



中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

隧道与地下工程 防排水指南

第二版

SuiDao Yu DiXia GongCheng FangPaiShui ZhiNan

吕康成 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书内容涵盖了山岭隧道、连拱隧道、寒区隧道、岩溶隧道、城市地铁、沉管隧道等不同类型隧道及地下工程的防排水设计、施工的要点、疑点、难点;书中还汇总了国内外隧道渗流水的治理措施,全面介绍了可用于隧道防排水工程的材料。本书内容全面,资料翔实。

本书可供从事隧道与地下工程设计、施工、科研工作的工程技术人员使用,亦可供相关专业的本科生、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道与地下工程防排水指南/吕康成编著. —2 版

. —北京:人民交通出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-114-09605-1

I. ①隧… II. ①吕… III. ①隧道工程—防水—指南
②隧道工程—排水—指南③地下工程—防水—指南④地下
工程—排水—指南 IV. ①U453.6-62②TU96-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 009231 号

书 名:隧道与地下工程防排水指南

著 作 者:吕康成

责任编辑:王 霞 (wxccpress@126.com)

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010) 59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京交通印务实业公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:26.75

字 数:650千

版 次:2012年3月 第2版

印 次:2012年3月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09605-1

定 价:68.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

改革开放以来,我国经济的发展带动了交通的发展,交通的发展又促进了经济的发展。在此过程中,作为交通基础设施重要组成部分的各种隧道也迅速发展。隧道愈建愈多,隧道愈建愈长,隧道的建设条件和结构形式愈来愈复杂,我国各种隧道的数字纪录不断被刷新。但是,在我国隧道建设取得巨大成就的同时,也应该看到,许多隧道也不同程度地出现了各种质量问题,其中尤以隧道渗漏水这一通病最为突出。隧道渗漏水不仅直接影响行车安全,而且还降低隧道通风、照明系统的工作效率,诱发运营设施的锈蚀,影响隧道结构的耐久性。在寒冷地区,隧道的渗漏水还与冰冻互为因果,危害更大,使防治更难。因此,不论是公路隧道、铁路隧道,还是地铁隧道,都对防排水工程十分重视。为了及时总结我国在隧道防排水方面的成功经验,促进各种隧道防排水技术的发展,减轻乃至避免渗漏水对隧道的种种危害,我们编写了此书。

本书是在大量收集资料的基础上,去粗取精,并融入了我们多年的教学、科研实践的体会而完成的。书中主要介绍我国山岭隧道防排水技术的研究成果、设计与施工经验;对目前工程界普遍关心的热点问题——连拱隧道的防排水、寒冷地区隧道的防排水和岩溶地区隧道的防排水也设专章进行重点讨论。考虑到我国有大量的已建隧道需要日常养护与进行渗漏水治理,书中还对隧道渗漏水产生的原因、治理方法、适用的材料和施工工艺等也作了介绍。

本书编写分工是:第三章由徐爱民、吕康成执笔;第四章由王新华、李创军、吕康成执笔;第五章由崔凌秋执笔;第六章由吕康成、伍毅敏执笔;第七、八、十章由伍毅敏、王飞执笔;其余章节由吕康成执笔。全书由吕康成统稿。

在编写本书过程中,得到了郑颖人院士的悉心指导,在此深表谢意。另外,在编写过程中,引用、参考了大量的有关资料,在此对原作者也顺致谢忱。

水平所限,书中错误难免,敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 12 月

第二版前言

改革开放以来,我国经济的发展带动了交通的发展,交通的发展又促进了经济的发展。在此过程中,作为交通基础设施重要组成部分的各种隧道也迅速发展。隧道越建越多,隧道越建越长,隧道的建设条件和结构形式越来越复杂,我国各种隧道的纪录不断被刷新。但是,在我国隧道建设取得巨大成就的同时,也应该看到,许多隧道也不同程度地出现了各种质量问题,其中尤以隧道渗漏水这一通病最为突出。隧道渗漏水不仅直接影响安全行车,而且还降低隧道通风、照明系统的工作效率,诱发运营设施的锈蚀,影响隧道结构的耐久性。在寒冷地区,隧道的渗漏水还与冰冻互为因果,危害更大,使防治技术更难奏效。因此,不论是公路隧道、铁路隧道,还是地铁隧道,都应对防排水工程十分重视。为了及时总结我国在隧道防排水方面的成功经验,促进各种隧道防排水技术的发展,减轻乃至避免渗漏水对隧道的种种危害,作者编写了此书。

本书是在大量收集资料的基础上,去粗取精,并融入了作者多年的教学、科研实践的体会而完成的。特别是受西部交通建设科技项目“寒冷地区公路隧道冻害雪害防治技术研究”的支持,作者对山岭隧道的防排水技术进行了系统试验研究,取得了以下创新性成果,并收集于书中:

1. 开发了防水层 LV 铺设法。该法将塑料组件在工厂或隧道洞外按适当间隔固定在防水层上,施工时用射钉固定塑料组件,借此铺设防水层。LV 铺设法施工方便,施工质量可靠,减少了防水层工间损伤机会。

2. 通过防水层工后力学性态试验,揭示了防水层在服务期间的受力变形规律,据此提出了保护防水层长期完好性的工程措施。

3. 开发了防止隧道衬砌施工缝(包括伸缩缝、沉降缝)渗漏水的可排水中埋式止水带。可排水中埋式止水带给止水带增加了排水功能,在施工缝防水中实现了先排后堵的“无压止水”。

