

(2) 坑門の設計

ア 一般事項

坑門は土石流・落石・崩壊・雪崩・異常出水等から坑口部を守るものであり、坑門の設計に当たっては、地形及び地山条件、周辺の景観との調和、車両の走行に与える影響、維持管理上の便宜等を考慮して、坑門の位置、形式、構造等を決めなければならない。

坑門設計上の留意事項は、以下のとおりである。

(ア) 安定性

坑門は坑口付けでバランスを崩した斜面を安定化させるものであり、背面の土圧・落石等に対して十分安定な構造物とする。

(イ) 施工性

坑門は、坑口部の施工と密接に関連するものであり、施工が容易で無理のないものとする必要がある。

また、近接する橋台等構造物の設計と矛盾しない位置・構造とする必要がある。

(ウ) 走行性、景観

道路トンネルの坑門は、進入するドライバーに圧迫感・抵抗感がないデザインが望まれる。また、コンクリート面が大きいと照明上、野外輝度が大きくなり緩和照明のレベルに影響するので、できるだけコンクリート面の小さい設計が望ましい。さらに、周辺環境に配慮し、緑化等について検討する必要がある。

(エ) 気象条件等

坑門は、雪崩・異常出水等気象災害の被害を受けないよう、設計する必要がある。また、積雪地においては、雪の吹込みが少ないこと、雪庇が発生しにくいこと、除雪作業が容易なこと等の条件を考慮する必要がある。

(オ) その他

坑口付近には各種施設が設けられるので、維持管理しやすい構造を検討する必要がある。

イ 坑門の型式

坑門の型式としては、一般に表-9.2.16のようなものがある。

坑門の位置・型式の選定に当たっては、それぞれに特徴があるので、前記の留意事項を考慮した上で、地形・地質等の条件に適合したものを選択しなければならない。

表-9.2.16 トンネル坑門の形式と特徴¹⁶⁾

形式 項目	壁 型		半突出型	突 出 型			重 力 型
	ウィング式	アーチウィング式	パラペット式	突 出 式	竹割 (逆竹割) 式	ベルマウス (逆) 式	重力・半重力式
形 状	 	 	 	 	 	 	
地山条件による適用性	- 両切面土工の場合 - 背面土圧を全面的に受ける場合 - 積雪量の多い場合には防雪工を併用。	- 比較的地形がなだらかな場合 - 左右の切土工が比較的少ない場合	- 屋根上地形や左右に他の構造物との取り合いが少ない場合 - 積雪地でも可能	- 押え盛土を施工した場合 - 坑口周辺の地質が良くない場合 - 積雪地でも可能 - 坑口周辺地形の切り取りなど、整形が比較的可能な場合	- 坑門周辺の地形がなだらかな場合 - 逆竹割式の場合、重心位置の関係から基礎の支持力の十分な検討を要する。	- 地形、地質が比較的に良く、坑口周辺の開けた個所に可能。 - 積雪地では吹き込み、雪庇が生じやすい。	- 比較的地形急峻の場合や土留擁壁的構造を必要とする場合 - 落石が多いと予想される場合 - 背面の排水処理が容易
施工性	- 不良地山では切土量が多くなるので、背面切土法面の安定化対策としての防護を十分に行う必要がある。 - トンネル本体との一体化が必要。	- 地形によっては、一部、明り巻き(特にアーチ部)が必要である。 - 保護盛土を必要とする。	数mの本体工の明り巻を必要とし、かつ盛りこぼしに對し多少の土留壁が生ずるが、坑門としては合理的な構造である。	- 型枠、配筋などに手間がかかる。 - 面壁型に比べ坑門位置が前に出たため支持力不足に留意する必要がある。	同左	同左	不良地山では切土量が多くなるので、背面切土法面の安定化対策としての防護を十分に行う必要がある。
景 観 車両走行性	- 壁面積が大きく輝度を下げる工夫(壁面のハズリなど)が必要。 - 重量感はあるが、走行上の圧迫感を感じやすい。	アーチ部の曲線が、周辺地形とあまり違和感を感じさせないような配慮が必要。	- 坑門コンクリートの面壁面積が小さいため、視覚的には違和感を感じさせない。 - 坑口周辺地形と良く適合する。	- 圧迫感が少なく、車両の走行に与える影響は少ない。 - 周辺地形と良く適合する。	- 圧迫感が少なく、車両の走行に与える影響は少ない。 - 周辺地形を修景することにより坑門との調和が図れる。	- 車両の走行に与える影響は少ない。 - 坑口周辺地形と良く適合する。	- 壁面積が大きく輝度を下げる工夫(壁面のハズリなど)が必要。 - 重量感はあるが、走行上の圧迫感を感じやすい。

リ 坑門の構造設計

坑門は、完成後これに加わる荷重等に対して安全であるように設計しなければならない。荷重は、坑門の型式に応じて適宜組み合わせで行うものとするが、特に、突出型のような場合は、一般に土かぶりが薄く、また覆工の一部が露出することもあり、地震、温度変化、コンクリートの乾燥収縮等の影響を受けやすいのでこれらを考慮した設計とする必要がある。

