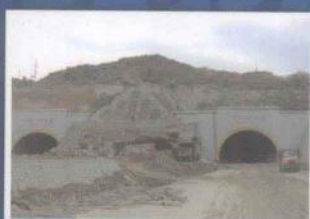
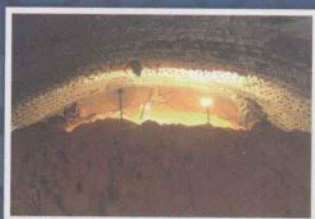


风积沙隧道 设计与施工技术指南

仇玉良 黄俊文 肖 均 史宝童 著



人民交通出版社
China Communications Press

Technical Guide for
Design and Construction of Aeolian Sand Tunnel

风积沙隧道设计与施工技术指南

仇玉良 黄俊文 肖 均 史宝童 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为风积沙地层浅埋暗挖公路隧道设计与施工技术指南。本书针对风积沙地层特有的工程地质特性,采用理论分析、室内试验、现场试验等综合手段,研究总结了一整套关于风积沙地层加固措施和施工开挖方案的关键技术,填补和丰富了我国风积沙地区隧道的建设技术。全书共分九章:第一章为绪论,总结风积沙隧道的建设技术的难点和特点。第二章介绍风积沙围岩工程特性。第三章介绍风积沙隧道现场注浆试验。第四章介绍风积沙隧道围岩压力计算方法。第五章介绍风积沙隧道设计施工要点。第六章介绍风积沙隧道超前预支护关键技术。第七章介绍风积沙隧道施工开挖关键技术。第八章介绍风积沙地层加固技术。第九章介绍风积沙隧道施工监控量测技术。

本书可供从事隧道设计、施工的技术人员参考,亦适合相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

风积沙隧道设计与施工技术指南 / 仇玉良等著. —
北京:人民交通出版社, 2013.1

ISBN 978-7-114-10241-7

I. ①风… II. ①仇… III. ①风积土-隧道工程-设计-指南②风积土-隧道施工-指南 IV. ①
U452.2-62②U455-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 292590 号

书 名: 风积沙隧道设计与施工技术指南

著 作 者: 仇玉良 黄俊文 肖 均 史宝童

责任编辑: 付宇斌

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 10.75

字 数: 180 千

版 次: 2013 年 1 月 第 1 版

印 次: 2013 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10241-7

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



风积沙隧道设计与施工技术指南

前 言

我国是一个多沙漠的国家,风沙面积约为 173.11 万 km^2 ,占全国总面积的 18.03% 左右,东起黑龙江,西至青海、新疆等地均有分布,地貌类型以风积地貌和风蚀地貌为主。随着我国西部大开发战略的持续实施,基础建设的迅速发展,高速公路、高速铁路将不可避免地穿越这一特殊的地貌单元,而自然形成的风沙地貌也给工程建设带了诸多困难。

风积沙是沙被风沙流搬运到冲积平原地区形成沙丘而产生的,属第四纪风积物,系指在风成沙性质上发育起来的土壤,具有无黏性、黏聚力小甚至无黏聚力、抗剪强度低、透水性好、颗粒较细、含水率少、保水性差、毛细不发达等特点,整体呈松散堆积状态。隧道施工时无法形成有效承载拱,漏沙、滑沙现象严重,伴随着隧道开挖,地表极易产生纵向、横向裂缝,洞内初期支护变形速率快,变形量大,施工控制管理难度很大。

面对榆神(榆林—神木)高速神木一号风积沙隧道带来的技术问题和挑战,在榆神高速公路有限公司的资助下,陕西省交通运输厅立项了风积沙地层浅埋暗挖公路隧道修筑技术研究课题。该隧道 2009 年 4 月份开始施工,同年 5 月份进入风积沙段,针对风积沙地层特有的工程地质特性,采用理论分析、室内试验、现场试验等综合手段,从注浆材料的选择、施工方案的优化及变形量、变形速率的控制标准等方面着手,研究总结了一整套关于风积沙地层加固措施和施工开挖方案的关键技术。

