

公路隧道技术状况 检测与评价

主编 杨 婕 柳治国

主审 石大为

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

公路隧道技术状况 检测与评价

主 编 杨 婕 柳治国
副主编 何家范 夏国正
参 编 张 勇
主 审 石大为

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书从实用角度出发,以公路隧道工程项目为载体,系统介绍了公路隧道基础知识、公路隧道技术状况评定方法、公路隧道施工检测、隧道环境监测和运营隧道结构检查等内容。

本书可用于高等院校城市轨道交通工程技术及地下与隧道工程技术专业的教学,也可供轨道交通工程相关技术人员工作时参考使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道技术状况检测与评价 / 杨婕, 柳治国主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2021.4

ISBN 978-7-5682-9695-3

I. ①公… II. ①杨… ②柳… III. ①公路隧道—检测 ②公路隧道—技术评估
IV. ①U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第060360号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本 / 787毫米 × 1092毫米 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 361千字

版 次 / 2021年4月第1版 2021年4月第1次印刷

定 价 / 69.00元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

“隧道检测技术”是城市轨道交通工程技术及地下与隧道工程专业的一门专业必修课，是地下工程建设从业人员必须掌握的一门专业技能。本书依据教育部对高等教育人才培养目标、培养规格、培养模式及与之相适应的知识、技能、能力和素质结构的要求进行编写，结合最新的行业技术标准、规范及隧道科技进步等情况，具有较强的针对性。本书在编写过程中较好地贯彻了素质教育的思想，力求体现以人为本的现代职业教育理念，从交通行业岗位群对人才知识结构和实践技能的要求出发，结合培养学生创新能力，职业道德方面的要求，提出教学目标和教学内容，在教材的理论体系、组织结构、内容描述上与传统教材有了明显的区别。

本书内容共分为六个模块，包括：绪论、公路隧道基础知识、公路隧道技术状况评定方法、公路隧道施工检测、隧道环境监测、运营隧道结构检查。

参加本书编写的有：贵州交通职业技术学院路桥系杨婕（编写模块一到模块三）、贵州宏信创达工程检测咨询有限公司柳治国和何家范（编写模块四：课题一到课题五）、贵州宏信创达工程检测咨询有限公司夏正国（编写模块四：课题六、课题七和模块五）、贵州宏信创达工程检测咨询有限公司张勇（编写模块六）。全书由杨婕、柳治国担任主编，何家范、夏正国担任副主编，张勇参与编写。全书由石大为担任主审。

本书是长期从事公路隧道工程检测技术专业教学与工程实践的工程师们工作经验的总结。但是，随着各项改革的逐步深入，加之编者水平所限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

模块一 绪 论1	课题二 洞身开挖质量检测26
课题一 公路隧道现状.....1	一、隧道开挖方法及施工要点认识.....26
课题二 公路隧道检测评定.....3	二、开挖质量标准.....32
一、隧道工程检测的目的和意义.....3	三、隧道断面仪法检测开挖断面.....34
二、隧道的主要质量问题.....3	课题三 喷锚衬砌施工质量检测38
课题三 公路隧道检测评定的发展.....4	一、喷锚衬砌认识.....38
模块二 公路隧道基础知识6	二、锚杆施工质量检查.....40
课题一 土建结构.....6	三、锚杆抗拔力测试.....43
一、隧道的分类.....6	四、锚杆锚固长度和密实度检测.....44
二、公路隧道的结构组成.....7	五、喷射混凝土施工质量检测.....49
课题二 机电设施.....7	六、钢筋网施工质量检测.....53
课题三 其他工程设施.....8	七、钢架施工质量检测.....55
模块三 公路隧道技术状况评定方法10	八、喷锚衬砌断面尺寸检测.....59
课题一 质量等级评定方法.....10	课题四 防排水检测59
一、质量等级评定的工程划分.....10	一、隧道防排水系统认识.....59
二、工程质量检验.....11	二、混凝土抗渗性能试验.....62
课题二 公路隧道质量等级评定.....12	三、防水层施工质量检测.....65
一、公路隧道质量检验评定标准.....12	四、排水系统施工质量检查.....70
二、竣（交）工验收相关规定.....12	课题五 混凝土衬砌施工质量检测76
模块四 公路隧道施工检测15	一、混凝土衬砌施工质量检测要点认识.....76
课题一 辅助工程措施质量检测.....15	二、混凝土衬砌施工检查.....77
一、辅助工程措施认识.....15	三、模筑混凝土衬砌质量检测.....83
二、施工质量检测.....23	四、回弹法检测混凝土强度.....87
	五、超声波法检测混凝土强度.....97
	六、超声回弹综合法检测混凝土强度.....102
	七、钻芯法检测混凝土强度.....105
	八、地质雷达法检测混凝土衬砌质量.....108

