

21 世纪高职高专地下与隧道工程系列教材

隧道工程施工

瞿万波 王毅 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

前 言

随着近年地下与隧道工程建设的高速发展，我国已经成为世界上隧道数量最多、建设规模最大、技术难度最高的国家。本教材根据近年隧道与地下工程技术的发展和高职高专对人才培养的需要编写。编写过程中，我们遵循如下原则：

1. 充分考虑高职高专地下与隧道工程技术及相关专业对隧道工程施工这门课程的要求，既注重系统性，又彰显实用性。

2. 以培养现场施工技术人员为导向，既考虑隧道工程的理论基础，又注重技术岗位对应用能力尤其是施工组织能力的要求；既有常规隧道施工方法的讲解，又有特殊条件下隧道施工技术的拓展。

3. 每个单元有明确的知识目标和技能目标，内容组织循序渐进，逐步完成专业知识学习和实践技能培养。

本教材可作为高职高专、成人教育教学参考用书，也可作为地下和隧道工程施工技术管理岗位培训教材，以及隧道工程技术人员的参考用书。

本教材以山岭隧道及其施工技术为主，共分 10 章，主要包括：隧道基本知识、隧道工程勘测设计、隧道结构构造、隧道围岩分级及围岩压力、隧道施工组织与施工准备、山岭隧道施工、特殊地质地段隧道施工、复杂条件隧道施工、隧道施工辅助工法与辅助作业、隧道施工监测与超前地质预报。各章节均采用新标准和新规范，全书突出职业教育特点，充分考虑了高职院校学生的认知规律，力争做到内容简明扼要、深入浅出、通俗易懂。

本教材由重庆工程职业技术学院瞿万波和王毅统稿并任主编，重庆工程职业技术学院王琳、陆春昌、冯廷灿、田卫东担任副主编。具体编写分工为：瞿万波编写第 1、2、3、8 章；王琳编写第 4 章；陆春昌编写第 5 章；冯廷灿编写第 6 章；田卫东编写第 7 章；王毅编写第 9、10 章。

本教材在编写过程中，参考了大量的国内外有关资料，许多生产、科研单位给予了大力支持，西南交通大学出版社的领导和编辑们付出了辛勤的劳动，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，教材中疏漏和不足之处在所难免，敬请读者批评指正，编者将根据读者意见认真修订。

编 者

2019 年 4 月

目 录

第 1 章 隧道基本知识	1
1.1 隧道的概念	1
1.2 隧道的分类	3
1.3 国内外隧道建设情况	4
1.4 本课程学习建议	8
复习思考题	8
第 2 章 隧道工程勘测设计	9
2.1 隧道工程调查与勘察	9
2.2 隧道选址	12
2.3 隧道线形设计	21
2.4 隧道横断面设计	27
2.5 隧道勘察设计文件的内容和组成	40
复习思考题	43
第 3 章 隧道结构构造	44
3.1 洞门类型及构造	44
3.2 明洞构造	48
3.3 洞身衬砌	51
3.4 附属建筑与设施	57
复习思考题	66
第 4 章 隧道围岩分级及围岩压力	67
4.1 围岩岩性与初始应力	67
4.2 隧道围岩分级	70
4.3 围岩压力的确定	79
4.4 影响围岩稳定性的因素	85
复习思考题	89

第 5 章	隧道施工组织与施工准备	91
5.1	隧道施工前期工作	91
5.2	施工作业指导书编制	93
5.3	施工资源配置	99
5.4	隧道施工测量	102
	复习思考题	113
第 6 章	山岭隧道施工	114
6.1	洞口与明洞施工	115
6.2	隧道洞身开挖	119
6.3	隧道出渣	142
6.4	初期支护	149
6.5	防水层施工	163
6.6	二次衬砌施工	168
	复习思考题	171
第 7 章	特殊地质地段隧道施工	173
7.1	特殊地质概述	173
7.2	膨胀土围岩隧道施工	174
7.3	黄土围岩隧道施工	177
7.4	溶洞地段隧道施工	179
7.5	隧道坍方处理	182
7.6	松散地层施工	185
7.7	流沙层隧道施工	186
7.8	瓦斯隧道施工	187
7.9	岩爆隧道施工	203
7.10	高地温隧道施工	206
	复习思考题	208
第 8 章	复杂条件下的隧道施工	209
8.1	浅埋暗挖隧道	209
8.2	小间距隧道	215
8.3	联拱隧道	219
	复习思考题	223

第 9 章 隧道施工辅助工法与辅助作业	224
9.1 隧道施工辅助工法	224
9.2 隧道施工辅助作业	235
复习思考题	245
第 10 章 隧道施工监测与超前地质预报	246
10.1 监控量测组织管理	246
10.2 监控量测项目和方法	249
10.3 监控量测结果的整理与分析	262
10.4 标准值与信息反馈	265
10.5 超前地质预报	267
复习思考题	270
参考文献	271

第 1 章 隧道基本知识

【知识目标】

1. 掌握隧道结构的组成；
2. 掌握隧道工程与地面工程的差异；
3. 掌握隧道的分类方法。

【技能目标】

能够正确对隧道进行分类。

1.1 隧道的概念

1.1.1 隧道概述

1970 年，国际经济合作与发展组织在召开的隧道会议上将隧道定义为：“以某种用途，在地面下采用任何方法，按规定的形状和尺寸修筑的断面积大于 2 m^2 的洞室。”根据这个定义，隧道是一种修建在地下的工程结构。我国山地和丘陵在国土面积中占有很大的比重，公路、铁路穿越山岭，修建城市地铁，都需要通过开挖隧道来实现。此外，在水力发电、农田灌溉、西气东输、南水北调、国防工程等工程建设中，隧道也得到了广泛的应用。本教材以交通隧道为主。

施工时，按照设计的形状和尺寸，开挖地层，为防止隧道变形、坍塌和水的涌入，沿隧道的周边修建的支护结构，称为“衬砌”；隧道端部外露，为保护洞口和排水而修筑的结构物，称为“洞门”。此外，为保证隧道能正常使用，还需设置一些附属建筑物，如：为工作人员在进行维修和检查时能及时避让列车而在隧道两侧开辟的“避车洞”，为保证车辆正常运行而设置的照明设施，为排除渗入隧道的地下水而设置的防排水设施，为排除隧道内车辆排放的有害气体和烟尘而设置的通风系统，等。这些附属建筑与设施是保障车辆安全运行，改善洞内工作条件必需的。

1.1.2 隧道的作用

交通隧道的作用主要体现在以下几个方面：

(1) 通过隧道工程可以避免远距离绕行，缩短线路里程、提高路线技术等级和行车交通效率。

(2) 修建隧道可以保护原有的自然原貌，保护环境，避免地面公路铁路建设引起的许多地质灾害。

(3) 修建隧道可以充分利用地下空间，节省工程建设用地。

(4) 修建城市地下快速道路、地铁、过街地下通道等更有利于城市地面环境美化。

在我国近年实施西部大开发战略、加快基础设施建设的大背景下，隧道修建数量越来越多，在交通建设事业中发挥着越来越重要的作用。

1.1.3 隧道的结构组成

隧道结构由主体建筑物和附属建筑物两部分组成，主体建筑物又包括衬砌和洞门两部分。实际上，我们在讨论隧道时，还应该将围岩考虑进来。

(1) 围岩：隧道周围一定范围内，对隧道稳定有较大影响的那部分岩土体。围岩是隧道结构的天然组成部分，现代隧道理论认为，围岩既是荷载来源，又是隧道承载结构的一部分。

(2) 支护：为维护围岩稳定而施作的人工结构物，又叫衬砌，包括初期支护和二次支护。隧道开挖后，为了有效控制和约束围岩的变形，充分调动和发挥围岩的自承能力，及时施作的锚杆、钢拱架、钢筋网、喷射混凝土等，称为初期支护。初期支护有良好的柔性，能与围岩体共同变形、有效调整围岩应力、控制围岩变形。二次衬砌可以用喷射混凝土，也可以采用模筑混凝土施作，起到增加安全度、保护防水层、防止喷射混凝土层或围岩风化并作为安全储备的作用，确保隧道主体结构的长期稳定和安全。

(3) 洞门：隧道工程明暗交界处的结构物，是联系洞内衬砌与洞口外路堑的支护结构，起保证洞口边坡安全和仰坡稳定的作用，同时也是隧道出入口的标志。

(4) 附属设施：为保证隧道正常使用而设置的所有设施，如照明、通风、排水、消防、电力、通信设施，以及隧道的内装、顶棚、路面、紧急停车带等，铁路隧道还有大、小避车洞、电缆槽、无人增音洞、绝缘梯车洞等设施。

1.1.4 隧道与地面结构的不同

隧道作为一种地下结构，与地面的建筑结构有着明显的差异。

地面结构体系一般都是由结构和地基所组成，地基在结构底部起约束作用，除了自重外，荷载都是来自外部，如人群、货物、设备、水力等，受力、约束和自由度是明确的。而地下结构体系则是由周边围岩和支护结构所共同组成并相互作用的结构体系，其中以围岩(地层)为主。

围岩在很大程度上是地下结构承载的主体，支护仅用来约束地层，不使它产生过大的变形而破坏、坍塌。在地层稳固的情况下，体系中甚至可以不设支护结构而只留下地层，如我国陕北的黄土窑洞。地下结构所承受的荷载主要是结构体系的本身——地层，称之为地层压

力或围岩压力。由此可知，在地下结构体系中，地层既是承载结构的基本组成部分，又是造成荷载的主要来源，这种合二为一的作用机理与地面结构是完全不同的，即地下结构 = 支护 + 围岩，其受力、约束和自由度在结构体系不同的作用状态下是不同的。可见在隧道工程这样的地下结构中，围岩（地层）起着主要作用。

隧道工程的建设，包括开挖方法、支护形式、衬砌结构类型、隧道位置、施工管理及能否顺利地建成、工期长短、投资多少、使用中是否会出现问题等，都与隧道所在区域的围岩（地层）条件，也就是围岩的工程性质息息相关，因此我们要打好工程地质知识的基础。

1.2 隧道的分类

隧道类型很多，依据标准不同，隧道的分类就不同。

1.2.1 按隧道长度分类

《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)依据长度不同，将公路隧道分为短隧道($L \leq 500$ m)、中隧道($500 \text{ m} < L \leq 1000$ m)、长隧道($1000 \text{ m} < L \leq 3000$ m)、特长隧道($L > 3000$ m)。

《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)将铁路隧道分为短隧道($L \leq 500$ m)、中长隧道($500 \text{ m} < L \leq 3000$ m)、长隧道($3000 \text{ m} < L \leq 10000$ m)、特长隧道($L > 10000$ m)。