本书在紧扣课题研究成果的基础上,对风积沙地层工程地质特性、超前支护和施工开挖方案关键技术、风积沙地层加固措施和监控量测重点及方法做了详细分析和阐述,并归纳总结了风积沙隧道设计施工要点。本书内容全面,实践性强,是一本集风积沙隧道施工经验和研究成果为一体的综合性书籍,极大地填补和丰富了我国风积沙地区隧道的建设技术,并可为风积沙隧道的施工与管理提供可靠的科学依据和技术支撑,全书共分九章:

第一章介绍我国风积沙分布的范围及特点,风沙地貌的类型及成因,重点介绍了我国风积沙隧道的建设历史、现状及各隧道的详细工程信息,总结了风积沙隧道建设

技术的难点和特点。

第二章介绍风积沙隧道地层的物理、化学及力学特性。

第三章通过现场正交注浆试验揭示风积沙地层的注浆特性,总结不同注浆材料的优缺点和适用条件,对比分析竖直旋喷桩和水平旋喷桩的固沙效果,并就竖直旋喷桩加固过程中出现的问题进行了总结。

第四章全面分析国内外各种常用的围岩压力计算理论的优缺点和适用条件,并根据现场围岩压力监测结果,提出了超浅埋、浅埋、深埋风积沙隧道的分界标准及相应的围岩压力计算公式,详细阐述了结构安全计算中等效节点荷载准确分配方法的推导过程。

第五章主要介绍风积沙隧道的选线原则,总结了风积沙隧道洞口、洞门、初期支护、二次衬砌设计及施工技术要点。

第六章针对风积沙隧道漏沙、滑沙现象严重的问题,以神木一号隧道不同超前支护形式为研究对象,详细分析和总结了超前支护设计和施工中存在的问题,并提出了更具针对性的风积沙隧道超前支护技术方案。

第七章详细分析各常见施工开挖方案在风积沙地层的适用性,提出了风积沙隧道开挖荷载释放率的计算方法,重点阐述了风积沙隧道施工开挖方案的施工原则和工艺要点。

第八章根据隧道穿越风积沙地层的部位、覆盖层厚度及施工环境的限制,详细论述几种常见的风积沙地层加固方法。

第九章介绍风积沙隧道监控量测的重点、方法及量测频率,并从围岩及支护结构稳定性、变形速率两个角度,提出了风积沙隧道初期支护稳定性速率和极限位移的判别标准。

在本书的编撰过程中,张晓旭、董长松、郑万坤、黄瑞、姚红志等做了大量的工作,王梦恕院士、韩常领教授级高工等提出了许多宝贵意见,同时也得到了许多一线技术人员的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促,水平有限,书中难免有遗漏和不足之处,一些论点和提法也值得商榷,恳请专家和读者批评指正。

作 者

2012年10月于西安

风积沙隧道设计与施工技术指南

目 录

第一章 绪论	1
第一节 我国风积沙的分布及特征	1
第二节 风积沙隧道的建设历史和现状	2
第三节 风积沙隧道建设技术难题	4
第二章 风积沙围岩工程特性	7
第一节 风积沙的物理特性	7
一、风积沙颗粒组成	7
二、风积沙天然密度	8
三、风积沙的含水性	8
第二节 风积沙的化学组成	9
一、风积沙矿岩组成	9
二、风积沙化学成分	9
第三节 风积沙力学特性	9
一、压缩特性	9
二、强度特性	9
三、力学特性	10
第三章 风积沙隧道现场注浆试验	12
第一节 风积沙地层特性和注浆必要性	12
一、注浆试验方案的确定	12

二、注浆加固的意义	12
三、注浆加固的目的	13
四、注浆加固机理	13
第二节 风积沙隧道注浆试验方案设计	15
一、试验依据	15
二、试验场地的选择	15
三、注浆材料的选择	15
四、注浆参数的选取	17
五、注浆设备	19
六、注浆效果检查	20
第三节 现场注浆试验	21
一、普通水泥浆注浆试验	21
二、超细水泥浆注浆试验	22
三、改性水玻璃浆液注浆试验	22
四、旋喷注浆试验	24
第四节 注浆试验结果分析	26
一、不同水灰比下水泥浆液可注性规律分析	26
二、不同注浆材料可注性分析	27
第四章 风积沙隧道围岩压力计算方法	30
第一节 常用围岩压力计算理论简介	30
第二节 风积沙地层围岩压力计算方法对比分析	37
一、围岩压力计算理论综合对比分析	37
二、现场实测围岩压力计算分析	40
三、风积沙隧道围岩压力确定	41
第三节 风积沙隧道衬砌结构安全性分析	44
一、衬砌结构强度计算方法和计算理论	44
二、衬砌结构安全性分析	50
第五章 风积沙隧道设计施工要点	57
第一节 风积沙隧道选线原则	57

