

绪 论

公路是国民经济的重要命脉，由于其特有的灵活性和优越性，发挥着其他运输方式不可替代的作用。公路建设又是国家最主要的基础产业之一，它的迅速发展，对于促进国民经济的发展，拉动其他相关产业发展具有非常重要的意义。公路隧道是公路工程结构的重要组成部分之一，本书主要介绍公路隧道施工技术知识。

一、公路隧道的作用

我国地域辽阔，多山岭重丘，山区公路建设任务十分繁重。过去修筑低等级公路，大都采用盘山绕行或高填深挖的做法，很少考虑修建隧道。尤其是在山峦耸立、地形起伏多变、峡谷深涧、线形蜿蜒曲折的地区，路线常以沿山坡依地形盘山绕行，但往往更为合理的方案应是修建隧道穿行。因为修建隧道可以缩短公路里程，改善线形和交通运输条件，从而提高车速，并能保护国土环境等。可是，由于受资金限制及其他因素影响，我国在 80 年代以前的公路建设中很少修建隧道。在许多越岭路段，本来打一个不太长的隧道就能穿过，却往往习惯于用较大纵坡绕行和展线去翻越垭口。这样既增长了公路里程，又降低了路线技术等级，并增大了投资及养护费和运输费用。今后，在新建和改建公路中，对于那些地形和地质条件适宜修建隧道的山区公路越岭路段，经调查研究、分析论证、工可调查、技术经济比较，若设置隧道能较多地缩短路线里程，提高公路技术标准，则应优先考虑修建隧道。这样尽管一次性投资较多，但是，由于缩短了营运里程、改善了交通运输条件，在较短时期内可收回投资，经济效益和社会效益都是十分显著的。

随着我国改革开放不断深化，国民经济蓬勃发展，公路客货运输量大幅度增长，公路特别是干线公路通行能力不足的矛盾日益突出。因此修建高等级公路和扩大干线公路的通行能力，已成为今后一个时期公路建设的重中之重。

在山岭重丘地区修建高等级公路，为缩短公路里程，改善线形及环境保护，昔日那种“逢山尽量绕着走”的做法，将被公路隧道代替。隧道既能保证最佳道路线形便利行车，又可有效防止山地陡坡的滚石、泥石流等自然灾害，提高了行车的安全性和可靠性，同时又能与当地环境相协调及保全自然景观。

我国在改革开放以来，特别是“八五”以来，公路建设取得了长足发展，通车里程大幅度增加，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中国大地上形成。公路事业的大发展，为振兴经济，提高全国各族人民的物质文化生活水平，起到了极大的推动作用。近几年我国在高等级公路建设中，已建成千米以上的长大隧道 40 余座，还有一些长大隧道正在建设中。为了保持国民经济的持续、快捷、健康发展，为了扩大内需、加快基础设施建设，为了实施西部大开发战略，我国加大了对公路建设的投入，迎来了公路建设的又一个春天。因此，今后隧道修建将会愈来愈多，以充分发挥隧道的重要作用。

二、公路隧道施工方法

隧道施工方法是指：隧道开挖、支护与量测方法、施工技术和施工管理的总称。

根据隧道穿越地层的不同地质条件和社会生产工业化的发展，公路隧道施工方法分为以下几类：

1. 山岭公路隧道施工方法
 - 1) 矿山法(钻爆法):
(1) 传统矿山法 ;(2) 新奥法。
 - 2) 掘进机法。
2. 浅埋及软土隧道施工方法
 - 1) 明挖法与浅埋暗挖法；
 - 2) 地下连续墙法；
 - 3) 盖挖法；
 - 4) 盾构法或半盾构法。
3. 水底(江河、海峡)隧道施工方法
 - 1) 预制管段沉埋法(沉管法)；
 - 2) 盾构法。

隧道施工方法的选择 主要依据工程地质和水文地质条件，并结合隧道断面尺寸、长度、衬砌类型、隧道的使用功能和施工技术水平等因素综合考虑研究确定。

隧道施工技术 主要研究解决各种隧道施工方法所需的技术方案和措施，隧道穿越特殊地质和不良地质地段时的施工手段，隧道施工过程中的通风、防尘、防有害气体及照明，风水电作业的方式和围岩变化的量测监控方法等。

隧道施工管理 主要解决施工组织设计(含施工方案选择、施工场地布置、施工技术措施、施工进度控制、材料供应、劳力和机具安排等)和施工中的技术管理、计划管理、质量管理、经济管理、安全管理等。

本书将系统介绍公路隧道构造、公路隧道施工方法，重点是新奥法隧道设计与施工、施工技术和施工管理等方面的专业知识及技能。

由于隧道工程遇到的地质条件复杂性及多变性，加之地质勘探的局限性，因而在隧道施工过程中经常会遇到地质突变情况，意外塌方或涌水等问题，使原制定的施工方案、技术措施和进度计划等也必须随之变更。因此，在隧道施工中应详细制定出灵活多变实用的隧道施工方案，以适应客观条件的变化，及时地正确处理隧道施工中所遇到的千变万化的各种实际问题。

三、公路隧道发展与展望

在新世纪里 随着世界科学技术和经济的发展 交通运输、水利、水电、采掘、城市地下交通及空间利用等，对隧道工程在数量、质量和难度上提出了更高的要求。大规模的地下工程、公(铁)路隧道的修建，大大促进了隧道施工技术的进步。总结工程实践经验，随着岩石力学的迅速发展，导致了现代支理论论的建立，在此基础上产生了先进的新奥法、挪威法及浅埋暗挖法等施工方法；用现代技术装备的掘进机和盾构能够适应从坚硬岩层到软土含水地层的各种掘进条件，其可靠性、有效性、耐久性、机动性及掘进高速度，使其在隧道施工中得到广泛应用；冲击钻头的改进及全液压钻孔台车和液压衬砌台车的出现、大能力装渣机、运渣设备的开

发，新型爆破器材的研制及爆破技术的完善、围岩受力条件改善和支护技术的进步等，极大地改善了隧道施工环境和提高了掘进速度，使钻孔爆破法掘进技术得到更新；同时，水底沉埋隧道施工技术的发展为穿越江河、海湾提供了新的有效手段。

新中国成立以前，我国已建隧道工程规模较小，施工技术和管理水平落后。新中国成立后，随着各项社会主义建设事业的发展，铁路修建了大量隧道工程，施工技术有了很大提高，但公路隧道修建较少。在改革开放 20 余年来，随着公路建设的发展，特别是高等级公路的加速发展，我国公路隧道在数量与规模上有了很大发展，施工技术有了很大提高。目前，隧道工程矿山法施工中，已较普遍采用了新奥法；岩石隧道施工中采用钻爆法掘进，并开始采用先进高效的掘进机施工；城市道路浅埋隧道明挖或盖挖法施工中开始使用地下连续墙，暗挖施工时采用的盾构法和浅埋暗挖法，都已具有了较高的技术水平。我国也是沉埋修建水底隧道座数较多的国家之一，据统计，目前我国已建成铁路隧道数量已超过 4 000km，居世界第一位。1995 年开始修建的秦岭特长隧道（长 19.45km），在我国隧道修建技术上取得了新的突破。20 世纪后半期隧道修建技术与现代化管理方法的发展，为今后修建长大公路隧道及克服各种复杂困难条件的能力奠定了坚实的基础。我国幅员广大山多且地质复杂、的发展中国家，城市化交通处于起步阶段，大规模的公路交通事业方兴未艾，隧道事业必将有更大的发展。

