

★ 服务热线: 400-615-1233
★ 配套精品教学资料包
★ www.huatengedu.com.cn

隧道工程施工

Suidao Gongcheng Shigong

国家示范性
高等职业院校
建设成果精品
教材

隧道工程施工

王万德 张美娜 张岩 主编

北京邮电大学出版社



X-A



国家示范性高等职业院校建设成果精品教材

隧道工程施工

Suidao Gongcheng Shigong

王万德 张美娜 张岩 主编

策划编辑: 刘建
责任编辑: 边丽新
助理编辑: 贺兰晚
封面设计: 李甲



定价: 42.00元



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



国家示范性高等职业院校建设成果精品教材

隧道工程施工

主 编 王万德 张美娜 张 岩
副主编 傅鸣春 殷雨时 王 启



北京邮电大学出版社
www. buptpress. com

内 容 简 介

本书依托国家示范性高等职业院校的建设成果,以辽宁省交通高等专科学校地下工程与隧道工程技术专业承担的中央财政支持的“高等职业学校提升专业服务产业发展能力”项目为载体,依据“服务为宗旨,就业为导向,产学研结合”的专业办学思想,根据地下工程与隧道工程施工项目实施过程的特点编写而成。全书主要内容包括绪论、隧道围岩的分级与围岩压力、隧道构造、隧道施工方法、特殊地质地段的隧道施工、施工辅助作业、隧道施工组织设计与施工管理。

本书可作为高等职业教育土建类专业隧道相关课程的教材,也可作为相关专业工程技术人员的学习资料或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道工程施工/王万德,张美娜,张岩主编. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2014. 5(2024. 6 重印)
ISBN 978-7-5635-3934-5

I. ①隧… II. ①王… ②张… ③张… III. ①隧道工程—工程施工—高等职业教育—教材 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 099282 号

策划编辑: 刘 建 责任编辑: 边丽新 封面设计: 李 甲

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 三河市骏杰印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13.75

字 数: 335 千字

版 次: 2014 年 5 月第 1 版

印 次: 2024 年 6 月第 9 次印刷

ISBN 978-7-5635-3934-5

定 价: 42.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

服务电话: 400-615-1233

本书以培养面向企业、面向施工一线的技术技能型人才为指导思想,针对铁路、公路及市政等隧道工程建设人才培养的需要,按最新铁路、公路隧道设计规范和施工规范要求编写而成。本书分为铁路隧道和公路隧道两部分,突出了教材的实践性和实用性,全面系统地介绍了隧道构造和施工方面的基本知识,广泛汲取了国内外施工现场的新技术、新方法和新工艺。

本书具有以下特色。

(1) 本书依托地铁施工、高速公路、高铁客运专线等典型隧道项目和校内技术服务的实体生产任务,使得学生能参与生产性实训,掌握基本的生产操作技术,实现了校企合作、工学结合。

(2) 本书内容都是根据行业企业发展要求和学生顶岗实际工作的需要,遵照“必需”和“够用”的原则,由隧道施工企业的从业人员参与编写,使学生能将所学知识灵活应用于实际工作中,指导具体的施工操作。特别是能将探索性学习掌握的新技术、新工艺、新方法,结合企业需要,开拓性地应用到实际工程中。

(3) 本书是在国家示范性高等职业院校“高等职业学校提升专业服务产业发展能力”项目建设成果的基础上编写而成的,充分体现了对人才培养的重视。

本书推荐学时见下表。

序 号	内 容	学 时
0	绪论	4
1	隧道围岩的分级与围岩压力	6
2	隧道构造	8
3	隧道施工方法	24
4	特殊地质地段的隧道施工	4
5	施工辅助作业	4
6	隧道施工组织设计与施工管理	4
总计		54

在教学过程中任课老师可以根据专业的特点对教学内容进行适当调整,并根据隧道施工技术的发展,结合一定的工程实例组织教学。

本书由辽宁省交通高等专科学校王万德、张美娜、张岩任主编,由辽宁省交通高等专科学校傅鸣春、殷雨时、王启任副主编,辽宁省交通高等专科学校王奇、赵芳芳、张津之参与了编写工作。具体分工如下:王启编写绪论,王万德编写第1章、第6章,张岩编写第2章,张美娜编写第3章,傅鸣春编写第4章,殷雨时编写第5章。王奇、赵芳芳、张津之参与书中图形的绘制工作。

在本书的编写过程中还得到了中铁九局、中铁十三局、沈阳地铁等施工单位与监理单位人员的大力支持和帮助,在此一并表示最衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏或不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

Contents

目 录

绪论	1
知识目标	1
0.1 隧道及其结构组成	3
0.1.1 有关隧道的基本概念	3
0.1.2 隧道的结构组成	3
0.2 隧道的分类	3
0.2.1 按用途分类	3
0.2.2 按几何特征分类	6
0.3 隧道工程的建设简史及发展	7
0.3.1 隧道的产生和发展	7
0.3.2 隧道工程建设简史	7
0.3.3 隧道工程的发展及需要解决的难题	9
0.4 隧道工程有关设计施工方面的基本知识	10
0.4.1 隧道工程设计的基本知识	10
0.4.2 隧道工程施工的相关知识	10
基础知识与技能训练	12
第1章 隧道围岩的分级与围岩压力	13
知识目标	13
1.1 隧道围岩的分级	15
1.1.1 概述	15
1.1.2 围岩分级的目的和基础条件	15
1.1.3 围岩的分级方法	16
1.1.4 我国铁路隧道围岩的分级	18
1.2 围岩压力与成拱作用	25
1.2.1 围岩压力概述	25
1.2.2 坑道开挖前后围岩的应力状态	26
1.2.3 围岩的成拱作用	26

1.2.4 影响围岩压力的因素 26

1.3 围岩压力的确定和实测方法 27

1.3.1 围岩压力的确定方法 27

1.3.2 围岩压力的实测方法 28

基础知识与技能训练 29

第 2 章 隧道构造 31

知识目标 31

2.1 隧道衬砌概述 33

2.1.1 隧道衬砌的形式及适用条件 33

2.1.2 隧道衬砌的一般构造要求 34

2.2 隧道洞身支护结构的构造 38

2.2.1 整体式模筑混凝土衬砌 38

2.2.2 装配式衬砌 39

2.2.3 锚喷支护 40

2.2.4 复合式衬砌 41

2.3 明洞的构造 42

2.3.1 明洞概述 42

2.3.2 拱式明洞 43

2.3.3 棚式明洞 45

2.4 隧道洞门结构的构造 47

2.4.1 隧道洞门结构概述 47

2.4.2 洞门的类型 48

2.5 隧道附属建筑物 54

2.5.1 通风建筑物 54

2.5.2 避车洞 57

2.5.3 防排水建筑物 58

2.5.4 电缆槽及高低压供电 63

2.5.5 伸缩缝、沉降缝与施工缝 64

2.6 隧道内部装饰 65

2.6.1 隧道内部装饰概述 65

2.6.2 常见的内部装饰类型 65

2.7 洞内噪声的防治措施 66

2.7.1 洞室内噪声的防治措施 66

2.7.2 隧道内噪声的治理措施 66

基础知识与技能训练 67

第3章 隧道施工方法	69
知识目标	69
3.1 传统矿山法	71
3.1.1 漏斗棚架法的基本施工程序	71
3.1.2 漏斗棚架法施工的特点	72
3.2 新奥法简介	72
3.2.1 隧道施工的基本技术要求	72
3.2.2 新奥法施工的基本原则	73
3.3 新奥法的施工方法	73
3.3.1 全断面开挖法	75
3.3.2 台阶开挖法	75
3.3.3 分部开挖法	78
3.4 新奥法的施工技术	82
3.4.1 新奥法的施工程序	82
3.4.2 锚杆	82
3.4.3 钢拱架	85
3.4.4 喷射混凝土	85
3.4.5 复合式衬砌	89
3.5 洞口段及明洞的施工方法	90
3.5.1 洞口段的施工方法	90
3.5.2 明洞的施工方法	91
3.6 辅助施工方法	92
3.6.1 超前锚杆	93
3.6.2 管棚	94
3.6.3 超前小导管注浆	95
3.6.4 预注浆加固地层	96
3.6.5 地表锚喷预加固	96
3.7 钻爆开挖和装渣运输	97
3.7.1 钻爆开挖	97
3.7.2 装渣与运输	103
3.8 隧道支护施工	112
3.8.1 临时支护	112
3.8.2 初期支护	113
3.8.3 二次衬砌	113
3.9 隧道防排水施工	120
3.9.1 塑料板防水层施工	120

3.9.2	防水混凝土施工	123
3.9.3	施工缝、变形缝及埋设件的防水施工	124
3.10	盾构法施工	125
3.10.1	盾构法概述	125
3.10.2	盾构法的特点及适用条件	126
3.11	掘进机法施工	126
3.11.1	掘进机法概述	126
3.11.2	掘进机法的特点及适用条件	127
3.12	沉埋法施工	127
3.12.1	沉埋法概述	127
3.12.2	沉埋法的特点及适用条件	128
3.13	监控量测与数据分析	129
3.13.1	量测的目的和项目	129
3.13.2	监控量测作业的内容	130
3.13.3	量测仪器、内容及方法	135
3.13.4	监测数据分析	142
3.13.5	量测资料的应用和管理	144
	基础知识与技能训练	146

第4章 特殊地质地段的隧道施工 149

	知识目标	149
4.1	特殊地质地段隧道施工概述	151
4.2	膨胀土围岩地段隧道施工	152
4.2.1	膨胀土围岩的特性	152
4.2.2	膨胀土围岩对隧道施工的危害	153
4.2.3	膨胀土围岩隧道的施工要点	153
4.3	黄土地段隧道施工	154
4.3.1	黄土层对隧道施工的影响	154
4.3.2	黄土隧道的施工方法及注意事项	155
4.4	溶洞地段隧道施工	156
4.4.1	溶洞的类型及对隧道施工的影响	156
4.4.2	隧道遇到溶洞的处理措施	156
4.4.3	溶洞地段隧道的施工要点	158
4.5	松散地层和流沙地段隧道施工	159
4.5.1	松散地层隧道施工	159
4.5.2	流沙地段隧道施工	160
4.6	岩爆地段隧道施工	160

4.6.1 岩爆的特点及产生的主要条件	161
4.6.2 岩爆的防治措施	161
4.6.3 岩爆地段隧道的施工要点	161
4.7 高地温地段隧道施工	162
4.7.1 高地温的热源	162
4.7.2 高地温地段隧道的施工要点	162
4.8 瓦斯地层隧道施工	163
4.8.1 瓦斯的基本知识	163
4.8.2 瓦斯地层隧道的施工要点	164
4.9 隧道施工塌方处理	166
4.9.1 发生塌方的主要原因	166
4.9.2 预防塌方的施工措施	167
4.9.3 隧道塌方的处理措施	167
基础知识与技能训练	168

第5章 施工辅助作业 171

知识目标	171
5.1 压缩空气的供应	173
5.1.1 空压机站的生产能力	173
5.1.2 高压风管的设置	174
5.2 施工供水与洞内排水	177
5.2.1 施工供水	177
5.2.2 洞内排水	179
5.3 施工通风与防尘	180
5.3.1 施工通风方式	180
5.3.2 施工通风的计算	183
5.3.3 通风机的选择与通风管理	188
5.3.4 防尘	188
5.4 施工供电与照明	189
5.4.1 施工供电	189
5.4.2 施工照明	189
基础知识与技能训练	190

第6章 隧道施工组织设计与施工管理 193

知识目标	193
6.1 隧道施工组织设计	195
6.1.1 隧道各阶段施工组织设计的内容	195

6.1.2	隧道实施性施工组织设计的编制依据、原则及程序	197
6.1.3	隧道施工前的准备工作	198
6.1.4	隧道施工场地的布置	199
6.1.5	隧道施工进度计划	200
6.2	隧道施工管理	205
6.2.1	隧道施工计划管理	205
6.2.2	隧道施工技术管理	206
6.2.3	隧道施工质量管理	207
6.2.4	隧道施工经济管理	208
6.2.5	隧道施工安全管理	209
	基础知识与技能训练	209
	参考文献	211

知识目标

- 了解隧道工程的历史、现状和发展。
- 理解隧道工程的基本概念及基本理论、相关技术规范。
- 掌握隧道工程的常用施工方法。

0.1 隧道及其结构组成

0.1.1 有关隧道的基本概念

1. 隧道

隧道是一种修建在地层中的地下工程建筑物。1970 年国际经济合作与发展组织召开的隧道会议综合了各种因素,对隧道做出了如下定义:“以某种用途在地面下用任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面面积大于 2 m^2 的硐室。”

2. 围岩

围岩是指隧道开挖后其周围产生应力重分布范围内的岩体,或指隧道开挖后对其稳定性产生影响的那部分岩体(这里的岩体是土体和岩体的总称)。

3. 支护

支护是指为维护围岩稳定而施作的人工结构。

4. 衬砌

衬砌是指为控制和防止围岩的变形与塌落,确保围岩的稳定,或为处理涌水和漏水,或为了达到隧道内空整齐或美观等目的,将隧道周边的围岩覆盖起来的结构体。

0.1.2 隧道的结构组成

隧道的结构组成是指隧道作为单位工程,其结构的组成部分及各部分在总体中所起的作用。隧道由围岩、洞身衬砌、洞门和附属设施四部分组成。

(1)围岩。围岩属天然结构,是隧道结构的主体,具有不可替代的作用。

(2)洞身衬砌。洞身衬砌是帮助围岩获得稳定的人工结构部分,分为初期支护(初衬)和二次支护(二衬)。

(3)洞门。洞门是明暗交界处的结构部分。

(4)附属设施。附属设施包括大小避洞(铁路隧道)或紧急停车带(公路隧道)、洞内排水系统(沟槽)、电力电缆系统(管槽)、辅助系统、辅助通风系统(巷道)。

0.2 隧道的分类

隧道的种类很多,从不同的角度划分,有不同的分类方法。按隧道所处的地质条件划分,可分为土质隧道和石质隧道;按埋置深度划分,可分为浅埋隧道和深埋隧道;按隧道所在位置划分,可分为山岭隧道、水底隧道、城市隧道。但目前比较明确的还是按隧道的用途和几何特征来分类。

0.2.1 按用途分类

按照用途分类,可将隧道(见图 0-1)分为交通隧道、水工隧道、市政隧道和矿山隧道。

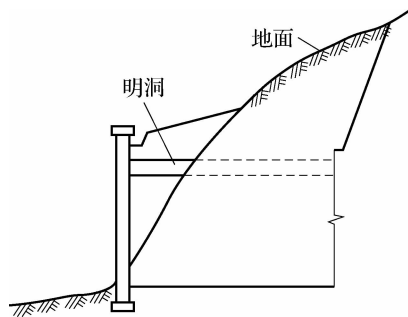


图 0-1 隧道

1. 交通隧道

交通隧道是应用最广泛的一种隧道,其作用是提供交通运输和人行的通道,以满足交通线路畅通的要求。它一般包括以下几种。

1)公路隧道

公路隧道是专供汽车运输行驶的通道。过去,在山区修建公路时,为了节省工程造价,常常选择盘山绕行,宁愿延长距离也不愿意花费巨额的费用来修建隧道。但是,随着社会经济和生产的发展,高速公路大量出现,对道路的修建技术提出了较高的标准,要求线路顺直、坡度平缓、路面宽敞等。因此,在道路穿越山区时出现了大量的隧道方案。隧道的修建在改善公路技术状态、缩短行车距离、提高运输能力、减少事故等方面起到了重要的作用。我国修建的秦岭-终南山隧道长 18.1 km,它的建成将翻越秦岭的道路缩短约 60 km,时间减少了两个多小时。

2)铁路隧道

铁路隧道是专供火车运输行驶的通道。当铁路穿越山岭地区时,需要克服高程障碍,由于铁路限坡平缓,最大限坡小于 24‰(双机牵引),而这些山岭地区限于地形,无法绕行,常常不能通过展线获得所需的高程。此时,开挖隧道穿越山岭就是一种合理的选择,其作用是可以使线路缩短、减小坡度、改善运营条件、提高牵引定数。例如,宝成线的宝鸡至秦岭段线路上就密集地设置了 48 座隧道,占线路总延长的 37.75%。由此可见,山区铁路隧道的作用非同一般。

3)水底隧道

水底隧道是修建于江、河、湖、海、洋下的隧道,是供汽车和火车运输行驶的通道。当交通线路跨越江、河、湖、海、洋时,可以选择的方案有架桥、轮渡和隧道,但架桥会受到净空的限制,轮渡会限制通行量,如果这些矛盾不能得到有效的解决,则水底隧道将是一种很好的解决方案。其优点是不受气候影响、不影响通航、引道占地少、战时不暴露交通设施目标等,缺点是造价较高。近年来,水底隧道越来越受到人们的青睐,如我国上海的黄浦江和广州的珠江都修建有跨江的水底隧道。

4)地下铁道

地下铁道是修建于城市地层中,为解决城市交通问题,用于火车运输的通道。地下铁道是大城市中解决交通拥挤、车辆堵塞的有效途径之一。由于它能够大量、快速、安全、准时地

输送乘客,因此,已成为大城市解决交通矛盾的有力手段。在我国的北京、上海、广州等城市建成的地下轨道交通系统,为改善城市的交通状况、减少交通事故发挥了重要的作用。其他城市,如深圳、南京、青岛、大连、武汉、沈阳、重庆、哈尔滨、成都等也都修建了地下铁道。

5) 航运隧道

航运隧道是专供轮船运输行驶而修建的通道。当运河需要跨越分水岭时,克服高程的有力手段是修建运河隧道,其优点是缩短航程、减少运营费用、河道顺直、航运条件优良。

6) 人行隧道

人行隧道是专供行人通过的通道,一般修建于城市闹区或跨越铁路、高速公路等行人众多,往来交错,车辆密集,偶有不慎便会发生交通事故的场合。人行隧道的作用是缓解地面交通压力,减少交通事故,方便行人。

2. 水工隧道

水工隧道是水利工程和水力发电枢纽的一个重要组成部分。水工隧道包括以下几种。

1) 引水隧道

引水隧道是将水引入水电站的发电机组或进行水资源调动而修建的孔道。引水隧道引入的水是水电站发电机组的动力资源,因此,引水隧道作为引水的建筑工程,一般要求内壁承压,但有时只是部分过水,内壁主要承受大气压力而水压较小,甚至无水压,故有有压隧道和无压隧道之分。

2) 尾水隧道

尾水隧道是指为将水电站发电机组排出的废水送出去而修建的隧道。

3) 泄洪隧道

泄洪隧道是指用于在洪水期间疏导排泄洪水的隧道。

4) 排沙隧道

排沙隧道是指用来冲刷水库中淤积的泥沙而修建的隧道。排沙隧道是水库建筑物的一个组成部分,其作用是利于排沙隧道把泥沙裹带送出水库,同时也用于在检查或修理时放空水库里的水。

3. 市政隧道

在城市的建设和规划中,为充分利用地下空间,将各种不同的市政设施安置在地下而修建的地下孔道,称为市政隧道。市政隧道与城市中人们的生活、工作和生产的关系十分密切,对保障城市的正常运转起着重要的作用。其类型主要有以下几种。

1) 给水隧道

为城市自来水管网铺设系统修建的隧道,称为给水隧道。在城市中,有序合理地规划和布置与人们生活和生产息息相关的给水管路是城市市政基础设施的重要任务。因为要求给水管路不能破坏市容景观,不可占用地面,避免遭受人为的损坏,所以用地下隧道来放置这些管道是一种合理的选择。

2) 污水隧道

为城市污水排送系统修建的隧道,称为污水隧道。城市的污水,除部分对环境污染严重的采用净化返用或排放外,大部分的污水需要排放到城市以外的河流中,这就需要有地下的污水隧道。这种隧道一般采用本身导流排送的方式,此时隧道的形状多采用卵形;也有在孔

道中安放排污管,由管道排污的。在污水隧道的进口处多设有拦渣隔栅,以便把水中漂浮的杂物拦在隧道之外,防止造成堵塞。

3) 管路隧道

为城市能源供给(煤气、暖气、热水等)系统修建的隧道,称为管路隧道。城市中的管路隧道是把输送能源的管路放置在修建的地下孔道中,经过防漏及保温措施处理,使其能将能源安全地输送到生产和居家的目的地。

4) 线路隧道

为电力通信系统修建的隧道,称为线路隧道。在城市中,为了保证电力电缆和通信电缆不被人们的活动损伤或破坏,避免悬挂高空影响市容景观而修建了专门的地下孔道。

在现代化的城市中,将以上四种具有共性的市政隧道按城市的布局和规划建成一个共用隧道,称为共同管沟。共同管沟既是现代城市基础设施科学管理和规划的标志,也是合理利用城市地下空间的科学手段,是城市市政隧道规划与修建发展的方向。

