



分类号:

学校代码: 10128

UDC:

学 号: 20101300

内蒙古工业大学

硕士学位论文

类 别: 全日制硕士研究生

题 目: 风雪复合侵蚀路基破坏机理的试验研究

英文题目: Study on failure mechanism of wind-snow-induced composite erosion for roadbed

研 究 生: 葛晓东

学科名称: 岩土工程

指导教师: 李驰 教授

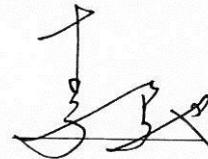
二〇一三年六月

原创性声明

本人声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得内蒙古工业大学及其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：葛晓东

指导教师签名：



日

期：2013.6.16

日

期：2013.6.16

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：内蒙古工业大学有权将学位论文的全部或部分内 容保留并向国家有关机构、部门送交学位论文的复印件和磁盘，允许编入有关数据库进行检索，也可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。为保护学校和导师的知识产权，作者毕业后涉及该学位论文的主要内容或研究成果用于发表学术论文须征得内蒙古工业大学就读期间导师的同意，并且版权单位必须署名为内蒙古工业大学方可投稿或公开发表。

本学位论文属于

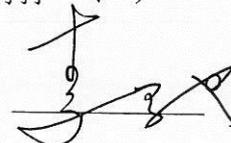
保密，在___年解密后适用本授权书。

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：葛晓东

指导教师签名：



日

期：2013.6.16

日

期：2013.6.16

摘 要

我国干旱寒冷地区如新疆、内蒙古、吉林、黑龙江等省、自治区，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、温差变化较大，使得寒旱区公路因风沙和雪害复合侵蚀破坏的现象频频发生。在干旱寒冷地区特殊的自然环境下，风沙的侵蚀体现在对路基的风蚀作用，雪害主要体现在积雪融化渗入到路基内部，在温差的影响下水分迁移对路基填料土体造成的冻融作用。

本文以特殊风沙土路基为研究对象，对风沙土路基受风雪复合侵蚀作用的破坏机理进行研究。通过风吹沙粒的风洞高速摄影试验，研究风场中路基断面设计参数对风吹沙粒运动轨迹的影响。采用高速摄像机对风场中单一颗粒撞击路基边坡前后运动轨迹进行追踪拍摄，分析不同路基断面对粒子撞击路基边坡的位置，撞击瞬间的角度和速度的不同影响。当风场水平风速一定，风吹的沙粒子经过矮路基时，大部分粒子从路基顶面越过或是撞击边坡上部后越过路基，随着路基边坡变陡，粒子撞击边坡时速度增大效果显著。当风吹的沙粒子经过高路基时，大部分的沙粒子撞击在路基边坡经多次向上反弹后能量逐渐损失沿坡面下滑或粒子反弹后直接飞向路基坡脚处堆积，随着路基边坡坡率增大，粒子撞击边坡的速度增加效果不明显。

通过路基风沙土三温冻融循环试验，对风沙土路基受冻融影响后的土体内部物理特征的变化规律进行研究。由于风沙土没有粘聚力，在没有补水条件下路基风沙土体水分在重力作用下会随着时间从上向下缓慢的迁移，冻融作用使得水分由上部向下部迁移速度加快，为水分向下扩散增加了动力迁移的能量。本文研究了在冻融循环作用下水分的向下迁移扩散规律。同时，由于冻融作用使得水分迁移而造成土体空隙率增加，土体结构变得疏松，其内部干密度降低。但是对于风沙土来说，冻融作用引起的变形较小。

通过冻融风蚀风洞试验，对寒旱区风沙土路基受冻融风蚀复合侵蚀作用破坏规律进行研究，通过测定抗剪强度的变化来表征路基不同位置处受到冻融风蚀复合侵蚀作用的不同影响，以及冻融和风蚀两种不同侵蚀作用的不同影响程度。当路基断面尺寸一定时，从路基顶部向下到底部，路基受风雪复合侵蚀作用的影响逐渐减弱；并且坡肩以风蚀破坏占主导，而坡脚以冻融侵蚀为主，风蚀基本不明显。而随着路基填料含水率的增大，路基整体受风蚀影响逐渐减弱，冻融作用的影响逐渐增强。

关键词：环境岩土工程；复合侵蚀；抗剪强度变化；风沙土路基

Abstract

The damage phenomenon caused by the wind-snow composite erosion of is usual in the arid and cold regions such as Xinjiang province, Inner Mongolia autonomous region, Jilin province, Heilongjiang province and so on. Complex erosion is induced by many factors: annual strong wind days, dust storm days and snowing days are long in these regions; furthermore, the average temperature is low and variation of temperature is obvious. In the special natural environment of arid and cold regions, the wind erosion of roadbed is stem from the wind-draft sand storm. Because of the difference in temperature leading to the snow melt into the roadbed, the damage of snow is mainly the freeze-thaw action caused by the moisture for the filler soil .

Taking aeolian sandy soil roadbed as the research object, the failure mechanism of the aeolian sandy soil filling roadbed induced by the wind-snow composite erosion has been researched in this article.

The trajectory of sand particles is studied by using wind tunnel experiments with high-speed camera shooting, which is influenced by design parameters of roadbed cross section in the wind field. A single particle trajectory is traced and shooted by high-speed camera before and after hitting roadbed slope, and the impact position, the impact angle and the impact velocity are analyzed under different roadbed section. When horizontal wind speed is constant and short roadbed is selected, most of the particles across the top of the roadbed directly or after hitting the top of roadbed. Moreover, the impact velocity will increase as roadbed slope becomes steeper. However, when sand particles are blown to high roadbed, most of the particles hit roadbed slope many times and rebound to upward with energy loss, and then slide along the slope or landing directly in the slope toe. As roadbed slope rate increases, the increase of the particles impact velocity is not obvious.

Through the freeze-thaw cycling test with three temperatures, we study on the chang law of the physical characteristics under the freeze-thaw action. Because of the lack of cohesive force, the moisture of the filler soil moves slowly from the top to the bottom over time under the action of gravity, however, the freeze-thaw action increases the migration speed of water, because of a new kind of power transfer of energy. The article studies the

diffusion law of moisture under the freeze-thaw action. At the same time, the freeze-thaw action can make the soil porosity increase, which leads to the porosity of soil structure, so the internal dry density decreases. But for sand soil, the deformation caused by the freeze-thaw action is small.

Through wind erosion test of freeze-thaw, the article studies the failure mechanism of composite erosion induced by freeze-thaw and wind erosion has been researched. Take the variable of shear strength as the measurement criteria, the different impact of wind-snow composite erosion is considered with the different position from the top to bottom, and from the slope surface to the interior. And the different impact degree for the different erosion action also plays the important roles in the composite erosion action. For the aeolian roadbed under the certain size, the influence of composite erosion reduces gradually from top to bottom; what's more, wind erosion damage is mainly for the shoulder slope, but the freeze-thaw erosion is more serious than wind erosion on bottom. For the filler soil with the increase of moisture content, the influence of wind erosion weakens, but the freeze-thaw action strengthens.

