

第一章 隧道工程施工概论

第一节 隧道工程施工概述

一、我国隧道工程发展现状及作用

我国是一个地域辽阔 多山的国家 交通运输发展很快 新修建的铁路、公路为缩短建设里程 改善线路走向及保护环境 那种逢山绕着走、坡陡、曲线半径小的现象将被隧道工程所代替。隧道工程既能保证行车安全又可防止滑坡、泥石流及提高行车速度和安全的可靠性 还能与周围环境相协调，保证自然景观的完善。

随着我国改革 不断的深化 国民经济日益向上 蓬勃发展 交通运输能力不足日益突出，直接影响国民经济的增长速度，特别是落后地区、边远地区的经济发展更加需要交通运输。有句谚语：“要想富 先修路”足以说明 交通运输道路修建的重要性和必要性。

我国位于欧亚大陆的东部 太平洋西岸 背靠大陆、面向大海。山地、丘陵和崎岖的高原，占总国土的 2/3 平原仅占 1/10。西部为世界屋脊的青藏高原，东部为平原丘陵，整体形状成三个台阶状。座落着四大高原（即青藏、内蒙、黄土、云贵高原）四大盆地（即四川、塔里木、准葛尔、柴达木盆地）与三大平原（即东北、华北、长江中下游平原）在这辽阔的大地上，分布着许多山脉、河流、湖泊和纵横的沟壑 构成发展交通运输网建设的障碍。因此 隧道工程建设尤为重要。只有发展隧道工程，才可使交通路网的行车速度加快，建设速度加快，从而促进国民经济的迅速发展。特别是带动了落后地区的经济发展。

20 世纪 80 年代开始，由于交通事业的迅速发展，公路事业也得到了迅速的发展，通车里程大幅增加 技术等级不断提高，一个以高等级国家干线为主骨架 连接大、中、小城市 辐射乡村的公路网正在我国大地上形成，对振兴经济，提高全国各族人民的物质文化生活水平，起到了重大的作用。近几年来铁路到不了的地方公路先到。为加快高等级公路建设，形成从南到北、从西到东；贯通全国的公路网 修建千米以上大隧道 40 余座。如正在建设中的秦岭公路隧道。在铁路上为提高行车速度，加快建设进度，保证行车安全可靠，也在一些主要修建的铁路干线上，选择隧道通过山岭，如已通车的内昆线和正在修建的渝怀线隧道总长都要占线路总长的 50% 以上。交通建设带动了国民经济持续上升，加快了基础设施的建设和发展。到 2000 年我国已有公路隧道 1684 座总长达 628km 到 1998 年底铁路运营隧道约 5336 座，总长达 2565km。除隧道数量增加外，隧道长度也有所突破，长度超过 12km 的朔黄线长梁山隧道，西康线上的 18.6km 秦岭隧道，正在修建的终南山公路隧道等。

国外隧道工程施工水平比我国先进。主要是隧道工程施工方法比较先进，机械化、自动化程度比较高，建设速度快。新奥法施工，无轨运输，无爆法隧道掘进等都比我国发展的早。隧道地质的超前预测，地质灾害监测和警报等在我国的发展也相对比较落后。因此必须加快我国隧道工程施工水平的提高，争取在短时间内赶超国际水平。

二、隧道工程施工

隧道工程施工包括 隧道施工方法、隧道施工技术和隧道施工管理。

(一) 隧道工程施工特点

隧道工程是属于地下结构物，地下结构是多种多样的，构筑地下结构的施工方法和技术也是多种多样的。施工方法和技术形成与发展与地下结构物的特点有关。其特点是纵向长度从几米到十几公里 断面相对比较小，一般高 5~6m 宽 5 至十几米的纵长地下结构物。

隧道工程施工特点：

1. 隐蔽性大，未知因素多。
2. 作业空间有限 工作面狭窄 施工工序干扰大。
3. 施工过程作业的循环性强，因隧道工程是纵长的，施工严格地按照一定顺序循环作业，如开挖就必须按照‘钻孔—装药—爆破—通风—出渣’的顺序循环。
4. 施工作业的综合性强 在同一工作环境下进行多工序作业(掘进、支护、衬砌等)
5. 施工过程的地质力学状态是变化的，围岩的物理力学性质也是变化的，因此施工是动态的。
6. 作业环境恶劣 作业空间狭窄 施工噪声大 粉尘、烟雾 潮湿 光线暗 地质条件差及安全等问题等给施工人员带来了不利的工作环境。
7. 作业风险性大。风险性是和隐蔽性和动态性相关联的，在施工过程中，施工人员必须随时关注隧道施工的风险性。

(二) 隧道工程施工方法

隧道工程施工中最重要的是合理选择施工方法，施工方法选择的是否合理，直接影响到隧道工程施工的速度、安全、质量和环境。

隧道工程施工的方法是多种多样的 目前我们在公路、铁路、水底隧道中常采用的方法有：

1. 矿山法(爆破法)台阶法、全断面法、分部开挖、新奥法。
2. 掘进机法(无爆法)
3. 浅埋及软土隧道施工方法：
明挖法与浅埋暗挖法 地下连续墙法、盖挖法、盾构法和半盾构法；
4. 水底隧道施工方法(海峡、江河)
预制管段沉埋法(沉管法)盾构法。

目前在公路、铁路隧道施工方法中最多的是采用台阶法 其次是全断面法。在大断面隧道施工中 为保证施工安全采用单侧壁导坑(中隔壁法)和双侧壁导坑(眼镜法)施工机械的发展和开发，辅助工法的应用，使得施工方法向全断面法施工发展，特别是全断面法与超短台阶法相结合的方法是当前隧道施工方法发展的趋势。

(三) 隧道施工技术

隧道施工技术 主要是研究解决隧道工程各种施工方法所需的技术方案和技术措施 特殊地质、不良地质地段的施工手段 隧道工程施工过程中的爆破、衬砌、支护、通风、防尘、防瓦斯、防有害气体 及照明、水、风和电的作业方式及操作技术标准和要求 围岩变化的测量监控方法等等。施工技术是确保所选择的施工方法的实施，随机性强。

隧道施工技术应遵循的基本原则：

1. 隧道的围岩，是隧道的主要承载单元，在隧道施工过程中应充分保护和维持围岩，避免

过度破坏和损伤遗留围岩的强度，使暴露围岩尽量保留既有的状态。这是在施工技术上是最重要的基本原则。为此，在施工技术上体现了改进爆破技术，采用光面爆破新技术，及围岩测量监控措施，保证遗留围岩强度。

2.为了充分发挥围岩的结构作用，应容许围岩有可控制的变形。可从两个方面进行控制，一方面容许变形但达不到在围岩中形成的松弛量级，另一方面必须限制容许变形，使围岩不会过度松弛而丧失或大大降低承载能力，必须在施工过程中及时做好临时支护和初期支护以及衬砌与开挖保持合理的距离等措施。

在浅埋或地表下沉受到控制的条件下，要及时的控制变形和松弛及其发展是非常重要的。

3.变形控制主要是通过支护阻力的效应达到的。所以，在施工中必须合理地确定支护结构的类型 支护结构参与工作的时间 各种支护手段的相互配合 断面封闭时间，一次掘进长度等。