随着隧道施工技术水平的提高，为修建长大隧道和地下工程奠定了基础。同时，大规模地下工程建设也必将对公路隧道施工技术提出新的更高的要求。为适应今后公路隧道工程大规模发展的需要，展望公路隧道的发展方向，公路隧道施工应重点加强开展以下方面的工作：

（1）加强全国隧道工程界学术交流

各级交通管理部门应重视隧道施工的经验交流，加强公路隧道工程设计、科研、施工和监理部门之间的密切配合，促进隧道工程发展。

（2）加强对公路隧道工程技术人员的培养

因为公路隧道建筑是一门综合性学科，需要具备较多的基础知识和专业知识，如土木工程、交通工程、风水电气、消防急救、防排水、质量监控、施工方法、施工技术、施工管理、机电电器、空气动力学、岩土力学、工程地质、水文地质、工程数学、环境保护等多学科知识。

（3）加强公路隧道施工中地质勘探工作

隧道设计阶段的地质勘察工作对制定施工方案具有重要意义，但它还不能完全指导施工，必须在施工中加强对地质超前预报技术的开发与完善及发展多种勘探手段，以迅速及时地获得尽量多的地质信息资料，对顺利进行施工极为重要。

（4）加快公路隧道施工机械化

加强施工机械化是加快隧道施工进度的重要手段，也是缩小我国公路与铁路隧道施工技术差距的重要方面。在应用最广泛的钻爆作业方面，建立以钻孔台车为先导的几条机械化作业线：开挖、出渣作业线，喷混凝土作业线，模筑混凝土衬砌作业线等。在特长隧道中采用全断面掘进机为核心的技术综合机械化（开挖、出渣、衬砌）以达高速、高效和高质量施工，发展盾构和沉管施工的机械化、自动化施工将使城市地下交通和越江、过海通道得到更快的发展。

（5）加强隧道施工新技术的研究与应用

为了提高公路隧道施工质量和加快施工进度，应注重以下几方面的研究与应用：

使用能力更强的凿岩机或钻孔台车进行钻孔作业，采用合金材料和改进钻形形状的冲击钻头以加快钻孔速度；开发更有效的爆破器材；优化爆破设计，由计算机控制钻孔，提高凿岩及爆破能力，减少超挖或欠挖问题。

加强对预制拼装式衬砌的研究应用，使预制混凝土衬砌向高标号、尺寸误差小、拼装密封条件好的方向发展。

加强对湿喷混凝土及喷射钢纤维混凝土的研究应用，完善施工工艺，改善施工条件，提高支护质量、速度、效果和投资效益。

完善隧道施工的辅助方法 加强注浆技术(注浆机具设备、材料、工艺、检验)的研究，以提高对付不良地质的应变能力。

加强公路隧道施工现代化管理

采用现代化科学管理方式(实质应该说是严格的制度管理)，可充分发挥机械效率、确保隧道工程施工质量和施工安全。这也是缩小我国与国外隧道施工技术差距的重要方面。

⑥ 加强对隧道围岩压力与变形的测试分析研究

深入探讨公路隧道采用新奥法设计与施工新技术，突出计算机模拟程序化计算等。

此外，还应积极研究和开发公路隧道施工技术与管理方法，并注意引进国外隧道建筑新技术、新设备和先进的管理经验及质量量测监控技术

总而言之，随着我国社会主义市场经济的发展，高等级公路已从沿海地区向西南、西北山岭区延伸，公路隧道建筑规模越来越大。据不完全统计，目前我国已建成 400 余座公路隧道，总长度已超过 100km，隧道长千米以上的有 40 多座，其中一半以上是最近几年建成的。1994 年开通的成渝高速公路的中梁山隧道、缙云山隧道，把我国公路隧道单洞长度提高到 3 000m 以上，并在处理塌方、瓦斯、地下水、通风和营运管理与交通监控技术等方面取得了突破性的进展，为我国今后修建长大公路隧道积累了一些宝贵经验；同年 6 月穿越广州珠江沙面水下公路隧道建成通车，标志着我国水下沉埋隧道修建技术达到了新的水平。近年，我国已经开始修建三车道大断面的公路隧道，例如已建成的北京八达岭高速公路的谭峪沟隧道，正在施工的重庆市川黔公路的真武山隧道。全国已修成的公路特长隧道还有：上海穿越黄浦江江底隧道长度超过 3 000m；云南楚大高速公路的九顶山隧道上行线长 3 204m；下行线长 3 199m 其单洞累计长度达到 6 403m，目前该隧道成为西南地区已建成公路隧道中为最长的、标准之高、规模之大成为“云南公路隧道第一、全国公路隧道第二”。另外，比九顶山公路隧道还要长的云南元磨高速公路上的墨江县大风垭口特长隧道正在施工。

四、公路隧道建筑质量

在公路建设投资大幅度增加，隧道工程建设步伐不断加快的新形势下，如何能确保工程质量，是一个非常突出且非常急迫的问题。因为“百年大计 质量第一”、“质量责任重于泰山”所以，质量是公路建设永恒的主题。

由于隧道既是道路永久性构造物，又是地下工程，涉及工程结构、岩土、地下水、空气、动力、光学、声学、消防、环保、环卫、交通工程、自动控制、量测与监控、工程机械、通风除尘、供电照明、报警与急救、维修服务、运营与管理等多种学科，无论从科研到设计、从施工到管理等还存在不少问题。归纳主要是：

(1) 在设计中由于荷载不明、围岩参数不清楚及设计理论尚不够完善；喷锚支护和二次衬砌设计参数仍然只能参考经验或套用规范。这样做对每座隧道来讲具有较大的主观性，往往与实际山体地质及围岩应力状态出入较大；

(2) 在公路隧道的科学技术研究中，限于人力、物力和财力投入不足，使我国公路隧道科研水平落后于铁路隧道的科研水平；

(3) 施工中围岩动态信息反馈技术较差，预报的准确率较低；喷射混凝土回弹率仍较高，影响工程进度，清理困难，材料浪费较大；

(4) 对地下水探测手段较落后，施工防排水技术亦较落后，隧道渗漏水情况还普遍存在；

(5) 通风、照明、防灾、监控、营运管理等设施和工程设计水平仍较低 缺乏综合性统筹；

(6) 水下隧道施工技术还有待加大科研力度；

(7) 在海底公路隧道修筑方面，我国尚属于空白（日本于 1984 年建设的青函海底隧道长 53.85km、1991 年英法海峡隧道长 50.50km 建成通车）；

(8) 公路隧道内交通监测与控制技术较落后，尚有待研制国产监控设备及降低费用等。

总之，我国公路隧道建设方兴未艾，前景广阔。为此，加强对技术人员培训，提高公路隧道施工水平，是促进公路建设事业发展一项重要工作。

第一章 公路隧道构造

公路隧道是公路工程的重要组成部分。修建隧道的目的是为了在地下占据一定的空间，以保证车辆安全运行。

隧道的主体建筑物由洞身衬砌和洞门建筑两部分所组成，如图 1-1 所示。在洞门容易坍塌地段 则应接长洞身 (即早进洞或晚出洞) 或加筑明洞洞口 如图 1-2 所示。

