



“十三五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

高速公路隧道工程安全风险评估 理论与实践

薛亚东 黄宏伟 王永义 李彦杰 著

Theory and Practice
of Safety Risk Assessment
for Highway Tunnel Engineering



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

高速公路隧道工程安全风险评估 理论与实践

薛亚东 黄宏伟 王永义 李彦杰 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

全书共包含9章,并以隧道风险评估理论和实践两个主题来安排各章相关内容。第1章介绍了当前公路隧道的发展概况,以及隧道风险评估及管理的研究背景和现状。第2章概述了公路隧道设计与施工的常用理论和方法。第3章提出了完整的隧道风险评估与管理的理论体系,总领全书。第4章通过许多实际案例对隧道工程建设过程中常见的典型事故进行了详细分析。第5章提出和引入了多种风险评估软科学方法。第6章提出了多种动态风险评估方法。第7章提出了基于数值模拟的风险评估新方法的理论,并对该方法的实际操作进行了详细阐述。第8章展示了所建立的基于互联网+的工程安全风险评估与管理智慧云系统,是作者多年从事隧道风险相关工作的成果结晶。第9章是基于风险评估理论与方法进行风险评判的多个工程案例,涵盖从隧道工程设计施工到运营的整个生命周期。此外,本书附带二维码链接数字资源,可下载山岭隧道事故案例库。

本书可供公路隧道工程领域的科研人员、工程技术人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路隧道工程安全风险评估理论与实践/薛亚东等著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.10

ISBN 978-7-114-14953-5

I. ①高… II. ①薛… III. ①高速公路—公路隧道—隧道工程—安全风险—评估 IV. ①U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第181683号

书 名: 高速公路隧道工程安全风险评估理论与实践

著 者: 薛亚东 黄宏伟 王永义 李彦杰

责任编辑: 谢海龙

责任校对: 尹 静

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 28.25

字 数: 676千

版 次: 2018年10月 第1版

印 次: 2018年10月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14953-5

定 价: 145.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

多年来,我从事岩土力学、隧道与地下工程方面的教学与科研工作,深感岩土介质的复杂性与地下工程的诸多不确定性,由此带来了各个方面、不同类型的工程建设风险。尽管国内外业界同仁在岩土力学本构模型、数值模拟计算方法、多场多相耦合分析、地下开挖施工时空效应、岩土加固支护设计施工等方面,都取得了大量的理论与实践成果,但不可否认,很多的工程决策依然基本上依赖工程经验。地下工程的魅力也可能就是源于这里所说的一些问题吧!

地下工程建设是一个复杂的系统工程,基于系统理论与可靠度方法,开展工程风险评估与管理是解决工程建设安全、质量、工期、经济、环境等问题的有效方法。为了提高隧道、桥梁等工程建设的安全管理水平,交通运输部、住房和城乡建设部、中国铁路总公司(原铁道部)等国家部委近年来先后制定颁布了相关的技术指南或规范,为工程建设的安全风险评估与监控管理各方面工作提供了技术依据。但鉴于地下工程的特点,仍需要在理论研究与工程实践方面花大力气开展深入探讨,以提升工程建设管理水平,也为走出国门、开展“一带一路”建设提供技术支持。本书作者撰写的《高速公路隧道工程安全风险评估理论与实践》一书,正是检阅这方面研究与实践成果的一部总结佳作。

这本著作具有一个鲜明的特点,它既阐述理论又重视实践,这也是我本人一直强调的“实践→理论↔实践”的研究方法。在理论方面,本书首先探讨了工程风险评估及管理的概念、方法、程序及其结果,并在指南、规范的基础上提出了具有良好操作性的评估指标体系,进而编制了辅助风险评估的专用软件系统。为了让读者对公路隧道工程的各种风险有一个更直观的理解,作者还收集整理了大量的事故案例资料,并从风险视角进行分类阐述,一些相关案例资料已作为本书附件电子材料供读者下载,这也考虑得很齐全周到。书中专门探讨了风险评估的软科学方法,这是多年前已经在工程实践中已有一定采用的新手段,它很好地解决了地下工程不确定性判断的难题。作者除了介绍改进的德尔菲方法、支持向量机、人工神经网络、贝叶斯网络方法以外,还引入了最新的深度学习方法,这都是很难得的学科交

叉性创新,有望为岩土力学、隧道与地下工程方面的难题提供一种新的构思。考虑到除隧道外,其他各类地下工程还不只是一种长线型结构,它的设计、施工、运营都具有显著的时空效应,因此相关的风险评估不应是静态的,而应该采用动态方法。本书作者强调了动态风险评估的重要性,针对性地提出了动态权重、马尔科夫过程、动态贝叶斯、时间序列等评估方法。考虑到隧道地质超前预报的重要性,在常规地质预报手段的基础上,书中提出了基于深度学习的掌子面围岩分级模型以及超前地质预测模型,为量化的风险评估提供了参数依据。近年来,岩土工程数值模拟分析得到了快速发展与应用,但我本人过去也曾提出其“灰箱”问题的研究局限性,并指出结合监控量测的神经网络方法具有更佳的实用性。本书针对隧道工程面临的数值计算效率低、围岩参数随机性高等问题,提出了基于数值模拟与神经网络的工程失稳概率计算方法,以及基于随机场的数值模拟方法,为量化风险评估提供了一种很好的解决方案。

