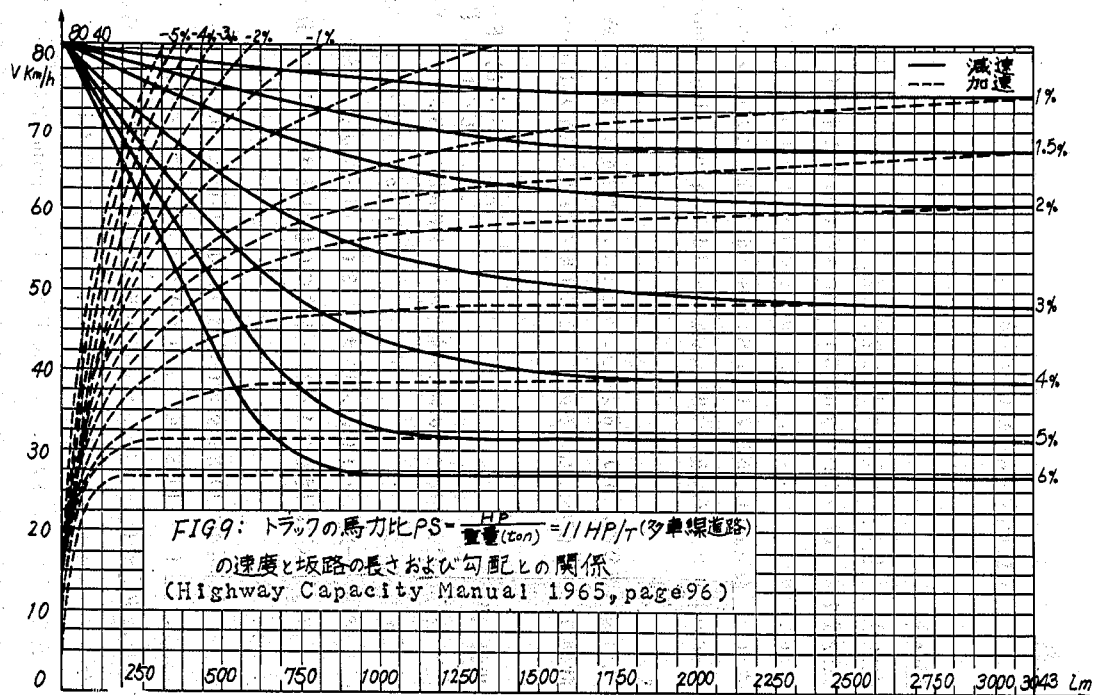


FIG 8. トラックの馬力比 $P_s = \frac{HP}{\text{重量 (ton)}} = 68 \text{ HP/ton}$ (2車線道路) のスピードと坂路の長さおよび勾配との関係

(Highway Capacity Manual 1965, page 96)



附 Ⅱ

換 気

所要新鮮空気供給量の計算

1. 年代誌概説

1.1 1920～1925年のアメリカのデーター

人工換気装置 (artificial ventilation system) が取付けられ、科学的に研究された最初のトンネルは、ニューヨークの Holland トンネルで、1927年に供用された。換気計画の権威者 Ole Singstad 氏は、これについての論説を、38年前の1924年に東京で開かれた World Engineering Congress に書いた。

この研究の基本部分は、30年間以上にわたって、全世界の多数の道路トンネルの換気計画の計算に使われているので、その主要な特徴点を簡単にのべることにする：

CO排出量／車：	水平区間	上り勾配	下り勾配
	ℓ/分	ℓ/分	ℓ/分
— 走行速度 1.6 Km/h の時の個人車	28.88	39.6	18.4
— 5 トントラック	71.75	85.85	42.5
— 交通：一列 1000 台／時但し、80% のトラックを含む			
— 故に、水平区間での 1 車当り平均 CO 排出量は、63 ℓ/分であった：			
— この装置からの新鮮空気供給量は、水平区間で、車道 1 ft 当り、 225 ft ³ 即ち、車線 1 m 当り 174 ℓ/秒であった。			

