

| 贵州省交通建设系列科技专著 |

贵州典型地层 公路隧道稳定性分析

STABILITY ANALYSIS FOR HIGHWAY TUNNEL UNDER
TYPICAL STRATA OF GUIZHOU

贵州省交通运输厅 组织编写

周 森 龙平江 刘学增 编著



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

贵州省交通建设系列科技专著

贵州典型地层 公路隧道稳定性分析

贵州省交通运输厅 组织编写
周 森 龙平江 刘学增 编 著



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

内 容 提 要

本书为“贵州省交通建设系列科技专著”中的一本。本书参考国内外相关文献、现行规范,结合诸多工程经验与笔者多年研究成果,阐述了贵州省浅变质碎裂岩体、节理裂隙密集带、岩溶发育区域等典型不良地质的发育特征及其主要危害形式,重点分析了在贵州典型地层中修建公路隧道时的围岩变形、稳定性及其主要影响因素,并依托工程实例,讨论了相应的加固技术、支护设计体系及防治对策,以期为贵州地区公路隧道建设提供一定参考。

本书可供隧道工程设计、施工、监理、监测技术人员及科研人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

贵州典型地层公路隧道稳定性分析 / 周森, 龙平江,
刘学增编著; 贵州省交通运输厅组织编写. —北京:

人民交通出版社股份有限公司, 2015. 11

(贵州省交通建设系列科技专著)

ISBN 978-7-114-12572-0

I. ①贵… II. ①周… ②龙… ③刘… ④贵… III.

①公路隧道—隧道工程—稳定性—研究—贵州省 IV.

①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 255402 号

贵州省交通建设系列科技专著

书 名: 贵州典型地层公路隧道稳定性分析

著 作 者: 周 森 龙平江 刘学增

责任编辑: 周 宇 牛家鸣

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: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16

字 数: 385 千

版 次: 2015 年 11 月 第 1 版

印 次: 2015 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12572-0

定 价: 70.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

贵州省交通建设系列科技专著

编审委员会

主 任：王秉清 陈志刚

副 主 任：罗 强 潘 海

委 员：康厚荣 熊 文 龙平江 刘 彤 赵 伟

冯 伟 任 仁 杨贵平 张 胤 徐仕江

章友竞 刘金坤 许湘华 张 林 梅世龙

粟周瑜 丁志勇 李黔刚 母进伟 何志军

龙万学 邓卫东 杨建国 李华国 胡江碧

吴春颖 王丽铮 彭运动 郭忠印 彭元诚

刘学增 吴立坚 马旭东

总 主 编：罗 强

副总主编：康厚荣

总序

Preface

古往今来,独特的地形地貌赋予贵州重峦叠嶂山高谷深的隽秀之美,但山阻水隔也桎梏着贵州经济社会发展的步伐。打破交通运输瓶颈,建设内捷外畅的现代综合交通运输体系,与全国同步迈向小康,一直是贵州人的夙愿。

改革开放特别是进入“十二五”以来,党中央、国务院及交通运输部等国家部委高度重视贵州经济社会发展。2012年年初,国务院出台支持贵州发展的国发2号文件,将贵州省经济社会发展的战略规划上升到国家层面。贵州省委、省政府立足当前、着眼长远,提出坚持把交通作为优先发展的重大战略,举全省之力加快交通基础设施建设。2012年以来,贵州省先后启动了高速公路建设、水运建设三年会战,普通国省干线公路建设攻坚,“四在农家·美丽乡村”小康路行动计划,“多彩贵州·最美高速”和“多彩贵州·平安高速”创建等一系列行动,志在“十二五”末,通过交通大建设一举打破大山的束缚,畅通经济发展的交通网络。

广大交通建设者紧紧抓住发展的历史机遇,凝心聚智,在广袤的黔山秀水之间,用光阴和汗水构筑贵州面向未来的交通新格局。“十二五”期间,全省交通基础设施建设将完成投资4500亿元,新建成高速公路3600公里,高速公路通车总里程将突破5100公里,全省88个县(市、区)将全部通高速公路。乌江、赤水河建成四级航道700公里,改写了贵州无高等级航道的历史。建成构皮滩水电站翻坝枢纽工程,实现乌江航道全线通航。曾经的黔道天堑正变成康庄大道,一张以高速公路为骨架、国省干线公路为支撑、县乡公路为脉络、小康路为基础的四级公路路网正在形成,“扬帆赴江海”指日可待。

围绕贵州交通发展中出现的科技需求,贵州省交通运输厅组织开展了一批省部级重大科研项目攻关,重点突破一批关键、共性技术难题,在支撑工程建设、引领行业创新发展方面成效显著。在山区复杂条件下大型桥梁建设技术方面,形成了千米级悬索桥、高墩大跨刚构桥和钢管混凝土拱桥等设计施工成套技术,有力支撑了坝陵河大桥、清水河大桥、鸭池河大桥、赫章大桥、木蓬大桥等一批世界级桥梁建设工程,实现了我省桥梁建设技术的大跨越;针对西部山区复杂地质地形条件,从勘察设计、建设施工、养护管理和生态环保等方面系统开展基础研究和