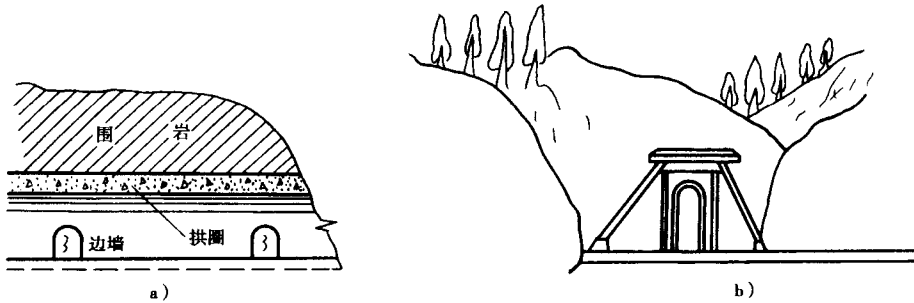


图 1-1 隧道的组成
a)洞身 ;b)洞门

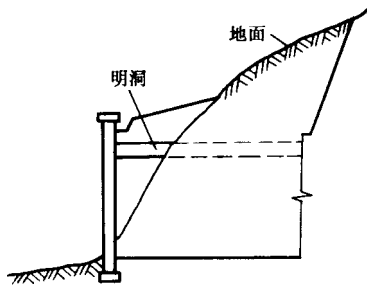


图 1-2 明洞

公路隧道的附属建筑物，包括：人行道（或避车洞）和防、排水设施，长、特长隧道还有通风道、通风机房、供电、照明、信号、消防、通讯、救援及其他量测、监控等附属设施。

本章主要叙述公路隧道建筑物的构造和功能及衬砌建筑材料，并介绍洞身衬砌类型、明洞构造、洞门构造及隧道的路面构造和类型。

第一节 隧道建筑限界及其内部轮廓

一、公路隧道建筑限界

为了保证车辆安全地在隧道内运行，隧道必须有一规定限界的空间，这个空间称为隧道净空。隧道净空若小了，则不能保证车辆安全通行；净空若大了，则增加隧道开挖和衬砌工程数

量,影响造价等,因此,必须从使用上、经济上和施工上等方面综合考虑,并按公路等级决定隧道的建筑限界。

公路隧道建筑限界应符合《公路工程技术标准》(JTJ001—97)(以下简称为《技术标准》)第2.0.4条关于公路建筑限界的规定。公路隧道建筑限界净空尺寸主要是指净宽和净高。公路隧道建筑限界一般规定如图1-3所示。

图1-3中 W —行车道宽度; S —行车道两侧路缘带宽度; C —余宽,当计算行车速度 $\geq 100\text{km/h}$ 时为 0.5m 小于 100km/h 时为 0.25m ; H —净高,一条公路应用一个净高,高速公路和一级、二级公路为 5.0m ; 三级、四级公路为 4.5m ; E —建筑限界顶角宽度,当 $L \leq 1\text{m}$ 时, $E = L$; 当 $L > 1\text{m}$ 时, $E = 1\text{m}$; L —侧向宽度,高速公路,一级公路的侧向宽度为硬路肩宽度 (L_1 或 L_2),其它各级公路的侧向宽度为路肩宽度减去 0.25m ; L_1 —左侧硬路肩宽度; L_2 —右侧硬路肩或应急停车带宽度。 J —检修道(一侧)宽度,一般为 0.75m 。 R —人行道宽度。

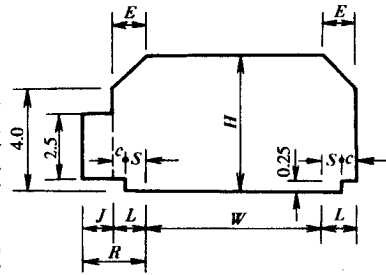


图 1-3 公路隧道建筑限界

在隧道建筑限界内,不得有任何部件侵入。特长、长及中长隧道应根据需要按《技术标准》第3.0.6条的规定设置紧急停车带。四级公路当采用 4.5m 的单车道路基时,应在适当距离内设置错车道。错车道应设在能使驾驶员看到相邻两错车道间相互驶来的车辆。设置错车道路段的路基宽度不小于 6.5m ,有效长度不小于 20m 。各级公路的行车道宽度,一般规定按《技术标准》表3.0.2布设。公路隧道按其长度分为四类,如表1-1所示。各级公路隧道建筑限界基本宽度规定,如表1-2所示。

隧道按长度分类表

表 1-1

| 隧道分类 | 短隧道 | 中隧道 | 长隧道 | 特长隧道 |
|--------------------|--------------|------------------|-------------------------|------------|
| 隧道长度 $L(\text{m})$ | $L \leq 250$ | $1000 > L > 250$ | $3000 \geq L \geq 1000$ | $L > 3000$ |

注 隧道长度系指进出口洞门端墙墙面之间的距离。即两端洞门墙面与路面的交线同路线中线交点间的距离。

各级公路隧道建筑限界基本宽度表 (m)

表 1-2

| 公路分类 | 公路等级 | 地形 | 行车道宽度(单洞) W | 侧向宽度(m) | | | | | 隧道净宽(m) | |
|--------|------|------|---------------|---------|--------|-------------|--------|---------|---------|------|
| | | | | 不设人行道 | | | 设人行道 | | 不设人行道 | 设人行道 |
| | | | | 路缘带 S | 余宽 C | 检修道(一侧) J | 余宽 C | 人行道 R | | |
| 汽车专用公路 | 高速 | 平原微丘 | 7.5 | 0.75 | 0.50 | 0.75 | | | 10.75 | |
| | | 重丘 | 7.5 | 0.50 | 0.50 | 0.75 | | | 10.25 | |
| | | 山岭 | 7.5 | 0.25 | 0.25 | 0.75 | | | 9.75 | |
| | | | 7.0 | 0.25 | 0.25 | 0.75 | | | 9.75 | |
| | 一级 | 平原微丘 | 7.5 | 0.50 | 0.50 | 0.75 | | | 10.25 | |
| | | 山岭重丘 | 7.0 | 0.25 | 0.25 | 0.75 | | | 9.25 | |
| | 二级 | 平原微丘 | 8.0 | / | 0.25 | 0.75 | | | 9.25 | |
| | | 山岭重丘 | 7.5 | | 0.25 | 0.75 | | | 8.75 | |

