

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书 · 公路基础设施建设与养护

Key Technology of Deformation Control of
Long Tunnel with Soft Fractured Rock

软弱破碎围岩 长大隧道变形控制



关键技术

赵队家 孙志杰 编著
宿钟鸣 董立山



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

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

软弱破碎围岩长大隧道 变形控制关键技术

赵队家 孙志杰 编著
宿钟鸣 董立山



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是在总结山西省多条高速公路长大隧道建设成果的基础上,借鉴国内外相关研究成果,重点以中条山特长公路隧道工程为依托,综合采用理论分析、数值模拟和现场试验等研究手段,围绕长大隧道软弱破碎围岩变形控制关键技术编写而成。全书主要内容包括软弱破碎围岩特征及隧道变形控制措施、隧道支护结构力学特性及围岩稳定性分析、超前预支护系统作用效果及其与施工工法优化组合、爆破荷载作用下围岩稳定性控制措施研究、软弱破碎带隧道施工工法比选及参数优化等。

本书可供隧道工程领域的科研、设计、施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

软弱破碎围岩长大隧道变形控制关键技术 / 赵队家
等编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司,
2017.5

(交通运输科技丛书)

ISBN 978-7-114-13842-3

I. ①软… II. ①赵… III. ①长大隧道—变形—控制
—研究 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 108152 号

“十三五”国家重点图书出版规划项目

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

书 名:软弱破碎围岩长大隧道变形控制关键技术

著 作 者:赵队家 孙志杰 宿钟鸣 董立山

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:15.5

字 数:358 千

版 次:2017 年 5 月 第 1 版

印 次:2017 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13842-3

定 价:80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾 问：赵冲久 周 伟 成 平

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 唐树名 汪双杰 廖朝华

金 凌 李爱民 曹 迪 田俊峰 苏权科

严云福

总 序

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版《交通运输建设科技丛书》,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建

设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版《交通运输科技丛书》,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

杨伟光

2016年6月24日

前言

我国山区面积占国土总面积的三分之二以上,特别是山西省,表里山河,东界太行山,西有吕梁山,南耸中条山,北亘恒山、五台山,中立太岳山,山区面积占全省总面积的80%以上。多山的地理环境给交通建设带来极大不便。而隧道作为公路穿越山岭的重要构造物,可有效克服地形高差,缩短建设里程,保护自然环境,减少公路用地,保障全天候运行,对解决山岭地区高速公路的交通建设难题起着不可替代的作用。

长大公路隧道因埋深大、线路长,在隧道建设过程中不可避免地要穿越节理裂隙较发育的软弱断层破碎带。在软弱破碎围岩条件下修筑长大隧道,其超前预支护结构参数及施工工法该如何选取,初期支护、二次衬砌支护时机该如何选择,爆破参数怎样选取才既安全又高效等技术难题是工程成败的关键。

基于此,山西省交通科学研究院组织黄土地地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室、山西交科公路勘察设计院岩土与地下工程研究所、山西交科岩土工程有限公司技术骨干成立了“软弱破碎围岩长大隧道建设关键技术”课题攻关小组。历经5年的艰苦努力,依依托运城至灵宝高速公路中条山特长隧道(9.67km),重点围绕软弱破碎围岩隧道施工工法特点、超前支护结构受力规律以及爆破施工围岩振动响应规律三个方面开展科学研究。同时,结合山西省太原至古交高速公路西山特长隧道(13.68km)、平遥至榆社高速公路宝塔山特长隧道(10.34km)等多条长大隧道建设技术成果,建立了可考虑掌子面水平位移影响的变基床系数弹性地基梁模型,提出了软弱围岩条件下管棚超前预支护体系的支护参数;推荐了不同围岩级别各工序应力释放组合及施工步距;建立了炮孔群孔齐发分析模型,揭示了隧道不同位置处的振速衰减规律及振速峰值分布规律,形成了软弱破碎围岩条件下长大隧道修建关键技术。

本书共7章,第1、2、4章由赵队家撰写,第3、5章由孙志杰撰写,第6章由宿钟鸣撰写,第7章由董立山撰写。

本书在撰写过程中,得到了山西省交通科学研究院学术委员会的高度重视和悉心指导,得到了山西交科公路勘察设计院韩大千副院长、王拥军工程师,山西交

科岩土工程有限公司武军总经理、任崇才工程师的鼎力支持,得到了运城至灵宝高速公路建设管理处王强锁处长、秦世华总工,华中科技大学郑俊杰教授、章荣军副教授的帮助和支持。同时,得到了交通运输部应用基础研究项目(2014319771190)、山西省交通建设科技项目(10-2-13)、山西省交通建设科技项目(11-2-18)等科研项目的资助,在此一并表示感谢。

