

HANHANQU GONGLU FENGXUE ZAIHAI
QIANSHI POHUAI JILI JIQI YUJING YANJIU

寒旱区公路风雪灾害 潜蚀破坏机理及其 预警研究

■ 李驰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

寒旱区公路风雪灾害 潜蚀破坏机理及其 预警研究

■ 李驰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书立足于环境岩土工程领域,结合作者在公路构筑物环境侵蚀机理方面的一些研究成果,主要针对风沙流或风雪流对公路构筑物的侵蚀机理进行了阐述,并提出了相应的预警措施。本书共分四个章节,分别为绪论;扰动风场中沙粒子和雪粒子的运动和迁移规律;公路风雪灾害潜蚀机理及量化分析;风雪灾害对寒旱区公路潜蚀影响的评价与预警。

本书可作为交通工程、道路桥梁等专业研究机构、高等院校科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

寒旱区公路风雪灾害潜蚀破坏机理及其预警研究 /
李驰著. — 北京:中国水利水电出版社, 2012.5
ISBN 978-7-5084-9776-1

I. ①寒… II. ①李… III. ①公路—风灾—灾害防治—研究②公路—雪害—灾害防治—研究 IV. ①U418.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第100122号

书 名	寒旱区公路风雪灾害潜蚀破坏机理及其预警研究
作 者	李驰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 8.25印张 196千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

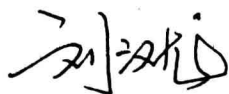
序

李驰教授的新著《寒旱区公路风雪灾害潜蚀破坏机理及其预警研究》即将付梓，我应邀欣然为序。看到年轻的同行努力开拓，不断进取，颇感欣慰。

学术研究的生命在于创新。《寒旱区公路风雪灾害潜蚀破坏机理及其预警研究》一书，充分体现了创新的特色。作者立足环境岩土工程领域，对公路构筑物的环境侵蚀开辟了新的研究蹊径，对于环境侵蚀量化分析方法的提出阐述了独到的见解。该书从工程构筑物单一的风沙流或风雪流侵蚀入手，到风雪复合侵蚀及其量化分析，内容上衔接紧密层层深入。不仅汇集了作者及其课题组多年的研究成果，也反映了现阶段本领域的最新研究进展，对于从事环境岩土侵蚀研究工作的科研人员是一本非常有价值的参考书。

李驰教授是一位年轻的岩土科技工作者，为人谦和，虚心好学。她多年来扎根于祖国西部边疆，怀着为家乡培养人才和服务于家乡经济建设的远大理想，热爱教学，潜心科研，善于创新，作风严谨、细致。相信新书的问世对拓展环境岩土侵蚀领域的研究工作，科学指导特殊地区的公路防护工程，以及对我国环境岩土工程领域研究工作的推动等具有积极的作用。

应当看到，环境岩土工程学科是一个年轻的、机遇与挑战并存的学科，环境岩土侵蚀研究，是一个前沿、广泛而复杂的课题，涉及多学科、多领域的交叉，有很大的研究空间和许多具体学术问题，还需要科研工作者进行持续、深入探索。期盼李驰教授在现有成果的基础上，继续坚持下去，一定能够获得更为丰硕的研究成果。



2012 壬辰龙年于南京

前 言

2006年10月一次偶然的机会途经锡—乌穿沙公路（南起鄂尔多斯高原杭锦旗锡尼镇，北止于乌拉特前旗乌拉山镇，横跨库布齐沙漠故而得名），沿途看到沙漠公路两侧边坡虽为粘土封闭，但作用已基本丧失，路肩处风蚀严重，右侧边坡严重积沙局部已侵害路面。这条被誉为“大漠奇迹”标志着杭锦旗人民与自然顽强抗争的穿沙公路，在风沙、高温、冰冻、雪害等恶劣的环境条件下被无情地侵害剥蚀着，也激发了我对沙漠公路环境侵蚀破坏机理研究的强烈愿望。于是，自2006年起历经3年时间对内蒙古境内不同道路等级沙漠公路的风蚀破坏现状、边坡防护情况等进行了实地调研，发现在内蒙古自治区境内修建的沙漠公路，约有95%以上受到不同程度的环境侵蚀破坏，残酷的现实让我坚定了科学研究的意志，旨在为公路构筑物环境侵蚀的防护工作提供一些科学的指导和有针对性的预警措施。

本书总结了我和课题组在公路构筑物环境侵蚀机理方面的一些初步研究成果。本书分为两个部分，一部分主要是针对风沙流或风雪流对公路构筑物的侵蚀机理研究，并建立相应的预警措施；另一部分着重于研究公路构筑物的风雪复合侵蚀机理，以及立足环境岩土工程领域的量化分析方法的提出。希望通过本书的出版能够抛砖引玉，也希望有志于环境岩土侵蚀研究的学者能够共同商榷、不惜赐教，是本书立言之本。