(ア) 面壁型坑門の設計

面壁型の坑門は、トンネル本体に剛結された版構造物として設計するものとする。そのウィングの断面力の算定は、原則として、図-9.2.18 に示すように、トンネル本体を固定端とする片持梁として求めるものとする。しかし、トンネルの場合は、ウィングは本体覆工の円曲線状に固定されるため、2方向版の性状が強く滑らかな応力分布を示すことから、ウィングの設計に当たっては、次のように考えるものとする。

a 荷重

ウィングの設計に当たって、土圧は埋戻し土による静止土圧を考慮するものとする。

その他の荷重としては、埋戻し土による土圧のほかに施工中の埋戻し土の締固め等を考慮し過載荷重 10kN/m^2 を、また必要に応じて積雪荷重を考慮するものとする。なお、ウィングの設計に当たっては、一般には地震の影響は考慮しないこととする。

b ウィング水平方向及び鉛直方向の応力計算

水平方向の応力は、図-9.2.18 に示す、面 ABCDEFG の仮想ウィング端 G～A～B に対する曲げモーメント $\Sigma M_{G\sim A\sim B}$ を求める。

鉛直方向の応力は、面 ADEFGHI の仮想ウィング端 I～A～D に対する曲げモーメント $\Sigma M_{I\sim A\sim D}$ 、せん断力 $\Sigma S_{I\sim A\sim D}$ を求める。

ただし、I～A～B は吹付けコンクリートの内面（覆工コンクリートの外面）を示す。

c ウィング固定端の断面力

ウィング固定端の断面力は、次式により求めるものとする。

(a) 水平方向の断面力

$$\text{曲げモーメント } M_{A\sim B} = \frac{\Sigma M_{G\sim A\sim B}}{h_e} \quad \dots\dots\dots \text{式 (9.2.1)}$$

$$\text{せん断力 } S_{A\sim B} = \frac{\Sigma S_{G\sim A\sim B}}{h_e} \quad \dots\dots\dots \text{式 (9.2.2)}$$

(b) 鉛直方向の断面力

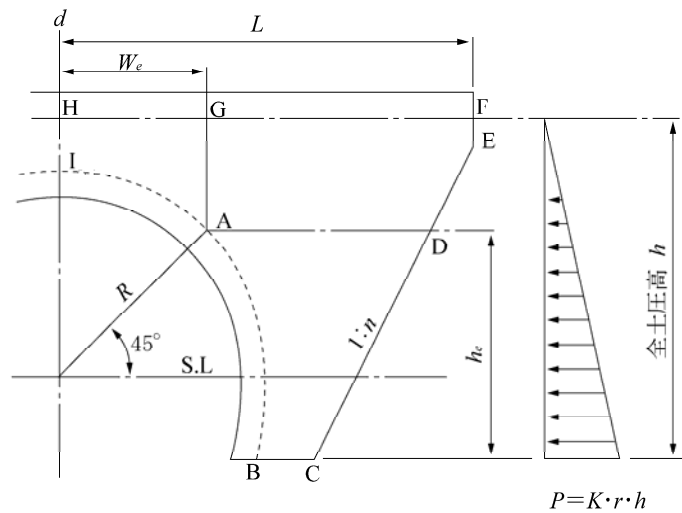
$$\text{曲げモーメント } M_{A\sim I} = \frac{\Sigma M_{I\sim A\sim D}}{W_e} \quad \dots\dots\dots \text{式 (9.2.3)}$$

$$\text{せん断力 } S_{A\sim I} = \frac{\Sigma S_{I\sim A\sim D}}{W_e} \quad \dots\dots\dots \text{式 (9.2.4)}$$

d 配筋設計

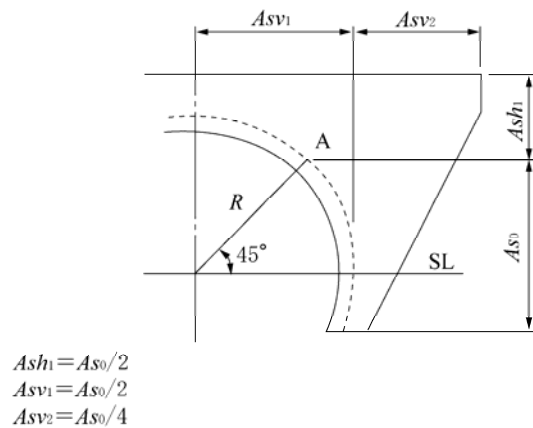
ウィングの配筋設計は、一般にはウィング固定端の断面力計算結果により、図-9.2.19 に示す鉄筋量算定の考え方に基づいて行うものとする。その中で、鉛直方向については、一般には水平方向の断面力に比べて非常に小さくなるが、配筋設計に当たっては、図-9.2.19 により行うものとする。また、坑門に生ずる応力のトンネル本体への影響を考慮して、覆工外側面に主鉄筋同等の鉄筋を先端から 5.0m 程度配筋するものとする。

図-9.2.20 にウィングの配筋図例を示す。



L : ウィング長 (m)
 h_e : 水平方向の断面力算出時の
 ウィング付根部の有効高さ (m)
 W_e : 鉛直方向の断面力算出時の
 ウィング付根部の有効幅 (m)
 K : 静止土圧係数 (0.5)
 r : 土砂の単位体積重量 (kN/m^3)

図-9.2.18 ウィングの断面力の算定 (片持梁)²⁷⁾



As_0, Ash_1 : 水平方向に配筋される主鉄筋量 (cm^2/m)
 Asv_1, Asv_2 : 鉛直方向に配筋される主鉄筋量 (cm^2/m)

