



普通高等教育“十二五”规划教材

隧道施工技术

主 编 王道远
主 审 冯卫星 朱永全



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

隧道施工技术

主 编 王道远

副主编 李现者 申 骞 袁金秀 孙伟任

主 审 冯卫星 朱永全

内 容 提 要

本书讲述了铁路和公路隧道工程的构造、设计、施工方法、施工技术以及隧道运营管理知识。全书共分9章, 主要内容包括: 隧道基本知识, 隧道构造, 隧道设计, 围岩稳定性, 隧道施工方法, 隧道施工技术, 不良和特殊地质地段隧道处治技术, 超前地质预报及现场监控量测, 以及隧道营运管理与常见病害防治等方面内容。本书注重图文并茂, 设置“知识拓展”部分, 并附以大量工程实例。

本书适于高职高专院校隧道及地下工程、城市轨道交通、道路桥梁工程、造价工程及相关专业学生作为教材使用, 亦可作为相关领域工程技术人员和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

隧道施工技术 / 王道远主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-1631-1

I. ①隧… II. ①王… III. ①隧道施工—施工技术—高等学校—教材 IV. ①U455

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第015598号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 隧道施工技术
作 者	主编 王道远 主审 冯卫星 朱永全
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22.25印张 528千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

QIANYAN

1996年4月在美国华盛顿召开的“国际隧道协会第22届年会和学术讨论会”，会议重点讨论了隧道及地下工程在可持续发展战略中的重要性。会议确定21世纪将是把地下工程作为资源开发的时代，地下空间是人类生存活动的第二个空间。一些有识之士预测21世纪末将有1/3的世界人口工作、生活在地下空间中。如何树立正确的建设理念，开展经济、实用、高效、环保的隧道与地下工程建设，还有很多问题需要研究，还有许多技术与方法需要开拓。

本书是为适应我国高等职业技术教育教学改革的发展趋势、职业资格培训的需要，综合多所高职院校与多家一线设计施工企业经验编写而成的。本书注重图文并茂，引入大量工程实例，拉近课堂与现场距离，避免专业理论的枯燥，易读易懂。内容涵盖铁路、公路和城市轨道交通知识，力求使学生全面掌握隧道知识，并注重培养学生的职业能力，以实现高职高专学生所学知识 with 就业岗位要求相贴合。本书可作为高职高专院校隧道及地下工程、城市轨道交通、道路桥梁工程、造价工程及相关专业学生教材使用，亦可作为相关领域工程技术人员和管理人员参考使用。

全书共包含九章，重点讲述了：隧道基本知识，隧道构造，隧道设计，围岩稳定性，隧道施工方法，隧道施工技术，不良和特殊地质地段隧道处治技术，超前地质预报及现场监控量测，以及隧道营运管理与常见病害防治等方面内容，并于“知识拓展”部分附以大量工程实例。

本书由王道远任主编，李现者、申骞、袁金秀、孙伟任副主编，冯卫星、朱永全任主审。具体编写人员分工如下：第一章、第二章由黑龙江交通职业技术学院孙伟和河北交通职业技术学院王道远编写；第三章由石家庄铁道大学朱正国、张素敏、孙明磊、贾晓云编写；第四章由河北交通职业技术学院袁金秀和梁艳编写；第五章第一节、第二节及第三节由河北交通职业技术学院王道远和黑龙江交通职业技术学院孙伟编写；第五章第四节、第五节及第六节由河北交通职业技术学院袁金秀和曹文龙编写；第五章第七节、第八节由河北交通职业技术学院王道远和刘柳编写；第五章第九节、第十节由河北

交通职业技术学院李现者和李冬编写；第六章由河北交通职业技术学院王道远和王慧聪编写；第七章由河北交通职业技术学院袁金秀和黑龙江交通职业技术学院孙伟编写；第八章由河北交通职业技术学院申骞和山东交通职业技术学院张震平编写；第九章由河北交通职业技术学院李现者和黑龙江交通职业技术学院孙伟编写；各章知识拓展部分由中铁十四局集团有限公司李栋、中铁七局集团有限公司马军辉、中铁十一局集团有限公司李博理、中铁十五局集团有限公司侯振兴、中铁十六局集团有限公司宋宝禄、中铁九局集团有限公司燕万红、廊坊市中铁物探勘察有限公司赵光敏、河北建设勘察研究院有限公司戴光寿、河北华能京张高速公路有限责任公司李强提供素材和编写。

