

道路トンネルの走行快適性と安全性



東京都市大学（武蔵工業大学）
工学部土木工学科
昭和42卒 太田 義和

略歴

1967年 武蔵工業大学工学部土木工学科卒業
同年（株）千代田コンサルタント入社。

主として海外業務全般および、道路トンネル安全計画を担当

2001年 太田技術事務所（OTA Engineering）を設立。以来業務の大半を海外（欧州および東南アジア）の道路トンネル計画に従事。

現在

- ・日本トンネル技術協会 ITA（国際トンネル地下空間協会）対応幹事会顧問
- ・オーストリアグラーツ工科大学機械工学科国際科学委員（2001年～）
- ・ノルウェートンネル協会（NFF）国際科学技術委員（2017年度迄）
- ・UAE（アラブ首長国連邦）地下空間協会国際科学技術委員（2018年度迄）

初めに

道路トンネルは多くの方々が日常的に通過し、その視環境的機能、安全性についてほとんど話題にされることがありません。しかしながら（道路：以下省略）トンネル坑口は交通容量限界値に近づくと渋滞発生の主たる要因であるブレーキングによる速度低下、さらには坑口直後の追突事故を誘引するかなり特殊な道路構造であるといえます。坑口へのアプローチ区間および坑口面での設計は海外では非常に重要な要素となっており、坑口の修景計画をトンネル建設より早い段階から着手する事例も見られます。本稿ではトンネル坑口部において主として安全性・快適性に着目した設計手法の実際を国際的視点も含めて皆様にご理解いただけるようその概要を記述したいと思います。

坑口のデザインにあたっては下記に示す3要素が主たるものと考えられますが

- ①照明効果と視環境
- ② 景観
- ③ 坑口地形、地質等の構造条件

道路利用者の視点に立つ安全性、快適性の重要項目は①照明効果と視環境、②景観であって、坑口地形、地質および換気効果等の構造条件は道路利用者とは視点とは別の純技術的要素で決定されます。

1 具体的なトンネル坑口デザイン事例

1-1 日本の一般事例

我が国のトンネル坑口の構造事例は図1に示すような坑口正面に面壁が設置された重力式、或いはウイング式手前に露出した突出式のような形式が数多く見られます（図1）。これらの形式は正面の反射率の高いコンクリート面壁に加えて背後の地山崩落防止対策の吹付けコンクリートによってフロントガラス正面の野外輝度は増加するため、入口から続く内部の視認性は大幅に低下し重大事故の原因になります。面壁背後の樹木は数年後に成長すると野外輝度低下に効果を発揮しますが開通当初には間に合いませんので、坑口表面を供用時から低反射率化の施工が必要となるのです。



図1 重力式坑口の例：船場トンネル：中国自動車道¹⁾



図2 -1 坑口の例：宇利トンネル：東名高速道路

図 2-1, 2-2 に示すように構造体が地山からあるいは突出式の場合であっても夏期には坑口周辺の草木により全景の野外輝度は低下していますが（図 2-1）、晴天時で冬季の積雪による高反射、高野外輝度に変化し前方トンネル空間は視覚的に非常に暗くブラックホールに突っ込むような心理的インパクトが同時に事故原因の一つになります。（図 2-2）。視環境的雪氷対策としては手前に側壁に開口構造を設け太陽の間接光を導入するスノーシェルターの導入、あるいは入口照明の増強などの対策が通例とられます。いずれの場合にもトンネルに接近しつつあるドライバーからみた場合に、視覚正面に反射率の高い白色系表面の存在は強い照り返しを受けるため、視環境、安全運転から望ましい環境ではなく、十分な配慮が必要です。



図 2-2 坑口の例（積雪期）：関越自動車道 越後川口トンネル¹⁾

1-2 理論的考察

運転者はトンネル手前一定距離からトンネル坑口を視認すると視覚的に瞳孔が拡張をはじめ暗い環境での視認性を自ら高めるような無意識的行動を起こします（暗順応）。トンネルにおける視環境からの安全設計では所定の制動停止距離手前から前方の坑口地点の路面上に位置する約 25～30 cm 立方体障害物への視認が可能であらねばなりません。国際的には設計速度 80Km/h の場合、トンネルの手前約 100m～110mとしています²⁾。さらに数秒後、運転者が坑口に近づくと図 3 に示す通り、フロントガラス上縁と車道空間上縁が被る位置を瞬間的に通過いたします。この位置を仮想侵入点といい、運転者の視覚機能はすでに暗順応への対応に入っておりトンネル内を注視しています（図 4）。

一般的に運転者の水平視野を基準としてフロントガラス上縁までの仰角約 20～25°³⁾との交点位置において太陽の直射光は遮断され、拡散光だけが車体と坑

口間へと入射し、運転者の視野のほとんどが、トンネル空間を注視する状況に移行します。この仮想侵入点は一般的にトンネル手前10mとされていますがベルマウス構造や坑口面の低反射構造によって仮想侵入点をさらに手前に延長することが可能となり、暗順応への適応、人工照明設備の削減等のメリットが生じます。したがって、坑口部の拡大構造（ベルマウス構造は）視覚的に大きな利点があると同時に空気力学的にも入口抵抗が減少し交通換気力による流入空気量の増大を図ることができます。

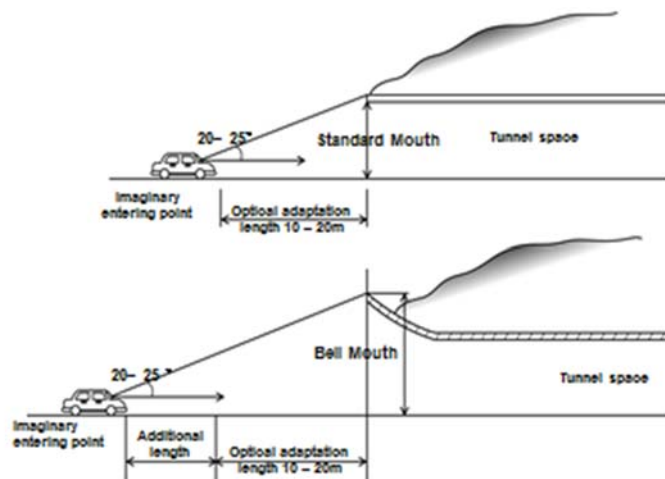


図3 トンネル坑口部における視覚と構造⁴⁾



図4 仮想侵入点での運転席からの視野⁴⁾

日本、欧米諸国共にトンネル部の総幅員、特に路肩部は建設コストの観点から明り区間に比べて縮小されており、運転者にとっては側壁面が車体に接近する心理的な抵抗があります。この構造的な心理抵抗と円滑な視認性を確保しようとするための暗順応が生理的な視覚変化が生じます。これ等の緩和対策は基本的に