4. 开发了施工缝蝶形中埋式止水带。通过巧妙造型,蝶形中埋式止水带解决了中埋式止水带不易安装的问题。

5. 开发了施工缝梯形背贴式排水止水带。该止水带给背贴式止水带也增加了排水功能,通过采用梯形断面与适宜的几何参数,使背贴式止水带不论在隧道两侧还是在洞顶,其防水可靠性均明显提高。

6. 为了扬背贴式止水带易于安装之长,避其在洞顶周围难以密实之短,开发了辅助背贴式止水带在洞顶安装的人工假顶技术。

7. 开发了施工缝止水带无接头施工工艺,避免了因接头不严而造成的隧道施工缝渗漏水

问题。

8. 探讨了寒冷地区隧道的冻胀问题,明确指出发生在衬砌壁后的冻胀现象不会对隧道结构安全构成严重威胁,发生在衬砌结构内的因渗漏水而引发的冻融现象会对隧道长期稳定产生不利影响。

9. 在地表温度按正弦规律变化,地层一定深度处温度为恒温,地层为单一介质条件下,导出了地面表层温度随时间与深度变化的解析解,为寒冷地区隧道冻结深度估算提供了依据。

10. 基于寒冷地区隧道冻害机理分析,提出了设置直通中央排水管的隧道环向排水通道,并在必要时采用条带保温法防冻。

11. 开发了寒冷地区隧道衬砌设置电伴热防冻技术,若隧道因冰冻而导致环向排水不畅并诱发冻害时,启用该技术形成的解冻预案,能使隧道衬砌壁后冰冻融解并形成环向排水通道。

12. 基于对寒冷地区隧道冻害的系统分析与研究,提出了“严密防水、妥善排水、酌情保温、急时供热”的寒冷地区隧道冻害设防理念,并编写了《寒冷地区隧道防冻设计指南》。

13. 开发了隧道施工缝渗漏水结构微创伤处治技术。基于研制的衬砌混凝土专用割缝机具,该技术能在可靠处治施工缝渗漏水的前提下,减少对隧道衬砌结构的损伤,并使处治效果可工间检测,处治部位可工后维护。

渗漏水一直困扰着我国隧道与地下工程的安全运营,如果作者的上述工作及前期的其他研究成果能通过本书介绍给同行,并能对提高我国隧道与地下工程渗漏水防治水平有些许贡献,作者将十分慰藉。

在编写本书过程中,得到了郑颖人院士的悉心指导,在此深表谢意。另外,书中引用、参考了大量的有关资料,在此对原作者也顺致谢忱。研究生伍毅敏、吉哲和马超超等参加了计算分析和编排校对等工作,在此也表示感谢。

受水平所限,书中错误难免,敬请广大读者批评指正。

吕康成

2011年11月于长安大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 我国隧道建设的发展	1
第二节 我国隧道防排水技术的发展	2
第三节 我国隧道防排水工程存在的问题	4
第二章 隧道地下水环境	8
第一节 地下水的贮存形式	8
第二节 地下水的运动规律	14
第三节 地下水对隧道工程的不良影响	18
第四节 隧道涌水量估算	21
第五节 隧道衬砌水压力	23
参考文献	28
第三章 一般山岭隧道防排水	30
第一节 概述	30
第二节 山岭隧道防排水体系的组成	31
第三节 围岩注浆	34
第四节 喷射混凝土与隧道防排水	53
第五节 隧道排水系统	59
第六节 隧道防水层	62
第七节 衬砌混凝土防水	72
第八节 衬砌施工缝与变形缝	82
第九节 隧道分区防水	94
第十节 一般山岭隧道防排水实例	96
参考文献	109
第四章 连拱隧道防排水	110
第一节 连拱隧道的分类与特点	110
第二节 整体浇筑直中墙连拱隧道防排水	112
第三节 整体浇筑直中墙连拱隧道的防排水改进	117
第四节 地铁连拱隧道综合防排水技术	120
第五节 分次浇筑曲中墙连拱隧道防排水	128
第六节 分次浇筑直中墙连拱隧道的应用	132
参考文献	135

第五章 寒冷地区隧道防排水及冻害预防	136
第一节 早期铁路隧道保温防冻设计	136
第二节 寒区隧道温度场和渗流场	141
第三节 寒冷地区隧道春融期渗漏水原因及预防	156
第四节 寒冷地区隧道冻融问题	160
第五节 隧道衬砌裂缝成因及预防	168
第六节 寒冷地区隧道防水与排水	175
第七节 寒冷地区隧道保温与供热	184
第八节 寒冷地区隧道防冻设计指南	193
参考文献	196
第六章 岩溶地区隧道防排水	198
第一节 岩溶地下水	198
第二节 岩溶地下水对隧道工程的影响	200
第三节 岩溶隧道涌水超前地质预报	207
第四节 岩溶地区隧道防排水的要求	216
第五节 岩溶地区隧道防排水工程实例	218
参考文献	227
第七章 城市地铁工程防排水	228
第一节 城市地铁工程简介	228
第二节 城市地铁构造特点与防排水要求	238
第三节 明挖法与新奥法施工的地铁工程防排水	241
第四节 盾构法施工的地铁隧道防排水	252
第五节 盾尾间隙注浆	259
第六节 地铁工程细节构造防排水	262
第七节 城市地铁防排水实例	274
参考文献	291
第八章 沉管隧道防排水	292
第一节 概述	292
第二节 沉管隧道构造及防排水特点	294
第三节 沉管隧道防水设计与施工	298
第四节 广州珠江沉管隧道防水措施	309
参考文献	312
第九章 隧道渗漏水治理	313
第一节 概述	313
第二节 隧道与地下工程防水等级	314
第三节 渗漏现象及其发生原因	315
第四节 渗漏治理要点	317