第二节 洞口与洞门工程	58
一、洞口工程	58
二、洞门工程	59
第三节 支护结构设计与施工	61
一、设计要点	61
二、喷射混凝土施工要点	63
三、钢筋网施工要点	65
四、钢拱架施工要点	65
五、二次衬砌施工要点	66
第六章 风积沙隧道超前预支护关键技术	69
第一节 常用超前支护技术原理及方法	69
第二节 超前支护固沙效果对比分析	71
一、风积沙隧道超前支护技术对比分析	72
二、超前支护技术施工实践总结	79
第三节 超前支护技术特点综合分析	82
第四节 风积沙地层超前预支护技术	83
一、密排超前小导管	83
二、超前大管棚	86
三、水平旋喷桩	90
四、咬合大管棚	95
第七章 风积沙隧道施工开挖关键技术	98
第一节 隧道施工方法概述	98
一、常用施工方法概述	98
二、风积沙隧道工程简介	99
第二节 风积沙隧道施工方法适应性及综合评价	100
一、施工方法对比分析	100
二、施工方法技术特点综合评价	115
第三节 风积沙隧道开挖方法	117
一、双侧壁导坑法	117

二、CRD 法	119
三、台阶临时仰拱分部开挖法	120
第四节 风积沙隧道施工步距优化及开挖荷载释放率分析	122
一、风积沙隧道施工步距优化分析	122
二、风积沙隧道荷载释放率分析	125
第五节 风积沙隧道施工技术要点	131
第八章 风积沙地层加固技术	133
第一节 风积沙地层加固处理的目的及原则	133
一、风积沙地层加固目的	133
二、风积沙地层加固处理原则	134
第二节 风积沙地层加固方法	134
一、水泥搅拌桩加固	134
二、竖直旋喷桩加固	140
三、树根桩加固	144
四、渗透注浆加固	148
第九章 风积沙隧道施工监控量测技术	152
第一节 风积沙隧道监控的重点及方法	152
一、监控量测项目及重点	152
二、监控量测方法	153
三、监控量测频率	158
第二节 风积沙隧道极限位移分析	159
一、初期支护稳定性评价方法	159
二、风积沙隧道极限位移分析	160
第三节 量测数据处理与应用	161
一、量测数据整理、分析与反馈要求	161
二、风积沙隧道围岩稳定性判别标准	162
参考文献	163

第一章 绪 论

第一节 我国风积沙的分布及特征

我国是一个多沙漠的国家,风沙面积约为 173.11 万 km^2 , 占全国总面积的 18.03% 左右,展布于北纬 $35^\circ \sim 50^\circ$ 和东经 $75^\circ \sim 125^\circ$ 之间。主要分布在新疆 (58.9%)、内蒙古 (29.9%)、青海 (5.3%)、甘肃 (2.7%)、陕西 (1.5%)、宁夏 (0.6%)、吉林 (0.5%)、黑龙江 (0.4%) 与辽宁 (0.2%) 等九省区。风积沙是沙被风沙流搬运到冲积平原地区形成沙丘而产生的,属第四纪风积物,系指在风成沙性质上发育起来的土壤。风沙地貌主要分布在干旱气候区,那里日照强、昼夜温差大、降雨少 (小于 250mm/年) 而集中,年蒸发量大,常超过降雨量数倍甚至数百倍,植被稀疏矮小,疏松的沙质地表裸露,特别是风大而频繁,所以风沙作用就成为干旱区塑造地貌的主要作用类型。风沙作用并不局限于干旱区,在半干旱区和大陆性冰川外缘,甚至植被稀少的沙质海岸、湖岸和河岸也可形成。