図-9.2.19 鉄筋量の算定の考え方²⁷⁾

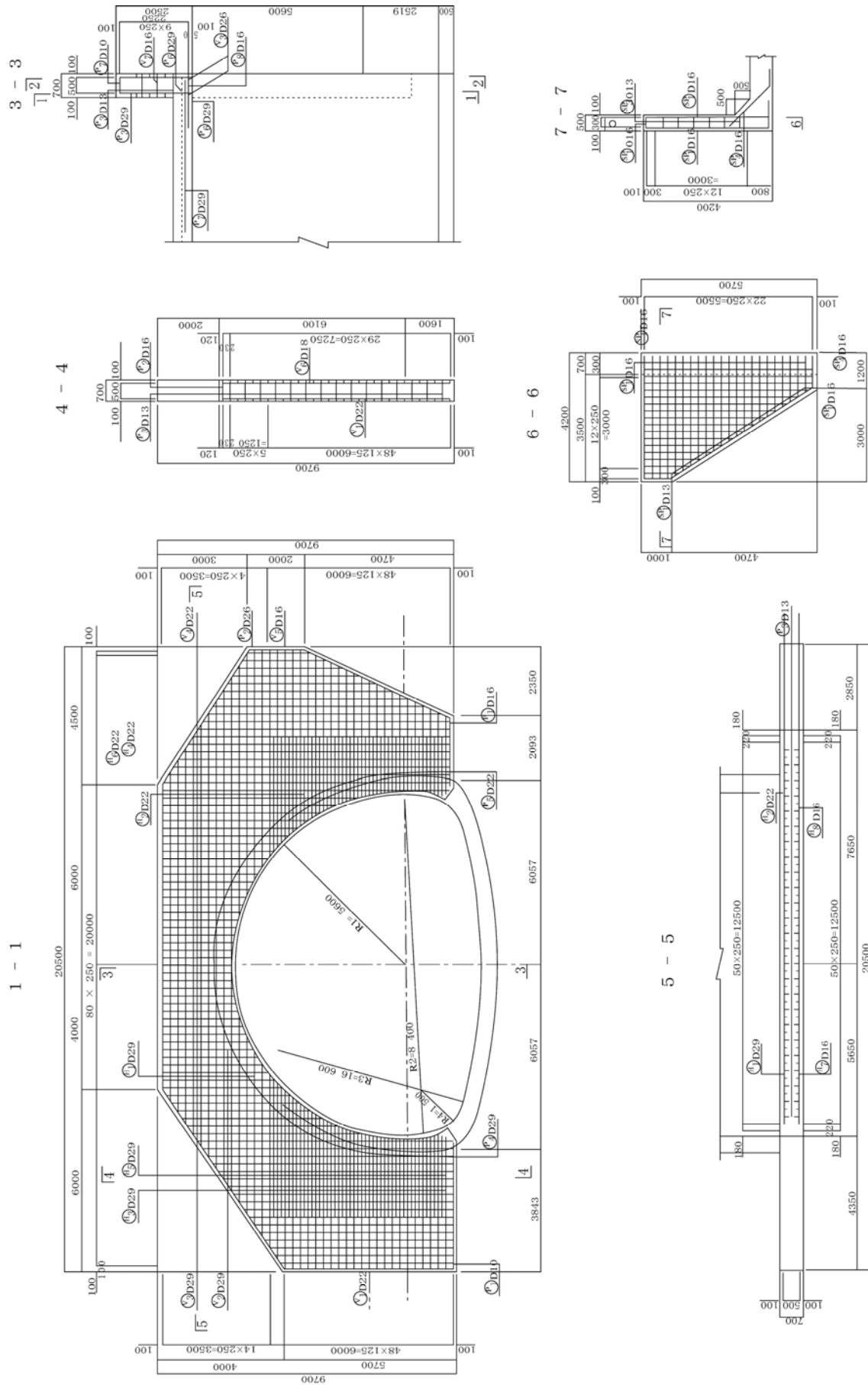


図-9.2.20 ウィングの配筋図例²⁹⁾

(イ) 突出型坑門の設計

突出型の坑門は、トンネル本体と同一の内空断面のアーチカルバートがトンネル坑口部に連続して設けられる坑門で、完成後において整形盛土による上載荷重、水平土圧、その他荷重（積雪荷重、輪荷重等）がこれに加わる。したがって、坑門の設計に当たってはこれらの荷重を考慮し、断面力、地盤の支持力の計算を行うものとする。また、アーチカルバート構造の一部が埋戻し土から露出する場合は、温度変化、コンクリートの乾燥収縮、地震の影響等を受けやすい状態にあるため、必要に応じて、これらを考慮した設計とするものとする。

断面力の算定に当たっては、原則として、図-9.2.21に示すように、弾性バネを考慮した変形法により計算を行うものとする。なお、図-9.2.22に参考として突出型の配筋図例を示す。