本书撰写过程中得到了国家自然科学基金项目（50868010），教育部科学技术研究重点项目（210036）和国家自然科学基金项目（51168035）的资助。书中引用了由我所指导的研究生高瑜、黄浩、杨慧、孙兵兵的部分学术论文成果，硕士生马云峰、葛晓东、张京京、郑程博等在专书整理过程中进行了校对、绘图、打印等工作。项目研究过程中有幸得到兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室郑晓静院士的指点，中科院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室董治宝研究员对风洞试验方案的独到见解使我受益匪浅，以及内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院申向东教授，内蒙古交通设计研究院罗俊宝教授级高工，兰州大学土木工程与力学学院王萍老师，中科院寒区旱区环境与工程研究所风洞实验室李芳老师等在项目研究过

程中给予了无私的帮助，借此一并表示感谢！

特别是，在本书即将出版时，荣幸地邀请到中国岩石力学与工程学会常务理事兼环境岩土工程分会理事长、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会副理事长、教育部长江学者奖励计划特聘教授刘汉龙先生为本书撰写序言，在此谨表示衷心的感谢！

环境岩土工程是一个年轻而充满活力的学科，与此同时环境岩土侵蚀研究是一个逐步被大家所认识并不断在完善中的研究方向，书中可能有诸多不足，恳请各位专家学者、同行批评指正。

李驰

2012 壬辰龙年于内蒙古·呼和浩特

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 寒冷干旱地区公路风雪灾害潜蚀特点及研究现状	2
1.2.1 公路风雪灾害潜蚀特点	2
1.2.2 国内外研究现状	2
第2章 扰动风场中沙粒子和雪粒子的运动和迁移规律	7
2.1 沙粒子和雪粒子绕路基运动和迁移规律的室内风洞试验研究	7
2.1.1 室内风洞试验介绍	7
2.1.2 风蚀风洞试验结果与分析	12
2.1.3 雪蚀风洞试验结果与分析	21
2.2 沙粒子和雪粒子绕路基运动和迁移规律的数值模拟研究	25
2.2.1 室内风洞试验数值模拟结果	25
2.2.2 FLUENT 粒子流数值模拟结果	37
2.3 本章小结	42
第3章 公路风雪灾害潜蚀机理及量化分析	44
3.1 路基边坡风沙流潜蚀机理及量化分析	44
3.1.1 试验路段的现场测试	44
3.1.2 路基边坡强度变化的室内试验测试	61
3.1.3 路基边坡微观结构孔隙变化的试验测试	72
3.2 路基边坡积雪融蚀潜蚀机理及量化分析	76
3.2.1 路基边坡积雪融蚀影响区域的数值模拟	76
3.2.2 路基边坡积雪融蚀潜蚀机理的量化分析	78
第4章 风雪灾害对寒旱区公路潜蚀影响的评价与预警	82
4.1 风蚀路基稳定性的评价	82
4.1.1 计算原理	82
4.1.2 路基稳定性数值计算	83
4.2 公路防护措施对路基周围环境风场的影响	88
4.2.1 中央分隔带的设置	88

4.2.2 护栏的设置.....	89
4.3 风雪流环境下公路交通预警措施研究.....	91
4.3.1 风雪流环境下安全运行速度计算分析.....	91
4.3.2 基于交通标志视认距离的安全行驶车速计算	100
4.3.3 风雪流环境下安全运行车速的推荐值	101
4.3.4 风雪流环境下安全行车的交通仿真	102
4.3.5 风雪流雪害交通预警措施研究	114
参考文献	119

第 1 章 绪 论

1.1 引言

“十一五”期间我国交通运输的大建设大发展取得了不平凡的成就，自主创新能力明显提高，科技在支撑和保障交通建设发展方面发挥了重要作用。根据《公路水路交通中长期科技发展规划纲要（2006～2020 年）》和《“十一五”西部交通科技发展规划》的要求，“十一五”期间西部地区在公路建设技术方面成绩斐然，针对西部地区复杂地质地形和恶劣气候条件等众多世界级难题，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，形成了以冻土、膨胀土和沙漠等 6 类筑路成套技术为代表的特殊地质地区公路建设关键技术，保障了西部地区大规模公路基础设施建设。

“十二五”期间西部公路交通仍处于大发展时期，公路建设将向自然条件更加恶劣的区域延伸，复杂地形地质条件下公路的建设与养护技术问题日益突出，公路建设和养护仍面临巨大技术挑战。为公路交通基础设施的建设与养护提供科技支撑，解决基础设施建养急需突破的关键性技术瓶颈，从而强化西部交通基础设施的耐久性和安全性技术，仍将是“十二五”时期西部交通运输科技发展的核心。特别是，西部地区地形复杂、气候多变、灾害频发，对交通安全监管、预警与应急保障能力将提出了更高要求。针对西部地区特殊地质条件和恶劣自然条件的特点，为交通基础设施的建养以及预警与应急技术提供理论指导，对保障和提升西部地区公路基础设施的建设、运营和管理有着重要的科学意义。