风沙地貌可分为风蚀地貌和风积地貌两大类。风蚀是风力对地面物质的吹蚀和风沙的磨蚀作用。风蚀作用形成风蚀地貌。中国沙漠地区的风蚀地貌,除被广大沙丘所埋没以外,在大风区域还有广泛的出露,特别是正对风口的迎风地段,发育更为典型。主要分布在柴达木盆地的西北部,塔里木盆地东端的罗布泊洼地,东疆以及准噶尔盆地的西北部等地。风蚀地貌地表形态主要表现为风蚀石窝、风蚀蘑菇、雅丹地形、风蚀谷、风蚀洼地等。风积地貌是风力作用堆积而成的各种沙丘和沙堆的总称,广泛分布于柴达木盆地南部和东部、青海湖东岸、共和盆地、哈拉湖盆地以及青南高原的中部和西部。风积地貌主要是指沙漠地区的沙丘而言。沙丘在中国沙漠里分布面积最广大,有流动和固定、半固定之分。流动沙丘的表面无植

物覆盖,或仅在沙丘坡脚有少许植物,覆盖度在 15% 以下,风沙活动强烈,流动性大;半固定沙丘的表面,植被呈斑块状分布,覆盖度在 15% ~ 40% 之间,在植物生长较好的地方略有黏土或盐土结皮现象,有局部风沙活动,流动性较小;固定沙丘有密集的植被覆盖,覆盖度超过 40% ,或大部分沙丘表面有薄层黏土或盐土结皮,不易被风吹蚀,比较稳定。

第二节 风积沙隧道的建设历史和现状

我国风积沙分布广泛,然而由于风积沙地层具有黏聚力低、稳定性差的特性,隧道开挖极易坍塌,施工难度非常大。到目前为止,我国风积沙地区隧道工程实例还很少,建成的隧道以铁路隧道居多,穿越风积沙地区的公路大断面隧道还存在着施工经验不足、施工技术和方法不完善的缺陷,并且缺乏成型的、系统的、可供运用的施工模式。

位于内蒙古赤峰市克什克腾旗经棚镇东侧的经棚隧道,是国道 306 线经(棚)陈(营子)段的控制工程(国道 306 线经陈段二级公路于 2001 年 7 月 20 日开工,2002 年 10 月 15 日竣工)。隧道全长 290m,其中暗挖段 210m,隧道进口端 90m 处于松散风积沙丘中,沙丘主要为粉细沙,稍湿,沙中黏土含量小于 5%,未胶结,直立性极度差,洞顶最大埋深 34m。该隧道的施工采用超前大管棚预支护技术,利用侧壁导坑法开挖风积沙隧道。

包西铁路包头至大保当段最长隧道——活沙兔隧道于 2009 年 12 月 1 日建成通车。活沙兔隧道位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗阿镇东南部活沙兔村附近,隧道全长为 4370m,单洞双线隧道。该隧道所处地貌单元属于高原丘陵地貌,地势平坦,地形起伏不大,沙丘、沙垄较多,自小里程到大里程缓慢下降。隧道进出口为风积沙、粉细砂层,围岩差,埋深较浅,技术难度和施工难度高,是整个包西铁路的重点控制工程之一。该隧道在不良地质断面开挖中,采取弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤量测等施工工艺,顺利通过了进出口风积沙段。

2005 年 10 月 15 日青藏铁路柳梧隧道建成贯通,柳梧隧道进口 DK2002 + 602 ~ DK2002 + 643 段共计 41m 风积沙地段(其中 8m 明洞)。隧道地处高原高寒缺氧地区,温差变化较大,常年风沙极大,经过多年积累,山体表面形成风积沙层,厚度为 0 ~ 17m,主要为细沙层:浅黄色、砂质纯净,颗粒均匀、松散,自稳坡率

1:2.5。该隧道采用大管棚跟管钻进,一次支护有效范围大,减少了支护工作循环次数;采用自进式锚杆进行边坡支护,集钻、注、锚于一体,解决了常规锚杆钻锚时的塌孔问题,并采用化学浆液进行注浆。