第五节 混凝土衬砌渗漏常用治理技术·····	322
第六节 隧道衬砌渗漏水微创处治技术·····	336
第七节 隧道细部结构渗漏治理·····	342
第八节 寒区隧道渗漏治理·····	344
第九节 隧道与地下工程渗漏水治理技术方案的制订·····	348
参考文献·····	354
第十章 隧道防排水材料·····	356
第一节 注浆材料·····	356
第二节 防水涂料·····	371
第三节 高分子特性与防水材料·····	385
第四节 防水卷材·····	388
第五节 我国对复合防水板的研究·····	394
第六节 防水卷材检测·····	398
第七节 止水材料·····	403
第八节 堵漏材料·····	406
参考文献·····	416



第一章 绪 论

第一节 我国隧道建设的发展

隧道是以交通为目的的地下通道。按通行车辆的种类,隧道可分为铁路隧道、公路隧道和地铁隧道。按所处的地理位置,隧道可分为山岭隧道、水下隧道和城市隧道。

改革开放之前,由于经济、技术和指导思想等方面的原因,我国的隧道建设规模小,技术落后,运营效益差。在当时的一些越岭铁路线上,有为数不多的铁路隧道,这些隧道绝大多数是长度小于1km的中短隧道,且都是单线隧道。据统计,1979年全国共有公路隧道374座,累计长度52km。这些公路隧道也多是长度从几十米到几百米的短隧道,隧道断面小,其内部不设置任何运营设施。到20世纪70年代末,在全国的大城市中,仅北京有里程有限的地铁线路,修筑地铁隧道的施工方法也十分落后。在我国内地,当时水下隧道的建设尚属空白。

改革开放之后,随着经济的发展和技术的进步,特别是国家对交通基础设施建设的高度重视,我国各类隧道的建设均取得了长足的进步。在铁路隧道建设中,首先是原有的单洞隧道长度纪录不断被打破。20世纪80年代末在京广线上建成的大瑶山隧道,长度达14.295km,突破了长大铁路隧道设计与施工中的许多技术难题,为后续特长隧道的建设积累了丰富的经验。2001年建成通车的西康铁路秦岭隧道长度达18.2km,使我国铁路隧道单洞长度在世界最长铁路隧道排列中榜上有名。2006年建成的兰新线上的乌鞘岭隧道长度达20.05km,取代秦岭隧道成为中国第一长隧。继大瑶山隧道之后,大断面的复线隧道也开始在铁路隧道建设中大量应用,技术上的进步使铁路隧道的建设投资与运营费用大为降低。在秦岭特长隧道施工中,铁道系统还首次在我国应用TBM技术进行隧道开挖并取得了可喜的成绩,使我国隧道施工技术水平上了一个新台阶。

在公路隧道建设中,20世纪80年代建设的深圳梧桐山隧道使我国公路隧道长度超过2km。90年代初建成的重庆中梁山隧道长度超过3km,2000年建成的四川二郎山隧道长度超过4km,2003年建成的山西雁门关隧道长度超过5km。2007年建成的西康公路秦岭隧道长度突破18km,成为亚洲第一长公路隧道、世界第二长公路隧道。在隧道长度纪录不断被突破的同时,单洞隧道的跨度也不断增加。单洞三车道隧道,如北京的潭峪沟隧道、浙江的黄鹤山隧道等已在多条交通量较大的线路上出现。值得一提的是,在沈大高速公路改扩建工程中遇到了单洞四车道隧道,创造了我国公路隧道单洞跨度的新纪录。隧道的结构形式也有了新的发

展,接线方便和节省用地的连拱隧道在地质条件适宜的一些线路上被广泛应用。在一些交通量较大的线路上,还出现了三跨连拱隧道和多跨连拱隧道。随着单洞隧道长度的不断增加和隧道在整个线路上重要性的提高,对隧道运营管理水平的要求也日渐提高。隧道内不仅要设置可靠的通风和照明设施,而且还要提供火灾探测与救援系统,这些都极大地促进了我国公路隧道建设的技术进步。

地铁隧道建设方面,在北京继续扩展通车线路的同时,上海第一条地铁线路于1994年全线开通,并且在施工中引入了软土隧道盾构施工技术,解决了我国在软土中建造地铁隧道的技术难题。20世纪90年代末,在借鉴了上海地铁隧道建设经验的基础上,广州也采用盾构法建设地铁隧道,并在1999年成为我国内地第三座拥有运营地铁线路的大城市。此后,我国多座城市上报了城市轨道交通规划,规划至2015年底将建设近百条轨道交通线路,总里程约300km;估计至2020年底我国将有40多个城市会有轨道交通。值得一提的是,重庆轨道交通的临江门地下车站,其最大开挖面积达 420m^2 ,采用复杂的分部开挖法施工并达到了预期的施工效果,为我国大断面岩石隧道施工积累了宝贵经验。