技术开发,形成一批山区高速公路修筑技术,其成果居国内先进水平,有力支撑了复杂山区环境下高速公路项目建设;在山区航道整治、船型标准、通航枢纽建设等方面取得的创新性成果,促进了贵州航运工程的发展;完成了“贵州乌蒙山区毕都高速公路安全保障科技示范工程”等交通运输部科技示范项目,有力推动了交通科技成果推广应用;以“互联网+便捷交通”推进智慧交通建设,率先开展智能交通云的建设和应用。交通运输科技成果连续3年获得贵州省科技进步和成果推广一等奖。

为展现在公路、水路和交通安全、信息化建设等方面取得的技术成就,促进技术交流,加大推广应用,贵州省交通运输厅组织编写了“贵州省交通建设系列科技专著”。这套科技专著的出版,对传承科技创新文化,提升交通科技水平,深入实施科技兴省战略,促进贵州经济社会快速发展,意义重大、影响深远。

交通成就千秋梦,东西南北贯黔中。编撰这套系列科技专著,付出的是艰辛、凝结的是智慧、反映的是成绩,折射了交通改变地理劣势、奋斗推动跨越的创新精神,存史价值较高,是一笔当代贵州的可贵财富。

王清

2015年10月

前言

Foreword

自“八五”“九五”规划以来,我国公路隧道建设正式进入高速发展时期,经过二十余年的发展,隧道总数、里程飞速增加的同时,隧道单洞长度也在不断增加。此外,由于交通量需求的增加,单洞 3、4 车道的大跨公路隧道逐渐增多,原位扩建、近接施工、海底隧道等项目也陆续出现。截至 2014 年年底,全国公路隧道已建成 12 404 座,共 1 075.67 万 m,已建成单洞长 18.0 km 的秦岭终南山公路隧道、单洞 4 车道的龙头山隧道、单洞 3 车道的厦门翔安海底隧道等典型工程。

与此同时,国内学者开展了一系列的研究,科学、系统地探讨和完善了隧道相关设计理论及施工工法,并陆续出台了《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)、《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009)、《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010),以期成熟及规范地指导我国公路隧道建设工程。然而,与世界发达国家百余年的发展历程相比,我国公路隧道建设发展时间短,技术理论与工程经验与工程的实际需求还存在差距。特别是针对西南黔桂地区常见的岩溶发育带、大型断裂构造带、节理裂隙密集带、瓦斯煤系地层等不良地质区段的隧道建设工程,已有研究成果在系统性、针对性上还存在一定不足,隧道建设安全问题仍是业内关注重点。

为此,交通运输部、贵州省科学技术厅、贵州省交通运输厅组织贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司、重庆大学、同济大学、贵州独平高速公路有限公司等多个单位开展了西部交通建设课题“岩溶地区公路修筑成套技术研究”、贵州省重大专项课题“厦蓉线水都高速公路建设关键技术研究”、贵州省交通科技项目“基于节理特征的公路隧道锚杆受力机理”等项目的研究,有针对性地探讨和研究了浅变质碎裂岩体洞口浅埋段、节理裂隙密集带及岩溶发育区域等贵州省典型地层中的公路隧道建设技术,取得了一些比较有意义的研究成果,很好地支撑了贵州省高速公路隧道建设,提升了贵州省公路隧道的建设与管理水平。本书的内容以这些成果为基础,结合国内外研究及贵州省近些年公路隧道工程建设经验,参考国内隧道建设实践,系统总结与升华而成,以期同类工程提供一定指导意义。

本书以“基础理论研究+典型工程实例研究”的模式展开阐述,重点介绍贵州省典型地层

中的公路隧道建设理论与技术,旨在形成贵州省典型地层中的公路隧道建设成套体系。全书共分3篇10章,第1章为绪论,重点介绍、总结当前隧道建设现状,为全书的撰写做铺垫;第1篇侧重研究黔东南典型浅变质碎裂岩体洞口浅埋偏压段的公路隧道围岩稳定性与加固技术,包括第2~5章;第2篇侧重研究节理裂隙密集带公路隧道围岩稳定性与支护优化技术,包括第6~8章;第3篇侧重研究岩溶发育区域公路隧道围岩稳定性与突涌水防治技术,包括第9、10章。

全书撰写大纲由周森提出并与龙平江、刘学增共同商讨后确定,具体分工为:周森承担了第1~5章的撰写工作,刘学增承担了第6~8章的撰写工作,龙平江承担了第9、10章的撰写工作。全书由周森具体组织实施并负责最后的统稿、修改及审定后定稿,由刘学增完成文字整理与校对编辑工作。