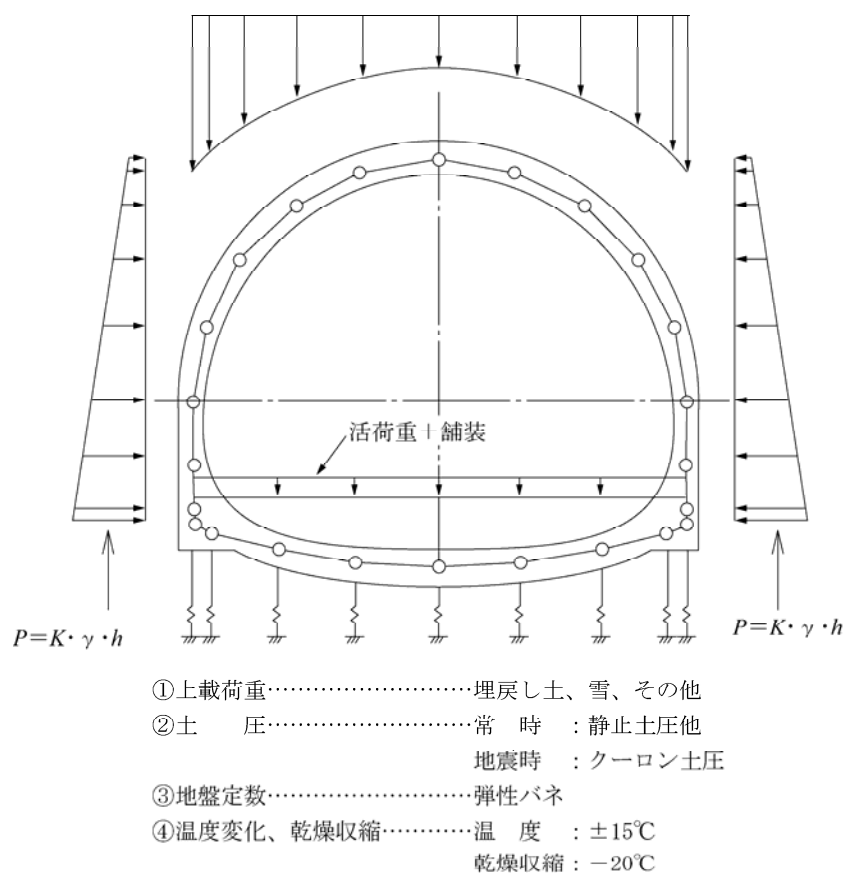
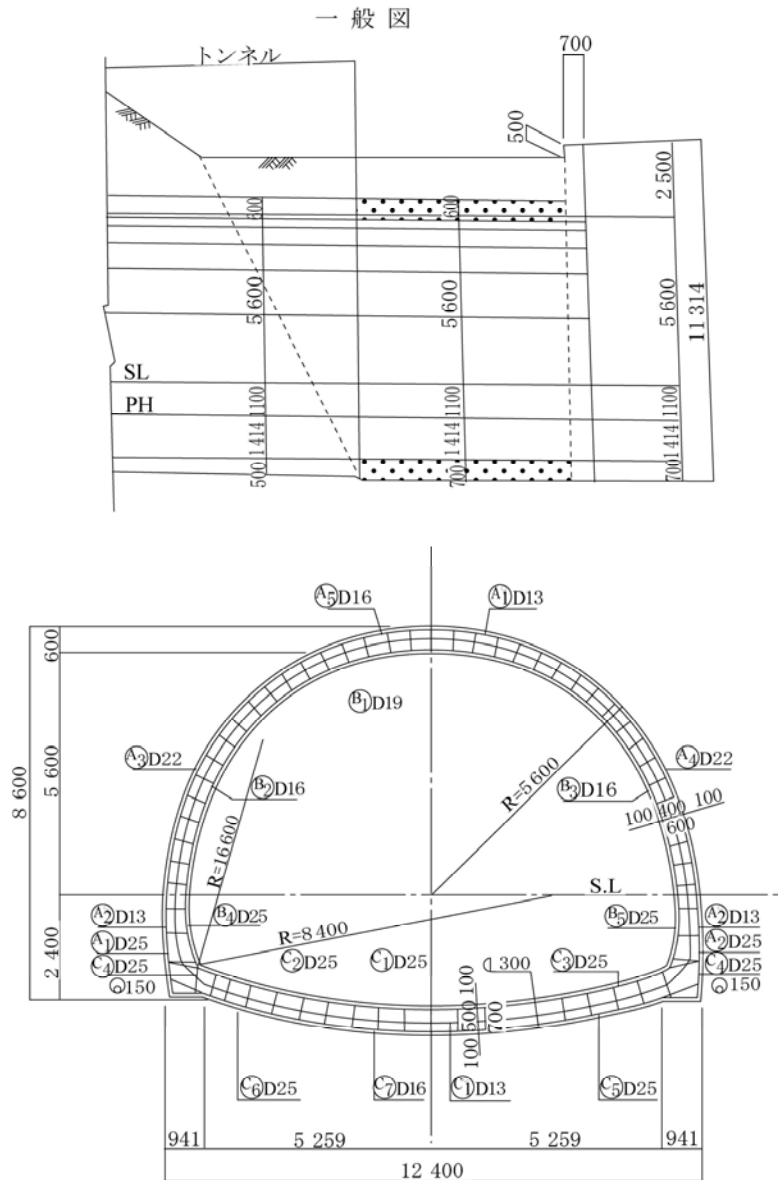


図-9.2.21 断面力の算定（突出型）¹⁸⁾

図-9.2.22 突出型坑門の配筋図例¹⁸⁾

(7) 重力型坑門の設計

重力型の坑門は、構造上、トンネル本体から独立して、外力に抵抗し得る型式でなければならない。重力型の坑門は、図-9.2.23に示すように立体的な門型を成しているため、坑門背面の埋戻し土による載荷重と主働土圧が作用した場合に転倒、滑動、及び地盤の支持力に対し、所要の安全率をもつことが必要であり、さらに堅壁についても外力に対し、十分抵抗できる断面を設計しなければならない。

なお、重力型坑門の設計は、「10.1 擁壁」に準ずるものとするが、インバートは坑門の安定向上には有効に働くが、安定計算上はそれを無視して設計するのがよい。

また、坑門のフーチング部分は、その機能上からおおむね軟岩に着岩することから、現場状況に応じて安定計算にはフーチング部の土圧を削除することができる。なお、坑門の堅壁は、計算の結果、無筋コンクリートの断面で満足する場合であっても、施工順序、不確実な外力等に対する配慮から、鉄筋による補強を行うものとする。