4.在隧道工程施工过程中 实地测量监控 及时提出可靠的、足够数量的测量信息 指导施工。测量的监控技术有仪器测量和观察测量等方法。

5.在选择支护手段时，原则上选择面积牢固与围岩及时紧密接触的设施和应变能力强的支护手段。因此 多采用喷混凝土、锚杆、金属网联合使用 有时地质条件特差的 喷混凝土与钢支撑或钢格栅等联合使用。在仰拱施工时，临时仰拱的支护也是很重要的，是不容忽视的支护手段。

6.隧道施工过程中，要特别注意围岩力学状态的不断变化的情况及过程。减少开挖暴露时间，从而减少因暴露时间过长而引起的围岩内的应力变化和围岩松弛，特别是在地下水丰富地段更应加以注意。

7.在任何情况下都要保证隧道断面能在较短的时间内闭合，这是很重要的原则。坚硬岩石隧道施工中 围岩的结构作用能“自封闭”而在软弱围岩隧道施工中 必须改变“重视上部，忽视底部”的观点 应尽量采用能先修筑仰拱 或临时仰拱 或底板的施工顺序 使断面及早封闭。

8.在二次衬砌的隧道施工中 为保证二次衬砌的质量和整体性 不论在任何情况下 衬砌的施工顺序都应采用先墙后拱的顺序。

9.隧道施工过程中，必须适应设计—施工检验—地质预测—测量反馈—修正设计的一体化的施工技术、管理系统 才能不断地提高和完善隧道施工技术。

(四) 隧道施工管理

隧道施工管理主要是如何按着施工组织设计的原则、施工方案和施工进度要求组织施工。包括技术管理，计划与进度的动态管理，施工质量管理，施工安全管理，施工成本控制与管理，通过科学的施工管理，才能实现施工组织设计的要求。

第二节 隧道工程施工与隧道施工成本的关系

一、隧道工程施工成本的概念

隧道工程施工成本是在施工过程中施工耗费的总和，以货币形式表现的称之为施工成本。总耗费主要是指人工的耗费、材料的耗费和机械设备及工具的耗费。概括为对施工资源的耗费，用货币的形式表现为人工费用、材料费用和机械费用（包括机械使用费和折旧费）。其特点

是隧道工程在施工过程中形成的。

二、隧道工程施工成本的构成

从隧道工程施工成本的概念及行业概预算编制规定出发，施工成本主要由两大费用组成即直接费和间接费。直接费主要包括人工费、材料费、机械费和其他直接费等，间接费主要包括管理费等。

三、影响隧道工程施工成本的因素

影响隧道工程施工成本的因素，据分析应从隧道施工过程中找出影响施工成本的因素。施工过程体现在施工方法、施工技术和施工管理等方面。有主观因素和客观因素两个方面 主观因素是人为的可以克服和改善的因素，客观因素是客观存在的人们是不可抗拒的因素。

主观因素表现为：

1. 施工方法的选择是否得当是否影响施工成本

例如 坚硬岩石选择全断面开挖 先墙后拱既能保证质量又可加快施工速度 可降低成本。软弱岩石不能选用全断面开挖方法，必须根据岩石条件和情况选择比较安全的方法如台阶开挖 否则会引起坍方，一方面影响工程质量和进度 另一方面又增加了施工成本。

2. 隧道开挖过程中的超开挖对施工成本的影响

隧道施工过程能否控制超开挖是影响施工成本的主要因素。超挖超过隧道施工允许的误差值（一般 10%）必须回填 回填数量越大 施工成本费用增加的越多。开挖值超过允许值时，必须在衬砌前予以处理 处理超开挖需要人工、材料 必然使施工成本费用增加。

3. 隧道施工过程中由于操作不当引起坍方，对施工成本的影响

在隧道施工过程中往往为赶进度，炸药用量太多或考虑不周造成的坍方，直接增加施工成本。因为坍方出现后必然影响施工进度。为赶进度必然增加资源，增加施工费用；清理坍方恢复正常施工 必然也要投入人力、材料、机械 从而使施工成本增加。

4. 支护混凝土的施工质量对施工成本的影响

支护混凝土包括模注混凝土和初期支护混凝土（喷混凝土等）。模注混凝土的强度必须保证 否则会引起掉拱事故 处理这类质量事故会大大增加施工成本。喷混凝土施工过程控制回弹量的技术措施不利时 会造成大量的回弹 浪费人工、材料和机械台班费用 使施工成本直接费用增加。

5. 施工方案对施工成本的影响。

一般我们在制订隧道工程施工方案时 是根据工期要求 决定进行现场施工的人工、机械和材料数量 以及采取的作业方式（即两班制或三班制）生产资源的投入多少影响施工成本的高低 因此 资源的优化组合是降低成本的关键。

6. 施工现场平面管理是否科学有序也直接影响隧道施工成本。施工现场是隧道施工的重要场所 由于隧道施工的特点 决定了施工现场平面管理的重要地位。施工现场管理混乱 施工就干扰大 不能充分发挥各工作面投入资源的工作效率 还有可能因施工干扰中断工作 使得工序施工不连续、工人施工不连续、机械施工不连续 从而降低人工、机械的工作效率 投入同量的资源 不能得到同量的产出 势必出现投入的多 产出的少 效益低 从而使施工成本增加。

7. 材料采用、供应、使用、管理对施工成本的影响。

隧道工程材料费用占直接费的 60% 左右，因此，材料成本的高低对施工成本的高低有决定性影响，事关重要。大批量材料的数量、质量的控制，材料采购成本及储存数量的控制，按消耗标准使用，科学管理杜绝浪费，才能做到使材料费用按照设计概（预）算要求使用，否则材料费用会大量增加，使施工成本大幅增加。

8. 间接费的控制对施工成本的影响。

影响间接费的主要因素是非生产管理人员和非生产车辆的多少。隧道工程项目部的非生产管理人员的素质高，降低做到一专多能，可减少非生产人员数量；项目部控制车辆的使用，可减少开支，降低施工成本。

客观因素影响隧道工程施工成本。

从隧道工程施工特点看，客观上存在着许多不可预见的风险，一旦出现就会使施工成本大大地增加。首先是隧道工程设计的地质、水文资料不全或不准确，造成施工过程中的塌方、地下水涌出等施工风险，处理这些出现的风险，必须要投入大量的人工、机械、材料，使施工成本超过设计概预算。如果是总价承包工程，这些风险要由承包方承担。否则，可以通过变更设计，修改设计概预算来弥补风险出现增加的施工成本。其次是隧道在施工过程中是动态的，地质的变化是常有的。因此，必须在施工过程中根据岩石性质的变化，修改衬砌的厚度。否则会因岩石比设计硬而衬砌厚度仍保持原设计厚度，使实际使用衬砌混凝土数量增加。或者因岩石比设计软而原设计衬砌厚度不够增加厚度使实际使用混凝土数量增加。混凝土数量增加，费用增加，意味着施工成本中的直接费增加。不管岩石如何变化，总是影响隧道断面的开挖尺寸，断面开挖要消耗火工材料和人工、机械台班，这都关系到直接费的增加。以上这些风险在施工中是不可避免的，也是客观存在的。