1929年に東京で Ole Singstad 氏が行った報告によれば、95% が個人車であったトンネル当りの時間交通量 2,371 台／時の時のテストでは、人工換気装置をその最大容量で運転すれば、CO 濃度は、160 ppm をこえることはなかった。この汚染度は、事実、テスト速度 4.82 Km/h の時の、1 車当りの CO 排出量—平均約 68 ℓ/分に相当するものである。

この当時既に、Ole Singstad 氏は、エンジンの排出する煙が、一酸化炭素

からの許容汚染度をまもなく制限する因子となりうることを指摘していた。

1.2 上述のように、約30年間、これらの基礎データは、世界中の数多くの道路トンネルの所要換気量の計算に使われてきた。アメリカのトンネルの大半は、次のような供給のできる換気装置を有している：

水平区間、車線当り 175ℓ/秒

上り勾配 229 "

下り勾配 96.5 "

この期間中、次のような多くの変化が起っている：

- 自動車の排出する排気ガス中のCO濃度の低下（1925年には、6～7%であったが、1940年には、2.5～3%になっている。）
- 自動車エンジンの気筒容量の増加
- ヨーロッパでのガソリントラック数の著しい減少とごく僅かなCO量しか出さないディーゼル車への交替。
- 透明な、澄んだ大気状態で、煙と不愉快な臭いのないトンネルを期待するモーターリスト達が要望する快適性の増加は、CO濃度を以前より大幅に低下させることになった：即ち、CO濃度は、今回では、大部分のトンネルで、60～100 ppm の間に維持されている。

当初の設備が要求量以上になっていたことと、上述の諸因子の逆方向への発展のおかげで、大部分のトンネルでは、当初の設備に修正を加える必要なしに、改善目的が達せられてきている。

1.3 最近の研究

1.3.1 1957年のMont Blanc トンネル計画の作定にあたって、かかる長さのトンネルにとっては、換気問題が非常に重大となるので、装置設計の適性化をはかる目的で、再び新しい研究が始められた。設備省（Ministry of Equipment）のLyon地区技術局（The Regional Technical Department）（むしろこの局の中心といえる）が、橋および道路技師のRamel氏の指導で、LyonのCroix-Rousse トンネルで実験を行い、徹底的なやり方で、トンネルから出る汚染空気中の合計CO量の測定と、交通解析に基いて、平均車両

の出すCO排出量を求めた。1957年5月21日に確証されたが、55Km/h (10~15%のディーゼル車混入)の時の、30ℓ/分という値は、極めて信頼性の高いものであることを示した。標高係数による割増しをしたこの値をMont Blanc トンネルの換気計画に使用した。

1.3.2 1958年には、スイスの専門家Brunner氏がガソリン車のCO排出に関する実証的研究を発表した。そこでの結論は、チューリッヒのETHのスイス人専門家委員会で検証された。(第10回 Institut für Strassenbau) 道路トンネル技術委員会の“図書および研究集”の中で、詳細に報告された方法は、次のようなkm・ton当りの排出量に対する計算に基いている：

- 自家用車に対しては、安全のための割増係数10%をとって17ℓ/t/Km
- ガソリン車、ディーゼル車を問わずトラックに対しては、12ℓ/t/Km
：但し、ディーゼル車の場合は、このCO排出量は、ディーゼルエンジンから出る煙を考慮した時の仮定値である。