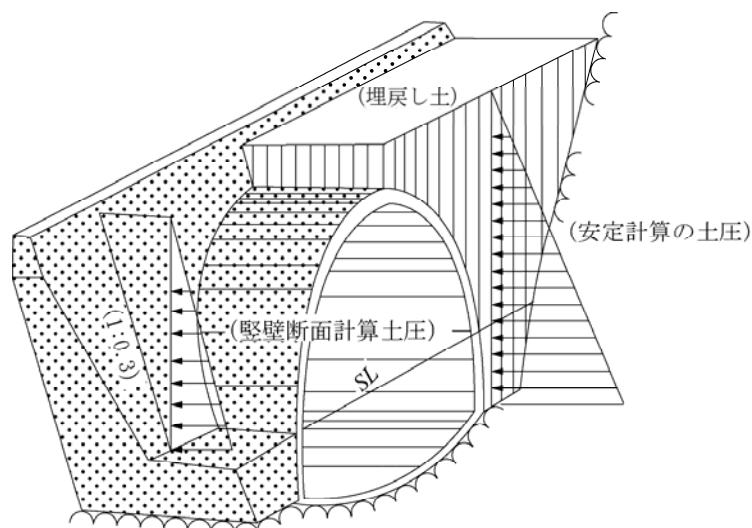


図-9.2.23 一般的な重力型坑門の形状図¹⁸⁾

9.2.8 トンネル内舗装

(1) 一般事項

トンネル内の舗装は、湧水等の影響を受けることが多く、また維持管理が難しいことから、その設計に当たっては十分な耐久性が確保できるように注意しなければならない。舗装の選定に当たっては、すべり抵抗や耐久性のほかに、照明効果に対する配慮をすることが望ましく、できるだけ明るいものを用いるのがよい。このことから、セメントコンクリート舗装が一般的である。

また、トンネルでは地山からの湧水は避けることができず、かつ湧水の圧力ヘッドが大きいことも多いので、路盤が浸水し、繰り返し作用する交通荷重によって劣化することのないよう十分な排水設備を設けるものとする。

トンネル内舗装の設計は、「舗装の構造に関する技術基準」(平成13年6月29日 国土交通省 都市・地域整備局長・道路局長通知)に基づいて行うこととし、「舗装設計施工指針」((公社)日本道路協会 平成13年2月)を参考に実施するものとする。

(2) 路盤

路盤厚は原則として「7.7.1 (2)路盤」によるが、路床が岩盤の場合は「7.5.6 路床が岩盤の場合」によって設計する。インバートの箇所はトンネル掘削時の山ずり又はクラッシュラン等で所定の位置まで埋め戻し、その部分を路床とみなし、路盤厚は15cm(粒度調整砕石)程度とする。

トンネル内では、十分な排水を行っても地山からの湧水を避けられないこともあるので、水の影響を受けにくい路盤材料を選ぶ必要がある。

- 注1) 将来、舗装のオーバーレイが予想される場合や、積雪によるクリアランスの減少がある場合等は、車道部の建築限界の高さを4.7m以上とするのが望ましい。
- 2) トンネル内では水の影響を受けることが多いので、瀝青混合物を用いる場合は、75 μ m ふるい通過量のうち2%程度を消石灰等で置換えることが望ましい。
- 3) 山ずりを路盤に用いることは経済的であるが、その場合でも路盤としての品質を十分に調査して用いることが大切である。なお、セメント安定処理路盤は水による浸食に対する有効な対策の一つである。
- 4) 通常の路盤材料では所要の路盤厚がとれない場合や、軟弱な路床等で路盤の一部にコンクリート版を打設した例がある。これらの場合の路盤厚の設計は過去の実施例や弾性計算等の方法を参考にして決めるとよい。

(3) コンクリート版

トンネル内のコンクリート版の設計は、「7.7 コンクリート舗装の設計」に基づいて設計するのを原則とする。ただし、交通量の区分がⅠ-2以下の区間でも維持管理が困難なことを考慮し、最小版厚は20cmとする。また、膨張目地は坑口付近にのみ設ける。

- 注1) 坑口部の横膨張目地は、坑口からトンネル内のおおむね30m以内に1か所とする。横収縮目地を打込み目地とするのは、トンネル外の温度の影響を考慮して坑口から150m程度では30mに1か所、また坑口から150m以上では50mに1か所の割合がよい。
- 2) 一般部がアスファルト舗装となる場合には、坑口部の横膨張目地は設けなくてよい。また、その接続部は、図-9.2.24に示す、すりつけ版を設けることが望ましい。
- 3) 路床の支持力が急激に変化している場合には、その位置に横収縮目地を設けるとよい。
- 4) 2車線道路の場合、一般に道路幅員の中央を頂点として両側に向かって下り勾配とするが、それが施工上困難な場合は片勾配としてもよい。ただし、曲線部を除く箇所は片勾配は2%を限度とする。
- 5) 寒冷地においてはタイヤチェーン等によるすりへり作用に対する抵抗性の大きい粗骨材を用いることが望ましい。