续上表

| 公路分类 | 公路等级 | 地形 | 行车道宽度(单洞)W | 侧向宽度(m) | | | | | 隧道净宽(m) | |
|------|------|------|--------------------|---------|------|----------|------|------|---------------------|-------|
| | | | | 不设人行道 | | | 设人行道 | | 不设人行道 | 设人行道 |
| | | | | 路缘带S | 余宽C | 检修道(一侧)J | 余宽C | 人行道R | | |
| 一般公路 | 二级 | 平原微丘 | 9.0 | | 0.25 | | 0.25 | 0.75 | 9.50 | 10.60 |
| | | 山岭重丘 | 7.0 | | 0.25 | | 0.25 | 0.75 | 7.50 | 8.50 |
| | 三级 | 平原微丘 | 7.0 | | 0.25 | | 0.25 | 0.75 | 7.50 | 8.50 |
| | | 山岭重丘 | 7.0 | | 0.25 | | 0.25 | 0.75 | 7.50 | 8.50 |
| | 四级 | 平原微丘 | 7.0 | | 0.25 | | 0.25 | 0.75 | 7.50 | |
| | | 山岭重丘 | $\frac{7.0}{4.50}$ | | 0.25 | | 0.25 | 0.75 | $\frac{7.50}{5.00}$ | |

注：汽车专用公路隧道只在左侧设检修道；

②山岭重丘区的四级公路，只有当路基宽度为4.5m时，行车道宽度可采用4.5m；

四级公路隧道一般可不设人行道。

表 1-2 隧道净空适用直线地段。当隧道内必须设置曲线时，则其曲线半径应符合《技术标准》第 3.0.10 条有关各级公路最小平曲线半径规定。一般情况下，应尽量采用大于或等于列最小半径，以提高隧道的使用质量。

当隧道平曲线半径等于或小于 250m 时，应在平曲线内侧加宽。平曲线加宽值的确定：双车道路面的加宽值规定如《技术标准》的表 3.0.12 单车道路面加宽值按表 3.0.12 所列数值之半采用。此时，隧道净空亦应作相应的加宽。

公路隧道横断面设计，除应符合隧道建筑限界的规定外，还应考虑洞内排水沟、通风、电、照明、通讯、防火、监控、营运管理等附属设施所需的空间，并考虑土压力影响、施工方法等必要的富裕量，使确定的断面形式及尺寸达到安全、经济、合理的要求。

二、隧道内部轮廓

隧道内部轮廓的类型，从使用、受力及施工等三个方面的要求，分别阐述如下：

1. 使用方面要求

隧道衬砌的轮廓，应尽量接近隧道净空，以使开挖的土石方数量及衬砌的材料数量最小。

2. 受力方面要求

隧道衬砌的内部轮廓，应尽力符合衬砌结构的受力状态，即尽力适应衬砌结构应力分布情况。在良好的地质条件下，衬砌结构承受荷载较小时，可采用直边墙（称直墙式），如图 1-4a）；在地质较差的条件下，衬砌结构承受荷载较大时，一般多采用曲边墙（称为曲墙式），如图 1-4b）；当隧道底部可能会引起基础沉陷时，可以采用带仰拱的封闭形式，如图 1-4c）所示。

3. 施工方面要求

隧道衬砌内部轮廓应当便于施工，因此要求衬砌内部轮廓在各种条件下（如有不同的加宽值时）变化尽量小或不变化，这样可使拱架、模板能重复周转使用。为了便于不同衬砌断面的衔接，拱圈与边墙的分界高度（称为超拱线）也最好采用同一数值，衬砌内部轮廓线的曲率要求尽量一致。

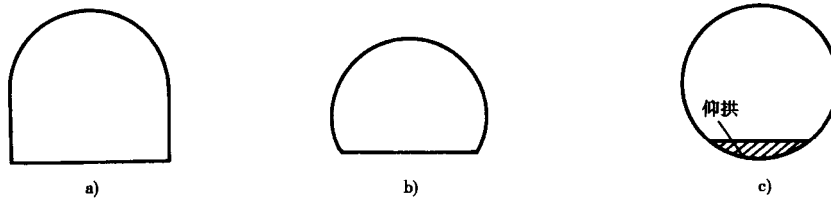


图 1-4 隧道衬砌的形式
a)直墙式 ;b)曲墙式 ;c)封闭式

第二节 隧道建筑材料及洞身衬砌类型

一、隧道建筑材料概述

隧道衬砌的作用是为了承受围岩压力、地下水压力，阻止围岩向隧道内变形和防止隧道围岩的风化，有时还要承受化学物质的侵蚀，地处高寒地区的隧道往往还要受到冻害的影响等。因此，隧道衬砌结构的建筑材料应具有足够的强度、耐久性、抗渗性、耐腐蚀性和抗风化及抗冻性等。此外，还要满足经济、就地取材、易于机械化施工等要求。根据以上要求，隧道建筑通常采用以下几种材料：

1. 混凝土

混凝土是目前隧道施工采用最广泛的建筑材料之一。这种建材的优点是：整体性和抗渗性较好，既能在现场浇筑，也可以在加工场预制，而且能采用机械化施工。可以在水泥中掺入密实性附加剂，以提高混凝土的密实度，从而提高混凝土的抗渗性和防水性能。此外，混凝土可以根据使用和施工上的需要加入其它附加剂，如低温早强剂、常温早强剂、速凝剂、缓凝剂、塑化剂、加气剂、减水剂等。现浇混凝土的缺点是：混凝土浇筑后需要养生而不能立既承受荷载，需要达到一定强度才能拆模，占用和耗用较多的拱架及模板、化学稳定性（耐侵蚀性能）较差。但其优点是主要的，故目前混凝土仍然是隧道衬砌结构的主要建筑材料。

2. 喷射混凝土（简称喷混凝土）

采用混凝土喷射机，将掺有速凝剂的混凝土干拌混合料和水高速喷射到洗干净的岩石表面上经凝结而成。其早期强度和密实性均较普通混凝土高，能封闭围岩的裂隙，能很快起到支护围岩的作用。其施工过程可以全部机械化，且不需要拱架和模板。在石质较软的不稳定围岩，它还可以与锚杆、钢丝网等配合使用，是一种理想的衬砌材料。

3. 锚杆与喷锚支护

锚杆是用机械方法加固围岩的一种金属材料，种类很多，通常可分为机械型锚杆和粘结型锚杆；或分为非预应力锚杆和预应力锚杆。锚杆主要类型有：楔缝式锚杆、膨壳式锚杆、爆固式锚杆、树脂式锚杆、开缝管式锚杆等。围岩不够稳定时，还可以张挂金属网。设置锚杆再加喷混凝土即称为喷锚支护。它是一种较符合岩体力学原理的积极支护方法，具有良好的物理力学性能。

4. 钢筋混凝土

隧道施工时，在暗挖地段可以采用现浇钢筋混凝土。通过不良地质地段时，往往采用废旧钢轨或焊接钢筋骨架（花拱架）灌注钢筋混凝土，如图 1-5 所示。暗挖地段就地绑扎钢筋比较

困难，通常不采用整体就地浇筑钢筋混凝土。但对于地震区的公路隧道衬砌、明洞、偏压隧道衬砌、通过断层破碎带及淤泥和流沙等地质不良地段的隧道衬砌，则均须采用钢筋混凝土衬砌。

5. 石料

石料衬砌的优点是：可就地取材、降低造价、砌好后能较早地承受荷载，可以节省水泥和模板，耐久性和耐侵蚀性能较好。其缺点是：砌缝多容易漏水，防水性能较差，施工主要靠手工操作 难于机械化施工 费工、费时 施工进度较慢 而且需要大量熟练工人。对于盛产石料的地区及隧道边墙地基的地质条件较好时，本着就地取材及经济的原则，石料衬砌仍可采用 尤其是洞门挡墙、挡土墙、路缘石、人行道盖板等仍然经常使用石料。超挖部分可以用片石混凝土回填。