本书在成稿过程中得到了贵州省交通运输厅等单位的大力支持与协助,作者在此深表谢意,同时感谢人民交通出版社股份有限公司同仁为本书出版付出的辛勤劳动。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均已在参考文献中列出,在此一并致谢。

本书旨在介绍适用于贵州省典型地层的公路隧道建设理论与成套技术,这给本书编撰增加了难度。再加上作者自身水平有限,虽几经易稿,不足之处在所难免,恳请广大学者、同仁批评指正。

作者

2015年4月于贵阳

目 录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 贵州典型地层及其隧道建设面临的主要技术问题	1
1.2 国内外相关技术现状	4

第 1 篇 浅变质碎裂岩体公路隧道洞口变形与稳定性分析

第 2 章 浅变质碎裂岩体公路隧道洞口变形及稳定性分析	19
2.1 洞口段类型划分及关键力学参数	19
2.2 地质及地形条件对偏压隧道围岩变形稳定性的影响	20
2.3 地形偏压下软弱围岩洞坡变形特征分析	26
2.4 高陡堆积体仰坡隧道洞口变形特征分析	33
2.5 仰坡坡度及与隧道轴线位置关系对隧道洞口稳定性影响规律	36
2.6 沟心地形下隧道洞口变形特征	47
第 3 章 浅变质碎裂岩体公路隧道洞口段开挖方案优化分析	50
3.1 环形导坑预留核心土法开挖工序分析	50
3.2 CRD 法开挖工序分析	54
3.3 合理开挖方式的确定原则	57
第 4 章 洞口段(预)加固措施对变形与稳定的影响	59
4.1 地形偏压下洞坡加固措施对隧道洞口变形与稳定的影响分析	59
4.2 厚堆积体高陡仰坡加固措施对隧道洞口变形与稳定的影响分析	64
第 5 章 典型工程示例分析	67
5.1 老寨隧道左幅出口段建设工程实例分析	67
5.2 平寨隧道洞口段建设工程实例分析	84

第2篇 节理裂隙密集带公路隧道变形与稳定性分析

第6章 节理特征对围岩变形及失稳模式的影响分析	127
6.1 简述	127
6.2 节理发育特征对围岩稳定性的影响规律	131
6.3 不同手段研究成果对比分析	137
第7章 节理发育岩体公路隧道初期支护技术研究	149
7.1 Ⅲ级围岩隧道锚杆支护参数分析	149
7.2 Ⅳ级对称型围岩隧道锚杆支护参数分析	156
7.3 Ⅳ级地质顺层偏压隧道锚杆支护参数分析	162
7.4 Ⅴ级围岩隧道锚杆优化支护参数分析	170
第8章 隧道支护优化工程实例分析	178
8.1 工程概况及地质条件综述	178
8.2 隧道支护方案	178
8.3 断面监控数据对比	179
8.4 施工力学响应分析	181

第3篇 岩溶区域公路隧道建设及典型案例

第9章 岩溶区域公路隧道围岩稳定性分析	207
9.1 岩溶洞穴稳定性分析	207
9.2 溶洞大小和隧道相对位置对隧道稳定性的敏感性分析	217
第10章 崇遵高速公路夏家庙隧道岩溶坍塌与处置工程实例分析	227
10.1 隧道工程地质评价与设计、施工及坍塌分析	227
10.2 隧道围岩坍塌情况	230
10.3 隧道围岩坍塌处理方案	230
10.4 隧道围岩坍塌处理前后数值模拟	231
10.5 隧道围岩坍塌及处理后效果监测	236
参考文献	240

第1章

绪 论

1.1 贵州典型地层及其隧道建设面临的主要技术问题

进入 21 世纪后,在西部大开发战略的刺激下,贵州省公路建设投资力度逐年加大,至 2014 年年底,全省公路网总里程达到 17.91 万 km,其中已建高速公路达到 4 006.81km,比“十一五”末增加近 2 500km。为进一步发展境内公路建设,打通外部通道,贵州省全力以赴推进“贵州省公路水路交通基础设施建设三年会战”(2013~2015)、普通国省干线公路建设攻坚等重大项目,实现境内“六横七纵八联四环”(图 1.1)的高速公路规划。