本书在编写过程中，编者参考引用了本书所列参考文献的一些内容，在此向文献的作者深表谢意。

由于编者水平有限，书中不当和错误之处，恳请专家和读者批评指正。

编 者

2013年12月

前言

第一章 隧道基本知识	1
第一节 隧道的基本概念及分类	1
第二节 隧道计算理论简介	3
第三节 隧道及地下工程的历史与发展概况	6
知识拓展	9
第二章 隧道构造	14
第一节 洞门	14
第二节 洞身衬砌	19
第三节 明洞	23
第四节 附属结构	26
知识拓展	34
第三章 隧道设计	37
第一节 概述	37
第二节 隧道位置选择	37
第三节 隧道线形设计	38
第四节 隧道横断面设计	40
第五节 隧道纵断面设计	47
第六节 隧道断面初步拟定	50
知识拓展	51
第四章 围岩稳定性	57
第一节 岩体和围岩的区别	57
第二节 岩体的稳定性分析	58
第三节 围岩的稳定性分级	71
第四节 围岩压力	78
知识拓展	88

第五章 隧道施工方法	90
第一节 概述	90
第二节 矿山法	92
第三节 新奥法	93
第四节 浅埋暗挖法	103
第五节 明挖法	108
第六节 盖挖法	114
第七节 盾构法	117
第八节 TBM 掘进机法	141
第九节 沉埋法	152
第十节 冻结法	163
知识拓展	164
第六章 隧道施工技术	178
第一节 超前预支护与预加固技术	178
第二节 钻爆开挖技术	189
第三节 出渣运输技术	217
第四节 初期支护技术	223
第五节 防排水技术	246
第六节 二次衬砌技术	253
第七节 辅助坑道设置技术	257
第八节 水电供应与通风防尘技术	262
知识拓展	271
第七章 不良和特殊地质地段隧道处治技术	284
第一节 富水地层处治技术	284
第二节 断层破碎带处治技术	286
第三节 岩溶地段处治技术	288
第四节 塌方处治技术	293
第五节 岩爆的处治	298
第六节 膨胀性和挤压性围岩的处治	299
第七节 冻土的处治	300
第八节 黄土的处治	302
第九节 煤系地层的处治	303
知识拓展	305
第八章 超前地质预报及现场监控量测	310
第一节 TSP 地质超前预报	310
第二节 地质雷达探测	314

第三节 监控量测·····	316
知识拓展·····	334
第九章 隧道营运管理与常见病害防治·····	337
第一节 隧道营运管理·····	337
第二节 隧道常见病害防治·····	341
知识拓展·····	346
参考文献·····	348

第一章 隧道基本知识

● 教学目标：

1. 了解隧道及地下工程历史、现状、发展及特点。
2. 理解隧道的定义和分类。

第一节 隧道的基本概念及分类

一、隧道的基本概念及组成

进入 21 世纪，地下工程建设任重道远，如何树立正确的建设理念，开展经济、实用、高效、环保的隧道与地下工程建设，还有很多问题需要研究，还有许多技术与方法需要开拓。

1996 年 4 月在美国华盛顿召开的“国际隧道协会第 22 届年会和学术讨论会”，会议重点讨论了隧道及地下工程在可持续发展战略中的重要性。会议确定 21 世纪将是把地下工程作为资源开发的时代，地下空间是人类生存活动的第二个空间。一些有识之士预测 21 世纪末将有 1/3 的世界人口工作、生活在地下空间中。

1970 年，国际经济合作与发展组织（OECD）召开的隧道会议综合了各种因素，对隧道所下的定义为：“以某种用途、在地面下以任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面面积大于 2m^2 的洞室均为隧道。”

隧道是埋藏于地面以下的条形建筑物，被岩土体围绕。在隧道周围一定范围内，对洞身的稳定有影响的岩（土）体，即由于受开挖影响而发生应力状态改变的岩（土）体我们称为围岩。

隧道在岩土体开挖后，自身很难保持稳定，为了达到洞室稳定及施工安全的目的，而在洞室开完后对洞室围岩采取的支撑、加强作用的构件和其他处理措施总称为支护。

现代隧道施工技术采取的支护手段按支护作用效果可分临时支护和永久支护两类，包括喷锚支护、钢木支撑、模筑混凝土衬砌、锚杆加固，超前管棚、注浆支护等多种类型。

隧道结构是由主体结构 and 附属结构组成的。其中主体结构包括隧道洞门及洞身衬砌部分。为了满足隧道的使用功能，隧道除应有主体结构外，还应具有其他的一些设施，包括（铁路隧道）大小避车洞、（公路隧道）紧急停车带、人行横道、洞内排水系统、电力电缆系统、通风系统等。