由于时间仓促和编者水平有限,不足之处在所难免,恳请同行专家和读者批评指正。

作 者

2016 年 10 月

目 录

1 绪论	001
1.1 引言	001
1.2 国内外研究现状	001
1.3 研究思路及主要内容	005
2 软弱破碎围岩特征及隧道变形控制措施	007
2.1 软弱破碎围岩的含义	007
2.2 软弱破碎围岩隧道变形特征	008
2.3 软弱破碎围岩隧道变形控制的基本原则与理念	011
2.4 软弱破碎围岩隧道变形控制措施	012
2.5 软弱破碎围岩隧道常用施工方法	015
2.6 软弱破碎围岩隧道施工方法数值分析	019
3 中条山特长公路隧道工程	031
3.1 工程概况	031
3.2 隧道地质与水文情况	034
3.3 隧道的设计类型及结构形式	038
3.4 隧道施工安全组织管理	041
4 支护结构力学特性及围岩稳定性分析	044
4.1 隧道初期支护受力特性分析及结构尺寸优化	044
4.2 应力释放率对围岩稳定性影响的数值模拟	075
4.3 应力释放率与仰拱至掌子面距离的配合效果分析	084
5 超前预支护系统作用效果及其与施工工法优化组合	096
5.1 超前管棚作用机理的理论研究	096
5.2 管棚对地层稳定性控制效果分析	102
5.3 超前管棚与不同施工工法的配合效果分析	120
6 爆破荷载作用下围岩稳定性控制措施研究	128
6.1 小间距隧道爆破振动控制研究现状	128
6.2 爆破荷载作用下小间距隧道响应基本规律分析	130
6.3 小间距隧道振动响应控制参数研究	145

7 软弱破碎带隧道施工工法比选及参数优化 159

7.1 软弱破碎带隧道施工概况 159

7.2 预留核心土法下核心土作用效果研究 161

7.3 不同施工工法下临时仰拱作用效果研究 176

7.4 台阶法下台阶长度作用效果分析 181

7.5 锚杆及导管的力学行为及施工参数优化 195

附录 现场试验监测数据..... 202

参考文献..... 235

1 绪 论

1.1 引 言

我国已经成为世界上公路隧道数量最多、发展速度最快的国家。山西省地质构造复杂,地貌类型多样,地理环境独特,近 80% 的面积位于山区。多山的地理环境给交通带来极大不便,同时也给隧道工程的发展带来了历史机遇。

依托工程中条山特长公路隧道进口位于运城市盐湖区解州镇王窑头村,出口位于芮城县陌南镇石坡村,属上下行分离的高速公路隧道。隧道全长 9671m,Ⅳ、Ⅴ级围岩段约占隧道长度的 40%,最大埋深 681m,属深埋特长公路隧道。隧道于 2009 年 11 月 28 日正式开工,2015 年 12 月 31 日正式通车。隧道所在的运灵高速公路是山西省挺进中原、通向东南沿海的一条重要出省通道,也是推进“黄河金三角区域”经济一体化的一条黄金通道。

中条山隧道是运宝高速公路的控制性工程,全隧分布多条发育宽度不等的软弱破碎带。断层带内岩体破碎,节理裂隙密集发育,力学强度低,稳定性差,隧道施工风险极高。

隧道大变形灾害主要发生在软弱破碎围岩条件下,并且在这种地质环境中,往往存在高地应力、地下水、温度等多场、多相耦合作用,同时还具有明显的时空效应。在这种复杂的地质环境中,隧道围岩不仅要承受自身的多场、多相耦合作用,而且还受隧道开挖、支护过程中的多次应力重分布的影响。在多种大变形影响因素的共同作用下,隧道开挖之后会引起软弱破碎围岩错动、滑移,形成松动圈,岩体塑性化或吸水膨胀,从而引起隧道围岩大变形。因此,为了应对软弱破碎围岩隧道大变形灾害,对软弱破碎围岩变形的机理及控制措施进行分析研究,具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状

软弱破碎围岩大变形的持续发展,往往伴随着侵限、支护开裂,甚至垮塌等灾害,将严重影响隧道的施工和运营安全。软弱破碎围岩大变形问题已经引起研究者的重视,国内外学者分别从不同的角度开展了大量的研究工作,在软弱破碎围岩大变形机理和控制措施方面取得了一系列研究成果。