我国西部干旱寒冷地区如新疆、内蒙古、吉林、黑龙江等省、自治区，其地形之复杂、气候之恶劣为人所共知。因全年大风日数、沙尘暴日数、积雪日数较多，加之常年平均气温较低、日温差变化大，使得该地区公路因风沙和雪害复合侵蚀而失稳的现象频频发生。以填方路基为例，当路基构筑物置于干旱寒冷环境下，一方面公路路基遭受风沙侵蚀破坏，发生路基的吹蚀、掏蚀和风沙流的磨蚀破坏，路基填料土体孔隙中水分散失、连接减弱、孔隙率增加、填料土体抗剪强度因风蚀侵害而降低；另一方面，当公路路基置于风雪流场中，路基不仅遭受自然积雪的侵蚀，而且路基障碍物的存在还破坏了风雪流在“积”与“蚀”搬运过程中的动态平衡，运动中的雪粒子在风的挟带下沿路基不同部位沉积下来，其形成的积雪深度一般为自然积雪的 3～8 倍。特别是环境温度的改变影响到积雪性状出现交替变化，超渗产流侵蚀到路基结构内部引起冻融循环，尤其是在初春时，昼夜交替形成的反复冻融过程会影响路基填料土体的性状，如土粒团聚体的稳定性、水分传导率、抗剪切力等。风蚀和融雪侵蚀对路基的共同作用或交替作用就造成了路基的风雪复合侵蚀，路基也会因风蚀和融雪侵蚀的交叉作用引起土体结构损伤下抗剪强度的持续衰减，从而影响到路基在建设和运营中的稳定性。

自 2005 年起笔者在对内蒙古境内不同道路等级不同边坡防护下公路构筑物风蚀现状进行了实地调研，由于气候干燥、风大沙多、植被稀疏，沙漠公路路基的风蚀已成为最为严重的问题，亟待解决。据不完全统计，在我国沙漠地区修筑的公路约 95% 以上不同程

度地受到了风蚀破坏,也有路基边坡不同程度的风蚀、掏蚀及堆积,甚至出现大面积边坡坍塌现象,使公路自身强度和稳定性严重受损,缩短了公路的使用寿命。以内蒙古境内穿越库布齐沙漠 G210 公路为例,库布齐沙漠绝大部分为半荒漠地带,流动沙丘居绝对优势,占整个沙漠的面积 80%,以沙丘链和格状沙丘为主,一般高度为 10~15m,少数可达 50m,沙漠北部的黄河河谷平原上,还分布一些零星低矮(3m 以下)的新月形沙丘和沙丘链,固定、半固定的灌丛沙堆仅分布在沙漠边缘。风蚀或局部风蚀区域占公路沿线的 70%,因此,立足于特殊环境岩土工程领域,从提升环境灾害的预警与应急技术出发,运用岩土工程学的基本理论,研究特殊环境地区公路风雪灾害潜蚀的机理,建议合理有效的地区防护措施与预警方案,为保障该地区公路基础设施的建养和正常运营提供理论指导,对地区公路交通建设将具有重要的科学意义。

1.2 寒冷干旱地区公路风雪灾害潜蚀特点及研究现状

1.2.1 公路风雪灾害潜蚀特点

风雪灾害对公路构筑物的潜蚀是一个长期的、潜在的、复杂的过程,是风力等多种自然作用力与岩土体之间耦合作用的结果,同时涉及环境温度效应、湿度效益等,是环境岩土工程学、工程地质学、水文地质学和冰雪学等多学科领域的交叉。由于寒冷干旱地区大风频繁,积雪日数较多,常年平均气温低而降雨量少,水力的冲蚀作用不明显,公路风雪灾害的主要体现将是风力潜蚀和积雪融蚀。在风力潜蚀与积雪融蚀交叉作用的复杂体系中,沿路基边坡由坡脚至坡肩、由坡面至路基内部,遭受到风力潜蚀与积雪融蚀的破坏作用有所不同,在边坡表层坡肩附近区域是以风力潜蚀为主的风雪两相侵蚀;在坡脚延伸到路基内部局部区域是以积雪融蚀为主的风雪两相侵蚀;在坡中附近或者沿边坡全断面都是风力潜蚀与积雪融蚀复合影响区域。这种风力潜蚀和积雪融蚀的相互作用过程,并不是简单的风力潜蚀与积雪融蚀的叠加,而是风力潜蚀与积雪融蚀相互作用呈现循环的、相互加速或减速的、彼此制约的复杂作用体系。因此,在这个相互作用的过程中,路基填料土体受到的损伤是累积的、是渐进的、是潜在的和不易察觉的,但却引起路基土体宏观力学性能的退化,填料土体力学性能的持续衰减直接影响到构筑物在施工和正常运营中的稳定性。

1.2.2 国内外研究现状

1.2.2.1 风沙流潜蚀灾害研究现状

风蚀,简而言之就是风力对土粒的作用,由于土颗粒与土颗粒之间相互碰撞导致土粒跃动,出现风蚀。风蚀过程一般可分为三部分:土颗粒的移动、搬运、沉积。关于土壤风蚀问题的研究,国内外已取得一些研究成果。土壤风蚀指一定风速的气流作用于土壤,使土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的作用。土壤风蚀是导致土地退化和区域环境恶化的重要原因之一,更是我国干旱半干旱及部分湿润地区土地退化的荒漠化的主要过程之一,其发生区域广泛分布范围占国土面积的一半以上,严重影响了我国经济可持续发展。