骆驼场隧道为红柳林至神木西专用线一座单线隧道,隧道起讫里程为 DK3 + 064 ~ DK4 + 618,隧道全长 1554m。隧道位于陕北黄土高原梁峁沟壑区与毛乌素沙漠的接触地带,地表植被不发育,第四系黄土及沙覆盖层较薄,厚度 5 ~ 20m。洞身段主要位于砂岩中,隧道出口端洞口及洞身位于风积沙中,该沙地为半固定沙地。施工过程中为提高基底承载力,减小沉降变形,设计基底采用树根桩加固,使桩与细砂紧密结合,桩土表面摩擦力较大,满足隧道基底承载力的要求。

2002 年 11 月 26 日,神朔复线铁路新杏树岭隧道顺利贯通。新杏树岭隧道是神朔复线的一座全风积砂土质隧道,全长 241m,其基底穿过风积砂地层,埋深浅,地势起伏较大,进出口段分别位于不同的山体偏压带内。该隧道位于中低山黄羊沟右岸,沟谷发育,自然坡度 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$,洞身穿越山梁,起讫里程为 DYK46 + 105 ~ DYK46 + 346,洞身最大埋深 30m,位于既有线外侧,与左侧既有隧道相隔 20 ~ 100m。施工中风积沙土质是制约隧道施工的关键,因此在风积沙隧道基底采用树根桩加固,经测量没有发生明显的沉降现象,解决了狭窄施工场地情况下地基处理施工技术的难题。

包西铁路通道新响沙湾隧道于 2009 年 9 月贯通,该隧道位于内蒙古鄂尔多斯市境内响沙湾风景区,与库布奇沙漠仅一川之隔。隧道长 3430m,进口里程 GDK47 + 330,出口里程 GDK50 + 760,进出口分别设 90m 及 60m 明洞。隧道大部分位于半径 4500m 的曲线地段,纵坡坡度 11.5‰。隧址区属于高原丘陵地貌,风积沙地质发育,沙丘呈波状起伏,冲沟发育。施工中大管棚采用热轧无缝钢管加工而成,洞口设置管棚导向墙起到了保证管棚打设精度的作用,同时由于导向墙刚度大、承载力高,将管棚牢牢支撑于拱顶,有效确保了整个隧道进口初期支护的强度和稳定。

榆神高速神木一号隧道位于神木县西沙开发区西侧,隧道大致呈东北—西南方向展布,横穿沙丘与水磨河大桥相接。隧道为双洞分离式隧道,全长 714m,左线起讫桩号 ZK90 + 998 ~ ZK91 + 360,长 362m,右线起讫桩号为 K90 + 993 ~ K91 + 345,长 352m。最大埋深约为 37m,隧道横穿沙丘,上有车流密集的神锦大道,施工干扰大,隧道围岩主要为风积细砂、黄土,围岩级别 IV ~ VI 级,隧道左线

有 109m、右线有 80m,为全断面风积沙段,均为 VI 级围岩,围岩稳定性极差,前期施工中,出现三次大的塌方,漏沙更是经常出现。为解决滑沙漏沙问题,先后采用了小导管注浆、大管棚、水平旋喷桩等三种不同的超前支护方案,最终顺利地通过了风积沙段。

隧道施工怕软不怕硬。面对毫无固结能力的风积沙地层,锚杆锚固超前支护等常规施工措施基本上发挥不了作用。同时,由于风积沙很难形成塌落拱,掘进过程中稍有不慎,就会发生坍塌,安全风险非常大,施工难度超出预料。因此,系统地研究风积沙隧道围岩力学特性,地层动态施工力学行为,支护及施工控制技术,施工风险识别、评估技术,揭示风积沙地层隧道的开挖变形机理,构建风积沙隧道施工技术体系是非常必要的。

第三节 风积沙隧道建设技术难题

1. 风积沙隧道施工过程中容易出现的问题

结合神木一号隧道施工情况,该隧道左右线共有近 200m 通过风积沙地层。前期采用“超前小导管+四台阶法”施工,由于风积沙地层本身的特殊性,施工中集中出现了以下问题:

(1) 风积沙特有的工程特性导致围岩自稳能力极差,施工中洞内掌子面和侧墙部位漏沙、滑沙现象严重,如图 1-1 所示;导致掌子面前方地表产生了多条横向裂缝及地表漏斗,如图 1-2 和图 1-3 所示。