1.2.1 软弱破碎围岩隧道变形机理研究

孙钧等^[1]结合工程实际,对软弱围岩隧洞施工中力学形态进行了计算模拟和分析,文中除提出了考虑隧洞开挖面时空效应的三维分析模型外,还计入岩体流变效应,进行弹—黏塑性

数值计算,分别利用台阶法、全断面法、侧壁导坑法进行对比模拟分析,将计算结果与现场监测数据进行对比。

张志强等^[2]采用能描述岩体大变形特征的几何非线性程序 FLAC 进行数值模拟,揭示了软弱围岩隧道在高地应力条件下最大变位方向与最大主应力方向存在相互垂直关系的变形规律。

周太全等^[3]结合非线性有限元法对软弱围岩条件下的铁路隧道湿喷纤维混凝土支护结构施工过程进行数值模拟,分析了围岩和支护结构体的非线性力学行为的应力场、位移场分布,围岩塑性区分布特征。

李文秀等^[4]针对太行山区保阜高速公路韩家庄隧道软弱围岩条件下工程实际情况,将浅埋隧道开挖所引起的地表移动视为随机过程,应用随机介质理论模型,对隧道施工所引起的地表移动进行分析探讨。

郭志^[5]分析了软弱夹层的流变特性和等速流变与起始流变之间的关系,认为一定存在软弱夹层的临界等速流变变形,并提出了确定对应剪应力的方法。

张奇华^[6]对软弱夹层进行了室内剪切流变试验研究,依据蠕变曲线特性,分别以 Kelvin - Voigt 和 Burgers 模型描述了剪应力小于和大于长期强度时的蠕变曲线。

软弱破碎岩体在地下洞室开挖后,由于内部岩体应力不断释放,洞室浅层原生节理面张开,次生节理出现并扩展,破碎岩体剥离、脱落,围岩松动圈逐渐扩大,因而又引起深层岩体应力的释放,导致深部岩体的变形发生。所以,软弱破碎岩体变形破坏具有明显的渐进性特征。

Bjerrum^[7]和王志伟^[8]等研究了引起渐进破坏的原因可能为应力释放,土体出现节理面或不连续的结构面,发生应变软化,应力和应变的不均匀分布,出现裂缝以及在水作用下软化,孔隙水压力的增长等。

沈珠江^[9]以广义吸力为基础,从颗粒材料的软化机理入手,提出了描述软化过程的新理论,此理论方便应变局部化问题采用常规有限元方法进行分析,开辟了解决工程中渐进性破坏问题的新途径。

D. Sterpi 等^[10]对浅埋隧道的渐进性破坏进行研究,提出了“结构软化”和“材料软化”的分析方法,对试验过程中渐进性破坏过程进行了模拟。

C. Callari^[11]分析了浅埋隧道应变局部化现象的发生及其扩展过程,研究了开挖进度对应变局部化、开挖产生的位移及隧道稳定性的影响。

1.2.2 软弱破碎围岩隧道施工方法研究

软弱破碎围岩隧道施工是隧道施工中的热点问题。由于破碎围岩岩性较差,若施工中采用的施工方法不当,极易导致隧道塌方等事故。破碎围岩一般采用的隧道施工方法为台阶分部法、CD 法、CRD 法以及双侧壁导坑法等。

国内学者齐琳^[12]对北京地区某高速公路三车道公路隧道的同一断面分别采用台阶法、CRD 法以及眼镜法展开有限元分析,并提出了“CRD 法与双侧壁导坑法均能满足设计要求,眼镜法在各施工阶段应力表现没有明显优势,台阶法应在采取了相应的加固措施或地质条件比较好时采用”的结论。

郭衍敬等^[13]就厦门翔安海底隧道采用有限差分软件 FLAC^{3D} 建立穿越砂层的三维有限差

分模型,分别采用 CRD 法和双侧壁导坑法进行开挖模拟,对比了两种工法对围岩塑性区的大小及位置以及两种工法对地层位移的控制等问题。

霍卫华^[14]就深圳大梅沙隧道展开有限元分析,对软弱围岩大断面隧道中围岩与支护结构的受力状态进行了模拟计算,得出“双侧壁导坑法导坑的围岩应力呈不对称分布,临时支护与永久支护结合部位会出现应力集中现象,中洞上部开挖是施工过程中最不利环节,据此提出对拱部支护及时施作二次衬砌及对围岩采用注浆加固等技术措施以保证围岩稳定”的结论。