风沙流对路基的风蚀作用可分吹蚀、磨蚀和掏蚀三种情况。吹蚀是风力直接带走路堤

填料颗粒,使路堤遭到破坏,往往在特大风力作用下路基的风蚀更为严重,形成骤发性的风蚀;磨蚀是气流中挟带的沙粒不断冲击填料颗粒,使颗粒发生位移或磨损,加快风蚀速度;路堤坡面不平整,形成局部小涡流,卷走细小颗粒,使大颗粒失去稳定性而落于坡脚,造成掏蚀;特别在路堤的背风侧,由于强大的涡流作用,掏蚀现象更为严重。

20世纪以来,关于风沙流的运动规律及土壤风蚀问题国内外已做过大量的研究工作。Bagnold等通过室内风洞试验对稳定地表和被侵蚀地表上沙粒移动的起动风速、沙粒的跃移蠕动和风沙流地表沉积特性等问题进行了一系列研究^[1]。Chepil等研究土壤颗粒在风力作用下的运动性质、颗粒起动条件、气流输沙能力以及风沙流的磨蚀作用等^[2-7]。同时,对一系列防风蚀措施进行了试验和评价,建立了风蚀流失量定量估计方程,研制了相应的风蚀研究仪器。其中最为重要的研究成果是Woodruff和Siddoway于1965年正式提出了著名的土壤风蚀方程(WEQ),这一成果标志着土壤风蚀从现状和理论研究向预测和应用研究的转变,系统的土壤风蚀理论体系已经初步形成^[8]。随着国际上对土地沙漠化问题的关注,国内兰州大学西部灾害与环境及风沙运动的多场多相耦合力学机理进行研究,其研究成果对于揭示土壤风蚀、沙尘暴和风沙灾害的本质有着重要的意义^[9-15]。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室、北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点试验室等高校和研究机构,对土壤风蚀进行了半定量、定量的试验研究,通过风洞试验研究土壤结构、土壤水分、植被条件、耕作与放牧等因子对土壤风蚀的影响。这些研究成果分别从理论的角度、利用室内风洞实验和野外实地观测等多方面,对土壤风蚀问题进行定性、定量的研究,并取得许多成果,主要集中在沙粒起动机制、风沙流结构、地表植被覆盖率与风蚀输沙率之间的关系等方面^[16-30]。

随着穿越新疆塔克拉玛干沙漠公路的成功修建,关于沙漠地区路基工程构筑物的风蚀问题引起人们的关注,在定量分析的基础上,通过野外观测结合风洞模拟试验,研究一定风场中工程构筑物引起的绕流(或扰动流)场特性,分析绕流场中沙粒运动或迁移的趋势或规律^[31-32]。文献[33]通过现场观测对路堤风蚀形态、风蚀高度,以及风蚀量随风蚀时间的变化规律进行了分析研究,指出沙漠路基风蚀量的大小,与填料类型、颗粒粗细、风速大小密切相关。文献[34]、[35]运用多元统计数学模型对公路沙害形成、沙害程度进行研究,并建立风沙危害程度的评判模式。上述研究成果对沙漠路基风蚀量大小以及影响因素进行了分析,对沙漠公路沙害程度进行了量化,并建立了沙漠风沙危害评判体系。非常值得一提的是,交通部西部交通建设科技项目“沙漠地区筑路成套技术研究”,通过现场观测、室内风洞试验及数值模拟对沙漠路基风蚀形态、风蚀高度,以及风蚀破坏规律进行了分析研究,为在流动、半固定及固定型沙漠公路的修建时选择合理的路基断面形式及填土高度等提供了理论指导^[36-38]。

近年来,人们不断在探索恶劣环境下工程构筑物及古代生土建筑物的潜蚀机理^[39-40]。注意到,工程构筑物抗风力潜蚀能力的强弱除了与环境风场(风力作用、地表覆盖及粗糙度状况、地表土壤等因素)密切相关外,还与填料土体粒间抵抗风力作用的抗分散能力有关。那么,具有不同抗剪强度的填料土体,由于抗分散能力不同也就具有了不同的抗风蚀能力。文献[41]、[28]曾建议将土壤的抗剪强度作为土壤抗水蚀、抗风蚀能力的表征。从微观结构分析土的抗风蚀能力研究风蚀环境下路基土的抗剪强度变化是一个新的热点,

国内兰州大学崔凯等人运用风洞试验、微结构分析研究了多元层状边坡土体风蚀速率与微结构参数关系^[42]。但对于一定环境风场下工程构筑物的立体侵蚀,其风力潜蚀的过程较土壤平面侵蚀更为复杂、影响因素更多,由于环境风场作用对路基土的影响,会随着路基填土的性质、路堤高度、路基土风蚀影响区域、边坡防护情况等变化而有所区别。并且,对于工程构筑物的潜蚀结果,相比于土壤潜蚀量的描述,更多关注的是对其强度、变形和稳定性的潜在影响。因而,揭示风沙流潜蚀路基机理,以及评价风力潜蚀环境下沙漠工程构筑物的稳定性已迫在眉睫。