二、隧道的分类

隧道包括的范围广，根据不同的作用角度，可以把隧道分为不同的种类，下面介绍几种工程中常见的隧道分类方法。

(1) 按照隧道埋深分类：可分为深埋隧道和浅埋隧道。深埋隧道和浅埋隧道的临界深度是以隧道顶部覆盖层能否形成压力拱（自然拱）为原则确定。因此，不同类别围岩的分界深度也是不一样的，一般采用塌方平均高度 h_q 的 2~2.5 倍为深浅埋的临界高度。

(2) 按照隧道所处地理位置分类：可分为山岭隧道、浅埋及软土隧道、水底隧道等。

(3) 按照隧道所处的地层情况分类：可分为岩石隧道或岩质隧道、土质隧道或软土隧道。

(4) 按照隧道用途分类：可分为交通隧道、市政隧道、水工隧道和矿山隧道等。

交通隧道是目前隧道种类中应用得最多的一类隧道，主要是用于公路、铁路运输，其作用是为公路、铁路运输提供通道。交通隧道又分为铁路隧道、公路隧道、水底隧道、地下铁道、航运隧道、地下人行通道等。

市政隧道是修建在城市地下，用作敷设各种市政设施、地下管线的隧道。由于城市中供市政设施用的地下管线越来越多，如自来水、污水、暖气、煤气、通信、供电等。管线系统的发展，需要大量建造市政隧道，以便从根本上解决各种市政设施的地下管线系统的经营水平问题。在布置地下通道、管线、电缆时，应有严格的次序和系统，以免在进行检修和重建时要开挖街道和广场。

水工隧道又称水工隧洞，是在山体中或地下开凿的过水隧洞。水工隧道可用于灌溉、发电、供水、泄水、输水、施工导流和通航等。水流在洞内具有自由水面的，称为无压隧洞；水流充满整个断面，使洞壁承受一定水压力的，称为有压隧洞。

矿山隧道是在矿山开采中，在地表与矿体之间钻凿出各种通路，用来运矿、通风、排水、行人以及为冶金设备采出矿石新开凿的各种必要准备工程等。这些通路，统称为矿山隧道。

(5) 按隧道断面形式分类：主要有圆形断面隧道、多心圆断面隧道、马蹄形断面隧道、矩形断面隧道等断面形式。

(6) 按隧道的长度分类：隧道长度是指进出口洞门端墙面之间的距离，以端墙面或斜切式洞门的斜切面与设计内轨顶面的交线同线路中线的交点计算。双线隧道按下行线长度计算，位于车站上的隧道以正线长度计算，设有缓冲结构的隧道长度应从缓冲结构的起点计算。

1) 根据《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)，铁路隧道按其长度分为四类。

特长隧道 全长 10000m 以上；

长隧道 全长 3000m 以上至 10000m；

中长隧道 全长 500m 以上至 3000m；

短隧道 全长 500m 以下。

2) 根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)，公路隧道按其长度可分为四类。

特长隧道 全长 3000m 以上；



长隧道 全长 1000m 以上至 3000m；

中隧道 全长 500m 以上至 1000m；

短隧道 全长 500m 以下。

第二节 隧道计算理论简介

隧道结构是埋藏于地面以下的建筑物，它的受力和变形与围岩密切相关，支护结构与围岩作为统一的受力体系，共同承受围岩荷载。这一点正是地下工程与地面以上工程结构物的主要区别之一。在隧道工程理论方面，传统的理论是“松弛荷载理论”，但在长期的隧道工程实践中，随着人们对地下工程理论和实际问题的不懈探索 and 理解的加深，也由于在对隧道围岩和支护结构（地质、岩体和结构）的力学研究中应用了弹塑性理论和有限元方法，以及在隧道施工过程中对围岩应力应变动态的量测、分析和总结，已经提出了现代隧道工程“围岩承载理论”，基本形成了隧道及地下工程理论体系，并表现出广阔的发展前景和应用空间。现代围岩承载理论是对传统松弛荷载理论的继承和发展。同样的，现代隧道工程施工方法和施工技术等也是对传统方法和技术的改进、继承和发展。