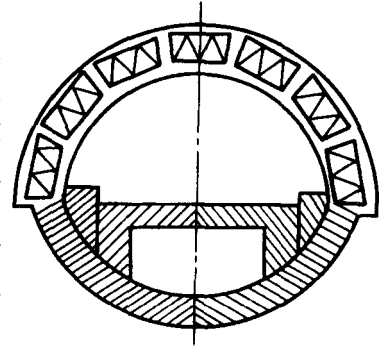


图 1-5 钢筋骨架

6. 装配式材料

在软土地区采用盾构法施工修筑隧道时，其衬砌材料常采用装配式材料，如钢筋混凝土大型预制块、加筋肋铸铁预制块等。在修筑棚式明洞时，可用预制板或预制梁装配式棚洞或梁式棚洞。采用先进的新奥法施工时，为了防水、防落石和美观，还可以加设离壁式结构，如采用波纹钢拱式大型装配预制件或采用玻璃钢代替钢材等作衬砌材料。

二、隧道建筑材料选用

选用隧道建筑材料，应符合下列规定：

1. 公路隧道洞门建筑材料

公路隧道洞门的建筑材料应符合表 1-3 和表 1-4 要求，其标号不应低于表列的规定值。

洞门建筑材料表

表 1-3

| 工程部位 | 材料种类 | | 砌体 |
|------------|-----------|-------|---------------------------------|
| | 混凝土或钢筋混凝土 | 片石混凝土 | |
| 端墙 | C15 号 | C15 号 | 10 号水泥砂浆砌片石、块石镶面或混凝土预制块镶面 |
| 顶帽 | C15 号 | | 10 号水泥砂浆砌粗料石 |
| 翼墙和洞口挡土墙 | C15 号 | C15 号 | 7.5 号水泥砂浆砌片石(严寒地区用 10 号水泥砂浆砌片石) |
| 侧沟、截水沟、护坡等 | | | 5 号水泥砂浆砌片石(严寒地区用 7.5 号水泥砂浆砌片石) |

注：①砌体包括石砌体和混凝土块砌体；

严寒地区洞门用混凝土整体灌注时，其标号不应低于 C20 号；

片石砌体的胶结材料采用小石子混凝土砌筑时，其最低标号及相应的适用范围与水泥砂浆相同。

2. 公路隧道建筑材料选用应考虑的因素

公路隧道建筑材料的选用，应当考虑以下因素：

(1) 隧道衬砌部位选用的建筑材料，应当符合结构强度和耐久性的要求，并应考虑其抗冻、抗渗和抗侵蚀性的需要；

(2) 当有侵蚀性水的经常作用时，衬砌结构物的混凝土或砂浆均应选用具有抗侵蚀性能的特种水泥，其抗侵蚀性能的要求，应视水的侵蚀特征而定；

(3) 在寒冷及严寒地区，当隧道衬砌受冻害影响时，宜采用整体式混凝土衬砌，且混凝土

标号应当提高，并应满足材料抗冻性指标的要求。还应符合下列两条规定：

抗冻性指标，系指材料在含水饱和状态下经过 -15 的冻结与融化的循环次数；试验后的材料应无明显损伤（裂缝、脱层）其强度不低于试验前的 0.75 倍；

根据以往实践证明，材料确有足够的抗冻性能时，可以不做抗冻性试验。

衬砌建筑材料表

表 1-4

| 工程部位 \ 材料种类 | 混凝土 | 片石混凝土 | 钢筋混凝土构件中用的混凝土 | 喷混凝土 | 砌体 |
|-------------|-------|-------|---------------|-------|-------------------|
| 拱围 | C15 号 | | C20 号 | C20 号 | 10 号水泥砂浆砌粗料石或混凝土块 |
| 边墙 | C15 号 | C15 号 | C20 号 | C20 号 | 10 号水泥砂浆砌片石 |
| 仰拱 | C15 号 | C15 号 | C20 号 | | |
| 棚洞盖板 | | | C20 号 | | |
| 仰拱填充 | C10 号 | C10 号 | | | 10 号水泥砂浆砌片石 |
| 水沟沟身及电缆槽身 | C15 号 | | | | |
| 水沟盖板及电缆槽盖板 | | | C15 号 | | |

3. 隧道衬砌砌体和混凝土强度要求

隧道衬砌材料，包括混凝土、钢筋混凝土和片石混凝土，所用的材料，除应符合国家规定的标准和要求外，尚应符合表 1-4 的规定：

(1) 片石、块石标号不应低于 30 号 粗料石标号不应低于 40 号，混凝土预制块标号不应低于 C15 号；有裂缝和风化的石料不得采用；

(2) 混凝土用的粗骨料 应使用坚硬耐久性好的天然砾石或碎石 亦可用砾石掺一部分碎石；

(3) 片石混凝土内片石掺用量不应超过总体积的 20% 片石标号不应低于 30 号。

4. 锚喷支护采用的建筑材料

锚喷支护材料除遵守前述的 1、2 两条有关规定外，尚应符合下列四点要求：

(1) 喷混凝土的水泥标号不得低于 325 号，并优先选用普通硅酸盐水泥；细骨料采用坚硬耐久的中、粗砂 细度模数宜大于 2.5 砂的含水率宜控制在 5% ~ 7%；粗骨料采用坚硬耐久的砾石或碎石，粒径不应大于 15mm。

(2) 锚杆的杆件材料宜采用 II 级钢筋 也可采用 I 级钢筋，其直径一般为 16 ~ 22mm；

(3) 采用灌浆锚杆时，其胶结材料可采用普通水泥砂浆或早强水泥砂浆，砂浆标号不得低于 20 号；

(4) 钢筋网可采用 I 级钢筋 直径一般为 4 ~ 10mm。

5. 公路隧道内的路面材料

公路隧道内路面材料应根据路面等级及面层类型参照公路路面有关设计规范办理。

三、公路隧道洞身衬砌结构类型

公路隧道衬砌，根据洞身围岩类别的不同可以采用下述各种类型。

1. 防护衬（亦称饰面衬砌）

防护衬的作用是防止坑道围岩的风化，适用于 VI 类围岩。一般在围岩表面喷射不大于 5cm 的混凝土层。在围岩极不容易风化及无局部掉块的情况，亦可不加防护。

2. 喷锚衬砌

如图 1-6 所示 喷锚衬砌适用于 V 类及 VI 类围岩。喷混凝土厚 6~15cm 必要时可增设钢筋网。

岩石隧道掘进机，是开挖岩石隧道的一种机械化切削机械，其开挖断面通常为圆弧形，开挖以后可采用喷射混凝土、喷锚衬砌或拼装预制构件衬砌等型式。

3. 大拱脚薄边墙衬砌

如图 1-7 所示 适用于 V、IV 类围岩。边墙可用喷混凝土做成，亦可用混凝土整体浇灌。采用此类衬砌可使拱脚稳固地直接支承在两侧围岩上，以改善拱圈的受力条件，减少边墙的开挖及衬砌圪工数量，降低工程造价。