- ① トンネル坑口に接近する過程での野外輝度を下げる対策を行うことによって以降接続するトンネル空間での視認性の向上につなげる。
- ② 坑口付近の入口照明を増強する。

入口照明機能向上のための対策は上記①、②の両者ともに欧米先進国と比較するとかなり異なっており、「日本のトンネル入口が非常に暗い、灯具からのチラツキが気になる」との指摘は多くの海外技術者からあるところです。

例えば、中央自動車道小仏トンネル付近の渋滞発生要因は本線縦断勾配の影響と相俟って入り口照明の不十分さと照明器具が側方建築限界線の外側の側壁上部に位置するため、照明光が（右ハンドルの場合）左フェンダー部分と側壁との隙間に届かず陰影が生じるため運転者は心理的に僅かにハンドルを右に切り左側のクリアランスを確保すると同時の軽いブレーキング（赤色尾灯の点灯）が後続車に影響し渋滞の波状伝搬への主たる要因であるものと考えられます。このような視覚的要素が坑口の事故の要因なる可能性は確実にあり得ます。

境界部輝度の設定値については1970年代後半当時欧州の照明の照明研究者と日本の照明研究者との間で設定値に関する議論が国際的に活発に行われた時期であります。その研究内容の詳細は省略いたしますがその結果には大きな違いがあり⁵⁾日本の指針値は欧州の照明強度の50～60%値で視認可能との成果が公表されました。現在もこの状況に大きな変化はありません。この設定値の相違に関する理由は十分に説明され尽くしているとは言えませんが、東洋人と欧米人の虹彩（瞳）の違いによる視覚能力の他、照明設備費、電力費、政策的配慮等社会的背景も含めた総合判断によるものとされています。

1-3 関越トンネル

図5は日本の著名な工業デザイナー柳宗理氏（文化功労者：2011年没、享年96歳）が1982-83年にかけて自ら石膏ブロックから制作された関越トンネル水上側坑口の原型模型です。この原型模型は私が千代田コンサルタント時代に関越トンネル水上側坑口、およびトンネル内装工詳細設計の主任技術者として、柳宗理氏のアトリエに最初の打ち合わせに伺った時、ご本人が石膏粉で白くなった手で模型表面を撫でながら提示して下さった「手造りモデル」の周辺に職員が植栽などの装飾を加えたものです。まさしく氏の掌から生み出された形

状でした。このモデルを目にした時の私の印象は下記の通りです。

- 提示された模型本体と関連付けた実物換算の具体的スケール、構造イメージ等は全く提示されず、ご本人の感性に基づくプロポーションでありました。
- トンネル坑口のランドマーク的美観、照明効果、走行環境、積雪対策等については過去に例を見ないほど秀逸であると直感しました。
- 非常にマッシブなうえ外面、内面、妻面、トンネル軸方向全てに異なる曲面で構成されておりコンクリート型枠による現場施工はほとんど不可能であります。
- 明かり部はトンネル掘削残土による盛土構造で施工済みで、地耐力には限界があり坑門工は極力軽量化が必要。

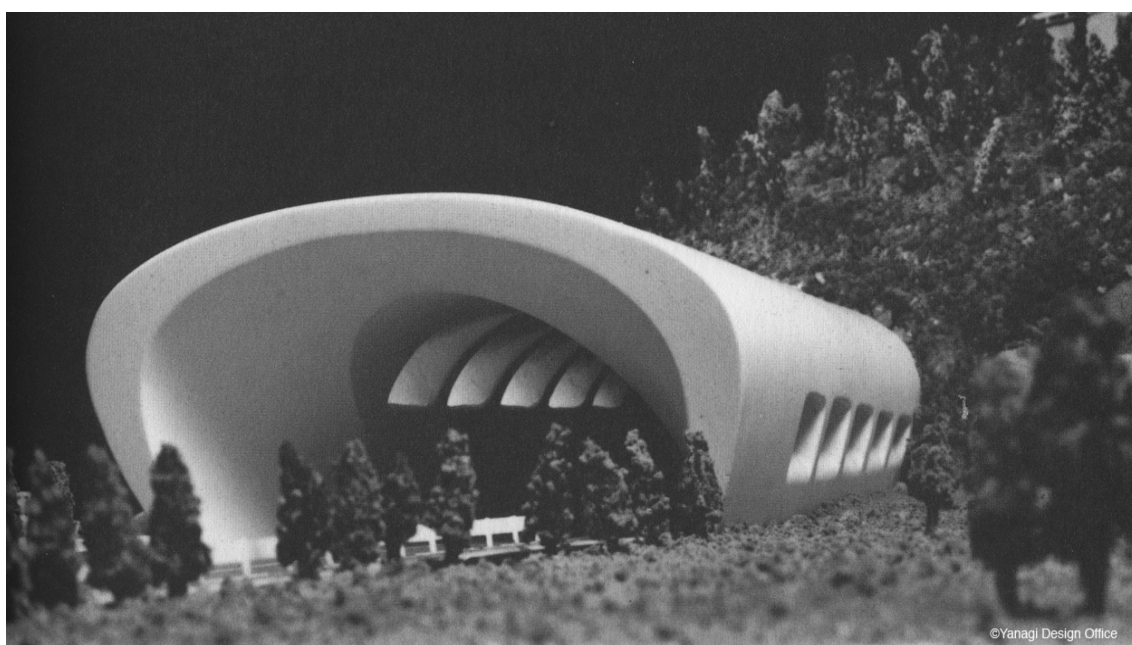


図5 柳宗理氏による関越トンネルのプロトモデル⁶⁾

このプロトモデルに関して構造寸法の表示は一切なく、模型各部寸法の詳細な計測から始めました。次に道路構造令に基づく自動車専用道路としての幾何構造的な内空断面を決定し、この諸元を基準としてモデル上の各位置でのプロポーションを忠実に拡大再現させていきました。その結果、明かり部における突出延長は38.450mと決定されました。構造体の設計、施工事例に関しても過去に施工に前例が見つからず数か月間模型を前にして考え続け、種々検討の結果、「鋼製張りぼて構造に左官職人の手仕上げ加工」との結論に至りました。基本構造は各断面での異なるアーチ形状の大梁とそれらを繋ぐ縦桁。内面の形状を維持するためのターンバックル付き吊材で主要部材を構成し外面および内面全