书中除了详细阐述新颖、实用的工程风险评估理论外,作者还结合多年工程实践构建了基于互联网的风险评估与管理平台,这是十分难得的一次创新实践,也是我多年前就看好的一个方向。随着互联网技术的迅猛发展,现在坐在家里就可以尽观天下事,以前难以查阅和了解的工程信息,都可以快速实时获得,这对工程建设管理将具有极大的推动作用。书中考虑了公路工程建设的规划、勘察设计、施工、运营等全过程,从工程风险评估与管理的要求出发,构建了基于网络的系统平台。为了方便读者理解,作者基于本书论述的风险评估方法以及所开发的系统平台,给出了多个实际工程案例。同时,还为读者提供了系统平台的免费使用账号,这也是很值得推荐的做法。

尽管我已年迈体弱,但对结合工程需求的高质量科研工作还是抱有极大兴趣。在看到本书书稿时,作者们提出让我作序而写述了上面一点文字,期待着本书的早日付梓问世,以飨广大读者。

中国科学院院士 孫 鈞

2018年9月24日中秋佳节于同济园

前言

FOREWORD

改革开放以来,我国高速公路隧道工程经过三十多年的快速发展,无论在建设规模还是施工技术上均取得巨大成就。正如事物的发展都会经历一个由量变到质变的转换过程一样,隧道工程在发展到一定程度或高度之后,其关注点也逐渐从规划、勘察设计施工技术转变到风险评估、管理上来。而各级政府对安全工作的愈加重视,更使此项工作得到莫大助力。但任何新生事物(或早已有之但进展缓慢之事物)在面对纷繁复杂的工程环境与新的要求时,均会出现诸多问题,不能让人满意,当前隧道工程的风险评估与管理工作正是如此。为此,本书提出一些新的理论、方法等,希望能为此项工作的开展提供一些有价值的参考。其中,提供的若干工程案例均为作者在工程实践中的经验总结,可作为工程技术和管理人员的借鉴。而开发的“基于互联网+的工程安全风险评估与管理智慧云系统”是作者从事隧道领域风险工作多年来的结晶,希望能与诸位同行分享,共同提高。

在撰写本书时,国内基础设施建设在历经高潮之后正渐趋理性,“互联网+”理念推广到各个领域,人工智能技术发展如火如荼(其中,“深度学习”技术一枝独秀)。时代的需要,不同领域技术的碰撞,为本书内容提供了诸多灵感,软科学方法、拟数值模拟方法等思想皆由此而来。纵观社会、科技发展,任何领域都不能封闭自固,而需要从其他行业或领域借鉴有利的因素来促进自身的发展。在21世纪的互联网时代,隧道工程的风险评估和管理也需要以协作、互通、共享的理念以及移动应用、新型浏览器、BIM等新技术,来实现自身的变革和进步。正是考虑到这些因素以及实际工程的需要,开发基于互联网的用于隧道工程风险评估和管理的系统已成为大家一致的共识,本书在这方面开发了一个包含多个功能模块的系统平台,并在多个实际工程中得以应用。当然,鉴于科技发展的日新月异,各种新技术和新思想层出不穷,因此欢迎各位读者尝试我们开发的系统,并提出宝贵的意见和建议。

在当下的大数据时代,数据的价值更加凸显,丰富的工程数据是工程领域的宝贵财富。本书通过多种方式搜集了隧道工程施工期和运营期的大量工程事故案

例,建立了隧道工程的事故案例库,这为我们开展隧道工程风险评估和管理工作提供了坚实基础。在此也一并奉上,希望能为大家提供有价值的参考。同时,我们还在建构隧道工程领域的风险知识数据库,包含大量的文本、图片、音视频等信息,未来可实现这些数据的互通共享,希望通过我们的不懈努力,建成隧道工程领域的风险知识图谱,为各位同仁服务。

理论联系实际并服务于实践是我们一贯的态度与追求。本书在探讨隧道工程风险评估理论的同时,尽量能结合实际案例给予说明。但鉴于隧道工程的复杂性,相关理论的适用性尚需在实践中完善。尽管国内外已颁布实施了多部隧道工程相关的手册、指南或者规范,但在工程实践中,作者发现仍存在诸多问题,包括工程风险的概念理解、风险分析评估的目的与方法、工程风险评估、管理的动态时效性等,导致风险评估与管理的相关工作不能有效落实。借助于数值仿真分析、监控量测、大数据分析、网络、人工智能等技术发展,为隧道工程安全风险评估与管理提供了理论支持与实践平台。

本书是作者多年从事相关科研工作成果的总结。国家自然科学基金委员会、上海市科学技术委员会、中建交通建设集团有限公司,浙江省交通规划设计研究院、贵州黔贵工程技术服务咨询有限公司、中交第二公路勘察设计研究院有限公司、云南省交通规划设计研究院等为相关研究提供了资助与支持。研究生赵丰、杨睿、李宜城、赵翰翔、赖涌峰、高健、张森、李兴等参与了书稿的部分工作。软件系统开发方面,王青参与了系统架构与代码实现;工程风险可视化方面,刘铁中、张天武参与了部分现场工作。在此对给予作者支持与帮助的单位 and 人员表示衷心的感谢!