5) 人防隧道

人防隧道是为战时的防空目的而修建的防空避难隧道。在城市中建造人防工程是为了预防战争空袭的发生。由于人防工程是紧急情况下用于人们避难的,因此,在修建时应考虑人生活环境的一般要求,除应设有排水、通风、照明和通信设备以外,还应考虑储备饮水、粮食和必要的救护设备。在洞口处还需设置防爆、防冲击波装置等。

4. 矿山隧道

在矿山开采中,为了能从山体以外通向矿床和将开采到的矿石运输出来,可修建矿山隧道。其作用主要是为采矿服务的。矿山隧道主要有以下几种。

1) 运输巷道

从山体开凿隧道通到矿床,并逐步开辟巷道通往各个开采面。前者称为主巷道,为地下矿区的主要出入口和主要的运输干道;后者分布如树枝状,分向各个采掘面。此种巷道多用临时支撑,仅供作业人员开采时使用。

2) 给水隧道

给水隧道的作用是送入清洁水(为采掘机械使用),并将废水及积水通过泵抽排出洞外。

3) 通风巷道

矿山地下巷道穿过的地层,一般都有地下有害气体涌出,加之采掘机械排出的废气和工作人员呼出的气体,都会使巷道内的空气变得污浊。如果地层中的气体含有瓦斯,将会危及人的安全。因此,为了净化巷道内的空气,创造好的工作环境,必须设置通风巷道,以便把有害气体排出去,并补充新鲜的空气。

0.2.2 按几何特征分类

1. 按长度等级分类

按照长度等级,隧道可分为以下几种。

(1) 特长隧道。其铁路隧道的长度不小于 10 000 m,公路隧道的长度不小于 3 000 m。

(2) 长隧道。其铁路隧道的长度为 3 000~10 000 m,公路隧道的长度为 1 000~3 000 m。

(3)中隧道。其铁路隧道的长度为 500~3 000 m,公路隧道的长度为 500~1 000 m。

(4)短隧道。其隧道长度不大于 500 m。

2. 按开挖隧道断面面积的等级分类

按照开挖隧道断面面积的等级,隧道可分为以下几种。

(1)特大断面隧道。其隧道断面面积在 100 m² 以上。

(2)大断面隧道。其隧道断面面积为 50~100 m²。

(3)中等断面隧道。其隧道断面面积为 10~50 m²。

(4)小断面隧道。其隧道断面面积为 3~10 m²。

(5)极小断面隧道。其隧道断面面积在 3 m² 以下。

0.3 隧道工程的建设简史及发展

0.3.1 隧道的产生和发展

隧道的产生和发展经历了以下几个阶段。

1. 原始时代

原始时代即从人类出现到公元前 3000 年的新石器时代,是人类利用隧道来防御自然威胁的穴居时代。当时的人类是用兽骨等工具开挖隧道的,并将其修筑在可以自身稳定而无须支撑的地层中。

2. 远古时代

远古时代(从公元前 3000 年到 5 世纪)是为生活和军事防御目的而利用隧道的时代。这个时代的隧道开发技术形成了现代隧道开发技术的基础。例如,在古埃及金字塔的建设中开始修建地下建筑。公元前 2200 年的古代巴比伦王朝为连接宫殿和神殿而修建了长度约为 1 km 的隧道(断面尺寸为 3.6 m×4.5 m),施工期间将幼发拉底河的水流进行改道,采用明挖法建造,该隧道是一种砖砌建筑。

3. 中世纪时代

中世纪时代(5 世纪至 14 世纪)正是欧洲文明的低潮期,该时期的建设技术发展缓慢,隧道技术没有得到发展。但由于社会对地下矿产资源(铜、铁等)的需求,人们开始进行矿石开采的工作。

4. 近代和现代

从 16 世纪以后的工业革命开始,由于炸药的发明和应用,加速了隧道技术的发展,如有益矿物的开采,灌溉、运河、公路和铁路隧道的修建以及随着城市发展而修建的地下铁道、上下水道等,使得隧道技术的应用范围迅速扩大。

0.3.2 隧道工程建设简史

1. 世界隧道工程建设简史

从各国不同时期建成的具有代表性的隧道工程,可以了解世界隧道工程历史的脉络。

最著名的隧道工程有日本于 1988 年建成的穿越津轻海峡的青森-函馆海底铁路隧道(长度为 53.85 km,铁路隧道+平行导坑);英、法两国于 1991 年联合建成的穿越英吉利海峡的加来-多佛海底隧道(长度为 50.5 km,包括两座铁路单线隧道和一座服务隧道);瑞士、意大利分别于 1906 年和 1921 年建成的米兰-伯尔尼穿越阿尔卑斯山的辛普伦 I 号、II 号山岭隧道(两座铁路单线隧道,长度分别为 19.8 km 和 19.82 km)。这些巨大的隧道工程,其结构和地质条件之复杂,应用技术之多,规模之大,投入的人力、物力、财力之巨,耗时之长,无不代表着 20 世纪世界隧道施工的领先水平。

2. 中国隧道工程建设简史

中国隧道工程建设的历史也较悠久,我国最早的铁路隧道是 1889 年台湾省台北至基隆窄轨铁路上修建的狮球岭隧道。在 20 世纪后半叶,随着改革开放政策的实施和经济的发展,在各种复杂的地质条件下又建成了一大批铁路隧道、公路隧道、输水隧道、城市地铁。这些都标志着我国隧道建设在工程设计、施工技术、工程质量、施工管理、施工速度、成本控制方面有了长足的进步和发展。

据不完全统计,目前我国拥有的铁路隧道总长已超过 4 000 km,居世界第一位。随着我国公路建设的发展,特别是高等级公路在我国的兴起,我国公路隧道在数量和规模上将有很大的发展,特别是在复杂地质条件下的修建技术也将会得到很大的发展。

我国已建成的长度大于 3 km 的公路隧道见表 0-1。世界各国已建成的长度大于 10 km 的公路隧道见表 0-2。

表 0-1 我国已建成的长度大于 3 km 的公路隧道

隧道名称	隧道长度/m	营运条件
大溪岭隧道	4 100	双向、双车道
二郎山隧道	4 160	单向、双车道
华蓥山隧道	4 770	单向、双车道
鹧鸪山隧道	4 400	单向、双车道
木鱼槽隧道	3 600	双向、双车道
八达岭隧道	3 455	双向、双车道
真武山隧道(重庆)	3 100	单向、双车道
中梁山隧道(重庆)	3 165	单向、双车道
牛郎河隧道	3 920	单向、双车道
猫狸岭隧道	3 600	单向、双车道
秦岭终南山隧道	18 100	双洞、单向、双车道

表 0-2 世界各国已建成的长度大于 10 km 的公路隧道

隧道名称	国家	长度/m
勃朗峰(Mt. Blanc)	法国—意大利	11 600
弗雷儒斯(Frejus)	法国—意大利	12 901

续表

隧道名称	国家	长度/m
圣哥达(St. Gothard)	瑞士	16 918
阿尔贝格(Arlberg)	奥地利	13 927
格兰萨索(Gran Sasso)	意大利	10 173
关越 I(Kan-Etsu)	日本	10 920
关越 II (Kan-Etsu)	日本	11 010
Hida	日本	10 750
居德旺恩(Gudvanga)	挪威	11 400
Folgefonn	挪威	11 100
Aurland Laerdal	挪威	24 500

0.3.3 隧道工程的发展及需要解决的难题

1. 隧道工程的发展前景

我国是幅员辽阔、地质复杂、多山的发展中国家,随着我国市场经济的发展,高速公路已从沿海地区向西部山区延伸,公路隧道的数量越来越多,建筑规模也越来越大。隧道的发展也是我国国民经济发展、国家西部大开发战略、开展通海战略的迫切需要。交通设施、水电供应越来越成为制约一个地区经济发展的瓶颈所在。各种用途地下工程的大力发展,能够有效地缓解经济发展带来的国土资源紧张的矛盾。充分利用城市地下资源建设各类地下工程是城市经济高速发展的客观需要。我国地下工程的建设特别是东部经济发达地区和大中城市将迎来建设高潮。

2. 隧道工程的发展方向

隧道施工企业应着重对以下几方面的工作开展研究。

- (1)加强对施工中隧道地质勘探和预报技术的研究。
- (2)加强对围岩动态量测技术及预报分析技术的研究。
- (3)加强对隧道施工机械化与成本关系的研究。
- (4)加强对山岭隧道掘进技术的研究。
- (5)加强对初期支护技术及其耐久性的研究。
- (6)加强对提高内层衬砌施工速度及其整体性、防水性能的研究。
- (7)加强对注浆加固(地层改良)技术的应用研究。
- (8)加强对隧道施工现代管理方法的应用研究。
- (9)促进勘察、设计、施工一体化的发展。

3. 隧道工程需要解决的难题

隧道工程需要解决的难题有:隧道围岩力学性质与围岩破坏的关系;计算模型和计算理论如何与实际相符;施工技术水平与经济效益的提高;隧道设计施工管理水平与经济效益的提高。

0.4 隧道工程有关设计施工方面的基本知识

0.4.1 隧道工程设计的基本知识

1. 隧道设计的概念

隧道工程设计是出于开拓并持续安全应用地下通道空间的目的,勘察地形、地质、地物等环境条件,确定隧道位置,并根据隧道围岩自稳能力的强弱,选择确定为保持隧道稳定所需提供帮助的多少(即需要的加固范围),以及选择确定支护的材料种类、结构形式、力学性能、参与时机、施作方法、监测方法、质量标准等支护技术参数,并评估支护的有效性和经济性的一系列工程规划活动。

2. 隧道设计的内容

隧道工程设计阶段可分为建筑设计、结构设计、施工设计三个阶段。各阶段的设计内容如下。

(1)建筑设计。隧道建筑设计包括选择隧道方案,确定隧道位置、洞口位置,隧道平面、纵断面及横断面设计。

(2)结构设计。隧道结构设计包括确定隧道的形状尺寸、支护结构形式、隧道衬砌形式及尺寸等。

(3)施工设计。隧道施工设计包括施工方案的选择、施工方法的选择、施工技术的选择、量测监控方法的选择、施工程序的设计,以及施工质量控制措施、施工安全控制措施 and 环境保护措施的制定等。

0.4.2 隧道工程施工的相关知识

1. 隧道工程施工的概念

隧道工程施工是指按照规定的使用目的、规定的设计要求、规定的技术标准,使用适当的人员、资金、机械、材料,运用适当的施工方法、施工技术和施工管理,在指定的地层中修建隧道及地下硐室建筑物的建筑活动。

2. 隧道工程施工的方法

隧道施工一般可分为明挖法和暗挖法。

1) 明挖法

明挖法适用于浅埋隧道的施工。其特点是先从地面将隧道上方及内部地层挖开,形成壕堑,然后在壕堑中修建衬砌,再在衬砌顶部进行土石回填。在修建浅埋隧道的地下铁道时也常采用明挖法施工。

2) 暗挖法

暗挖法施工的特点是先在地层中按需要的形状和尺寸挖出一个孔洞,然后在其中修建衬砌。常用的暗挖法有矿山法、掘进机法和盾构法。

(1)矿山法。矿山法是指用一般地下开挖方法进行隧道施工的方法。当隧道穿经岩石

地层时,通常采用钻眼爆破的方法进行开挖,在进行必要的临时支护及清除开挖出来的石渣之后,再修建永久性支护结构——衬砌。隧道的横断面视具体条件可分几部分挖成,或一次挖成。由于这种方法与矿山地下巷道的施工方法类似,故常被称为矿山法。

(2)掘进机法。掘进机法是采用掘进机来开挖隧道的方法。在石质地层修建圆形断面的隧道时,常用全断面隧道掘进机(TBM),像钻孔一样,一次就将隧道的整个断面钻凿成型。掘进机除了具有掘进功能外,还兼有装渣及自动推进的功能。

(3)盾构法。在水底隧道、城市地铁隧道和上(下)水隧道的建设中,由于需要经常通过松软的甚至含水的土层,因此一般采用盾构法施工。盾构是一种兼推进、防护、安装和掘进功能于一体的壳体隧道开挖机,按其功能的不同,可分为普通盾构、机械化盾构、气压盾构及泥水加压盾构等。

3. 隧道工程的施工技术

隧道工程的施工技术主要是研究和解决隧道工程中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、支护、通风、出渣、防尘、防瓦斯、防有害风体,照明、风、水、电的作业方式及操作技术标准和要求,以及围岩变化的量测监控方法等。

4. 隧道工程的施工要点

隧道施工必须坚持的施工要点如下。

1)施工过程中要爱护围岩和保护围岩

为了保证施工过程中不削弱或少削弱遗留围岩的固有支护能力,一方面可以通过机械开挖技术和控制爆破技术予以解决;另一方面可以采用支护、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)隧道圬工工程要做到“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”的关键是保证“六密实”,即混凝土捣固要密实,喷射混凝土要密实,喷混凝土与围岩结合要密实,二次衬砌与初期支护要密实,喷射混凝土与钢结构、围岩三者要密实,回填石料要密实。“外美”即混凝土外露的表面要美。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。内部环境是指隧道施工作业的环境。由于隧道施工空间小,多工种同时施工会对作业环境产生污染,直接危害施工人员的身心健康,因此,在施工过程中要不断地改善作业环境。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体现,环境技术是随着社会的发展而发展的。隧道施工的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

隧道施工过程中的地质条件是不不断变化的,其岩石的力学状态也是不断变化的,这就要求施工人员在施工过程中采用不同的施工方法和技术,以适应这种变化的状态。隧道施工决策是建立在施工阶段的地质技术、围岩的量测技术、质量控制基础之上的,充分体现了动态施工的基本含义。

基础知识与技能训练

一、名词解释

隧道 围岩 支护 洞门

二、简答题

1. 简述隧道的结构组成。
2. 简述隧道按用途是如何分类的。
3. 简述隧道按几何特征是如何分类的。
4. 简述市政隧道的分类。
5. 隧道工程设计包括哪几个阶段？
6. 简述公路、铁路、水底隧道工程施工中的常用方法。

三、实践题

结合本地及周边地区典型的隧道工程,将隧道工程概况、施工方法和施工技术情况的内容做成 PPT。

● 隧道围岩的分级与围岩压力

● 知识目标

了解隧道围岩分级的基本知识和基本理论。

掌握常用的围岩分级方法。

掌握围岩压力的定义及分类。

了解围岩压力的计算及实测方法。

1.1 隧道围岩的分级

1.1.1 概述

判断隧道围岩的稳定性,并针对围岩稳定的程度制定相应的工程措施(最佳的施工方法和支护结构)是研究隧道地质环境时需要解决的两个基本问题。对此,工程界历来都并存着两种可供采用的截然不同的方法:经验方法和理论方法。由于隧道工程所处的地质环境十分复杂,人们对它的认识远没有达到完善的地步,因此,经验方法至今在隧道工程中仍然占有一定的地位。可以说,目前隧道工程的设计和施工在很大程度上还处在“经验设计”“经验施工”的阶段。

所谓经验方法就是根据以往的工程经验对上述的两个问题做出决策,其依据就是隧道围岩稳定性分级。目前,作为隧道工程设计、施工基础条件的隧道围岩分级还处在“经验分级”的阶段上。人们对于坑道围岩的认识,还没有达到“自由”,还不能充分揭示出地质条件和地下工程之间本质的、内在的联系,因而也就不能客观地预估或判断坑道围岩的级别。

隧道工程所处的地质环境千差万别,如地质构造、岩性、地下水等,这就给地下工程的设计、施工带来了很大的不可避免的盲目性。但也应指出,隧道工程的某一种类型的支护结构或某一种施工方法,在多数条件下都有很强的地质适应性。例如,台阶法可以适应大部分中等程度的地质条件;喷混凝土支护作为临时支护,在采取一定措施的情况下可以适应绝大多数的地质条件。这就说明,针对不同的工程目的(爆破开挖、掘进机掘进、支护等),可以将与之相应的地质条件进行一定的概括、归纳并加以分级,从而为隧道工程的设计和施工提供一定的基础条件。

1.1.2 围岩分级的目的和基础条件

根据长期的工程实际,工程师们认识到各种围岩的物理性质之间存在一定的内在联系和规律,依照这些联系和规律,可将围岩划分为若干级,称为围岩分级。

围岩分级的目的有:作为选择施工方法的依据;进行科学管理及正确评价经济效益;确定结构上的荷载;确定支护结构的类型和尺寸;制定劳动定额、材料消耗标准的基础等。

近些年来,国内外都把地下坑道围岩分级作为地下工程技术基础研究的重要内容之一,从定性和定量的角度进行了大量的探索和实践,并取得了一定的成果。

隧道围岩分级是为了解决坑道支护而建立起来的,即坑道开挖后是否需要支护、采用什么类型的支护结构、如何支护等。而坑道支护与坑道开挖后的稳定性有着直接的关系。因此,隧道围岩分级的基础条件是坑道开挖后的稳定性。

根据坑道开挖的长期实践,坑道开挖后的稳定性大体上可分为以下几类。

(1)充分稳定。坑道在长时间内有足够的自稳能力,无须任何人为支护而能维持稳定,无坍塌,偶尔有掉块现象。

(2)基本稳定。坑道会因爆破、岩块结合松弛等而产生局部掉块,但不会引起坑道的坍塌,坑道是稳定的。层间结合差的平缓岩层顶板可能会发生弯曲和断裂,此时应采取局部支

护或轻型支护措施。

(3)暂时稳定。大多数坑道是属于暂时稳定类型的。坑道开挖后会呈现出不同程度的坍塌现象,坍塌后的坑道呈拱形而处于暂时稳定状态。在外界(如爆破、重新更换支撑等)和内部(如地下水等)条件的影响下,坑道如不进行及时支护,会进一步丧失稳定。因此,在这种围岩中必须采取各种类型的支护措施。

(4)不稳定。坑道在不支护的条件下是难以开挖的,随挖随坍,常常要先支后挖,坑道的坍塌发生迅速、影响范围大,有时可坍塌到地表,或在地面形成沉陷盆地。在有水的情况下,土体流动会造成极大的荷载。此时,需要采取专门的支护措施和施工方法来保证坑道的稳定。

坑道围岩的稳定性不同,采取的支护措施和施工方法也不同。因此,按坑道围岩稳定性大致相同的围岩工程地质条件并结合工程实践进行围岩分级是有可能的,也是有根据的。

目前,国内外有关隧道围岩分级的方法有很多,虽然它们所采用的分级指标各不相同,但都是在隧道工程实践的基础上逐步发展起来的。随着人们对隧道工程、地质环境以及这两者间相互关系了解的深入,围岩的分级方法也将得到不断的深化和提高。

1.1.3 围岩的分级方法

对于现行的围岩分级方法,其分级的基本要素有与岩石有关的要素、与地质构造有关的要素、与地下水有关的要素。

1. 以岩石强度或岩石的物性指标为基础的分级方法

1) 以岩石强度为基础的分级方法

这种围岩分级单纯以岩石的强度为依据,如新中国成立前及新中国成立初期(如修建成渝线时)的土石分类法。该分级法把岩石分为坚石、次坚石、松石及土四类,并设计出相应的四种隧道衬砌结构类型。

采用这种分级方法,坑道开挖后的稳定性主要取决于岩石的强度,即岩石越坚硬,坑道越稳定,反之,则坑道的稳定性越差。实践证明,这种认识是不全面的。例如,我国陕北的老黄土,无水时直立性很强,稳定性相当高,在无支护条件下能维持十几年甚至几十年,但其单轴抗压强度却很低。又如,江西、福建一带的红砂岩,其整体性好,坑道开挖后的稳定性较好,但其强度不高。因此,单纯以岩石强度为基础的分级方法是很片面的。

2) 以岩石的物性指标为基础的分级方法

以岩石的物性指标为基础的分级方法中最具代表性的是苏联的普氏分类法。它把围岩分成10类。这种分类法曾在我国的隧道工程中得到广泛应用。普氏系数 f 值是一个综合的物性指标值,反映岩石的坚固程度,如抗钻性、抗爆性、强度等,它也是岩石强度指标的反映。

2. 与地质勘探手段相联系的分级方法

随着工程地质勘探方法,尤其是物探方法的进步,用弹性波速度进行围岩分级的探讨在日本取得了一定的成果。围岩弹性波速度是判断岩性和岩体结构的综合指标,它既可以反映岩石的软硬程度,又可以表达岩体结构的破碎程度。因此,在弹性波速度的基础上综合考虑与隧道开挖及土压有关的因素(岩性、风化程度、破碎状态、含水及涌水状态等),将围岩分为7级。

《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)将弹性波(纵波)速度引入隧道围岩分级中,将围岩分为6级,见表1-1。