隧道工程施工过程中影响施工成本的因素主客观上都存在。因此，要求在隧道施工过程中控制上述的各种不利因素，尽量避免或采取各种技术措施将风险降低到最少的程度。

四、隧道工程施工与施工成本的关系

隧道工程施工包括施工方法 施工技术与施工管理 前面已叙述 三个方面。从影响施工成本各种因素的分析可看出施工方法、施工技术与施工管理存在的问题对施工成本中的直接费和间接费用影响是很重要的。隧道施工和隧道施工成本是互相依赖性和相互制约的。隧道施工过程中考虑的越细致、周密 那么预见性就越强 出现问题就能够及时处理 将隧道施工风险降低 损失减少到最低限度。隧道施工包括的三个方面 都不可缺少和忽视 必须从三个方面进行整体优化与控制 才可达到控制施工成本的目的。以最少的投入 获得最多的产出 取得隧道工程施工最好的经济效益。

第三节 隧道工程施工组织与管理的特点

隧道施工环境恶劣 在恶劣的环境 有限的施工空间 组织好综合作业 达到循环作业 减少施工干扰 减少风险 安全施工 减少投入资源 科学组织与管理事在必行。进行施工组织与管理的理念是 从隧道施工特点出发运用现代化管理理论、方法和手段 组织和优化资源 进行科学管理。

1. 建立正规循环作业

隧道施工过程中，规定各工序作业时间。各工序在规定作业时间内各自完成作业，保证工序

施工的不间断和连续性。

2. 确定多种作业的形式和关系

开挖与衬砌是平行作业 风、水、电的供应和维修与开挖、衬砌是平行作业 开挖、通风除尘、出渣运输是顺序作业等。只有明确多种作业的关系，才能在有限施工空间科学地组织综合作业的施工。

3. 根据隧道工程的长短和合同工期的要求组织多班作业（两班制或三班制）。多班作业是隧道施工空间有限，工期限制所决定的。组织多班作业必须完善班与班的交接班制度，尽量减少停工时间。

4. 建立健全现场施工调度系统

隧道施工空间狭窄、多工种综合施工 必然产生施工干扰 建立健全现场施工调度 统一指挥 协调、平衡施工过程中出现的矛盾 做到有序施工。

5. 建立动态组织与管理系统

隧道施工是动态的。因此，应根据施工的动态变化相应的修改和完善施工组织和管理。在施工过程中出现问题，要根据问题性质及时调整施工组织。如资源的增减，任务的安排都要及时调整，符合现场实际情况。那么，相应的管理就要跟上去。动态的组织与管理系统可保证隧道施工的动态变化 使得施工顺利进行。

6. 建立健全各种责任制度

责任制包括管理制度和岗位责任制。管理制度是规范施工人员的施工行为和协调施工人员之间关系的准则，岗位责任制度是规范个人参加施工行为的准则。管理制度和岗位责任制是统一的整体。根据隧道施工特点，建立健全各种责任制度是很重要的。多工种，多工作面，多种作业组织形式，同时在有限的空间，狭窄的工作面进行施工，必然产生施工相互干扰。因此，建立和规范施工人员施工行为的制度，可以明确责任，达到减少施工干扰和相互之间产生矛盾 保证施工进度、质量及施工安全并降低成本。

7. 加强施工过程中的分工协作

隧道工程施工是多工种作业的，工种之间有明确的分工还要有密切的协作。分工和协作，二者是密不可分的，只有二者紧密结合才能形成新的生产力。只分工不协作，各自为事，那么，就会一事无成。如开挖工作包括打眼—装药—爆破—通风排烟—出渣等五个工种组成。上道工序要为下道工序服务，也就是说上道工序不合格下道工序不能进行，这也是一种管理制度，它协调了相邻两工序之间的衔接关系，保证开挖循环的正常进行。否则，各行其事不考虑五个工种相互联接的关系（即协作的关系），就不能按着规定开挖循环时间完成一个循环的工作量，会直接影响施工进展。建立健全各种责任制对隧道工程施工管理显得特别重要。

第四节 隧道工程施工要点

隧道施工必须坚持的施工要点有：

1 施工过程中维护和保护围岩

隧道施工要穿过岩体，尽量做到不损伤或少损伤遗留围岩的固有支护能力，为此，通过采用机械开挖技术 无爆破 和控制爆破技术 光面爆破 控制装药量 周边眼加密 少装药或不装药），及各种技术措施、手段和方法，如采用临时支护、加固或预加固技术以及各种辅助施工技术增强围岩的自支护能力。

2.隧道圬工工程做到内实外美

隧道圬工工程是指混凝土、喷混凝土、干砌和浆砌工程。

内实关键是保证‘六密实’即混凝土捣固要密实、喷混凝土要密实、喷混凝土与围岩结合要密实、二次衬砌与初期支护要密实、喷混凝土与钢结构支护、围岩三者结合要密实、回填石料要密实。外美即混凝土外露表面要美。其中内实是关键。

3.隧道施工要重视环境

隧道施工环境包括内部环境和外部环境。内部环境指隧道施工作业的环境。由于隧道施工空间小，多工种同时施工对作业环境产生污染，直接危害施工人员的身心健康，因此，施工过程要不断改善作业环境。外部环境，是指隧道施工对周边环境的影响。如施工污水、弃渣处理，施工噪声扰民等。重视环境保护是社会进步的要求，环境技术是随着社会发展而发展的，在隧道施工过程中许多标准要求是根据环境保护的要求而制定的。

4.隧道施工是动态施工

隧道施工穿过山体，因此，隧道施工过程中的地质条件是不断变化的，其岩石的力学状态也是不断变化的，施工过程的地质不可能是一成不变的。要求我们在施工过程中采用各种不同的施工方法和技术，适应这种变化的状态。隧道施工决策都是建立在施工阶段的地质技术，对围岩的量测技术，及质量控制基础之上的，体现了动态施工的基本含义。

上述四个要点也是我们隧道工程施工的基本原则。

第二章 隧道工程施工方法及实例

第一节 隧道工程施工方法及施工工艺流程

一、隧道工程施工方法选择的原则

隧道工程施工最重要的是合理选择施工方法。在我国隧道工程 铁路、公路 施工实践中，积累了丰富的施工经验和理论，逐渐形成了具有中国特色的隧道施工方法体系。施工方法是多种多样的，目前常采用的是矿山法，矿山法也是爆破施工方法。但也有用无爆破的施工方法 即掘进机施工方法。如西康线秦岭隧道 西安到合肥的西合线上的桃花铺隧道 是我国第一次引进掘进机施工方法进行施工的隧道工程。

选择隧道工程施工方法的原则是 除了考虑隧道工程的地质条件外 还要强调施工方法必须符合快速、安全、质量及环境的要求。而且环境因素有时成为选择施工方法的决定性因素。如在地质条件适合的条件下选用大型的掘进机施工方法，这种方法机械化、自动化程度高，它可满足快速、安全、质量的要求 但是由于洞口现场平面狭窄 无法组拼大型掘进机的环境 限制了大型掘进机的施工方法，这时环境决定了施工方法的选择。