课题六 施工监控量测	117	二、运营通风检测	200
一、简介	117	三、运营照明方式	212
二、施工监控量测内容及要求	117	四、运营照明检测	215
三、必测项目	118		
四、选测项目	125	模块六 运营隧道结构检查	233
五、案例应用	127	课题一 经常检查	233
课题七 超前地质预报	134	一、检查频率	233
一、简介	134	二、检查方法	233
二、超前地质预报方法	135	三、检查内容及判定标准	234
三、不良地质体的预报	144	课题二 定期检查	235
四、案例应用	147	一、检查频率	235
		二、检查内容和方法	235
模块五 隧道环境监测	175	三、土建结构技术状况评定	245
课题一 隧道施工环境监测	175	课题三 应急检查	251
一、简介	175	课题四 专项检查	251
二、粉尘浓度测定	176	课题五 隧道衬砌表面病害自动化检测方法	252
三、瓦斯检测	180		
四、一氧化碳检测	185	附录 检查记录表	255
五、硫化氢检测	190		
六、氡气检测	194	参考文献	258
七、核辐射检测	197		
课题二 隧道运营环境监测	200		
一、运营通风方式	200		

模块一 绪 论

教学目标

通过本模块的学习，了解公路隧道发展的现状，掌握公路隧道检测评定的目的及意义，为学习后续内容做必要准备。

知识点

公路隧道检测评定的目的和意义。

课题一 公路隧道现状

与发达国家相比，我国的公路隧道起步较晚。1949年以前，我国仅有7座公路隧道，总长为897 m，最长的不超过200 m，多为单车道隧道，无衬砌或采用砌体进行衬砌。中华人民共和国成立后30年所修建的公路等级均较低，线形指标要求不高。20世纪50年代，仅有公路隧道30多座，总长约为2 500 m，且单洞长度都很短。20世纪60—70年代，我国干线公路上曾修建了一些百米以上的隧道，但标准也很低。进入20世纪80年代，公路隧道的发展逐渐加快，具有代表性的工程有深圳梧桐山隧道和珠海板樟山隧道、福建鼓山隧道和马尾隧道、甘肃七道梁隧道等。20世纪90年代后，我国公路隧道进入了高速发展时期，截至2017年年底，我国建成公路隧道16 000座，总长度达15 000 km，其中大于3 km长的隧道902座，全长为4 013 km，最长公路隧道为秦岭终南山隧道，长为18.02 km，为世界最长双洞高速公路隧道，于2007年建成通车。近年来，我国公路隧道以每年1 000 km速度增长，建设速度世界第一。世界上已建成10 km以上隧道26座，我国占15座。在建和拟建的10 km以上公路隧道18座，建设规模居世界第一。