薛继连^[15]在朔(州)—黄(骅港)铁路长梁山隧道施工中,针对各种不良地质条件所采取的各种施工措施,结合工程实践,提出了各种工法软弱围岩下基本施工原则、一般地段开挖与初期支护标准、不同地层及构造条件下的施工措施,有效地防止了较大塌方,确保施工顺利进行。

王伟锋等^[16]针对广福隧道某浅埋段地质条件复杂、断面大、岩性差的特点,为确保浅埋隧道的施工安全,减少隧道开挖引起的地表沉降和围岩变形,运用 FLAC^{3D} 对全断面法、短台阶法、单侧壁导坑法、双侧壁导坑法进行模拟,得出“双侧壁导坑法开挖时引起竖向位移及收敛位移比其他工法小且塑性区半径最小、安全可靠度最高”的结论。

奚正兵^[17]通过利用有限差分软件分析合(肥)—武(汉)铁路大别山隧道软弱围岩地段采用不同工法开挖隧道引起地表沉降、塑性区范围及地层分层沉降,提出了相关隧道施工技术,认为对于不同的开挖方式,围岩应力释放取决于隧道开挖的状态,单侧壁导坑法较台阶法地表沉降发展速度及地层应力更为均匀。

陈鉴等^[18]根据当前软弱围岩中公路隧道常用施工方法,采用数值计算并综合考虑各种因素,得出在软弱围岩中隧道施工合理的开挖方法。

胡文清等^[19]以木寨岭隧道软弱围岩段的施工为例详细介绍了在 I 类软弱围岩条件下的隧道设计和施工技术特点,并进行了平面弹塑性有限元数值分析,得出在 I 类软弱围岩条件下隧道采用双侧壁导坑法施工时,底板仰拱与拱周支护随掌子面开挖同时支护形成封闭的承载圈可保证围岩稳定性。

关宝树^[20]从国内外软弱围岩隧道的施工实例,特别是开挖断面早期闭合的实例中,总结软弱围岩隧道大断面施工技术的基本经验。指出把掌子面前方围岩的补强与掌子面后方开挖断面早期闭合结合在一起,在有水的条件下,再把掌子面前方围岩的超前钻孔预测组合在一起,是解决不良围岩隧道施工的基本方法。

张健明等^[21]依托谷竹高速公路 4 座软弱围岩隧道建设,从实践中探索如何通过开挖工艺、开挖方法、支护措施的调整,有效控制围岩的变形和塌方,保证隧道的施工质量和安全。

陈耕野等^[22]对沈阳至大连高速公路韩家岭大跨度隧道采用分层台阶法进行开挖并进行了稳定性应力检测研究,主要阐述该隧道应力测试方法、喷层与围岩接触应力、锚杆内力随时间变化的量测数据及分析,得出随着开挖进行围岩对初期支护的作用处在变化之中,通过短掘短支可控制围岩变形,大跨度公路隧道采用台阶法开挖施工方式可行的结论。

1.2.3 软弱破碎围岩隧道变形控制技术研究

为了保证软弱破碎围岩隧道围岩的稳定性,通常需要采用有效的控制措施,以改善围岩的力学性能,保证隧道施工和运营阶段安全。目前,隧道围岩大变形的控制措施主要包括主动支

护和被动支护两个方面。被动支护主要由支护材料本身被动地承担由地应力和围岩碎胀所产生的松弛和变形压力,且破坏后的围岩是作为荷载作用在支护结构上,不能发挥围岩自身的承载能力,围岩破坏后的状态、力学性质和破坏程度对支护结构的稳定起着决定性作用。主动支护是指通过运用锚杆、喷射混凝土、金属网和注浆等方法或其不同组合进行的支护方式,在很大程度上能改善破裂岩体的应力状态,提高围岩自身的承载能力。

黄惠芳^[23]通过对软弱破碎围岩双线或多线隧道中两种临时仰拱形式在施工各阶段的作用进行对比和分析,提出了临时仰拱形式以直线形式为最佳的观点,并对兼做弃渣运输通道的临时仰拱的设置形式提出了应预留上拱度的观点。

范廉明^[24]总结隧道进洞技术,研究预留核心土环形开挖法中各种超前支护方式的应用条件,表明超前锚杆、超前小导管和管棚分别适用于Ⅳ级和完整性较好的Ⅴ级围岩、完整性较差的Ⅴ级围岩和浅埋Ⅴ级围岩及土体。