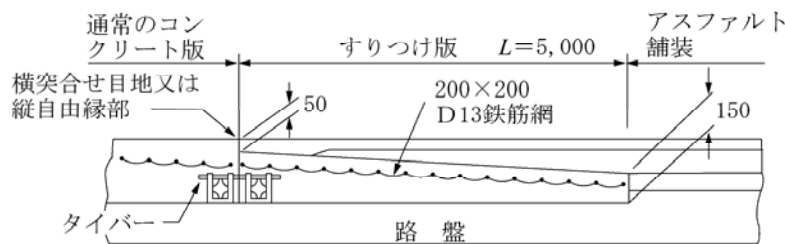


図-9.2.24 すりつけ版の設計例

9.2.9 その他の施設

(1) 換気施設

トンネルの換気施設は、トンネル本体の構造を始め、トンネルのルート選定にも影響を与える。換気に影響を与える要因としては、トンネル延長、勾配、交通条件、気象条件、トンネル周辺の環境等複雑なため、機械換気の要否を定量的に決めることは難しい。したがって、本技術書では、延長、勾配、交通量がさほど大きくない平均的なトンネルにおける自然換気の限界の経験的な目安を示す。ここで示す値はあくまでも目安であり、この値に近づいたトンネルについては機械換気の検討を行う必要がある。

〈対面交通〉(図-9.2.25)

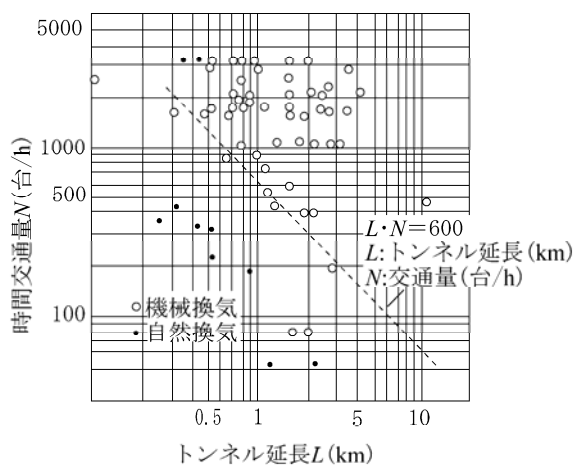
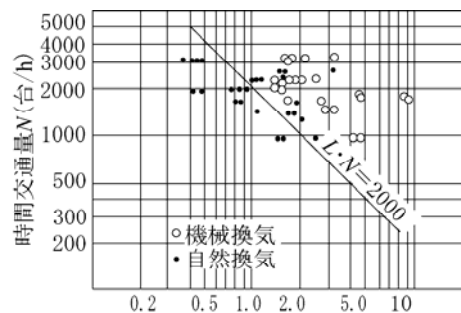
$$L \cdot N = 600$$

L : トンネル延長 (km)

N : 時間交通量 (台/h)

〈一方方向交通〉(図-9.2.26)

$$L \cdot N = 2000$$

図-9.2.25 対面交通トンネルの自然換気の目安²⁹⁾図-9.2.26 一方方向交通トンネルの自然換気の目安³⁰⁾

(2) 非常用施設

道路トンネルには、図-9.2.27 で区分されるトンネルの等級に応じて、表-9.2.17 の非常用施設を設けるものとする。

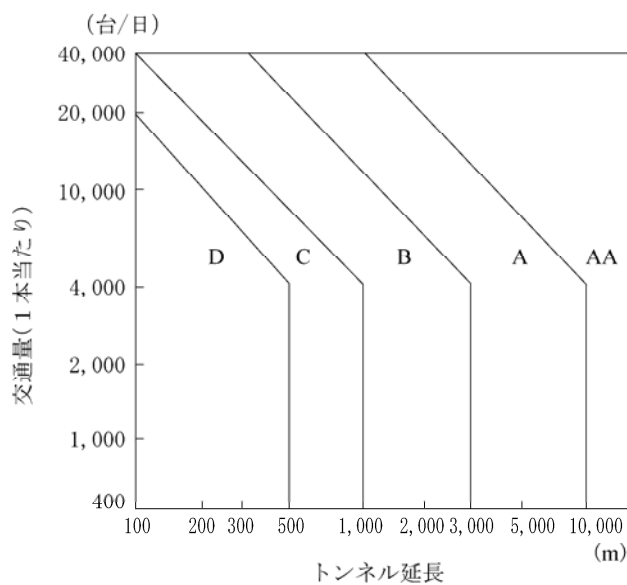
図-9.2.27 トンネル等級区分²⁵⁾

表-9.2.17 非常用施設の設置基準²⁵⁾

トンネル等級		AA	A	B	C	D
非常用施設	非 常 電 話	○	○	○	○	
	押 ボ タ ン 式 通 報 装 置	○	○	○	○	
	火 災 検 知 器	○	△			
	非 常 警 報 装 置	○	○	○	○	
消火装置	消 火 器	○	○	○		
	消 火 栓	○	○			
避難誘導設備	誘 導 表 示 板	○	○	○		
	排 煙 設 備 又 は 避 難 通 路	○	△			
その他の設備	給 水 栓	○	△			
	無 線 通 信 補 助 設 備	○	△			
	ラ ジ オ 再 放 送 設 備	○	△			
	又 は 拡 声 放 送 設 備					
	水 噴 射 設 備	○	△			
	監 視 装 置	○	△			