面を金網で被覆整形し曲面の基本構造を再現しました。坑門工は冬季の積雪荷重および低温、夏季の高温での曝露環境に位置し、長期の耐久性を確保するためには塩害対策も重要となります。したがってひび割れの少ない高品質、かつ高水準の凍結融解抵抗性の確保を目標といたしました。

凍結融解試験を中心としたコンクリートの性能評価試験を武蔵工業大学コンクリート研究室小玉教授に依頼いたしました。供試体製作のための繊維補強材（苧：スサ）として、マニラ麻、鋼繊維、炭素繊維、藁、等を候補とし、配合設計及び供試体の作成は当時我が国で最高度の左官職人に小玉研究室に道具一式およびセメント、細骨材（川砂利）、スサ等、すべての材料を持参いただき、研究室での供試体の製作をお願いいたしました。特にセメント量、水セメント比、骨材産地と粒形分布に基づく調合と供試体の製作は全て職人さんの経験と手加減で行われました。小玉研究室での実験の結果、セメントモルタルの繊維補強材への付着性能、強度、ワーカビリティ等においてマニラ麻が最も優れた性能を発揮しました。この実験結果を詳細に記録し、材料仕様、配合等すべての必要事項をそのまま特記仕様書に記載しました。

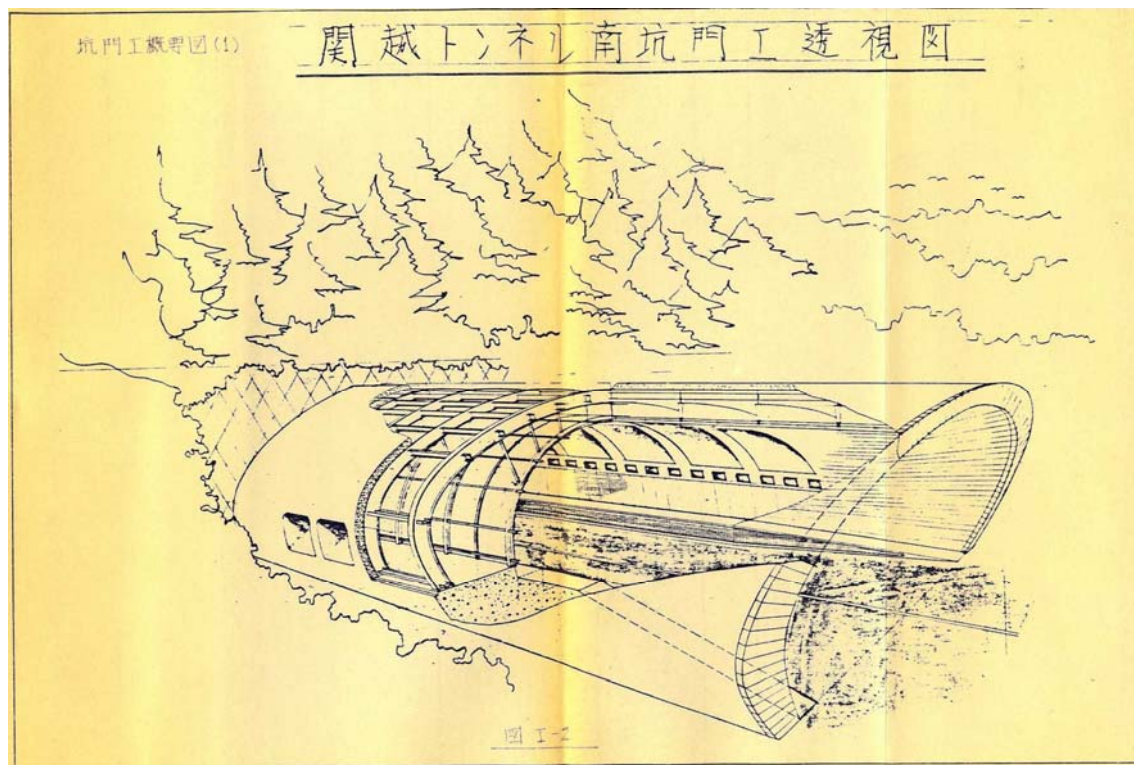


図7 関越トンネル坑口構造概要⁷⁾

現地での最終仕上げはマニラ麻（表面に微細な毛羽立ちのある使用済みマニラロープを径1mm程度の繊維に分解し3cm程度に裁断したもの）による繊維補強コンクリートとし、内面、外面ともに35mm厚での施工が可能となり、最

終仕上がり状態は見事なものでした。実験室の配合設計基準で現地施工が可能となった理由として、数量的にも小規模であったため高品質材料を揃えることが可能であったことも大きな理由です。

私は施工完了後の状態変化の確認のため、数年間坑口に通いましたがその性能は驚異的でした。図6は坑門工完成後の全景です。右側に見える小断面はサービストンネルの坑口で、妻面のラピスブルーは柳宗理氏のシンボルカラーです。東名高速道路足柄斜張橋主塔、東京料金所防音壁妻面も同様に同氏の作品でありラピスブルーが彩色されています。