特别感谢孙钧院士在本书撰写过程中给予的关心与指导,并在百忙之中为本书作序!谨记“Never say too old & too late to learn & to do!”

江河成于涓流,发展在于积累。希望本书所做的工作能为隧道工程风险评估和管理理论的发展贡献一份绵薄之力。由于作者水平有限,本书难免存在错误和不足之处,恳请有关专家和读者批评指正。

作者

2018年8月于同济园

目录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 公路隧道发展现状	1
1.2 风险评估与管理背景	9
1.3 风险评估及管理研究现状	10
1.4 本书内容与章节分配	16
第2章 公路隧道工程设计与施工方法简介	17
2.1 公路隧道工程设计方法	17
2.2 公路隧道工程施工方法	39
第3章 风险评估及管理理论体系	49
3.1 风险机理	50
3.2 风险评估与管理流程	51
3.3 风险评估指南	60
3.4 风险评估与管理平台	87
第4章 公路隧道建设典型事故分析	92
4.1 洞口失稳	92
4.2 塌方	97
4.3 软岩大变形	101
4.4 涌水突泥	106
4.5 岩爆	114
4.6 瓦斯爆炸	120
4.7 TBM 隧道典型事故	125
第5章 风险评估软科学方法	133
5.1 改进德尔菲方法	133
5.2 支持向量机方法	144
5.3 人工神经网络方法	149
5.4 贝叶斯网络方法	157
5.5 深度学习方法	170
5.6 BIM 技术	176
5.7 ICI 蒙德法	182

5.8	案例实证分析	185
5.9	本章小结	187
第6章	动态风险评估方法	189
6.1	基于动态权重的隧道施工安全风险评估新方法	189
6.2	基于马尔可夫过程的风险指标动态预测方法	195
6.3	基于动态贝叶斯的水风险评价方法	205
6.4	基于深度学习的隧道掌子面地质辨识和超前预测	210
6.5	隧道施工时间序列数据降噪、分析和预测	218
6.6	本章小结	229
第7章	基于数值模拟的工程风险分析	230
7.1	新思路与实现方法	231
7.2	数值模拟方法分析隧道工程风险	234
7.3	基于随机场理论的隧道工程风险分析	238
7.4	隧道壁后空洞数值分析	245
7.5	本章小结	255
第8章	基于“互联网+”的工程安全风险评估与管理智慧云系统	256
8.1	工程需求	256
8.2	系统框架搭建	265
8.3	功能介绍	268
8.4	本章小结	334
第9章	工程案例	335
9.1	杭绍台高速公路隧道工程初步设计安全风险评估	335
9.2	贵州盘县至兴义高速公路隧道工程施工安全风险评估	344
9.3	湖南益阳至马迹塘高速公路隧道和边坡工程施工安全风险可视化	356
9.4	黄土岭隧道运营期病害分析	366
9.5	塔石岭隧道上跨既有隧道爆破影响分析	377
附录A	山岭隧道施工事故案例(二维码)	389
附录B	贝叶斯网络节点条件概率表	390
附录C	专家调查问卷	401
附录D	风险可视化相关数据	403
D.1	传感器参数	403
D.2	变形预警、报警值	404
D.3	部分传感器的变形监测曲线	405
附录E	隧道运营期病害调查	409
E.1	病害调查表	409
E.2	病害案例表	415
	参考文献	425

第 1 章 绪 论

1.1 公路隧道发展现状

1.1.1 公路隧道发展概况

截至 2017 年年底,世界上已建成的长度超过 8km 的公路隧道约 50 座,其中,隧道长度超过 10km 的近 50%。前期世界长大公路隧道多建于欧洲:挪威的洛达尔隧道,长度 24.5km;瑞士的圣哥达公路隧道,长度 16.9km;意大利的弗雷瑞斯公路隧道,长度 12.9km;而全长 18.2km 的山手隧道,是日本最长的公路隧道,也是目前亚洲最长的公路隧道。

我国是一个地形复杂的国家,山地、高原和丘陵约占陆地面积的 67%,其中仅山地和丘陵的面积就达到了 43%。复杂多样的地形给交通运输的发展造成了巨大阻碍。在这些地区进行公路基础设施建设就势必要开挖穿越山岭的隧道,以满足运输便利性、工程技术标准等要求。随着我国经济水平的不断提高,以及隧道建设技术的不断完善,在公路建设中,已广泛采用挖掘隧道的方式穿山越岭。王梦恕院士(2004)指出“我国是一个多山的国家,开发中西部又是今后我国的国策,发展山区交通,使山区人民脱贫致富是我国的具体目标。高速、准高速铁路、公路的发展和建设又是 21 世纪的特色;21 世纪必然出现大量隧道工程,必然带来长隧道的增多。‘多’和‘长’是 21 世纪山岭隧道修建的两大特点。”