1.2.2 按隧道断面大小分类

国际隧道协会(ITA)根据隧道的横断面积的大小，将隧道分为极小断面隧道($2 \sim 3 \text{ m}^2$)、小断面隧道($3 \sim 10 \text{ m}^2$)、中等断面隧道($10 \sim 50 \text{ m}^2$)、大断面隧道($50 \sim 100 \text{ m}^2$)和特大断面隧道($> 100 \text{ m}^2$)。

1.2.3 其他分类方法

按所在地址，隧道可分为山岭隧道、城市隧道、水底隧道。

按施工方法，隧道可分为矿山法、明挖法、盾构法、沉埋法、掘进机法隧道等。

按埋置深度，隧道分为浅埋隧道和深埋隧道。

按洞身结构形式，隧道分为单拱隧道、联拱隧道、小净距隧道等。

按用途，隧道分为交通隧道、水工隧洞、市政隧道、矿山巷道。

对隧道进行分类，是为了针对不同类型隧道的特点和技术要求，在勘测、设计、施工和管理工作中采取有针对性的方法和措施。例如：相对山岭隧道而言，水底隧道施工时，水患处理是工程的重中之重；而城市隧道工程地处城市，用地范围较小，周边建构物较多，减小对环境影响是该类隧道的难点。

1.3 国内外隧道建设情况

1.3.1 隧道的发展历史

人类修筑隧道的记录在遥远的古代就已经有了。公元前，古巴比伦人在幼发拉底河下修筑的行人隧道，长 190 m，是迄今发现的最早的交通隧道。建于东汉明帝永平九年（公元 66 年）的石门隧道，位于今陕西省汉中市褒谷口内，是我国最早采用“火烧水浇”开凿的穿山通车隧道。

现代意义上的隧道，则开始于英国工业革命之后。

1825 年，英格兰的斯托克顿与达灵顿铁路建成第一条蒸汽火车铁路，很快铁路便在英国和世界各地通行起来。随着铁路的出现，大量的隧道得以修筑，隧道施工技术得到快速发展。

1886 年，德国工程师卡尔·本茨的三轮机动车获得德意志专利权，这是公认的第一辆现代汽车。随着汽车的普及，20 世纪 30 年代西方一些国家开始修建高速公路，60 年代以后，世界各国高速公路发展迅速，长大公路隧道相继涌现。

地铁属于城市快速轨道交通的一部分，运量大、速度快、污染少、能耗低。自 1863 年英国伦敦第一条地下铁道起，截至 2018 年年底，全球有 72 个国家和地区的 493 座城市开通了城市轨道交通系统，里程超过 26 100 km，其中地铁占 54%。

1.3.2 国外著名隧道

1. 青函隧道

青函隧道(图 1-1)是日本本州青森地区和北海道函馆地区之间穿过津轻海峡的一条海底隧道，1964 年动工，1987 年建成，耗资约 27 亿美元。主隧道全长 53.9 km，海底部分 23.3 km。它由 3 条隧道组成，主隧道宽 11.9 m，高 9 m，断面积 80 m²。最大水深 140 m，最小覆盖层厚 100 m。该隧道工程地质条件复杂，施工难度大，施工期间共造成 33 人死亡，1300 余人伤残。由于海底复杂的地质断层和软岩构造，隧道曾出现多次严重渗水事故，1969 年和 1976 年两度被海水淹没，每次水害都耗时近 5 个月才整治完成。

2. 哥达隧道

哥达隧道(图 1-2)位于瑞士中部阿尔卑斯山区的一条高速铁路上，连接瑞士和意大利，设计速度 250 km/h，全长 57 km，是目前世界上最长的山岭隧道。该隧道于 1999 年动工，2010 年全隧贯通，大约有 2500 名工人参与该项工程，8 人不幸遇难。

3. 洛达尔隧道

洛达尔隧道(图 1-3)位于挪威西部地区的洛达尔和艾于兰之间，全长 24.51 km，是目前世界上最长的公路隧道。洛达尔隧道 1995 年 3 月动工，2000 年 11 月 27 日正式通车，整个工程项目共耗资约 1 亿美元。过去来往于奥斯陆和卑尔根的车辆不仅要在洛达尔乘 3 h 的

轮渡穿越松恩峡湾，还要通过一段地势非常险峻的山路，并且在冬季冰冻时期禁止通行。洛达尔隧道通车后，奥斯陆与卑尔根之间的行车时间从以前的 14 h 缩短到 7 h，车辆在冬季照常通行无阻。



图 1-1 青函隧道



图 1-2 哥达隧道

4. 英吉利海峡隧道

英吉利海峡隧道(图 1-4)于 1986 年 2 月 12 日开工,1994 年 5 月 6 日开通,耗资约 100 亿英镑(约 150 亿美元),是世界上规模最大的利用私人资本建造的工程项目。隧道全长约 51 km,海底段 37.5 km,由 2 条直径 7.6 m 的铁路隧道和 1 条直径 4.8 m 的服务隧道组成。隧道采用盾构掘进机施工,相继解决了“盾构在深层高水压下的密封防水技术”“钢筋混凝土管片衬砌的结构和防水”“长距离掘进的运输”等技术难题。隧道的规划设计把施工和运行安全放在极重要的地位,运输、供电、照明、供水、冷却、排水、通风、通信、防火等系统都充分考虑了紧急备用的要求,提高了运行、维护的可靠性。例如 2008 年 9 月 11 日,英吉利海峡隧道发生火灾,2 天后即开始恢复客运服务。



图 1-3 洛达尔隧道



图 1-4 英吉利海峡隧道

1.3.3 我国隧道建设进展

1. 铁路隧道

截至 2018 年年底,中国铁路营业里程达 13.1 万千米。其中,投入运营的铁路隧道 15117 座,

总长 16 331 km。2018 年新增开通运营线路铁路隧道 550 座，总长 1005 km。其中，长度在 10 km 以上的特长隧道 12 座，总长约 144 km。

2. 公路隧道

截至 2017 年年末，全国公路隧道 16229 处、1528.51 万米，比 2016 年年末增加 1048 处、124.54 万米，其中特长隧道 902 处、401.32 万米，长隧道 3841 处、659.93 万米。

3. 地铁隧道

截至 2018 年年底，我国（统计数据不包括港、澳、台）已有 38 个城市开通了地铁，拥有 181 条运营线路，总里程达 5 668.75 km；在建 227 条线路。

4. 水工隧洞

根据国家 172 项节水供水重大水利工程计划，近年来我国新建水工隧洞数量持续增加，兰州市水源地引水隧洞（31.570 km）、北疆供水工程喀双隧洞（283.270 km）、东北引松供水隧洞、引汉济渭秦岭隧洞、鄂北引水工程唐县—尚市隧洞等相继开工建设或已经建成。

1.3.4 我国近年典型隧道工程

1. 青藏铁路关角隧道

青藏铁路关角隧道（图 1-5）全长 32.645 km，是世界高海拔第一长隧，也是国内已运营的最长铁路隧道。该工程于 2007 年 11 月 6 日全面开工，采用钻爆法施工，于 2014 年 4 月 15 日实现全线贯通，同年 12 月 25 日正式通车。

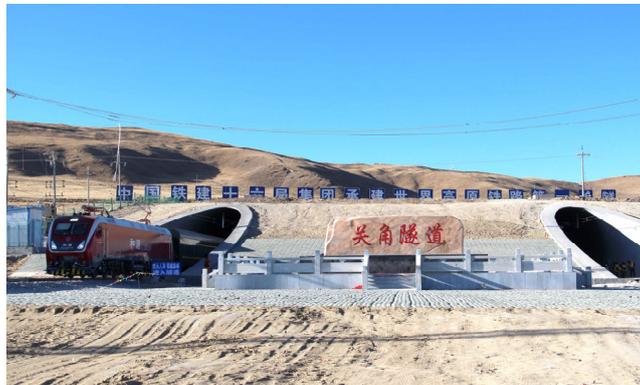


图 1-5 青藏铁路关角隧道

2. 兰渝铁路木寨岭隧道

兰渝铁路木寨岭隧道（图 1-6）全长 19.1 km，为双洞单线分离式特长隧道。隧道地质条件极其复杂，共经过包括区域性大断层在内的 11 条断裂带，高地应力软岩地段占全隧长度的 84.5%，最大地应力为 27.16 MPa，处于高地应力区域，被称为“全国铁路高风险隧道之最”。隧道围岩不仅变形大，且变形快，流变性强，极易坍塌，被国内外专家称为“中国之最，世界罕见”，为全线唯一动态设计、动态施工的隧道项目，于 2016 年 7 月 18 日贯通。



图 1-6 兰渝铁路木寨岭隧道

3. 港珠澳大桥沉管隧道

港珠澳大桥沉管隧道全长 5.664 km，最大水深 44 m，由 33 节沉管对接而成，包括 28 节直线段沉管和 5 节曲线段沉管。港珠澳大桥海底隧道是我国第一条外海沉管隧道，也是世界上最长的公路沉管隧道和唯一的深埋沉管隧道，被誉为交通工程中的“珠穆朗玛峰”。

4. 武汉三阳路长江隧道

武汉三阳路长江隧道全长 4.6 km（江中段长约 2.59 km），是世界上首条公路、铁路合建的水下盾构法隧道。该隧道采用 2 台直径为 15.76 m 的泥水盾构施工，于 2016 年 4 月始发（图 1-7）。



图 1-7 武汉三阳路长江隧道盾构始发

5. 八达岭地下车站

京张高铁八达岭隧道全长 12.01 km，八达岭地下车站最大埋深 102 m，地下建筑面积 $3.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，是世界最大、埋深最深的高铁地下车站。车站两端渡线单洞开挖跨度 32.7 m，是国内单拱跨度最大的暗挖铁路隧道。工程于 2016 年 4 月开工建设，其效果图见图 1-8。

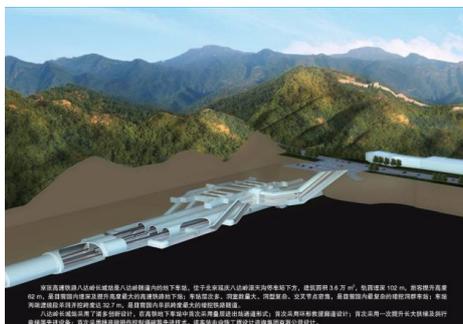


图 1-8 八达岭地下车站效果图

1.4 本课程学习建议

首先，应打好相关知识基础。隧道工程存在于复杂的地质环境中，具有很强的综合性，因此，学生应认真学习工程地质知识、力学知识和工程材料知识。

其次，要理论联系实际，也要重视学习基本理论与方法。隧道建设是实践性很强的工作，学习过程中必须同生产实践相结合，才能加深对本课程知识内容的理解。同时，我们也要重视理论学习，对隧道施工过程中围岩应力变化、支护体系的工作原理、围岩稳定性控制的基本原理和方法等问题做到心中有数，才能确保施工中采取的技术措施是合理的，才能有效地解决工程问题。