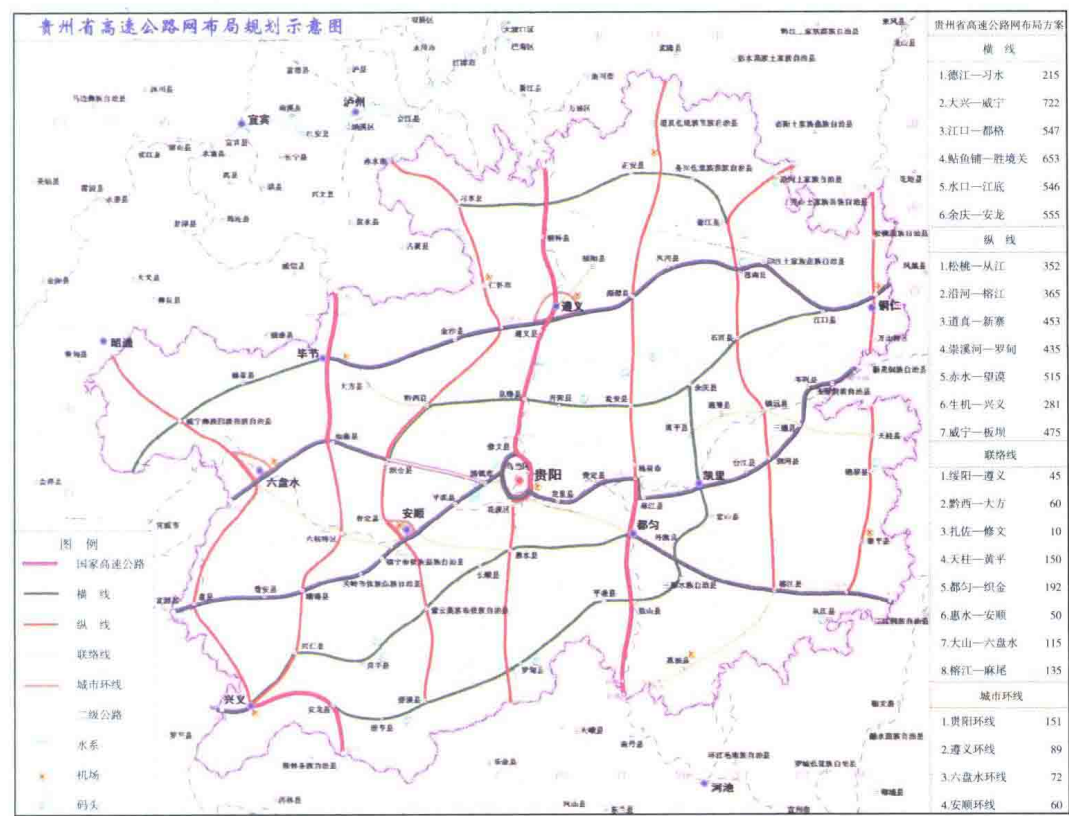


图 1.1 贵州省骨干公路规划(六横七纵八联四环)

因地处云贵高原,境内多为山地、丘陵,隧道是贵州省公路建设项目中的常见结构,如国家高速公路“7918”网厦蓉高速公路(贵州境内)水口至都匀段,桥隧比极高,初步设计隧道总长71 988m共58座,隧道总长占路线总长的34.6%,是贵州高速公路建设历史上最艰巨复杂的工程;又如即将建成通车的独平高速公路,全线沟壑纵横,地质地貌复杂多变,桥隧比例达55%,其中罗汉坡隧道、虎头山隧道、大钟隧道等均是各节段的控制工程。因此,在大力兴建公路工程的同时,应加强隧道工程的建设技术研究,确保施工安全。

地质资料表明,贵州是我国唯一没有平原的多山省份,境内层峦叠嶂,绵延纵横,山高谷深,地形起伏较大,地质构造作用极为明显,浅变质碎裂岩体、节理裂隙密集带、大型褶皱区域、瓦斯煤系地层是常见的工程地质现象。另外,境内岩溶地貌发育非常典型,喀斯特地貌面积占全省国土总面积的61.9%,进行公路隧道建设时,很难避开这类复杂地层。而工程经验与理论研究表明,隧道因深埋于地下,其受力模式及空间力学特征异常复杂,施工开挖或进出洞时会破坏围岩原有的应力平衡状态,浅变质碎裂岩体(浅埋偏压)、节理裂隙密集带、岩溶区及瓦斯煤系地层等特殊地质的存在,给贵州地区隧道的建设造成了极大困难,现简要介绍如下。

1.1.1 浅变质碎裂岩体隧道洞口修建难题

资料调研表明,与洞身相比,隧道洞口通常处于浅埋、偏压、软弱破碎围岩等复杂地质和地形条件下,加之存在边仰坡坡面,因而洞口工程不确定因素更多。洞口段隧道结构受力机理及空间力学特征比较复杂,施工中容易发生仰坡坍塌、冒顶、衬砌结构变形开裂、难于安全进洞等情况,使得隧道洞口段的设计与施工变成了整座隧道的关键,隧道洞口位置的选择常常成为决定路线走向方案的控制因素,可见隧道洞口在隧道设计与施工中占有非常重要的地位。

在坡体内开挖隧道时,斜坡和隧道通过变形协调和相互作用,形成一个整体,该结构存在整体稳定性的问题。斜坡及隧道的整体稳定性及其各自稳定性之间是既有联系又有区别的,该方面也有待进一步研究。隧道开挖改变了斜坡体的应力状态,对其稳定性产生了影响。同时,由于隧道洞口段一般处于斜坡体内,斜坡体的应力状态的调整也会影响隧道荷载的分布。斜坡体与隧道的这种相互作用及二者的稳定性构成了隧道洞口段洞坡整体稳定性分析的主要内容。因此在斜坡内开挖隧道且斜坡坡度较陡时,研究隧道施工对山体稳定性的影响、隧道结构和坡体相互作用机理及隧道结构的力学特征,对于合理进行隧道结构、山体加固和施工工艺的设计至关重要,同时也有利于正确选择隧道位置。