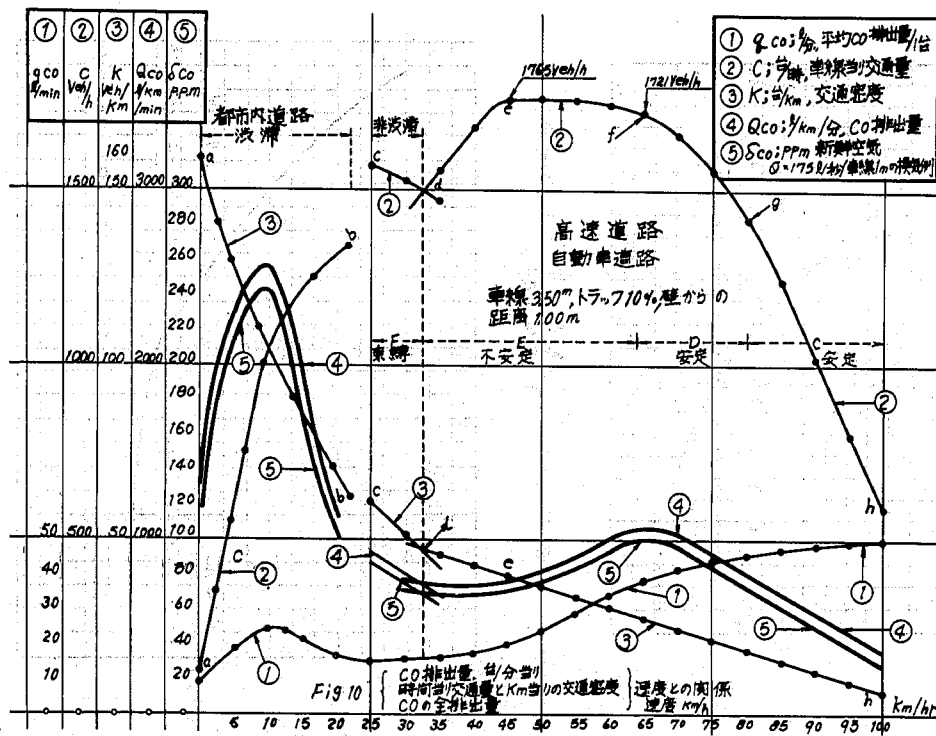
理論的に求めた種々の要素の影響は、いろいろな上りおよび下り勾配での速度の非連続的变化について、若干のケースを規定することで、割増率曲線の形で示されており、標高の影響も定められた。

この方法は非常に有効なことを証明しており、数年間にわたって、多くの構造物の計算に使われてきており、種々の要素(標高、勾配)を、たくみに計算にとり入れられるようになっている。トンネル内での通常の維持速度である

45~50Km/hの車速に対しては、ごく最近、フランスで採用された方法でえられる結果と非常によく一致しているのも、スイスでは引続いて使われている。

1.3.3 フランスでは、設備省(Ministry of Equipment)が、上述のLyon 地区技術局(Regional Technical Department of Lyon)に道路トンネルに関する研究、とくに、次のような実施すべき換気に関する研究を委嘱した：

- 1車あたりの排気に関する研究
- 既存のトンネルでの汚染並びに排気の全体量に関する研究



(Ref: LINCOLN TUNNEL)

(Ref: HIGHWAY CAPACITY MANUAL 1965)

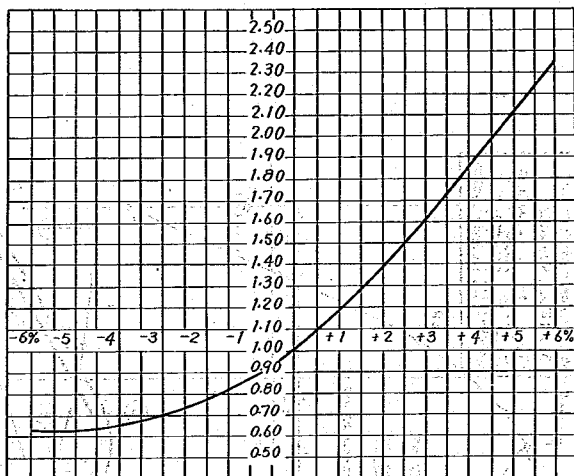


FIG. 11: 係数 $\left\{ \begin{array}{l} \text{上り勾配の割増} \\ \text{下り勾配の割引} \end{array} \right\}$ (乗用車)