我国交通运输行业发展统计公报提供的数据显示,2014 年年底,我国投入运营的公路隧道为 12 404 座、10 756.7km。其中,特长隧道 626 座、2 766.2km,长隧道 2 623 座、4 475.4km。2015 年年底,我国投入运营的公路隧道 14 006 座、12 683.9km,比 2014 年新增 1 602 座、1 927.2km。其中,特长隧道 744 座、3 299.8km,长隧道 3 138 座、5 376.8km。2016 年年底,我国投入运营的公路隧道 15 181 座、14 039.7km,比 2015 年新增 1 175 座、1 355.8km。其中,特长隧道 815 座、3 622.7km,长隧道 3 520 座、6 045.5km。2017 年年底我国投入运营的公路隧道 16 229 座、15 285.1km,比 2016 年新增 1 048 座、1 245.4km。其中,特长隧道 902 座、4 013.2km,长隧道 3 841 座、6 599.3km。图 1-1 所示为我国 2012~2017 年公路隧道数量和长度的发展现状。

截至 2017 年年底,我国已建成且长度超过 5km 的公路隧道有 120 多座。世界长度排名前 10 的公路隧道中有 5 座位于中国(包括台湾雪山隧道)。秦岭终南山隧道为我国第一长双洞公路隧道,全长 18.02km。拟建平绵高速公路插岗梁隧道位于甘肃境内,全长 22.6km,建成后将成为中国第一、世界第二长的高速公路隧道。我国长度超过 10km 的在建公路隧道工程包括四川二郎山隧道、新疆东天山隧道、云南老营隧道等,拟建公路隧道数量则超过 10 座。

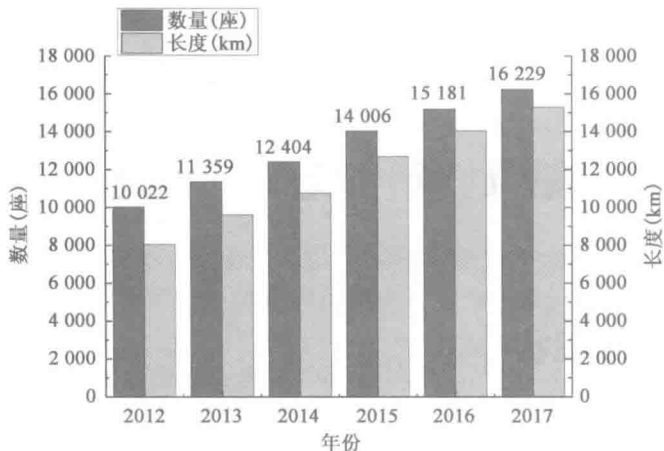


图 1-1 运营公路隧道工程现状

在隧道数量和建设规模得到迅速发展的同时,我国山岭高速公路隧道修建技术取得长足进步。20 世纪 80 年代后,随着新奥法的推广,以钻爆法开挖为主的山区公路隧道修筑技术在我国日趋成熟。我国隧道建设者已完全掌握了山岭双洞四车道隧道、双洞六车道隧道、双洞八车道隧道、连拱隧道、分岔隧道、大跨连拱隧道、小净距隧道、大跨小净距隧道等的修建技术,以及隧道改扩建技术和大型地下立交建设技术(李献民,2015)。山岭隧道已真正成为高标准公路建设中一种必不可少的手段。

1.1.2 典型公路隧道实例

近年来我国公路隧道建设发展迅速,已成为世界上公路隧道数量最多、类型最全、结构最复杂、发展最快的国家。以下列举了一些国内外比较典型的公路隧道工程。

1) 洛达尔隧道

洛达尔隧道是世界最长单洞公路隧道,位于挪威西部的洛达尔和艾于兰之间,全长 24.51km。于 1995 年 3 月开始施工,2000 年 11 月 27 日正式通车。整个工程项目共耗资约 1 亿美元,由挪威国王哈拉尔五世为其剪彩通车。图 1-2 所示为洛达尔隧道南口。

2) 山手隧道

山手隧道是世界最长双洞公路隧道,日本东京都首都高速道路中央环状线新宿线(C2)的一部分,自丰岛区的高松出入口至品川区的大井交流道为止,全长 18.2km。几乎全线均位于山手通以及目黑川地底下,深约 30m,其中 70% 的部分使用 TBM(Tunnel Boring Machine)工法建造。隧道分为两条,分别为北向车道和南向车道。

山手隧道的延伸隧道(中央环状品川线的主要部分)则从 2007 年 12 月 12 日起开始施工,于 2015 年 3 月 7 日全线通车,成为日本最长公路隧道及亚洲最长公路隧道。图 1-3 所示为山手隧道内部结构图。

3) 秦岭终南山隧道

秦岭终南山隧道是世界第二长双洞公路隧道,位于国道主线包头至北海段(包茂高速公路 G65)在陕西境内的西康高速公路北段,穿越秦岭山脉的终南山,长 18.02km,双孔、四车道,