表 1-1 弹性波(纵波)速度分级

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
弹性波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	A: >4.5	A: $4.5 \sim 5.3$ B: >5.3 C: >5.0	A: $4.0 \sim 4.5$ B: $4.3 \sim 5.3$ C: $3.5 \sim 5.0$ D: >4.0	A: $3.0 \sim 4.0$ B: $3.3 \sim 4.3$ C: $3.0 \sim 3.5$ D: $3.0 \sim 4.0$ E: $2.0 \sim 3.0$	A: $2.0 \sim 3.0$ B: $4.3 \sim 5.3$ C: $3.5 \sim 5.0$ D: >4.0	<1.0 (饱和状态的土 <1.5)

注: A、B、C、D、E 是指岩性类型。

把地质勘察手段与围岩分类联系起来,这是分级方法上的一个重要进展。这方面除了用弹性波速度外,还有用钻探时的岩心复原率(或称岩心采取率)的分级方法。美国伊利诺斯大学狄丽等人提出的采用所谓“岩石质量指标(rock quality designation, RQD)”就是一例。狄丽指出,岩心的采取状态(采用率)、平均长度、最大长度等受到原始裂隙、硬度、均质性等状态的支配。因此,岩心采取率是可以用来表达岩体质量的。同时指出,岩体质量的好坏主要决定于小于 10 cm 的细小岩块状态。因此,岩心复原率是以单位长度钻孔中 10 cm 以上的岩心占有比例来判断的,即

$$RQD(\%) = \frac{10 \text{ cm 以上岩心累计长度}}{\text{钻孔长度}} \times 100 \quad (1-1)$$

该分级法将围岩分为 5 级: $RQD \geq 90\%$ 为优质的; $75\% \leq RQD < 90\%$ 为良好的; $50\% \leq RQD < 75\%$ 为好的; $25\% \leq RQD < 50\%$ 为差的; $RQD < 25\%$ 为很差的。分级也给出相应的地压值及可采用的支护系统。当采用掘进机掘进时,地压值可适当减小(约减小 20%)。

上述分类大体上说是半定量的、综合的。它把岩体的很多错综复杂的因素用一个指标来表达,难免给判断带来一定的主观性。例如,当弹性波速度较低时,可能有以下几种情况。

- (1) 岩体完整,但岩质松软。
- (2) 岩质坚硬,但岩体破碎。
- (3) 出现于地形上局部高低差显著的谷部等。

因此,在判断上还要借助于其他条件,如地质测绘、岩性等手段或资料。

3. 以多种因素进行组合的分级方法

这种分级法认为,评价一种岩体的好坏,既要考虑地质构造、岩性、岩石强度,还要考虑施工因素,如掘进方向与岩层之间的关系、开挖断面的大小等,因此需建立在多种因素的分析基础之上。

在这类分级法中,比较完善的是 1974 年挪威地质学家巴顿(N. Barton)等人提出的“岩体质量-Q”分级法。Q 与 6 个表明岩体质量的地质参数有关,具体见式(1-2)。

$$Q = \frac{RQD}{J_h} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1-2)$$

式中, RQD 为岩石质量指标; J_h 为节理组数,岩体越破碎, J_h 取值越大,如整体没有或很少有节理的岩体, $J_h = 0.5 \sim 1.0$, 两个节理组时, $J_h = 4$, 破碎岩体、类似土的 $J_h = 20$; J_r 为节理粗糙度,节理越光滑, J_r 取值越小,如不连续节理, $J_r = 4$, 平整光滑的, $J_r = 0.5$; J_a 为节理蚀变值,蚀变越严重, J_a 取值越大,如节理面紧密结合、夹有坚硬不软化的充填物时, $J_a = 0.75$, 节理中夹有膨胀性黏土(如蒙脱土)时, $J_a = 8 \sim 12$ 等; J_w 为节理含水折减系数,节理渗水量越大,水压越高, J_w 取值越小,如干燥或微量渗水,且水压低于 0.1 MPa 时, $J_w = 1.0$, 而渗水量特别大或水压特别高,且持续无明显衰减时 $J_w = 0.1 \sim 0.05$; SRF 为应力折减系数,围岩

初始应力越高,SRF 取值越大,如脆性而坚硬的岩石有严重岩爆现象时, $SRF=10\sim 20$;坚硬岩石有单一剪切带时, $SRF=2.5$ 。

通过进一步分析可以发现,这 6 个地质参数可以表达出岩体的岩块大小(RQD/J_h)、岩块间的抗剪强度(J_r/J_a)、作用应力(J_w/SRF)。所以说,岩体质量 Q 实际上是岩块尺寸、抗剪强度、作用应力的复合指标。

根据不同的 Q 值,将岩体质量分为 9 个等级,详见表 1-2。

表 1-2 岩体质量评估

岩体质量等级	特别好	极好	良好	好	中等	不良	坏	极坏	特别坏
Q	400~1 000	100~400	40~100	10~40	4~10	1~4	0.1~1	0.01~0.1	0.001~0.01

考虑多种因素组合的分级是以大量实践资料为基础的,它同时引进了岩体的动态分析,故对判断隧道围岩的稳定性是比较合理和可靠的,也具有一定的理论意义,是围岩分级研究中一个有发展前途的方法。但分级还没有与有关的地质测试手段联系起来,因而在确定各项指标时,有的是通过试验或现场实测确定的,有的主要是凭经验决定的,带有一定的主观因素。

4. 以工程对象为代表的分级法

这类分级法,如专门适用于喷锚支护的原国家建委颁布的围岩分级法(1979 年)、苏联在巴库修建地下铁道时所采用的围岩分级法(1966 年)等,其优点是目的明确,而且和支护尺寸直接挂钩,使用方便,对指导施工起到一定的作用。但其分类指标以定性描述为主,带有很多人为因素。

由上述可知,隧道围岩的分级方法有简有繁,并无统一标准。目前,国内外许多学者都认为,隧道围岩分级的详细程度在工程建设的不同阶段可以不同。在工程规划和初步设计阶段的围岩分级,可以定性评价为主,判别的依据主要来源于地表的地质测绘以及部分的勘探工作。在工程的技术设计和施工设计阶段,围岩分级是为专门目的服务的,如为支护结构设计服务的围岩分级,为钻爆工作服务的围岩分级等。围岩的类别除了取决于地质条件外,还应和工程尺度、形状、施工工艺技术等条件有关。其划分依据除了地质测绘资料外,更重要的是详细勘探(包括钻探、坑探、物探等)资料和岩石(体)的室内和现场试验数据。这一阶段的分类指标应该是半定量的或定量的。在施工阶段,应利用各种量测和观测到的实际资料对围岩分类进行补充和修正,此时的分类仍属第二阶段的详细分类,但数据则是岩体暴露后的实际值。

1.1.4 我国铁路隧道围岩的分级

经过长期的工程实践,发现主要反映岩石强度的 f 值分级法不能全面地反映隧道围岩的稳定特征和状态。所以,原铁道部于 1975 年颁布了以围岩结构特征和完整状态为分类基础的新的铁路隧道围岩稳定性分级法,它总结了新中国成立以来在修建铁路隧道中使用 f 值分级法所积累的经验,并参考了国内外有关围岩分级的成果。它的出现引起了各方面的重视,国内许多部门针对本部门地下工程的特点,都相继采用了类似的分类方法。20 世纪 80 年代,我国又对铁路隧道围岩分级法做了补充和修正,1986 年颁布了修正方案。2005 年颁布的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)中采用了国家标准的分级排序,并将原围岩分类改称为围岩分级,同时完善了施工阶段围岩分级的评定方法[2016 年 10 月,国家铁路局发布了《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016),《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)同时废止。];又将围岩分级的部分内容与《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2001)进行了

协调修改,生成了新的隧道围岩分级方案[2007 年 8 月 31 日,《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)正式实施,同时,《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2001)废止。]。下面就对这一新的隧道围岩分级进行介绍。

1. 围岩分级的基本因素及围岩基本分级

1) 围岩分级的基本因素

围岩基本分级应由岩石坚硬程度和岩体完整程度两个因素确定,岩石坚硬程度和岩体完整程度应采用定性划分和定量指标两种方法综合确定。岩石坚硬程度可按表 1-3 确定,岩性类型可按表 1-4 确定,岩石风化程度可按表 1-5 确定。岩体完整程度可按表 1-6 确定,表中结构面结合程度可按表 1-7 确定,层状岩层厚度划分可按表 1-8 确定。

表 1-3 岩石坚硬程度的划分

岩石类别		单轴饱和抗压强度 R_c /MPa	定性鉴定	代表性岩石
硬质岩	极硬岩	$R_c > 60$	锤击声清脆,有回弹,振手,难击碎; 浸水后,大多无吸水反应	未风化~微风化的 A 类岩石
	硬岩	$30 < R_c \leq 60$	锤击声较清脆,有轻微回弹,稍振手,较难击碎; 浸水后,有轻微吸水反应	微风化的 A 类岩石;未风化~微风化的 B、C 类岩石
软质岩	较软岩	$15 < R_c \leq 30$	锤击声不清脆,无回弹,较易击碎; 浸水后,指甲可刻出印痕	强风化的 A 类岩石;弱风化的 B、C 类岩石;未风化~微风化的 D 类岩石
	软岩	$5 < R_c \leq 15$	锤击声哑,无回弹,有凹痕,易击碎; 浸水后,手可掰开	强风化的 A 类岩石;弱风化~强风化的 B、C 类岩石;弱风化的 D 类岩石;未风化~微风化的 E 类岩石
软质岩	极软岩	$R_c \leq 5$	锤击声哑,无回弹,有较深凹痕,手可捏碎; 浸水后,可捏成团	全风化的各类岩石和成岩作用差的岩石

注:当无条件取得单轴饱和抗压强度 R_c 实测值时,也可采用实测的岩石点荷载强度指数 $I_{s(50)}$ 的换算值,换算方法按现行国家标准《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)执行。

表 1-4 岩性类型的划分

岩性类型	代表岩性
A	岩浆岩(花岗岩、闪长岩、正长岩、辉绿岩、安山岩、玄武岩、石英粗面岩、石英斑岩等),变质岩(片麻岩、石英岩、片岩、蛇纹岩等),沉积岩(熔结凝灰岩、硅质砾岩、硅质石灰岩等)
B	沉积岩(石灰岩、白云岩等碳酸盐类)
C	变质岩(大理岩、板岩等),沉积岩(钙质砂岩、铁质胶结的砾岩及砂岩等)
D	第三纪沉积岩类(页岩、砂岩、砾岩、砂质泥岩、凝灰岩等);变质岩(云母片岩、千枚岩等),且岩石单轴饱和抗压强度 $R_c > 15$ MPa
E	晚第三纪~第四纪沉积岩类(泥岩、页岩、砂岩、砾岩、凝灰岩等),且岩石单轴饱和抗压强度 $R_c \leq 15$ MPa

表 1-5 岩石风化程度的划分

名 称	风化特征
未风化	岩石结构构造未变,岩质新鲜
微风化	岩石结构构造、矿物成分和色泽基本未变,部分裂隙面有铁锰质渲染或略有变色
弱风化	岩石结构构造部分破坏,矿物成分和色泽较明显变化,裂隙面风化较剧烈
强风化	岩石结构构造大部分破坏,矿物成分和色泽明显变化,长石、云母和铁镁矿物已风化蚀变
全风化	岩石结构构造完全破坏,已崩解和分解成松散土状或砂状,矿物全部变色,光泽消失,除石英颗粒外的矿物大部分风化蚀变为次生矿物

表 1-6 岩体完整程度的划分

完整程度	结构面发育程度			主要结构面结合	主要结构面类型	相应结构类型	岩体完整性指数(K_v)	岩体体积节理数/(条/ m^3)
	定性描述	组数	平均主要间距/m					
完整	不发育	1~2	>1.0	结合好或一般	节理、裂隙、层面	整体状或巨厚层状结构	$K_v>0.75$	$J_v<3$
较完整		1~2	>1.0	结合差	节理、裂隙、层面	块状或厚层状结构	$0.55<K_v\leq 0.75$	$3\leq J_v<10$
	2~3	$0.4\sim 1.0$	结合好或一般	块状结构				
较破碎	较发育	2~3	$0.4\sim 1.0$	结合差	节理、裂隙、劈理、层面、小断层	裂隙块状或中厚层状结构	$0.35<K_v\leq 0.55$	$10\leq J_v<20$
	发育	≥ 3	$0.2\sim 0.4$	结合好		镶嵌碎裂结构		
				结合一般		薄层状结构		
破碎		≥ 3	$0.2\sim 0.4$	结合差	各种类型结构面	裂隙块状结构	$0.15<K_v\leq 0.35$	$20\leq J_v<35$
	很发育	≥ 3	≤ 0.2	结合一般或差		碎裂结构		
极破碎	无序	—	—	结合很差		散体结构	$K_v\leq 0.15$	$J_v\geq 35$

注:平均间距指主要结构面间距的平均值。

表 1-7 结构面结合程度的划分

结合程度	结构面特征
结合好	张开度小于 1 mm,为硅质、铁质或钙质胶结,或结构面粗糙,无填充物;张开度 1~3 mm,为硅质或铁质胶结;张开度大于 3 mm,结构面粗糙,为硅质胶结
结合一般	张开度小于 1 mm,结构面平直,钙泥质胶结或无填充物;张开度 1~3 mm,为钙质胶结;张开度大于 3 mm,结构面粗糙,为铁质或钙质胶结
结合差	张开度 1~3 mm,结构面平直,为泥质胶结或钙泥质胶结;张开度大于 3 mm,多为泥质或岩屑充填
结合很差	泥质填充或泥夹岩屑填充,充填物厚度大于起伏差

表 1-8 层状岩层厚度的划分

层状岩层厚度	单层厚度
巨厚层	大于 1.0 m
厚层	大于 0.5 m,且小于等于 1.0 m
中厚层	大于 0.1 m,且小于等于 0.5 m
薄层	小于等于 0.1 m

2) 围岩的基本分级

根据以上分级的基本因素及指标,给出各级围岩的主要工程地质特征、结构特征、完整性及围岩弹性纵波速度等要素,《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)将单、双线铁路隧道的围岩划分为 6 级,见表 1-9。

表 1-9 铁路隧道围岩分级

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态(小跨度)	围岩基本质量指标 BQ	围岩弹性纵波速度 $v_p/(km/s)$
	主要工程地质特征	结构特征和完整状态			
I	极硬岩(单轴饱和抗压强度 $R_c > 60\text{ MPa}$);受地质构造影响轻微,节理不发育,无软弱面(或夹层);层状岩层为巨厚层或厚层,层间结合良好,岩体完整	呈巨块状整体结构	围岩稳定,无坍塌,可能产生岩爆	>550	A: >5.3
II	硬质岩($R_c > 30\text{ MPa}$);受地质构造影响较重,节理较发育,有少量软弱面(或夹层)和贯通微张节理,但其产状及组合关系不致产生滑动;层状岩层为中厚层或厚层,层间结合一般,很少有分离现象,或为硬质岩石偶夹软质岩石	呈巨块状或大块状结构	暴露时间长,可能会出现局部小坍塌,侧壁稳定,层间结合差的平缓岩层顶板易塌落	451~550	A:4.5~5.3 B: >5.3 C: >5.0

续表

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态(小跨度)	围岩基本质量指标 BQ	围岩弹性纵波速度 $v_p/(km/s)$
	主要工程地质特征	结构特征和完整状态			
Ⅲ	硬质岩($R_c > 30\text{ MPa}$):受地质构造影响严重,节理发育,有层状软弱面(或夹层),但其产状及组合关系尚不致产生滑动;层状岩层为薄层或中层,层间结合差,多有分离现象;硬、软质岩石互层	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	拱部无支护时可产生小坍塌,侧壁基本稳定,爆破振动过大易塌	351~450	A:4.0~4.5 B:4.3~5.3 C:3.5~5.0 D:>4.0
	较软岩($R_c = 15\text{ MPa} \sim 30\text{ MPa}$):受地质构造影响轻微,节理不发育;层状岩层为厚层、巨厚层,层间结合良好或一般	呈大块状结构			
Ⅳ	硬质岩($R_c > 30\text{ MPa}$):受地质构造影响极严重,节理很发育;层状软弱面(或夹层)已基本损坏	呈碎石状压碎结构	拱部无支护时,可产生较大的坍塌,侧壁有时失去稳定	251~350	A:3.0~4.0 B:3.3~4.3 C:3.0~3.5 D:3.0~4.0 E:2.0~3.0
	软质岩($R_c \approx 5\text{ MPa} \sim 30\text{ MPa}$):受地质构造影响较重或严重,节理较发育或发育	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构			
	土体:(1)具压密或成岩作用的黏性土、粉土及砂类土;(2)黄土(Q_1 、 Q_2);(3)一般钙质、铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土	(1)和(2)呈大块状压密结构,(3)呈巨块状整体结构	拱部无支护时,可产生较大的坍塌,侧壁有时失去稳定		
Ⅴ	岩体:较软岩、岩体破碎;软岩、岩体较破碎至破碎;全部极软岩及全部破碎岩(包括受构造影响严重的破碎带)	呈角砾碎石状松散结构	围岩易坍塌,处理不当会出现大坍塌,侧壁经常会出现小坍塌;浅埋时易出现地表下沉(陷)或塌至地表	≤ 250	A:2.0~3.0 B:2.0~3.3 C:2.0~3.0 D:1.5~3.0 E:1.0~2.0
	土体:一般第四系坚硬、硬塑黏性土,稍密及以上、稍湿或潮湿的碎石土、卵石土、圆砾土、角砾土、粉土及黄土(Q_3 、 Q_4)	非黏性土呈松散结构,黏性土及黄土呈松软结构			

续表

围岩级别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态(小跨度)	围岩基本质量指标 BQ	围岩弹性纵波速度 $v_p/(km/s)$
	主要工程地质特征	结构特征和完整状态			
Ⅵ	岩体:受构造影响严重呈碎石、角砾及粉末、泥土状的富水断层带,富水破碎的绿泥石或炭质千枚岩	黏性土呈易蠕动的松软结构,砂性土呈潮湿松散结构	围岩极易变形坍塌,有水时土砂常与水一齐涌出;浅埋时易塌至地表	—	<1.0 (饱和状态的土 <1.5)
	土体:软塑状黏性土,饱和的粉土、砂类土等,风积沙,严重湿陷性黄土				

2. 围岩分级的影响因素及分级的修正

在围岩基本分级的基础上综合考虑地下水、初始地应力和风化作用等必要因素的影响,对围岩分级进行修正。

1) 地下水

隧道施工的大量实践证明,水是造成施工塌方、使坑道围岩丧失稳定的重要原因之一。在不同的围岩中水的影响是不同的。

- (1)使岩质软化、强度降低,对软岩尤为明显,对土体则可促使其液化或流动。
- (2)在有软弱结构面的围岩中,会冲走充填物或使夹层液化,减少层间摩擦力促使岩块滑动。
- (3)在某些围岩中,如石膏、岩盐和蒙脱石为主的黏土岩,遇水后产生膨胀;在未胶结或弱胶结的砂岩中可产生流沙和潜蚀。

因此,在隧道围岩分级中水的影响是不容忽视的。在同级围岩中,遇水后会使围岩的级别降低。降低的幅度主要视以下两个条件而定。

- (1)围岩的岩性及结构面的状态。
 - (2)地下水的性质、大小、流通条件及对围岩的浸润状况和危害程度。
- 围岩分级中关于地下水状态的分级和地下水影响的修正参照表 1-10 和表 1-11。

表 1-10 地下水状态的分级

地下水出水状态	渗水量 $[L/(min \cdot 10 m)]$
潮湿或点滴状出水	≤ 25
淋雨状或线流状出水	$25 \sim 125$
涌流状出水	> 125

表 1-11 地下水影响的修正

地下水出水状态	围岩级别				
	I	II	III	IV	V
潮湿或点滴状出水	I	II	III	IV	V
淋雨状或线流状出水	I	II	III或IV ^①	V	VI
涌流状出水	II	III	IV	V	VI

注：①围岩岩体为较完整的硬岩时定为Ⅲ级，其他情况定为Ⅳ级。

表 1-12 初始地应力状态评估基准

初始地应力状态	主要现象	评估基准(R_c/σ_{max})
一般地应力	硬质岩：开挖过程中不会出现岩爆，新生裂缝较少，成洞性一般较好	>7
	软质岩：岩芯无或少有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体有一定的位移，成洞性一般较好	
高地应力	硬质岩：开挖过程中可能出现岩爆，洞壁岩体有剥离和掉块现象，新生裂缝较多，成洞性较差	$4\sim7$
	软质岩：岩芯时有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体位移显著，持续时间较长，成洞性差	
极高地应力	硬质岩：开挖过程中有岩爆发生，有岩块弹出，洞壁岩体发生剥离，新生裂缝多，成洞性差	<4
	软质岩：岩芯常有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体有剥离，位移极为显著，甚至发生大位移，持续时间长，不易成洞	