我国部分已建成的10 km以上隧道见表1.1-1。

表 1.1-1 我国修建的部分特长公路隧道

序号	隧道名称	长度/m	位置	车道数
1	秦岭终南山隧道	18 020	陕西	2×2
2	凉山州锦屏山隧道	17 500	四川	1×1

续表

序号	隧道名称	长度/m	位置	车道数
3	木寨岭隧道	15 221	甘肃	2×2
4	巴陕高速公路米仓山隧道	13 800	川陕交界	2×2
5	太古高速公路西山隧道	13 600	山西	2×2
6	雅康高速公路新二郎山隧道	13 460	四川	2×2
7	长平高速公路虹梯关隧道	13 120	山西	2×2
8	蒋渭水高速公路雪山隧道	12 900	台湾	2×2
9	宝天高速公路麦积山隧道	12 290	甘肃	2×2
10	大坪里隧道	12 290	甘肃	2×2

我国修建的部分大跨度公路隧道见表 1.1-2。

表 1.1-2 我国修建的部分大跨度公路隧道

序号	隧道名称	长度/m	位置	车道数×隧道洞数
1	深中通道	6 800	广东	4×2
2	外环越江隧道	2 882	上海	4×2
3	白鹤嘴隧道	1 240	重庆	4×2
4	杏花村 1 号隧道	1 191	新疆	4×2
5	大东山隧道	1 114	大连	4×2

我国修建的部分水下公路隧道见表 1.1-3。

表 1.1-3 我国修建的部分水下公路隧道

序号	隧道名称(工法)	长度/m	位置	车道数×隧道洞数
1	上海崇明长江隧道(盾构法)	8 955	上海	3×2
2	翔安海底隧道(钻爆法)	8 695	厦门	3×2
3	深圳中山通道海底隧道(沉管法)	6 800	粤港澳大湾区	4×2
4	港珠澳海底隧道(沉管法)	6 700	伶仃洋	3×2
5	南京长江隧道(盾构法)	6 042	南京	3×2

我国公路隧道长度由 20 世纪 90 年代初单洞最长 3 km 左右,发展到现在的 10 km,甚至 18 km。从过去的两车道隧道到今天的三车道隧道、四车道隧道;隧道的布置方式由过去的分离式双洞隧道到今天的连拱隧道、小净距隧道、分岔隧道,还有如“地下立交”“桥隧混合”等布置形式。公路隧道的改建、扩建工程也逐年增加。近 30 年来,大批重大科研项

目和重大公路隧道工程的完成，表明我国公路隧道建设与运营管理技术水平已经取得了很大发展，采用钻爆法、盾构法、沉管法修筑隧道的设计施工技术已处于国际先进水平。

根据交通运输部制定的《国家公路网规划(2013—2030年)》，普通国道网由12条首都放射线、47条北南纵线、60条东西横线和81条联络线组成，总规模约为26.5万km。2030年国家高速公路网总规模约为11.8万km，另规划了1.8万km的远期展望线。这比起2004年《国家高速公路网》规划的2020年国家高速公路网的8.5万km的目标大幅上调。由此可见，在今后一个时期，我国公路建设仍将保持高速发展。而随着公路大规模建设的开展，隧道的数量也将迅猛增加。

课题二 公路隧道检测评定

一、隧道工程检测的目的和意义

我国地域广阔，地质条件、气候环境条件及施工环境条件复杂，施工组织实施困难，在公路隧道建设中会遇到各种各样的技术问题，随着公路隧道里程的不断增加，养护需求日趋迫切，提高养护水平、确保畅通也是十分突出的问题，无论是新建还是运营的隧道，为保证工程质量、降低运营风险，都离不开隧道的检测与监测工作。隧道检测工作是隧道施工质量控制和竣工验收评定工作中不可缺少的一个主要环节。对于提高工程质量、加快工程进度、降低工程造价、提高养护水平、推动隧道工程施工技术进步，将起到极为重要的作用。