一、松弛荷载理论

松弛荷载理论是 20 世纪 20 年代提出的，也称为传统隧道工程理论。其核心内容是：稳定的岩体有自稳能力，不产生荷载；不稳定的岩体则可能产生坍塌，需要用支护结构予以支承。这样，作用在支护结构上的荷载就是围岩在一定范围内由于松弛并塌落（或可能塌落）的岩体重力（即最不利荷载）。其代表性的人物有太沙基（K. Terzaghi）和普氏（М. Лромобьяконоб）等人。松弛荷载理论是在总结传统矿山法原理的基础上提出来的，它类似于地面工程考虑问题的思路，已经发展到一个相当高的水平，至今仍被广泛地应用着。

松弛荷载理论对应的力学计算模型为荷载—结构模型（图 1-1），又称为传统的结构力学模型。它将支护结构和围岩分开来考虑，认为围岩是荷载的来源，支护结构是承载主体。隧道的支护结构与围岩的相互作用是通过弹性支撑对支护结构施加约束来体现的，而围岩的承载能力则在确定围岩压力和弹性支撑的约束能力时间接考虑。围岩的承载能力越高，它给予支护结构的压力越小，弹性支撑约束支护结构变形的抗力越大，相对来说，支护结构所起的作用就越小。这一类计算模型主要适用于围岩因过分变形而发生松弛和崩塌，支护结构主动承担围岩松动压力的情况。所以说，利用这类模型进行隧道支护结构计算的关键问题是如何确定作用在支护结构上的主动荷载，其中最主要的是围岩所产生的松动压力，以及弹性支承作用于支护结构上的弹性抗力，由于这个模型概念清晰，计算简便，易于被工程师们所接受，故至今仍很通用，尤其是对模筑衬砌。

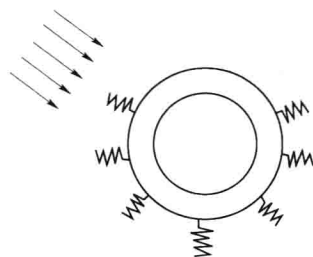


图 1-1 荷载—结构模型



二、围岩承载理论

围岩承载理论是 20 世纪 60 年代提出的,也称为现代隧道工程理论。其核心内容是:围岩稳定显然是岩体自身有承载自稳能力;不稳定围岩丧失稳定是有一个过程的,如果在这个过程中提供必要的帮助或限制,则围岩仍然能够保持稳定状态,如此就更有利于“充分发挥围岩的自承能力”。其代表性人物有腊布希维兹(K. V. Rabcewicz)、米勒·菲切

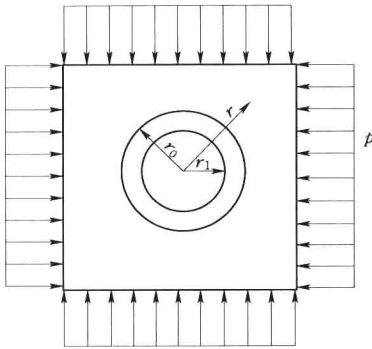


图 1-2 地层—结构模型

尔(Miller Fecher)、芬纳·罗勃(Fenner Talobre)和卡斯特奈(H. Kastener)等人。围岩承载理论是在总结新奥法原理的基础上提出来的,它已经脱离了地面工程考虑问题的思路,而更接近于地下工程实际,近半个世纪以来已被广泛接受和推广应用,并且表现出了广阔的发展前景。

围岩承载理论对应的力学计算模型为地层—结构模型(图 1-2),又称为现代的岩体力学模型和复合整体模型。它将支护结构与围岩视为一体,作为共同承载的隧道结构体系。在这个模型中围岩是直接的承载单元,支护结构只是用来约束和限制围岩的变形,这一点和第一类模型正好相反。地层—结构模型是目前隧道结构体系中力求采用的或正在发展的模型,因为它符合现在的隧道施工技术水平。采用快速和早强的技术可以限制围岩的变形,从而阻止围岩松动压力的产生。

三、两大工程理论的比较说明

经长期的应用、研究和充实,这两种理论已逐步形成成为两大理论体系,并且在原理、措施和方法上表现出不同的特点。表 1-1 是对两大理论体系的比较说明。

表 1-1 两大理论体系的比较说明

理论比较项	松弛荷载理论	围岩承载理论
认识	<p>围岩虽然有一定的承载能力,但极有可能因为松弛的发展而致失稳,结果是对支护结构产生压力作用;视围岩为荷载的来源,采取直观的方法和结构来承受围岩压力,以期维持围岩的稳定;</p> <p>更注重结果和对结果的处理,不能被动接受开挖坑道后围岩的任何变化结果</p>	<p>围岩虽然可能产生松弛破坏而致失稳,但在松弛的工程中围岩仍有一定的承载力,具有“三位一体”特性;视围岩为结构的主体和荷载主体;对其承载能力不仅要尽可能地利用,而且应当保护和增强;</p> <p>更注重过程和对过程的控制,应主动控制开挖坑道后围岩的变化过程</p>
施工方法	传统矿山法,日本称之为“背板法”	新奥法,我国隧道施工规范称为“锚喷构筑法”