注：表中 R_c 为岩石单轴饱和抗压强度(MPa)， σ_{max} 为垂直洞轴线方向的最大初始地应力值(MPa)。

表 1-13 初始地应力影响的修正级别

初始地应力状态	围岩级别				
	I	II	III	IV	V
极高应力	I	II	III或IV ^①	V	VI
高应力	I	II	III	IV或V ^②	VI

注 1：①围岩岩体为较破碎的极硬岩、较完整的硬岩时定为Ⅲ级，其他情况定为Ⅳ级；②围岩岩体为破碎的极硬岩、较破碎及破碎的硬岩时定为Ⅳ级，其他情况定为Ⅴ级。

注 2：本表不适用于特殊围岩。

3) 风化作用的影响

若隧道洞深埋深较浅，则应根据围岩受地表的影响情况进行围岩级别修正。当围岩为风化层时，应按风化层的围岩基本分级考虑。若围岩仅受地表影响时，则应较相应围岩降低 1~2 级。

在隧道施工过程中,根据对隧道的直接观察、量测和试验结果,可进一步核定岩层的构造、岩性及地下水等情况,从而判断围岩的稳定程度。当发现设计文件与实际情况不符时,应及时修改围岩级别,并变更支护设计。

1.2 围岩压力与成拱作用

1.2.1 围岩压力概述

衬砌结构承受的压力,称为围岩压力。

当在坚硬稳定的岩层中开挖隧道时,一般不需要支护,但因为爆破时围岩会发生松动及爆破后被风化,所以仍需要修筑支护结构。当在破碎的岩层或松软地层中修筑隧道、开挖坑道时,围岩由于受到扰动失去稳定而产生变形、松弛、错动、挤压、断裂、下沉或坍塌等现象。因此,为了阻止围岩的移动和崩落,保证坑道具有设计的建筑界限和净空,就需要架设临时支撑或修筑永久支护结构。

围岩压力按作用力发生的形态,一般可分为以下几种类型。

1. 松动压力

由于开挖而松动或坍塌的岩体以重力形式直接作用在支护结构上的压力称为松动压力。按作用在支护结构上位置的不同,松动压力分为竖向压力、侧向压力和底压力。松动压力常在下列三种情况出现时发生。

- (1)在整体稳定的岩体中,可能出现个别松动掉块的岩石。
- (2)在松散软弱的岩体中,坑道顶部和两侧边帮冒落。
- (3)在节理发育的裂隙岩体中,围岩某些部位沿软弱面发生剪切破坏或拉坏等局部塌落。

2. 形变压力

形变压力是指由于围岩变形受到与之密贴的支护(如锚喷支护等)的抑制,而使围岩在与支护结构共同变形的过程中,围岩对支护结构施加的接触压力。形变压力除与围岩应力的状态有关外,还与支护时间和支护刚度有关。

3. 膨胀压力

由于围岩吸水而膨胀崩解所引起的压力称为膨胀压力。它与形变压力的基本区别在于它是由吸水膨胀引起的。

4. 冲击压力

冲击压力是指围岩中积累了大量的弹性变形能之后,由于隧道的开挖,围岩的约束被解除,能量突然释放所产生的压力。

因为冲击压力是有关岩体能量的积累与释放问题,所以它与弹性模量直接相关。弹性模量较大的岩体在高地应力的作用下,易于积累大量的弹性变形能,一旦遇到适宜的条件,就会突然猛烈地大量释放。

1.2.2 坑道开挖前后围岩的应力状态

1. 坑道开挖前围岩的应力状态

坑道开挖前,地层处于相对静止状态。地层中任何一处的土石都受到其上、下、左、右、前、后土石的挤压,保持着相对的平衡,称为原始应力状态。它是由上覆地层自重、地壳运动的残余应力以及地下水活动等因素决定的。

2. 坑道开挖后围岩的应力状态

坑道开挖后,围岩原来保持的平衡状态受破坏,由相对的静止状态变成显著的变动状态,于是围岩在应力和变形方面开始了一个新的变化运动,出现了围岩应力的重分布和围岩向开挖的坑道空间变形,力图达到新的平衡。

1.2.3 围岩的成拱作用

通过工程实践发现,当隧道在多裂隙围岩(包括一般土层)中埋置较深时,作用在支护结构上的围岩松散压力远小于其上覆岩层自重所造成的压力,这可用围岩的“成拱作用”来解释。当坑道开挖后,如果让其任意变形、松动和坍塌,最后将看到在坑道上方形成一个相对稳定的拱形洞穴,人们常称之为“天然拱”或“平衡拱”。它上方的一部分岩体承受着上覆地层的全部重力,如同一个承载环,并将荷载重力向两侧传递下去,这就是所谓的围岩的成拱作用。

1.2.4 影响围岩压力的因素

影响围岩压力的因素很多,如工程地质因素,主要包括原始应力状态、岩石的力学性质、岩体的结构面等;又如工程结构因素,包括施工方法、支护设置的时间、支护本身的刚度、坑道的形状和尺寸、坑道的埋置深度等。其中,起决定作用的是围岩的地质条件,这是内因,其对围岩压力的影响已在围岩分级中有所论述。下面将就其他因素(外因)对围岩压力的影响进行分析。

1. 时间

不论是何种围岩,在坑道开挖后的暴露时间都是越短越好。从另一方面讲,就是要修筑永久性衬砌并使之能提供所需的支护力的时间不宜过迟。否则,要受到较大的松动围岩压力的作用。按照一般混凝土衬砌的修筑方法,从开挖到做完衬砌并使之具有一定的强度,往往需要较长的时间,也就是说衬砌结构从一开始就要受到很大的松动围岩压力,因此应该将衬砌结构做得厚一些。而采用喷射混凝土技术来支护围岩,可使围岩的暴露时间缩短,能及时制止围岩的变形,防止因变形过大产生较大的松动压力,能充分利用围岩自身的承载能力。

2. 坑道的形状和尺寸

围岩压力是随着坑道尺寸的增大而增大的,当坑道有引起应力集中的形状,即有明显的拐角时,围岩的压力相对较大。

3. 坑道的埋置深度

当坑道的埋置深度在一定范围内时,围岩压力是随着埋置深度的增大而增大的;当坑道

的埋置深度超过一定范围时,围岩压力的大小基本不受埋置深度变化的影响。

4. 支护

有支护的坑道,其围岩压力要比无支护的坑道小;支护及时要比支护晚的围岩压力小;支护与坑道周边密贴的越好则围岩压力越小;当支护刚度较小(即柔性支护)时,坑道的围岩压力相对较小。

5. 爆破

采用爆破法进行开挖对围岩的稳定性极为不利,尤其是对地质条件较差的围岩,爆破的扰动很大,能造成围岩压力过大、岩体松动甚至塌方。因此,在隧道施工中应严格控制爆破用药量,提倡采用光面爆破、预裂爆破等先进的爆破技术。

6. 超挖回填

对衬砌背后的超挖部分进行施工时,若回填不密实,会使围岩得不到很好的支护而继续松动,严重时会造成围岩坍塌,引起衬砌裂损。

1.3 围岩压力的确定和实测方法

1.3.1 围岩压力的确定方法

围岩压力的确定方法一般有现场量测法、理论计算法、经验法(或工程类比法)。现场量测法是用仪器实地量测围岩压力的大小,最具说服力。但因受量测技术手段的影响,量测的结果往往不能充分反映真实的情况。理论计算法是用一些成熟的计算理论对围岩体做一些假定来实现对隧道围岩压力的计算,但因围岩的条件千变万化,所用的计算参数难免有与实际不相符的地方,故采用理论计算法时还需要配合一些其他的方法。通过对实际工程的围岩压力值进行统计分析而形成的经验法,因具有简单、可靠的优点而被广泛应用。目前,在实际工程中往往采用上述几种方法互相验证。

当隧道的埋置深度超过一定限值时,由于围岩有“成拱作用”,其松动压力仅是隧道周边某一破坏范围(自然拱)内岩体的质量,而与深度无关,因此,确定这一破坏范围的大小就成为解决问题的关键。

1. 深埋隧道围岩压力的确定

目前,我国铁路隧道所采用的计算围岩竖向匀布压力的计算式是通过工程类比法在统计分析了我 1 000 座隧道塌方的调查资料后确定的。

1) 垂直匀布压力

通过统计分析实际隧道工程中的塌方高度,在《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)中给出了围岩垂直匀布压力的计算公式。

$$q = \gamma h \quad (1-3)$$

$$h = 0.45 \times 2^{S-1} \omega \quad (1-4)$$

式中, q 为围岩垂直匀布压力(kPa); γ 为围岩重力密度(kN/m³); h 为围岩压力计算高度(m); S 为围岩级别,如Ⅲ级围岩; ω 为宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B - 5)$; B 为坑道宽度(m); i 为 B 每增

减 1 m 时的围岩压力增减率;当 $B < 5$ m 时,取 $i = 0.2$;当 $B \geq 5$ m 时,可取 $i = 0.1$ 。

2)水平匀布压力

水平匀布压力可按表 1-10 确定。

表 1-14 围岩水平匀布压力

围岩级别	I、II	III	IV	V	VI
水平匀布压力	0	$< 0.15q$	$(0.15 \sim 0.30)q$	$(0.30 \sim 0.50)q$	$(0.50 \sim 1.00)q$

注:式(1-3)和表 1-14 的适用条件是不产生显著偏压力和膨胀力的一般围岩及采用钻爆法(或开敞式掘进机法)施工的隧道。

当地面水平或接近水平,且单(双线)隧道覆盖厚度值小于表 1-15 所列数值时,应按浅埋隧道进行设计。

表 1-15 浅埋隧道覆盖厚度值 单位:m

围岩级别	III	IV	V
小跨度隧道	5~7	10~14	18~25
中等跨度隧道	8~10	15~20	30~35
大跨度隧道	10~11	19~21	37~42

2. 浅埋隧道围岩压力的确定

对浅埋隧道而言,由于不能形成天然拱,因此不能套用确定深埋隧道围岩压力的方法,而是应通过研究浅埋隧道岩体的平衡条件找出新的方法。

1.3.2 围岩压力的实测方法

1. 直接量测法

直接量测法是采用各种压力盒量测作用在衬砌或支护结构上的压力的方法。该方法主要是利用各种土压力盒(即土压力传感器),将其置于衬砌结构与围岩之间,使二者之间的压力直接由土压力盒反映出来。这种土压力盒主要有电阻式、电容式、电压式和振弦式等几种。

2. 间接量测法

间接量测法是通过衬砌或支护及围岩应力的量测来推求围岩压力的方法。在这种量测法中,往往还要用围岩变形(位移)的量测来评价隧道围岩的稳定性及确定围岩松弛带的范围等。

3. 衬砌(支护)和围岩的应力或应变量测

1)应力解除法

应力解除法是在已经承载的衬砌(支护)表面贴上应变量测元件(应变片、应变计),再解除衬砌(支护)的应力,使其处于不受力状态,从而测出衬砌(支护)受力前后的应变值变化,

以此反推出衬砌(支护)所承受的压力。

2) 内部埋设应变仪法

内部埋设应变仪法是在衬砌(支护)施工时预先将应变元件(应变仪)埋设在衬砌与围岩之间,以测出衬砌(支护)内外表面的应变变化,进而反推出围岩所承受的压力。

3) 电测锚杆法

电测锚杆是一种特制的空心锚杆,其内壁贴有应变元件。在隧道施工中,可将电测锚杆锚固在围岩中,这样它就会随着围岩的变形而变形,这种变形可通过应变元件测出,以此来推求围岩所承受的压力。



基础知识与技能训练

一、名词解释

围岩 围岩压力 松动压力 膨胀压力

二、简答题

1. 简述围岩分级的目的。
2. 简述隧道开挖后的稳定性分类。
3. 我国现行《铁路隧道设计规范》中将单线、双线铁路隧道的围岩划分为哪几级?
4. 简述围岩的成拱作用。
5. 简述影响围岩压力的因素。
6. 围岩压力的确定方法有哪些?

三、实践题

结合隧道施工的实际情况,对围岩压力过大引起隧道坍塌的认识过程与处理方法进行总结分析。

● 隧 道 构 造

● 知识目标

了解隧道的基本构造。

掌握隧道的支护形式、洞身支护结构、明洞与洞门构造、通风排水等。

2.1 隧道衬砌概述

2.1.1 隧道衬砌的形式及适用条件

隧道开挖以后,为了保持坑道的稳定,一般都需要在坑道周围修建支护结构,即衬砌。隧道支护示意如图 2-1 所示。

1. 支护的方式

支护的方式主要有以下几种。

(1)外部支护。外部支护即从外部支撑着坑道的围岩,如模筑混凝土整体式衬砌、砖石衬砌、装配式衬砌、喷射混凝土支护等。

(2)内部支护。内部支护即对围岩进行加固以提高其稳定性,如锚杆支护、压入浆液等。

(3)混合支护。混合支护即内部与外部支护混合在一起的衬砌,如喷锚支护。

2. 衬砌的类型

按衬砌的施工工艺,可将隧道衬砌分为以下四种类型。

1)整体式模筑混凝土衬砌

整体式模筑混凝土衬砌是指就地灌注混凝土衬砌,也称模筑混凝土衬砌。其工艺流程为立模—灌注—养生—拆模。模筑混凝土衬砌的特点是对地质条件的适应性较强,易于按需要成型,整体性好,抗渗性强,并适用于多种施工条件,如可用木模板、钢模板或衬砌模板台车等。

2)装配式衬砌

装配式衬砌是将衬砌分成若干块构件,这些构件在现场或工厂预制,然后运到坑道内用机械拼装成一环连一环的衬砌。这种衬砌的特点是拼装成环后立即受力,便于机械化施工,改善劳动条件,节省劳力。目前,装配式衬砌多在使用盾构法施工的城市地下铁道中采用。

3)喷锚支护

喷射混凝土是以压缩空气为动力,将掺有速凝剂的混凝土拌合料与水混合成浆状,喷射到坑道的岩壁上凝结而成。当岩壁不够稳定时,可加设锚杆、金属网和刚架,如此构成的支护形式,简称“锚喷支护”。

喷锚支护是一种符合岩体力学原理的支护方法。喷锚支护具有以下几个特点。

(1)与围岩密贴,支护及时,柔性好。

(2)封闭围岩壁面,防止风化。

(3)填充裂隙,加固围岩。

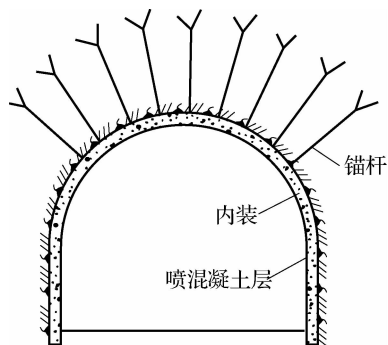


图 2-1 隧道支护

(4)能充分调动围岩本身的自稳能力,与围岩组成共同承载体系。

喷锚支护包括锚杆支护、喷射混凝土支护、喷射混凝土锚杆联合支护、喷射混凝土钢筋网联合支护、喷射混凝土与锚杆及钢筋网联合支护、喷射钢纤维混凝土支护、喷射钢纤维混凝土锚杆联合支护,以及上述几种类型加设型钢支撑(或格栅支撑)而形成的联合支护等。

喷锚支护是目前常用的一种围岩支护手段,适用于各种围岩地质条件,但是若作为永久衬砌,则一般仅考虑在Ⅰ、Ⅱ级等围岩良好、完整、稳定的地段中采用。

不宜采用喷锚支护作为永久衬砌的情况有以下几种。

- (1)膨胀性围岩。
- (2)黏土质胶结的软岩。
- (3)大面积涌水的地段。
- (4)堆积层、破碎带等不良地质地段。
- (5)对衬砌有特殊要求的隧道或地段,如洞口地段,要求衬砌内轮廓整齐、平整。
- (6)辅助坑道或其他隧道与主隧道的连接处及附近地段。
- (7)有很高防水要求的隧道。
- (8)围岩及覆盖太薄,且其上已有建筑物,不能沉落或拆除的。
- (9)地下水有侵蚀性,可能造成喷射混凝土和锚杆材料的腐蚀。
- (10)最冷月平均气温低于 -5°C 地区的冻害地段。

4)复合式衬砌

复合式衬砌不同于单层厚壁的模筑混凝土衬砌,它把衬砌分成两层或两层以上,可以采用同一种形式、方法和材料进行施工,也可以采用不同的形式、方法和材料进行施工。

目前,在工程中常用的都是外衬和内衬两层,所以也被称为“双层衬砌”。按内衬和外衬的不同组合情况,双层衬砌可分为以下几种。

- (1)喷锚支护与混凝土衬砌。
- (2)喷锚支护与喷射混凝土衬砌。
- (3)可缩性钢拱架(或格栅钢构拱架)喷射混凝土与混凝土衬砌。
- (4)装配式衬砌与混凝土衬砌。

目前最通用的是外衬为喷锚支护,内衬为整体式混凝土衬砌。

复合式衬砌是一种较为合理的结构形式,适用于多种围岩地质条件,具有广阔的发展前景。

2.1.2 隧道衬砌的一般构造要求

1. 隧道衬砌的建筑材料及其要求

用来修建隧道衬砌的材料应具有足够的强度和耐久性,在某些环境中,还必须具有抗冻性、抗渗性和抗侵蚀性。此外,还应满足就地取材、造价低、施工方便及易于机械化施工等要求。

常用的隧道衬砌材料有以下几种。

1)混凝土与钢筋混凝土

混凝土的优点是整体性和抗渗性较好,既能在现场浇筑,又可以在加工场预制,而且能

采用机械化施工。还可以在水泥中掺入外加剂,以提高混凝土的性能。

钢筋混凝土主要用在洞门、明洞衬砌,地震区断层破碎带或淤泥、流沙等不良地质地段的隧道衬砌中。在特殊情况下可采用旧钢轨或焊接钢筋骨架进行加强。

2)片石混凝土

为了节省水泥,在岩层较好的地段进行边墙衬砌时,可采用片石混凝土(片石的掺量不应超过总体积的 20%)。此外,当高于起拱线以上 1 m 的部位有超挖时,其超挖部分也可用片石混凝土进行回填。

片石混凝土选用的石料要坚硬,其强度等级不应低于 MU40,且不应采用有裂隙和易风化的石料。

3)石料和混凝土预制块

石料衬砌的优点是可就地取材,造价低,可保证衬砌厚度并能较早地承受荷载,可节省水泥和模板,耐久性和耐侵蚀性较好。其缺点是整体性差,砌缝多容易漏水,防水性能较差,施工主要靠手工操作,费工、费时,施工进度较慢,而且需要大量的熟练工。

4)喷射混凝土

喷射混凝土是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。另外,可在喷射混凝土中加入纤维类材料以提高其性能。

5)锚杆和刚架

锚杆是一种插入到围岩岩体内的杆形构件。锚杆可以是钢材,也可以是其他抗拉性能较好的材料。

刚架是为了加强支护刚度而在初期支护或二次衬砌中放置的型钢支撑或格栅钢支撑。

6)装配式材料

衬砌材料也可采用一些装配式材料,如钢筋混凝土大型预制块、加筋肋铸铁预制块等。另外,为了提高洞内照明、防水、通风、美观、视线诱导或减少噪声等的效果,可在衬砌内表面粘贴各种各样的装修材料。

2. 隧道衬砌的其他构造要求

(1)承受荷载的隧道建筑物各部结构截面最小厚度不应小于表 2-1 的规定。

表 2-1 界面最小厚度 单位:cm

建筑材料种类	隧道(暗洞、明洞)衬砌	洞门端墙、翼墙和洞口挡土墙
混凝土	25	30

(2)混凝土基础台阶的坡线和竖直线之间的夹角不应大于 45°。

(3)钢筋混凝土构件中最外侧钢筋的混凝土保护层厚度应符合《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)的规定。

(4)受拉区域的钢筋可单根或 2~3 根成束布置,钢筋的净距不得小于 d (d 为钢筋的直径,带肋钢筋 d 为钢筋的计算直径)和 30 mm。当钢筋(包括成束钢筋)层数等于或多于 3 层时,其净距横向不得小于 1.5 d 和 45 mm,竖向仍不得小于 d 和 30 mm。

(5)隧道暗洞及明洞衬砌钢筋混凝土结构一侧受力钢筋最小配筋率不小于 0.2%,全部

受力钢筋最小配筋率不小于 0.4%。其他钢筋混凝土结构受力钢筋的界面最小配筋率应符合《混凝土结构设计规范(2015 年版)》(GB 50010—2010)的规定。