4. 直墙式衬砌

如图 1-8 所示，一般设计成等截面的直墙式衬砌，通常用于岩石地层垂直围岩压力为主要计算荷载、水平围岩压力很小的情况。一般适用于 V、IV 类围岩。若在一个隧道全长范围内，仅局部地段为 IV 类以下围岩，则此类衬砌也可用于 III 类围岩，以使全隧道衬砌内部轮廓一致，便于施工等。实际上，同一座隧道内的地质条件常常是复杂、多变的，往往也会突变！对此应有清醒的认识，施工中应做好地质预报工作，以便及时采取有效的应变措施，或变更衬砌结构设计和施工方法等。

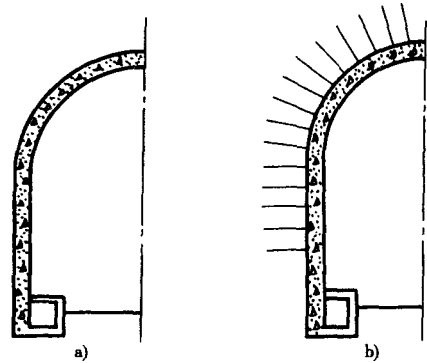


图 1-6 喷射衬砌与喷锚衬砌
a) 喷射混凝土衬砌； b) 喷锚衬砌

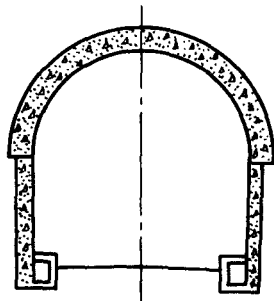


图 1-7 厚拱脚薄边墙

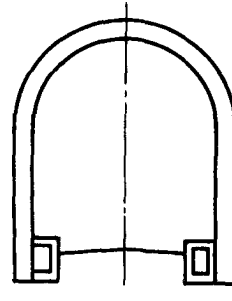


图 1-8 直墙式衬砌

如果围岩完整性较好在 V 类围岩中 边墙可采用连拱或柱 称为连拱 柱式边墙。

5. 曲墙式衬砌

适用于 III~I 类围岩。一般在 I、II 类围岩中，围岩水平压力甚大，或除了围岩垂直压力外，常有底压力，因此，可把边墙做成曲线形状。当地质条件较差时，为防止衬砌沉陷，抵御底鼓压力，使衬砌形成环状封闭结构，在隧道底面设置仰拱，称为带仰拱的封闭式曲墙衬砌，如图 1-9 所示。当基础地基条件比较好，可采用无仰拱的曲墙式衬砌，图 1-10 所示。

6. 喷混凝土衬砌、喷锚衬砌及复合式衬砌

为了使喷混凝土衬砌结构的受力状态臻于理想化，要求采用光面爆破开挖，使洞室周边平顺光滑 成型较准确 减少超挖或欠挖。然后 通过监控量测设计 确定在适当的时间喷混凝土，即为喷混凝土衬砌。根据实际情况 需要安装锚杆的则先装设锚杆 再喷混凝土 即为喷锚衬砌。如果以喷混凝土、锚杆或钢拱架、钢筋网中的一种或几种组合作用，当初次支护只是对围岩进行加固，维护围岩稳定，防止有害松动。待初次支护的变形基本稳定后，进行现浇混凝土作为二次

支护，即为复合衬砌。为使衬砌的防水性能可靠，保持无渗漏水，采用塑料板作复合式衬砌中间防水层是比较适宜的，如图 1-11 所示。

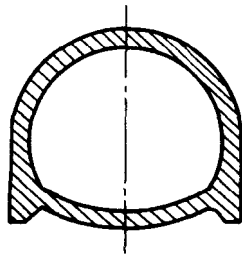


图 1-9 封闭式曲墙衬砌

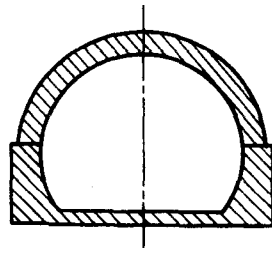
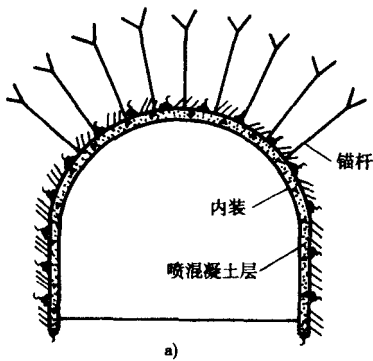
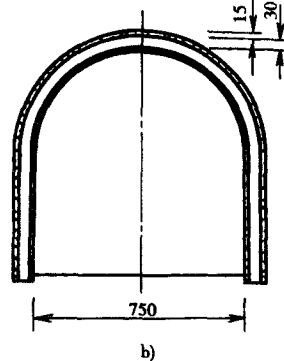


图 1-10 无仰拱的曲墙衬砌



a)



b)

图 1-11 喷锚衬砌与复合衬砌
a)组合式衬砌;b)复合式衬砌

7. 钢花拱或钢筋混凝土衬砌

当隧道通过坍方、断层地段，或在 I 类围岩中，由于作用荷载很大，采用曲墙式混凝土衬砌，因其截面太厚，施工困难，即费料费工，故此宜采用带有劲性钢骨的、厚度较小的钢花拱衬砌（如图 1-5）或钢筋混凝土衬砌。

8. 结构不对称的偏压衬砌

当地面坡度陡于 1:0.25 时，线路中线外侧山体覆盖较薄，或由于地质构造引起偏压，使衬砌结构承受显著不对称的围岩压力，适宜采用不对称的衬砌结构，即偏压衬砌。偏压衬砌适用于 IV ~ II 类围岩 根据其受力要求，一般设计为对称的曲墙带仰拱的衬砌结构型式。也有设计为不对称式的偏压衬砌（如图 1-12）所示。

四、隧道衬砌基本尺寸初步拟定

公路隧道衬砌基本尺寸的拟定，包括确定衬砌内轮廓线、轴线、截面厚度以及外轮廓线等的主要尺寸。对于矩形衬砌截面（采用沉管法施工时广泛用矩形断面）圆弧形断面、直墙式衬砌的边墙等的尺寸在计算上一般不存在困难。但是对曲墙式衬砌、三心圆拱等，计算比较繁琐，均系几何上的换算。为了读者计算使用方便 现将常用换算公式和换算方法 在此介绍如下 以便隧道施工放样时使用。

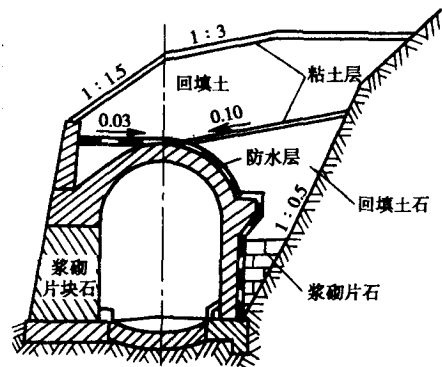


图 1-12 不对称偏压衬砌

1. 隧道衬砌内部轮廓线的确定

隧道衬砌内部轮廓线形，应满足所围成的断面积最小，合围岩压力和水压力的特点，并以既经济又适用为目的。隧道衬砌外部轮廓线系指为了保持净空断面的形状，衬砌必须有足够的厚度（或称最小衬砌厚度）的外缘线。该线又称为最小开挖线 如图 1-13 所示。