目前对隧道洞口尚无系统的研究,同时现行的《公路隧道设计规范》(JTGD70—2004)也无相关方面的内容,《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005)中尽管有少量规定,但由于未做深入的研究,关键部分内容尚无统计资料而未能完善^[1-4]。目前隧道洞口段的设计与施工通常采用的方法是经验法和类比法,对于复杂地质、地形条件下的洞口段隧道围岩变形特征及受力机理缺乏系统研究和定量描述,对不同地质、地形条件下的洞口段隧道及边、仰坡的典型破坏特征还缺乏了解,设计和施工中采用的加固措施和支护参数的合理性缺乏评价依据,因而在工程实践中易出现对工程估计不足或者设计过于保守等问题。对工程估计不足易造成塌方、地表开裂、结构破坏等事故,而设计过于保守则会造成工程费用大幅增加和不必要的浪费,这些问题的出现不仅增加了工程造价,还影响隧道的施工安全和工期。

综上所述,在复杂地质地形条件下,特别是在黔东南典型的浅变质碎裂岩体中的隧道进洞

技术、围岩及边坡仰坡稳定及其控制技术、施工及加固技术仍然是目前国内外隧道工程界研究热点和难点问题,较多方面仍处于摸索和经验工作阶段。诸如软弱或碎裂岩体地区偏压隧道洞口在何种情况下应采取填方反压或削方减载?什么情况下应该加强内侧或外侧加固?在浅变质碎裂岩体地区常见的高陡堆积体仰坡及沟心隧道同样存在进洞措施的选择问题,贵州省及其他地区类似工程出现的较多的重大隧道洞口坍塌及滑坡病害表明其设计和施工技术还有待深入研究。

1.1.2 节理裂隙密集带隧道修建难题

工程岩体中普遍存在着不同规模的结构面或其他软弱裂隙面,它们虽然大部分延长不远,纵深发展不大,但数目往往很多,将岩体分割成形状不一、大小不等的块体,从而致使岩体失去了原有的连续性和完整性。在隧道开挖扰动下,围岩会沿节理面滑动,产生大变形甚至造成塌方,另外,在节理发育岩体隧道开挖过程中,往往超挖严重,对工程的经济效益产生不良影响。

目前关于节理岩体隧道设计施工的研究,国内外学者多是依据室内试验、数值模拟,针对某一产状的节理,分析节理对围岩变形的影响,得到的研究结果局限性较大。同时基于节理特征对地层稳定性的影响,对节理发育段隧道初期支护合理参数的进一步量化分析研究相对较少,往往是按照围岩级别,全断面采用均一支护参数,忽略了节理特征的影响,可见支护设计体系存在诸多不合理之处。

依据区域地质志,贵州境内多山脉丘陵,地质构造作用明显,节理裂隙极度发育,原岩被切割成块甚至呈碎裂状,进行隧道设计施工时,应如何考虑节理特征对隧道结构产生的力学影响,不同围岩等级下支护体系又需作何种优化与调整,目前尚未见系统的研究,更未形成可以参考的贵州区域性规章制度。

1.1.3 岩溶区隧道修建难题

以贵州为中心的西南岩溶地区是世界上最大的一片裸露型岩溶区,土洞、溶洞、溶沟、溶槽、落水洞、暗河等岩溶形态发育,工程地质条件极其复杂,在该地区修建长大公路隧道时,完全避免穿越岩溶发育区几乎是不可能的。工程经验表明,在岩溶隧道的设计施工中存在一系列的困难:高压富水地段的隧道衬砌设计很难把握;施工阶段的突水、突泥现象对施工安全和进度造成很大威胁;位于路基面下及周边的岩溶和衬砌外的高水压都对隧道的修建及运营造成很大隐患^[5-6]。由于岩溶发育的因素错综复杂,发育的形态千姿百态,尽管业内对岩溶形成的基本条件有了一定认识,但由于岩溶发育存在不均衡性和不规则性,致使岩溶区域隧道设计施工及岩溶的处治具有一定盲目性。另外,由于对运营隧道衬砌水压力的作用及规律的认识还存在争议,衬砌结构中水荷载的计算方面还无章可循,这就使得运营岩溶隧道出现多次衬砌突水中断行车现象。

基于上述调研现状,本书依托贵州境内水文—都匀高速公路、独山—平塘高速公路项目及相关课题研究成果,对贵州境内典型地层中的公路隧道修建技术进行总结,分析不同典型地层中围岩变形特征、结构受力特性,探讨合理的支护设计体系与施工工艺,并结合典型工程实例进行阐述,集成贵州典型地层中公路隧道的关键建设技术,以期同类工程的修建提供一定的指导与参考意见。