改革开放之后,我国内地的水下隧道建设也从无到有,取得了较大的发展。目前,我国已经建成和正在建设的水下公路隧道有30余条。其中,已建成通车的跨越长江的大型隧道有武汉长江隧道、南京长江隧道、上海长江隧道等;已建成的跨海峡隧道有厦门翔安海底隧道,香港红袋海底隧道和香港东区、西区海底隧道,青岛胶州湾海底隧道等。从地理方面讲,我国地处亚洲东部,海岸线漫长,岛屿众多,河川纵横,修建水下公路隧道是社会经济发展的客观需要。厦门翔安海底隧道,工程全长8.695km,其中海底隧道长6.05km,跨越海域宽约4200m,是我国内地第一座海底隧道。设计采用三孔隧道方案,两侧为行车主洞,各设置3条车道,中孔为服务隧道。主洞隧道建筑限界净宽13.50m,净高5.0m。服务隧道建筑限界净宽6.5m,净高6m。主洞隧道测设线间距为52m,服务隧道与主洞隧道净间距为22m。计算行车速度80km/h。隧道最深处位于海平面下约70m,最大纵坡3%。左、右线隧道各设通风竖井1座,隧道全线共设12处行人横通道和5处行车横通道,横通道间距为300m。该隧道采用钻爆法与暗挖法施工,它的顺利建成和安全运营,对我国海底隧道建设技术的进步和发展,缩小与世界先进水平的差距起到了里程碑式的作用。

我国幅员辽阔,山多水多,经济健康快速发展,在未来的铁路和公路建设中,还将有更多更难的各种隧道需要建设。我国正在全面建设小康社会,人口城镇化成为一种必然趋势,我国的许多大城市都需要建设先进的轨道交通系统,为此需要修建大量的地铁隧道。因此,我国的各类隧道建设方兴未艾。

第二节 我国隧道防排水技术的发展

各类隧道在设计、施工和管理方面各有其特点,但所有的隧道都有一个共性——构筑在地表之下。地层中存在各种地下水,因而隧道在建成后总是处在各种地下水的包围之中。地下水无孔不入,由于隧道设计、施工或使用过程中的有害扰动而造成的隧道防排水体系的任何破坏,都可能引起隧道渗漏水。这就是隧道渗漏水防不胜防,各类隧道都可能发生渗漏水的原因。

我国铁路隧道建设起步较早。20世纪70年代之前的铁路隧道都采用矿山法修建,采用

料石衬砌,由于没有采取任何防水措施,隧道的渗漏水量完全取决于地下水本身的大小及其渗流方式。70年代之后,新奥法逐渐引入我国,一些隧道开始采用混凝土衬砌,由于在衬砌的施工缝处没有采取任何防水措施,加上衬砌上各种裂缝比比皆是,隧道的渗漏状况较以前没有多大改善。80年代之后,电气化机车的广泛使用对铁路隧道的防水提出了新的要求。在大规模采用整体式混凝土衬砌的同时,开始在施工缝内采用各种止水带,使隧道的渗漏水状况有了一定的改善。80年代后期,随着一些长大铁路隧道的出现,铁路隧道的防渗漏问题才受到普遍重视。1986年7月1日开始实行的《铁道隧道设计规范》(TBJ—85)规定,隧道防水应遵循“防、排、截、堵结合,因地制宜,综合治理”的原则。一些重要隧道开展了隧道防水试验研究,国外隧道的防排水技术与材料也引入国内。目前,在铁路隧道设计中采用的防排水措施有:根据隧道的水文地质条件,设计由环向排水管、纵向排水管和隧道两侧的排水边沟或隧道路面之下的中央排水沟构成的完整排水系统;在复合式衬砌之间设置防水卷材加土工布构成的防水层。其中,环向排水管采用透水性好、可弯曲、耐碾压的弹簧排水管,防水卷材多为工程性能较好的高分子复合材料。这些都极大地改善了铁路隧道的渗漏状况。

自20世纪80年代起,我国的公路隧道逐渐增多。由于当时公路隧道的建设经验不足,对公路隧道的特点缺乏认识,公路隧道的设计理念和施工方法都照搬铁路隧道的经验。值得一提的是,由于公路隧道断面大且形状扁平,按当时的技术水平,公路隧道的施工难度要较铁路隧道的施工难度大,因而先拱后墙施工法在当时的公路隧道施工中相当盛行,这种方法在拱墙接茬处会形成水平施工缝,成为隧道渗漏的主要发生点。在经历了天山二号隧道因渗漏水侵蚀和冻胀破坏而报废、七道梁隧道因渗漏水和冰冻而被迫向隧道内送暖气、八盘岭隧道和密江隧道等因渗漏水在路面结冰而被迫在混凝土衬砌内加复衬的工程教训后,工程界才对公路隧道渗漏水问题有了正确的认识。渗漏水使路面湿滑,威胁安全行车,并诱发各种冻胀,破坏隧道结构,渗漏水侵蚀隧道运营的各种设施并降低隧道的通风和照明效率。从80年代中后期起,工程界对公路隧道的防排水技术提出了更高的要求,不仅提出了与铁路隧道相似的防排水系统和施工工艺,还对防排水材料提出了比铁路隧道更为严格的要求。因此,从总体上讲,公路隧道的防排水效果较之铁路隧道要好。