図6 関越トンネル水上側下り線坑口全景¹⁾

この坑門工はベルマウス構造に加えて両側面10か所の開口部から車道への間接入射による緩和照明など、論理的視環境対応、景観的なランドマークとしての観点からも秀逸です。構造の複雑さ、建設手間と職人の確保、コストなどは国内の標準的坑口とは比較にならないほど高コストになってしまいました。設計中の苦労は計り知れないものがありましたし現在は構造体の部分的損傷も感じますが関越トンネルを通過する毎に工業デザイナーとしての柳宗理氏の力量を改めて感じています。その後我が国にも数多くの著名なトンネルが建設されましたが技術的側面からもこれほどの坑口構造は現在まで出現しておりません。

2 海外事例

欧米諸国において道路トンネルの建設事例が多いのは、人口1千万人以下の国々ではノルウェー、スイス、オーストリア、等の山岳国であり、次いでイタリアでしょうか。一方、ドイツ、フランス、ベルギー、オランダ、等はその地

形条件からトンネルの建設数は1000本に満たないものの、トンネルに関する安全計画と建設、維持管理費等の議論は非常に活発です。

特にEU道路網に組み込まれている国際高規格都市間高速道路の継続的性能と安全性の向上及び維持管理に関する緻密な議論は継続してなされています。私が過去40年以上にわたって、欧州とのチャンネルを持ち続けているのにはここに理由があります。一方で米国は19世紀に鋼殻による沈埋工法トンネルが開発された歴史ある国ではありますが米国東、西海岸および山間部に多くの建設例が見られますが、現在の議論の場は欧州が中心でそこに米国、カナダが参加してくる事例が目立ちます。ここではその一端をご紹介します。

2-1 オランダのトンネル坑口への数々の視環境対策

オランダの国土面積は約3.7万平方キロで日本の10分の1、九州とほぼ同じ面積です。そのほとんどが平地のためNATM工法によるトンネルは非常に稀ですが沈埋工法による矩形断面トンネルで、他にはTBM(シールド工法)によるオランダ最長の6.6kmの道路トンネルがベルギーとの国境の西スカルデ河口に位置しています。オランダアウトバーンは(私のような外国人にとっても)非常に快適性が高く高速ドライブが可能で欧州の道路技術者からも最高度の評価を得ています。

通常走行時における一般車のトンネル内への進入速度は120km/H~130km/Hで、この進入速度は世界最速であると思われます。オランダアウトバーンのトンネルでは明かり区間とほぼ同様の速度でトンネル内へ円滑に移行することができます。この秘密を探るべくオランダ運輸事業省(RWS)の許可を得て、日本の機材、計測方法を用いて、RWSの指定したアムステルダム環状線の一部ジーバークートンネル(図8)で現地調査を実施しました⁸⁾。



図8 ジーバークートンネル 坑口部⁹⁾

このトンネルは坑口部を含むトンネル周辺部、および内部への接近および計測機材の配置が容易であったことが理由です。調査はトンネル手前のアプローチ区間および坑口部における野外輝度削減対策、入口照明輝度と照明器具による配光、内部空間の視線誘導効果およびドライバーのブレーキング挙動等、測定結果によって、日本では見られない空間演出がなされていることが判明いたしました。即ち、トンネル方位軸と太陽位置との関係からアプローチ区間の擁壁天端高を先端から内部に向かってテーパーに設定しかつ両側壁を境界部でフロントガラス上縁からの太陽光入射を遮断する面壁でつなげています（図8中央）。いわゆるサンバイザーの機能を擁壁先端部に持たせています（図3参照）。この対策によってアプローチ区間において夏至の状態でも太陽光の路面への入射が遮断されると同時に仮想侵入点をトンネル坑口手前に移動させることに成功しています。



図9 スキポールトンネル南坑口⁹⁾

図9はアムステルダム国際空港（スキポール空港）滑走路下を通過するスキポールトンネル南坑口のアプローチ区間です。この路線の車両走行速度は120km/h～130km/hでアムステルダム市域、空港、ロッテルダム、ハーグを繋ぐ重要路線です。南坑口側は航空域の高さ制限から境界部の輝度低減のため（太陽光直射型）ルーバーによって輝度調整を行っています。図9の静止画像では路面に縞模様が見えますが走行速度約60km/h以上の走行速度で縞模様の周波数が50hzを超えた時点で視覚上のチラツキは消え、緩和部相当の輝度に変化し暗順応に対応します。

図10は運河の下部を通過するトンネルですが手前のアプローチ区間では擁壁

および正面壁を黒色で演出し、曇天時、夜間の自車ヘッドライトの反射による眩光の緩和、野外輝度の低下、重ねて運河の堤体への大規模な植樹による地盤の安定と樹木によるフロントガラスに占める空の面積の低減（野外輝度の低下）を図っています。この樹木はトンネル工事の数年前から植樹されました。



図 10 ヴラーケトンネル南坑口⁹⁾

2-2 ドイツ

ドイツはオランダに比べて国土面積がはるかに大きく人口も多いため一般国道トンネルの建設も数量的には多いですがその多くは中南部のドイツアルプス地方に集中しています。ドイツ北部ハンブルグ港を通過するエルベトンネル以外には、南部国境を越えたスイスバーゼルまでの西部ドイツを縦断する西部幹線道路及び途中から分岐してシュットガルト、ミュンヘン等の大都市に至る南部幹線自動車国道には注目すべき高規格トンネルは見当たりません。



図 11 エルベトンネル南坑口（TBM 陸上トンネル側）¹⁰⁾

エルベトンネルはハンブルグ市北のエルベ川および国際港湾区域を通過するドイツ最長のシールド工法区間と水底部の沈埋区間を連結させた全長 3100m、交通量 10 万台/日を記録するドイツ最大級の都市トンネルです。このトンネルは 1974 年に開通していますが当時 TBM の掘削径 10m 台が技術的限界であったため 2 車線、3 チューブとし中央のチューブは各方向の交通状態に合わせて対面通行、各方向の一方通行に管制室からの遠方制御での切り替え方式を採用していました。