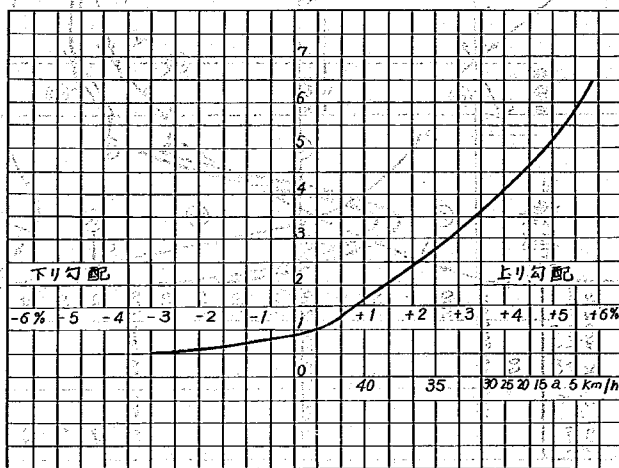


FIG. 12: 係数 $\left\{ \begin{array}{l} \text{上り勾配の割増} \\ \text{下り勾配の割引} \end{array} \right\}$ (トラフとバス)

事実、これは、改良され、より精度の高くなった器具を使つての1957年の実験の継続である。

この実験およびその第1回の詳細な結果はPIARCの出した道路トンネル技術委員会の“Documentation and Studies”の中に出ている。

得られた結果は、主として、建物密集地区 (built-up area) で、だんだん頻ぱんになり、しかも、車が非常にひしめき合っているのので、群を抜いて最も有害な状態 (harmful) である交通渋滞 (jam) に基因する断続交通流 (interrupted flow) の時のCO排出にかんする実験的研究を扱っている。

これはまた、速度の連続変化、上りおよび下り勾配に関する排気の研究も扱っている。さらに、標高の影響を実験的に研究することも始まっている。

測定は、36台の種々の型の車について、20,000 Km以上の合計距離で行われ、車の単位重量当りのCO排出量の割合には、現実的な数値 (realistic value) がないこと、即ち、車の型式によって、大きな差があることがわかり、さらに、小さな車が、それよりはるかに重い車よりも多くのCOを排出することが、しばしばあることを立証した。

この研究の完成は、まだ先のことである：しかしながら、現段階でも、次のような方法を採用することができるようになっていゝる：

1. 水平区間での種々の速度における、平均車両（ディーゼル重量車を含む）の1分間当りCO実排出量 q_{co} (リットル)。これは、Fig.10 (附図) の曲線①である。速度については、ゆるい上昇があることと同時に、障害に起因する0~15 Km/hの間での断続速度に対しては、非常に著しい増加があるのに気付くであろう。

この一車当りの単位排出量は、次の係数を使って割増せねばならない。(現在、継続的に行なわれている実験の結果が出るまでは、暫定的に、スイスの理論係数を使う)：

— 高 度 —

Hは、トンネルの平均標高 (m)

$$\text{係数 } f = 1 + 0.9 \frac{H - 400}{1600}$$

— 上りおよび下り勾配 —

附図の Fig. 11 および 12 に示す係数

継続して行われている実験研究から既にえられている結果によれば、スイスの係数は、この実験係数に比べて、非常に上位のものであり、したがって、これを使えば、一定の安全率を含むことになることを示している。

2. 車線の特有密度 (special density) (与えられた瞬間における車線 1 Km 上に、同時に存在している車の台数)

この密度は実験で求めた値で、同じ速度でも、考えている車線の性格によって変わるものである。

一例として、Fig. 10 は、速度に関する時間交通量 (曲線②) からくる実験によってえられた密度 (曲線③) を与えているもので、次のことを示している。

(a) Lincoln トンネルで、交通混雑が起った時 (曲線 a b) および、起っていない時 (曲線 c d)。

これは、Denos C. Cazis, Robert Herman, Richard W. Rothery の諸氏 (Michigan 州 Warren 市, General Motors Corporation 社の研究所員) によって行われた研究である。(Operations Research Vol. 9 第 4 July-August 1961 年)

我々の知るかぎりでは、この種の研究はまだ、ヨーロッパのトンネルでは行われていない。次の P.I.A.R.C. 大会のため研究が行われるだろう。

(b) U.S.A. (米国) の自動車道路では、1965 年版 H.C.M. (Highway Capacity manual) にデータが出ています。— (Fig. 10 の曲線 de h)。