1.2 国内外相关技术现状

1.2.1 碎裂岩体公路隧道洞口建设技术现状

目前国内外有关隧道洞口工程的文献较多,但对于隧道洞口的变形特征、设计及施工技术尚无系统全面的研究,同时现行的《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)尚无这方面的内容,尽管《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)对隧道偏压情况进行了统计,但还不完善。

1) 现行规范的主要相关要求和规定

《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)对本文提及的内容进行了部分反映,但很不完善,特别是没有针对隧道洞口岩体及结构破坏特征进行分类和分析,其内容仍然停留在 20 世纪 80 年代及更早期的一些资料上,几乎没有什么突破。其具体相关描述为:

(1) 对浅埋隧道的定义

当地面水平或接近水平,且隧道覆盖厚度值小于表 1.1 所列数值时,应按浅埋隧道设计。当不利于山体稳定的地质条件时,浅埋隧道覆盖厚度值应适当加大。

浅埋隧道覆盖厚度值(m) 表 1.1

围岩级别	Ⅲ	Ⅳ	V
单线隧道	5~7	10~14	18~25
双线隧道	8~10	15~20	30~35

(2) 对偏压隧道的定义及加固措施的建议

作用于隧道衬砌上的偏压力,应视地形、地质条件以及外侧围岩的覆盖厚度确定。一般情况下,Ⅲ~V 级围岩,地面倾斜,隧道外侧拱肩至地表的垂直距离 t 等于或小于表 1.2 所列数值时,应按偏压隧道设计。当 t 值等于或小于表 1.3 规定时,尚应在洞外采取设置地表锚杆、抗滑桩或其他支挡结构等工程措施。

2) 公路隧道洞口建设相关文献研究及资料

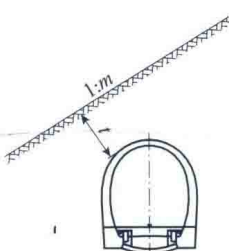
由于公路隧道断面较铁路隧道大,尤其是连拱隧道、多车道隧道的开挖断面更大,所以公路隧道的洞口处理技术和出现的问题更加复杂和多样,目前国内针对公路隧道洞口段设计与施工技术的研究成果较多,可概括为四部分:

(1) 隧道洞口边坡及仰坡稳定性研究

隧道洞口段边坡由于其特殊的地质环境条件,洞口段边坡和围岩受风化和卸荷影响较严重,岩体破碎,节理裂隙发育,甚至出现较厚堆积体。洞口段边坡复杂地形及较差的地质条件特征使得隧道在施工、运营过程中出现了一系列工程病害^[7-10],如:洞口段边坡失稳、隧道内渗漏水、衬砌开裂和衬砌腐蚀等。现今对隧道洞口边坡及仰坡稳定性的研究主要是通过数值模拟分析、极限平衡分析和定性分析等开展进行的。数值模拟方面,缪荣辉、刘光东、赵德志、曾进群对某隧道口山体蠕滑的预应力锚索加固进行了三维弹塑性有限元分析^[11];陆锡铭、应志民运用地质分析方法和三维有限元分析方法对隧道洞口滑坡机制进行分析^[12];郑建中在现场

偏压隧道外侧拱肩山体最大覆盖厚度 $t(m)$

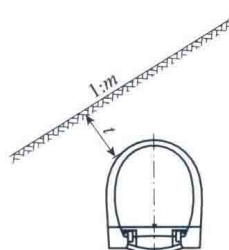
表 1.2

地面坡度 $1:m$	线别	围 岩 级 别				示 意 图
		Ⅲ	Ⅳ _石	Ⅳ _±	V	
1:0.75	双线	7.0	*	*	*	
1:1	单线	*	5.0	10.0	18.0	
	双线	7.0	*	*	*	
1:1.25	双线	*	*	18.0	*	
1:1.5	单线	*	4.0	8.0	16.0	
	双线	7.0	10.0	16.0	30.0	
1:2	单线	*	4.0	6.0	11.0	
	双线	*	10.0	14.0	25.0	
1:2.5	单线	*	*	5.5	10.0	
	双线	*	*	11.0	20.0	

注:1.Ⅵ级围岩的 t 值可通过计算确定。
2.Ⅲ、Ⅳ级石质围岩的 t 值应扣除表面风化破碎层和坡积层厚度。
3.“*”表示缺少统计资料,设计时可通过工程类比或经验设计取值。

偏压隧道外侧拱肩山体需加固的覆盖厚度限值 $t(m)$

表 1.3

地面坡度 $1:m$	线别	围 岩 级 别				示 意 图
		Ⅲ	Ⅳ _石	Ⅳ _±	V	
1:0.75	双线	3.0	*	*	*	
1:1	单线	*	3.0	5.0	11.0	
	双线	3.0	8.0	*	*	
1:1.25	双线	*	*	10.0	*	
1:1.5	单线	*	2.0	4.0	9.0	
	双线	3.0	7.0	9.0	20.0	
1:2	单线	*	2.0	3.5	7.0	
	双线	*	6.0	8.0	17.0	
1:2.5	单线	*	*	3.0	6.0	
	双线	*	*	7.0	14.0	