Key words: *Geoenvironmental engineering; Composite erosion; Shearing strength variety; Aeolian Sandy soil filling roadbed*

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 国内外关于土壤风蚀研究现状	2
1.2.2 国内外关于融雪侵蚀研究现状	3
1.3 本文研究的目的及意义	4
1.4 本文研究的主要内容	4
第二章 风吹沙粒的风洞高速摄影试验	6
2.1 试验方案	6
2.1.1 试验仪器	6
2.1.2 试验装置	7
2.1.3 试验方案	8
2.2 试验结果分析	9
2.2.1 沙粒子经过不同路基的运动轨迹分析	10
2.2.2 沙粒子撞击路基边坡位置、速度和角度（方向）分析	13
2.3 本章小结	17
第三章 风沙土路基冻融循环中水分迁移规律试验研究	18
3.1 路基风沙土填料基本物理指标	18
3.1.1 风沙土颗粒组成	18
3.1.2 风沙土击实试验	19
3.2 冻融循环试验方案	21
3.2.1 试验仪器	21
3.2.2 试验方案拟定	22
3.3 冻融试验结果分析	23
3.3.1 土体含水量沿土样深度方向重分布	23
3.3.2 土体干密度沿土样深度方向变化	25
3.3.3 土体竖向变形	27

3.4 本章小结.....	27
第四章 风沙土路基冻融风蚀破坏规律试验研究.....	29
4.1 试验方案.....	29
4.1.1 试验仪器.....	29
4.1.2 试验装置.....	30
4.1.3 试验方案与步骤.....	31
4.2 试验要点和相似性.....	34
4.3 试验结果分析.....	34
4.3.1 同一含水率下路基内部抗剪强度变化规律.....	34
4.3.2 不同含水率下路基强度变化规律.....	43
4.4 本章小结.....	45
第五章 结论与展望.....	47
5.1 结论.....	47
5.2 展望.....	48
参 考 文 献.....	50
致 谢.....	53
作 者 简 介.....	54

第一章 绪论

1.1 引言

我国干旱寒冷地区如新疆、内蒙古、吉林、黑龙江等省、自治区地形复杂，因常年有大风、沙尘暴、积雪等恶劣天气，再加上常年平均气温较低、日温差变化大，使得寒旱区路基因风沙和雪害这两大自然因素侵蚀而破坏的现象频频发生。寒旱区风沙对路基的风蚀作用是典型的侵蚀作用之一，由于气候非常干燥，风大沙多，植被稀少，路基的风蚀已成为最为严重的问题。风沙对路基土的风蚀作用分为吹蚀、磨蚀和掏蚀三种情况^[1]。吹蚀是风力直接带走路堤填料土体颗粒而使路堤遭到破坏，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。

据不完全统计，在我国沙漠地区修筑的公路约95%以上不同程度的受到了风蚀破坏，路基边坡也受到了不同程度的吹蚀、掏蚀及堆积破坏，甚至出现大面积的边坡坍塌现象，使公路自身的稳定性严重受损，缩短了公路的使用寿命。以穿越内蒙古境内库布齐沙漠的G210国道为例，库布齐沙漠绝大部分是以格状沙丘及沙丘链为主的半荒漠地带，格状沙丘及沙丘链一般高度为10~15m，少数可达到50m，占整个沙漠的面积80%。在沙漠北部的黄河河谷平原上，还零星地分布了一些低矮的新月形沙丘及新月形沙丘链，一般高度在3m以下。沙漠北部边缘还分布有固定、半固定的灌丛沙堆。G210国道穿越库布齐沙漠的路段中，被风蚀或局部风蚀的区域占该路段沿线的70%。

同时寒旱区风雪侵蚀也是对路基主要的侵蚀作用之一。路基受雪害侵蚀而造成的失稳破坏现象频频发生，给公路交通安全和正常运营带来了极大的影响。例如，在2001年内蒙古地区入冬以来，由于连续降雪，干线公路G303线、G306线、S204线等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。风雪对公路的灾害影响分为两方面。一方面，风雪使道路的能见度变差，视距变短，路面变滑，给道路上车辆的运行带来严重的危险性。另一方面，由于温度变化的影响，道路上覆的积雪

融化并渗入到路基内部,在温差的作用下使路基遭受冻融作用的影响而使路基结构产生侵蚀破坏,影响道路的长期稳定性,缩短道路结构的使用寿命^[2]。

路基受到风蚀或融雪侵蚀引起的灾害是非常严重的。由于寒旱区的气候复杂性,路基在干旱寒冷的环境下同时受到风、雪、温度等多种自然环境因素的复合作用,所以寒旱区路基不仅受到风蚀、积雪融化单独的侵蚀作用,在这种复杂的自然环境中还会受到风雪复合侵蚀的作用影响^{[3]-[5]}。即路基一方面会遭受以风沙为外动力的风蚀作用,另一方面还会受到以融雪渗入到路基内部造成的冻融作用。这种路基的风雪复合侵蚀作用实际上是自然界风-水-温度综合作用的结果。风雪复合侵蚀作用并不是风蚀与融雪侵蚀的简单叠加,而是风蚀与融雪侵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。当路基置于环境风雪流场中,所遭受的侵蚀破坏作用有所不同,局部是以风蚀破坏为主的风雪复合侵蚀,局部是以融雪侵蚀破坏为主的风雪复合侵蚀,或者是风雪复合侵蚀破坏区域,不同的侵蚀破坏作用所呈现的规律性不同,对路基稳定性的潜在危害是不同的。虽然国内外关于土体侵蚀动力学机制及其过程的研究成果很多,但是主要集中在单独的风蚀或融雪侵蚀方面,对于风雪复合侵蚀路基的破坏机理,以及对路基稳定性的潜在危害方面的研究甚少。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外关于土壤风蚀研究现状

风对土颗粒的风蚀过程一般分为三部分:土颗粒的移动、搬运和沉积。土壤风蚀是指一定风速的气流作用于土壤,使土壤颗粒发生移动造成土壤结构破坏、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,更是干旱、半干旱及部分湿润地区荒漠化的主要过程之一,严重影响了地区经济的可持续发展^[6]。