二、隧道工程施工方法选择应考虑的基本要素

选择隧道工程施工方法应考虑的基本要素有：

1 施工条件

施工条件包括施工队伍的施工能力，施工人员素质，及施工管理水平，装备水平。在选择施工方法时，应充分考虑这个因素。如隧道地质条件允许采用全断面开挖法，但施工装备满足不了。一般全断面开挖选用钻孔台车打眼一次性钻孔完毕，若没有这种装备，最好选用短台阶开挖法。

2.地质条件

地质条件包括岩石级别、地下水及不良地质现象等，岩石级别是隧道工程围岩性质的综合判断，对施工方法的选择起着重要的甚至决定性的作用。在隧道施工过程中岩石的级别发生变化时 必须变换施工方法。按 III—IV 岩石选择全断面结合超短台阶法的施工方法，但在施工过程中，岩石级别变为 II 级，这时施工方法相应地改变为上导坑、中槽马口开挖方法。

3.隧道断面积

隧道断面尺寸和形状，对施工方法的选择有一定的影响。铁路单线和双线隧道、公路的双车道隧道，越来越多地选择采用全断面法和台阶法施工。目前，隧道断面有向大断面方向发展的趋势 如公路隧道修建 3 车道 至 4 车道隧道，水电工程中大断面洞室更是屡见不鲜。所以施工方法必须适应其发展。大断面隧道工程施工中，目前一般是先采用各种方法开挖小断面导坑，再扩大形成全断面的施工方法。

4.埋深

隧道埋深与围岩的初始应力场及多种因素有关。一般将埋深分浅埋和深埋两类，浅埋又分为超浅埋和浅埋两类。在同样的地质条件下，由埋深不同施工方法有很大差别。一般浅埋隧道往往采用先将地面挖开，修筑完成支护结构后再回填土石的回挖施工。如隧道进出口埋深比较浅时常采用明挖施工。深埋隧道则采用不挖开地面的暗挖法施工，即在地下开挖及修筑支护结构。

5.工期

隧道工程合同工期的要求，在一定程度上会影响基本施工方法的选择。隧道工程施工中，工期决定了在均衡生产条件下，对开挖衬砌、运输等综合生产能力的基本要求，对施工方法，施工均衡进度，机械化水平和管理模式的要求。相同地质条件下，工期短的隧道要比工期长的隧道机械化程度高，管理更加科学、严格。

6.环境条件

隧道施工会对周围环境产生爆破振动，地表下沉，施工噪声，地下水的变化，绿色覆盖的变化等不良影响，这时，环境条件将成为选择隧道施工方法的重要因素之一。特别是在城市隧道施工，环境条件成为选择施工方法的决定因素。

三、隧道工程施工常遇到的问题

目前隧道施工基本上采用矿山法修筑，出现的问题表现如下：

- 1.施工阶段地质判断技术不完善，缺乏有效的判断方法和手段。如地质超前预报技术和设备，还没有推广和应用。
- 2.在施工过程中，人们没有牢固树立“保护围岩、爱护围岩”的观点和理念，造成不能有效地控制对遗留围岩的损伤和松弛。如，为加快施工进度，在掘进时装药不按爆破设计用药量装药，随意增加药量，使遗留围岩损伤严重，或初期支撑不在要求时间内支护完毕，使得遗留围岩暴露时间过长，使围岩松弛。这些现象都是造成隧道施工塌方的隐患。
- 3.隧道施工方法工厂化程度不高。特别是软弱破碎围岩的施工方法的工厂化程度更加有待提高。工厂化程度可使施工快速，及时使围岩形成自应力，有效避免塌方。
- 4.隧道圻工工程“重外美，轻内实”，圻工结构存在严重的隐患。如衬砌厚度不够，欠控不处理，使得衬砌厚度严重不足；衬砌背后填充未按规定施工，靠近衬砌先用浆砌片石填充，余下超挖空间再用干砌片石填充，因此，留下空洞；衬砌初期开裂普遍存在；拱脚、基底清理不彻底，灌注混凝土；拱部和边墙接触不密，形不成衬砌整体作用，基底与隧道铺底工程分离，运营后出现翻浆、冒泥现象等。
- 5.隧道施工过程中，地下水处理始终是薄弱环节，防止工程施工质量存在问题，造成隧道成洞地段衬砌渗水、洞水现象常有发生。
- 6.施工阶段工程质量的检测体制不完善，更重要的是缺乏有效的检测手段和方法。贯彻ISO9000质量管理标准流于形式，施工操作不按作业指导书去做，甚至有的不编写作业指导书。
- 7.环境意识薄弱。洞内施工作业环境欠佳，施工高压风、水管漏水，通风管漏风，粉尘含量超过标准，机械、车辆废气超标准等。洞外控制对周边环境和结构物的影响措施不利。
- 8.参加施工人员（技术人员、管理人员及职工）的应变能力不强，没有对不良施工灾害的预测，一旦出现施工灾害，有时束手无策。
- 9.没有真正地实现隧道的动态施工和动态管理。如隧道施工的地质条件经常变化，如何

根据施工实际情况，改变施工方法适应变化的地质条件，同时相应的改变施工组织适应施工方法并加以控制做的不够。

10. 隧道洞内施工干扰普遍存在，如何统一调度，缺少现代化的管理方法和手段。

从上述存在的问题衡量我国的施工技术水平和管理工作，与世界一些发达国家相比，还存在差距。但这些问题存在是多方面的原因，有设计、施工、业主、监理方面的原因。解决好这些问题，才能提高隧道施工技术和施工管理水平。

四、隧道工程施工方法及工艺流程

隧道施工方法的分类各有不同，大体有以下几种：

(一) 按是否爆破开挖分

隧道施工按是否爆破开挖可分为爆破法和无爆破法施工。

1. 爆破法施工主要是指常用的矿山法

在矿山法中，坑道开挖后的支护方法，一般分为钢木构件支撑和锚杆喷射混凝土支护两类。作为隧道施工方法，习惯上将采用钻爆开挖加钢木构件支撑的施工方法，称为“矿山法”。

矿山法是人们在长期的施工实践中发展起来的。它是以木或钢构件作为临时支撑，待隧道开挖成型后逐步将临时支撑撤换下来而代之以整体式厚衬砌作为永久性支护的施工方法。

木构件支撑由于其耐久性差和对坑道形状的适应性差，支撑撤换工作较麻烦和不安全，且对围岩有所扰动，因此目前已很少采用。钢构件支撑具有较好的耐久性，可采用装配式周转重复使用，及对坑道形状的适应性较好等优点，施工中亦可以不予撤换，并更为完全可靠。钢木构件支撑类似于地上的“荷载—结构”力学体系。它作为一种维持坑道稳定的措施是很有效的，容易被施工人员理解和掌握。因此，这种方法常被应用于不便采用锚喷支护的隧道中，或处理坍方等。