地铁隧道大多位于地下水位之下,由于不宜大量抽排地下水,因而要求采用全封闭的防水方式,隧道防渗漏的难度很大。在80年代中期之前,我国地铁隧道的防水主要依赖于衬砌结构自防水,采用刚性防水,即采用抗渗混凝土衬砌,并在施工缝处设置止水带,这种方法防水效果不够理想。80年代后期,通过借鉴铁路隧道复合式衬砌防水技术,在初期支护和二次衬砌之间设置高分子卷材防水层。由于当时卷材幅宽仅为1m左右,幅间采用热楔缝焊,焊缝多且焊接质量不易保证,加之采用有钉铺设工艺,施工后高分子防水卷材已经千疮百孔。因此,尽管通过加设柔性防水层,防水效果较以往有所改进,但仍难以满足电气化地铁线路对隧道防水的要求。90年代初期,在北京地铁的修建中,采用了幅宽达2m以上的防水卷材,减少了拼幅时焊缝的数目;拼幅时采用了可进行工间检测的双缝热合焊接工艺,给焊缝质量以双保险;为了保证防水卷材在施工期间的完好性,开发了防水层免钉穿热合铺设工艺。这些方法和措施使地铁隧道的防水效果有了很大的改善。90年代后期以来,软土中的地铁隧道主要用盾构法施工。盾构法施工的地铁隧道衬砌管片工厂化制作、精度高,管片机械化安装误差小,管片间有形状规整、质地优良的橡胶止水材料,整个衬砌的密封效果较好,加上衬砌壁厚注浆堵水,所以,从我国已建的地铁隧道总体上看,用盾构法施工的地铁隧道防水效果较好。

水下隧道完全位于水体之下,防水对水下隧道的重要性不言而喻。1994 年建成通车的广州珠江隧道,除了管段本身采用自防水结构外,该隧道重点做好了管段柔性接头的防水。具体解决了以下几个关键问题:Ω 形橡胶止水带的安装与堵漏;硅酸铝防火毡的制作与安装;填塞遇水膨胀橡胶条和弹性密封胶;钢水平剪切键的制作与焊装;钢垂直剪切键的制作与焊装;钢连接板与 Ω 形钢板的加工与焊装。在此基础上,该隧道采用注沙回填后,结合稳定性水泥浆回填和 EAA 浆材封孔抗渗处理,配以适宜的施工工艺,使该隧道取得了较好的防水效果。新近建成的上海黄浦江隧道的防水技术更为完备,其防水效果更好。

总的来说,经过近几十年来的不断努力,通过提高防排水设计水平,开发性能优良的防排水材料和研究科学的防排水施工工艺,我国在隧道防排水技术方面取得了令人瞩目的成绩。

第三节 我国隧道防排水工程存在的问题

近年来,尽管我国在隧道建设方面取得了可喜的成绩,在隧道防排水技术上取得了长足的进步,但绝大部分隧道仍有不同程度的渗漏,有些隧道的渗漏状况相当严重,对安全行车构成极大威胁。目前,渗漏是隧道最常见的病害,隧道防排水和渗漏治理已经成为隧道工程建设的一大难题。实践证明,隧道及地下工程的防排水是一项系统工程,它与工程地质及水文地质勘察、防排水设计、防排水材料选择、施工技术与工艺、管理水平等都密切相关。在勘测、设计、选材、施工和管理等任一方面的不足都可能引起隧道渗漏问题。

一、勘测

勘测是设计的基础,只有清楚地掌握了隧道所在地区的水文地质条件,才能使隧道的防排水体系设计合理。由于经费和其他方面的原因,我国目前在隧道设计前,绝大部分隧道的水文地质勘测工作都做得不是十分细致,获取的水文地质资料不够充分、准确,以致一些隧道选址在水文条件不良的位置,造成隧道建成后渗漏严重,例如新疆的天山二号隧道。

二、设计

设计是施工的依据,没有科学的隧道防排水设计,就不可能获得良好的防排水效果。目前我国在隧道防排水设计方面还没有引起足够重视或还没有做好的工作有:

1. 施工期间的围岩注浆堵水

山岭隧道的防排水体系为圈层构造。第一层为注过浆的围岩,第二层为由高分子卷材构成的防水层,第三层为衬砌混凝土。由于指导思想和经济上的原因,在富水区段用围岩注浆进行堵水的方法常常被放弃。隧道修建之前,山体地下水渗流场处于一个动态平衡的状态。随着隧道开挖和临空面的形成,地下水向隧道区域汇集、渗出,形成隧道渗水。由于隧道围岩中存在大量的裂隙、节理、断层破碎带等,它们与地下水有着复杂而又密切的联系,一般来说,隧道开挖会加快地下水的渗出。如果对地下水以排为主,将造成地下水大量外泄,地下水位下降,地下水资源大量流失,影响植被生长和生态平衡,造成局部环境破坏,对当地工农业生产造成长期不良影响。地下水向隧道区域汇集、渗出,将浸泡、侵蚀隧道围岩,使围岩强度和稳定性降低,冲掏衬砌背后围岩形成空洞,影响围岩和衬砌的长期稳定,形成巨大水压力,威胁衬砌安全。此外,渗水携带有大量的泥沙,这些泥沙在排水管道中淤积,堵塞排水管路,引发隧道渗