此外，应培养多渠道自主学习的习惯。现在获取学习资源的渠道很多，广泛阅读有关的技术刊物和专著，利用网络资源进行自主学习是非常方便的，也是非常必要的。

复习思考题

1. 隧道由哪些部分组成？它与地面建筑结构相比有何不同？
2. 隧道有哪些分类方法？各分类方法的目的是什么？
3. 查询资料，了解国内外著名隧道的特点与关键技术。

第2章 隧道工程勘测设计

【知识目标】

1. 熟悉隧道调查与勘察的内容和方法；
2. 掌握隧道位置选择和洞口位置选择的方法和原则；
3. 了解隧道线形设计的内容；
4. 了解隧道断面设计的内容；
5. 掌握隧道曲线加宽的计算；
6. 熟悉隧道勘察设计文件的内容和组成。

【技能目标】

1. 能够制定隧道工程地形地质调查的提纲，编写调查报告；
2. 能够合理确定隧道的位置和隧道洞口的位置；
3. 能够初步阅读勘察设计文件。

2.1 隧道工程调查与勘察

隧道总是处在一定的环境和地质条件中的，环境与地质条件对隧道工程的影响必须重视。隧道工程勘察的目的，就是查明隧道所处位置的工程地质条件和水文地质条件以及隧道施工和运营对环境保护的影响，为规划、设计、施工提供所需的勘察资料，并对存在的岩土工程问题、环境问题进行分析评价，提出合理的设计方案和施工措施，从而使隧道工程经济合理、安全可靠。

2.1.1 既有文献资料的收集

为了做好线路规划和后期调查，应对隧道所在区域的既有文献资料进行收集和分析，收集资料应以拟建隧道为中轴，取较大范围调查。

需要收集的既有文献资料主要包括：

地形地貌：地形图、航空照片、遥感和遥测资料等；

地质资料：地质资料文件及地质图；

工程资料：邻近隧道、其他已有工程及其所记录的工程地质和水文地质资料；

气象资料：当地的气温、气压、风速、风向、降雨、降雪等；

用地及环境资料：施工临时用地、文物古迹、自然保护区、居民环境、其他受影响的设施等；

灾害资料：地震、滑坡、泥石流、洪水等。

2.1.2 地形、地质调查与勘察

隧道地形、地质调查分施工前和施工中两阶段调查。

1. 施工前的地形与地质调查内容

(1) 地层、岩性及地质构造变动的性质、类型和规模。

(2) 断层、节理、软弱结构面特征及其与隧道的组合关系，围岩的基本物理力学性质。

(3) 地下水类型及地下水位、含水层的分布范围及相应的渗透系数、水量和补给关系、水质及其对混凝土的侵蚀性，有无异常涌水、突水。

(4) 崩塌、错落、岩堆、滑坡、岩溶、自然或人工坑洞、采空区、泥石流、湿陷性黄土、流沙、盐渍土、盐岩、多年冻土、雪崩、冰川等不良地质和特殊地质现象。

(5) 隧道通过含有有害气体或有害矿体的地层时，应查明其分布范围、有害成分和含量，并预测和评价其对施工、运营的影响，提出防治措施。

(6) 按《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)规定或经地震部门鉴定，确定隧道所处地区的地震动参数。

2. 施工前的分阶段勘察

公路隧道工程地质勘察是分阶段进行的。《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011)将公路工程勘察分为三个阶段：可行性研究阶段勘察、初步勘察，详细勘察。可行性研究阶段勘察又分为预可行性研究勘察(预可勘察)和工程可行性研究勘察(工可勘察)。

(1) 可行性研究阶段勘察。

预可行性研究着重收集和既有文献资料；而在工程可行性研究中，要分析隧道中轴一定范围的地形地貌、邻近工程、气象、水文及区域性地质、用地及环境、灾害等既有资料及沿路线进行地面踏勘，为隧道路线走向比选提供区域地形、地质和环境等基本资料。

(2) 初步勘察。

初步勘察的目的是选择隧道位置和初步确定围岩类别，因此初勘应在踏勘获取资料的基础上进行，初步查明地形、地质条件及其他环境状况对线路线形、隧道走向、洞口位置、隧道长度以及隧道其他附属工程的影响。勘察应由有相应资质的地质部门中有经验的地质工程师以现场踏勘、测绘和必要的勘探工作等方式进行，主要查明地形、地貌、地质构造、地层岩性、特殊地质、不良地质、地下水以及其他地质特征。

调查完毕后，经过归纳整理和分析研究，提供下列资料：

地质条件简单的短隧道可列表说明其工程地质条件，特长隧道、长隧道、中隧道和地质条件复杂的短隧道应按工点编制文字说明和图表资料。

文字说明：水文地质及工程地质条件说明，分段评价围岩等级，进出口边坡稳定性，滑坡等地质灾害的可能性，岩爆和围岩大变形的可能性，偏压的可能性，突水、突泥、塌方的可能性，有害气体（物质）的影响，地下水涌水量分析计算，隧道建设对环境的不良影响及隧道工程建设场地的适宜性。

图表资料：隧址区域水文地质平面图，工程地质平面图，工程地质纵断面图，钻孔柱状图，物探、原位测试、地应力测量资料，水文地质测试资料，岩、土、水测试资料，有害气体、放射性矿体、地温测试资料，附图、附表和照片。

（3）详细勘察。

详细勘察是在初勘基础上，进一步用钻探、物探和测试等手段进行勘察，详细调查地形、地质和环境等。其调查的内容有岩性、地质构造、地表水及地下水、地下资源等，以分析其对隧道设计与施工的影响。

岩性调查内容包括岩石的种类和特征，松散堆积物，岩石的物理、力学性质，风化及变质情况等。

地质构造调查内容包括地层、岩层产状、褶皱、断层与破碎带、节理、劈理及围岩结构完整状态。

地下水与地表水调查内容包括涌水及枯水状态、地层含水层与隔水层的分布、水的补给来源等。

地下资源调查内容包括矿物资源、天然气、温泉、地热等。

详细勘察的方法主要有地球物理勘探（简称物探）、化学勘探（简称化探）、简易钻探等。一些成熟的技术也应用到地质钻探中，如：将微型摄影仪放入钻孔内，将孔内的情况拍摄成连续照片或反映在显示屏幕上；利用遥感技术，在工程地质测绘中可以更客观更全面地看到在地面踏勘时看不到或看不清楚的现象，使勘察工作更宏观、全面。

详勘完毕需要提供的资料与初勘要求的内容相似，但深度要求更详细、准确。

3. 施工中的工程地质调查

（1）核实岩性、地质构造、地下水等情况，分析判定实际揭露的围岩级别。

（2）采用超前地震波反射、声波反射、地质雷达等物理手段，或采用超前钻孔、平行导坑、试验坑道等进行超前探查，及时预报解决施工中遇到的工程地质和水文地质问题。

若施工中的地质调查与施工前的调查不符，应及时反馈给设计方进行修改，并及时调整施工方案。

2.1.3 其他工程环境调查

（1）自然环境调查：地表水系、地下水露头、涌泉、温泉、沼泽、天然和人工湖泊、植

被、矿产资源以及动植物生态等。

(2) 社会环境调查：隧道场区内土地使用情况、农田、水利设施、建筑物、地下管线等。

(3) 生活环境调查：生产生活用水、交通状况、施工和营运噪声、振动、污水及废气排放等对生态环境的影响，施工和运营可能造成的地表沉降、塌陷、地面建筑破坏、生产生活用水枯竭等。

(4) 施工条件调查：施工便道、施工场地、弃渣场地、供水、供电、通信条件和建筑材料的来源、品质、数量等。

2.2 隧道选址

2.2.1 隧道选址原则

合理选择隧道位置，可以缩短线路长度，使线路平缓顺直、病害少、维修简单，减少通行时间，减少道路修建对自然植被的破坏。隧道位置选择与线路选择是相关的。一般情况下，隧道位置是由线路位置大体决定的，线路方案一旦确定，隧道位置只能进行很小幅度的调整。但是，如果隧道很长，工程规模很大，或者工程地质条件很复杂，属于本区段的重点控制工程，就得根据隧道的最优位置，调整线路。

隧道位置的选择应遵循下列原则：

隧道应选择在地质构造简单、地层单一、岩体完整等工程地质条件较好的地段，以隧道轴线垂直于岩层走向最为有利。

隧道应避免断层破碎带，当必须穿过时，宜与之垂直或以大角度穿过。

隧道应避免岩溶强烈发育区、地下水富集区、有害气体及放射性地层、地层松软地带。

地质构造复杂、岩体破碎、堆积层厚等工程地质条件较差的傍山隧道，宜向山脊线内移，加长隧道，避免短隧道群。

隧道洞口应选择在边坡稳定、覆盖层薄、无不良地质之处，宜早进洞、晚出洞。

隧道顺褶曲构造轴线布置时，宜避让褶曲轴部破碎带，选择在地质条件较好的一侧翼部通过。

隧道宜避开高地应力区，不能避开时，洞轴宜平行于最大主应力方向。

2.2.2 隧道位置选择

2.2.2.1 不同地形条件下隧道位置选择

1. 越岭隧道

线路跨越高程很大的分水岭时，这段线路称为越岭线。越岭隧道所经过的地区一般山峦

起伏、地形陡峻、地质复杂，自然条件变化很大。选择越岭隧道的位置时，应在附近较大范围内比选，全面调查各个垭口，弄清其高程和工程地质与水文地质条件，并查清垭口两侧的地形地貌和地质情况，然后选择最合适的垭口作为隧道穿越的位置，并最终确定隧道的位置和高程。因此，选择越岭隧道的位置，主要就是选择垭口和确定隧道高程。

(1) 垭口选择。

确定线路时，常常有若干个垭口可以通过，此时就要分析比较，选定最为理想的垭口。从平面上考虑，越靠近连接控制点的航空直线的线路，距离越短，但由于垭口两侧地形、地质条件限制，往往无法做到。因此，越岭隧道的路线，应进行较大面积方案的选择，对可能穿越的垭口，拟订不同的越岭高程及其相应的展线方案，进行全面技术经济比较后确定。一般宜选择地质条件较好的垭口一侧穿越。

例如，成昆线乃托至泸沽段，当中有明显的分水岭把两地隔开。分水岭与乌斯河一侧的高差达 1 600 m，分水岭与泸沽一侧高差也有 620 m。线路要跨越，必须以隧道通过。由于工程量较大，需要慎重比选，于是在小相岭纵横几十千米范围内进行了大面积的测绘及调查，得知这一地区是个横断山脉，小相岭的脊线是明显的分水岭。所有可跨越的垭口都在 2500 m 高程以上，其中以沙木拉达垭口最低，而其两侧沟谷较长，地势开阔，线路沿沟谷台地有展线的条件。经过技术和经济的比较，最后选定了沙木拉达隧道方案，如图 2-1 所示。