从20世纪30年代起,国外在对土壤风蚀方面的研究取得了重要的研究成果^[7]。R. A. Bagnold 根据现代流体力学原理建立了“风沙和荒漠沙丘物理学”的理论体系,使得土壤风蚀研究进入了动力学研究的新领域^{[8]-[13]}。1939年, W. D. Chapil 和 R. A. Milne 通过风洞试验重点研究了关于土壤风蚀的动力机制问题,建立了风蚀基本原理^[14]。1945年, W. D. Chapil 在田间发现促使最易侵蚀土颗粒移动的最小速度,并定义这时的风速为“最小气体起动速度”,随着风速的增大,越来越大的土颗粒被吹动,直到风速增大到所有的土颗粒都被吹动,定义这时的风速为“最大气体起动风速”^[15]。1963年, W. S. Chapil 与 N. P. Woodruff 研究了风蚀的磨蚀量与风速之间的定量关系,

发现磨蚀量与风速的平方成正比，而与破裂系数成反比^[16]。与此同时，N. P. Woodruff 和 Siddoway 在 W. S. Chepil 与 N. P. Woodruff 研究成果的基础上，建立了世界上第一个通用土壤风蚀方程 WEQ(Wind Erosion Equation)^[17]。同时，澳大利亚新南威尔士大学风蚀研究工作者提出了 IWEMS 模型系统(Integrated Wind Erosion Model System)，它提供了一个可同时应用于区域和大陆尺度上的定量化风蚀评价和预报系统。1980 年，美国农业部建立了风蚀预报模型 WEPS，到目前为止它是风蚀预报中最完整、最先进的模型系统^[18]。

国内关于土壤风蚀方面也做了大量的研究工作。1981 年，朱震达、陈治平等认为由于土壤性质的不同，风蚀对土壤强度的影响程度存在差异，并且风蚀作用的结果也会改变土壤粒度的组成^[19]。1989 年，赵羽、史培军等在土壤风蚀的研究中以相对风蚀深度和植被覆盖度为指标，对内蒙古地区土壤风蚀进行了强度分级^[20]。在联合国粮农组织 (FAO) 提出的对风蚀气候因子指数修正式的基础上，1994 年，董玉祥、康国定根据中国北方 11 个省区的气象数据计算出了相关区域的风蚀气候因子指数，并绘制了中国干旱、半干旱地区年风蚀气候因子等值线图^[21]。1997 年，董治宝、陈渭南等通过风洞模拟试验研究发现风蚀率与地表破坏率之间存在着三次幂的函数关系^[22]。兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室郑晓静教授及其研究生针对沙粒跃移运动以及风沙运动的力学机理进行了研究，其研究成果对揭示土壤风蚀、沙尘暴和风沙灾害的本质有着重要的现实意义^{[23]- [26]}。

1.2.2 国内外关于融雪侵蚀研究现状

关于土壤融雪侵蚀的研究主要包括两个方面，一方面是积雪融化产生的径流对土壤颗粒进行冲刷和搬运的过程，另一方面是冻融作用引起土壤性状的变化。目前，国内外关于融雪侵蚀方面的研究主要是利用土壤水蚀模型进行融雪侵蚀的模拟^[27]，并且已取得了一定的研究成果。

从目前世界上一些国家已建立的土壤侵蚀预报模型看，主要分为经验模型和理论模型。其中应用比较成功的是 1965 年第一次正式发表于《农业手册 (第 283 号)》的美国通用土壤流失方程 USLE(Universal Soil Loss Equation)，但由于受资料的限制，没有考虑融雪侵蚀过程^[28]。Wischmeier 等人于 1978 年提出了 USLE 的修订版考虑了融雪侵蚀过程，提出了降雨径流侵蚀力的计算公式。在此基础上 Renard 等于 1997 年发表了 USLE 的修订版 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)，提出了降雨-融雪侵蚀力的计算公式，而且考虑了由于降雨和融雪引起的对土壤性状的冻融影响

^[29]。20 世纪 80 年代, 美国农业部研制的模型 EPIC(Erosion-Productivity Impact Calculator), 主要模拟融雪过程、融雪径流的产生及其产生的土壤流失量。1998 年, 美国的 Peter Botterweg 利用 SOIL 模型计算积雪融化速率和积雪厚度等, 然后代入 EROSUM(European Soil Erosion Model)模型, 将积雪融化量视为降水, 估计由其产生的侵蚀量。WEPP(Water Erosion Prediction Project)是美国农业部于 1995 年推出的最为完整、也是最为复杂的土壤侵蚀机理模型, WEPP 模型根据能量平衡原理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^{[30]-[33]}。

我国在土壤侵蚀模拟方面上做了一定的研究工作。1996 年, 江忠善等根据黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀特征, 建立了沟间地侵蚀模型。1998 年, 康尔泗、程国栋对融雪和冰川径流进行了预报研究的工作, 探讨了高寒区水文过程、径流形成的机制和产流特征。2001 年, 张光辉等针对一些地方性流域特征建立了的土壤侵蚀预报模型^[34]。

国内外关于风水两相侵蚀方面也做了一些初期的研究工作。1946 年, 前苏联专家 Г.А. 普罗霍罗娃分析了风水两相侵蚀作用对区域地貌形成过程的影响。Harrison J. B. J 等人针对以色列内盖夫沙漠地区的风水两相作用的过程进行了研究, 主要分析了风水两相作用是一个复杂的循环体系。我国对风水两相侵蚀的特征, 风蚀水蚀交错带地貌的发育过程, 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^{[35]-[37]}。这些初期的研究作为课题在风雪复合侵蚀机理方面的研究提供了良好的基础。

1.3 本文研究的目的及意义

本文主要是以内蒙古地区特殊风沙土路基为研究对象。根据寒旱区复杂的自然环境, 研究风、雪、温度等自然因素变化对风沙土路基的复合侵蚀破坏作用。

(1) 研究不同路基断面形式对风场中沙粒子的运动轨迹影响, 为分析风沙流对路基的危害提供试验基础。

(2) 将风雪复合侵蚀对路基的影响等效为路基填料土体的抗剪强度的衰减, 分析由于风雪复合侵蚀作用引起的填料土体抗剪强度衰减的影响因素, 揭示寒旱区路基风雪复合侵蚀的破坏机理。进而, 为寒旱区路基的工程防护提供试验依据和理论指导。

1.4 本文研究的主要内容

1. 路基断面设计参数对风沙流中的沙粒子运动轨迹影响

通过风吹沙粒的风洞高速摄影试验,针对不同的路基设计断面,研究单一颗粒在一定的风力携带下撞击路基坡面前后运动轨迹的变化,以及撞击坡面瞬间的位置、速度和撞击角度。

2. 水与温度复合作用下填料土体性能的变化规律

积雪在温度变化的影响下对路基的侵蚀作用实际上是水与温度对路基填料土体的复合作用,而水与温度的复合作用体现在对路基土体的冻融作用。本文通过室内三温冻融循环试验研究冻融对路基填料土体性能变化的规律,为进一步研究风雪复合侵蚀路基的破坏规律提供理论依据和指导。