漏。因此,施工期间的围岩注浆堵水作为隧道防水的第一道防线,应当摆在最重要的位置。

2. 施工缝、变形缝的处理

工程实践和室内试验均证明防水层在施工期间和服务期间会受到各种损伤,当地下水压较大时,渗水会穿过防水层。在这种情况下,混凝土衬砌的防水就成为整个隧道工程防水的关键。纵观隧道衬砌的渗漏点可以发现,隧道的渗漏主要发生在施工缝上。目前,工程上常用的衬砌施工缝防水构造主要有两种:一是在衬砌厚度的中部沿环向设置中埋式止水带,二是在同样的位置设置遇水膨胀橡胶条。两种方法的防水效果均不甚理想。

3. 连拱隧道的防排水技术

连拱隧道结构复杂,施工工艺也复杂。连拱隧道的渗漏水主要发生在中隔墙的顶部,中隔墙顶部的设计方法与施工工艺是连拱隧道研究的热点问题。目前连拱隧道顶部的防排水工程,有的设计上存在缺陷,有的施工中质量无法保证,致使连拱隧道的渗漏水成为隧道工程中难以解决的一个顽症。

4. 寒区隧道的防渗防冻技术

由于渗漏至今仍是隧道与地下工程界尚未很好解决的难题,在寒区隧道的渗漏与冰冻还会相互影响,互为因果,使消除隧道冻寒的问题极为复杂。一些隧道虽然采取了种种防排水和保温措施,使隧道的冻害有所缓解,但至今仍鲜有不漏不冻的隧道范例。春融期是隧道渗漏与冰冻的主要发生期,其原因是隧道横断面上的冻结线与防水层重合,渗水与防水层接触但下排不畅。

三、材料

设计的隧道防排水体系要靠各种防排水材料来构建,只有用合格的材料才能建成合格的工程。目前我国隧道用防排水材料品种繁多,生产厂家众多,质量良莠不齐,给隧道防排水工程设计选材造成了很大的困难。

1. 防水层性能指标要求不明确

防水层被认为是山岭隧道防水技术的核心,其工程造价也很高。可用作防水层的材料种类很多,由于隧道设计规范中对防水层的性能指标缺乏具体的规定,设计人员往往不知如何从众多的材料中选出合适的材料。比如有的材料的伸长率被标为 500% ~ 600%,如此大的伸长率其工程意义何在?又如臭氧老化试验等只能区分材料的相对抗老化能力,但针对不同的隧道,如何确定不同的防水材料的抗老化指标,也是一个有待于进一步明确的问题。

2. 检测项目与工程关系不密切

防水层的力学性能试验主要包括:拉伸强度试验、撕裂强度试验、刺破强度试验和挤破强度试验。分析防水层寿命的全过程可知,防水层在施工过程中会受拉和撕裂,在使用期间会受压受剪。施工过程是短暂的,备受重视的材料抗拉和抗撕裂能力仅仅服务于为时不长的施工过程;材料的抗刺破和抗挤破能力也只能在施工过程中找到相近的场景,而防水层的长期使用性能却没有匹配的试验来测试。

四、施工

精心施工是搞好隧道防排水工程的关键,只有在隧道施工中完全贯彻设计思想,隧道的防

排水体系才有可能完备而没有缺陷。由于隧道施工的复杂性和其他种种原因,目前我国隧道防排水施工的常见问题有:

1. 排水系统衔接不畅

一般山岭隧道的排水系统由环向排水管、纵向排水管、横向排水管、排水边沟或中央排水管等组成。每个环节都要汇集上游来水并将其顺利排至下游。施工中容易出现排水管上下部没有衔接或中间断开、三通管连接不畅、纵向排水管反坡设置和排水管中间淤堵等现象,使隧道在运营过程中不能将本应排出的地层渗水畅通排出,造成衬砌壁后水压增高而引发隧道渗漏。

2. 防水层基面粗糙

防水层在服务期间,一侧是喷射混凝土,另一侧是二次衬砌混凝土。两侧虽然同是混凝土,但由于施工方法的不同,它们与防水层相邻表面的粗糙程度大不相同。喷射混凝土表面十分粗糙,局部还会呈“葡萄状”与“泼粥状”。二次衬砌混凝土与防水层的接触面相当光滑,这是因为浇注时混凝土混合料呈流动态,隧道建成后,由于隧道围岩的流变而使围岩内的应力与位移逐渐调整。围岩变形带动初期支护喷射混凝土发生变形,而二次衬砌作为人工结构,其整体性较好,相对变形也较小。喷射混凝土与二次衬砌间的变形不协调,造成局部范围内喷射混凝土对二次衬砌的压力过大,介于两个承载结构之间的防水层也要承受极大的压力。在围岩应力重分布过程中,喷射混凝土与二次衬砌之间还可能出现相对错动;另外,二次衬砌还会因季节变化出现纵向伸缩,也会引发二次衬砌与喷射混凝土之间出现相对错动。这些错动会使防水层承受较大的剪力。不论是两承载结构之间的压力还是其间的剪力,都会在应力值达到一定限度时,因喷射混凝土表面的粗糙不平,导致防水板损伤,引发渗漏水。