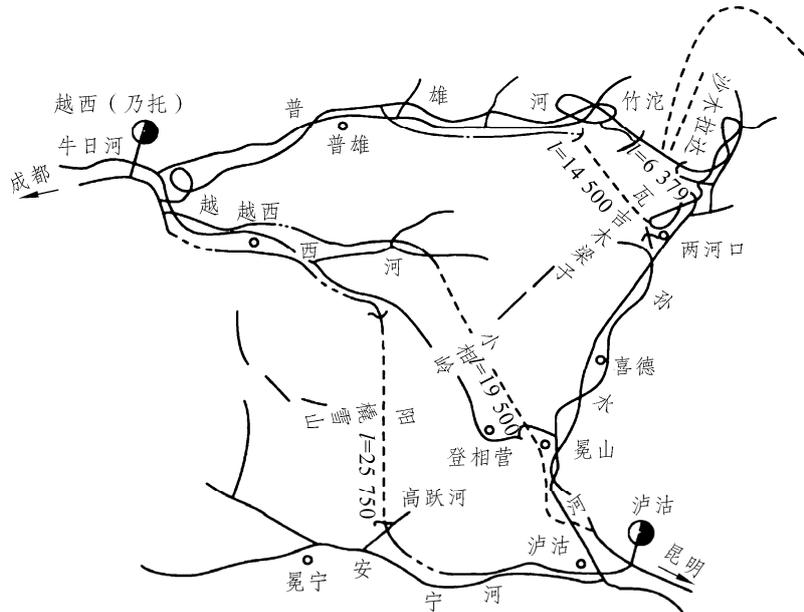


图 2-1 成昆线乃托—泸沽段隧道方案

(2) 高程选定。

隧道位置定得越高，山体越薄，隧道越短，但两端的引线高程也相应增加，需要引线工程迂回盘绕而出现坡陡弯多的情况；若隧道位置定得越低，隧道就越长，但引线会更顺直平缓，有利于今后的长期运行。因此，隧道高程位置的选定，可以根据越岭地段的地质条件，以临界高程作为隧道穿越方案的比选基础（临界高程是隧道造价、引线造价及营运用费总和

为最小的越岭高程)。在选定隧道高程时,务必全面衡量,从技术和经济两方面,尤其在今后长远运营条件上,做出综合的比较,决定取舍。

2. 傍山隧道

线路行走在河谷地段时,修建的隧道即为傍山隧道。傍山隧道的特点是:

依山傍水修建时,施工中容易破坏山体平衡,造成各种病害。

在山体表层范围内修建隧道,常常遇到崩塌、滑坡、错落、松散堆积及泥石流等不良地质现象,地质情况较为复杂。

一般埋深较浅,属浅埋隧道和短隧道群,洞身覆盖薄、易产生不对称的偏压情况。

河道狭窄,水流湍急,冲刷力强,对山坡稳定和隧道安全威胁较大。

傍山隧道的位置选择要点:

保证最小覆盖层厚度。

傍山隧道在浅埋地段,要注意洞身覆盖厚度问题。为保持山体稳定和避免坡面被冲刷,形成偏压,隧道位置宜往山体内侧靠。同时,河岸存在冲刷现象或河道窄、水流急、冲刷力强的地段,要考虑冲刷对山体和洞身稳定的影响,隧道位置也宜往山体内侧靠一些,有可能时,最好设在稳定的岩层中(图 2-2)。

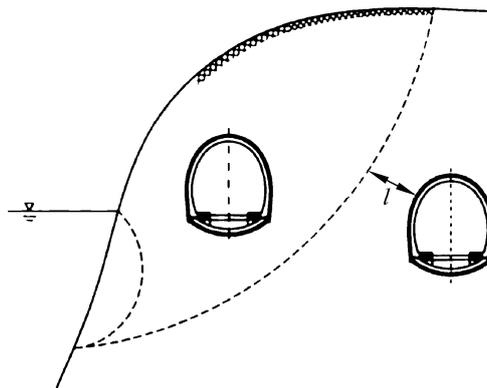


图 2-2 河道冲刷下的隧道位置选择

“裁弯取直”。

线路沿山嘴绕行应与直穿山嘴的隧道方案进行比较。如山嘴地段地形陡峻、地质复杂,河岸冲刷严重,以路堑或短隧道通过难以长期保证运营安全时,应尽可能用“裁弯取直”,以较长隧道方案通过。

例如:关村坝隧道位于金口河至道林子间,原设计沿大渡河绕行,线路迂回长达 16.6 km,其间有隧道 8 座总长 4.2 km(最长的隧道不足 2 km),大中桥 2 座共长 124 m,土石方 $2.15 \times 10^4 \text{ m}^3$,还通过枕头坝至中坪溪长达 8 km 的不良地质地段,且要占用不少农田,因而研究了裁弯取直做长隧道的方案。经过比选,相关部门采用了 6 107 m 长的关村坝隧道方案。裁弯取直与绕行方案相比,缩短线路 10.1 km,减少了 25 个弯道和车站 1 处,避开了不良地质地段,占用农田显著减少,工程单一,还可节约大量运营费,为安全行车创造了良好条件,

如图 2-3 所示。

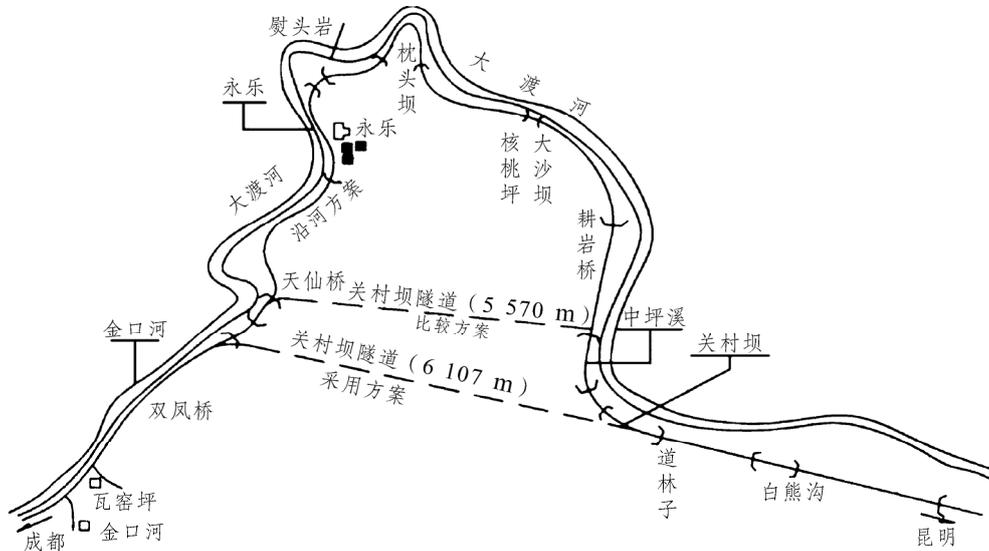


图 2-3 关村坝隧道平面图

2.2.2.2 不同地质构造下隧道位置选择

1. 单斜构造

单斜构造是指成层的岩层向一个方向倾斜的地质构造，常见的地质问题为不均匀地层压力或偏压，或者产生顺层滑动等现象。当隧道与倾斜的岩层走向一致时，如果隧道的位置恰在层间软弱面上，则岩层滑动将使隧道结构受到很大的剪力，以致把结构物损坏。如果隧道恰在层间软弱面处，则岩层滑动会使隧道的某一段发生横向推移，而导致断开错位。因此，应避免将隧道置于两种岩性迥然不同的软弱构造面处，尽量不要把隧道中线设计成与软弱构造面的走向一致或平行，要正交或有一定的交角，如图 2-4 的 B 所示隧道位置就不太合理，而比较合理的应该是 A 位置，因为它已完全位于稳定围岩之中。

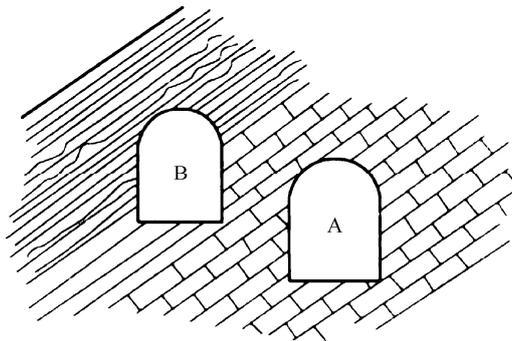


图 2-4 隧道与单斜构造岩层走向一致

2. 褶曲构造

在褶曲构造地区，岩层一部分向上弯曲成为背斜，另一部分向下弯曲成为向斜。背斜的岩层受弯而在上面出现节理、裂隙，切割岩体成为上大下小的楔块，楔块受到两侧邻块的挟制，使得楔块的重量由邻块分担，因而只产生小于原重的压力。与此相反，向斜地层受弯而在下面开裂，切割岩体成为上小下大的楔块，这种楔块在重力作用下，极易脱离母岩而坠落，于是产生较大的压力，也就是给结构物以较大的荷载；而且在施工时，这种楔块极易发生掉块或坍方，对工程产生不利影响。所以，隧道穿过褶曲构造时，选在背斜中要比在向斜中有利。如果恰在褶曲的两翼，则将受到偏侧压力，结构需加强，如图 2-5 所示。

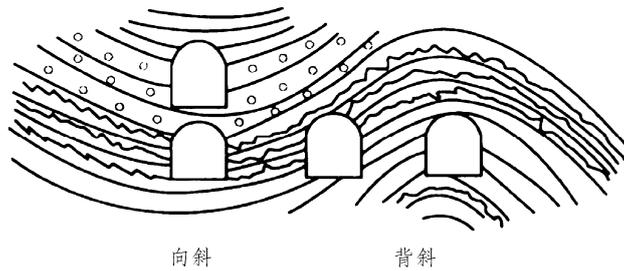


图 2-5 褶曲构造中隧道位置选择

3. 断层构造

断层带中的岩体呈破碎状态，当严重揉挤时，可成为泥状。断层带的岩体强度很低，而且往往是地下水的通道。遇到这种地质条件时，施工十分困难。选择隧道位置时，应尽可能避开断层。不得已时，隧道走向与断层走向应隔开足够的安全距离，或隧道走向与断层走向正交与斜交跨过。在断层构造中施工时，还应做好各种支护及防水措施。如图 2-6 所示，某线路走向与一区域性大断裂带平行，隧道位置采用（甲）方案通过，避开了外线崩塌、坍方的威胁和中线长区段正穿或靠近断层带的不利条件。