续表

理论比较项		松弛荷载理论	围岩承载理论
工程措施	支护	<p>根据以往工程队围岩稳定性的经验判断,进行工程类比,确定临时支撑参数;考虑到隧道开挖后,围岩很可能松弛坍塌,常用型钢或木构件等刚度较大的构件进行临时支撑,盾构是临时支撑的最佳形式;</p> <p>待隧道开挖成型后,逐步将临时支撑撤换下来,而用单层衬砌作为永久性衬砌</p>	<p>根据测量数据提示的围岩动态发展趋势,确定初期支撑参数;为了控制围岩松弛变形的过程,维护和增强围岩的自承载能力,获得坑道的稳定,常用锚杆和喷射混凝土等柔性构件组合起来加固围岩,必要时可增加超前锚杆或钢筋网、钢拱架、预注浆,称为初期支护,然后采用混凝土或钢筋混凝土内层衬砌承受后期围岩压力并提供安全储备;初期支护、内层衬砌与围岩共同构成隧道的复合式承载结构</p>
	开挖	<p>常用分布开挖,以便构件支撑的施作;钻爆法或中小型机械掘进</p>	<p>常用大断面开挖,以减少对围岩的扰动;钻爆法或大中型机械掘进</p>
	优缺点	<p>构件临时支撑直观、有效、容易理解,工艺简单,易于操作;</p> <p>临时支撑的拆除既麻烦又不安全,不能拆除时,既浪费又使衬砌受力条件不好;</p> <p>当围岩松散破碎甚至有水时,满铺背柴,也能奏效;</p> <p>一般必须在开挖后再支撑,故一次开挖断面的大小受围岩稳定性好坏的限制,因而开挖与支护之间的相互干扰较大,施工速度较慢</p>	<p>锚喷初期支护按需设置,适应性强,工艺较复杂,对围岩的动态量测要求较高;</p> <p>初期支护无须拆除,施工较安全,支护结构受力状态较好;</p> <p>当围岩松散破碎甚至有水时,需采用辅助方法(如管棚、注浆)来支持,才能继续施工;</p> <p>由于采用了一系列初期支护措施,故一次开挖断面可以加大,因而减少了开挖与支护之间的相互制约,给快速掘进提供了较为便利和安全的条件,施工速度较快</p>
力学原理		<p>土力学:视围岩为散粒体,计算其对支撑或衬砌产生荷载的大小和分布状态;</p> <p>结构力学:视支撑和衬砌为承载结构,检算其内力,并使之受力合理;</p> <p>建立的是“荷载—结构力学体系”,以最不利荷载作为衬砌结构的设计荷载;但衬砌实际工作状态很难接近其设计工作状态;</p> <p>以往据此所做的大比例隧道荷载—结构模型试验,并无多大参考价值</p>	<p>岩体力学:视围岩为具有弹塑性的应力岩体,分析计算围岩在开挖坑道前后的应力—应变状态及变化过程;</p> <p>视支护应力岩体的边界条件,起调节和控制围岩的应力—应变的作用,检验作用的效果并使之优化;</p> <p>建立的是“围岩—支护力学体系”,以实际的应力—应变状态作为支护的设计状态;实际工作状态较易接近设计工作状态</p>
理论要点		<p>开挖隧道后,围岩产生松弛是必然的,但产生坍塌却是偶然的,故应准确判断各类围岩产生坍塌的可能性大小;</p> <p>围岩的松弛和坍塌都向支撑和衬砌施加压力,故应准确判断压力的大小和分布;但在实际中对以上两种判断的准确程度很难把握;</p> <p>为保证围岩稳定,应根据荷载的大小和分布,设计临时支撑和永久衬砌作为承载结构,并使承载结构受力合理(但实际上只能以最不利荷载作为设计荷载);</p> <p>尽管承载结构是按承受最不利荷载来设计的,但它是在开挖后才施作的,故为保证施工的顺利进行,应尽可能地防止围岩的松动和坍塌</p>	<p>围岩是主要承载部分,故在施工中应尽可能地减少对围岩的扰动,以保护其固有承载能力;</p> <p>初期支护主要用来加固围岩,它应既允许围岩承载能力的充分发挥,又能防止围岩因变形过度而产生失稳;故初期支护应先柔后刚,适时、按需提供;</p> <p>围岩的应力—应变动态预示着它是否能进入稳定状态,因此应以量测作为手段掌握围岩动态,进行施工监控,或据此修改支护参数;</p> <p>整体失稳通常是由局部破坏发展所致,故支护应该能够既加固局部以防止局部破坏,又全面约束围岩以防止整体失稳,从而使支护与围岩共同构成一个力学意义上的封闭和稳定的承载环</p>