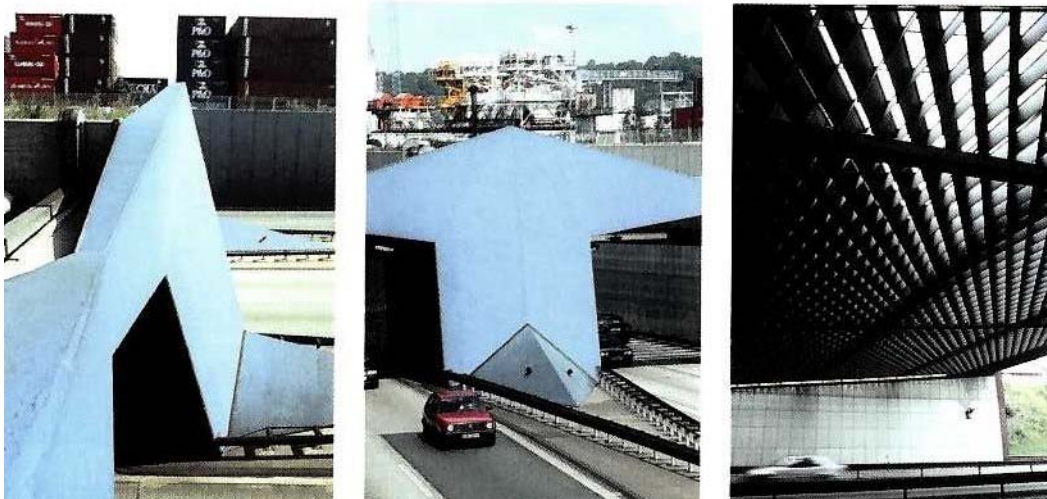


図 12 エルベトンネル北坑口（沈埋トンネル側）¹⁰⁾

図 11、図 12 に両坑口の構造を示しますが、前述の通り野外輝度の低下を意図して坑口、側壁面共に低反射材による表面仕上げとしています。平常時、トン

ネル内の規制速度は 80km/h 中央部のトンネルは、交通量に応じて、北行、南行の各 2 車線一方通行への切り替、南北方向対面通行時の 3 種類の交通管制が供用後 30 年間にわたって行われてきました。対面通行状態でのすれ違い速度は 160km/h 前後となりトンネル内も狭くカーブしているうえ、国際港湾区域のため、大型車の混入率が非常に高く恐怖感を感じます。そのせいでしょうか中央トンネルは両側に比べ交通量率が低かったのを記憶しています。

その後、交通量の増大に伴いさらに北側に TBM（シールド）工法（掘削径 14.2 m）によりもう一本のトンネルが建設され 2002 年に完成しました（第 4 エルベトンネル）。この新トンネルによって、対面通行帯は解消され 4 チューブ往復 8 車線のトンネルとして供用されています。特に坑口、南行きは太陽光が面壁と路面に入射するため RC 製の坑口モニュメントを設置し、さらに 2002 年の改修によって、ルーバー区間は図 9 に示すオランダスキポール空港と同様の太陽光直射型ルーバー（運転席の仰角から太陽光は直視できません）の再架装と側壁の仕上げはアプローチ区間は黒色塗装、ルーバー区間は白色塗装がなされました。供用当時から南坑口はミッドナイトブルーでしたが表面劣化により明るく変色してしまいました（図 12）。

図 13 はドイツアウトバーン、カッペルベルグトンネルの坑口です。このデザインは平原で鷲（黒鷲：ドイツの国鳥）が羽根を広げて獲物を確保したイメージでデザインされており、眩光を抑える低反射素材（艶消しタイル）、拡大断面等、坑口視環境の理論にも合致したドイツでも傑作と言われる構造です。なお中央分離帯に突出した仕切り壁は平常時の換気ガスや火災発生時の煙の反対車線への短絡抑制効果を目的としています。



図 13 カッペルベルグトンネル (1) ¹⁾



図 14 カッペルベルグトンネル (2) ¹⁾

図 15 は 一般国道のトンネル坑口ですがここでも低反射特性を持つ石積み方式によって敢えて粗さを残し太陽光の乱反射によりフロントガラスを通過する反射光の抑制を図っています。



図 15 ズッケルヒュットトンネル ¹⁾

2-3 米国

米国はトンネル大国ではありませんが、その中でも著名なトンネルは東海岸、西海岸の両岸地方に集中して見られ、西海岸の大都市であるシアトルからロサンゼルスへつながるアラスカンハイウェイの整備が終盤を迎えています。特にシアトル市内では用地取得の関係から 2 車線上下二層構造計 4 車線/1 チューブ（2 チューブ建設）の世界最大の TBM 掘進機（日本製）による施工がなされ、2017 年現在、付帯設備工の施工等最終段階に入っています。



図 16 リンカーントンネルニュージャージー州側坑口¹²⁾

図 16 は 1800 年代末に完工したハドソン川底を横断しニューヨークマンハッタン島を結ぶトンネルで米国東海岸にあつては非常に重要な路線の一つです。1996 年にはシルベスタースタローン主演のパニック映画「デイトライト」(交通事故によりタンカーがトンネル内で爆発、水没、しかし主人公は生還)の舞台となったトンネルです。この東坑口は図のように現地で採掘された低反射表面の凹凸を付けた自然石の石積みで坑口の輝度低下に効果的です。ハドソン川の中州に位置しマンハッタンの高層ビル群を望む換気所はレンガ造りの重厚な建築物で文化遺産としても確実に保存されております。このトンネルに並行して位置するホーランドトンネルも全体に双子のような構造をしています。

2-4 橋梁とトンネル坑口の接続構造

橋梁とトンネル坑口が近接した構造は図 17 から図 20 に示す通り日本、欧米諸国、中国、台湾等世界各地にみられます。この構造では野外輝度を低下させるため坑口対策として地盤崩壊や落石による事故対策の面からシェルター等を採用しつつ面壁構造の視覚専有面積の縮小を図ると同時に人工的植栽、低反射材料による自然光反射制御などの対策をとる必要があります。実際には坑口付けの地盤条件にもよりますが橋台および上部工への構造的影響も大きく慎重な検討を要します。しかしながら、図 17 の事例のように坑口正面にコンクリート打ち放し面壁の露出、或いは地滑り対策のための吹付けコンクリートの露出はドライバーにとっては視環境的に不利であり、正面面壁には「つる植物」による緑化、橋梁部壁高欄部にはヘッドライトの照り返し緩和のための黒色処理等、景観的な調和を図りながらもう少し工夫がほしいものです。