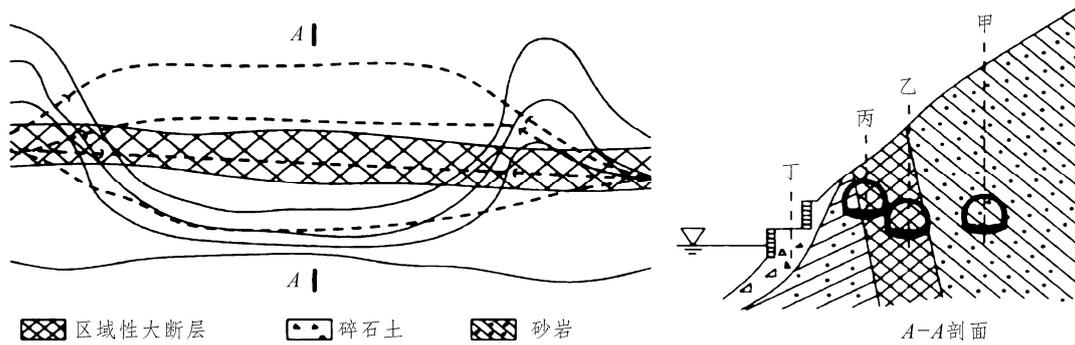


图 2-6 断层破碎带隧道选线

2.2.2.3 不良地质地段隧道位置选择

不良地质地段是指存在滑坡、崩塌、岩堆、泥石流、岩溶、危岩、落石、瓦斯等危害的地段。

1. 滑坡地区

滑坡地区山坡土体在重力作用下，有沿某一软弱面整体下滑的趋势。隧道通过这种地段时，将会受到滑坡土体推力，有时会使结构物挤压破坏或是剪切断开。当隧道通过滑坡地区时，应充分考虑河岸冲刷、剥蚀、人为活动影响等引起的滑坡风险。隧道位置宜避开软弱面（夹层），将其置于可能滑动面以下一定深度处的稳定岩体中（图 2-7）。

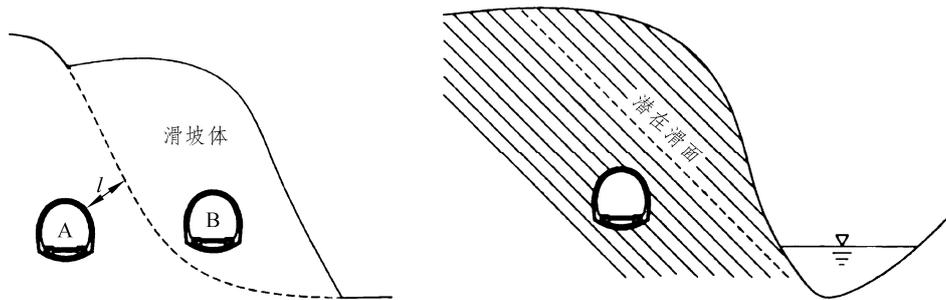


图 2-7 滑坡地区隧道位置选择

如果明确滑坡已停止滑动，也可以把隧道置于滑坡体之内，但要采取有效措施（如上部减载或下部支挡、排水、加固等）加以处理，不致因施工而造成滑坡体复活，影响施工、运营安全。

2. 崩塌地区

山坡陡峻的地段，岩体易因风化而崩塌。崩塌的出现是突然的，冲击力很大，不易防范。选择隧道位置时，最好不要沿这类山坡通过。不得已时，应当尽可能地把隧道置于山体之中，穿过稳定的岩层（图 2-8，A）。对于崩塌危害不甚严重的区段，若采用内侧隧道方案（A 方案）工程量大，而采取处理措施后，采用外侧明洞方案（图 2-8，B）安全可靠时，可以采用明洞方案。

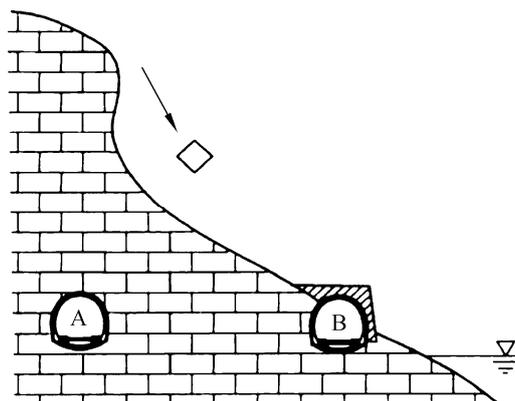


图 2-8 崩塌地区隧道位置选择

3. 岩堆地区

岩石经过风化作用，分解和剥离成为大小不一的块体，从山坡上方滚下，或冲刷夹持而

堆积在山坡较平缓处或坡脚处，就形成了无黏结力的堆积体。隧道通过这类地区，开挖时极易发生坍方，给施工带来极大困难（图 2.9，B）。这时，宜把隧道位置放在岩堆以下的稳定岩体之中（图 2-9，A）。

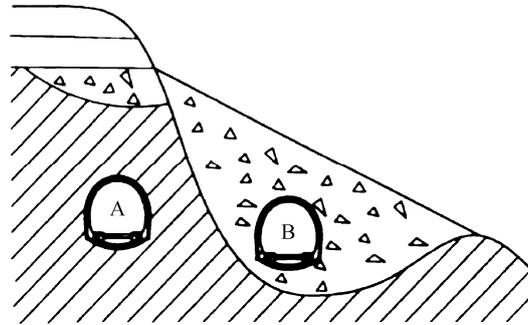


图 2-9 岩堆地区隧道选线

4. 泥石流

坡面堆积的土壤和岩块受到洪水作用形成泥石流，可能摧毁路基，堵塞隧道。因此，在选择隧道位置时，务必躲开泥石流泛滥区，如躲避不开，需使隧道洞身置于泥石流下切深度以下的基岩中或稳定的地层内，并保持拱顶以上有一定的安全覆盖厚度（图 2-10）。隧道顶板厚度要满足河床下切、安全施工和泥石流改道等因素要求。应避免把隧道放在冲积扇范围内，以免堵塞隧道洞口。

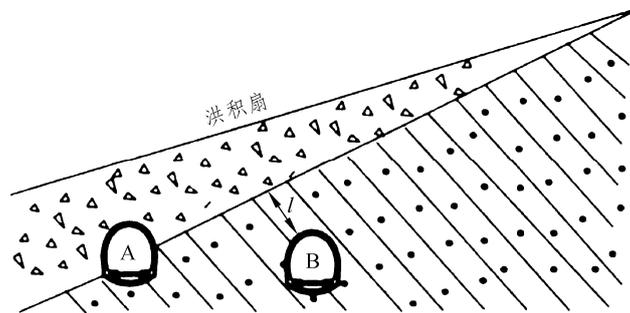


图 2-10 泥石流地区隧道选线

5. 岩溶地区

碳酸盐类岩石（如灰岩、白云岩）易受水溶蚀而形成各种岩溶现象。选择隧道位置时，应尽可能避开这类地区。当不能避开时，应探明溶洞的规模、性质和与隧道的位置关系，择其较狭窄、影响范围最小处，垂直或以大角度穿越。宜选择岩溶水不发育的地带通过。施工及运营时均需防范岩溶突水风险。隧道洞身周围有溶洞存在而不能避开时，宜使隧道与溶洞间壁（特别是顶底板）保持一定的岩壁厚度，否则应有合理的处理措施。

6. 瓦斯地区

煤系地层蕴藏着如甲烷（ CH_4 ）和二氧化碳（ CO_2 ）等有害气体。隧道开挖时，有害气体逸出，轻则致人窒息，重则引起爆炸，危害甚大。选择隧道位置时应尽量避开瓦斯地区，无

法避开时，施工中应高度重视瓦斯的排放与检验，可参考煤矿行业的安全措施。

7. 地下水

地下水多是由地表水的渗透或地下水源补给的。例如岩层裂隙中的裂隙水或溶洞中储藏的岩溶水，它们有时是流动的，有时是静止的，有时还有压力水头。它们的存在，使岩石软化、强度降低、层间夹层软化或稀释，促成了层间的滑动。裂隙中的水在开挖时涌入坑道，给施工带来困难，也给以后养护带来了无休止的危害。选择隧道位置时，最好不从富水区中经过。

2.2.3 隧道洞口位置的选择

洞口是隧道进出的咽喉，又是隧道施工中的主要通道。洞口位置选择是否合理，直接关系到隧道的施工和运营安全与否、造价高低、工期长短。所以在隧道线路设计中，洞口位置的选择是一项很重要的工作。隧道洞口位置选择时，要结合洞口的地形、地质、施工、运营条件以及洞口的相关工程（桥涵、通风设施等），本着“早进晚出”的指导思想综合分析确定。

1. 不同地形条件下隧道洞口位置选择

（1）洞口线路宜与等高线正交，使隧道正面进入山体[图 2-11（a）]，洞口结构物不致受到偏侧压力。对于傍山隧道，因限于地形，有时无法与等高线正交，只能斜交进洞时，尽量使交角不小于 45° [图 2-11（b）]，应避免隧道中线与地形等高线平行。

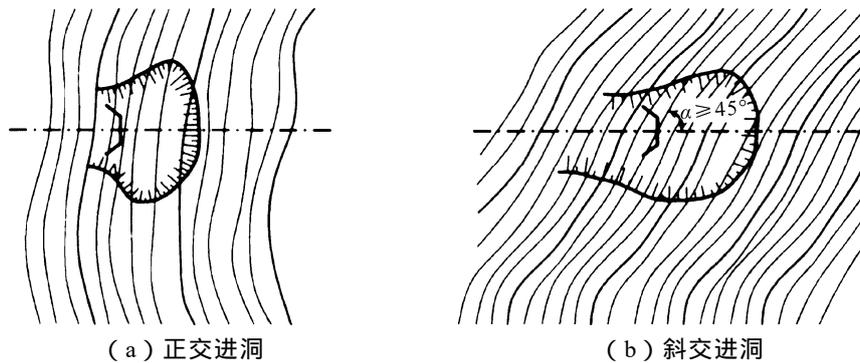


图 2-11 洞门平面示意图

（2）洞口不宜设在垭口沟谷的中心或沟底低洼处，不要与水争路（图 2-12，A）。垭口沟谷常会遇到断层带或褶曲带、坍方、冲积土等不良地质，同时地表流水都汇集于此，再加上洞口路堑开挖，破坏了山体原有的平衡，更易引起坍方，甚至不能进洞。所以，洞口最好选在沟谷一侧，留出泄水的通路（图 2-12，B）。