注) ○：原則として設置する。△：必要に応じて設置する。

9.2.10 掘削方式

掘削方式の選定に当たっては、次のような条件を考慮し適切な方式を採用するものとする。

- ① 地形、地質、土かぶり
- ② 湧水、破碎帯の有無及びその程度
- ③ トンネルの断面形状、延長
- ④ 工期
- ⑤ 土捨て場の条件等

掘削工法の選定を最も左右するのは、掘削断面の大きさと地山の安定度の関係である。一般に、不安定地山に対しても補助工法を活用して切羽の安定を図り、できるだけ大きな加背で掘削する工法を積極的に採用することが重要であり、加背に合わせた施工機械の組合せやずり出し方式等を含めた掘削工法を決定する必要がある。補助ベンチ付全断面工法及び上部半断面工法の上半盤の位置は、原則としてスプリングラインの位置とするが、施工機械から加背割が決まる場合もあるので注意が必要となる。

なお、掘削工法の工事途中での変更は、通常、多大な工費と労力を要し、工事工程上の損失も大きいので慎重な対応が必要である。

以下に、代表的な掘削工法を示す。

(1) 全断面工法

トンネルの全断面を一回で掘削する最も単純な掘削工法であり、施工に大型機械が使用でき、切羽が1か所に集約され作業管理も行いやすい。適用に当たっては岩盤が堅硬で全断面の切羽が安定であること及びトンネルの全長にわたって地質の変化が少ないことが必要である。なお、作業坑等のような中小断面(約30m²まで)では全断面で掘削するのが一般的である。

(2) 補助ベンチ付全断面工法

全断面工法の一つであるが、切羽に2～5m程度の補助ベンチを設けることで切羽の安定性と安全性を確保し、下半盤にトンネル全断面に対応した大型施工機械を配置し、上半と下半を同時に掘削する工法である。切羽に補助ベンチを設けたことで、広範囲の地山条件への適用が可能であり、上半と下半の施工時間差がないため早期閉合が可能な工法である。この工法は最も汎用性のある工法であり、特殊地山や大断面を除いて一般的に用いられている。また、切羽の安定が確保できない場合には、天端の安定のための先受工や、切羽の安定のための鏡ボルト、鏡吹付けコンクリート等の補助工法を検討する必要がある。

(3) 上半半断面工法

トンネル断面を上半部と下半部に分けて上半と下半を同時あるいは交互に掘削する工法で、各種地山条件に適用が可能であり、施工機械も通常のダンプトラックがずり運搬に使えるほか、この工法による施工に適合するように開発された機械が多い。

地山条件が悪い場合には、ベンチ長(上半切羽と下半切羽との距離)を短くして、早期に断面を閉合することが重要である。

(4) 導坑先進工法

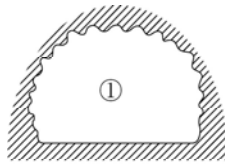
トンネル断面内に導坑を先進させた後、上半及び下半の切掘げを追随させる工法である。導坑は、地質が複雑な箇所での地山状態の確認・湧水に対する水抜き・切羽の安定性を高めるための断面分割・地耐力が不足する場合の上半アーチ基礎工等の目的で特殊な地山で採用する。

導坑の位置によって、側壁導坑・中央導坑・頂設導坑等の工法があり、切掘げる上半・下半の各掘削作業が導坑周辺に競合するため、施工設備に工夫が必要である。

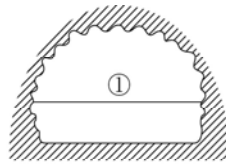
(5) 中壁分割工法

中壁分割工法は、トンネルを大きく左右に分割して掘削切掘げを行う工法で、特に土砂から軟岩のように切羽の自立性の悪い地山で偏平な断面や大断面を採用する場合、土かぶりが小さい箇所では地表沈下を迎える必要がある場合等に適用する。

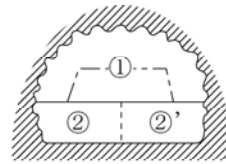
なお、中壁分割工法は、後進の断面掘削時に頂部における支保工の接合を慎重に行い、荷重が中壁から掘削面の支保工に移行したのを確認した後、中壁の撤去を行う必要がある。