図 17 笹の渡トンネル（東北自動車道）¹⁾

図 18 にみられるシャモワーズトンネルのように仮想侵入点での視野範囲内の坑口上部の僅かなスペースに植栽空間を設け樹木の生長によって野外輝度低下の対策をとっている例もあります（注：段階施工によって右チューブが先行開通したため、右坑門上の植栽の生育が進んでいる）。



図 18 フランス シャモワーズトンネル西坑口¹³⁾



図 19 米国コロラド州ハンギングレイクトンネル坑口¹⁴⁾ (図 27 参照)

図 19 の米国ハンギングレイクトンネル、ドイツアルテンベルグトンネルなど欧米およびアジア大陸では日本に比べ地盤条件は良好で地山崩落の危険性は少ない等の有利な面はあるとは思いますが設計思想と美観、建設コストなどそれなりの理由に裏打ちされた構造物に見えます。

日本では構造物設計段階で野外輝度低下を目的とした対策工の配慮が不十分です。加えて関連する技術書にも全くと言っていいほど記載がありません。

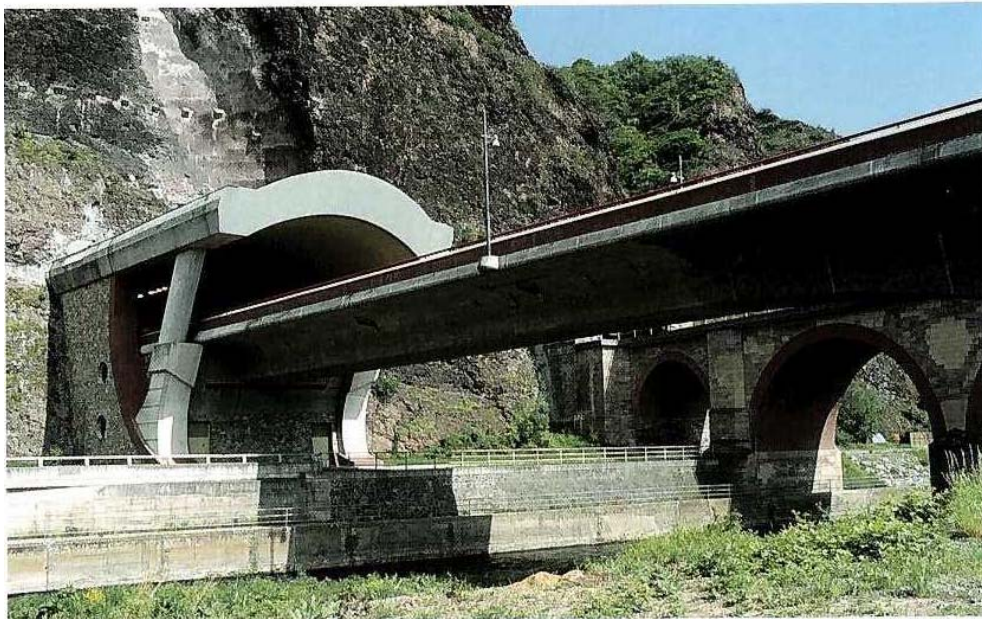


図 20 ドイツアルテンベルグトンネル西坑口¹¹⁾

3 車道内空間について

3-1 日本



図 21 都市内道路トンネル（首都高速湾岸線：3 車線）¹²⁾

トンネル坑口から約 300m以降の下流側域で視力が暗順応化した区間を基本照明と呼んでいます。図 21 と図 22 はほぼ同じスケールでの画像です。

車道幅員、照明器具位置はほぼ同じですが内装仕上げ高さや矩形断面と馬蹄形断面及び路面材の相違があります。図 22 の方が図 21 に比べて視覚的に広く感じます。図 21 では天井面は“灰色”の塗装が施されておりますが、図 22 はコンクリート面が露出しており次第に黒色に変化し図 23 のように変化するものと思われます。

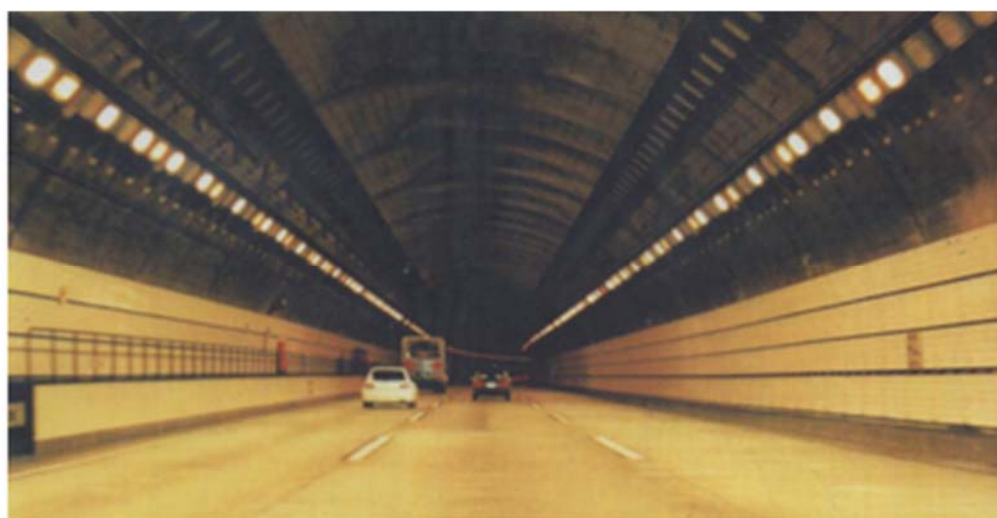


図 22 都市間（東名）高速道路拡幅区間；3 車線）¹²⁾

内装材の設置高さについての規定はありませんが、所定の車頭間隔における前方の大型車両の投影面積の約 70%程度が被れば十分との判断に至っています。この高さは規格品のパネル寸法（2.4m）をうまく使うと前方が乗用車の場合