矿山法施工的基本原则是：少扰动、早支撑、快衬砌。

(1) 少扰动，是指在进行隧道开挖时，要尽量减少对围岩的扰动次数、扰动强度、扰动范围和持续时间。采用钢支撑，可以增大一次开挖断面的跨度，减少分部开挖次数，采用预裂爆破技术，从而达到减少对围岩的扰动次数。

(2) 早支撑，是指开挖坑道后应及时施作临时构件及支撑，使围岩不致因变形松弛过度而产生坍塌失稳，并能承受围岩松弛变形产生的压力—早期松弛荷载。并进行定期检查支撑的工作情况，若发现变形严重或出现损坏征兆，应及时增设支撑予以加固和加强。作用在临时支撑上的早期松弛荷载大小，可比照设计永久衬砌的计算围岩压力大小来确定。临时支撑的结构设计，亦采用类似于永久衬砌的设计计算方法，即结构力学方法。

(3) 快初砌，指拆除临时支撑时要及时修筑永久性混凝土衬砌，并使其能尽早承载参与工作。若采用的是钢支撑又不必拆除，或无临时支撑时，亦应尽早施作永久性混凝土衬砌，防止坑道壁裸露时间过长风化侵蚀围岩、强度降低、产生变形过大等情况的发生。

矿山法施工工艺流程图见图 2-1。

新奥法。新奥法即新奥地利隧道施工方法的简称，原文是 *New Austrian Tunneling Method* 简称为 NATM。新奥法概念是奥地利学者腊布希维兹 (L. V. Rabcewicz) 教授于 20 世纪 50 年代提出的。它是以隧道工程施工经验和岩体力学的理论为基础，将锚杆和喷射混凝土组合在一起作为主要支护手段，通过监测控制围岩的变形，充分发挥围岩的自承能力的施工方法，经过奥地利、瑞典、意大利等国的许多隧道与地下工程实践和理论研究及科学论证。于 20 世纪 60 年代取得专利权并正式命名为新奥法 (NATM)。之后新奥法在欧洲、美国和日本等国家许多隧道与地下

工程中获得极为迅速的发展，已成为现代隧道工程新技术的标志之一。我国近 30 年来 通过 科研、设计、施工相结合 在 100 余座公（铁）路隧道工程修建中，根据中国的特点成功地应用了新奥法 取得了较多的经验 积累了大量的数据 现已进入普遍推广使用阶段。目前 新奥法几乎成为在软弱的破碎围岩地段修建隧道的一种基本施工方法。

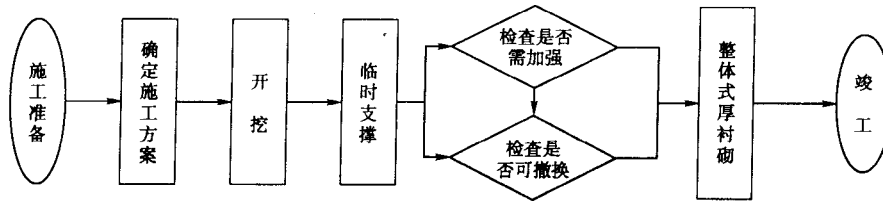


图 2-1 矿山法施工工艺流程图

新奥法与传统的矿山法相比，不仅仅是手段上的不同，更重要的是工程理念、力学概念和设计原理的不同，人们对隧道及地下工程问题进一步的认识和理解。新奥法是一个体现应用岩体动态性质较完整的力学概念，科学性较强的隧道施工方法。因而不能单纯地将它仅仅看成是一种施工方法或是一种支护方法 也不应片面理解仅用锚喷支护就认为是采用新奥法 新奥法的内容及范围相当广泛、深入 它既包括隧道工程设计 又包括隧道工程施工 还包括隧道和地下工程的科学范畴的大系统工程。新奥法应用岩体力学的理论，以维护和利用围岩的自承能力为基点，采用锚喷为主要支护手段，达到及时控制围岩的变形和松弛，使围岩亦成为支护体系的组成部分，并通过 对围岩和支护结构的测量、监控来及时而正确的指导隧道和地下工程设计施工的方法。

由于新奥法的应用和发展，使隧道及地下工程理论进入现代理论的新领域和高水平，从而使隧道及地下工程的设计和施工更符合地下工程实际，将设计理论—施工方法—结构（体系）工作状态 结果 做到一致 因此 新奥法已在世界范围内得到广泛的应用。

2. 无爆法施工

隧道工程无爆破法施工，即盾构法及掘进机开挖。这种方法施工速度快，机械化、自动化程度高，施工安全。但要求的技术水平高，施工人员的素质高，施工成本高。目前我国还未普遍推广，我们将在本章第三节专门介绍。

（二 按衬砌的施工顺序不同分

矿山法按衬砌的施工顺序不同分为先墙后拱法和先拱后墙法。

1. 先墙后拱法（又称为顺作法）

它通常是在隧道开挖成形后，再由下至上施工模筑混凝土衬砌。先墙后拱法施工速度较快，施工各工序及各工作面之间相互干扰较小，衬砌结构的整体性较好，受力状态也比较好。

2. 先拱后墙法（又称为逆作法）

它是先将隧道上部开挖成形并施工拱部衬砌后，在拱圈的掩护下面再开挖下部并施工边墙衬砌。先拱后墙法施工速度较慢，上部施工较困难。但是当上部拱圈完成之后，下部施工就比较安全和快速。先拱后墙法施工衬砌结构的整体性较差，受力状态不好。并且拱部衬砌结构的沉降量较大，要求的预拱度较大，增加了开挖工作量。