(6)绑扎骨架中的受力光圆钢筋应在末端设置 180°弯钩,带肋钢筋和焊接骨架、焊接网以及作为受压钢筋时的光圆钢筋可不作弯钩。受拉钢筋弯钩应符合下列规定:

①光圆钢筋端部半圆形弯钩的内径不应小于 2.5d(d 为钢筋直径),并应在钩的端部留一直段,其长度不应小于 3d。

②钢筋直径不大于 25 mm 时,HRB400 钢筋直钩的内径不应小于 4d,HRB500 不应小于 6d,并在钩的端部留一直段;HRB400 直段长度不应小于 10d,HRB500 不应小于 12d。

③钢筋直径大于 25 mm 时,HRB400 钢筋直钩的内径不应小于 5d,HRB500 不应小于 7d,并在钩的端部留一直段;HRB400 直段长度不应小于 10d,HRB500 不应小于 12d。

④钢筋直径不大于 25 mm 时,HRB400 钢筋 135°弯钩的内径不应小于 4d,HRB500 不应小于 6d,并在钩的端部留一直段;HRB400 直段长度不应小于 5d,HRB400 不应小于 6d。

⑤钢筋直径大于 25 mm 时,HRB400 钢筋 135°弯钩的内径不应小于 5d,HRB500 不应小于 7d,并在钩的端部留一直段;HRB400 直段长度不应小于 5d,HRB500 不应小于 6d。

(7)钢筋的锚固及最小弯曲半径应符合下列规定:

①钢筋最小锚固长度应符合表 2-2 的规定。

表 2-2 钢筋最小锚固长度									单位:mm	
钢筋种类		HPB300			HRB400			HRB500		
混凝土等级		C25	C30	≥C40	C25	C30	≥C40	C25	C30	≥C40
受压钢筋(直端)		30 <i>d</i>	25 <i>d</i>	20 <i>d</i>	35 <i>d</i>	30 <i>d</i>	25 <i>d</i>	40 <i>d</i>	35 <i>d</i>	30 <i>d</i>
受拉钢筋	直端	—	—	—	45 <i>d</i>	40 <i>d</i>	35 <i>d</i>	50 <i>d</i>	45 <i>d</i>	40 <i>d</i>
	弯钩端	25 <i>d</i>	20 <i>d</i>	20 <i>d</i>	30 <i>d</i>	25 <i>d</i>	20 <i>d</i>	35 <i>d</i>	30 <i>d</i>	25 <i>d</i>

- 注 1:当带肋钢筋直径大于 25 mm 时,其锚固长度应增加 10%。
注 2:采用环氧树脂涂层钢筋时,受拉钢筋最小锚固长度应增加 25%。
注 3:当混凝土在凝固过程中易受扰动时,锚固长度应增加 10%。
注 4:受弯及大偏心受压构件中的受拉钢筋截断时宜避开受拉区。

②梁端部钢筋伸过支点的长度不应小于 10d(d 为钢筋直径),并设置标准弯钩。
③HPR300 钢筋的最小弯曲半径应为 10d,HRB400 钢筋的最小弯曲半径应为 14d,HRB500 钢筋的最小弯曲半径应为 18d。

(8)钢筋的连接应符合下列规定:

①隧道衬砌受力钢筋接头宜设置在受力较小处,受拉钢筋宜采用套筒机械连接方式,其他钢筋可采用绑扎搭接。

②隧道衬砌拱部及边墙钢筋接头不宜采用焊接,不可避免时应有保证安全的措施。

③钢筋的连接海英满足《混凝土结构设计规范(2015 年版)》(GB 50010—2010)的相关规定。

(9)钢筋的直径和间距应符合表 2-3~表 2-5 的要求。

表 2-3 柱中钢筋的直径和间距 单位:mm

类 别	直径 d	间 距
纵向受力钢筋(主筋)	≥ 12	净距 ≥ 50 且 ≤ 300
箍筋	≥ 6 且 $\geq d/4$ (d 为主筋中的最大直径); 纵向钢筋配筋率 $>3\%$ 时, ≥ 8	≤ 400 及截面的短边尺寸且 $\leq 15d$ (d 为主筋的最小直径); 纵向钢筋配筋率 $>3\%$ 时, $\leq 10d$ (d 为主筋的最小直径)且 ≤ 200
构造钢筋	偏心受压柱,当截面高度 $h \geq 600$ mm 时,应在垂直于弯矩作用平面的侧面上设置纵向构造钢筋, $d \geq 10$,并相应设置符合箍筋或拉筋	

表 2-4 板中钢筋的直径和间距 单位:mm

类 别	直径 d	间 距
纵向受力钢筋(主筋)	受力钢筋常用 6, 8, 10	板厚 $h \leq 150$ mm 时, ≤ 200 ; $h > 150$ mm 时, $\leq 1.5h$ 且 ≤ 250
构造钢筋	分布钢筋常用 $d \geq 6$, 间距 ≤ 250	

表 2-5 梁中钢筋的直径和间距 单位:mm

类 别	直径 d	间 距
纵向受力钢筋(主筋)	梁高 $h < 300$ mm, ≥ 8 ; $h \geq 300$ mm 时, ≥ 10	下部钢筋 ≥ 25 和 d ,上部钢筋 ≥ 30 和 $1.5d$ (d 为主筋的最大直径);下部钢筋多于两层时,2 层以上钢筋横向中距应是下面 2 层中距的 2 倍
箍筋	$h \leq 800$ mm 时, ≥ 6 ; $h > 800$ mm 时, ≥ 8 ; 配有计算需要的受压钢筋时, $\geq d$ (d 为受压钢筋中的最大直径)	梁高 $150 \text{ mm} < h \leq 300$ mm 时, 150~200; $300 \text{ mm} < h \leq 500$ mm 时, 200~300; $500 \text{ mm} < h \leq 800$ mm 时, 300~400; $KQ > 0.07R_a b h_0$ 时取最小值,反之取最大值
构造钢筋	(1)架立钢筋,梁跨 $l < 4$ m 时, $d \geq 8$; $l = 4 \sim 6$ m 时, $d \geq 10$; $l > 6$ m 时, $d \geq 12$; (2)梁的腹板高度 $h_w \geq 450$ mm 时,在梁的两个侧面应沿高度配置纵向构造钢筋,每侧纵向构造钢筋的间距不宜大于 200 mm,截面面积不应小于腹板截面面积($b \times h_w$)的 0.1%	

注 1:当按计算需设置弯起钢筋时,从支座起前一排的弯起点至后一排的弯终点的距离不应大于上表中 $KQ > 0.07R_a b h_0$ 时的箍筋间距。

注 2:截面的腹板高度 h_w :矩形截面,取有效高度;T 形截面,取有效高度减去翼缘高度;I 形截面,取腹板净高。

3. 隧道衬砌断面的初步拟定

隧道衬砌是超静定结构,其断面的设计步骤为初步拟定尺寸—计算内力—验算强度(安全量)—调整尺寸—重复上述计算,直到合适为止。

初步拟定结构的形状和尺寸时可采用经验类比的方法,主要应考虑以下几个因素。

1) 内轮廓

选定净空形状,原则是紧贴限界,衬砌表面平顺、圆滑。

2) 结构轴线

抽象出进行计算的几何形状。隧道衬砌是一种受压结构,结构的轴线应尽可能地符合荷载作用下的压力线。

(1)当衬砌承受径向分布的静水压力时,结构的轴线以圆形最合适。

(2)当衬砌主要承受竖向荷载和不大的水平荷载时,结构轴线的上部宜采用圆弧形或尖拱形,下部可以做成直线形(即直墙式)。

(3)当衬砌承受竖向荷载的同时又承受较大的水平荷载时,衬砌结构的轴线上部宜采用圆弧形或平拱形,下部可采用凸向外方的圆弧形(即曲墙式)。如果还有底鼓压力,或衬砌有沉陷的可能,则结构底部还应有凸向下方的仰拱。

3) 截面厚度

通过验算,要求设计的截面厚度具有足够的强度。

4) 衬砌的最小厚度

衬砌的最小厚度应满足施工的要求。

2.2 隧道洞身支护结构的构造

2.2.1 整体式模筑混凝土衬砌^①

整体式模筑混凝土衬砌是在坑道内立模板、拱架,然后浇筑混凝土而成的。它作为一种支护结构从外部支撑着坑道围岩,是一种传统的衬砌结构形式。按照不同的地质条件,或是按照不同的围岩级别,整体式模筑混凝土衬砌分为直墙式和曲墙式两种形式。

1. 直墙式衬砌

直墙式衬砌适用于地质条件比较好,以垂直围岩压力为主而水平围岩压力较小的情况,主要适用于Ⅱ、Ⅲ级围岩,有时也可用于Ⅳ级围岩。铁路隧道Ⅲ级围岩直墙式衬砌的标准图如图 2-2 所示。

直墙式衬砌由上部拱圈、两侧竖直边墙和下部铺底三部分组成。其中,上部拱圈可采用圆弧形拱、坦三心圆拱或尖三心圆拱。洞内一侧设有排除洞内积水的排水沟。

直墙式衬砌有以下几种特殊情况。

(1)半衬砌(省去边墙)。注意在拱脚做平台以支撑拱圈,两侧岩壁喷浆敷面以阻止风化

^① 《铁路隧道设计规范》(TB 1003—2016)中已经删除了“整体式衬砌设计”内容,但在实际中仍有应用,故此处保留相关内容。

和少量地下水的渗透。

(2)大拱脚。大拱脚产生于先拱后墙法施工。

(3)降低边墙建筑材料等级或采用花边墙(见图 2-3),如柱式边墙、连拱式边墙。

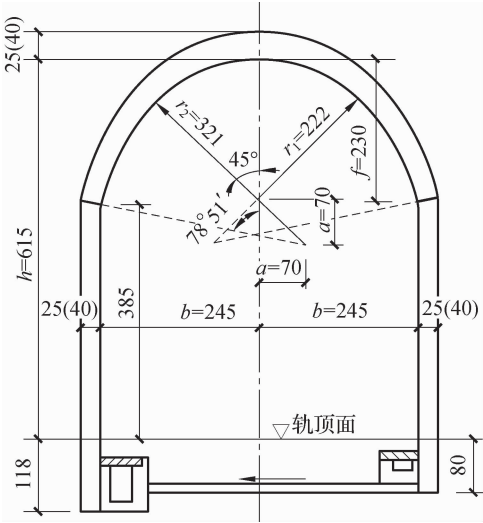


图 2-2 铁路隧道Ⅲ级围岩直墙式衬砌标准图(单位:cm)

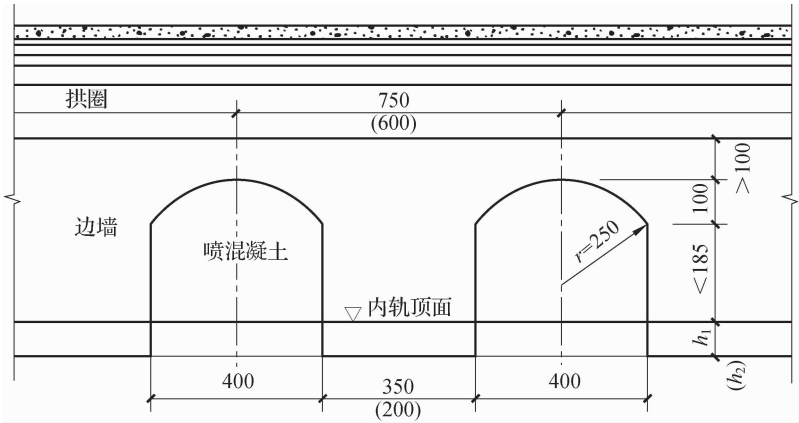


图 2-3 带花边墙隧道纵断面示意图(单位:cm)

2. 曲墙式衬砌

曲墙式衬砌适用于地质条件比较差,岩体松散破碎,强度不高,又有地下水,侧向水平压力也相当大的Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ级围岩。

曲墙式衬砌由顶部拱圈、侧面曲边墙和底部仰拱(或铺底)组成。其中,仰拱的作用是抵御底部围岩压力,防止衬砌沉降,并使衬砌形成一个环状的封闭整体结构以提高衬砌的承载能力。

2.2.2 装配式衬砌

1. 装配式衬砌的优点

(1)一经装配成环,不需要养生时间,即可承受围岩压力。

喷射混凝土的喷射方式分为干喷、湿喷和潮喷。

- (1)干喷。在输送到喷头处与高压水混合。
- (2)潮喷。预加水成潮湿状,再在喷头处与高压水混合。
- (3)湿喷。拌和好混凝土,在喷头处与速凝剂混合后喷出。

喷层的厚度一般为 5~25 cm。

2. 锚杆

1) 锚杆的锚固方式

锚杆的锚固方式有以下两种。

- (1)通过锚杆杆体或杆端锚头的膨胀将锚杆嵌固在围岩中(机械型)。
- (2)利用灌浆将锚杆杆体或杆端端部固定在岩体内(黏结型)。

2) 锚杆的作用

锚杆的作用有支撑、加固(系统锚杆,形成连续压缩带)、组合梁(层状岩体)、悬吊(不稳定岩体)。

3) 锚杆的类型

锚杆的类型按照作用原理可划分为以下几种。

- (1)全长黏结型。全长黏结型锚杆价廉、施作简单,适用于围岩变形量不大的各类地下工程的永久系统支护。
- (2)端头锚固型锚杆。其安装后能立即提供支护抗力,并能对围岩施加不大的预应力,适用于坚硬裂隙岩体中的局部支护和系统支护,当用作永久支护时,须采取灌浆或其他防腐措施。
- (3)摩擦型锚杆。其安装后可立即提供抗力,其最大特点是对围岩施加三向预应力,韧性好,适用于软弱破碎、塑性流变围岩及经受爆破震动的矿山巷道工程。
- (4)预应力型锚杆或锚索。其可对围岩施加较大的预应力,适用于大跨度高边墙隧道的系统支护及加固大的不稳定块体的局部支护。

2.2.4 复合式衬砌

1. 复合式衬砌的构造

复合式衬砌指的是分内、外两层先后施作的隧道衬砌。

复合式衬砌的常用组合是锚喷支护+模筑混凝土衬砌,同时可在外衬与内衬之间敷设一层防水层,以便达到防水的目的。

具体做法是先在洞壁表面上喷射一层混凝土,有时也同时施加锚杆,待其凝固后形成一个薄层的柔性支护结构允许它有限度地产生变形,甚至少许的裂纹,把围岩因开挖坑道而引起的形变压力全部吸收或吸入绝大部分,并把洞壁的位移逐渐地稳定下来,使外衬与围岩共同组成的初步支护体系处于暂时平衡状态。外衬的厚度多为 5~20 cm。在施工的同时,应定期量测支护变形的相关数据,并将这些数据信息反馈到施工和结构的设计中去,据以确定内衬的最佳施作时间和内衬的适宜厚度。在外衬变形终止或基本稳定后再施作内衬。

内衬除了起到整齐美观的作用外,还承担着诸如围岩的残留变形、竣工后围岩条件改变所产生的荷载。根据铁道科学研究院和隧道工程局共同进行的模型实验和有限元分析的研

究结果,可知复合衬砌的极限承载能力比同等厚度的单层模筑混凝土衬砌可以提高 20%~30%,并且如能调整好内衬的施作时间,还可以改善结构的受力条件。

内、外层衬砌之间的防水层可以用软聚氯乙烯薄膜、聚异丁烯片、聚乙烯片等防水卷材,或喷涂乳化沥青等防水剂。当喷层表面凹凸不平时,须事先以砂浆敷面,做成找平层,使岩壁与防水层密贴。防水层的接缝处一般用热水焊接,或电敏电阻焊接,也可以用适当的溶剂进行溶解焊接,以保证防水的质量。

复合式衬砌最适宜在Ⅱ~Ⅵ级围岩中使用,但遇到下列情况时应慎重对待,必要时应辅以相应的加固措施。

- (1)拱顶以上覆盖厚度小于隧道直径时。
- (2)有明显偏压力时。
- (3)在无自稳能力的未胶结沙砾石地层中时。
- (4)在大膨胀性的地层中时。
- (5)在大涌水的地层中时。
- (6)在严重的冻害地区中时。

2. 复合式衬砌的支护机理

(1)外衬(初期支护)允许大的约束变形,允许出现少量裂缝,吸收变形压力,稳定洞壁,与围岩共同形成支护体系。

(2)内衬(二次衬砌)与外衬围岩共同承受围岩残余变形产生的压力,共同承受外部条件恶化产生的压力,以作为整个结构的安全储备。

初期支护应按主要承载结构设计;二次衬砌在Ⅲ级及以下围岩时按安全储备设计,在Ⅳ级及以上围岩时按承载(后期围岩)结构设计,并均应满足构造要求。

2.3 明洞的构造

2.3.1 明洞概述

明洞是用明挖法修建的山岭隧道部分,是在露天的路堑地面上或是在敞口的基坑内,先修筑结构物,然后再回填覆盖土石,如图 2-5 所示。

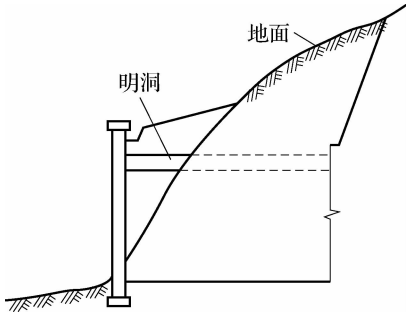


图 2-5 明洞

适于修建明洞的场合主要有以下几种。

- (1)地质差且洞顶覆盖层较薄,用暗挖法难以进洞。
- (2)洞口路堑边坡上受塌方、落石、泥石流等威胁而危及行车安全。
- (3)铁路、公路、河渠必须在线路上方通过,且不宜做立交桥或暗洞。
- (4)减少隧道工程对环境的破坏影响,保护环境和景观,洞口段需延长。

明洞是隧道洞口或线路上起防护作用的重要建筑物。明洞的结构有拱式明洞和棚式明洞两种。

2.3.2 拱式明洞

拱式明洞由拱圈、边墙和仰拱或铺底组成。拱式明洞分为路堑式拱式明洞、偏压直墙式拱式明洞、偏压斜墙式拱式明洞和半路堑单压式拱式明洞。

1. 路堑式拱式明洞

路堑式拱式明洞适用于路堑边坡处于对称或接近对称,边坡岩层基本稳定,仅防边坡有少量坍塌、落石,或用于隧道洞口岩层破碎,覆盖层较薄而难以用暗挖法修建隧道的情况。

在挖出路堑的基面上,先修建与隧道衬砌相似的结构,然后上面回填覆盖土石,夯实并覆盖防水黏土层,层上留有排水的沟槽,以防止地面水的渗入。两侧墙外填以浆砌片石,使其密实。路堑式拱式明洞承受对称荷载,拱、墙均为等截面,边墙为直墙式。路堑式拱式明洞如图 2-6 所示。

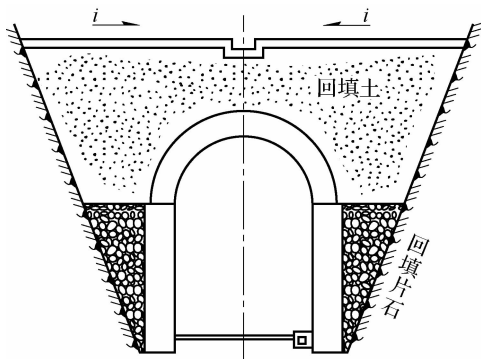


图 2-6 路堑式拱式明洞

2. 偏压直墙式拱式明洞

偏压直墙式拱式明洞适用于两侧边坡高差较大的不对称路堑。其承受不对称荷载,拱圈为等截面,边墙为直墙式,外侧边墙的厚度大于内侧边墙的厚度。

3. 偏压斜墙式拱式明洞

偏压斜墙式拱式明洞适用于地形倾斜,低侧处的路堑外侧有较宽敞的地面供回填土石,以增加明洞抵抗侧向压力的能力。其承受偏压荷载,拱圈为等截面,内侧边墙为等厚直墙式,外侧边墙为不等厚斜墙式。