文献 [43] ~ [46] 中笔者提出将路基土抗剪强度的变化辅之以微观结构特性的改变作为路基边坡抗风蚀能力的表征,通过室内风蚀风洞试验、现场原位十字板剪切试验、微观结构特性试验以及数值模拟,确定特定环境风场下沙漠路基边坡风蚀影响区域的临界边界,以及风蚀影响区域内土体抗剪强度的变化规律。即,处于一定风场下的沙漠风沙土路基,在风蚀影响区域内路基不同位置处受到风蚀作用影响的程度是不同的,即风蚀作用对路基土抗剪强度的改变在路基内部呈现不同的变化规律。因此,将路基土抗剪强度的改变作为路基抗蚀能力的表征,风蚀环境对路基的影响被等效为不同位置处路基土具有的不同抗剪强度,且风蚀环境下路基土的抗剪强度是会随着环境风场的强度、路基风蚀影响区域、不同路堤高度、由边坡向路基内部延伸深度的变化而改变。揭示了沙漠路基边坡的风蚀机理,对风蚀路基在施工和正常运营过程中的稳定性进行了评价。对于完善区域性沙漠地区路基设计计算,指导沙漠地区高等级公路建设以及边坡防治有着积极的意义。

1.2.2.2 风雪流潜蚀灾害研究现状

风雪流(又称风吹雪)为空气挟带着雪粒运行的非典型两相流,即雪粒被风卷着随风运行的一种天气现象。在我国新疆、内蒙古、吉林和黑龙江等省、自治区,因风吹雪雪害的影响,致使公路严重积雪,能见度降低,造成交通中断,路基受雪害侵蚀而失稳等现象频频发生,给公路交通安全和正常运营带来极大的影响。其中,以牧区公路风吹雪雪害尤为严重。仅以2001年入冬以来内蒙古自治区为例,由于连续降雪,干线公路G303线、G306线、S204线等路段严重雪阻,致使林东一大阪、经棚—锡林浩特、经棚—赤峰、林西—西乌旗交通中断,严重雪阻路线达8条,雪阻长度58.8km,受灾地区交通几乎陷于瘫痪。在风吹雪发生时不仅能见度变差,视距变短,还能在较短的时间内使视距发生急剧下降,易造成驾驶人员判断失误,对车辆的运行来说非常危险。除此以外,受寒区温度变化的影响,冰雪融水渗入道路结构内部,对路基路面结构产生潜在的侵蚀破坏,影响到道路结构的长期稳定性,缩短路基路面结构的使用寿命。因此,亟待从道路结构设计、交通工程设施设计、雪害防治、雪害预警预报以及交通(含雪害)信息服务等方面出发,解除或减缓公路风吹雪雪害的影响。

目前,对于公路雪害的研究主要集中在风雪流运动特性及雪阻的防治与预警方面。国外Schmidt和S. Kobayashi等学者比较系统深入地研究了风雪流的内在机理,之后运用数学模型、野外观测和风洞实验等方法开展了雪粒子物理性质、风雪流运动特性、垂直分布规律以及输运规律等方面的研究^[47-50]。国内在1967年由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、新疆交通厅公路管理局、中国科学院新疆地理研究所等单位系统开展了天山风雪流及其防治研究,并与新疆、西藏、黑龙江、甘肃等省(自治区)交通厅和农牧厅一起,

进行了我国西北、西南和东北风雪流研究。2001年,王中隆出版了我国风雪流及其防治研究的专著《中国风雪流及其防治研究》,比较集中地体现了我国风雪流的研究成果^[51]。交通部西部交通建设科技项目管理中心于2002年7月起动了西部交通建设科研项目“公路雪害防治成套技术研究”。对风吹雪灾害地区合理的公路选线以及基于风吹雪雪害仿真技术的公路风吹雪雪害预警系统进行了研究,并提出公路雪灾的工程综合防治成套技术^[52-55]。其研究成果为风吹雪地区公路设计与预警提供了理论依据,对公路风吹雪雪害工程防治提供了指导。为风雪灾害频发地区的公路工程实践提供了很好的技术支持,但对于风蚀、雪蚀或者风雪复合侵蚀的机理并未涉及。