3. 风沙土路基风雪复合侵蚀破坏规律试验研究

风雪对风沙土路基的复合侵蚀作用是自然环境中的风、融雪和温度的共同作用结果,而风、融雪和温度对路基的共同作用体现在路基的冻融和风蚀复合侵蚀作用。将冻融和风蚀复合侵蚀对路基的影响量化成路基土体抗剪强度的衰减,通过室内冻融风蚀风洞试验来研究土体抗剪强度随环境风场、温度场以及冻融循环次数变化而变化的规律,分析土体风蚀量、冻融风蚀量的变化与土体物理特性参数之间的关系,将反复冻融循环下土体物理特性的变化作为内因,将风蚀作为外部动力源,研究风沙土路基风雪复合侵蚀的破坏规律。

第二章 风吹沙粒的风洞高速摄影试验

风沙流对路基的破坏形式主要表现在两方面。一方面是在风力的作用下,所携带的沙粒子撞击到路基坡面上,路基坡面的水分散失和沙粒子对坡面的撞击使得密实的路基坡面结构变得疏松,造成对路基的侵蚀破坏。另一方面由于路基周围风场的改变,使得风携带的沙粒子撞击到坡面后会有不同的运动轨迹,在风场强度和粒子粒径一定的情况下,粒子不同的运动轨迹将主要取决于路基高度和边坡坡率。

由于沙粒细小,几何形状极不规则,运动变化迅速,因而采用一般的测试手段和方法难以确定沙粒在撞击坡面前后的位置、角度和运动速度等诸多运动轨迹参数。高速摄像机具有准确的时算和连续画面,可以精确地记录沙粒的运动轨迹。本章通过室内风洞试验机结合高速摄影追踪,来研究单一颗粒在一定的风力携带下撞击路基坡面前后运动轨迹的变化,以及撞击坡面瞬间的位置、速度和撞击角度。

2.1 试验方案

2.1.1 试验仪器

1. FDY-1.2 型可移动式风蚀风洞机

试验所用的风洞机为内蒙古农业大学机电学院自制研发的 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,截面积为 1.2m×1.0m,边界层厚度可达 15cm,风速由 0~18m/s 连续可调,可以实现自由控制来模拟外界自然风速,见图 2-1。



图 2-1 FDY-1.2 型可移动式风蚀风洞试验机

Fig.2-1 FDY-1.2 portable wind erosion wind tunnel

2. 高速摄像机及配套电脑采集系统

试验所用的高速摄像机（Pike F032C），拍摄频率为 30 幅/秒，摄像机镜头附加 1:1.3 放大镜。高速摄像机及配套采集系统如图 2-2。



图 2-2 摄像机及采集系统

Fig.2-2 The camera and the acquisition system

2.1.2 试验装置

1. 自制灯箱

本次试验采用自制灯箱，灯箱内有功率为 25W 的 LED 灯管作为光源。其工作原理为灯管发射出来的强光经过狭缝内消光向外散射出一条光带，用以提高拍摄的实际效果。试验中将灯箱置于风洞内顶板上，实现上部采光，其方向平行于沙粒子运动方向。自制灯箱以及剖面如图 2-3 所示。

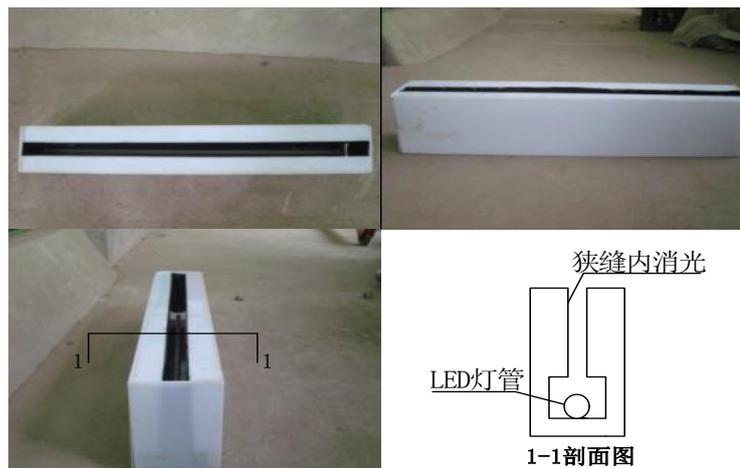


图 2-3 灯箱及其剖面图

Fig.2-3 Light box and the profile

2. 自制路基模型

试验中自制黑色纸盒路基模型代替风沙土路基模型。由于本次试验研究沙粒子撞击迎风坡面前后运动轨迹变化情况，所以将模型简化成半路基模型，但要严格控制路基高度和边坡坡率，如图 2-4。



图 2-4 半路基模型

Fig.2-4 A half roadbed model

3. 黑色 PVC 植绒坐标格纸

试验中采用黑色 PVC 植绒坐标格纸粘在光带后面作为摄影背景，并可以通过坐格计算粒子的轨迹长度，并据此计算出粒子撞击边坡时的速度和角度。

4. 石英砂

试验中选择白色石英砂颗粒作为试验粒子。由于从沙漠现场采集的风沙土颗粒粒径很小（最大粒径不超过 $0.5mm$ ），且风沙土颗粒颜色暗淡，试验中很难实现对其拍摄。为了取得更好的拍摄效果，本次试验选择反光较好的白色石英砂颗粒代替风沙土颗粒。将石英砂过 $1\sim 2mm$ 的筛子并洗净烘干，以防试验中出现起雾现象。

2.1.3 试验方案

通过变换路基模型的高度 ($H=60mm$ 和 $H=170mm$) 和坡率 ($\alpha=1:1$ 和 $\alpha=1:1.75$)，来研究不同路基模型参数对风场中沙粒子撞击路基模型坡面前后运动轨迹的影响。分析并计算沙粒子撞击不同坡面瞬间位置、角度和撞击速度。

通过试验确定沙漏距离路基中心的水平距离为 $0.8m$ ，并使沙漏与灯箱中心处于同一铅垂面上，使得石英砂粒子在风力的水平作用下能够打在路基坡面的运动过程落在光束范围内，实现对粒子撞击坡面前后运动轨迹的拍摄。试验现场布置如图 2-5 所示。



图 2-5 试验现场布置图

Fig.2-5 The arrangement of the test site

设定风洞风速 $V=16m/s$ 不变, 从沙漏垂直自由下落的石英砂粒子在水平风力的携带作用下撞击到路基边坡上, 采用高速摄像机进行跟踪拍摄粒子撞击路基边坡前后的运动轨迹, 试验方案示意如图 2-6。