100%、大型車でも 70%は内装の施工範囲となります。この考え方が日本国内にも普及し始めました。



図 23 標準的都市間高速道路トンネル：照明器具 4.5m（東名高速道路）¹²⁾

図 23 は標準的な都市間高速道路の照明器具路面 4.5m 付近に設置されている日本国内ではよく見られる空間構成です。一方、図 24 は関越トンネル下り線の照明器具位置で路面からの高さが他のトンネルに比べて 1m 低く 3.5m で設置されています。



図 24 関越トンネル下り線新潟方面：照明器具 3.5m¹²⁾

両者を比べると一目瞭然で路面で、関越トンネルの照明強度は同じ照明器具出力にも拘らず高い輝度が確保されています。

照明設計で規定される照明強度は路上の障害物を制動停止距離相当の前方からの視認性を前提とした輝度として設定されているため、関越トンネルでは、標準的照明器具出力で、より高輝度な照明レベルとすることを目的としてこのような対策が取られました。しかしながら従来に比べて低い照明器具位置は結果として大型貨物車の運転席からの着座視点（アイポイント）では路面から2m以上の高さ（外国製大型貨物車の着座視点はさらに高い）となり、光源が近過ぎてフロントガラスと共に、運転席側面窓からの入射光によって大きなチラツキが発生し、運転計器類の視認性低下にも影響することが後になってから判明しました。即ち自動車運転席の計器類はフロントガラスからの入射光を前提とした設計がなされているのです。関越トンネルを通過の大型車ドライバーは70Km/hで走行したとして、この不快な視環境に10分近く耐え続けねばなりません。この照明はトラックドライバーに大変不評でそれ以降は積極的には採用されなくなりました。

3-2 オランダ、ベルギー

図25は我々が現地調査を行ったジーバーガートンネル、図26は前述のスキポールトンネルの内部で両者ともに3車線矩形断面トンネルです。



図25 ジーバーガートンネル内部（図8参照）⁹⁾

これらの共通点は、

- ① 蛍光灯による連続照明でその位置は配光上最も有利なレーンマーク位置。
- ② 天井面と側壁1.5mまでは黒色仕上げ（タイル高さは路面から約3.3m位）。
- ③ 側壁は高反射率の磁器タイルあるいは白色塗装。

- ④ 路面材はリサイクル性が高く路面のレーンマークとのコントラストの良好なアスファルト（EU高規格道路ではアスファルト舗装が標準）。

これ等の設計思想は基本的に欧州のトンネルに共通しています。特にEUネットワークに組み込まれた国際規格自動車専用道路トンネルはほぼ同様の内空構成です。この連続照明は路面の輝度均斉度の確保以外に道路線形をシャープに演出し運転者の視線誘導効果の向上、運転席での視認性等を図る目的でもあります。世界的に見てトンネル内の走行速度が高く移動距離の長い欧州のトンネルならではのコンセプトだと思われます。



図 26 スキポールトンネル内部（図 9 参照）⁹⁾

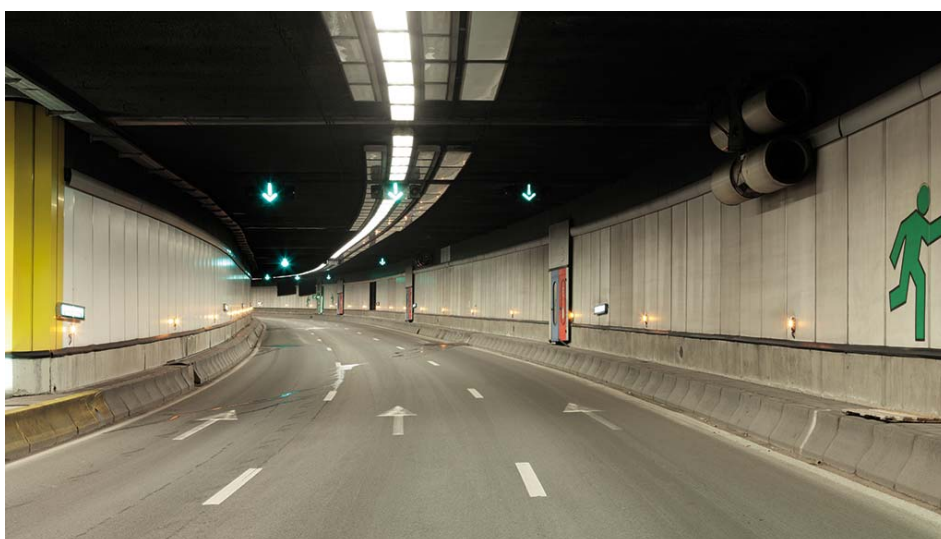


図 27 ベルギーブリュッセル市内 ベリアードトンネル内部¹⁶⁾

図 27 は ベルギーEU本部ビル地下駐車場に直結するベリアードトンネル内部で本線に分岐合流部が数か所設置された典型的都市内道路トンネルで規制速

度は時速 70Km, 通行車両は車高 2.7mまでの中型車（大型車の通行可能な車道空間は確保されています）に限られ大型車の通行は制限されています。この都市トンネルを含め海外のトンネルの多くにみられる特徴として視線誘導効果と車線毎の安全表示のため正面↓と裏面✖の信号灯が表示されています。裏面✖の表示は通常フロントガラスを通しては見えませんが自車のバックミラーを通して同時に視認できます。この管制システムは車線規制時、非常時、特別な交通管制時には逆走も含む自由度の高い車線規制が可能です。この方法を採用するためには明り区間に於いて中央分離帯の開閉構造（ここでは詳細は省略）が必要となります。これに近い交通管制は欧州の多くのトンネル、特に重要路線であったり、近くに代替ルートがなかったりするケースに採用されます。米国における天井部の規制信号機の設置は基本的に欧州と同じ（図 27）コンセプトです。

3-3 米国

対照的なのが米国の道路トンネルで図 27 は都市間自動車道 I-70 号（コロラド州）と図 29 はハドソン川を横断する都市トンネルの内部空間の様子です。これ等米国のトンネルはメンテナンスもよく、路面以外全部ピカピカ、天井部側壁部共に白色仕上げで隅角部に蛍光灯（最近はLEDが多い）連続照明が設置されています。両者ともに天井版が設置され内部は換気ダクト構造となっています。この空間設計は欧州の多くのトンネルにみられるシャープな道路線形の演出が意識されずに、米国の基本的なコンセプトである「広く、明るく」が設計意図として明確となっています。