设计行车速度 80km/h,总投资 25.8 亿元人民币。工程于 2002 年 3 月动工,2004 年 12 月 13 日贯通,2007 年 1 月 20 日正式通车,是当时世界上最长双洞公路隧道。图 1-4 所示为终南山隧道洞口。

隧道洞内设人字形纵坡,最大纵坡为 1.1%,最大埋深为 1 640m。设置有 3 座通风竖井,最大井深 661m,最大竖井直径 11.5m。图 1-5 所示为终南山隧道通风竖井示意图。

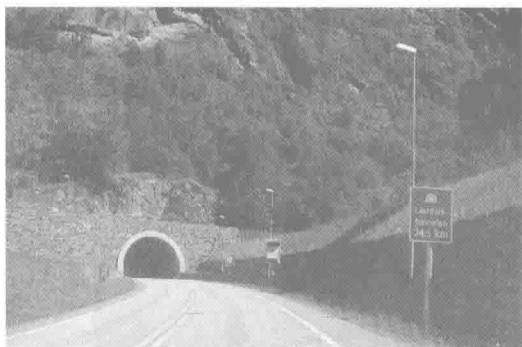


图 1-2 洛达尔隧道南口

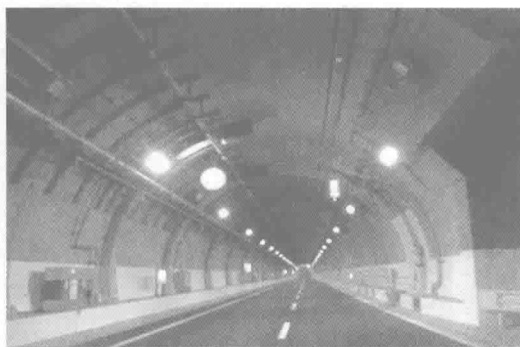


图 1-3 山手隧道内部结构图



图 1-4 秦岭终南山公路隧道洞口

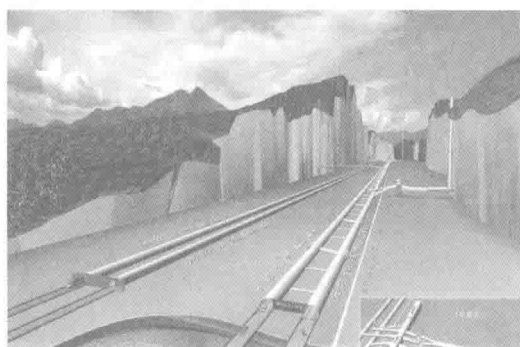


图 1-5 秦岭终南山公路隧道竖井示意图

4) 港珠澳大桥海底沉管隧道

港珠澳大桥东连香港,西接珠海、澳门,全长 55km,其中海中主体工程长 29.6km,按双向六车道高速公路标准建设,采用桥岛隧结合方案,是目前世界上规模最大、标准最高、最具挑战性的集桥、岛、隧为一体的交通集群工程。港珠澳大桥平面布置如图 1-6 所示(吕勇刚,2017)。

沉管隧道是港珠澳大桥的控制性工程,是中国第一条外海沉管隧道,是目前世界上最长的公路沉管隧道。隧道全长 6 704m,沉管段长 5 664m,共 33 节,标准管节尺寸为 180m(长)×37.95m(宽)×11.4m(高),以每节近 8 万 t 的质量成为世界之最。隧道管节由一个长约 12m、质量达 6 500t 的最终接头拼接而成,并通过珠江口伶仃洋南北侧两个面积近 10 万 m² 的离岸人工岛相连。为满足通航要求,沉管管顶埋于海床面以下 23m 的长度达 3km,是目前世界上唯一的深埋沉管隧道工程。沿线基底软土厚度 0~30m,地处珠江口外开敞海域,水文气象环境复杂,航线繁忙,通行船舶日均 4 000 余艘。隧道于 2017 年 7 月 7 日全线贯通,设计使用寿命为 120 年。图 1-7 和图 1-8 分别为沉管隧道的纵断面图和横断面图。