施工流程见图 2-2。图 2-2 中 a)是先墙后拱法施工 b)、c)、d)为先拱后墙法施工。

（三 按隧道工程开挖方法不同分

按着隧道工程开挖方法的不同，可分为明挖法和暗挖法。

暗挖法施工的特点是：施工时全部在地下进行，即在地下开挖坑道、支撑和衬砌修筑隧道

的方法。开挖方法及工艺流程列于表 2-1。

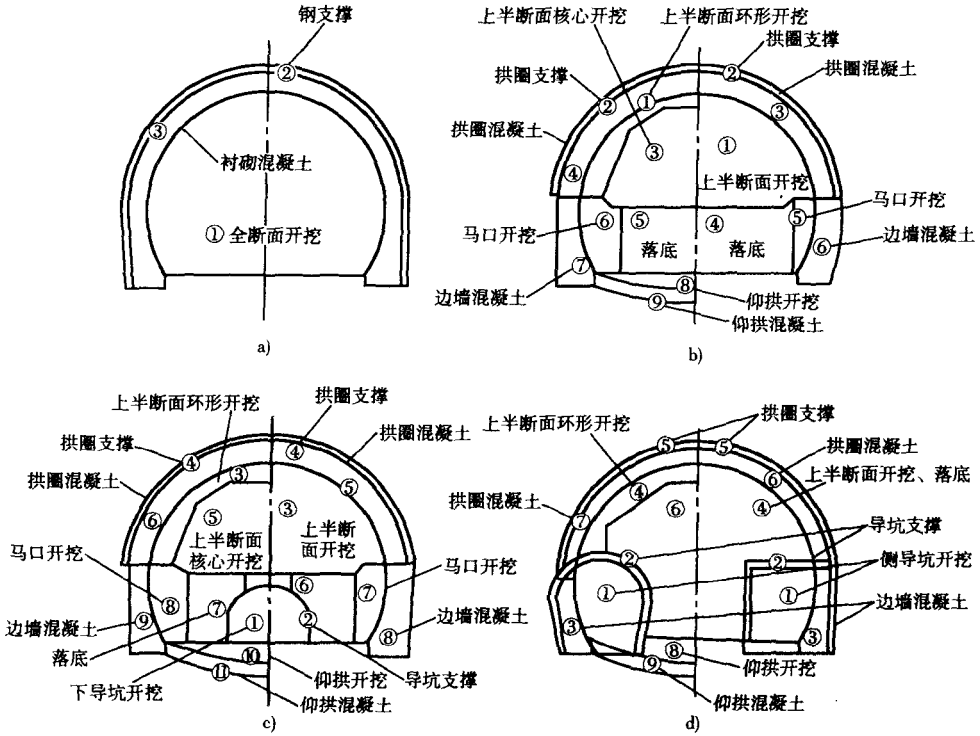


图 2-2 传统的矿山法施工顺序

a)全断面法 ; b)上半断面超前法 ; c)下导坑超前上半断面施工法 ; d)侧导坑超前上半断面施工法
开挖方法及工艺流程

表 2-1

开挖方法名称	图 例	施工工艺流程
全断面法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 全断面开挖 2. 锚喷支护 3. 灌筑混凝土衬砌
台阶法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 上半部开挖 2. 拱部锚喷支护 3. 拱部衬砌 4. 下半部中央部开挖 5. 边墙部开挖 6. 边墙锚喷支护及衬砌
台阶分部法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 上弧形导坑开挖 2. 拱部锚喷支护 3. 拱部衬砌 4. 中核开挖 5. 下部开挖 6. 边墙锚喷支护及衬砌 7. 灌筑仰拱

开挖方法名称	图 例	施工工艺流程
上下导坑法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 下导坑开挖 2. 上弧形导坑开挖 3. 拱部锚喷支护 4. 拱部衬砌 5. 设漏斗, 随着推进开挖中核 6. 下半部中部开挖 7. 边墙部开挖 8. 边墙锚喷支护衬砌
上导坑法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 上导坑开挖 2. 上半部其它部位开挖 3. 拱部锚喷支护 4. 拱部衬砌 5. 下半部中部开挖 6. 边墙开挖 7. 边墙锚喷支护及初砌
单侧壁导坑法 (中壁墙法)		<ol style="list-style-type: none"> 1. 先行导坑上部开挖 2. 先行导坑下部开挖 3. 先行导坑锚喷支护钢架支撑等, 设置中壁墙临时支撑(含锚喷钢架) 4. 后行洞上部开挖 5. 后行洞下部开挖 6. 后行洞锚喷支护、钢架支撑 7. 灌筑仰拱混凝土 8. 拆除中壁墙 9. 灌筑全周衬砌
双侧壁导坑法		<ol style="list-style-type: none"> 1. 先行导坑上部开挖 2. 先生导坑下部开挖 3. 先行导坑锚喷支护、钢架支撑等, 设置临时壁墙支撑 4. 后行导坑上部开挖 5. 后行导坑下部开挖 6. 后行导坑锚喷支护、钢架支撑等, 设置临时壁墙支撑 7. 中央部拱顶开挖 8. 中央部拱顶锚喷支护、钢架支撑等 9、10. 中央部其余部开挖 11. 灌筑仰拱混凝土 12. 拆除临时壁墙 13. 灌筑全周衬砌

注:①图例中省略了锚杆;

图中所列方法为基本开挖方法, 根据具体情况可作适当变换。

以下主要介绍暗挖法修筑山岭隧道的施工方法。

1. 全断面一次开挖法

全断面一次开挖法就是将全部设计断面一次开挖成型, 再修筑初砌, 如图 2-3 所示。一般适用于 IV ~ VI 类围岩, 并配有钻孔台车和高效率装运机械的石质隧道。采用深孔钻爆, 深度

可取 3~3.5m。全断面一次开挖法主要工序是：使用移动式钻孔台车，首先全断面一次钻孔，并进行装药连线，然后将钻孔台车后退到 50m 以外的安全地点再起爆，使一次爆破成型。出渣后钻孔台车再推进至开挖面就位，开始下一个钻爆作业循环，同时进行先墙后拱衬砌。全断面一次开挖法具有以下主要优点：

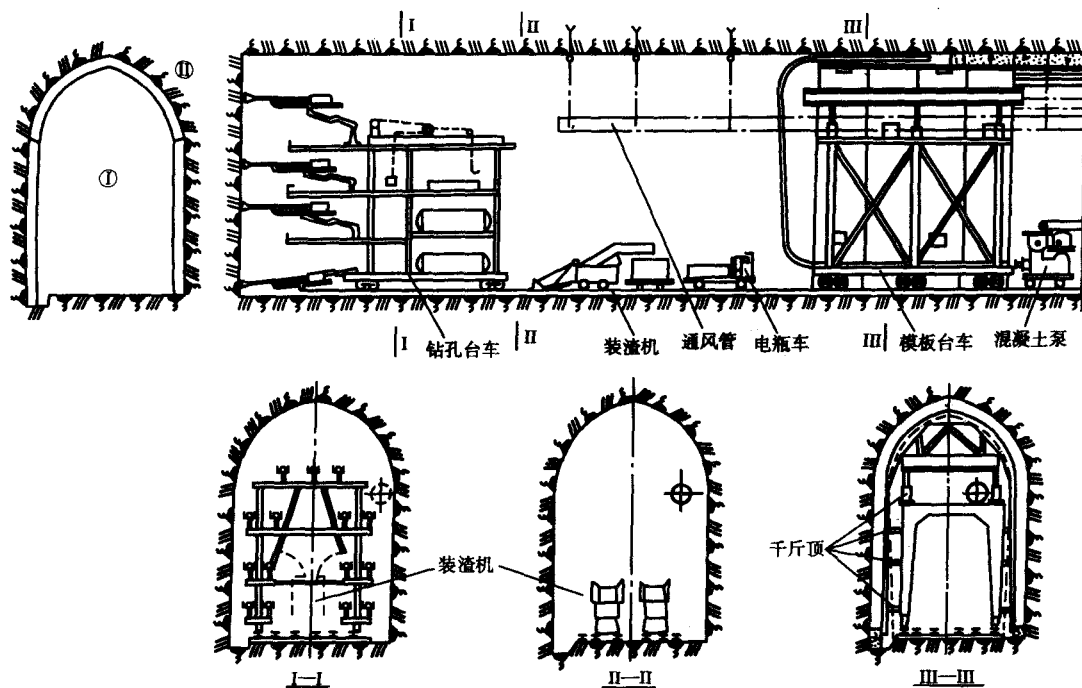


图 2-3 全断面一次开挖法（此图为有轨运输）

- (1) 施工工序较少 互相干扰较少 便于施工组织与管理；
- (2) 开挖工作面较大 钻爆施工效率较高 可以采用深眼爆破的方法 加快掘进速度；
- (3) 道坑空间较大 便于采用先进的大型施工机械设备 实现综合机械化施工 从而可以提高劳动生产率 劳动条件好 可以减轻工人劳动强度 降低工程造价 施工速度快 质量好 是今后的发展方向。