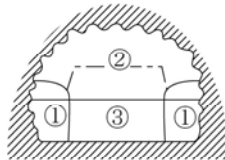
(a) 全断面工法



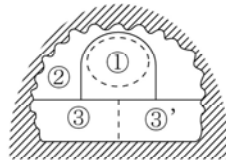
(b) 補助ベンチ付全断面工法



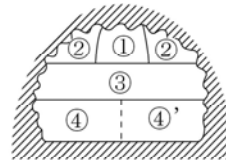
(c) 上部半断面工法



(イ) 側壁導杭

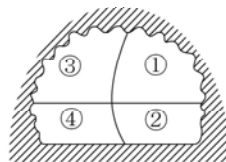


(ロ) 中央導杭



(ハ) 頂設導杭

(d) 導杭先進工法



(e) 中壁分割工法

注 1) ①, ②……は、掘削順序を示す。

2) 切羽の安定が悪い場合は、図中に一点鎖線で示したように掘削断面を細分割することがある。
上半部ではリングカット又は核残しという。

図-9.2.28 代表的な掘削工法 ¹⁶⁾

9.2.11 掘削工法

トンネルの掘削工法は、次のように分類される。

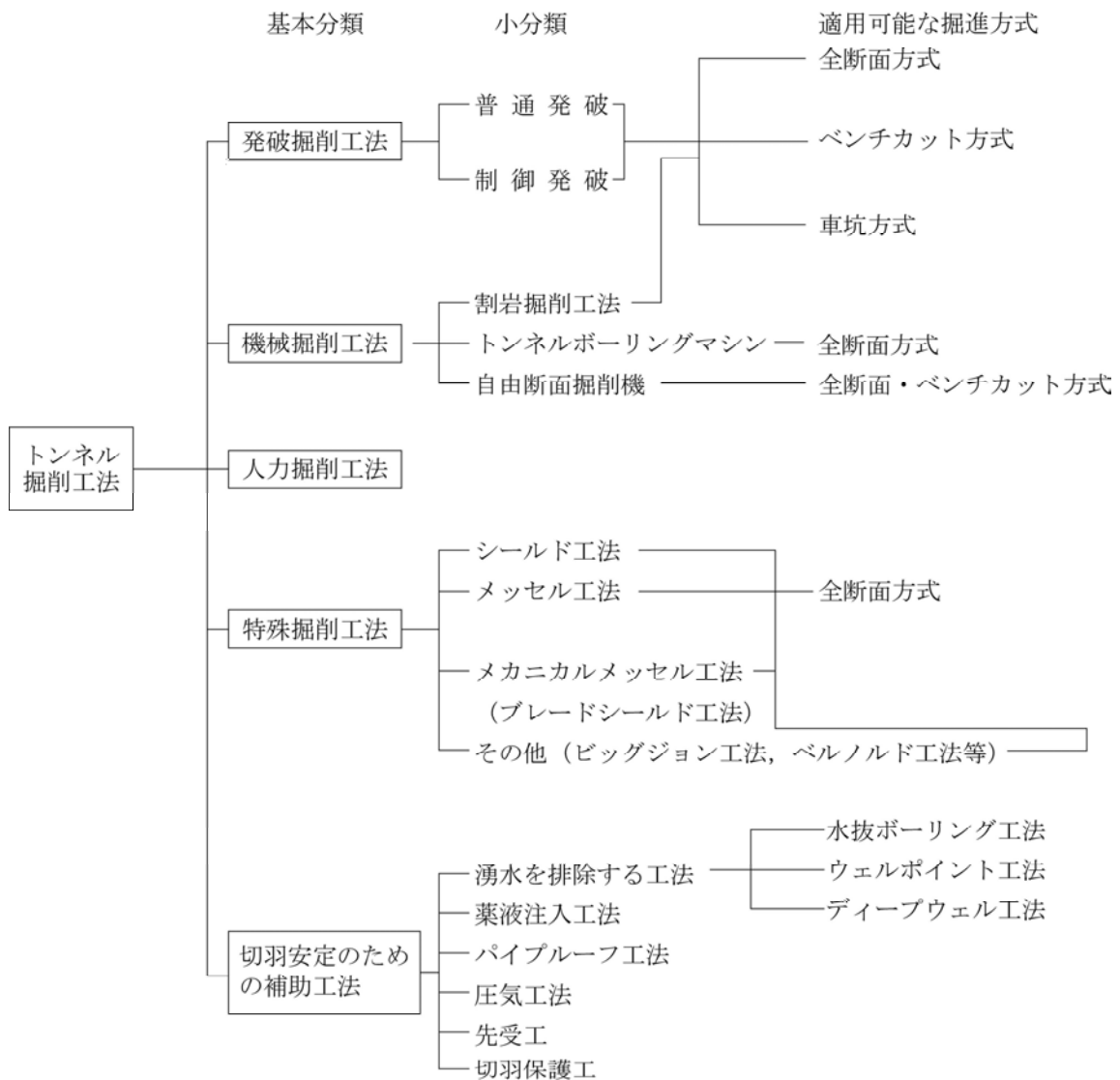


図-9.2.29 掘削工法の分類²⁰⁾

引用・参考文献

- 1) 道路構造令、令和2年政令第329号（令和2年11月）
- 2) (公社)日本道路協会：道路構造令の解説と運用（令和3年3月）
- 3) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編）（平成29年11月）
- 4) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋・鋼部材編）（平成29年11月）
- 5) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編）（平成29年11月）
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅳ下部構造編）（平成29年11月）
- 7) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅴ耐震設計編）（平成29年11月）
- 8) (公社)日本道路協会：鋼道路橋施工便覧（令和2年9月）
- 9) (公社)日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧（令和2年9月）
- 10) (公社)日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧（令和2年9月）
- 11) (公社)日本道路協会：杭基礎設計便覧（改訂版）（令和2年9月）
- 12) (公社)日本道路協会：道路橋伸縮装置便覧（昭和45年4月）
- 13) (公社)日本道路協会：道路橋支承便覧（平成31年2月）
- 14) (公社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説（昭和59年2月）
- 15) (公社)日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説 ボラードの設置便覧（令和3年3月）
- 16) (公社)日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説（平成15年11月）
- 17) (公社)土木学会 トンネル工学委員会：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説（平成28年8月）
- 18) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：設計要領 第三集トンネル保全編・トンネル建設編（令和2年7月）
- 19) (公社)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針（平成21年2月）
- 20) 農林水産省農村振興局：土地改良事業計画設計基準・設計「水路トンネル」（平成26年7月）
- 21) (公社)土木学会：軟岩評価－調査・設計・施工への適用（平成13年6月）
- 22) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針（平成8年2月）
- 24) (一社)農業土木事業協会：よりよき設計のポイント（平成23年3月）
- 25) (公社)日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説（令和元年9月）
- 26) (公社)日本河川協会：改定 解説・河川管理施設等構造令（平成12年1月）
- 27) 近畿地方整備局：設計便覧（案）第3編 道路編（平成24年2月）
- 28) (一社)日本トンネル技術協会：山岳トンネルの坑口部の設計・施工に関する研究報告書（昭和60年2月）
- 29) (公社)日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説（平成13年10月）