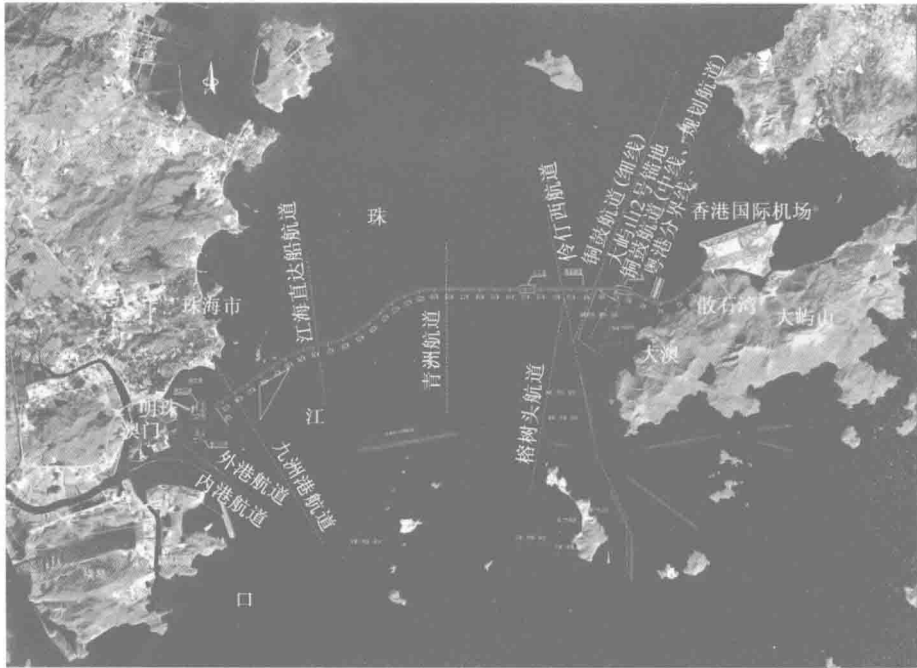


图 1-6 港珠澳大桥平面图

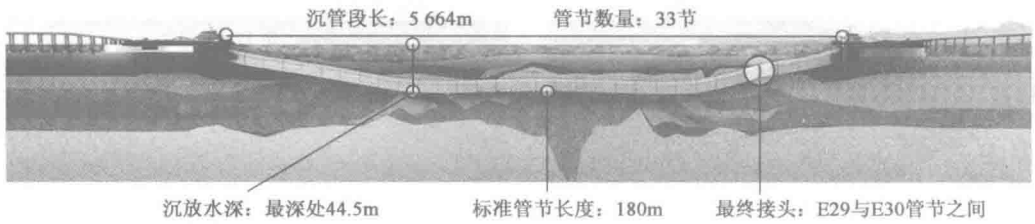


图 1-7 沉管隧道纵断面图

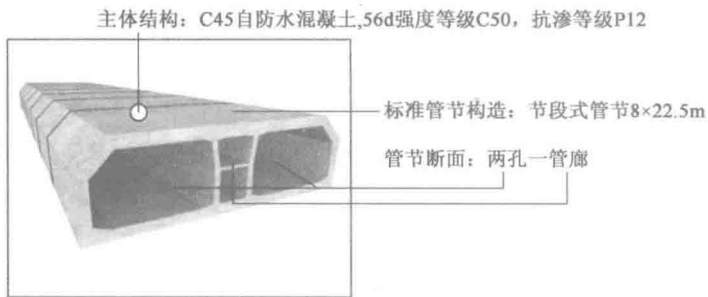


图 1-8 沉管隧道横断面图

5) 拱北隧道

拱北隧道是国内最大断面的高速公路隧道、世界最长的超大断面曲线管幕隧道。其位于广东珠海,是港珠澳大桥的重要组成部分,下穿我国日通关量最大的陆路口岸——拱北口岸,由海中隧道和城市地下隧道两部分组成,全长2741m,双向六车道,开挖断面尺寸为宽19m、高21m,面积达336.8m²。于2016年12月28日贯通。图1-9所示为拱北隧道示意图。



图1-9 拱北隧道示意图

由于口岸对地表沉降控制要求极其严格,工程采用管幕冻结预筑法通过拱北口岸限定区域。隧道超前支护采用顶管及冻结帷幕,顶管采用大直径管幕36根,待顶管作业完成后进行分区域冻结形成止水帷幕,然后进行隧道的开挖支护及衬砌。

6) 南京扬子江隧道

南京扬子江隧道,又名南京纬三路过江通道,连接南京鼓楼区与江北新区。其位于南京长江大桥上游约5km处,距离南京长江隧道约8km,是世界水压最高的盾构公路隧道。隧道为双管双层、X形八车道结构。隧道分南线与北线,南北线的江北出口均在铺镇大街;南线的江南出口位于定淮门大街,全长7360km;北线在江南与扬子江大道相连,全长7340km,如图1-10所示。隧道开挖直径为14.98m(泥水盾构直径14.93m,设计隧道外径14.5m、内径13.3m),与相邻的南京长江隧道(纬七路)相通,在国内大型越江盾构隧道中,仅次于已建成的上海长江隧道和钱江隧道(两者盾构直径15.43m,隧道直径15m)。隧道内分上下两层,每层设两个车道,上层为江北到江南,下层为江南到江北。它是世界上同类隧道中规模最大、长度最长、地质最复杂、水压最高的隧道,被誉为“江底70米深处的世界级工程”。

工程中使用的国内自主知识产权最大泥水气压平衡复合式隧道盾构机,由中交天和机械设备制造有限公司研制,刀盘直径14.93m,如图1-11所示。

7) 红专路隧道

红专路隧道是世界断面最大的矩形顶管隧道,位于河南郑州,起于红专路与姚寨路交叉口,沿红专路向东下穿中州大道,终点位于红专路与龙湖外环路交叉口,全长801.263m,为四孔隧道。其中,中间两孔为机动车道,双向四车道;两侧两孔为非机动车道和行人通道。隧道断面尺寸为7.5m×10.4m。图1-12所示为红专路隧道盾构施工始发图。