图 1-1 洞内漏沙、滑沙



图 1-2 地表漏斗

(2) 风积沙地层结构松散,自稳能力差,承载能力低,隧道开挖后初期支护变

形快、沉降量过大,局部严重侵限,最大侵限达 90cm,不得不进行换拱处理,如图 1-4 所示。

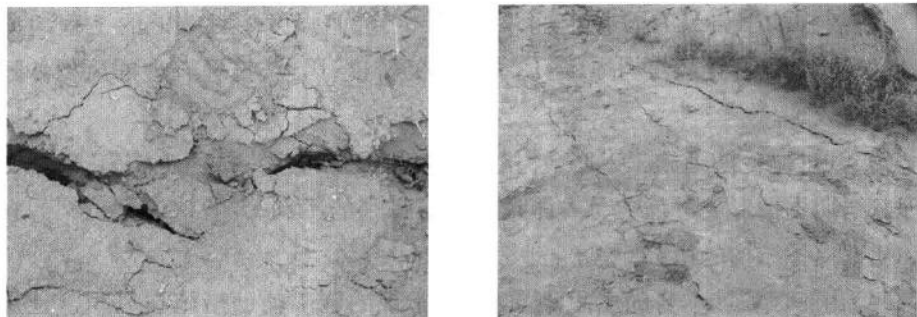


图 1-3 地表裂缝

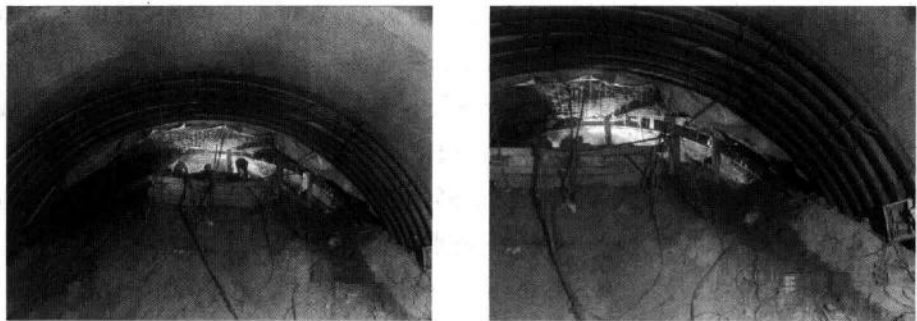


图 1-4 洞内换拱施工

(3)施工进度缓慢。进入风积沙地段后,由于漏沙严重,导致几次施工受阻,通过 20m 风积沙段耗时达 3 个多月,几乎处于停滞状态,严重影响了整个项目的工期进度。

2. 风积沙隧道建设的技术难题

(1)风积沙地层与一般地层不同,其围岩自稳时间极短,开挖后若不支护会立即坍塌。目前新奥法在山岭隧道及地下工程领域中得到了广泛应用。它是一种把设计、施工和监测相结合的科学的隧道建造方法。新奥法的核心就是根据围岩的性质允许围岩有一定的变形,以减少作用在支护结构上的围岩压力,提高工作效率和经济效益。而风积沙地层与一般岩石地层不同,其围岩自稳时间极短,开挖后若不支护会立即坍塌,根据地层特征曲线支护阻力与围岩位移的关系,若围岩自稳时间比支护施工时间短,支护结构要承受较大松散围岩压力,在这种地层中适时的支

护时间已没有意义,必须采用合理的预加固措施,提前加固风积沙层,才能保证施工安全。

(2) 风积沙围岩具有颗粒单一,黏聚力小,抗剪强度相对较低的工程地质特征,自稳能力差,开挖极易坍塌,增加了施工的难度,因此,选择合理的风积沙隧道施工方案较难。

(3) 浅埋暗挖隧道施工工序多,相应初期支护结构接头截面也较多,因此必须处理好初期支护形成过程中受力体系转换所带来的不利影响,保证钢拱架焊接质量和初期支护结构的稳定性,防止地表沉降过大。