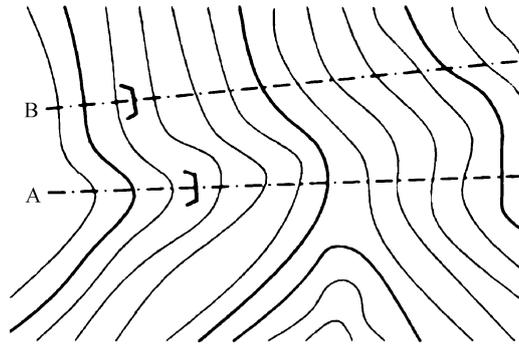


图 2-12 沟底附近洞口位置示意图

(3) 傍山隧道洞口，靠山一侧边坡较高时，如有塌方、落石等风险，应早进洞或接长明洞，必要时采取适当的防护措施。特别注意洞口段的地层情况及覆盖层厚度，如果形成偏压，须防止坍塌和破坏山体的稳定。

(4) 悬崖陡壁下的洞口，不宜切削原坡面。若崖壁稳定，则可贴壁进洞，如图 2-13 (a) 所示；如可能发生掉块，则可采用接长明洞、棚洞或其他防落石措施，如图 2-13 (b) 所示。

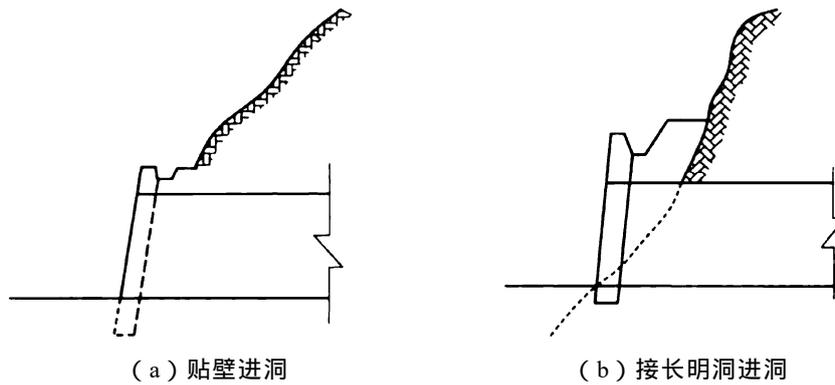


图 2-13 陡壁进洞纵断面示意图

(5) 在缓坡地形选择洞口时，应综合考虑洞外线路土方工程量、排水、施工等多因素，尽量少占农田。隧道位于城镇、风景区附近时，尽量少做长挖堑进洞，可适当延长明洞，如图 2-14 所示。

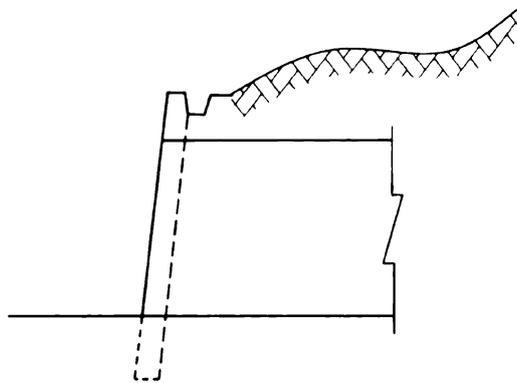


图 2-14 缓坡洞口纵断面示意图

(6) 当隧道附近有河流、湖泊、溪水等水源时, 洞口标高应在洪水位安全线以上, 其路肩高程应高出设计水位加波浪侵袭高度和壅水高度至少 0.5 m。设计水位的洪水频率标准在Ⅰ、Ⅱ级铁路应为 1/100 (百年一遇), Ⅲ级铁路为 1/50; 当观测洪水 (包括调查可靠的有重现可能的历史洪水) 高于上述设计洪水频率标准时, 应按观测洪水设计; 但当观测洪水的频率在Ⅰ、Ⅱ级铁路超过 1/300, Ⅲ级铁路超过 1/100 时, 应分别按 1/300 和 1/100 设计。

2. 不同地质条件下隧道洞口位置的选择

(1) 洞口应尽可能地设在山体稳定、地质较好、地下水不太丰富的地方, 尽量避开崩塌、滑坡、岩堆、岩溶、流砂、泥石流、盐岩、多年冻土、雪崩、冰川等对结构物会造成危害的地方。

(2) 当岩层倾斜, 层理、片理结合很差或存在软弱结构面时, 不宜大挖, 避免斩断岩脚, 防止顺层滑动或塌方。宜尽量早进洞或设明洞引进, 不能避开堆积层进洞时, 不宜采用清方的办法缩短洞口, 若有必要应接长明洞。

(3) 干燥无水、密实、稳定的老黄土可按一定的挖深进洞, 有水或新黄土则不宜大挖。洞口应避免开冲沟, 防止坡面冲蚀产生泥石流。

(4) 洞口为软岩或软硬岩互层时, 应适当降低边、仰坡高度, 以减少风化暴露面, 同时对软岩坡面可作适当的防护。

3. 洞口位置选择需考虑的其他因素

除地形、地质因素外, 隧道洞口位置选择尚应考虑施工、环境等因素。

确定洞口位置时, 需考虑施工场地的布置。隧道洞口多在地沟谷之中, 地势狭窄, 而施工有许多工序是在洞外进行的, 需要一定的场地, 如运输便利的位置、弃渣的地点、材料堆放的位置、机械设备的保养、生产管理 & 生活用房等。

环境保护是隧道洞口选择时应着重考虑的因素, 过去有所忽视。随着对环境保护的要求越来越高, 在确定洞口位置时, 必须尽量减少破坏天然植被, 最大限度地保护自然景观。当洞口附近有居民点时, 还应考虑施工爆破、噪声、水质污染对环境的影响, 切实做好相应的工程措施。

2.3 隧道线形设计

隧道是整条线路中的一个区段, 设计时, 首先要满足整条线路规定的各种技术指标, 其次尚需满足为适应隧道特点的附加技术要求。

2.3.1 铁路隧道线路平面设计

直线隧道线路顺直, 距离短, 行车速度快。因此, 隧道内的线路最好采用直线, 但是, 受到地形或地质条件的限制, 往往不得不采用曲线。与直线隧道相比, 曲线隧道有下列缺点:

曲线隧道的建筑限界需要加宽,开挖尺寸相应地加大,开挖的土石方量和衬砌的圬工量都有所增加。

曲线隧道的断面是变化的,不同断面上的支护尺寸不一致,增加了施工难度。

洞身弯曲,洞壁对气流的阻力加大,通风条件变差,行车阻力增大,抵消了一部分机车牵引力。

在曲线隧道洞内进行施工测量时,操作复杂,精度也有所降低。

列车在曲线隧道内运行时,由于列车产生离心力,再加上洞内空气潮湿,使得钢轨磨损加速,从而使洞内的养护工作量增大。

运营中为了保证隧道建筑限界的要求和正常的行车条件,需要经常检查线路平面和水平,曲线隧道也较直线隧道增加了维护作业量和难度。

当地形、地质等条件限制,隧道必须采用曲线时,应注意以下问题:

应尽可能采用较大的曲线半径和较短的曲线长度,且将曲线设置在隧道洞口附近为宜,以减小其不利影响。

在曲线两端设缓和曲线时,最好不使洞口恰恰落在缓和曲线上。因为缓和曲线在平面上半径总在改变,外轨超高值也在变化,在双重变化下,列车行驶不平稳,所以,应尽可能将缓和曲线设在洞外适当距离以外。

隧道内若设置圆曲线,其长度不应短于一节车厢的长度。

一座隧道内最好不设一条以上的曲线,尤其是不宜设置反向曲线或复合曲线,因其修养护比同向曲线复杂,列车运行比同向曲线更不平稳。

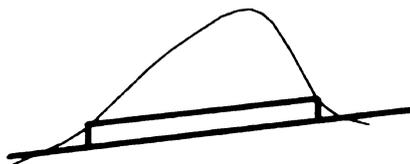
当必须设置两条曲线时,两曲线间应有足够长的夹直线,一般要求超过3倍车辆长度。

2.3.2 铁路隧道线路纵断面设计

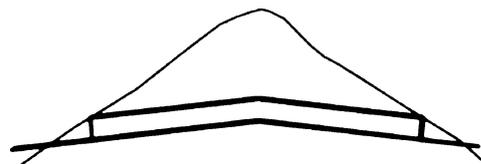
铁路隧道纵断面的设计,必须满足行车安全和平稳的要求,并应考虑施工和养护的方便。设计主要考虑的因素是排水、施工、通风、越岭高程等,主要包括坡道形式、坡度大小、坡段长度和坡段连接。

1. 坡道形式

单坡,如图 2-15(a)所示,多用于线路的紧坡地段(需要在较短的距离内拔高较高的高程)或是展线的地区,因为单坡可以争取高程。单坡隧道两洞口的高差较大,由此产生的气压差和热位差能促进洞内的自然通风。在施工过程中,低位洞口有利,因它是往上坡方向掘进,重车下坡,空车上坡,运输动力消耗低,产生的废气少,水也自然顺着坡道排出;而高位洞口不利,因它是往下坡方向掘进,出渣、排水不便,车辆排放废气多。



(a) 单坡



(b) 人字坡

图 2-15 坡道形式示意图

人字坡，如图 2-15 (b) 所示，多用于长大隧道，尤其是越岭隧道。在满足排水的同时，人字坡不必抬高洞口高程，它与山坡的自然坡形正好一致，这对于不需要争取高程的越岭隧道是十分合适的。由于隧道两端都是往上坡施工，因而掘进、排水都有利，但施工废气将自然集聚于工作面，不利于通风。运营时，废气也会聚集在坡顶，即使用较强的机械通风，有时也排除不干净，长期积累，浓度渐渐增大，影响司机和洞内维修人员健康，因而对于长大隧道，往往在坡顶设置通风竖井，以利运营通风。

两种不同的坡形适用于不同的隧道。对于紧坡地段，线路要争取高程，应考虑采用单坡隧道。对于可以单口掘进的短隧道，也可以采用单坡。而对于长大隧道，特别是越岭隧道，宜采用人字坡。此外，在设计时，还需考虑施工条件，如地下水的发育程度、出渣量的大小等，在允许的前提下，尽量照顾施工的方便。