公路隧道的检测、监测活动贯穿建设和运营两个阶段。在施工过程中，从原材料制品的质量控制到各个阶段的施工过程量测，质量检验及超前地质预报、施工环境的监测，都离不开检测工作。在运营期通过对隧道结构的检测评定、运营环境的监测，以确保结构安全，网络通畅。运营隧道结构检查是隧道运营管理中的一项重要工作，通过结构检测检查，可了解隧道结构的技术状况，保证隧道结构的安全耐久。《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)提出了公路隧道分级养护的理念，将公路隧道养护分为三个等级，根据隧道养护等级对隧道结构进行检测、分级及技术状况评定，为隧道维修、养护及隧道安全运营管理提供科学依据。

二、隧道的主要质量问题

我国公路隧道具有断面面积大、防水要求高、所处自然环境均较复杂等特点。加之由于设计和施工等方面的原因，国内已建和在建的公路隧道都不同程度地出现了质量问题，其中最常见的问题主要有以下几个方面：

(1)隧道渗漏水。与其他地下工程一样，公路隧道在施工期间和建成以后，一直受到地下水的影响，特别是建成以后的隧道，更是处于地下水的包围之中。据不完全统计，目前

国内公路隧道完全无渗漏者寥寥无几，绝大部分隧道都存在着不同程度的渗漏问题，渗漏位置遍及隧道各个部位。

(2)衬砌开裂。在隧道衬砌结构设计中常有一定的不准确性，导致结构强度不够或与围岩压力不协调，造成衬砌结构开裂、破坏。然而，在工程中出现的衬砌开裂更多的是由于施工管理不当、衬砌厚度不足或混凝土强度不够造成的。隧道衬砌结构裂缝较为普遍，其形态多样，有的拱顶和边墙出现纵向裂缝、斜向裂缝、网状龟裂裂缝，有的出现错台。

(3)衬砌厚度不足。衬砌厚度包括初期支护厚度和二次模筑混凝土衬砌厚度。对模筑混凝土衬砌，衬砌厚度不足主要出现在边墙脚、侧墙、拱顶、仰拱两侧等。

(4)衬砌结构同围岩结合不密实。支护结构同围岩的紧密接触是地下结构区别于地面结构的主要特征。围岩与初期支护之间不密实、模筑混凝土厚度不足，甚至形成较大空区(洞)都属于很严重的质量问题。

(5)混凝土劣化、强度不足。混凝土强度不足主要有喷射混凝土强度不足、模筑混凝土强度不足两种情况。混凝土在腐蚀性环境作用下会产生劣化。

(6)路面隆起、下沉、开裂。隧道运营一段时间以后，有些隧道会出现路面开裂、底鼓、下沉变形现象，通常伴随电缆沟盖板翘起，路缘石、边沟破坏。

(7)照明亮度不足。在隧道内粉尘浓度较高、潮湿环境条件下，灯具内外容易积尘纳垢，电器容易老化，使照明亮度不足。

(8)悬挂件锈蚀、松动、脱落、缺失。隧道内风机、灯具、电缆桥架等各种预埋件、悬挂件长期在隧道内特有的环境和车辆振动作用下，出现锈蚀松动与脱落问题十分普遍，有的甚至出现缺失。这也是老旧隧道主要的安全隐患之一。

(9)附属设施损坏。隧道各种附属设施在运营过程中出现损坏，如设备洞门老化、电缆槽壁及盖板破损、内装饰层(防火涂层、边墙瓷砖等)起层脱落等。

课题三 公路隧道检测评定的发展

20世纪50年代，人们逐步认识到地下工程中的许多事故往往是由岩(土)体失稳引起的，监测和检测技术开始得到重视。20世纪70年代，随着新奥法技术的推广应用，人们开始逐步加深对地下工程中监测、检测项目的确定，仪器选型，布置埋设与观测方法，观测资料的分析整理等工作的研究，并取得了一定的成果。但在监测设计规划、仪器的技术性能及数据分析处理等方面并不令人满意。20世纪80年代以来，人们对地下工程监测检测技术应用实践中存在的问题进行了深入研究，改进了监测手段和方法，对仪器的技术指标、使用条件、稳定性和可靠性等给出了评定标准。安全监测工作的标准化、程序化和质量控制措施也逐步得到完善，并编制了各类工程监测技术规程、规范、指南和手册。20世纪90年代，地下工程监测技术的硬件和软件迅速发展，应用范围不断扩大，动态设计和信息化