(4) 由于风积沙本身的工程地质特征,常规的施工辅助措施在风积沙地层中难以发挥有效作用。对隧道工作面前方的土体进行超前预加固和预支护,是控制洞室变形的关键技术。风积沙围岩自稳能力极差,若存在临空面,洞顶会立即坍塌;若超前支护加固不当、加固厚度不足,也会造成初期支护变形过大而引起塌方,施工中必须根据风积沙地层工程地质特征、隧道施工方案特点和周围环境的限制要求,合理选择超前支护措施,有效加固沙体,抑制围岩变形。

(5) 风积沙隧道初期支护变形大,变形速率快,与一般隧道相比,无相应的监控量测宏观管理标准限值做参考,施工控制管理难度也较大。

第二章 风积沙围岩工程特性

第一节 风积沙的物理特性

通过广泛调研国内各风积沙地区的土工试验资料,并结合榆神高速神木一号风积沙隧道现场取样室内分析结果,对风积沙围岩的物理化学参数进行了统计分析,综述如下。

一、风积沙颗粒组成

《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)规定,沙主要是按照沙的细颗粒(小于0.074mm以下颗粒)含量 F (一般称为粉黏粒含量)进行分类。风积沙表现为典型的砂性土特性,粉黏粒含量的增加,最初可改善风积沙的级配,从而使压实性有所改善,CBR值和回弹模量等有相应提高;当粉黏粒含量达到一定比例后,其工程特性,特别是力学特性发生很大变化,砂性土的特性逐渐失去。研究表明,风积沙的力学特性变化点在粉黏粒含量为40%~60%之间, $\leq 40\%$ 时表现为砂性土的性质,40%~60%时砂性土性质逐渐降低, $\geq 60\%$ 时表现为典型的粉黏土的性质。

风积沙的粒径比较集中,主要分布在0.25~0.5mm和0.075~0.25mm两个范围内,属于细沙,其中以0.075~0.25mm为主,而大于0.5mm的粗粒和小于0.075mm的粒径含量极少。尤其粉黏粒含量极少,表明颗粒表面活性低,黏性小,松散性强,水稳性好。

典型风积沙颗粒级配分布情况见表2-1,不均匀系数 $C_u < 5$,曲率系数 $C_c < 1$,表明其颗粒大小均匀,级配曲线不连续,属典型的级配不良细沙。

风积沙颗粒级配 (%)

表 2-1

样本名称	粒径 d (mm)				
	>1.0	0.5~1.0	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075
样本一	0	2.1	19.7	47.6	30.6
样本二	0	4.3	18.5	47.9	29.3

注:该样本数据来自毛乌素沙漠地区。

二、风积沙天然密度

风积沙的天然密度主要与粒度成分及分选程度有关,沙粒越粗,密度越大,分选程度越高,密度越小,天然密度一般为 $1.58 \sim 1.72 \text{ g/cm}^3$ 。

风积沙的天然密度还因沙丘活动部位而不同,活动沙丘较固定、半固定沙丘密度大,随着固定程度增高,密度减少,迎风坡较背风坡密度大,沙丘上部较下部密度大。

表 2-2 是榆神高速神木一号隧道风积沙物理指标表,由测试结果可以看出风积沙黏聚力很小,甚至无黏聚力,发生滑移时内摩擦阻力主要由颗粒之间的咬合力和粒间表面摩擦力控制。

风积沙物理指标表

表 2-2

洞内取样	含水率 (%)	天然孔隙比	天然重度 (kN/m^3)	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	变形模量 (MPa)
ZK91+232	4.4	0.447	17.155	0.011	26.88	21.0
K91+240	4.8	0.456	17.165	0.012	27.65	22.0

三、风积沙的含水性

在沙漠中地下水一般都埋藏很深,沙层含水率较小,通常表层 20cm 为含水率小于 0.5% 的干沙层,40cm 以下沙层保持 2%~3% 的稳定含水率。沙层含水率随季节更替而呈现周期性变化,雨季沙层含水率提高,短期内可上升到 5%~6%,旱季含水率减小,20~40cm 沙层含水率可降低至 1%~2%。

风积沙的水分物理常数因粒度成分而变化,最大吸湿水量为 0.45%,稳定凋萎含水率 0.56%~0.71%,田间持水量 3.1%~4.7%,总毛细管持水量 23%~24%,风积沙的渗透性好,渗透系数一般在 $0.01 \sim 0.02 \text{ cm/s}$ 之间。