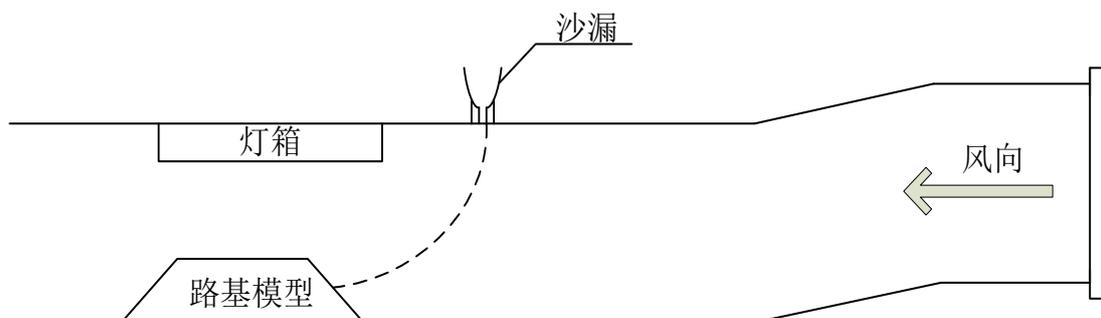


图 2-6 试验方案示意图

Fig.2-6 Sketch map of the test

2.2 试验结果分析

风场中作用于单颗沙粒的力主要有气流的迎面阻力或是风的动压力, 沙粒的重力等。关于这些力作用于单颗沙粒的物理过程是相当复杂的, 气流作用于单颗沙粒的迎面阻力 P 计算公式为:

$$P = \frac{\pi}{8} \rho_a U_r^2 d^2 C_D \quad (2-1)$$

式中: ρ_a ——空气密度 (g/cm^3);

U_r ——气流与沙粒的相对速度;

d ——沙粒粒径;

C_D ——阻力系数。

通过风力作用于单颗沙粒的迎面阻力公式可知，沙粒子的迎面阻力与沙粒粒径和风速有关。本次风吹沙风洞高速摄影试验中，选择的石英砂粒子几何形状不规则，粒子之间粒径也不相同，并且路基几何参数（路基高度、边坡坡率）不同，引起路基周围风场的改变导致周围风速发生变化，所以各个颗粒从下落至撞击坡面前后的运动轨迹不同，撞击的位置、角度和速度也不同。故采取对多个粒子进行统计分析计算，来研究路基几何参数的不同对风沙流粒子的运动轨迹的不同影响。

2.2.1 沙粒子经过不同路基的运动轨迹分析

1. 路基为矮路基（ $H=60mm$ ）时对沙粒子的运动轨迹分析

(1) 对于矮路基，根据试验中拍摄到的 50 个颗粒运动轨迹进行统计，可以得出风沙流中的沙粒子经过矮路基的运动形式主要有三种类型。一是沙粒子沿路基模型顶面直接越过或是打在路基顶面上方；二是撞击模型边坡后回弹跳跃沿路基顶面越过；三是沙粒子撞击模型边坡后回弹跳跃向坡脚方向运动。粒子运动轨迹示意如图 2-7。

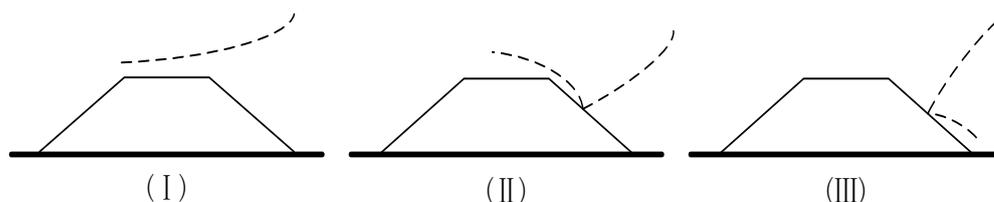
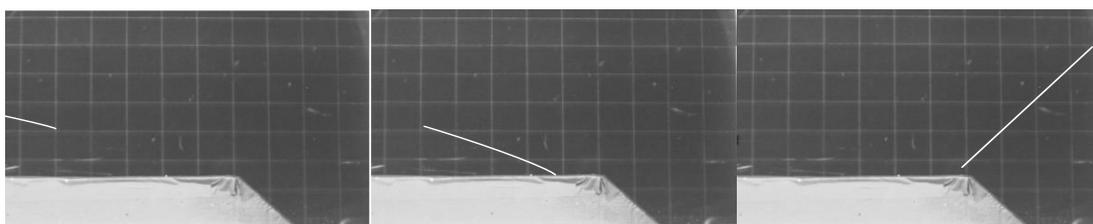


图 2-7 粒子经过矮路基的不同轨迹类型示意图

Fig.2-7 Sketch map of the different trajectories of particle through the low subgrade

对应试验结果拍摄到的粒子运动轨迹类型如图 2-8，粒子运动方向从右向左。



路基高度 $H=60mm$ 类型 (I)



路基高度 $H=60mm$ 类型 (II)

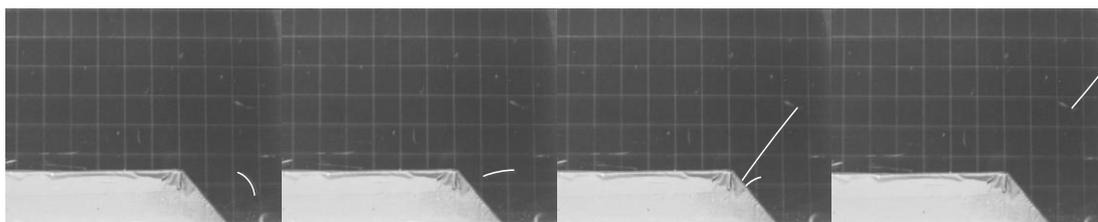
路基高度 $H=60mm$ 类型 (III)

图 2-8 粒子经过矮路基的不同轨迹类型图

Fig.2-8 The different trajectories of particle through the low subgrade

(2) 对于矮路基, 根据试验中拍摄到的 50 个颗粒运动轨迹, 对每种运动轨迹类型所统计的颗粒数及其比例, 如表 2-1 所示。

表 2-1 不同轨迹类型的颗粒数及其比例

Table.2-1 Number of particles in different trajectories

矮路基 ($H=60mm$)	运动轨迹类型		
	(I)	(II)	(III)
$\alpha=1:1$	29 (58%)	16 (32%)	5 (10%)
$\alpha=1:1.75$	26 (52%)	21 (42%)	3 (6%)

结论: 根据数据表 2-1 统计结果可知当风洞水平风速 $V=16m/s$ 一定, 路基为矮路基时, 大部分的粒子直接从路基顶面越过或是打在路基顶面上, 部分粒子撞击路基边坡后回弹并继续从路基顶面越过, 而极少部分粒子撞击边坡后向坡脚方向堆积。