図 28 コロラド州 I-70 号線ハンギングレイクトンネル（都市間トンネル）¹⁵⁾



図 29 米国 ニューヨーク、ニュージャージー州間リンカーントネル（都市内トンネル）¹²⁾

図 29 では前方数台前（上り勾配）の車両の尾灯が点灯しているのが確認できません。これはマンハッタン側出口の渋滞がトンネル内まで影響していることを示しています。米国はこの壁面反射は天井と両側壁、欧州では両側壁で機能させます。内装材としては高い拡散反射性能を有する磁器質タイル、ホーロー鋼板等が主要な材料として用いられます。このためこれら内装面の清掃等維持には独自の機材が開発され、高度な管理がなされています。

両者の空間設計で共通して重要なことは縦断勾配、或いは平面線形等走行安全に直結する“道路線形と走行状態”、特に減速時のブレーキランプの視認性が非常に重要な要素となります。このように「トンネル内面の反射によって前方の尾灯から隠れた車両を認知する」ことは他の車両に対して、非常に重要な安全情報の提供になります。

これ等図 25－図 29 に示した 5 種類の事例は特殊なものではありません。道路トンネル視環境的内空構成の事例は欧州、米国において高規格自動車道によくみられる手法の一つですがこの事例のように大きな違いがあります。この件について米国高速道路庁トンネル担当官、ドイツ運輸省道路局技術部長と議論したことがあります。「米国は昼間の演出」、「欧州は夜間の演出」との説明があり、両者共に運転者のための安全性確保の最善策との説明がありましたが結論に至る大きな議論には至らずどうも釈然としません。

実際に走行した印象では米国のトンネル内は視点が広い範囲に移動し焦点が定まりませんが低速走行時あるいは時速 50-60Km 位の走行では内部空間に余裕が感じられます。一方で欧州のトンネルでは前方を限定された視野で注視し高速で走り切るようなシャープな空間に演出されています。

欧州と米国のトンネル内の実走行速度を比べると米国は時速 45—55 マイル (70-90km) で欧州より 30-40km 程度走行速度が低い現実があることも原因しているものと考えられますが、文化の違いも大きく影響していると思います。車のデザイン思想にしても米国車と欧州車では歴然とした違いがありハンドルを握ればわかります。伝統的米国車は横幅も広く左右方向への視点の移動、体の動作の自由度が高い印象がありますが、欧州車は定位置への着座で規律性の高い運転操作を要求される一方で、欧州車の米国への輸出には米国特有の保安基準準拠した車両の輸出が義務付けられます。蛇足ながら米国のトンネルの方が維持管理費を含む全体のコストは欧州に比べて高くなります。私個人の印象では欧州のトンネルの方が米国に比べて、快適性、安全性に優れているような気がします。

4 終わりに

ここまでの概説の通り道路利用者に直結する走行安全性、或いは地域に影響を及ぼし質的に高い社会資本を構築するためには、各種設計要素の融合が大変重要であり、利用者の安全性にも直結していることを幾分でもご理解頂けたと思います。

残念な事に日本では、坑口部の計画、設計等に関する専門技術書類を見ても、記載された留意点は斜面崩壊、切羽安定、偏土圧等々土木的要素の羅列のみで利用者の安全快適性、入口照明効果対策等についての記述は十分ではありません。近年、東京湾域の数々の水底トンネル群のように開けた地形に建設された大規模トンネルでも統一された技術的コンセプトに基づく坑口および内部空間デザインとはなっておらず、一定の技術解釈に基づく（欧米のような）配慮は感じられず利用者不在の設計思想が見えます。

海外プロジェクトに於ける議論では総合的観点からの構造計画をかなり初期的な段階より始めます。加えて世界各地では関連する会議が頻繁に開かれ情報交換が行われています。

残念な事に日本では発注者側、コンサルタント側にも総合計画の専門家が不在で各分野の専門家が集まって同じテーブルで議論する場がなく、多くの場合に、主要構造物が完成後に一部の照明技術者による限定的な対応に留まっているのが現状です。さらに公共事業の業務契約の締結においても基本的に単年度期間内で担当業務者の変更も伴うため、技術の固定化が進む反面、プロジェクト毎の継続的一貫性、革新性の欠如も見られます。キーワードはまさしく「システムエンジニアリングの育成」でありましょう。今後の「社会システム工学」の発展が大きな鍵となるものと信じます。

参考文献

- 1) トンネル坑口写真集 (財) 高速道路技術センター 昭和 63 年 6 月
- 2) CIE International Commission on Illumination, Technical Report. Guide for The Lighting of Road Tunnels and Underpasses CIE 88 1990
- 3) トンネル照明設計指針 日本道路協会
- 4) Y. OTA Road tunnel safety design. Deliverable of Tunnel safety training course. World Bank 2010
- 5) Tunnel Entrance Lighting Publication. CIENo61 1984
- 6) (財) 柳工業デザイン研究会
- 7) 設計図書 関越トンネル水上側坑門工内装詳細設計 昭和 59 年 11 月 日本道路公団東京第二建設局
- 8) 吉田、太田 オランダの高規格高速道路トンネルにおける視環境と交通状態に関する研究 高速道路と自動車 第 38 巻 8 号 1995 年 8 月
- 9) Tunnels in the Netherlands, Rijkswaterstaat 1990
- 10) https://de.wikipedia.org/wiki/Neuer_Elbtunnel
- 11) Bundesministerium für Verkehr – Abteilung Straßenbau – Gestaltung von Straßentunnelportalen Dokumentation 1998
- 12) 筆者撮影
- 13) Autoroutes Paris – Rhine – Lone 2005
- 14) Homepage “United States Federal Highway Administration Research and Technology”
- 15) <http://www.myers-sons.com/projects/i-70-hanging-lake-tunnel-cmgc>
- 16) <http://thewordmagazine.com/art/the-unprintables-midnight-marauders/>

以上