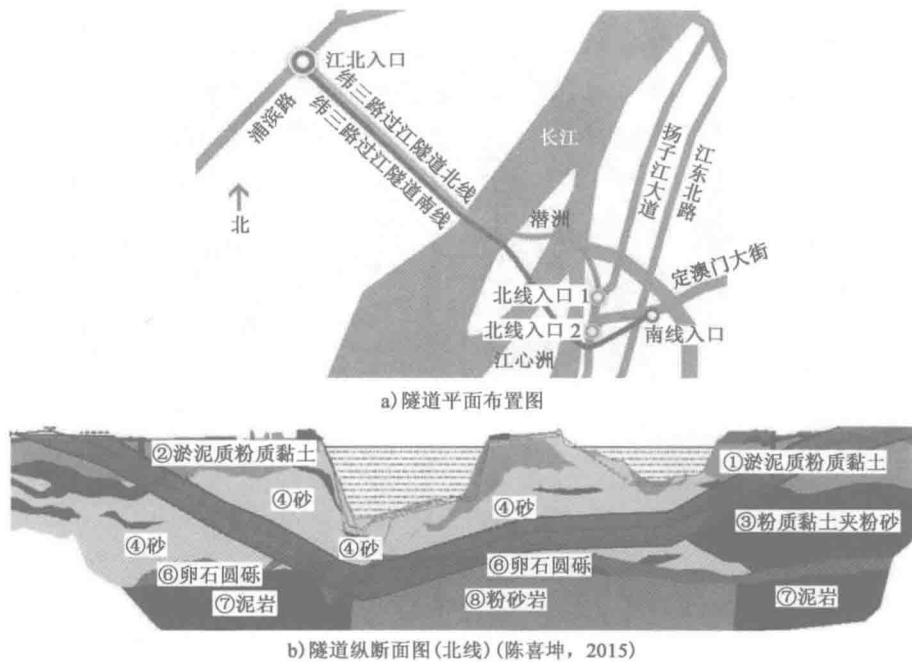


图 1-10 南京扬子江隧道示意图

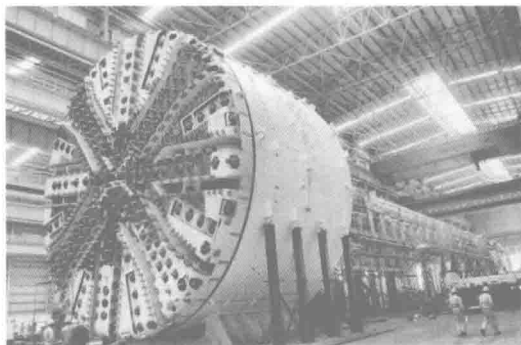


图 1-11 南京扬子江隧道施工泥水平衡盾构机



图 1-12 红专路隧道盾构施工始发

8) 厦门翔安海底隧道

厦门翔安海底隧道,位于福建厦门,连接厦门岛和翔安区。全长 8 695m,其中海底部分长 4 200m。于 2005 年 8 月 9 日动工,2009 年 11 月 6 日全线贯通,2010 年 4 月 26 日正式通车。该隧道是第一条由国内专家自行设计的海底隧道,也是世界上第一条采用钻爆法施工的海底隧道。图 1-13 所示为翔安隧道洞口。

9) 瘦西湖隧道

瘦西湖隧道是世界直径最大的单洞双层公路隧道,位于江苏扬州,下穿瘦西湖,全长 3.6km,其中主体盾构段长 1 275m,直径 14.5m。于 2011 年 8 月 21 日动工,2013 年 12 月 10 日贯通,2014 年 9 月 19 日正式通车。图 1-14 所示为瘦西湖隧道内部结构示意图。

隧道主体盾构段采用直径为 14.93m 的世界超大直径泥水平衡盾构机(德国海瑞克公司研制)施工,穿越长达 1.2km 的全断面硬塑黏土地层,解决了盾构施工的世界级难题。



图 1-13 翔安海底隧道洞口

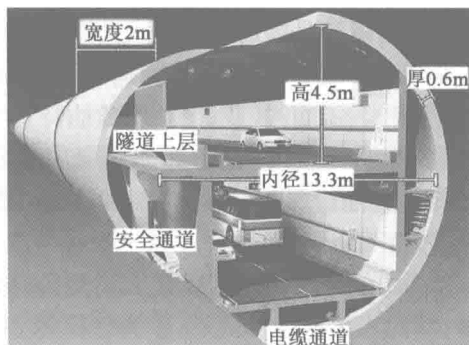


图 1-14 瘦西湖隧道内部结构示意图

10) 国内其他有代表性的隧道工程

(1) 打浦路隧道

打浦路隧道是国内第一座水底公路隧道,位于上海,穿越黄浦江底,全长 2 736m。于 1966 年动工,1970 年 10 月贯通,1971 年 6 月正式通车。

(2) 龙头山隧道

龙头山隧道是国内第一座双洞八车道高速公路隧道,位于广州黄埔区广州东二环高速公路,上下行分离式隧道,左线长 1 010m,右线长 1 006m,最大开挖宽度 21.47m,最大开挖高度 13.56m,于 2008 年 6 月建成通车。