2. 路基为高路基 ($H=170mm$) 时对沙粒子的运动轨迹分析

(1) 对于高路基, 根据试验中拍摄到的 50 个颗粒运动轨迹进行统计。可以得出风沙流中的沙粒子经过高路基的运动形式主要有四种类型。一是沙粒子沿路基模型顶面直接越过; 二是粒子撞击模型边坡回弹跳跃后继续沿路基顶面越过; 三是沙粒子撞击模型边坡多次回弹向坡肩方向跳跃后能量逐渐损失最终在重力作用下沿路基坡面下滑; 四是沙粒子撞击模型边坡后回弹跳跃向坡脚方向运动。沙粒子运动轨迹示意如图 2-9。

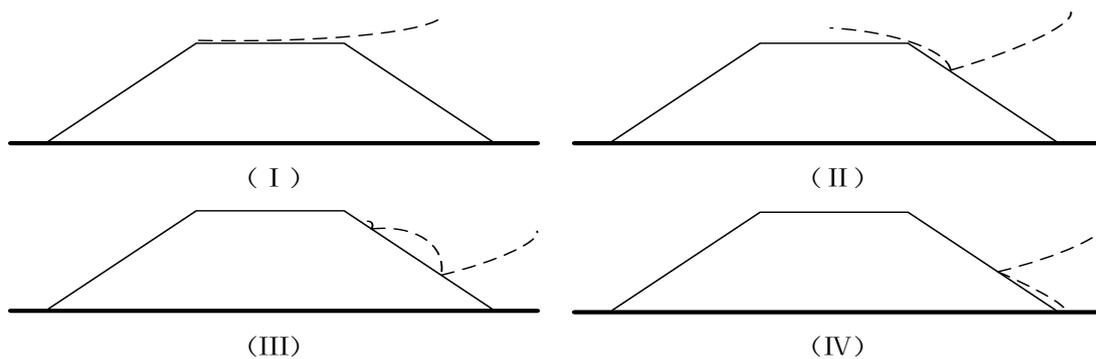
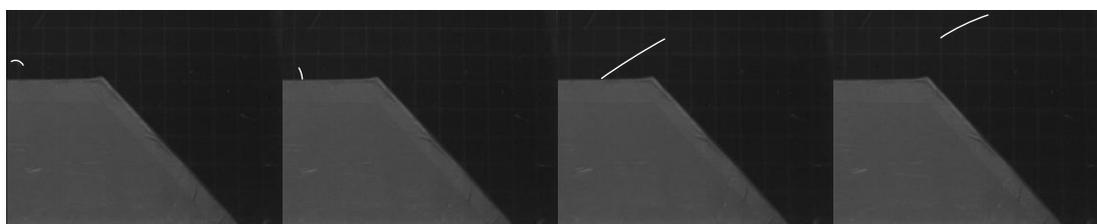
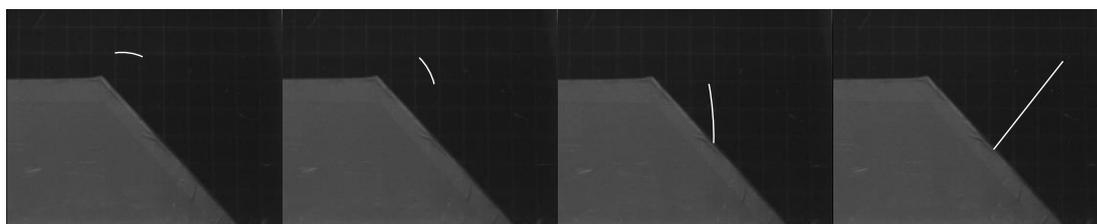


图 2-9 粒子经过高路基的不同轨迹类型示意图

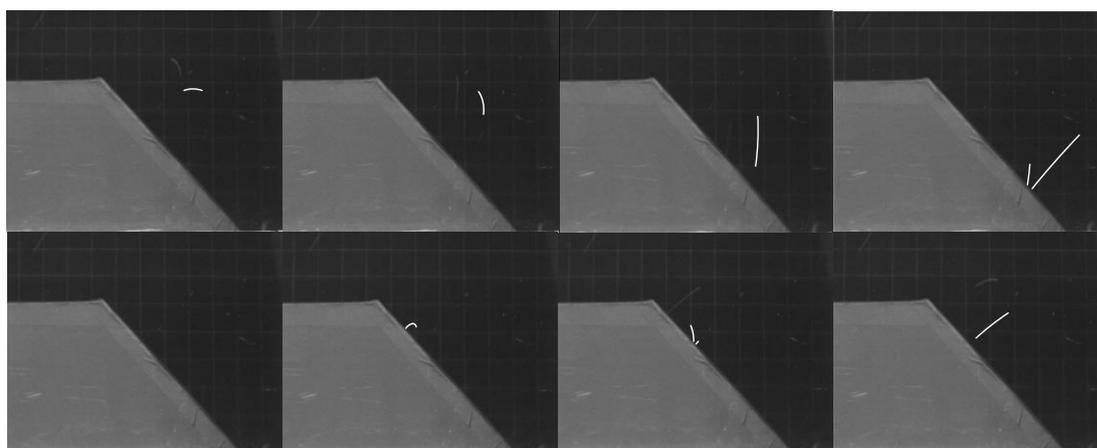
Fig.2-9 Sketch map of the different trajectories of particle through the high subgrade
对应试验结果拍摄到的轨迹类型如图 2-10 所示，粒子运动方向从右向左。



路基高度 $H=170mm$ 类型 (I)



路基高度 $H=170mm$ 类型 (II)



路基高度 $H=170mm$ 类型 (III)

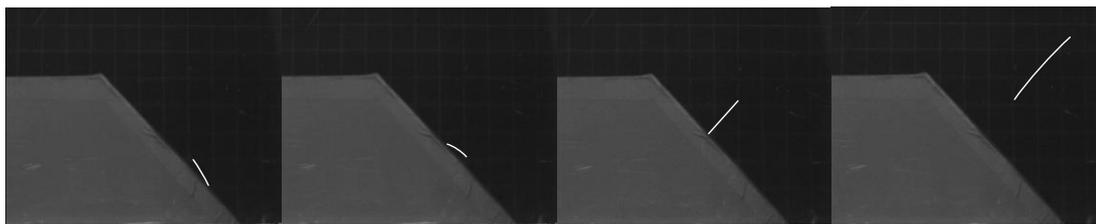
路基高度 $H=170mm$ 类型 (IV)

图 2-10 粒子经过高路基的不同轨迹类型图

Fig.2-10 The different trajectories of particle through the high subgrade

(2) 对于高路基, 根据试验中拍摄到的 50 个颗粒运动轨迹, 每种运动轨迹类型统计其颗粒数及其比例, 如表 2-2 所示。

表 2-2 不同轨迹类型的颗粒数及其比例

Table.2-2 Number of particles in different trajectories

高路基 ($H=170mm$)	运动轨迹类型			
	(I)	(II)	(III)	(IV)
$\alpha = 1:1$	3 (6%)	14 (28%)	15 (30%)	18 (36%)
$\alpha = 1:1.75$	4 (8%)	19 (38%)	13 (26%)	14 (28%)