由此不难看出,两种理论的根本区别是:在解决隧道施工及地下工程问题时,传统的松弛荷载理论更注重结果和对结果的处理,即将围岩视为荷载的来源,继而被动接受开挖坑道后围岩的任何变化结果,并采取直观简单的方法和结构来承受围岩压力,以期维持围岩的稳定。而现代围岩承载理论则更注重过程和对过程的控制,即将围岩视为隧道的结构主体和承载主体,继而主动控制开挖坑道后围岩的变化过程,并采取积极有效的方法和措施以加固围岩,以期充分利用围岩固有的自稳能力。

也可以这样来表述,现代围岩承载理论与传统松弛荷载理论的区别在于:开挖坑道后或预计围岩稳定能力不足时,究竟是对围岩进行外部支撑,还是对围岩进行内部加固。传统的松弛荷载理论由于当时的技术、材料的限制和对围岩的认识不透彻,主要着力研究如何对围岩施加外部的支撑(包括临时性的钢木构件和永久性的混凝土衬砌)。现代围岩承载理论则是由于新技术、新材料的成功应用和对围岩认识的加深,主要着力研究如何对围岩施加内部的加固。

应当注意的是,隧道工程都是在应力岩体中开拓地下空间,在实际隧道工程中,并不介意采用什么理论和方法,而应当根据具体工程的各方面条件综合考虑,选择最经济、最合理的设计和施工方案,甚至是多种理论、方法和措施的综合应用。这是一个受多种因素影响的动态的择优过程。

第三节 隧道及地下工程的历史与发展概况

一、隧道工程的历史

隧道的发展历程与人民的水平和生产能力密切相关。人类最早在远古时代就学会了把洞穴作为住处,当社会发展能制造挖掘机具时,就出现了人工挖掘的隧道。古代隧道修建在自身稳定而无须支撑的岩层内,靠人的双手和原始的简单工具开挖。炸药的发明,使得隧道的开挖进入了快速发展的阶段。机械钻孔出现后,用机械开挖取代了人工开挖。混凝土这种建筑材料的出现,将支护坑道的方法由砌筑的砖石结构改为混凝土衬砌结构。随着铁路、公路、城市地铁等的发展,更是推动了隧道工程的发展建设。

纵观世界历史,隧道的发展大体可分为四个阶段。

第一阶段为原始时代:即从人类的出现到新石器时代。这是人类主要利用隧道来防御自然威胁的穴居时代。这个时期的隧道开始是利用天然的洞穴,逐渐地人类开始挖掘一些窑洞来居住。这些洞穴主要修建在自身稳定而无须支撑的地层内。

第二阶段为远古时代:从新石器时代到5世纪。这是一个以生活和军事防御为目的而利用隧道的时代。这一时期的隧道是现代隧道技术的基础。如我国的帝王将相都修建了大量的地下陵墓,我国古籍《左传》中曾记载“隧而相见”,说明当时已经有通道式的隧道了。国外如古巴比伦王朝在公元前2200年为连接宫殿和神殿修建了约1km长的隧道,施工时将幼发拉底河水流改道,采用明挖法施工。

第三阶段为中世纪时代:从5世纪到14世纪。这一时期隧道技术发展缓慢,隧道技术没有显著的进步,隧道主要用于对地下矿山的开采。



第四阶段为近代和现代：从 16 世纪的产业革命开始至今。这一时期由于炸药的发明，加速了隧道的发展。人类对于交通的发展需求、矿产开采的需要、城市发展的要求等加速了隧道设计和施工的水平。而随着其他相关学科的发展，更进一步加快了隧道的发展技术。