余伟健等^[25]提出的“适当让压”的支护思想有利于提高围岩的自承载能力和支护系统的稳定;在适当让压后,通过施作锚喷网+锚索支护,发挥了“围岩—支护”的共同承载作用,该措施既能充分发挥岩体的承载力,又能充分调动支护结构的抗力。

关宝树^[26]根据软弱围岩隧道变形的基本规律,系统总结了国内外,尤其是日本控制隧道开挖后变形的基本对策:①超前支护——控制先行位移;②掌子面补强——控制掌子面挤出位移;③脚部补强——控制脚部下沉;④加强初期支护。

路军富等^[27]研究得出围岩内不同部位变形模式是影响锚杆受力的关键性因素,拱部锚杆受力很小,边墙锚杆受力较大;建议隧道拱部 130° 范围内可不设置锚杆,该范围以下至墙角设置全长黏结型系统锚杆。

赵建平^[28]建立了基于双参数弹性地基梁模型上的管棚支护结构与围岩相互作用模型,将超前管棚的支护效果从定性描述上升到定量描述,对于定量研究管棚在开挖过程中的变形、内力变化和管棚参数的优化设计等研究具有实际意义。

董新平等^[29,30]基于杆系有限元理论对超前管棚在施工中的作用进行空间分析,研究表明在软弱地层小直径管棚法施工中,管棚主要通过管棚注浆以及棚架体系在纵向和横向对开挖释放荷载进行重新调节和分布等方式对地层沉降进行控制;棚架体系中,地层条件的改变对位移敏感度的影响相对较大。

伍振志等^[31]采用有限差分法模拟了不采用和采用管棚注浆时围岩的应力场和位移场,定量分析了管棚注浆法的加固效果,说明采用管棚注浆法能显著抑制松软地层的变形,减少隧道支护结构的变形和受力,避免浅埋松软地层开挖中出现塌方现象。

Sung 等^[32]基于新奥法的原理研究了软弱岩体中隧道开挖的最佳支护设计。

陈军等^[33]结合软弱围岩铁路隧道工程,运用三维有限元数值分析方法,对软弱围岩中隧道采用双侧壁导坑开挖法的施工全过程进行了数值模拟与分析,重点研究了大断面隧道施工中二次支护与掌子面的距离对隧道稳定性的影响,以期寻找隧道二次支护的最佳施作时机。

郭建新等^[34]从软破围岩锚喷支护位移理论出发,结合野狐岭二号隧道工程实例,运用理论分析和现场监测,研究了软破围岩隧道开挖过程中围岩的时间和空间效应,并对空间围岩位移的释放进行了分析。在此基础上,根据围岩的围岩流变曲线进行合理的支护时间选择。

综上,当前对软弱破碎围岩隧道变形控制的研究还存在以下问题:

对掌子面先行位移控制技术——超前管棚预支护系统的分析多数是基于常系数下的弹性地基梁理论,未能考虑到由于掌子面隆起变形而产生的局部基床系数软化现象,进而使计算结果偏离实际情况;管棚前后段的合理搭接长度还有待确定,影响合理搭接长度的相关参数需要明确;随着隧道的不断开挖掘进,钢管的内力和应变的变化趋势以及围岩的位移变化规律等也还需进一步研究。因此,需要对超前管棚与后续施工工法的配合效果进行进一步研究,为管棚的优化设计及施工方案的合理选择提供一定的理论基础。

对掌子面挤出位移和后行位移的控制技术——软弱围岩隧道施工过程中各工法的力学行为研究和变形机理的研究较多(如台阶、核心土、临时仰拱、锚杆、导管以及支护结构施作时机等),但不系统。因此,对软弱围岩条件下施工工法下隧道各位移控制措施的力学行为进行系统分析很有必要,可为软弱破碎带中各种工法的合理实施和各项施工参数的最优选取提供理论依据。

在小净距隧道钻爆施工阶段,爆破作用对邻近隧道的围岩以及已施作支护结构的振动影响较大,有可能对邻近隧道结构造成损伤。如何合理控制爆破参数,既达到较好的爆破效果,又尽可能地减小爆破作用对邻近隧道的振动影响,需要进行深入探讨和分析。

1.3 研究思路及主要内容

1.3.1 研究思路

本书以运(城)至(灵)宝高速公路中条山特长公路隧道为依托工程,开展软弱破碎围岩特长隧道变形控制现场试验,并结合数值模拟方法,对软弱破碎围岩特征及隧道变形控制措施、隧道支护结构力学特性及围岩稳定性分析、超前预支护系统作用效果及其与施工工法优化组合、爆破荷载作用下围岩稳定性控制措施研究、软弱破碎带隧道施工工法比选及参数优化等问题开展了系统研究。最后,将上述研究成果应用于中条山特长公路隧道建设中,并通过现场测试,对该控制技术的应用效果进行评价。