结论: 通过表 2-2 可知当风洞水平风速 $V=16m/s$ 一定, 路基形式为高路基时, 极小部分的粒子直接从路基顶面越过或是打在路基顶面上, 绝大部分粒子撞击在路基边坡上。通过对运动轨迹类型 (II)、(III)、(IV) 的粒子数分析可得出小部分粒子经过高路基撞击边坡后沿顶面越过路基, 大部分粒子由于多次撞击能量逐渐损失沿坡面下滑或是反弹后直接向坡脚方向运动而堆积在坡脚处。

2.2.2 沙粒子撞击路基边坡位置、速度和角度(方向)分析

风场中沙粒子撞击坡面的位置、角度 θ 的分析计算如图 2-11, 本次试验中拍摄频率设定为 30 幅/秒, 在每幅图片里通过黑色 PVC 植绒坐标格纸背景可以计算出粒子撞击坡面前后运动轨迹的长度和撞击坡面瞬间的角度, 进而根据设定的频率计算出粒子撞击坡面瞬间的速度。

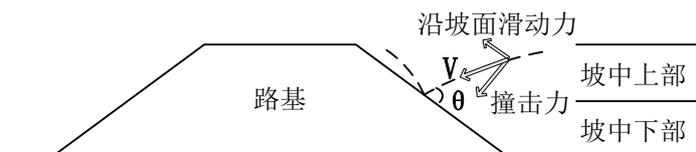


图 2-11 计算示意图

Fig.2-11 Calculation sketch

1. 粒子撞击矮路基边坡时的撞击位置、角度、速度的分析计算

(1) 路基 $H=60mm$, $\alpha=1:1$ 时, 从撞击在路基边坡上的颗粒中选取运动轨迹清晰的 10 个粒子进行统计, 分析粒子撞击坡面时的位置并计算与坡面的夹角 (即方向) 和速度如表 2-3 所示。

表 2-3 计算数据统计表 ($H=60mm$, $\alpha=1:1$)

Table.2-3 Calculated data statistics ($H=60mm$, $\alpha=1:1$)

颗粒序号	速度 V (m/s)	角度 θ ($^{\circ}$)	撞击位置	运动轨迹类型
1	7.57	96.1	坡中上部	III
2	7.10	106.4	坡中上部	II
3	12.10	102.3	坡中下部	II
4	6.85	104.5	坡中上部	II
5	8.28	100.5	坡中上部	II
6	8.76	95.2	坡中上部	II
7	8.86	90.8	坡中上部	II
8	5.92	90.3	坡中上部	II
9	7.34	95.2	坡中上部	III
10	8.82	98.6	坡中上部	II
平均值	8.16	98.0	—	—

(2) 路基 $H=60mm$, $\alpha=1:1.75$ 时, 对粒子撞击的位置、角度、速度用同样方法计算统计如表 2-4。

表 2-4 计算数据统计表 ($H=60mm$, $\alpha=1:1.75$)

Table.2-4 Calculated data statistics ($H=60mm$, $\alpha=1:1.75$)

颗粒序号	速度 V (m/s)	角度 θ ($^{\circ}$)	撞击位置	运动轨迹类型
1	8.28	81.1	坡中上部	II
2	10.18	82.8	坡中下部	II
3	7.68	81.0	坡中下部	II
4	7.69	86.0	坡中上部	II
5	6.60	74.7	坡中上部	II
6	6.27	78.9	坡中上部	II
7	6.51	79.3	坡中下部	II

8	7.30	82.8	坡中下部	II
9	7.54	81.5	坡中上部	III
10	7.96	80.2	坡中上部	II
平均值	7.60	80.8	—	—

通过对比数据表 2-3 和 2-4 可以得出结论:

(1) 当路基模型高度为 60mm , 大部分的沙粒子撞击在路基边坡上部后反弹跃起从路基顶面越过。

(2) 路基模型高度 ($H=60\text{mm}$) 一定, 当路基边坡坡率为 1:1 时, 粒子撞击坡面的平均速度 ($v=8.16\text{ m/s}$) 大于坡率为 1:1.75 时的粒子撞击坡面的平均速度 ($v=7.60\text{ m/s}$)。这说明当路基高度一定时, 边坡坡率越大, 粒子在风的携带下从迎风坡中上部至坡肩处, 其风速增加效果越明显。

(3) 路基边坡坡率为 1:1 时粒子撞击时与边坡的夹角 θ 大于 90° , 路基边坡坡率为 1:1.75 时粒子撞击坡面时的角度小于 90° 。这说明当路基高度一定时, 边坡坡率越大, 粒子在风的携带下撞击到边坡的瞬间, 对边坡的撞击力越大, 对边坡侵蚀作用越大。

2. 粒子撞击高路基边坡时的撞击位置、角度、速度的计算

(1) 路基 $H=170\text{mm}$, $\alpha=1:1$ 时, 从撞击在路基边坡上的颗粒中选取运动轨迹清晰的 10 个粒子进行统计, 分析粒子撞击坡面时的位置并计算与坡面的夹角 (即方向) 和速度如表 2-5 所示。

表 2-5 计算数据统计表 ($H=170\text{mm}$, $\alpha=1:1$)

Table.2-5 Calculated data statistics ($H=170\text{mm}$, $\alpha=1:1$)

颗粒序号	速度 V (m/s)	角度 θ ($^\circ$)	撞击位置	运动轨迹类型
1	7.07	90.8	坡中上部	III
2	6.73	109.1	坡中下部	IV
3	7.05	105.5	坡中下部	IV
4	7.04	86.2	坡中上部	III
5	6.66	96.7	坡中上部	II
6	7.07	91.4	坡中上部	III
7	5.71	104.3	坡中下部	IV
8	6.50	87.5	坡中下部	III

9	8.07	98.1	坡中下部	IV
10	6.81	97.0	坡中上部	III
平均值	6.87	96.7	—	—

(2) 路基 $H=170mm$, $\alpha=1:1.75$ 时, 对粒子撞击的位置、角度、速度用同样方法计算统计如表 2-6。

表 2-6 计算数据统计表 ($H=170mm$, $\alpha=1:1.75$)

Table.2-6 Calculated data statistics ($H=170mm$, $\alpha=1:1.75$)

颗粒序号	速度 V (m/s)	角度 θ ($^\circ$)	撞击位置	运动轨迹类型
1	6.36	99.5	坡中下部	II
2	6.41	105.4	坡中下部	IV
3	6.30	104.5	坡中下部	IV
4	7.07	75.6	坡中下部	III
5	7.07	74.7	坡中上部	II
6	5.89	74.7	坡中上部	III
7	7.04	84.2	坡中下部	II
8	8.96	78.1	坡中下部	III
9	6.15	80.5	坡中下部	IV
10	5.19	79.5	坡中下部	IV
平均值	6.64	85.7	—	—