この H.C.M. では、次のように認めている。

(b) 基本容量 (basic capacity) は、理想状態では、1 車線当り 2000 台/時であるが、実際の状態では、平面線形、縦断線形、車線幅、横方向の障害物、トラック類の混入率と特定馬力によってへり、これらの諸点についてはすべて、特定のためのデータが 1965 年版 H.C.M. に出ている。

(b) 時間交通量と車線容量についての V/C の関係での交通の流動性と安定性の特徴づけるサービス水準 (A から F まで)。

かくして、Fig.10は、1965年版HCMによって安定状態(stable)として示されている。CおよびD水準に対する(さらに、法的制限速度“official speed limit”70マイル/時すなわち112 Km/hの自動車道路において)VおよびKを示しており、この場合の交通には、常に10%のトラック類が含まれており、横方向の障害余裕は1.00 mである。

こうした曲線は、トラック類の値が変れば(より高い交通水準での恒久的なまたは一時的な値)1965年版HCMのデーターを使って修正すべきであろう。

サービス水準Eは、交通量が容量に等しい部分であり、不安定状態で短時間しか続かず、ついで急激な(交通量の)低下がおこる。

束縛された交通流(forced flow)に対応する交通量のサービス水準Fは、Lincoln トンネルでえられた値と32 Km/hの所で接続する。

3. 与えられた速度と密度の時の、車線1 Km当りの合計CO排出量 Q_{co} これは q_{co} とKの積に等しい。Fig.10(曲線4)は、既に考慮された交通の種々の例に対するこの排出量(ℓ /分/Km)の計算例である。

Fig.10は次のことを示している。

— 高速度の時の自動車道路のトンネルに対しては(重車両は10%以下で、歩行用通路(footpath)は1.00 m幅と仮定する):

— 交通車線1 Km当りの最大 Q_{co} は、

$$Q_{co} = 1.050 \ell / \text{分/Km}$$

で、不安定限界になる時の安定交通レベルの際に発生する。

$$(V = 65 \text{ Km/h})$$

水準Eでの不安定交通は、交通量は高いけれども、 q_{co} の排出は、はげしくないので、換気に関しては考慮しなくてよいことに注意すべきである。

交通に重車両が含まれていない時は、最大 q_{co} はむしろもっと重要となり、低い方の速度ではきめられないだろう。

— 都市線路(urban routes)のトンネルに対しては:

車線1 Km当りの最大 $Q_{co} = 2550 \ell / \text{分/Km}$ は、約10 Km/hの速

度で走っている混雑交通の際に発生する。これは、大半の都市トンネルで予期すべきものであると思われ、取付車線 (access lanes) からの排出もあるので、許容CO濃度をきめるためには、この確率がどの位のものであるかをたしかめねばならないし、許容CO濃度は通常、非常に例外的な場合には、より高くなりうるものである。

4. 換気を

$Q_{Ar} = 175 \text{ l/秒/車線} 1 \text{ m}$ として、発生汚染度 (resultant pollution) δ_{co} の例も、Fig10 (曲線5) に出ている。

— 自動車道路に対しては、最大汚染度は次のようになる：

65 Km/h, 交通量1720台/時, トラック10%, 車線幅3.5 m, 壁からの距離1 m という状態では、一約100 ppm

— 都市内の自動車道路トンネルでは、最大汚染度は10 Km/hの時に発生し、245 ppmに達する。これらの値は、混雑したトンネル内で、実際に到達した値である。

1.3.4 日本で確立された不透明度に関して、道路トンネルの所要換気を算定する方法が、道路トンネルの技術委員会に通知された。

かかる複雑な命題を適切にしらべるための時間的余裕がなかったので、委員会は、これを研究することが、できなかった。事実、いろいろな国で、どうすれば適用できるかを決めるために、重車両の特性、道路利用者が現在期待している快適性、およびディーゼルエンジンからの煙と同時に見え方に影響する湿度測定の変化に関するテストを行うことが必要であると思われる。この仕事は次の大会で多分行われることになる。