1.3.2 主要研究内容

为了揭示软弱破碎围岩特长隧道变形机理,提出一套可有效控制围岩变形的控制技术,本书采用工程调研、理论分析、数值模拟和现场试验相结合的方法,从以下几方面开展研究:

在总结国内外已有研究成果基础上,对软弱破碎围岩特长隧道施工方法、变形特征规律以及变形控制措施进行概括总结。

采用理论分析和数值模拟相结合的方法,建立超前管棚支护段的理论分析模型及三维塑性数值仿真模型,结合中条山特长隧道实体工程,分析洞身超前管棚的荷载传递特征、确定管棚的主要设计参数,对超前管棚的荷载传递机理以及其对地层稳定的控制效果进行分析,并对超前管棚与后续工法的配合效果进行研究。评价管棚预支护体系在控制地层松弛及掌子面先行位移方面发挥的作用。

采用数值分析结合现场试验的方法分析比较了软弱破碎带不同施工工法下隧道的力学行为,分析比较了临时仰拱、核心土(核心土长度、核心土面积)、台阶法施工下台阶长度等对隧

道结构受力及围岩变形的影响程度及影响规律。根据对软弱破碎围岩变形的控制效果选择最优的施工工法。

考察了不同应力释放率下支护结构的受力及围岩稳定性的变化规律;综合确定支护结构的合理施作时机,明确仰拱距离掌子面的合理距离。采用三步应力释放法,研究了支护时机与掌子面闭合距离对隧道结构的影响,推荐了不同围岩级别下支护结构合理施作时机,优化了掌子面闭合距离。

分析了小间距隧道的爆破振动对已施作支护结构力学行为及围岩稳定性的影响,研究了隧道洞周爆破振动的分布规律,在此基础上,找到隧道最危险断面和断面上最危险部位。对隧道爆破因素(炮孔长度、炸药爆速和炮孔直径)进行了参数分析,研究了各爆破因素对临近隧道振动响应峰值及分布规律的影响。首次采用炮孔群孔齐发技术,揭示了临近隧道不同位置处振动演化规律,优化了小净距隧道爆破设计指标,形成了弱爆破控制技术。

2 软弱破碎围岩特征及隧道变形控制措施

2.1 软弱破碎围岩的含义

2.1.1 软弱围岩的分类

首先软弱围岩属于软岩的范畴,因此软弱围岩的分类及评价可采用软岩的分类。目前,普遍采用的软岩定义基本上可归于地质学描述的范畴,按地质学的岩性划分,地质软岩是指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量泥质、炭质、膨胀性黏土矿物的松、散、软、弱岩层,该类岩石多为泥岩、页岩、千枚岩等单轴抗压强度小于 25MPa 的岩石,是天然形成的地质介质。

根据《工程地质手册》关于岩石按照坚硬程度分类中,软质岩可分为较软岩、软岩和极软岩三级,中科院地质与地球物理研究所伍法权等根据隧道工程实践中遇到的新的围岩介质,在软岩和极软岩类的代表性岩石中补充了特殊岩土体类型,如表 2-1 所示。

软质岩按坚硬程度等级划分表^[35] 表 2-1

定 性 值	单轴饱和抗压强度 (MPa)	定 性 鉴 定	代表性岩石
较软岩	$15 < R_c \leq 30$	锤击声不清脆,无回弹,较易击碎;浸水后,指甲可刻出印痕	1. 强风化的极硬岩; 2. 弱风化的硬岩; 3. 未风化~微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等
软岩	$5 < R_c \leq 15$	锤击声哑,无回弹,有凹痕,易击碎;浸水后,手可掰开	1. 强风化的坚硬岩; 2. 弱风化~强风化的硬岩; 3. 弱风化的较软岩; 4. 未风化的泥岩等; 5. 遇水软化岩石:云母片岩、灰质板岩
极软岩	$R_c \leq 5$	锤击声哑,无回弹,有较深凹痕,手可捏碎;浸水后,可捏成团	1. 全风化的各种岩石; 2. 各种半成岩的岩石;第三系砂岩、泥岩等; 3. 第四系各种成因堆积物:如黄土、黏土、砂土、粉土、碎石土等; 4. 遇水软化或膨胀型岩石:膨胀土