设计技术开始在实际工程中应用，监测自动化、网络传输、数据处理和资料分析、安全预报预警等系统不断完善。地理信息系统(GIS)也在大型工程监测中得到了应用。21 世纪开始，安全和环境问题的日益恶化引起了人们的高度重视，公众的法律和环保意识增强，对地下工程建设的关注程度增加，各级政府对安全和环保方面的科学研究、防护治理、环境监测与检测的投入加大，为促使施工安全，环境保护和工程质量监(检)测技术应用范围继续扩大，监(检)测仪器设备与技术发展迅猛。

模块二 公路隧道基础知识

教学目标

通过本模块的学习，掌握公路隧道的基础知识，包括隧道的分类、隧道的结构组成。

知识点

隧道的分类，隧道的结构组成。

课题一 土建结构

一、隧道的分类

隧道从不同的角度出发，可以分为不同的种类。

- (1)按隧道的用途可分为交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道。
- (2)按隧道所处的位置可分为山岭隧道、城市隧道、水下隧道。
- (3)按隧道穿越地层可分为岩石隧道、土质隧道。
- (4)按隧道修建方式可分为明挖隧道、暗挖隧道、沉管法隧道等。
- (5)按隧道开挖掘进方式可分为钻爆法(也称矿山法)隧道、盾构法隧道、掘进机法隧道等。
- (6)按隧道布置方式可分为分离隧道、小净距隧道、连拱隧道、分岔隧道等。
- (7)按隧道跨度或车道数可分为一般跨度隧道(指两车道隧道)、中等跨度隧道(指三车道隧道)、大跨度隧道(指四车道及以上隧道)。
- (8)按隧道长度分类：我国《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)按隧道长度将公路隧道分为以下4类：
 - 1)特长隧道： $L > 3\,000\text{ m}$ 。
 - 2)长隧道： $3\,000\text{ m} \geq L > 1\,000\text{ m}$ 。
 - 3)中隧道： $1\,000\text{ m} \geq L > 500\text{ m}$ 。
 - 4)短隧道： $L \leq 500\text{ m}$ 。

二、公路隧道的结构组成

公路隧道结构除洞门和裸露的明洞外，全部埋入地下，一般置于地层包围之中，是由围岩喷锚衬砌(初期支护)、模筑混凝土衬砌(二次衬砌)、仰拱衬砌、仰拱填充、防水层、排水盲管、深埋水沟、路侧边沟、路面结构、电缆沟及盖板等组成的，如图 2.1-1 所示。

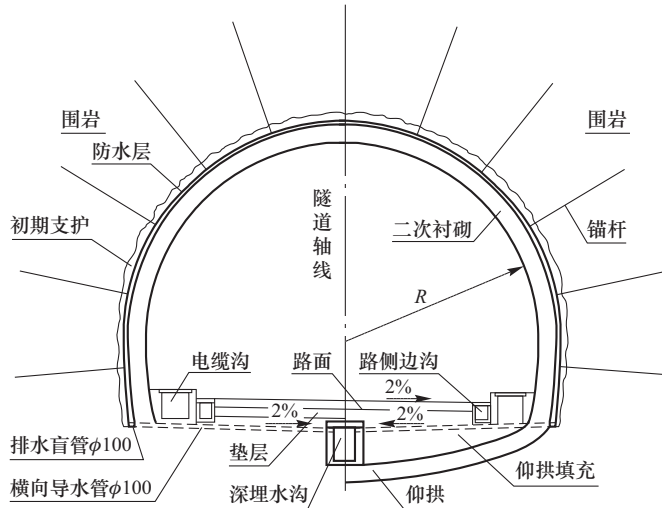


图 2.1-1 公路隧道结构组成

课题二 机电设施

根据隧道的不同长度，隧道内还须配备照明、通风、监控、交通工程设施，防火、防灾救援设施等机电设施(图 2.2-1)和管理设施。公路隧道机电设施主要是指为隧道营运服务的相关机电设施，包括供配电设施、照明设施、通风设施、消防及救援设施、监控设施等。