铁路隧道在人字坡的顶部，允许设置不长于 200 m 的平坡。当列车通过这种地段时，车钩为拉紧状态，附加力及附加加速度的变化较小，可以用较短的坡段长度。

2. 坡度大小

对于行车来说，以平坡为最好。但是，为了适应地形起伏变化以减少工程量，最好随地形的变化设置相应的线路坡度，但坡度应不超过限制坡度，也就是说，坡度不能过大。

不同等级的铁路线路有不同的限坡（最大坡度）。由于隧道内的行车条件比明线差，因此需要对限坡作进一步的折减，原因如下：

洞内湿度影响。隧道内空气的相对湿度大，因而在钢轨踏面上凝成一层水分子薄膜，使轮轨之间的黏着系数降低，导致机车的牵引力降低。

洞内空气阻力影响。列车在隧道内行驶，其作用犹如一个活塞，洞内的空气阻力会削弱列车的牵引力。

隧道长度小于 400 m 时，上述影响不太显著，坡度可以不予折减。位于长大坡道上且长度大于 400 m 的隧道，其坡度应予以折减。曲线地段的隧道，应先进行隧道内线路最大坡度折减，再进行曲线折减。折减的方法按下式进行：

$$i_{\text{允}} = m \times i_{\text{限}} - i_{\text{曲}} \quad (2-1)$$

其中： m 为隧道内线路的坡度折减系数，与隧道的长度有关，规范中列出了经验数值，如表 2-1 所示； $i_{\text{允}}$ 为设计中允许采用的最大坡度(‰)； $i_{\text{限}}$ 为按照线路等级规定的限制最大坡度(‰)； $i_{\text{曲}}$ 为曲线阻力折算的坡度当量(‰)。

表 2-1 隧道内线路的坡度折减系数

隧道长度/m	电力牵引	内燃牵引
401 ~ 1 000	0.95	0.90
1 001 ~ 4 000	0.90	0.80
> 4 000	0.85	0.75

注：最大坡度不分单、双机牵引，也不分单、双线隧道。

列车的机车一旦进入隧道，空气阻力就增加，黏着系数也开始减少，所以在上坡进洞前半段远期货物列车长度范围内，也要按洞内一样予以折减。至于列车出洞，机车已达明线，则不存在折减的问题，如图 2-16 所示。

除了最大坡度的限制以外，还要限制最小坡度，以便隧道内的水向外流出。《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)规定，隧道内线路不得设置平坡，最小的允许坡度应不小于 3‰。

内燃机牵引的列车开始上坡时，一般都有足够的前进能力，行至中途时机车的效能就会有所降低，逐渐衰减以致趋近于不能前进而出现打滑、停车甚至倒退等危险情况。即便勉强爬上，缓缓而过，洞内行车时间过长，产生的污浊空气也会使机车工作人员以及旅客感到不适，甚至酿成窒息、晕倒等事故。因此要求：1 000 m 及以下的隧道检算车速不应小于计算速度，1 000 m 以上的隧道检算车速不应小于 25 km/h。当检算车速小于上述值时，应在洞外设置加速缓坡。电力机车一般不会产生如内燃机车那样的有害气体，动力也有保障，故不须作最低速度检算。

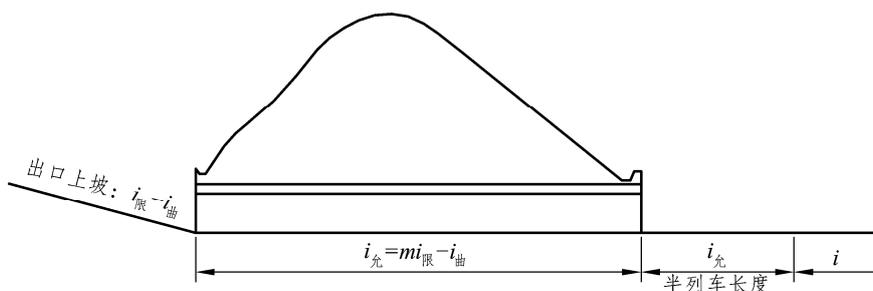


图 2-16 坡度折减区段示意图

3. 坡段长度

铁路隧道内坡段不宜把坡段长度定得太长，尤其是单坡隧道，坡度已用到了最大限度。长上坡路段，即使坡度未超限制，也会使机车疲劳或超负荷，以致有停车或出现车轮打滑的情况，容易发生事故。长下坡路段，制动时间过久，机车闸瓦摩擦发热，将使燃油失效，以致刹不住车，发生溜车事故。长大隧道可以设缓坡段，以缓解机车负荷。此外，顺坡设排水沟时，若坡段太长，则水沟难以布置，给今后的运营和维修增加了工作量。

与此相反，线路坡段也不宜太短。坡段太短就意味着变坡点多而密集，列车行驶就不平稳，司机要随时调整操作。列车过变坡点时，受力情况也随之变化，车辆间会发生相互的冲撞，车钩会产生附加应力。如果坡段过短，则一列车在行驶中，会同时跨越两个变坡点，车体、车钩同时受到不利的影 响，有时会因此发生事故。实践证明，坡段长度最好不小于列车的长度。考虑到长远的发展，坡段长度最好不小于远期到发线的长度。

4. 坡段连接

为了行车平顺，两个相邻坡段坡度的代数差值不宜太大，否则会引起车辆之间仰俯不一，车钩受到扭力，容易发生断钩。因此，在设计坡度时，坡间的代数差值 Δi 不应大于重车方向的限坡值 i 。

采用人字坡的越岭隧道，坡顶两侧坡面相反，坡差很容易超过限值，一般在坡顶处设置一段长度不超过 200 m 的分坡平道。

当坡差小于 3‰时，行车不平顺的情况还不太严重；当坡差大于 3‰时，列车行驶就有不平顺的感觉。设计行车速度不超过 160 km/h，Ⅰ、Ⅱ级铁路相邻坡段的坡差大于 3‰，Ⅲ级铁路相邻坡段的坡差大于 4‰时，坡段间应用圆曲线形竖曲线连接；Ⅰ、Ⅱ级铁路的竖曲线半径应为 10 000 m，Ⅲ级铁路应为 5 000 m。

隧道内的缓和曲线不应与竖向曲线相重叠。缓和曲线范围内，外轨轨面高程一般以不大于 2‰的超高递减坡度逐渐升高。竖曲线范围内的轨顶将以一定的变化率圆顺变化。若两者重叠，变化率不能协调，则在一定程度上外轨顶改变了竖曲线、缓和曲线在立面上的形状，对养护工作要求较高。

2.3.3 公路隧道线路平面设计

在公路隧道中，设置小半径曲线会使司机的通视不好，容易出交通事故。隧道内如必须设置曲线时，则最好采用不设超高且能满足视距要求的平曲线半径，如表 2-2 所示。当受条件限制，不得不采用小半径曲线时，需考虑加宽隧道断面，并设置超高，超高值不宜大于 4%。

隧道内一般禁止超车，设计时应采用停车视距和会车视距，如表 2-3 所示。

表 2-2 公路隧道不设超高最小平曲线半径（单位：m）

路拱	设计速度/(km·h ⁻¹)						
	120	100	80	60	40	30	20
2.0%	5 500	4 000	2 500	1 500	600	350	150
> 2.0%	7 500	5 250	3 350	1 900	800	450	200

表 2-3 公路停车视距和会车视距

公路等级	高速公路、一级公路				二、三、四级公路				
设计速度/(km·h ⁻¹)	120	100	80	60	80	60	40	30	20
停车视距/m	210	160	110	75	110	75	40	30	20
会车视距/m	—	—	—	—	220	150	80	60	40

单向行驶的长隧道，如果在出口一侧设置大半径曲线，面向司机的出口段衬砌边墙的亮度是逐渐增加的，有利于驾驶人眼睛对洞外亮度的适应，尤其是当出口处阳光可以直接射入时，隧道出口段曲线的优势就更明显。因此在曲线设计时，可以适当考虑这一因素。

洞外连接线应与隧道线形相协调，隧道洞口内外各 3 s 设计速度行程长度范围的平面线形应一致，即处于同一个直线或圆曲线内。由于缓和曲线内曲率不断变化，连接线一般不采用，但当处于下列两种情况时，连接线可采用缓和曲线或缓和曲线与圆曲线组合线形，并设置诱导和光过渡等方面的措施：

路线平纵面线形指标较高，平曲线半径大于规范规定的一般平曲线半径最小值的 2 倍，最大纵坡坡度小于 2%，行车视距大于停车视距规定值 2 倍以上，且调整后工程规模增加较大时。

隧道群之间每个洞口线形均采用理想线形有困难，在平面指标较高、处于上坡进洞，且行车视距满足要求时。

2.3.4 公路隧道线路纵断面设计

公路隧道一般宜采用单向坡，特别是单向通行的隧道，宜设计为通行下坡。考虑行车安全性、营运通风规模、施工作业效率和排水要求，隧道纵坡坡度不应小于 0.3%，一般情况不应大于 3%。地形等条件受限制时，高速公路、一级公路的中、短隧道纵坡坡度可适当加大，但不宜大于 4%。短于 100 m 的隧道纵坡坡度可与隧道外路线的指标相同。

当采用较大纵坡坡度时，必须对行车安全性、通风设备和营运费用、施工效率的影响等作充分的技术经济综合论证。

隧道变坡处应设置竖曲线，凸形竖曲线和凹形竖曲线的最小半径和最小长度应符合表 2-4 的规定。纵坡的变换不宜过大、过频，以保证行车安全视距和舒适性。

表 2-4 竖曲线最小半径和最小长度（单位：m）

设计速度/(km·h ⁻¹)		120	100	80	60	40	30	20
凸形竖曲线半径	一般值	17 000	10 000	4 500	2 000	700	400	200
	极限值	11 000	6 500	3 000	1 400	450	250	100
凹形竖曲线半径	一般值	6 000	4 500	3 000	1 500	700	400	200
	极限值	4 000	3 000	2 000	1 000	450	250	100
竖曲线长度		100	85	70	50	35	25	20

隧道洞口内外各 3 s 设计速度行程长度范围的纵断面线形应一致，有条件时宜取 5 s 设计速度行程。隧道洞口的纵坡，宜设置一定长度的直坡段，使驾乘人员有较好的行车视距。当条件困难不能满足时，应采用较大的竖曲线半径，特别是当隧道设计速度大于等于 60 km/h 时，洞口竖曲线半径应符合表 2-5 的规定。

表 2-5 洞口最小竖曲线半径（单位：m）

设计速度/(km·h ⁻¹)		120	100	80	60
竖曲线半径	凸形	20 000	16 000	12 000	9 000
	凹形	12 000	10 000	8 000	6 000

2.4 隧道横断面设计

2.4.1 铁路隧道横断面设计

2.4.1.1 直线隧道净空

隧道净空是指隧道衬砌的内轮廓线所包围的空间，根据隧道建筑限界确定。隧道建筑限界是为了保证隧道内各种交通的正常运行与安全，而规定在一定宽度和高度范围内不得有任何障碍物的空间范围。

1. 机车车辆限界

机车车辆限界指机车车辆最外轮廓的限界尺寸。该限界要求所有在线路上行驶的机车车辆停在平坡直线上时，车体所有部分都必须容纳在此限界范围内而不得超越。“机车车辆限界”能满足各种型号的机车和车辆在横断面尺寸上的最大需要。