4. 半路堑单压式拱式明洞

半路堑单压式拱式明洞适用于傍山隧道的洞口或傍山线路上的半路堑地段,如图 2-7

所示。因外侧地形狭小,地面陡峻,无法回填土石以平衡内侧压力。

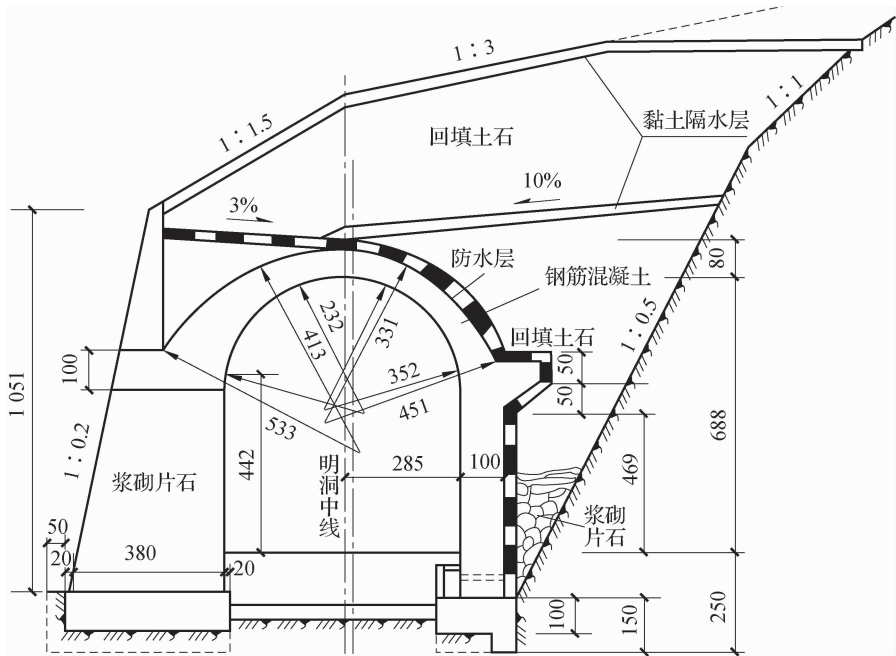


图 2-7 半路堑单压式拱式明洞(单位:cm)

半路堑单压式拱式明洞受单侧的压力,内侧边墙为等厚直墙,外墙为设有耳墙的不等厚斜墙,而且必须把基础放在稳固的基岩上。拱圈可采用等截面或变截面。

当外侧地形低,不能保持回填土的天然稳定坡度,或是按天然稳定坡度则边坡将延伸很远时,可以在结构的外墙顶上接高一段挡墙,用以拦截土石,此种明洞称耳墙式拱式明洞。

当外侧边墙基底地质不好,不足以承受外墙传来的压力而必须把基础放到下方较深的基岩上时,外墙可以延伸直达基岩,形成内、外墙不同,内短外长的结构,称为长腿式拱式明洞,如图 2-8 所示。

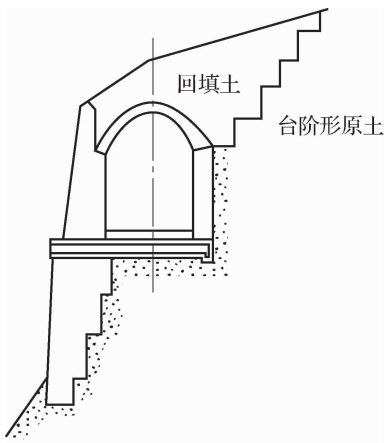


图 2-8 长腿式拱式明洞

明洞顶上的回填土石是为了缓冲落石对衬砌的冲击而设置的,它的厚度应视落石下坠的实际情况通过计算来确定,一般不应小于 1.5 m。在填土面上应留有不小于 1:1.5 的流水坡。填土的上面及拱顶上方都要做一层黏土隔水层,以防水渗入。

如果基底地质较好,外墙可以做成连拱形,以节省圬工。如果明洞外侧覆盖土不厚,还可以掏成侧洞,使露天的光线射进来,外界的新鲜空气流进来,从而改善明洞内的环境条件。

拱式明洞是在露天施工的,不受地下坑道条件的限制,所以可以采用钢筋混凝土做拱圈。

当在隧道洞口有公路或水渠横越而又不宜做立交桥时,为了保证公路的畅通和不致中断灌溉农

田的水道,可以修建带有渡槽的拱式明洞。当路线必须通过有滑坡的地方时,可以配合挡墙、抗滑桩等修建抗滑明洞。

拱式明洞应设置横向贯穿的伸缩缝,其间隔的长短视实际情况而定,一般为 6~20 m。如有侧洞,则在设置伸缩缝时应避开侧洞的位置。

2.3.3 棚式明洞

当山坡的塌方、落石数量较少,山体的侧向压力不大,或因受地质、地形限制,难以修建拱式明洞时,可以修建棚式明洞,简称“棚洞”。

棚洞常见的结构形式有盖板式、刚架式和悬臂式三种。

1. 盖板式棚洞

盖板式棚洞是由内墙、外墙及钢筋混凝土盖板组成的简支结构,如图 2-9 所示。顶上不是拱圈而是平的盖板,其上回填土石,以保护盖板免受山体落石的冲击。

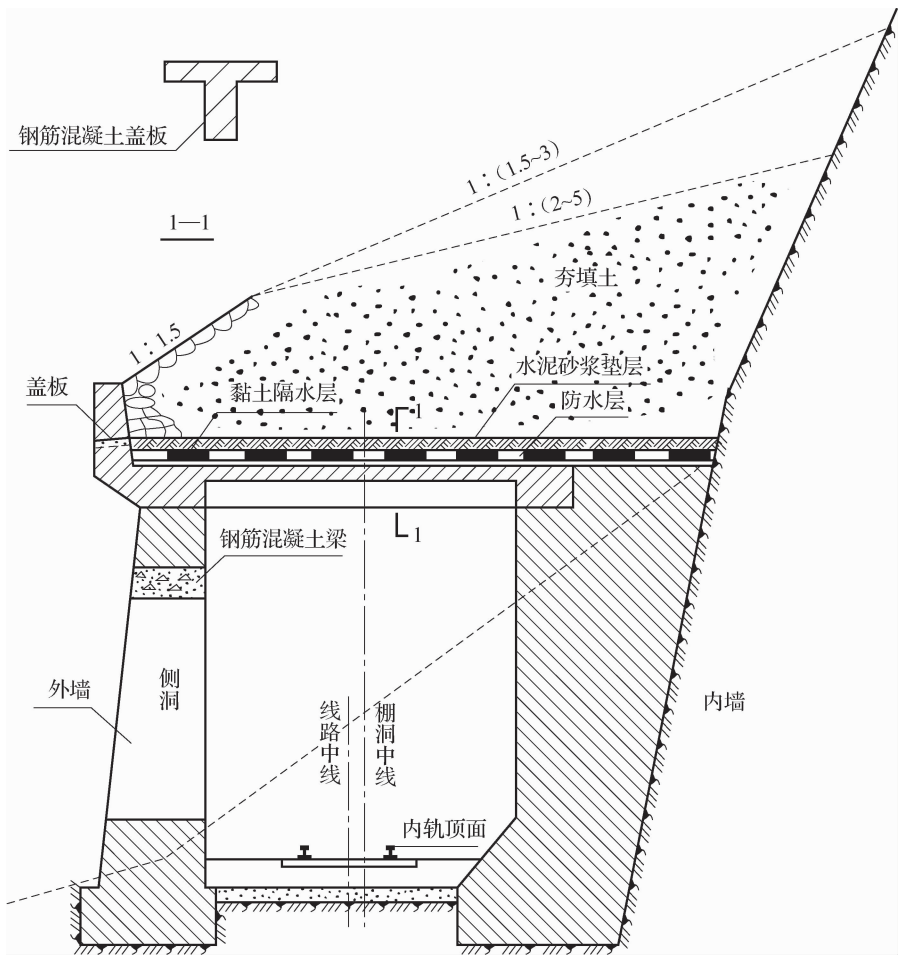


图 2-9 盖板式棚洞

内墙一般为重力式墩台结构,厚度较大,用以抵抗山体的侧向压力,因此它的基础必须

放在基岩或稳固的地基上。当侧坡较陡,地面水不大,坡面稳定而坚实,采用重力式内墙开挖量太大时,也可以采用钢筋混凝土锚杆挡墙的形式。

当外墙不承受侧向压力,仅承受梁和盖板的竖向荷载时,其要求的地基承载力较小,此时外墙可以较薄,或可以根据落石情况的严重与否以及地质情况,采用立柱式(梁式)或连拱墙式结构。当外侧基岩较浅,地基基础承载力较大时,可采用立柱式。

2. 刚架式棚洞

当地形狭窄,山坡陡峻,基岩埋置较深而上部地基稳定性差时,可将刚架式或长腿式外墙置于稳固的地基上,此时称明洞为刚架式棚洞,如图 2-10 所示。

刚架式棚洞由外侧刚架、内侧重力式墩台结构、横顶梁、底横撑及钢筋混凝土盖板组成。盖板上应做防水层及回填土石处理。

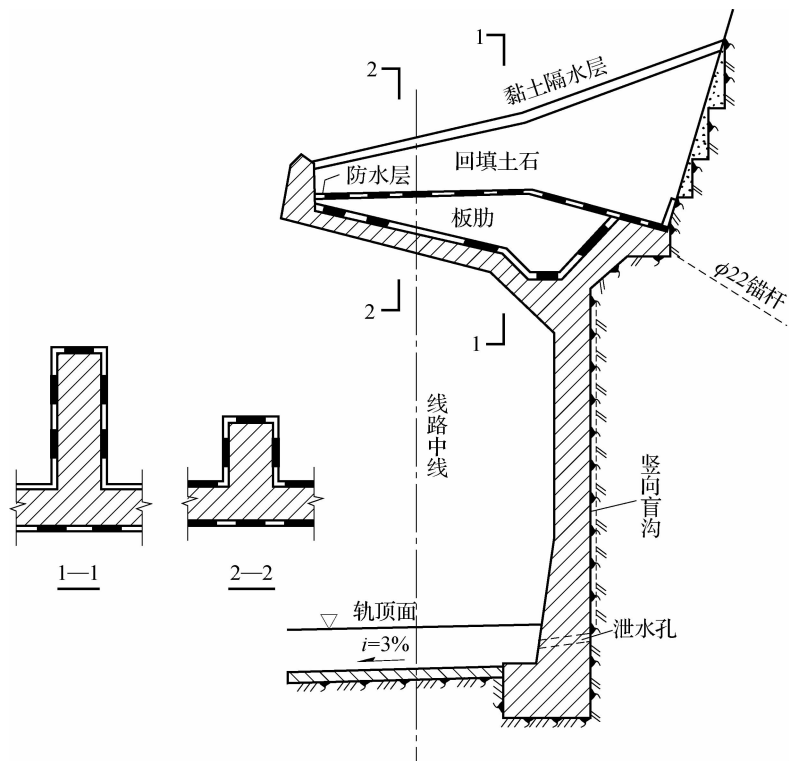


图 2-10 刚架式棚洞

3. 悬臂式棚洞

悬臂式棚洞适用于稳固而陡峻的山坡,外侧地形难以满足一般棚洞的地基要求,落石不太严重的情况。

悬臂式棚洞的内墙为重力式,上端接筑悬臂式横梁,其上铺以盖板,在盖板的内端设平衡重来维持结构受外荷载作用下的稳定性。同时为了保证棚洞的稳定性,要求悬臂必须伸入稳定的基岩内。因为对内墙的稳定性要求很严,故施工时必须十分谨慎;又因其是不对称结构,所以选用时应十分慎重。

明洞虽然是在敞开的地面上修建的,但由于它的圬工量较大,上覆回填也较费工,因此

其造价比暗挖的隧道要高些。过去,由于力求缩短隧道洞身,在施工后,发现洞口保证不了安全,于是只得一再地接长明洞,原本想节省投资,结果反而增加了费用,还给洞口施工带来了干扰。所以,在决定洞口位置时应体现“早进晚出”的精神,不宜以事后增修明洞作为补救的办法,必须有计划、有比较地全面考虑,慎重选用。

2.4 隧道洞门结构的构造

2.4.1 隧道洞门结构概述

1. 洞门的概念

洞门(隧道门的简称,通常也泛指隧道门及明洞门)是隧道洞口用圬工砌筑用以保护洞口、排放流水并加以建筑装饰的支挡结构物。它联系衬砌和路堑,是整个隧道结构的主要组成部分,也是隧道进出口的标志。

2. 洞门的作用

- (1)减少洞口土石方的开挖量,起到挡土墙的作用。
- (2)稳定边仰坡,减小引线路堑的边坡高度,缩小正面仰坡的坡面长度,从而保证边仰坡的稳定。
- (3)引离地面流水,把流水引入侧沟排走,保证了洞口的正常干燥状态。
- (4)装饰洞口,修建洞门也可以算是一种装饰。特别是对城市附近、风景区及旅游区内的隧道,更应配合当地的环境,给予艺术处理和美化。

3. 洞门结构的设计要求

- (1)洞门结构的形式应实用、经济、美观、醒目。
- (2)洞门墙应根据实际情况设置伸缩缝、沉降缝和汇水孔。
- (3)洞门墙的厚度可按计算或结合其他已建成的隧道洞门用工程类比法确定。
- (4)洞门墙的基础必须埋置在稳定的地基上,应视地形及地质条件,埋置足够的深度,以保证洞门的稳定性。

4. 洞门的种类

根据洞口地形、地质及衬砌类型等不同情况和要求,洞门可分为以下两种。

(1)隧道门。隧道门是修建在不设明洞的隧道洞口的支挡结构物,包括环框式洞门、端墙式洞门、翼墙式洞门、柱式洞门、台阶式洞门、斜洞门和耳墙式洞门等。

(2)明洞门。明洞门主要配合明洞结构类型设计,明洞有拱式明洞和棚洞之分,相应的明洞门也分为拱式明洞门和棚式明洞门。棚式明洞门一般不单独设置,通常在棚洞洞口端的横向顶梁上加设端墙,以拦截落石,避免其坠入线路影响行车安全,故一般所说的明洞门多指拱式明洞门。

2.4.2 洞门的类型

1. 环框式洞门

环框式洞门,即只镶饰隧道衬砌两端部分,如图 2-11 所示。

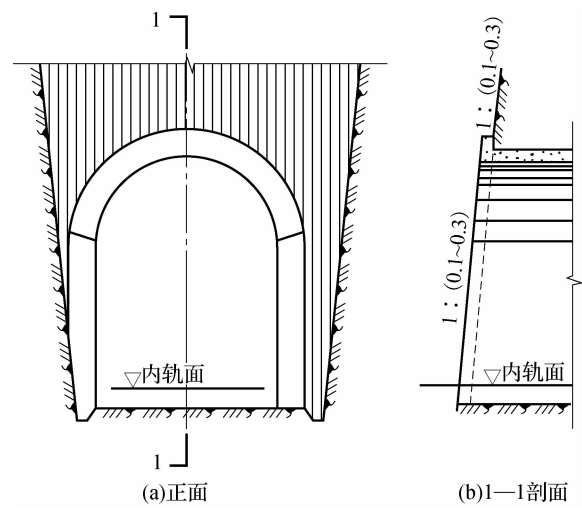


图 2-11 环框式洞门

当隧道洞口仰坡极为稳固、岩层坚硬、节理不发育、不易风化,且地形陡峻而又无排水要求时,可以将洞口段的衬砌加厚,形成洞口环框。洞口环框主要起加固洞口衬砌和减少洞口雨后滴水的侵蚀作用,并对洞口做出简单的装饰,是不承载的简单洞口环框。

2. 端墙式洞门

端墙式洞门俗称一字式洞门,如图 2-12 所示。

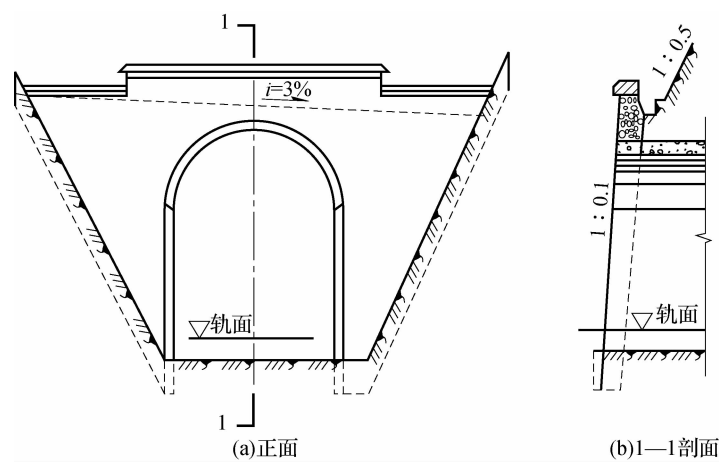


图 2-12 端墙式洞门

端墙式洞门适用于地形开阔、岩层较为坚硬完整的情况。它由端墙和洞门顶的排水沟组成。其中,端墙可以抵抗山体的纵向推力,支持洞口正面上的仰坡;排水沟可将从仰坡流

下来的地面水汇集排走。

端墙式洞门具有结构简单、工程量小、施工简便的优点,在岩层较好时使用最为经济,也是最常见的一种洞门。若洞门顶的排水条件稍差,且横向山坡一侧较低时,宜开挖沟槽横向引排。

端墙式洞门的构造要求有以下几点。

(1)端墙的高度应保证洞身衬砌的上方留有 1 m 以上的回填层,以减缓山坡滚石对衬砌的冲击;洞顶水沟深度应不小于 0.4 m;为保证仰坡滚石不致跳跃超过洞门落到线路上,端墙应适当上延形成挡渣防护墙,其高度从仰坡坡脚算起应不小于 0.5 m,水平方向不宜小于 1.5 m;端墙基础应设置在稳固的地基上,其深度视地质条件、冻害程度而定,一般应在 0.6~1.0 m。按照上述要求,端墙的高度约为 11.0 m。

(2)端墙的厚度应按挡土墙的方法计算,但一般不应小于以下数值:浆砌片石 0.4 m,片石混凝土 0.35 m,混凝土、块石 0.3 m,钢筋混凝土 0.2 m。端墙一般是采用等厚的直墙,墙身微向后倾斜,斜度约为 1:0.1。

(3)端墙的宽度应与路堑横断面相适应。下底的宽度应为路堑底宽加上两侧水沟及马道的宽度。上底则根据边坡坡度按高度比例增宽。端墙两侧还应嵌入边坡以内约 30 cm 以增加洞门的稳定。

3. 柱式洞门

柱式洞门是从端墙式洞门发展而来的,它实际上也是一种端墙形式的洞门,如图 2-13 所示。

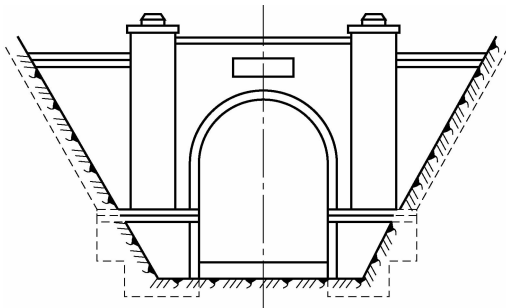


图 2-13 柱式洞门

柱式洞门适用于洞口地形较陡、地质条件较差、岩层有较大侧压力、仰坡有下滑可能性的地段;或洞口处地形狭窄,受地形或地质条件限制,设置翼墙无良好基础或不能设置翼墙的地段,此时可以在端墙中部设置两个断面较大的柱墩,以增加端墙的稳定性的。

由于柱式洞门的墙面有凸出的线条,较为雄伟壮观,因此在城市、风景区或有建筑艺术装饰要求的地区适宜采用,特别是对于较长较大的隧道,采用柱式洞门比较壮观。

4. 翼墙式洞门与耳墙式洞门

1) 翼墙式洞门

在端墙式洞门以外增加单侧或双侧的翼墙(挡墙),形成翼墙式洞门,俗称“八字式洞门”,如图 2-14 所示。其适用于地质条件较差,山体纵向推力较大的地方。

翼墙式洞门由翼墙和端墙组成。其中,翼墙的正面起到抵抗山体纵向推力,增加洞门的

抗滑和抗倾覆能力的作用；两侧面起到挡土墙的作用，用来保护路堑边坡。

翼墙式洞门的正面端墙一般采用等厚的直墙，微向后方倾斜，斜度为 1 : 10。翼墙前面与端墙垂直，顶面斜度与仰坡坡度一致（顶面一般与仰坡的延长面一致），墙顶上设流水凹槽，将洞顶上的水从端墙后面沿预留的泄水孔引出墙外，俗称“龙嘴”或“吊沟”，然后沿凹槽流至路堑边沟内。翼墙的基础应设在稳固的地基上，其埋深应与端墙基础相同。