近年来,土壤水蚀或融雪侵蚀是水土保持领域研究的热点。融雪侵蚀与水蚀过程既相近又不同。土壤融雪侵蚀过程的模拟主要包括两个方面:一是积雪融化形成的径流冲刷过程;二是冻融作用对土壤物理性质及其可蚀性的影响。从目前世界上一些国家已建立的土壤侵蚀预报模型来看,主要是利用土壤水蚀模型进行融雪侵蚀的模拟^[56]。其中,美国的通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 以及 USLE 的修订版 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 针对融雪径流形成的细沟侵蚀过程,通过细沟和细沟间侵蚀比例的观测,确定降雨-融雪侵蚀力,并且考虑了冻融过程对土壤性状的影响。WEPP (Water Erosion Prediction Project) 是美国农业部推出的最为完整、也最为复杂的土壤侵蚀机理模型,其核心思想是用稳定状态的泥沙连续方程描述细沟和细沟间侵蚀。WEPP 模型中,积雪融化过程模拟的基本思想是根据能量平衡原理模拟每小时的融雪量,将融雪量作为断点雨强数据,进而计算融雪径流、径流剪切力、泥沙含量等参数^[57]。我国从20世纪40年代开始了土壤侵蚀的定量化研究,建立了土壤侵蚀预报模型并开始了对一些流域或地方性的融雪侵蚀过程进行模拟和预报^[58-60]。

国内外关于雪害预警方面的研究和应用尚处于起步阶段。国外是从整个冰雪灾害或气象灾害角度进行预警技术,其系统可划分为大中型区域风吹雪的长期预警,大中型区域风吹雪短期预警和小区域风吹雪短期预警三大类^[61]。在这三类系统中,对积雪或雪害的预测主要依靠大量动态数据、完整的模型体系,与公路雪害预警有关的应用系统,往往是纳入到高等级公路养护与管理系统中,并通常与道路气象信息系统结合。国内基本上没有专门针对公路雪害的预测、预报或预警研究,只有一些气象台站和有关科研院所通过雪灾的气象学研究,对区域雪灾灾情的发展趋势及预测方法进行了较为深入的探索。但对于灾害性天气影响道路交通安全的因素,一些学者在进行着不同程度的探索,如同济大学柳本民教授等针对雾天对交通安全的影响开展了一系列研究工作,通过计算得出不同可视距离下的安全车速,并经过驾驶模拟仿真实验的验证,最终提出了不同雾等级下的安全车速^[62-66]。目前,亟待运用交通工程的原理与方法,借鉴雾天的交通管制措施,对公路雪害的防治与交通预警措施进行研究,提出科学、可行的公路交通组织规划与设计,指导公路交通设施的设计与管理。从而推动公路雪害的研究工作达到一个新的阶段。

1.2.2.3 风雪复合潜蚀灾害研究现状

国内外已有的关于土壤侵蚀动力学机制及其过程的研究成果,主要集中在单独的风蚀或融雪侵蚀方面。近年来,从水土保持角度对于风蚀与水蚀交错区交叉侵蚀作用的内在机理,以及相应的水土保持措施的研究成为重点。对风水两相侵蚀的时空特征,风蚀水蚀交

错带地貌特征及其发育过程,以及风蚀水蚀交错带小流域的生态环境治理等已开展了初期的研究工作^[67-69],对高速公路建设中造成的沿线水土流失问题,通过对土壤流失方程中可蚀性因子的修正,对高速公路边坡水土流失量进行了预测和研究等^[70,71],为在工程构筑物风雪复合侵蚀机理方面的深入研究提供了很好的借鉴。

但是,对于公路构筑物风蚀和融雪侵蚀的共同作用或交替作用,即风吹雪蚀环境灾变演化及对工程构筑物的复合侵蚀破坏机理方面的研究未见报道。风雪复合潜蚀作用并不是简单的风蚀加雪蚀,而是风蚀、融雪侵蚀和环境温度间的相互作用呈现循环的、相互加速的、彼此制约的复杂作用体系,特别是,对于工程构筑物的立体侵蚀较平面侵蚀(如土壤、古代生土建筑物表面等)更为复杂、影响因素更多。沿路基断面受到的“风吹”与“雪蚀”破坏作用有所不同,局部以风蚀破坏为主,或局部以融雪侵蚀破坏为主,也存在风蚀和融雪侵蚀复合侵蚀区域。笔者曾针对工程构筑物单一的风蚀或融雪侵蚀问题,提出将路基土抗剪强度的变化辅之以微观结构特性的改变作为路基边坡抗潜蚀能力的表征,并通过室内风蚀风洞/模拟雪风洞试验、现场测试并结合微观结构特性试验,研究了风沙流、风雪流绕路基障碍物的绕流场特征,确定特定环境风场下沙漠路基边坡风蚀影响区域的临界边界和融雪侵蚀影响区域的临界边界,分析并总结了风蚀影响区域内土体抗剪强度的变化规律,建议了风蚀路基边坡的量化分析方法,揭示了沙漠路基边坡的风蚀机理。在已有的研究成果的基础上,考虑环境温度变化的影响,将冻融风蚀累积损伤引入路基土风蚀与融雪侵蚀相互作用的体系中,这种交替的、渐进的、相互加速的侵蚀破坏作用结果,将使得路基土体结构松散、孔隙率不断增大、抗剪强度持续下降、抗潜蚀能力严重受损。