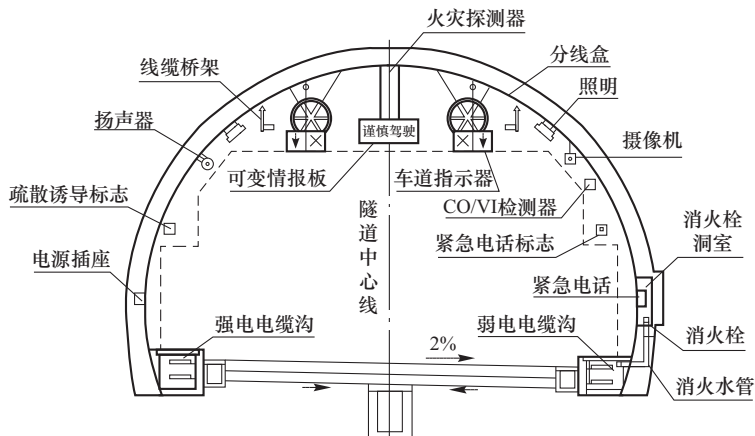


图 2.2-1 公路隧道机电设施组成

课题三 其他工程设施

公路隧道中交通安全设施有标志、标线、轮廓标，如图 2.3-1~图 2.3-4 所示。



图 2.3-1 隧道出口距离预告标志



超薄型紧急电话指示标志



超薄型人行通道指示标志



超薄型疏散指示标志



铝合金边框紧急电话指示标志



铝合金边框紧急停车带指示标志



铝合金边框车行横洞指示标志



铝合金边框人行横洞指示标志



铝合金边框疏散指示标志



铝合金边框消防设备指示标志

图 2.3-2 隧道内标志



图 2.3-3 隧道内标线

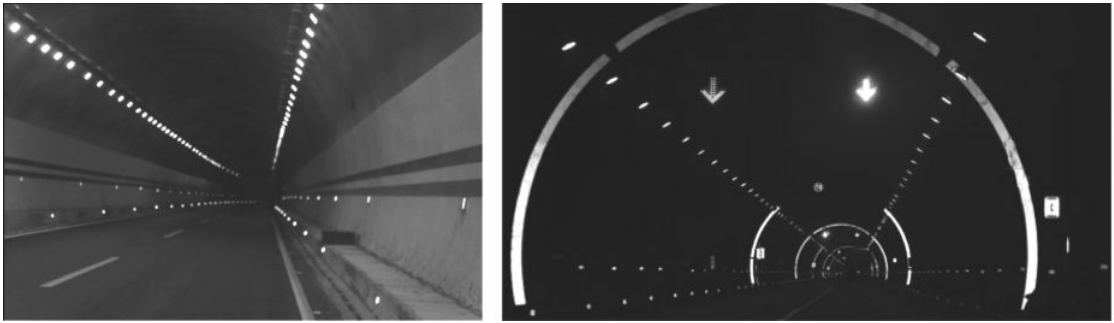


图 2.3-4 隧道轮廓标

模块三 公路隧道技术状况评定方法

教学目标

通过本模块的学习，掌握工程质量等级评定的方法及公路隧道质量评定的相关内容。

知识点

工程质量等级评定的方法，公路隧道质量评定内容。

课题一 质量等级评定方法

公路工程质量检验和等级评定是依据交通运输部颁布的《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)来进行的。在进行质量等级评定之前，首先应进行工程划分，然后按照“两级制度、逐级评定、合规定质”的原则进行评定。