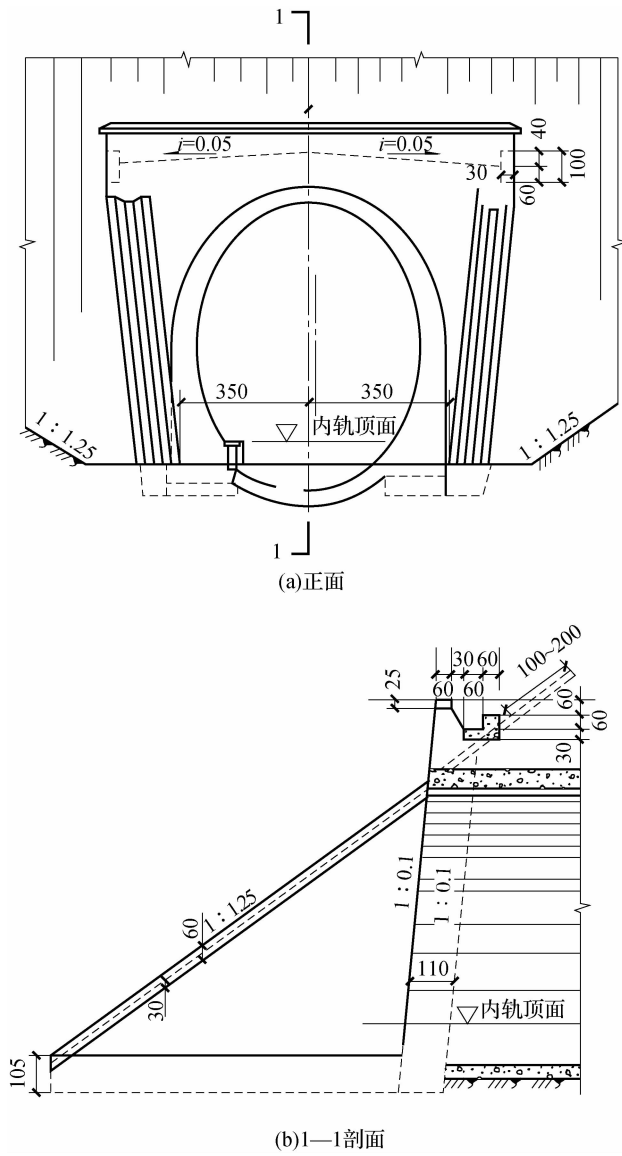


图 2-14 翼墙式洞门

2) 耳墙式洞门

耳墙式洞门即带耳墙的翼墙式洞门。将翼墙式洞门的端墙两侧各接出一个耳墙至边坡内，呈带耳墙的结构，形成耳墙式洞门，如图 2-15 所示。这种洞门形式对于排泄仰坡、边坡地表汇水和阻挡洞顶风化剥落体效果良好，可大大减少对坡面的冲刷，洞口显得宽敞，结构

式样比较美观,而且对于边坡、仰坡坡度不一致的洞口,设计时也比较好处理。

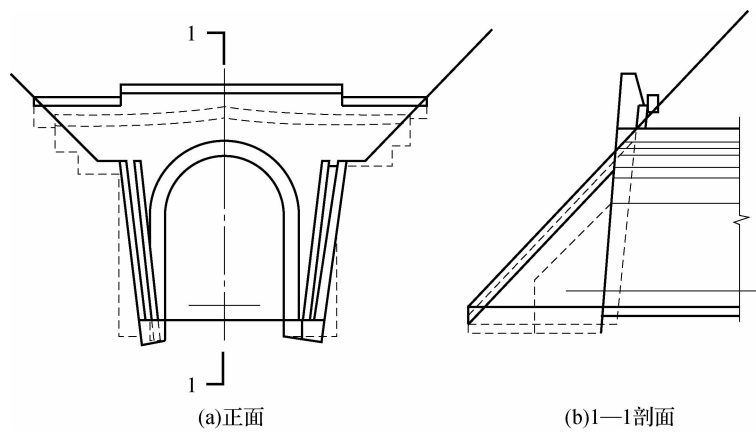


图 2-15 耳墙式洞门

耳墙式洞门因增加了耳墙,虽圬工量略有增加,但可减少铺砌范围,因此在总的造价上与无耳墙的翼墙式洞门相比,增加费用有限。由于这种洞门形式保持了翼墙式洞门的优点,克服了其不足之处,采用它可大大减少运营期间的养护工程量,因此应用较多,被认为是一种适用、经济、美观的结构形式。

5. 其他形式的隧道门

1) 台阶式洞门

当洞门处于傍山侧坡地区,地面横坡较陡,洞门一侧边坡较高时,为了减小仰坡高度及外露坡长,可以将端墙一侧顶部改为逐步升级的台阶形式,以适应地形的特点,减少仰坡土石开挖量,此种洞门称为台阶式洞门,如图 2-16 所示。台阶式洞门一般会配合偏压隧道衬砌使用,故也称为偏压隧道门。

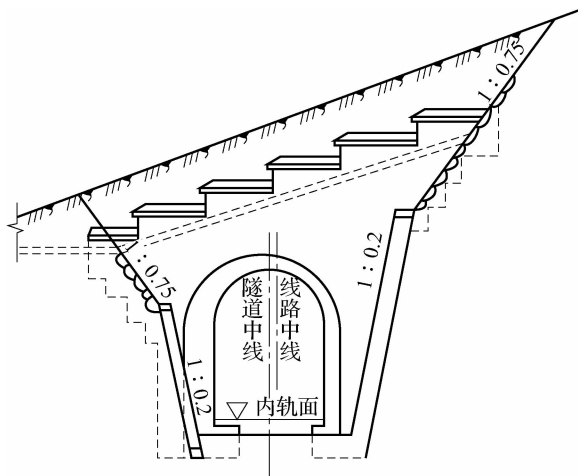


图 2-16 台阶式洞门

在靠山侧通常需设置挡墙,以降低边坡的开挖高度,并压缩端墙的宽度。低山坡一侧如地质较差、地面较高,也可采用矮挡墙。选用台阶式洞门时,通常需要根据洞口的地形地质

条件,与采用明洞或斜洞门做技术经济比较。

2)斜交式洞门

当线路方向与地形等高线斜交时,可采用平行于地形等高线方向与线路成斜交的洞门,此种洞门称为斜交式洞门,如图 2-17 所示。

斜交式洞门一般分端墙式和翼墙式两种,个别地方因受地形限制也可采用柱式斜洞门。在松软地层中不宜采用斜交式洞门。斜交式洞门与线路中线的交角不应小于 45° ,一般斜交式洞门与衬砌斜口段是整体砌筑的。由于斜交式洞门与线路中线斜交,使得洞口环节衬砌的跨度加大,衬砌斜口段的受力情况变复杂,施工也不方便,因此,只有在十分必要的情况下才会采用斜交式洞门。

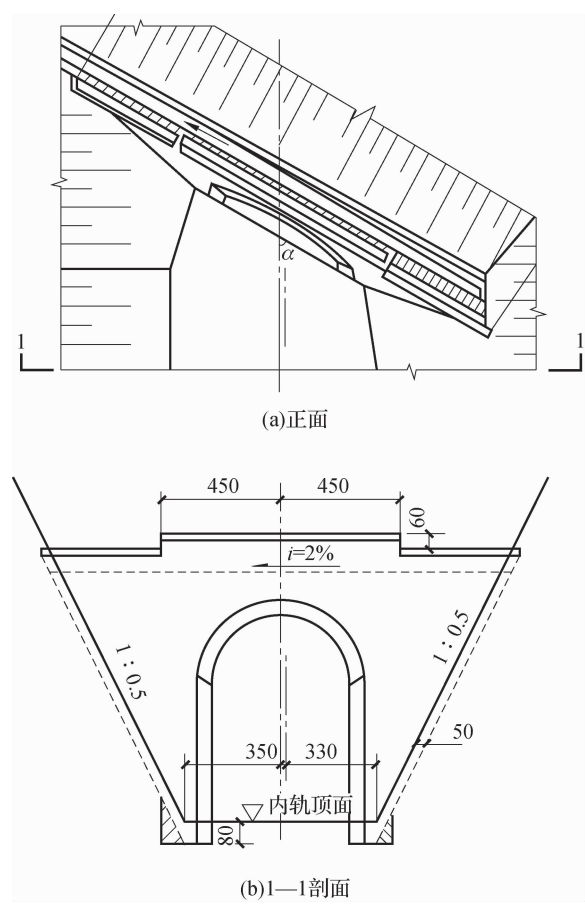


图 2-17 斜交式洞门(单位:cm)

6. 拱式明洞门

拱式明洞门可分为路堑式和半路堑式两类。路堑式明洞门有端墙式(常用柱式)和翼墙式两种,与一般隧道门的形式相似,如图 2-18 所示。

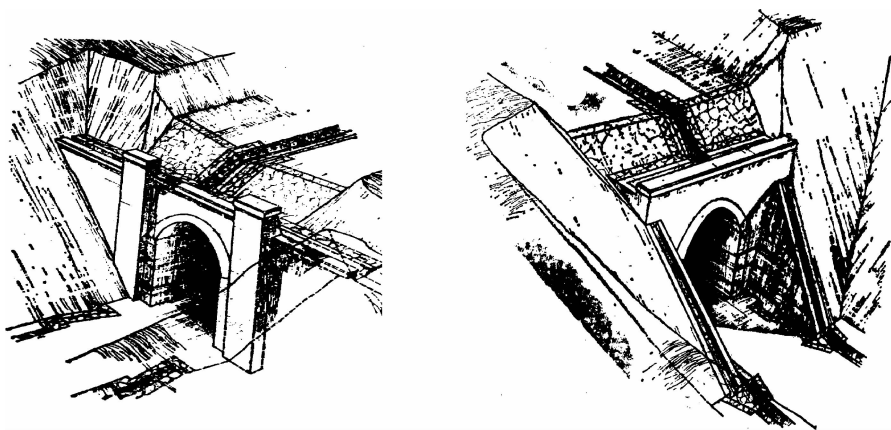


图 2-18 路堑式拱式明洞门

半路堑式明洞门多用于傍山线路,其山侧与原地层相接,为了适应傍山、横向地面坡陡的地形,一般多以台阶形式加高端墙,并在山侧设置挡墙支挡边坡,降低开挖高度。对外侧有覆盖填土的偏压明洞,为了支挡填土,设置了较低的翼墙,并将洞门顶水沟的水经由翼墙顶引排,如图 2-19 所示。

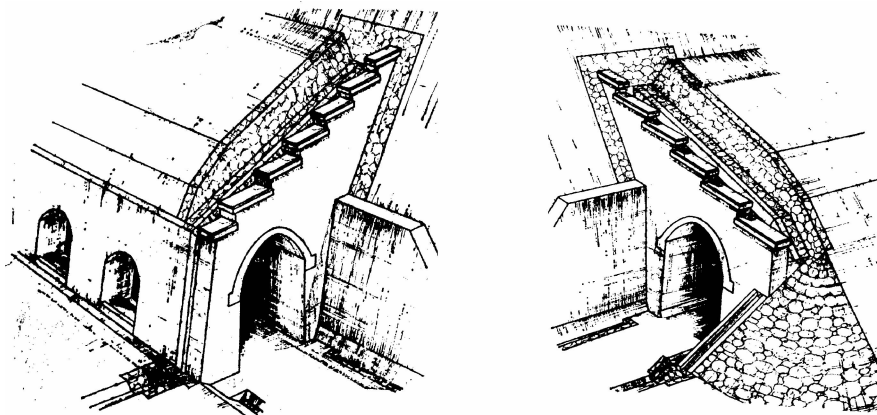


图 2-19 半路堑式拱式明洞门

7. 突出式洞门

在工程实践中,人们逐渐认识到“洞门是防护承载结构”观念的局限性和不合理性,在实践中逐渐形成了“无洞门”的洞口观念,即不开挖既有山体边坡和周边植被,直接进洞,必要时将洞口结构适当向洞外延长。采用这种处理方法,基本上不需要设置洞门,即使设置了洞门也是装饰性的,是不具备承载功能的。在这种情况下,对“无洞门”的洞口功能可以概括如下。

(1)防护功能。防护洞口上方的落石以及在严寒地区防护洞口积雪等。

(2)安全功能。安全功能可保证车辆行驶的安全。公路隧道洞口应具有缓和洞口内、外光线差异,降低眩晕感,确保眼睛舒适感和视觉安全性的安全作用。

(3)景观功能。景观功能可保证与洞口周边的景观相协调,将洞口作为一个与周边环境协调的“景点”建筑,缓和高速进入洞内暗部时心理的紧张感。

从上述功能可以看出,洞口的承载功能被削弱了,更加强调的是其防护、安全和景观方面的功能。

为了全面满足上述功能的要求,突出式洞口将成为主流形式而代替传统的路堑式洞口。突出式洞口为景观设计提供了极大的设计空间和自由度,这是路堑式洞口无法比拟的。突出式洞门是采用与隧道主体相同的断面向前突出、使用填土防止滑坡所采用的结构。突出式洞门根据其外形又可分为削竹形式和喇叭口形式。

2.5 隧道附属建筑物

为了使隧道能够正常使用,保证车辆的安全通行,除了洞门、明洞和洞身衬砌等主体建筑物以外,还要设置一些附属建筑物来配合。其中包括通风建筑物、避车洞、防排水建筑物、电力及通信信号的安放设备等。

2.5.1 通风建筑物

通风建筑物将有害气体、热量、潮湿空气等排出洞外,把洞外的新鲜空气引进洞内,使洞内空气达到无害的程度,使列车司乘人员和洞内维修人员能舒适而高效地工作。

要达到现行《铁路隧道设计规范》规定的通风标准,除了要提高列车的运行速度、铺设整体道床、给避车洞安装防烟门和为隧道内工作人员配备防毒口罩外,采取通风措施是最有效的一种方法。

通风可以分为借助自然条件的自然通风和依靠人为条件的机械通风两种方式。

自然通风是利用洞内的天然风流和列车运行所引起的活塞风来达到通风的目的。机械通风则是在自然通风不能满足要求时,通过设置一系列的通风机械送入或吸出空气来达到通风的目的。

机械通风的方式可分为纵向式通风、全横向式通风和半横向式通风。

1. 纵向式通风

在通风机的作用下,风流沿着隧道轴线方向流动的称为纵向式通风。它又有以下不同形式。

1) 洞口风道式通风

洞口风道式通风是把通风机设置在隧道洞口处,将通风道连通至洞内。当列车车尾一出洞口,立即开动通风机,把已被活塞风挤到出洞口一段内的污浊空气排出洞外,同时低洞口外的新鲜空气随着风流被带入隧道,这样就完成了一次通风作业。洞口风道式通风简图如图 2-20 所示。

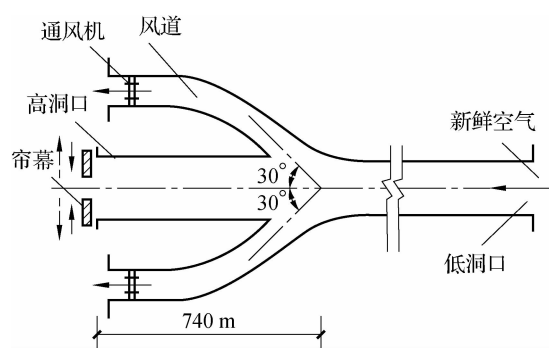


图 2-20 洞口风道式通风简图

2) 喷嘴式通风

喷嘴式通风是在隧道洞口处的衬砌上方建造一个汇集新鲜空气的空气室，室内尽端在衬砌周边上做成环形喷嘴通向洞内。当洞外新鲜空气在通风机的作用下被送到空气室后，当空气积聚到一定压力时，便从衬砌周边的环形喷嘴以极高的速度和极小的交角喷进隧道。它的缺点是喷嘴的结构复杂、施工工艺要求高、维修不方便，并且有很大一部分能量损失在喷嘴的摩擦阻力上，因而降低了通风效果。喷嘴式通风简图如图 2-21 所示。

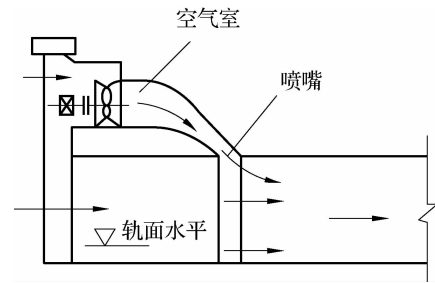


图 2-21 喷嘴式通风简图

3) 竖井(斜井)式通风

当长隧道纵剖面为人字坡时，污浊空气常积聚在坡顶，造成通风效果不好。若在隧道施工中设置竖井或斜井作为辅助坑道，则可以利用这些辅助坑道作为通风道，把通风机置于竖井或斜井处，借助通风机和竖井的换气作用吸出污浊空气(或引入新鲜空气)。竖井式通风简图如图 2-22 所示。

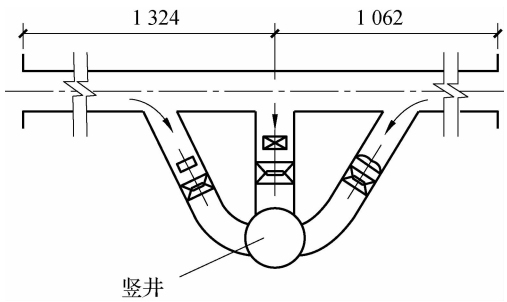


图 2-22 竖井式通风简图(单位:cm)

4)射流式通风

射流式通风是在隧道内安设射流式通风机,通过升压进行通风的方式。射流式通风机的安设可采用洞口堆放式、洞内壁龛式和拱部吊装式。通常根据需要,在隧道洞口或沿隧道纵向以适当的间隔安设数组,每组为一至数个射流式通风机。射流式通风机具有体积小、风量大的特点,其喷射风速能达到 25~30 m/s。射流式通风简图如图 2-23 所示。

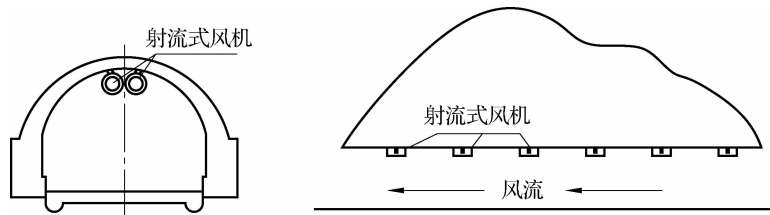


图 2-23 射流式通风简图

2. 全横向式通风

在通风机的作用下,风流的方向与隧道轴线方向正交的称为横向式通风。横向式通风的做法是隔出隧道的部分面积作为沿洞身轴线的通风渠(包括压入风渠和吸出风渠),并根据计算确定风量和风压,选择合适的通风机。

通风机送入的新鲜空气首先被送入压入风渠,并沿着通风渠流到隧道的全长范围内。压入风渠通过系列出风口把新鲜空气在均匀的间隔上吹到隧道中去,而隧道内的污浊空气则从吸出风渠的系列进风口被吸出洞外。

横向式通风系统能将新鲜空气沿隧道全长范围内均匀地吹入,而污浊气体无须沿隧道全长范围流过,就地直接被进风口吸出,所以通风效果较好,但它占用了隧道的净空面积,结构上较烦琐。

3. 半横向式通风

半横向式通风系统的工作原理如图 2-24 所示,这种通风系统是在隧道的顶部设置进风管,并在进风管的下部,沿隧道的长度方向每隔一定距离开一个通风口,气流沿通风口流入隧道,然后隧道内的空气在新鲜气流的推动下,沿隧道的纵向排出洞外。半横向式通风的效果比纵向式通风好,但没有全横向式通风的能力强。

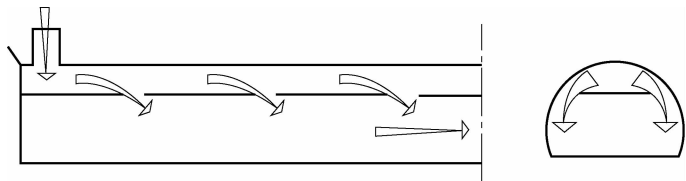


图 2-24 半横向式通风系统的工作原理

对于公路隧道,通风设计是隧道总体设计的重要环节之一。隧道通风所需的新鲜空气的风量和风压必须经过计算确定,即进行通风设计。设计时需要考虑的问题有以下几个。

(1)空气中有毒物质的容许浓度。

- (2)需风量的计算方法。
- (3)判断自然通风的能力。
- (4)机械通风方式的讨论。
- (5)通风设备的选择以及经济性评价等。

2.5.2 避车洞

在隧道两侧边墙上交错均匀修建的用于人员躲避及放置车辆料具的洞室称为避车洞。

1. 避车洞的类型

避车洞根据其断面尺寸的大小分为大避车洞和小避车洞。

1)大避车洞

大避车洞的净空尺寸为宽 4 m,凹入边墙深 2.5 m,中心高 2.8 m,如图 2-25 所示。在碎石道床的隧道内,每侧每隔 300 m 设置一个大避车洞。在混凝土宽枕道床或整体道床的隧道内,每侧每隔 420 m 设置一个大避车洞。