(3) 武汉长江隧道

武汉长江隧道是国内第一座穿越长江的隧道,位于武汉长江一桥和长江二桥之间,为左右两条单洞式隧道、单向两车道。于 2004 年 11 月 28 日动工,2008 年 12 月 28 日建成通车,为首条穿越长江的隧道。隧道左线长 2 550m,右线长 2 499.2m,利用一台大断面泥水平衡盾构机(直径 11.38m)掘进,两隧道间设置了 5 条联络通道。

(4) 万石山隧道和钟鼓山隧道

万石山隧道和钟鼓山隧道是国内第一座地下立交互通隧道,位于福建厦门阳台山山体内,钟鼓山隧道为双洞四车道,北行隧道长 1 227.573m,于 1986 年通车,南行隧道长 1 101.911m,于 1995 年通车。万石山隧道为双洞六车道,左洞长 1 300.5m,右洞长 1 255m,下穿钟鼓山隧道,并与钟鼓山隧道通过 3 条匝道连接。整个隧道群由 7 条隧道构成,全长 5 852.384m,于 2008 年全部建成通车。

(5) 青岛胶州湾海底隧道

青岛胶州湾海底隧道是国内最长的海底隧道,于 2006 年 12 月 27 日动工,2010 年 4 月 27 日贯通,2011 年 6 月 30 日通车。隧道全长 7 800m,其中海底段长约 3 950m,断面最大跨度 28.20m,最深处位于海平面以下 82.81m。隧道分为 2 条主隧道、1 条服务隧道和 2 条匝道,其中主隧道均为单向三车道,净宽 13.5m;匝道净宽为 8.5m 和 9.5m。隧道穿越青岛胶州湾湾口海域,两端分别位于青岛市市南区台西片区的团岛和黄岛区的薛家岛。隧道共穿越 18 条断层破碎带。

(6) 锦屏山隧道

锦屏山隧道是国内埋深最大公路隧道,位于四川凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁县交界处的雅砻江干流上,处于三大河湾之一的锦屏大河湾的中间。它既是为锦屏一级、锦屏二级、卡拉、杨房沟、孟底沟等水电站服务的特长交通隧道,又是锦屏二级水电站引水隧洞施工的超前勘探洞和施工辅助洞,于2008年8月8日全线贯通。

隧道长约17500m,最大埋深2375m,埋深大于1500m的洞段占隧道总长的73.1%。

(7) 金鸡山隧道

金鸡山隧道是国内跨径最大高速公路双连拱隧道,位于福建省福州机场高速公路,全长295m,双向八车道连拱隧道,单洞跨径18.198m,连拱隧道总跨度达41.498m,于2010年8月通车。

(8) 东山隧道

东山隧道是国内最长纯黄土公路隧道,位于陕西志丹县境内的延吴高速公路,为分离式双向四车道黄土隧道,左洞全长4925m,右洞全长4914m。于2013年12月19日建成通车。

(9) 嘎隆拉隧道

嘎隆拉隧道是国内坡度最大公路隧道,位于西藏波密县与墨脱县之间,是我国最后一条通县城公路——墨脱公路的控制性工程,横穿岗日嘎布山,全长3310m,平均海拔3700m,隧道纵坡度为4.1%,于2010年12月15日贯通。

(10) 延安东路隧道

延安东路隧道是上海连接浦东与浦西、跨越黄浦江的一条主要道路,由南北两条隧道组成,共4条行车道,是上海的一座观光隧道。隧道浦西出口位于延安东路福建中路口,浦东出口则位于世纪大道银城中路口,直接连接世纪大道。全长2261m,穿越黄浦江的部分有1476m。隧道北线于1984年12月18日开始兴建,1989年11月29日正式通车;隧道南线于1994年1月18日动工,1996年11月29日正式通车。该隧道在高峰时段交通极为繁忙,实际流量远超设计值。

(11) 上海长江隧道

上海长江隧道是崇明越江通道的一部分,起自浦东新区五号沟,穿越长江西南港水域于长兴岛西南方登陆,接上海长江大桥,全长8950m,于2009年10月31日正式通车。隧道为双层结构:上层为道路,设计为双向六车道,设计速度80km/h;下层为轨道交通线路预留。

(12) 雪山隧道

雪山隧道是一座开凿于1991年至2006年、长度近13km的公路隧道,位于台湾省新北市坪林区与宜兰线头城镇之间,属于北宜高速公路横贯雪山山脉的路段,并因其超高的施工难度而名列《大英百科全书》。整个工程使用了两大一小共三台全断面隧道掘进机(TBM)进行快速掘进。其中一部大型TBM在掘进隧道东口工程时,通过硬度比钢还要高的四棱砂岩地层,并遭遇大涌水;在挖掘过程中,共发生过63次岩盘崩落,TBM曾26度受困。另一部TBM在一次隧道崩塌事故中,被大量土石掩埋而损毁报废,导致后续工程不得不采用钻爆法进行开挖。