注:1.Ⅲ、Ⅳ级石质围岩的 t 值应扣除表面风化破碎层和坡积层厚度。
2.“*”表示缺少统计资料,设计时可通过工程类比或经验设计取值。

调查和岩体结构分析基础上,建立了边坡变形破坏机理的概念模型,利用 FLAC3D 模拟研究了开挖后坡体变形特征^[13];李育枢、高广运、李天斌用动力有限元法研究了偏压隧道洞口横向边坡在水平地震、垂直地震以及水平和垂直地震同时作用下的全时程动力反应规律^[14];李建林、胡兴娥、熊俊华、杨学堂运用卸荷理论及其分析方法对三峡工程地下电站进水口边坡进行了边坡岩体的位移、应力分析及其加固优化分析^[15];徐卫亚、宋晓晨、周维垣对一典型的反倾

向层状结构岩质高边坡进行了非线性三维数值模拟^[16]；傅少君、陈胜宏以龙滩水电站 9 号机进水口边坡为例，针对高边坡施工期的工程特点，模拟施工进度以及各种施工措施，以弹—黏塑性有限单元方法为基础，利用人工智能方法建立了力学参数的联合位移反分析模型，反演了进水口边坡岩体的综合力学参数，在此基础上进行了边坡变形及稳定性的实时跟踪预报^[17]；彭作为、周创兵、龚玉峰、孔建利用三维弹—黏塑性有限单元法对向家坝进水口边坡中系统锚杆的受力状况进行了模拟和分析^[18]。极限平衡分析方面，许桂生、汪卫明等采用三维刚体极限平衡法对小湾电站进水口边坡进行了稳定分析与加固方案优化：首先，采用三维块体系统的自动识别方法，找出了危险滑动块体组合，计算出不加固时的安全系数，并通过对地质参数的敏感性分析，找出了控制性的滑动面和块体组合。其次，计算了最小锚固力并指出了较优的加固范围，对纯锚固方案和联合加固方案（预应力锚索加抗剪洞）的加固效果进行了比较，得出了联合加固方案较优的结论。最后，根据开挖现场最新揭露的地质产状，对边坡的稳定性重新进行分析，并调整了加固方案^[19]。定性分析方面，颜育仁、杜时贵等在野外结构面定向统计测量基础上，用结构面抗剪强度经验估算方法获得其抗剪强度参数，再利用详细的工程地质资料、赤平投影定性分析及确定工程岩体的破坏模式^[20]；杨绪波、黄润秋等通过对四川省紫坪铺水电站 2 号泄洪洞进水口高边坡的物质组成、结构特征以及边坡开挖等因素的分析研究，阐述了其变形机理，说明了这类由下软上硬岩性组成的反倾边坡，其变形破坏模式为压缩—倾倒和滑移复合型：变形首先以层间软弱岩的不均匀压缩蠕变变形为先导，下部的这种不均匀压缩变形为其上部坚硬岩体的变形提供了有利的空间，从而使上覆岩体产生自重式倾倒，其变形程度显然也是由坡面向坡内逐渐递减的，表现为岩层宏观的“弯曲”，由于坡体内顺坡向断续结构面的存在，因此，当变形较小时，这组结构面将产生拉裂；当变形发展到一定程度时，该组结构面将产生顺坡向的错动，最终导致边坡的失稳^[21]。

（2）隧道洞口段设计及施工技术研究

在国内，对复杂地质条件下浅埋偏压隧道洞口安全施工及支护设计方面的研究较多，但都是针对具体工程进行经验性的研究。隧道洞口段设计及施工技术主要包括：地表预加固处理、偏压问题重新配载、超前支护施工技术、开挖方法、初期支护、仰拱施作及二次衬砌等。例如：四川二郎山隧道洞口滑坡段隧道处理，陕西长安坝隧道洞口处理，深圳汕梅高速公路在隧道洞口段应用回填反压的加固方法，普安 2 号在浅埋、偏压及残坡积地质条件下的隧道洞口段施工等。部分单位也做了一些相关的科研工作，如：重庆大学张永兴教授团队关于隧道信息化施工、开挖围岩动态力学特征、支护设计及稳定性分析等方面的研究，湖北沪蓉西高速公路建设指挥部关于一些特殊的隧道洞口结构的研究（分岔隧道设计施工关键技术研究）等。