2. 基本建筑限界

基本建筑限界指线路上各种建筑物和设备均不得侵入的轮廓线，用以保证机车车辆的安全运行以及建筑物和设备不受损害。

3. 隧道建筑限界

(1) 常速铁路隧道建筑限界。它是指包围“基本建筑限界”外部的轮廓线，即在“基本建筑限界”的基础上，留出少许空间，用于安装通信信号、照明、电力等设备。

对于速度 120 km/h 的新建和改建的内燃机车牵引的单线和双线铁路隧道，采用“隧限-1A”和“隧限-1B”，如图 2-17 所示。新建和改建的电力机车牵引的单线和双线铁路隧道，采用“隧限-2A”和“隧限-2B”，如图 2-18 所示。

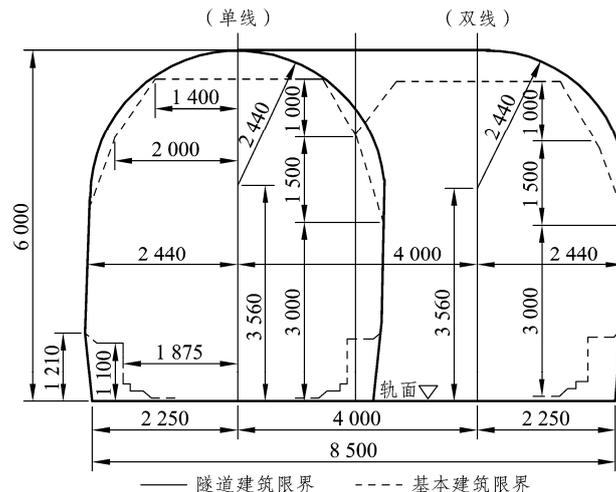


图 2-17 蒸汽及内燃牵引的单线、双线隧道限界 (单位: mm)

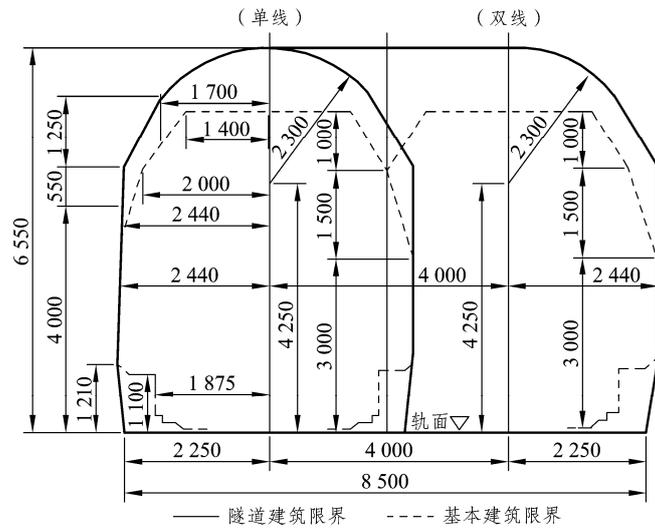


图 2-18 电力牵引的单线、双线隧道限界 (单位: mm)

(2) 高速铁路隧道建筑限界。

我国高速铁路隧道建筑限界分为 200 km/h 客货共线、200 km/h 及以上客运专线、200 km/h 客货共线双层集装箱运输三种, 如图 2-19 ~ 图 2-21 所示。

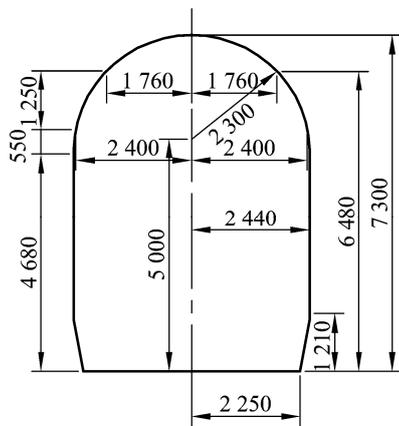


图 2-19 200 km/h 客货共线电力牵引铁路 KH-200 桥隧建筑限界 (单位: mm)

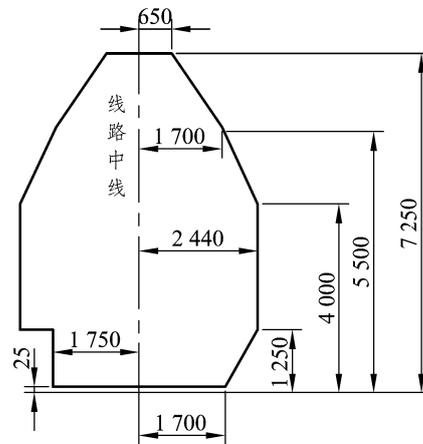


图 2-20 200 km/h 及以上客运专线铁路建筑接近限界 (单位: mm)

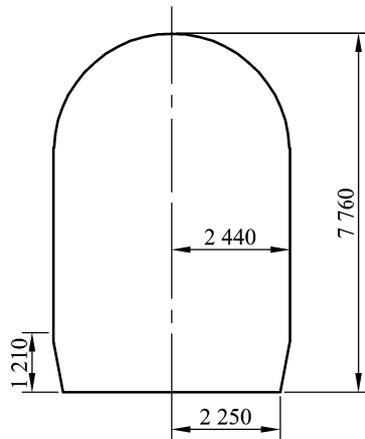


图 2-21 200 km/h 客货共线电力牵引铁路双层集装箱运输隧道建筑限界 (单位: mm)

4. 直线隧道净空

(1) 常速铁路隧道净空。

“直线隧道净空”要比“隧道建筑限界”稍大一些，它除了满足限界要求外，还考虑避让等安全空间、救援通道及技术作业空间，还考虑了在不同的围岩压力作用下，衬砌结构的合理受力形状（拱部采用三心圆，边墙采用直墙式或曲墙式）以及施工方便等因素。图 2-22 及图 2-23 为时速 120 km 单线及双线电力牵引铁路隧道衬砌内轮廓。

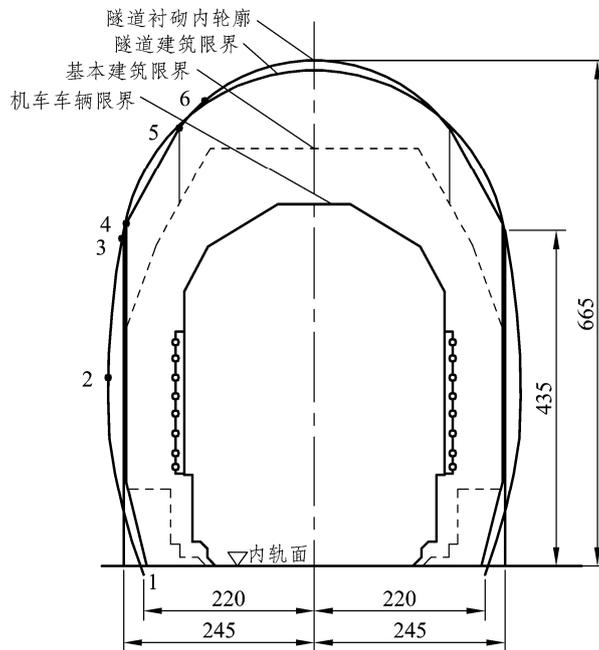


图 2-22 单线电力牵引铁路隧道衬砌内轮廓 (单位: cm)

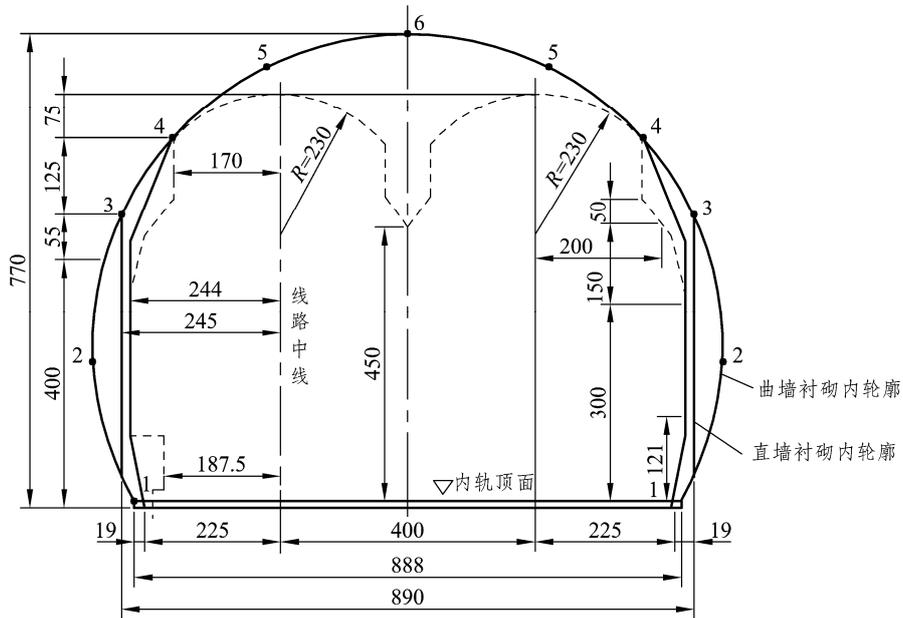


图 2-23 双线电力牵引铁路隧道衬砌内轮廓 (单位: cm)

(2) 高速铁路隧道净空。

高铁列车以高速通过隧道时,产生的空气动力学效应对行车、旅客舒适度、列车相关性能和洞口环境的不利影响十分明显。因此,高速铁路隧道断面的确定必须考虑如何缓解和消减旅客列车进入隧道时诱发的空气动力学效应的影响。我国统一制定了 200 km/h、250 km/h、350 km/h 不同行车速度条件下的隧道衬砌内轮廓,如图 2-24 ~ 图 2-30 所示。

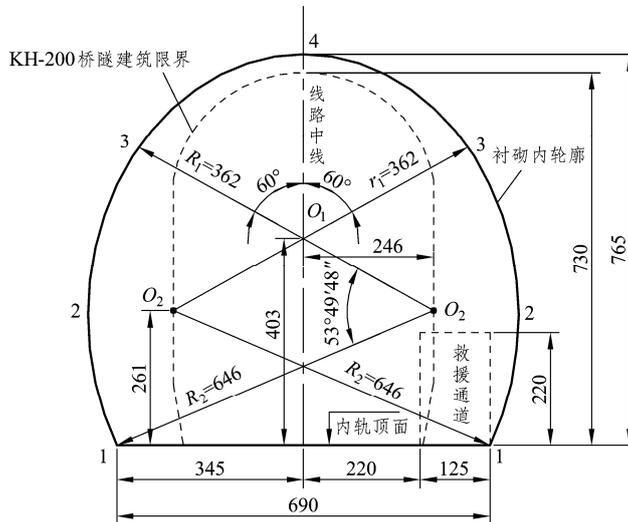


图 2-24 200 km/h 客货共线铁路单线隧道内轮廓 (单位: cm)