隧道衬砌内轮廓线尺寸计算图式，详见图 1-14 和图 1-15 所示

$$r_1 + a - r_2 \cos \varphi_2 = f$$

$$r_2 \sin \varphi_2 - a = b$$

$$r_1 + \frac{a}{\sin \varphi_1} = r_2$$

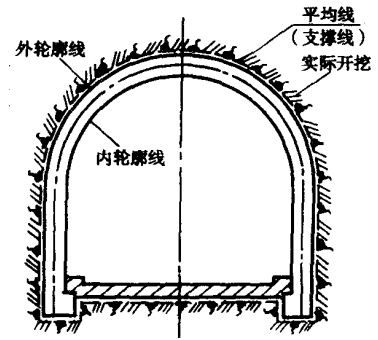


图 1—13 断面诸元素

式中： b ——公路建筑限界宽度，其值为行车道宽度加上两侧路缘带与人行道宽度的总和，两侧各加 5~10cm 的施工误差；

f ——拱顶至拱脚的计算矢高，按通风量所需通风道面积确定，并使拱圈具有能保证合理的静力平衡的工作状态——把压力曲线保持在衬砌断面范围内（因为实际上，使拱轴线与压力曲线完全重合是很困难的，只能尽量接近）；

φ_1 ——内径 r_1 画出的圆曲线的终点截面与竖直画的夹角；

a ——内径 r_1 、 r_2 的圆心 O_1 与 O_2 之间的水平距离。

其中： r_1 、 r_2 ——第一个内径和第二个内径；

φ_2 ——拱脚截面与竖直截面的夹角。

图 1-14 中的 4 个参数 b 、 f 、 φ_1 和 a 必须根据建筑限界要求预先给定，代入式(1-1)后求出其余 3 个参数 r_1 、 r_2 及 φ_2 。

曲墙式边墙内径 r_3 由参数 H_1 及 b_1 确定，见图 1-15 所示。

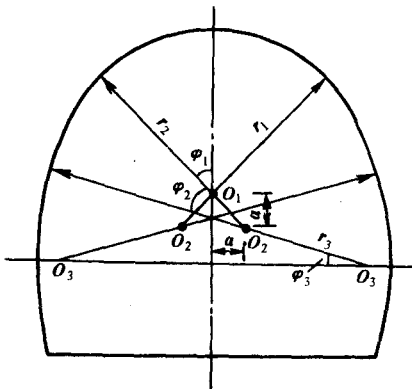


图 1.14 内轮廓计算图式

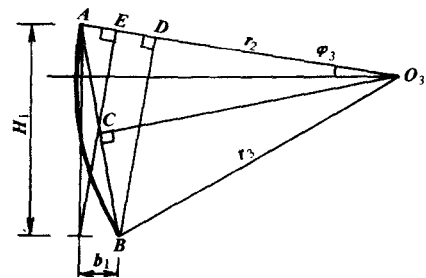


图 1 - 15 边墙内径 r_3 的计算图式

$$\left. \begin{aligned} r_3 &= (H_1 + b_1) / 2 (H_1 \sin \varphi_3 + b_1 \cos \varphi_3) \\ \varphi_3 &= (90^\circ - \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

2. 拱圈轴线与外轮廓线

拱圈的轴线和外轮廓线的计算，对于等截面拱的计算较简便；对于变截面拱圈尺寸的计算

算, 参见图 1-16, 可按式 (1-3) 和 (1-4) 式计算。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= m + r_1 + d_0 \\ R_2 &= m + r_2 + d_0 \\ \Delta d &= d_b - d_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} m &= \Delta d (r_2 + d_0 + 0.5 \Delta d) / [(r_2 + 0.5 d_0)(1 - \cos \varphi_2) - 0.5 \Delta d \cos \varphi_2] \\ r'_1 &= m' + r_1 + 0.5 d_0 \\ r'_2 &= m' + r_2 + 0.5 d_0 \\ m' &= \frac{0.5 \Delta d (r_2 + 0.5 d_0 + 0.25 \Delta d)}{(r_2 + 0.5 d_0)(1 - \cos \varphi_2) - 0.5 \Delta d \cos \varphi_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中: R_1, R_2 ——外轮廓线半径;

r'_1, r'_2 ——拱轴曲线半径;

$r_1, r_2, \varphi_1, \varphi_2$ ——意义同前, 均为已知;

d_0 ——拱圈顶截面厚度;

d_w ——拱脚截面厚度, 二者都是预先设定的尺寸。

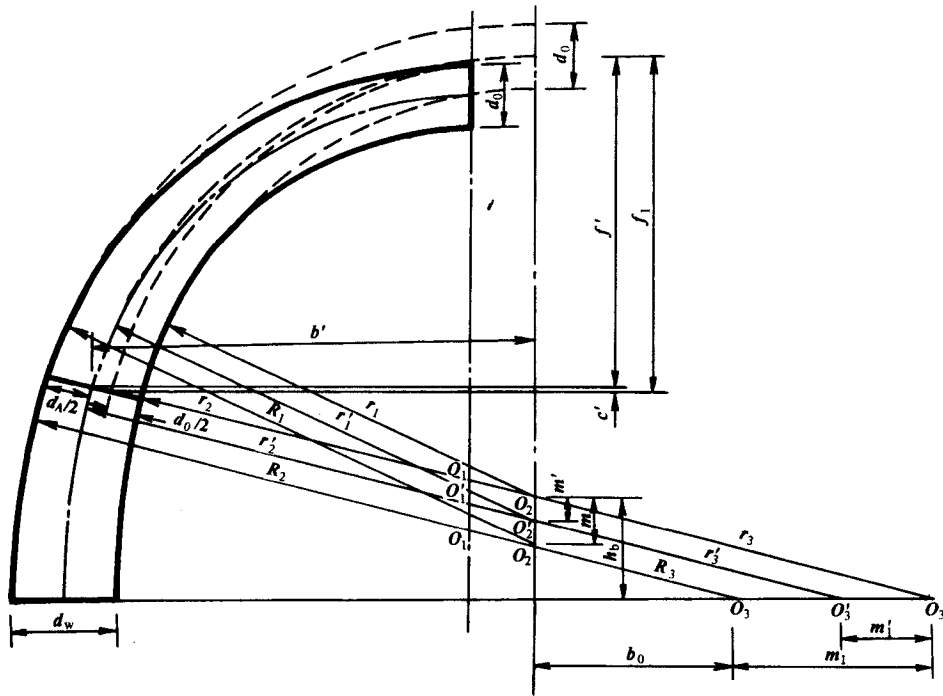


图 1-16 变截面拱圈尺寸的计算图式及水平线以上部分曲边墙尺寸计算图式

3. 衬砌结构图形确定原则

- (1) 衬砌轴线形状应平顺, 因为曲折的轴线会引起轴线与压力线产生较大的偏移;
- (2) 在垂直方向的压力作用下, 拱圈轴线应接近二次抛物线, 即拱顶部分轴线曲度大些;
- (3) 在侧压力作用下, 边墙最好做成曲墙式。