3. 防水层接茬不严且易受损伤

防水层由防水板与土工布组成,防水层的损伤主要是防水板的损伤。防水板损伤可分为施工期损伤和运营期损伤。众所周知,施工期损伤主要来自两个方面:一是防水卷材拼幅时的粘结或焊接质量欠佳,造成接缝不严;二是二次衬砌混凝土施工时,因绑扎钢筋或振捣混凝土而造成防水板局部破损,并且这些局部破损或者未被发现,或者虽被发现但修补不当。

4. 防水层铺设工艺有缺陷

目前,防水层的铺设多采用吊挂工艺,吊带的挂钉为射于喷射混凝土上的射钉。射钉的尾端通常要出露喷射混凝土的表面 1cm 左右,出露部分本应进行细致的处理,使其不成为防水层与喷射混凝土表面的尖锐接触点,保证该点在防水层施工或运营期间不损伤防水层的完好性。事实上,射钉的出露部分在施工的过程中通常不做任何处理,从而给防水层的完好服务埋下了隐患。

5. 止水带安装有待改进

(1) 渗水下排不畅

衬砌施工缝渗水下排不畅有两种情况:一是沿施工缝环向下排不畅,二是施工缝下部下排不畅。

在衬砌基础以上,穿过防水板的渗水常向施工缝汇聚。施工缝虽然具有一定的宽度和一定的渗水下排能力,但此排水能力往往较小,不能满足渗水的下排要求。特别是在雨季,洞内气温仍然相对较高,由于衬砌线膨胀的原因,施工缝的宽度较小,渗水下排阻力较大,造成施工缝止水带外侧水压增高,从而引发渗漏。



在全断面一次衬砌情况下,衬砌基础总是先于衬砌施工。衬砌基础施工的分段位置往往与上部衬砌的分段位置不重合,因此常常在衬砌施工缝的下部没有与隧道排水系统相连通的衬砌基础施工缝。设想上部衬砌施工缝中已经饱水,水便很难下排,从而在止水带或膨胀橡胶条与防水板之间形成较高的水压,该水压可能会引发施工缝渗漏。即使在基础混凝土与防水板之间存在缝隙,但缝隙极小,难以满足上部施工缝渗水下排的要求。忽视施工缝渗水的下排是目前隧道防排水设计中普遍存在的问题。

(2) 止水带、膨胀橡胶条周围不密实

造成止水带周围不密实的原因主要是混凝土的干缩和端头模板漏浆。前者在混凝土浇筑时,混合料与止水带虽然紧密接触,但在混凝土凝结硬化过程中,混凝土会产生一定量的干缩,使止水带与其周围混凝土的界面出现间隙,此间隙便为渗水提供了外渗的通道。特别是在止水带固定钢筋的周围,这种间隙更大,渗水更容易绕过止水带。后者则由于衬砌端头模板构造复杂,一些隧道衬砌的端头模板由木板拼装而成,端头模板在止水带两侧不够严密,混凝土浇注时容易漏浆,使止水带周围混凝土不密实,导致隧道建成后渗水绕过止水带从混凝土中渗出。

6. 衬砌混凝土不密实

混凝土衬砌是隧道防水的最后一道防线。施工中由于混凝土配比不当、衬砌配筋的影响、端头模板的移动、振捣不充分等原因,造成衬砌混凝土不密实、抗渗能力差的缺陷。尤其在隧道洞顶,施工难度加大,充填和振捣更不容易,每段衬砌的封口部位更是不易密实,从而成为隧道渗漏的另一常见部位。

五、管理

隧道的管理可分为施工管理和运营管理,在不同的阶段对隧道的渗漏水状况有不同的影响。

1. 施工管理不严

在隧道的施工阶段,存在的主要问题是管理不严。具体表现在对隧道防排水工程重视不够,对施工过程缺乏检测手段。隧道的防排水工程多为隐蔽工程,如果不能在施工过程中发现并纠正存在的问题,则在隧道建成后很难发现这些问题且极难予以弥补。另外一种较为普遍的现象是,越是施工过程中围岩出水量大的区段,越应该做好隧道的防排水工程,可是往往在这些区段,由于作业环境较差,防排水工程质量难以保证。工程界对桥梁和路面工程的技术与管理总是精益求精,而对隧道的防排水工程仍是粗放管理。

2. 运营管理不当

一些隧道的渗漏水也与隧道的运营管理有关。隧道的防排水工程构成了一个完整的体系,防水与排水相互影响。如果隧道在运营过程中,使某一排水环节封堵,就会使上游渗水难以下排,从而增大上游防水体系的压力,可能造成上游防水体系失效而引发隧道渗漏。在寒区经常出现因保温出水口封冻,使隧道内的渗水无法排出,进一步造成水在纵向排水管或衬砌壁后结冰,引发隧道在春融期渗漏。