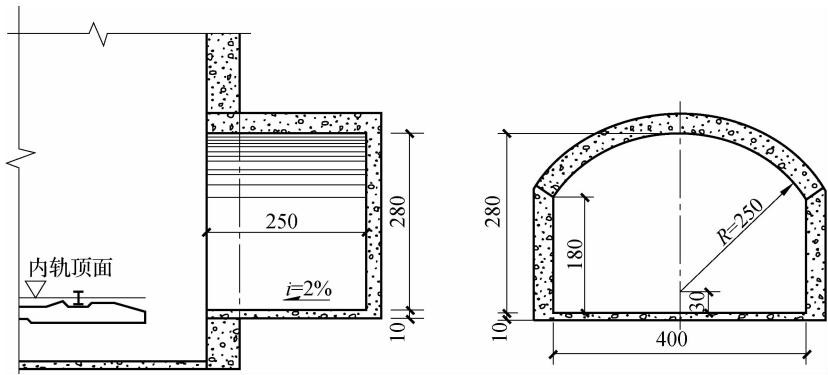


图 2-25 大避车洞(单位:cm)

2)小避车洞

小避车洞的净空尺寸为宽 2 m,凹入边墙深 1 m,中心高 2.2 m。无论在碎石道床或整体道床的隧道内,单线每隔 60 m 设一个小避车洞,双线每隔 30 m 设一个小避车洞。

2. 避车洞的建筑要求

- (1)在修隧道衬砌的同时修避车洞,以保证结构连续,修筑时应避开衬砌的伸缩缝、沉降缝、工作缝、不同衬砌类型或不同加宽断面变化的衔接处。
- (2)避车洞的底面应与道床或侧水沟的盖板面等高齐平,以保证维修人员及小车等可以平顺进入。
- (3)为使避车洞的位置明显,便于人员在光线暗淡的隧道内寻找,并迅速奔向最近的避车洞,且不必跨越线路,应在避车洞内以及周边用石灰浆刷成白色,并在两侧距离为 10 m 处的边墙上各绘制一个白色的指向箭头,在运营期间应保证这些标志的鲜明醒目,如图 2-26 所示。

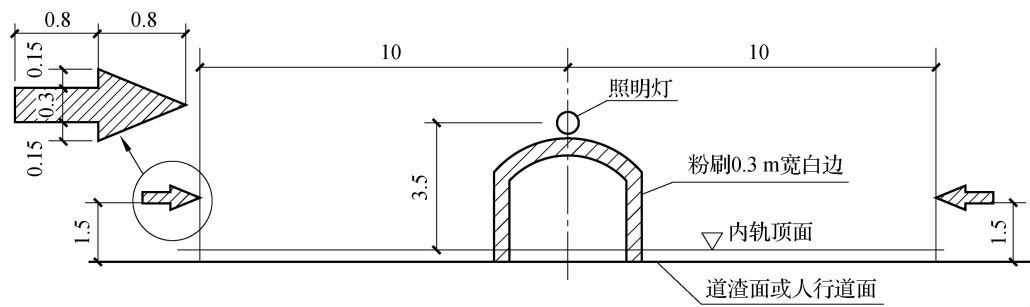


图 2-26 避车洞周边示意图(单位:m)

2.5.3 防排水建筑物

1. 隧道防排水设计标准

隧道防排水设计标准有以下几点。

- (1)衬砌不滴水,安装设备的孔眼不渗水。
- (2)道床不积水。
- (3)电力牵引的隧道拱部基本不渗水。
- (4)对有冻害地段的隧道,除拱部和边墙不渗水外,衬砌背后不得积水。
- (5)隧道防排水应根据“防、排、截、堵结合,因地制宜,综合治理,保护环境”的原则,采取切实可行的设计、施工措施,达到防水可靠、排水畅通、经济合理的目的。

①“防”。要求隧道衬砌结构具有一定的防水能力,能防止地下水渗入。

a. 防止地表水的下渗。当隧道地表的沟谷、坑洼积水对隧道有影响时,宜采取疏导、勾补、铺砌和填平等措施,对废弃的坑穴、钻孔等应填实封闭,防止地表水下渗。

b. 当隧道附近的水库、池沼、溪流、井泉的水有可能渗入隧道,影响农田灌溉及生活用水时,应采取措施处理。

c. 混凝土衬砌的抗渗等级不得低于 P6,若有必要可采用防水混凝土(不小于 P8)。

d. 施工缝、变形缝应采取可靠的堵水措施。

e. 对围岩破碎、含水、易坍塌的地段,宜采取注浆加固围岩和防水的措施。

f. 在初期支护与二次衬砌之间,宜设置防水板或设系统盲(管)沟。当隧道底部有涌水时,应采用封闭式防水板。

g. 当有侵蚀性地下水时,应针对侵蚀类型,采取抗侵蚀性混凝土以及压注抗侵蚀浆液,敷设防水、防蚀层等措施。

h. 对最冷月平均气温低于-15℃的地区和高海拔地区的地下水的处理应以堵为主。

②“排”。隧道应有排水设施并充分利用,以减小渗水压力和渗水量,但必须注意大量排水后引起的后果,如围岩颗粒流失、围岩稳定性降低或造成当地农田灌溉和生活用水困难等,对此应事先进行妥善处理。

a. 利用盲沟、泄水管、渡槽等将衬砌背后的地下水排入隧道内,再经由洞内水沟排走,以免造成隧道病害。

- b. 隧道内纵向应设排水沟, 横向应设排水坡。
- c. 遇围岩地下水出露处所, 宜在衬砌背后设竖向盲沟或排水管(槽)、集水钻孔等, 对水予以引排, 对颗粒易流失的围岩, 不宜采用集中疏导排水。
- d. 根据工程地质和水文地质条件, 应在衬砌外设环向盲沟、纵向盲沟和隧底排水盲沟, 组成完整的排水系统, 保证道床不积水。
- e. 当地下水发育、含水层明显、有长期补给来源、洞内水量较大时, 可利用辅助坑道或设置泄水洞等作为截、排水设施。

③“截”。隧道顶部如有地表水易于渗漏处所或有坑洼积水, 应设置截、排水沟和采取消除积水的措施。“截”是指截断地表水和地下水流入隧道的通路。为了防止地表水渗入地层内, 主要采取以下措施。

- a. 在洞口仰坡外缘 5 m 以外设置天沟, 并加以铺砌。当岩石外露、地面坡度较陡时可不设天沟。仰坡上可种植草皮、喷抹灰浆或加以铺砌。
- b. 对洞顶天然沟槽加以整治, 使山洪宣泄畅通。
- c. 对洞顶地表的陷穴和深坑加以回填, 对裂缝进行堵塞。在处理隧道地表水时要有全局观点, 不应妨碍当地农田水利规划, 做到因地制宜、一改多利、各方满意。
- d. 在地表水上游设截水导流沟, 地下水上游设泄水洞或洞外井点降水。

④“堵”。当隧道施工过程中发生渗漏水时, 可采用注浆、喷涂等方法堵住; 运营后渗漏水地段也可采用注浆、喷涂或用嵌填材料、防水抹面等方法堵水。

“堵”即堵住地下水, 防止其从衬砌背后渗入隧道内。主要采取以下措施。

a. 喷射混凝土和模筑混凝土衬砌堵水。当围岩有大面积裂隙渗水, 且水量、压力较小时, 可结合初期支护采用喷射混凝土的方法堵水。但应注意, 此时需加大速凝剂的用量, 进行连续喷射, 且在主裂隙处不喷射混凝土, 使水流能集中从主裂隙处流入盲沟, 通过盲沟排出。

由于普通混凝土的抗渗性较差, 因此堵水时应采用防水模筑混凝土, 并注意以下两点。

- 防水混凝土的抗渗等级不得小于 P8, 抗压强度应满足设计要求, 水泥用量不得少于 320 kg/m^3 , 当掺用活性粉细料时, 不得少于 280 kg/m^3 。
- 防水模筑混凝土衬砌施工必须采用机械振捣。施工缝、沉降缝及伸缩缝则可以采用中埋式塑料或橡胶止水带, 或采用背贴塑料止水带止水。

b. 防水层。防水层的种类很多, 大致可归纳为两类: 一类为粘贴式防水层, 如用沥青将油毡(或麻片)粘贴在衬砌的外表面(适用于明挖修建的地下工程), 复合式衬砌在初期支护与二次模筑衬砌之间可粘贴软聚氯乙烯薄膜、聚异丁烯片、聚乙烯片等防水卷材; 另一类为喷涂式防水层。

c. 压浆。向衬砌背后压注水泥砂浆, 用以充填衬砌与围岩之间的空隙, 以堵住地下水的通路, 并使衬砌与围岩形成整体, 改善衬砌的受力条件。采用压浆分段堵水, 使地下水集中在一处或几处后再引入隧道内排出, 此法可收到良好的防水效果。

2. 隧道内外设置的排水建筑物

1) 排水沟

排水沟的断面大小按排水量而定, 一般底宽不应小于 40 cm, 深度不应小于 35 cm。沟

底的纵向坡度宜与线路坡度一致,若不一致,则沟底纵坡也不应小于1‰,道床底面的横坡不应小于2‰。水沟上面应有预制的钢筋混凝土盖板,平时作为人行道使用。盖板顶面应与避车洞底面平齐。排水沟在一定长度上应设检查井,以便随时清理残渣。

排水沟有以下两种方式。

(1)侧式水沟。根据水沟是设在线路的两侧或一侧,侧式水沟分为双侧水沟和单侧水沟。

①双侧水沟。隔一定距离应设一条横向联络沟,以平衡不均匀的水流量。

②单侧水沟。设在来水的一侧,在曲线内侧。

(2)中心式水沟。当隧道采用整体道床时,水沟设在线路中线的下方;当为双线隧道时,水沟设在两线之间。中心式水沟是用混凝土砌筑的,维修工作量较小,但一旦需要清理或维修,则必须在行车间隔的时间内进行,因此维修不方便。

在严寒地区可修筑浅埋保温水沟,即将水沟沟身加深,用轻质混凝土做成上、下两层,各自设有钢筋混凝土盖板,上层用保温材料密实填充,厚度不小于70 cm,可保证流水不冻,如图 2-27 所示。

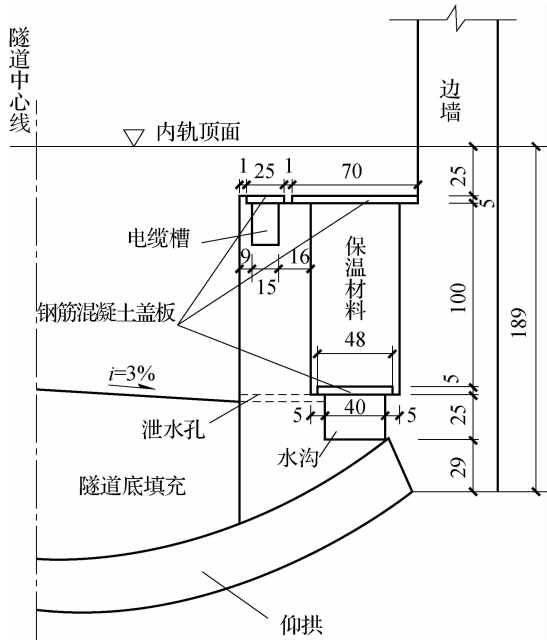


图 2-27 侧式浅埋保温水沟(单位:cm)

当浅埋保温水沟不足以防止冻害时,可设置中心深埋渗水沟,即利用地温本身的作用,达到保温防冻害的目的,如图 2-28 所示。当隧道内冻结深度较深,用明挖法会影响边墙稳定时,可采用暗挖法修筑泄水洞。

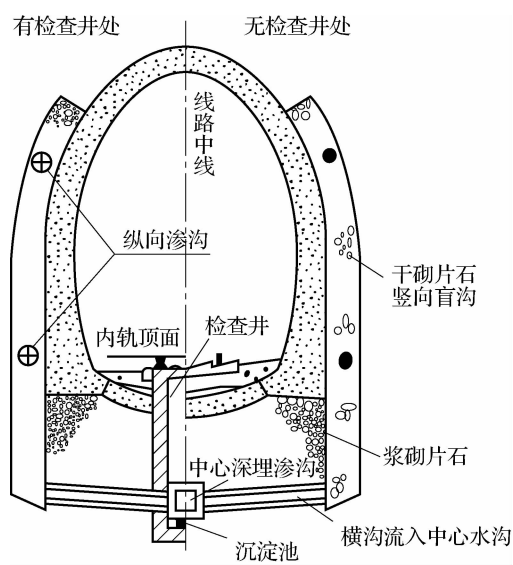


图 2-28 中心深埋渗水沟

2)盲沟

在衬砌背后,用片石、卵石或埋管修成一道环向或竖向可供流水的盲沟,以汇集衬砌周围的地下水。

现在我国普遍采用的是柔性盲沟,它是由工厂加工制造。柔性盲沟具有现场安装方便、布置灵活、容易连接、接头不易被混凝土阻塞、过水效果良好、成本不高等优点。其构造形式有以下两种。

(1)弹簧软管盲沟。弹簧软管盲沟一般是采用 10 号铁丝缠成直径为 5~8 cm 的圆柱形弹簧或采用硬质且具有弹性的塑料丝缠成半圆形弹簧,或带孔塑料管,以此作为过水通道的骨架,如图 2-29 所示。安装时外覆塑料薄膜和铁窗纱,从渗流水处开始沿环向铺设并接入泄水孔。

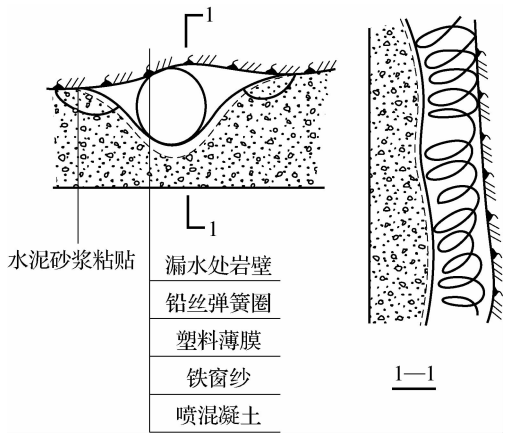


图 2-29 弹簧软管盲沟

(2)化学纤维渗滤布盲沟。化学纤维渗滤布盲沟是以结构疏松的化学纤维布作为水的渗流通道,其单面有塑料敷膜,安装时使敷膜朝向混凝土一面,可以阻止水泥浆渗入滤布。

这种渗滤布式盲沟质量轻,便于安装和连续加垫焊接,宽度和厚度也可以根据渗排水量的大小进行调整,是一种较理想的渗水盲沟,如图 2-30 所示。

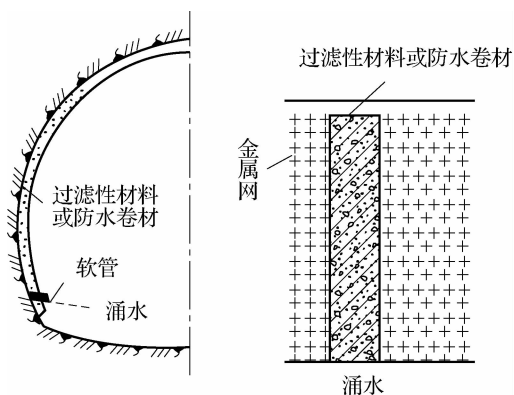


图 2-30 化学纤维渗滤布盲沟

3) 渡槽

在隧道衬砌的内表面每隔一定距离开凿一道竖向的环形凹槽。槽的大小依水量而定。槽内填以卵石,槽的外表面仍以混凝土封盖。环槽的下端与预留的水管相连,通到侧排水沟。地下水从外方流到隧道衬砌的周边后进入渡槽,自顶的上沿两侧流到槽底,然后经水管排到边沟中。这种排水方式多用于漏水较多且已无法采取其他防水措施解决的已建隧道。虽然渡槽可以取得较好的效果,但是它削弱了衬砌边墙的结构强度。

4) 防水层

为保证隧道衬砌、通信信号、供电线路和轨道等设备的正常使用,隧道衬砌应根据要求采取防水措施。设置防水措施一般有以下几种途径。

(1) 注浆。注浆,即压注水泥浆及化学浆液,是指将按一定组合成分配制而成的浆液压入衬砌背后围岩或衬砌与围岩间的空隙中,经凝结、硬化后起到防水和加固的作用。

(2) 衬砌采用防水混凝土灌注。防水混凝土是指以调整配合比或掺用外加剂的方法增加混凝土的密实性,提高混凝土自身抗渗性能的一种混凝土。

(3) 衬砌各类缝隙防水。在地下水较丰富的地区,衬砌接缝处常用止水带防水。其类型很多,如金属(铜片)止水带、聚氯乙烯止水带以及橡胶止水带等。其中,橡胶止水带可用于变形幅度较大的场合。在水底隧道中广泛使用钢边止水带,它是一种在两侧镶有 0.6~0.7 mm 厚的钢片翼缘的橡胶止水带,其刚度较高,便于安装。

(4) 外贴式防水层。外贴式防水层是在衬砌的外侧粘贴沥青、油毡,或涂刷焦油聚氨酯等涂料,形成隔水层。外贴式防水层的防水效果比较好,但是施作困难,工作人员易中毒,故一般用于明洞防水。

(5) 内贴式防水层。内贴式防水层是在衬砌的内侧施作防水层。一般采用喷水泥砂浆、防水砂浆抹面或喷涂阳离子乳化沥青胶乳等涂料施作内贴式防水层。

(6) 复合式衬砌中间防水层。在复合式衬砌的内外层衬砌之间设防水层是一种效果良好的防水形式。防水层可以用软聚氯乙烯薄膜、聚异丁烯片、聚乙烯片等防水卷材,或用喷

涂乳化沥青等做防水剂。

5) 洞顶防排水

当隧道围岩内的水主要由洞顶地表水补给时,可根据实际情况对地表进行处理,以隔断水源。另外,为防止地表水冲刷仰坡,流入隧道,一般应在洞口边仰坡上方设置天沟,以便引流地表水。如果隧道设有明洞,则一定要做好明洞顶的防排水。

6) 洞门排水

洞门的端墙、翼墙和边(仰)坡上均应设有相应的排水设施,以便引流地表水。另外,在洞口处还应设有洞内外水沟的衔接过渡设施。

2.5.4 电缆槽及高低压供电

1. 电缆槽

穿过隧道的各种电缆,如照明、通信、信号以及电力等电缆,必须有一定的保护措施来防止其潮湿、腐烂以及遭受人为的创伤。保护的方法是沿着衬砌边墙的下方设置全长的电缆槽。

电缆槽是用混凝土浇筑围成的,附设在侧水沟的同侧(内侧)或异侧且不侵入隧道净空限界的位置。槽内铺以细砂或自熄性泡沫塑料作为垫层,低压电缆可以直接放在垫层面上,高压电缆则应在槽边预埋的托架上吊起。槽顶用盖板作防护。盖板顶面应与避车洞底面或道床顶面齐平。当电缆槽与水沟同侧并行时,应与水沟盖板齐平。通信和信号的电缆可以放在同一个电缆槽内,但缆间距离不应小于 100 mm。电力线必须单独放在另外的电缆槽内。托架的间隔,在直线段不应超过 20 m,曲线段不应超过 15 m。

电缆槽在转折处应以不小于 1.2 m 的半径曲线连接,以免电缆因弯曲而折断。

电力牵引区段隧道内的接触网,对于单线隧道来说是悬吊在拱顶处,对于双线隧道来说是悬吊在线路中心上方的拱腰处。

隧道内的养护维修或其他电气设备的供电一般是采用三相四线式供电,控制开关应集中设在隧道口便于操作处。

隧道照明主要是为了便于工作人员对隧道及其设备进行检查、养护和维修,以及方便洞内人员行走和躲避车辆。电力照明采用固定式灯具,装置高度(距轨面)一般为 3.5~4 m。

养护作业用的照明插座一般设在避车洞内,装置高度(距轨面)不宜低于 1.5 m。

当隧道长度大于 500 m 时,需要在设有电缆槽同侧的大避车洞内设置余长电缆腔;当隧道长度为 500~1 000 m 时,需要在隧道中间设置一处;1 000 m 以上的隧道则每隔 420 m 或 600 m 增设一处。

2. 信号继电器箱洞和无人增音站

隧道内如需设置信号继电器,则应在电缆槽同侧设置信号继电器箱洞,其宽度为 2 m,深度为 2 m,中心高度为 2.2 m。

根据电讯传输衰耗和通信设计的要求,在隧道内设置无人增音站时,其位置可根据通信要求确定,也可与大避车洞结合使用,但应将大避车洞加深 2.5 m;如不能结合,则应另行修