目前 全断面一次开挖法是隧道工程施工技术的一个发展方向 但是在推广使用这种方法时，要注意下面几个问题：

- (1) 机械设备要配套 如钻眼、装渣等主要机械和相应的配套机具（钻杆、斗车、调车设备等）在型号、规格尺寸、性能和生产能力上都要相互配合 施工工作才能环环紧扣 不致发生彼此互相受到牵制而影响掘进，并应注意经常检查维修机械设备，应备有足够的易损零件部件，以保证各项施工工作进行；
- (2) 加强各种辅助作业和设备的管理 如三管两线（即高压风管、高压水管、通风管、电线及运输路线），要保持技术良好状态；
- (3) 加强对工程地质和水文地质的调查 对不良地质情况要及时预报、量测 分析研究 以防影响施工安全、工程建设进度等；
- (4) 加强和重视施工操作人员的技术培训，使其能熟练掌握各种机械设备和推广新技术，不断提高工效 改进施工管理 包括隧道施工的计划管理 技术管理 质量管理 经济管理 安全管理等）；

(5)全断面开挖法选择支护型式时 应根据围岩类别和具体的工程地质、水文地质条件、使用要求、埋置位置及施工条件等,通过工程类比和结构计算综合分析确定。必要时,可通过试验、论证来确定 隧道衬砌支护型式一般有整体式衬砌与复合式衬砌、直墙式衬砌与曲墙式衬砌、砌体衬砌与拼装式衬砌等)

2.台阶开挖法

台阶开挖可以说是全断面开挖法的变化方案,即是将设计断面分成上半部断面和下半部断面两次开挖成型;或采用上弧形导坑超前开挖和中核开挖及下部开挖(即台阶分部开挖法)如图 2-4所示。台阶法开挖便于使用轻型凿岩机打眼,而不必使用大型凿岩台车。在装渣运输、衬砌修筑等方面 则与全断面法基本相同。

在上部断面以弧形导坑领先 2.5~2m,下部断面以一个正台阶垂直挖到底,一次爆破,利用渣堆钻眼,机械装渣运输,先墙后拱衬砌。采用正台阶法开挖关键问题是台阶的划分形式。台阶划分要求尽量做到爆破后扒渣量少,钻眼和出渣干扰少。因此,一般将设计断面划分成 1~2 个台阶进行分部开挖(如图 2-5、图 2-6所示)。台阶法适用于 IV~II 类围岩。

1)台阶开挖法优缺点

- (1)台阶开挖法具有较大的工作空间和较快的施工速度,但上下部作业有相互干扰影响;
- (2)台阶开挖法有利于开挖面的稳定,尤其是上部开挖支护后,下部断面作业就较为安全。但台阶开挖增加了对围岩的扰动次数,应注意下部作业对上部稳定性产生的不良影响。

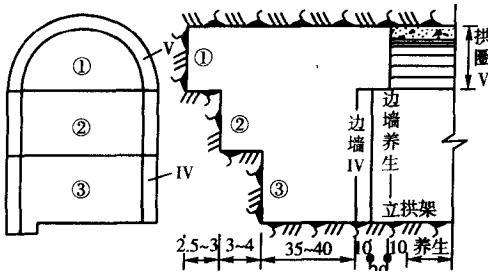


图 2-5 正台阶开挖法
(尺寸单位:m)

贯通 再进行下半部断面的开挖;

(3)上部开挖 因临空面较大 易使爆破面石渣块过大 不利于装渣 应适当密布中小炮眼,但采用先拱后墙法施工时 对于下部开挖法 必须控制开挖厚度 合理地利用药量 并应采取防护措施,避免损伤拱圈及确保施工安全;

(4)下部开挖时 应注意上部的稳定。若围岩稳定性较好 则可以分段序开挖 若围岩稳定性较差 则应缩短下部掘进循进尺 若围岩稳定性很差 则应左右侧互相错开施工 或先拉中槽后挖边帮;

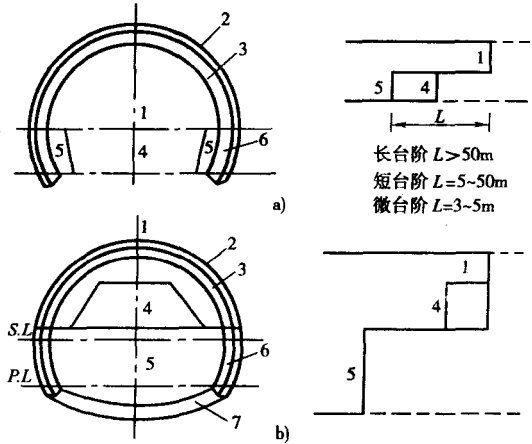


图 2-4 台阶及台阶分部开挖法(均省略了锚杆)

图 a)中:1-上半部开挖;2-拱部锚喷支护;3-拱部衬砌;4-下部中央部分开挖;5-边墙部分开挖;6-边墙锚喷支护及衬砌

图 b)中:1-上弧形导坑开挖;2-拱部锚喷支护;3-拱部衬砌;4-中核开挖;5-下部开挖;6-边墙锚喷支护及衬砌;7-灌注仰拱

2)采用台阶法开挖应注意事项

(1)台阶数不宜过多 台阶长度要适当 并以一个台阶垂直开挖到底,保持平台长度 2.5~3m 为宜,易于掌握炮眼深度和减少翻渣工作量,装渣机应紧跟开挖面,减少扒渣距离以提高装渣运输效益;

(2)注意妥善解决上、下半部断面作业的相互干扰的问题,即应进行周密的施工组织安排,劳动力的合理组合等。对于短隧道,可将上半部断面先

(5)采用钻爆法开挖，应采用光面爆破或预裂爆破技术，尽量减少扰动围岩的稳定性。

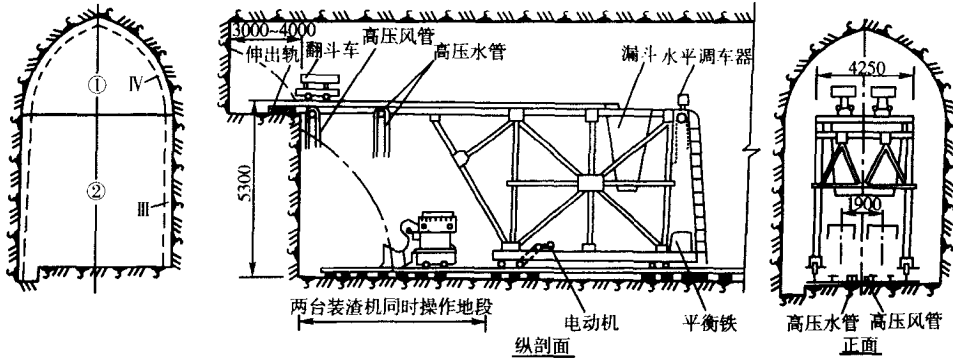


图 2-6 正台阶悬臂工作车开挖法 (尺寸单位: mm)