因而,从环境岩土工程角度出发,将风雪复合潜蚀的影响等效为岩土体结构的累积损伤和其抗剪强度的持续衰减。拟通过现场调研、室内冻融风蚀风洞试验、微观结构特性试验、土静、动强度特性试验、数值仿真模拟等,研究寒旱区公路风雪灾害潜蚀破坏机理,并建议合理有效的预警措施。在对典型寒旱区公路风雪灾害现场调研的基础上,通过室内风洞试验中高速摄影结合离散动力学数值仿真,跟踪沙粒子和雪粒子绕路基的运动轨迹,以及沿路基不同部位风蚀、堆积以及积蚀的过程,分析寒旱区公路路基风雪灾害的影响因素。对于局部以风蚀破坏为主的风雪复合侵蚀区域,填料土体的抗剪强度会随着环境风场强度、路基断面设计参数、路线与风向的夹角以及风蚀影响区域延伸深度的改变而呈现出不同程度的衰减;对于局部以融雪侵蚀破坏为主的风雪复合侵蚀区域,运用损伤力学的原理确定积雪融蚀影响区域内土体抗剪强度随融雪量、环境温度变化特点、冻融循环次数等变化的规律。进而,将风雪复合侵蚀的影响等效为路基岩土体微结构的累积损伤和其抗剪强度的持续衰减,视反复冻融循环下岩土体微结构特性的改变为内因,风蚀为外部动力机制,通过室内冻融风蚀风洞试验研究风雪复合侵蚀引起路基岩土体抗剪强度衰减的变化规律,对环境潜蚀路基在交通荷载作用下的应力、变形及稳定性进行评价与预警。预期研究成果将是寒旱区公路环境灾害研究中重要的理论和试验依据,将对公路路基在风蚀、雪蚀、温度交替,耦合交通荷载作用下的力学行为能力进行评价,为揭示工程构筑物风雪复合侵蚀机理,评价风雪环境对工程构筑物的稳定性的影响,量化风雪复合潜蚀对构筑物的潜在影响,将对寒旱区公路建设、运营和维护有着重要的科学意义和工程应用价值。

第2章 扰动风场中沙粒子和雪粒子的运动和迁移规律

当路基（路堑）置于一定的环境风场时，因障碍物的存在，环境风场在经过路基（路堑）周围时被扰动，并在远离路基（路堑）时逐渐得到恢复。而扰动风场中的沙粒子和雪粒子或被携带或沿着路基（路堑）在风速急剧减小的部位被沉积。同时，对于零防护的路基（路堑）来讲，填料土颗粒在环境风场的驱动下被风卷起带走、掏蚀并不断地磨蚀着路基（路堑）裸边坡，使路基（路堑）发生潜蚀破坏而影响其服役行为能力。

2.1 沙粒子和雪粒子绕路基运动和迁移规律的室内风洞试验研究

2.1.1 室内风洞试验介绍

试验所用的风洞机为内蒙古农业大学自制研发的 FDY—1.2 型可移动式风蚀风洞机，直流吹气式风洞。风洞全长为 11.8m，实验段总长 7.2m，收缩比 1.7，截面尺寸为 1.2m × 1.0m，边界层厚度可达 15cm，风速由 0~18m/s 连续可调，可以自由控制模拟外界自然风速，风洞测控系统包括电机风扇、变频器、皮托管、微压差变送器、数据采集卡等部分，最后由电脑直接显示风速^[72]。试验过程中，直径 4mm 的皮托管固定在风洞试验段中央距入口 6m 处，皮托管开口距离风洞底面 60cm，用于测量风洞内空气流场未受扰动时的自由风速，风速选择为试验段入口附近中心风速，试验风速的调节通过风洞电机变频调速器而实现。试验仪器见图 2-1。

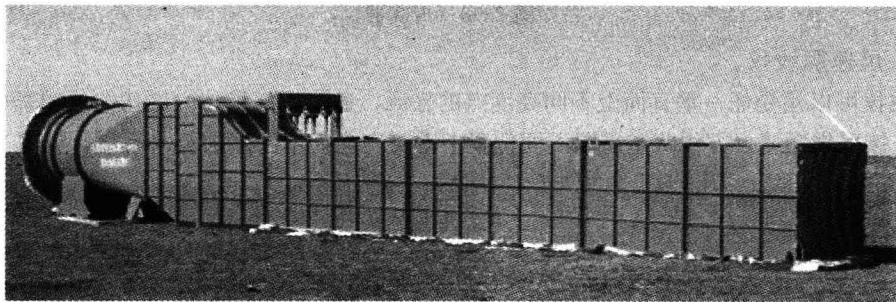


图 2-1 FDY—1.2 型可移动式风蚀风洞试验机

2.1.1.1 试验装置

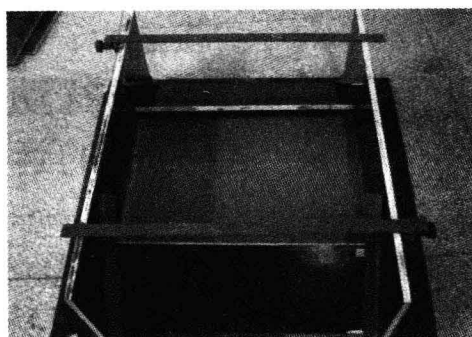
(1) 路基模型箱。

模型箱是根据本次试验需要自制而成，方便自由组装，可以变换不同路基高度和边坡坡角，路基模型见图 2-2，模型箱材料采用清水模板制作，不易吸水，不易变形，成型效果好，是制作路基模型的良好材料。