1. 世界隧道工程建设简史

国外的隧道最早是用于矿山的开采。用于交通的第一座隧道是公元前 2180 年古巴比伦城中幼发拉底河下修建的一个地下人行道。

随着铁路的发展，1826~1830 年英国利物浦至曼彻斯特的铁路修建了隧道，全长 1190m。1857~1871 年，建立了连接法国和意大利的仙尼斯山隧道，长为 12850m。1988 年日本建成了位于本州和北海道之间横跨津轻海峡的铁路干线上的青函隧道，全长 53850m，是目前世界上最长的铁路隧道；而该隧道有 23300m 在水底，是目前世界上最长的海底隧道。挪威修建的 Aurland—Laerdal 公路隧道，长度达 24500m，是目前世界上最长的公路隧道。

2. 我国隧道工程建设简史

我国隧道工程的建设历史较长，最早用于交通的隧道为“石门”隧道，位于今陕西省汉中市褒谷口内，建于东汉明帝永平九年（公元 66 年）。但我国隧道工程整体发展较慢，隧道设计和施工水平也较落后，建成的隧道规模也较小。1889 年在台湾的台北至基隆修建的窄轨铁路上修建了狮球岭隧道，长 261m，是我国第一座铁路隧道。此后在京汉、中东等铁路上修建了一些隧道。1908 年，京张铁路关沟段建成了 4 座隧道，这是我国通过自己的技术力量修建的第一批铁路隧道，其中八达岭隧道长 1091m。

自 20 世纪 50 年代后期，我国才开始了隧道的大量建设，铁路隧道、公路隧道、输水隧道、城市地铁等各种隧道相继建设，隧道的设计和施工水平也达到了世界先进水平。目前我国是世界上铁路隧道最多的国家。

二、我国隧道发展现状

当今，中国已经是世界上隧道及地下工程建设规模最大、数量最多、地质条件及结构形式最复杂、修建技术发展最快的国家，中国的隧道施工技术及建设成就已经走在世界前列。而随着城市人口的急剧增加，城市生活空间拥挤，交通堵塞等生活交通问题凸显，大量地发展建设地下空间成为解决城市生活拥堵问题的重要手段之一。据统计，我国目前正以每年 10% 的速度进行城市化发展。需要我们建设大量的地下停车场、地下商业街、人行地下通道、城市地铁等地下工程。

从我国修建第一条隧道至今，我国隧道发展可以大体划分为三个阶段：第一阶段是 1949 年新中国成立前，我国整体建设水平落后，这一时期隧道施工主要采用人力，施工机具非常简单，施工速度慢，养护维修水平低；第二阶段为新中国成立后至 20 世纪 70 年代这一时期，这一时期隧道施工技术得到了一定的发展，施工由以前的人力开挖转变为采用中小型机具施工，施工水平整体提升；第三阶段为 80 年代至今，隧道技术得到了飞速发展，这一时期隧道施工由传统的施工方法转变为现代先进的施工技术，主要以光面爆破、喷锚支护、复合式衬砌、盾构施工等为特征，施工中采用监控量测手段，采用信息反



馈模式指导施工。采用新奥法、盾构法、掘进机法等一系列先进的施工方法。从这一时期的隧道施工中取得了一系列隧道施工的新技术、新设备、新工艺等，隧道施工形成了大型、配套的机械化施工。目前我国隧道施工技术已经达到了国家先进水平。

近年来，我国隧道在勘察、设计、施工、运营管理等方面都取得了很大突破。修建了秦岭隧道、乌鞘岭隧道、秦岭终南山隧道、太行山隧道、西格二线新关角隧道等越岭特长隧道和跨越江河湖泊海洋的港珠澳大桥海底隧道、武汉长江隧道、上海崇明岛隧道、南京长江隧道、厦门翔安海底隧道、青岛海底隧道等水底隧道，北京、上海、深圳等 30 多个城市地铁的建设如火如荼，到 2015 年前后，我国 22 个城市将建设 79 条轨道交通线路，总长 2259.84km，总投资 8820.03 亿元。

我国幅员辽阔，山地占国土总面积的 2/3，水系发育，江河纵横，有漫长的海岸线。隧道建设具有数量多、发展速度快、地质条件及施工环境复杂等特点。目前我国建成的最长的铁路隧道为青藏铁路西格二线新关角隧道，隧道全长 32.605km；最长的公路隧道为秦岭终南山隧道，全长 18.02km；世界上最长的输水隧道为辽宁大伙房水库输水隧道，全长 85.32km；世界上海拔最高的铁路隧道是我国青藏铁路位于青海可可西里无人区的风火山隧道，平均海拔 4900m，年均气温零下 7℃，冬季最低气温达零下 41℃，空气中氧气含量只有内地的 50%左右，被喻为“生命禁区”，目前均已经建成使用。表 1-2 为我国部分已建长大隧道名称。