（3）隧道洞口段加固措施研究

隧道洞口段加固技术研究，主要是针对具体的某个加固措施展开研究的。如超前大管棚方面：国外的 Hisatake^[22]、Shin^[23]等采用的离心模型试验，Ocak^[24]等在隧道施工现场进行的测试以及 Kamata^[25]等进行的一系列试验都证实了管棚预支护对开挖面上方的位移能够起到有效的控制作用。除了试验研究，还通过数值模拟^[26-27]对管棚的作用机理进行了分析。国内王海涛^[28]等基于 Pasternak 弹性地基梁理论对不同条件下管棚预支护体系的力学行为和加固效果进行了分析，并得到了管棚合适的直径为 108~159mm 的结论。董新平^[29]等推导了管棚

位移敏感度分析方程,并就如何合理的选择管棚的直径进行了分析。高健、张义同^[30]采用土体极限平衡法^[31-33]计算了隧道开挖面受到的有效支护压力,并考虑了地下水^[34-35]条件,分析了超前注浆管棚的加固机理以及管棚加固的合理长度。刘文彬、刘保国^[36]等对双连拱隧道偏压段管棚效应进行了分析。地表注浆方面,Marico muniz de Farias^[37]采用三维数值模拟对隧道开挖变形的控制进行了分析,彭立敏、施成华、韩玉华^[38]利用现场量测与室内模型试验研究的方法探讨了浅埋隧道地表锚杆加固的作用机理,并指出,地表锚杆的加固范围与深度的合理选择是保证加固效果的两个关键因素。彭立敏、周铁牛、韩玉华^[39]利用现场量测与室内模型试验的研究方法对预加固的有关技术参数做了技术研究。杨明举^[40]利用有限元数值方法模型模拟了浅埋偏压隧道地表预加固及施工影响分析。路德福^[41]阐述了水平高压旋喷注浆技术的原理、施工设计以及在浅埋隧道预支护中的应用,并就该技术应用中的问题进行了探讨。昱岭关隧道地质水文条件复杂,埋深浅,节理发育,地下水丰富且存在偏压,最后利用地表注浆技术成功进行了围岩加固^[42]。挡土墙和抗滑桩方面,赵乐之、刘晓峰^[43]等以头道隧道为实例,考虑了工程设置偏压挡土墙的特点,对隧道进行了有限元的分析。苏沟口隧道^[44]采用了预应力抗滑桩、挡土墙加固、坡面加固和坡面排水等措施,综合治理了苏沟口隧道滑坡。王军、曹平^[45]等采用FLAC内嵌的FISH语言^[46]对路透堡隧道进行了模拟分析,并指出采用双排抗滑桩加固,明显改善了隧道偏压带来的不利影响。朱苦竹、朱合华^[47]以小曼萨河隧道为背景,分析了滑坡与隧道之间的相互促进,相互作用的过程,揭示了滑坡与隧道相互作用的机理,并提出了抗滑桩治理的措施,并通过监测分析了抗滑桩的作用。小德江2号隧道洞口段^[12]位于古滑坡体上,表层为坡积层,隧道开挖易引起古滑坡体复活,利用抗滑桩进行治理后顺利进洞^[48]。马蹄经隧道^[49]在施工中遇到洞口30m上断面全部变形垮塌的难题,后采用了预应力锚索,抗滑桩等综合治理措施,保证了隧道施工的顺利进行。渝合高速公路尖山子隧道洞口段滑坡形成蛇状滑体,利用抗滑桩及超前小导管预注浆等综合治理措施进行治理后,顺利进洞^[50]。

(4) 隧道洞口段围岩监测反馈分析

加强施工全过程的监控量测,实现信息化施工,及时掌握围岩变形及支护动态,为合理支护技术和时间的选择提供参考。这方面研究成果也较多,但很少有结合研究区的工程地质条件、施工及支护设计进行系统地反馈分析。重庆大学张永兴教授团队针对湖南一高速公路偏压双连拱隧道进口段埋深浅、地质条件复杂以及隧道结构受力复杂等情况,对隧道典型断面的拱顶下沉量、中墙顶部位移和收敛位移进行现场监控量测,结合隧道开挖情况和工程地质条件分析其发展规律和产生原因,给设计和施工反馈围岩变形信息,指导现场施工。同时,对隧道的施工全过程进行有限元仿真模拟分析。刘艳青、钟世航等对招宝山隧道开挖施工过程中现场监控量测结果进行分析研究,并系统测试了爆破破坏深度及围岩松弛范围^[51]。高军介绍了非接触观测技术,重点论述了系统的基本构成、观测原理及观测方法,并将此方法应用在曾家坪1号隧道施工中,获得了很好的效果^[52]。于宁、朱合华将安全监测预报应用到公路隧道建设中来,综合分析现场观察、现场地质调查、现场监控量测所得到的信息,使隧道的“信息化设计和施工”的概念得到了加深,为今后隧道的建设提供有益的帮助和借鉴^[53]。谭俊玲将全站仪遥测技术应用在乌鞘岭铁路隧道围岩变形监测中,取得很好的效果^[54]。曾鼎华等对三角形测量在隧道变形监测中的应用进行了研究^[55]。李二兵以南京市九华山隧道施工为例,对现场