3. 上下导坑先拱后墙法

在松软地层修建隧道时，应采用台阶分部开挖法，适用于 II ~ III 类围岩或一般土质围岩地段。一次开挖的范围宜小，而且要及时支撑与衬砌，以保持围岩的稳定。在松软地层开挖隧道，一般宜采用先拱后墙法。上下导坑先拱后墙法的基本要求是：先将上部断面开挖成型，随即浇筑拱圈衬砌混凝土，并须待拱圈混凝土达到设计强度 20% 之后，方可进行下部断面开挖。在拱圈的保护下开挖下部断面及修建边墙、仰拱，其施工程序如图 2-7 所示。

显然 分部开挖法是将隧道断面分部开挖逐步成型，且一般将某一部分超前开挖，故称为导坑超前开挖法。常用的有上下导坑法、上导坑法、单侧壁导坑法、双侧壁导坑法等。

1) 分部开挖法优缺点

(1) 分部开挖减小了每个坑道的跨度，有利于增强坑道围岩的相对稳定性，易于进行局部支护。因此，它主要适用于软弱破碎围岩或设计断面较大的隧道施工；

(2) 采用导坑超前开挖，有利于提前探明地质情况，便于及时处理或变更施工手段等；

(3) 其缺点是分部开挖法作业面较多，各工序相互干扰较大，增大施工组织和管理难度。分部钻爆掘进，增加了对围岩的扰动次数，不利于围岩的稳定。若采用的导坑断面过小，则会使施工速度减慢而影响总工期等。

2) 分部开挖法应注意的事项

(1) 因工作面较多，相互干扰大，应注意组织协调，实行统一指挥；

(2) 应特别注意加强对爆破开挖用药量的控制，尽量减少对围岩的扰动而影响其稳定性；

(3) 应尽量减少分部次数，尽可能争取大断面开挖，创造较良好的地下施工条件；

(4) 凡下部开挖，均应注意上部支护或衬砌结构的稳定性，尤其边帮开挖时应减少对上部围岩、支护、衬砌的扰动及破坏等。

4. 大断面隧道施工方法

公路隧道施工方法要根据断面形状、隧道长度、要求工期、地质条件、涌水量、周围环境等，综合确定。二车道的隧道一般选用台阶法。三车道以上因断面大而且是扁平型，而扁平断面不能长时间的围岩暴露，开挖后要及早用临时仰拱封闭。由此，在选用施工方法时注意以下几点：第一 地质、地形条件。如洞口段、埋深浅地段、易变形、地质状况不佳等；第二 是否有限制条件。如地表面下沉、地基承载力小；第三 尽量采用避免围岩松弛的施工方法，必须时要与辅助工法配合。

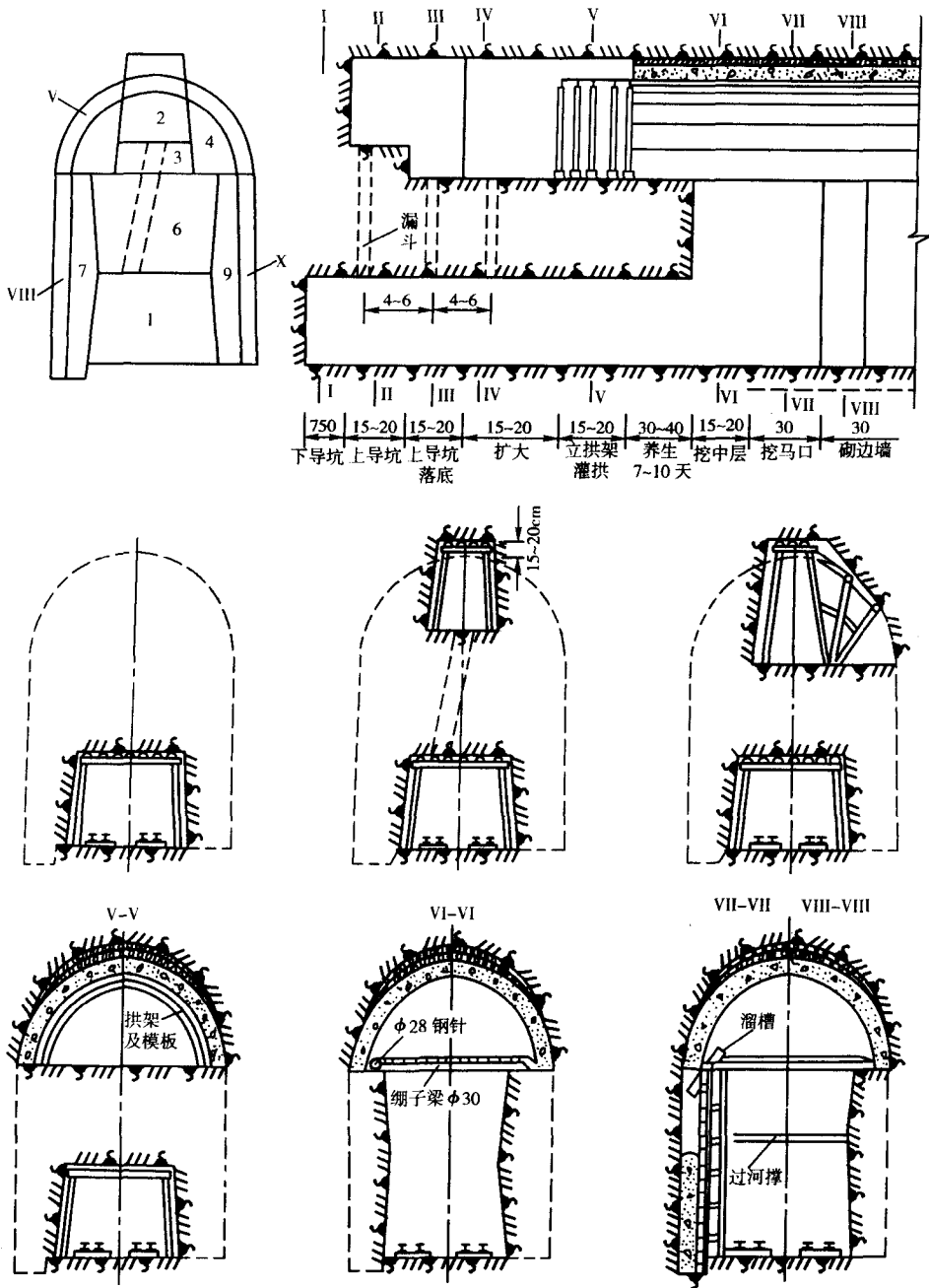


图 2-7 上下导坑先拱后墙法 尺寸单位:m)

从目前的施工技术水平出发，适合大断面开挖的施工方法主要有：

- (1)上半断面超前短台阶法（见图 2-8a）
- (2)上半断面临时的闭合短台阶法 见图 2-8b)

上半断面施工方法采用的较多，在大部分围岩条件下都可使用。

- (3)中隔壁法 见图 2-8c)

图 2-8 中 表示开挖顺序。图 2-8c) 表示的施工工艺流程适用于掌子面岩石不稳