本书将围绕着以上问题展开讨论,结合我国隧道工程的施工技术现状,提出隧道渗漏水的防范措施和建议。

第二章 隧道地下水环境

埋藏在地表下面土中空隙、岩石空隙和裂隙中的水,称为地下水。地下水广泛存在于地下岩土体中,与人类工程活动(尤其是隧道与地下工程)关系密切。地下水与岩土体的相互作用会使岩土体的强度和稳定性降低,产生各种不良自然地质现象和工程地质现象,如滑坡、岩溶、潜蚀、地基沉陷、道路冻胀和翻浆等,给公路工程建筑的正常使用造成危害。地下水的存在不仅可能造成施工困难,还会不同程度地降低围岩强度,留下安全隐患,而地下水的侵入和渗出造成的隧道渗漏,已经成为隧道运营期间的主要病害。此外,在地下水的大量化学成分中,侵蚀性 CO_2 或 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等的存在,可能对混凝土、钢筋产生不同程度的腐蚀作用。腐蚀性地下水在隧道内的渗出,不仅对隧道衬砌和路面造成影响,还将影响到隧道内机电设施的运营安全和运营效率。因此,了解隧道地下水环境,对隧道工程,尤其是隧道工程防排水设计与施工具有重要的作用。

第一节 地下水的贮存形式^[1,4]

岩土体中的水有气态、液态、固态三种形式,其中液态水又可分为吸着水、薄膜水、毛细水和重力水。吸着水、薄膜水受静电引力作用,不受重力和表面张力的驱动。在毛细作用下运动的水叫毛细水,毛细水可逆重力方向运动,并可达到自由水面以上一定高度。在重力作用下流动的水叫重力水,重力水总是向下流动。

岩土体中地下水的分布如图 2-1 所示:岩土体空隙充满水的地带称为饱和带,这个带的地

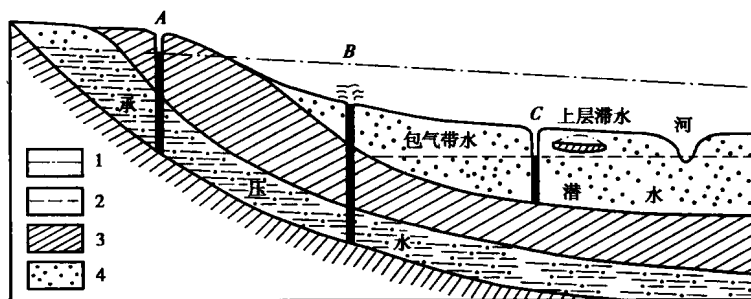


图 2-1 地下水埋藏示意图

1-承压水位;2-潜水位;3-隔水层;4-含水层;A-承压水井;B-自流水井;C-潜水井

下水称为饱和带水；在饱和带以上，未被水充满的地带叫包气带或未饱和带，包气带中的地下水叫包气带水；有时在包气带内夹有局部隔水层，可形成局部饱和带水，叫上层滞水。

根据地下水的埋藏条件，可以把地下水划分为包气带水、潜水和承压水三类（图 2-1）。根据含水层空隙性质的不同，可将地下水划分为孔隙水、裂隙水和岩溶水三类。按这两种分类，可以组合成九种不同类型的地下水（图 2-2）。

下面分别介绍地下水的主要类型——上层滞水、潜水、承压水、裂隙水。

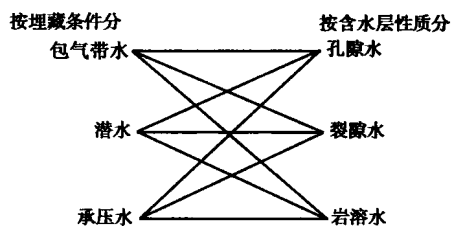


图 2-2 地下水的分类

一、上层滞水

在包气带内局部隔水层上形成的饱和带水，称为上层滞水。

上层滞水是一种局部的、暂时性的地下水。当透水层中夹有不透水层或弱透水层的透镜体时，地表水便可下渗聚于透镜体上，而称为上层滞水。

上层滞水多位于距地表不深的地方，分布区与补给区一致，分布范围一般不大。其分布范围和存在时间取决于隔水层的厚度和面积的大小。隔水层的厚度小、面积小，则上层滞水的分布范围较小，而且存在时间较短；相反，如果隔水层的厚度大、面积大，则上层滞水的分布范围就较大，而且存在时间也较长。

由于上层滞水接近地表且分布范围有限，故受气候因素的影响很大，动态变化极不稳定。雨季或融雪期水量增大，水位升高，并且会有一部分水向隔水层边缘流去，补给潜水；旱季则水量大幅度减少，水位迅速降低，甚至可能被全部蒸发和下渗掉。

上层滞水的存在，可使地基土强度减弱。在寒冷的北方地区，则易引起道路的冻胀和翻浆。此外，由于其水位变化幅度较大，故常给工程的设计、施工带来困难。

二、潜水

潜水是地表下面第一个连续隔水层之上具有自由水面的重力水（图 2-3）。潜水一般是存在于第四纪松散堆积物的空隙中（空隙潜水）及出露于地表的基岩裂隙和溶洞中（裂隙潜水和岩溶潜水）。

参看图 2-3，潜水的自由水面称为潜水面。潜水面的标高称为潜水位，潜水面至地面的垂直距离称为潜水埋藏深度。由潜水面往下到隔水层顶板之间充满重力水的部分为含水层深度。

1. 潜水的特征

潜水的分布极广，与道路工程、桥梁工程和隧道工程的关系也最为密切。潜水的埋藏条件决定了潜水具有以下特征：

（1）大气降水和地表水直接渗入为补给源

潜水通过包气带与地表相通，所以大气降水和地表水可以直接渗入补给潜水，成为潜水的主要补给来源。在大多数情况下，潜水的分布区与补给区是一致的。某些气象水文要素的变化可直接影响潜水的变化。