4. 整体衬砌结构各部主要尺寸初步拟定

为了进行隧道衬砌结构的计算和验算，在设计经验的基础上，初步拟定各部主要尺寸作为参考。公路隧道衬砌结构尺寸，主要按照围岩的坚固系数 f_{up} 值的不同，大致分为下列几种控制尺寸：

(1) 隧道拱顶衬砌厚度 d_0 按岩石坚固系数 f_{up} 值之大小而确定，如表 1-5；

拱顶衬砌厚度 d_0 与岩石坚固系数 f_{up} 关系表

表 1-5

| f_{up} | 0.7 | 1.0 | 2.5 | 4 | 6 | 10 | 15 |
|------------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| $d_0(\text{cm})$ | 130 | 120 | 100 | 75 | 60 | 40 | |

注 坚硬岩层 $f_{up} \geq 15$ 时，可采用无衬砌隧道洞身（但在洞口一般应修筑衬砌）； $f_{up} \geq 10$ 的岩层，可采用半衬砌（即只有拱圈衬砌而无边墙衬砌）；在 $f_{up} < 4 \sim 1$ 的岩层，采用有底板厚度 20~40cm 的直墙式全部衬砌； $f_{up} < 1.0$ 的地层中，承受较大的地层垂直压力及主动土压力，采用带仰拱的封闭式曲墙全部衬砌。

(2) 衬砌拱圈的净矢高 $f_0 = (0.4 \sim 0.25) \times L_0$ 之间（ L_0 为拱圈的净跨径）；

(3) 拱脚的厚度： $d_b = (1.2 \sim 1.4) d_0$ ；

(4) 边墙的厚度： $d_c = (1.0 \sim 1.5) d_b$ ；

(5) 仰拱的厚度： $d_j = (0.5 \sim 0.8) d_0$ 。

五、装配式隧道衬砌的构造及设计原则

1. 采用装配式隧道衬砌构造的目的

从坑道开挖岩层到修建永久衬砌工程之间间隔时间，应当尽力减至最短，这是隧道建筑的一项基本原则。衬砌后，向永久衬砌背后压注水泥灰浆便能保证使衬砌与周围地层紧密连接，防止地层压力增长。

因为整体式混凝土衬砌施工很困难，仅适用于矿山法开挖的隧道，故此法很少采用，如采用装配式衬砌，可在预制厂或在工地预制场内以工业化方法制备装配式衬砌构件，然后运送到地下刚开挖好的坑道拼装，并在其后压注砂浆使其立即支护加固地层，以达到加快施工进度，缩短工期及降低成本等主要目的。

2. 隧道装配式衬砌设计原则

(1) 衬砌分块应从每环的分块接头、防水与开挖等问题来全面考虑，分块要尽量大些，但避免过大、太重，否则不便于施工（当地质条件良好和干燥无水时，方可采用拼装式衬砌）；

(2) 砌块形状要求简单，易于在工厂预制；

(3) 砌块的接头数目和接头总长要求尽量减少，以有利于防水，抗渗和防侵蚀等；

(4) 若采用轻质混凝土装配式衬砌去代替重混凝土衬砌，则可以减轻砌块自重，容易同时满足本设计原则的策 1)-(3) 条的要求。

第三节 明洞构造及类型

洞顶覆盖层较薄，难以用暗挖法修建隧道时，如：隧道洞口或路线当通过不良地质地段，路堑边坡可能发生坍方，中小滑坡、落石、雪害或泥石流等危害的地段，道路之间形成立体交叉，但又不宜做立交桥时，通常宜修建明洞。以明挖法施工修建的隧道，或在露天修建而有回填土予以遮盖的衬砌结构，称为明洞。

一、拟建明洞的原则

1. 核查地形、地貌和地质水文情况

在拟建明洞的地方，应详细调查该地址的地形、地貌、地质和水文地质情况。在有可能发生大滑坡和有大量坍方的地方不宜修明洞。

2. 地基与基础处理

明洞所在位置，通常地形、地质条件比较复杂，明洞基础条件差，所以修建明洞时，为确保结构的安全与稳定，应当慎重处理地基与基础。

(1) 明洞边墙基础应放置在稳固的岩层上，在特殊困难的地质条件下，边墙基础可放在坚硬的土壤上，但其埋置深度应在距冻结线 25cm 以下，并应在地基上或明洞建结构上加以特殊处理，还应进行对边墙和拱圈的计算和验算；

(2) 在明洞边墙基础下遇有地下水较多时，则应将地下水妥善地引离边墙基础；

(3) 明洞回填土的厚度必须足以缓和边坡上石块下坠之冲击力（考虑此项冲击力的影响，洞顶填土高度一般不宜小于 2m）；

(4) 明洞处边墙基础埋置深度超过路面以下 3m 时，宜在路面以下设置钢筋混凝土横向水平拉杆，锚固于内边墙基础或岩体中，或采用锚杆锚固于稳定的岩体中。

3. 明洞结构型式选定

通常应根据明洞的地形、地质条件、荷载分布情况、营运安全、施工方法以及经济分析比较，确定明洞的结构形式。

二、公路隧道明洞的结构类型

公路隧道中明洞的结构类型，一般分为拱式明洞、箱形明洞和棚式明洞三类。选择明洞的结构类型应根据地形、地质、安全与稳定性、经济实用以及施工条件等因素分析确定 现分别概述如下：

1. 拱式明洞

如图 1-17、图 1-18 所示。

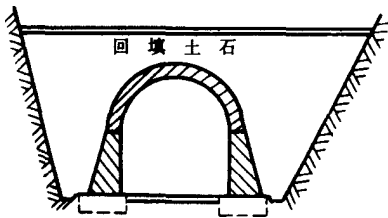


图 1-17 拱式明洞

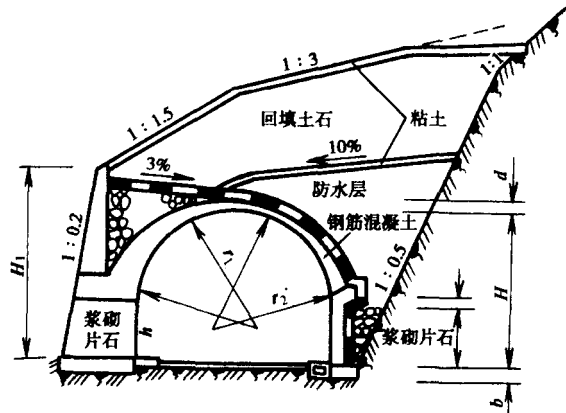


图 1-18 拱式明洞（半路堑式）

当边坡坍方数量较大，落石较多，基础条件较好时，宜采用拱形明洞。图 1-17 为路堑拱式明洞 其受力对称 因此 结构也对称。图 1-18 为常用的半路堑式偏压（单压）明洞。它主要承受回填土石和坍方落石的单侧压力作用，为此，拱圈常采用钢筋混凝土结构，且外墙尺寸较厚，可达 3~5m，即因受力不对称，则结构亦不对称。为了节约圬工数量，通常在浆砌片石外墙上每隔 3~4m，开设一个洞孔。明洞采用外贴式防水层，确保防水质量。

拱式明洞的内外墙身用混凝土结构、拱顶用钢筋混凝土结构，整体性较好，能承受较大的