一、质量等级评定的工程划分

《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)中按工程建设规模大小、结构部位和施工工序将建设项目划分为单位工程、分部工程和分项工程，对复杂工程，还可设立子分部工程。

- (1)单位工程：在合同段中，具有独立施工条件和结构功能的工程。
- (2)分部工程：在单位工程中，按结构部位、路段长度及施工特点等划分的工程。
- (3)分项工程：在分部工程中，根据施工工序、工艺或材料等划分的工程。

工程划分应注意规模均衡、主次区别、层次清晰。

隧道工程原标准分部工程太多，对分部工程进行了重新划分，将总体与装饰装修合并，明洞并入洞口工程，洞身衬砌包括支护(超前支护和初期支护)和二次衬砌。鉴于目前特长隧道数量增多，故将辅助通道增列为分部工程，另外，明确了单位工程和分部工程的划分。

一般建设项目的工程划分见表 3.1-1。

表 3.1-1 一般建设项目的工程划分

单位工程	分部工程	分项工程
隧道工程 ^① (每座或 每个合同段)	总体及装饰装修(每座或每合同段)	隧道总体, 装饰装修工程
	洞口工程(每个洞口)	洞口边仰坡防护, 洞门和翼墙的浇(砌)筑, 截水沟、洞口排水沟、明洞浇筑, 明洞防水层施工, 明洞回填
	洞身开挖(200 延米)	洞身开挖
	洞身衬砌(200 延米)	喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢架、仰拱、仰拱回填、衬砌钢筋、混凝土衬砌、超前锚杆、超前小导管、管棚
	防排水(200 延米)	防水层、止水带、排水
	路面 ^② (1~3 km 路段)	基层、面层
	辅助通道 ^③ (200 延米)	洞身开挖、喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢架、仰拱、仰拱回填、衬砌钢筋、混凝土衬砌、超前锚杆、超前小导管、管棚、防水层、止水带、排水
<p>①双洞隧道每单洞作为一个单位工程。</p> <p>②按路段长度划分的分部工程, 高速公路、一级公路宜取低值, 二级及二级以下公路可取高值。</p> <p>③辅助通道包括竖井、斜井、平行导坑、横通道风道、地下风机房等。</p>		

二、工程质量检验

工程质量检验评定以分项工程为基本单元, 采用合格率法进行。分项工程质量检验包括基本要求、实测项目、外观鉴定和质量保证资料四个部分。只有在基本要求符合、外观质量无限制缺陷和质量保证资料真实并基本齐全时, 方能对分项工程质量进行检验评定。

(1)基本要求检查。分项工程所列基本要求, 对施工质量优劣具有关键作用, 应按基本要求对工程进行认真检查, 并应检查工程所用的各种原材料的品种、规格、质量及混合料配合比和半成品、成品是否符合有关技术标准规定并满足设计要求。

(2)实测项目检验。对规定检查项目采用现场随机抽样方法, 按照规定频率和下列合格率计算方法直接计算各检查项目的合格率, 按数理统计方法评定的项目除外。

$$\text{检查项目合格率}(\%) = \frac{\text{合格的点(组)数}}{\text{该检查项目的全部检查点(组)数}} \times 100\%$$

检查项目可分为一般项目和关键项目。涉及结构安全和使用功能的重要实测项目为关键项目, 其他项目为一般项目。关键项目在《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)中以“△”标示, 其合格率应不低于 95%(机电工程为 100%), 一般项目的合格率应不低于 80%, 否则该检查项目为不符合对少数实测项目还有规定极值的限制, 这是指任何一个检测值都不能突破的极限值, 检测不符合要求时该实测项目为不合格, 所在分项工程可直接判为不合格, 并要求其必须进行返工处理。采用《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)中附录 B 至附录 N 等所列方法进行评定的关键项目, 不符合要求的该分项工程评为不合格。

(3)外观质量检查。外观质量应进行全面检查, 并应满足规定要求, 否则该检验项目为不合格。