(2) 击实器。



(a)



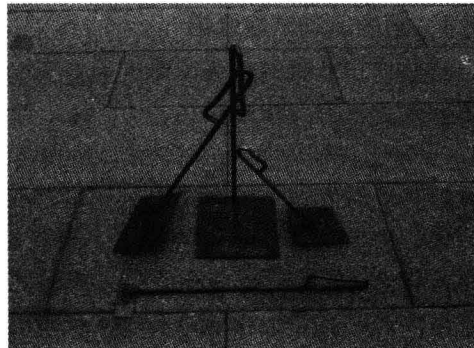
(b)

图 2-2 路基模型

压实器自制而成，材料为钢板，不同规格的有不同作用，可竖向压实，也可随坡角的变化，针对边部倾角部分压实，见图 2-3。



(a)

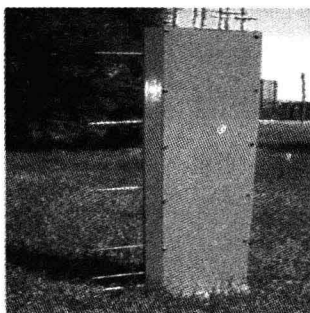


(b)

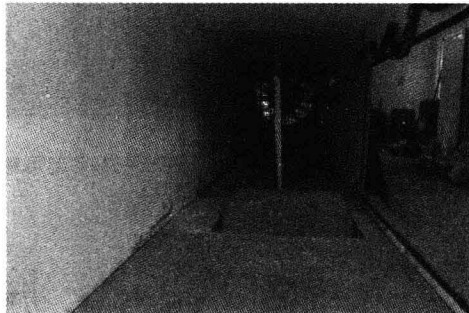
图 2-3 压实器

(3) 风速廓线仪。

廓线仪可以接受任一垂直面上不同高度点的来风，通过皮托管传入微压差传感器利用采集卡可以直接采集风速，方便路基周围不同位置上垂直高度处不同点的风速采集，见图 2-4。



(a)



(b)

图 2-4 风速廓线仪

(4) 毕托管架。

自制的毕托管架前后可以自由移动，可以通过上下调节毕托管高度，采集路基边坡的不同位置和路基中心点处的风速，见图 2-5。

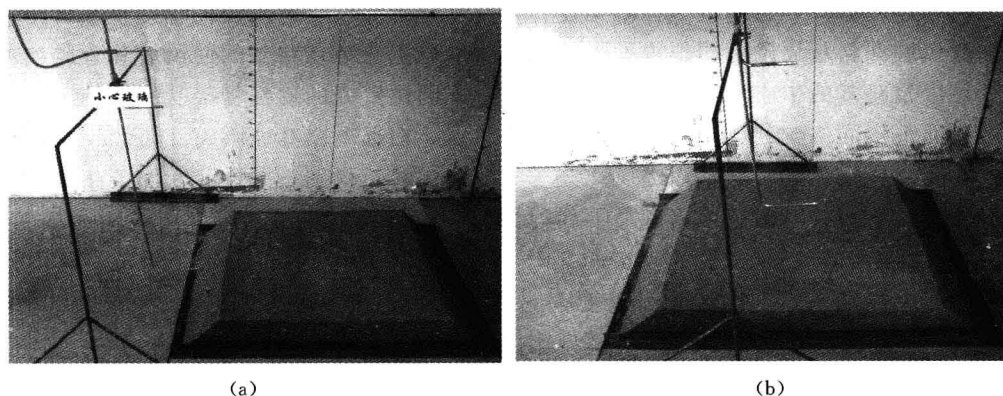


图 2-5 自制的毕托管架

(5) 雪漏仪。

自制的雪漏仪可以人工手动调节模型雪下漏的速度，试验中用于确定雪粒子沿路基边坡的堆蚀情况，见图 2-6。



图 2-6 雪漏仪

2.1.1.2 试验方案

由于路基断面参数的变化影响风沙流和风雪流的运动规律，通过室内风蚀风洞试验和室内雪蚀风洞试验，考察在一定的环境风场作用下，不同路基设计断面时周围风速流场变化规律，以及风蚀路基和雪蚀路基的破坏形态，对确定环境风场下较为合理的路基设计断面提供依据。

路基抗蚀能力的强弱与路基沿程风沙流和风雪流的运动规律密切相关，其中，路基高度 H 、路基边坡坡率 α 、路基宽度以及路线与来风方向的夹角，都会影响到路基沿程风速的变化。因此，选择的风蚀试验方案如下：试验中按照最不利的环境风场，即选用风速 V 为 18m/s 的净风下吹蚀时间 5min，路基模型中的沙粒为原型沙，路基模型的断面为不积