表 1-2 我国已建成的部分长大隧道

序号	线路	隧道名称	长度 (m)	建设年份	线洞
1	青藏铁路西格二线	新关角隧道	32605	2013	单线双洞
2	兰渝铁路	西秦岭铁路隧道	28236	2013	单线双洞
3	石太客专	太行山铁路隧道	27839	2007	单线双洞
4	兰武铁路	乌鞘岭铁路隧道	20050	2006	单线双洞
5	西康铁路	秦岭铁路隧道	18456	1999	单线双洞

三、我国隧道发展前景及技术创新要点

1. 我国隧道发展前景

我国隧道目前发展前景主要表现为以下三个方面。

(1) 我国幅员辽阔，西部地区是我国经济落后地区，也是山岭纵横的地区。由于特殊的地理条件，使得这一地区公路相对比较落后，尤其是西南、西北地区，公路、铁路都比较落后。随着国家对西部大开发的力度加大，这一地区的公路、铁路建设将迎来新的高潮，西南、西北地区多山区，山岭隧道比例很大。

(2) 厦门海底隧道、青岛海底隧道全线贯通，港珠澳大桥海底隧道的施工，开启了我国海底隧道的工程大门，沿江、沿海许多城市开始大量修建水底隧道。

(3) 随着我国城市化进程的推进，城市交通成为我们城市面临的最主要问题之一，解决这一问题的途径之一便是开发立体交通体系，目前全国各大城市纷纷开始修建地铁，缓解城市交通压力。



2. 我国隧道技术创新要点

中国已成为名副其实的隧道大国，在以往的工程实践中，积累了丰富的隧道建设经验，但在工程质量和技术水平上，与先进水平相比还存在差距，我们要在未来的工程实践中，不断探索，开拓创新，积极学习吸取国外隧道建设的先进技术。具体指导思想是：坚持科学发展观，树立服务运输和以人为本的设计理念，以加大科技创新、技术创新和引进吸收再创新为指导，大力推进我国隧道技术的进步。

(1) 推进城市隧道和水下隧道技术的发展。采用隧道下穿城市区域，具有可大量减少城市拆迁、减少对既有建筑物的影响、大大降低铁路噪声、促进铁路与城市和谐发展等诸多优越性。铁路和公路采用隧道方案穿越江河、海湾，在不影响河道的环境、通航和保证列车的全天候运营等方面具有明显优势。在未来的道路建设中，应大力推进城市隧道和水下隧道技术的发展。

(2) 提高隧道机械化施工水平，减轻劳动强度。隧道工程的现代化，必须实现主要工序施工的机械化，要研究开发适合中国隧道作业的专用设备，以先进的机械设备代替大量的人工作业，减轻施工人员的劳动强度，改善隧道工程的施工作业环境，实现文明施工和快速施工，从而保证工程施工的安全和质量。在未来的隧道建设中，对有条件的特长隧道宜优先采用掘进机法施工，对其他长或特长隧道也应采用配套的大型机械化施工，研制开发适合喷射混凝土、架设钢拱架、铺设防水板、钻孔注浆等作业的小型机械进行辅助施工。在有可能的隧道中，要积极采用皮带输送机出渣技术，减少施工干扰，提高施工效率。

(3) 提高隧道防排水技术，减少隧道病害。应进行合理的防排水系统设计，严把防水材料质量关，进一步提高防排水系统施工工艺，积极推广应用可维护防排水系统，确保隧道不渗水、不漏水，减少隧道病害。

(4) 推进隧道信息化施工，发展隧道的超前地质预报技术，加强现场动态设计与科学的施工管理。隧道工程的特点是修建环境和地质条件等不确定因素较多，需要在施工过程中不断优化调整，所以应综合利用超前地质预报技术，完善现场的设计与加强科学管理，推进信息化施工。

(5) 隧道防灾救援措施系统化。目前，中国铁路隧道的运营防灾系统还不完善，随着高速铁路隧道和更多长或特长隧道的建设，我们应加强铁路隧道防灾技术的研究，使隧道的防灾救援措施系统化。

(6) 做好隧道洞口的景观设计。隧道的建设应尽量减少对周围环境的影响，减少洞口边、仰坡的开挖，保护洞口的植被和生态，并选择简洁的洞口结构形式，做好洞口与周围景观协调的设计。

知识拓展

一、日本青函铁路隧道

长久以来，日本本州的青森与北海道的函馆两地隔海相望，中间横着水深流急的津轻