通过对比数据表 2-5 和 2-6 可以得出结论:

(1) 当路基模型高度为 $170mm$, 大部分的沙粒子撞击在路基边坡下部经多次向上反弹后能量逐渐损失沿坡面下滑沉积在迎风坡脚处, 或者粒子反弹后直接飞向路基的背风坡并堆积在背风坡脚处。

(2) 路基模型高度 ($H=170mm$) 一定, 当路基边坡坡率为 1:1 时, 粒子撞击坡面的平均速度 ($V=6.87 m/s$) 略大于坡率为 1:1.75 时的粒子撞击坡面的平均速度 ($V=6.64 m/s$)。这说明当路基高度一定时, 边坡坡率越大, 虽然迎风坡脚至坡中风速越增加, 但增加效果与矮路基相比并不显著

(3) 路基边坡坡率为 1:1 时粒子撞击时与边坡的夹角 θ 大于 90° , 路基边坡坡率为 1:1.75 时粒子撞击坡面时的角度小于 90° 。与矮路基相同, 这说明当路基边坡坡率越大, 粒子在风的携带下对边坡撞击并引起侵蚀作用力也越大。

2.3 本章小结

本次风洞高速摄影试验是研究风场中路基断面设计参数对风吹沙粒运动轨迹的影响。通过采用高速摄像机对风场中单一颗粒撞击路基边坡前后运动轨迹进行追踪拍摄,分析粒子撞击位置,撞击瞬间的角度和速度与路基高度和边坡坡率的关系。对本次风洞摄影试验总结得出以下结论:

(1) 风场中水平风速一定且路基为矮路基时,大部分的粒子直接从路基顶面越过或是撞击在路基顶面上,部分粒子撞击路基边坡后回弹并继续从路基顶面越过,而极少部分粒子撞击边坡后向坡脚方向堆积。路基为高路基时,大部分的沙粒子撞击在路基边坡经多次向上反弹后能量逐渐损失沿坡面下滑或粒子反弹后直接飞向路基坡脚处堆积。

(2) 路基为矮路基且高度一定时,大部分粒子撞击在路基边坡上部,且随着坡率的增大,向上跃起至坡肩风速增加效果显著,所以对于陡边坡路基,粒子撞击边坡时的速度较缓边坡路基相比较,对边坡撞击力也更大。路基为高路基且高度一定时大部分粒子撞击在路基边坡下部,且随着坡率的增大,向下至坡脚的风速增加较缓,所以粒子撞击陡边坡路基的速度略大于缓边坡。同时粒子撞击陡边坡时的角度 θ 大于 90° ,而粒子撞击缓边坡时的角度 θ 小于 90° 。

第三章 风沙土路基冻融循环中水分迁移规律试验研究

路基在自然环境条件下，其内部的物理力学特征指标会受到各种自然因素的影响。尤其是在干旱寒冷地区的冬末春初时期，温度处于零下，路基土体处于冻结状态，积雪覆盖在路基表面。当温度上升到零上时，积雪开始融化并渗入到路基内部，这使得冻融循环作用成为影响寒旱区路基的一个重要侵蚀作用。路基内部水分会在冻融驱动力的作用下迁移，也因此引起其它的物理力学特征的变化。本章通过冻融试验来研究风沙土路基内部水分在温度牵引下的重分布情况，以及由于水分重分布而引起的土体干密度变化和竖向变形^{[38]-[40]}。为研究风沙土路基复合侵蚀规律，确定风沙土路基内部水分迁移与外界温度变化之间的关系提供前期试验基础。

3.1 路基风沙土填料基本物理指标

本试验使用的路基土体材料为风沙土，取自内蒙古库布齐沙漠，取土深度在地表下 3~5m。

3.1.1 风沙土颗粒组成

风沙土颗粒分析试验是根据《公路土工试验规程》(JTJ051-93)规定采用筛分法进行的。实验得出风沙土颗粒组成见表 3-1，根据表 3-1 绘制的风沙土颗粒级配曲线如图 3-1 所示。

表 3-1 风沙土颗粒分析试验结果

Table.3-1 Grain composition of Aeolian sandy soil

粒径 /mm	>0.25	0.25~0.1	0.1~0.074	≤0.074
小于某粒径的质量百分数 /%	2.5	95.1	1.7	0.7

根据如下公式可计算出不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ：

$$C_u = d_6 / d_1 \quad (3-1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (3-2)$$

式中： d_{10} ， d_{30} ， d_{60} ——分别为沙样中小于该粒径的颗粒质量为 10%、30%和 60% 的粒径(mm)。

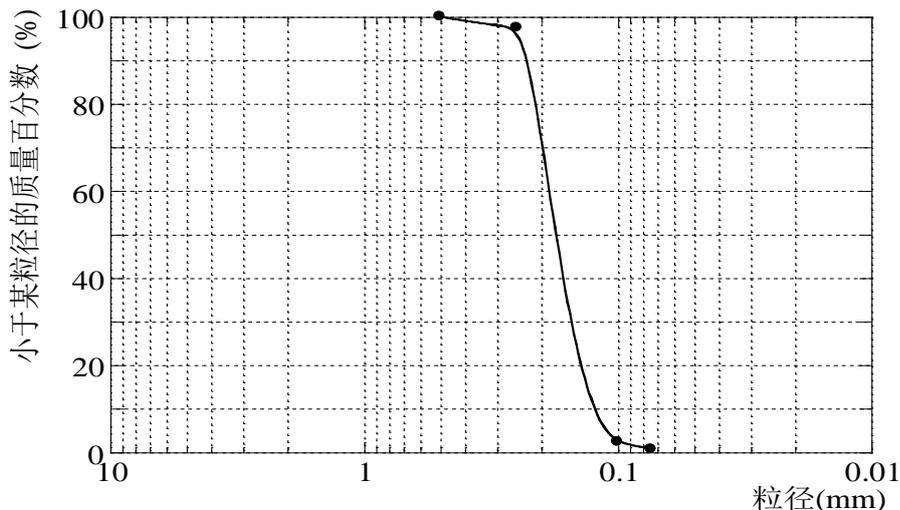


图 3-1 风沙土颗粒级配曲线

Fig.3-1 Curve of grain grade of Aeolian sandy soil

根据上图可查得 $d_{60}=0.19$, $d_{10}=0.13$, $d_{30}=0.16$, 计算出此风沙土的不均匀系数 $C_u=1.462$ 和曲率系数 $C_c=1.036$ 。沙样风沙土的不均匀系数 $C_u \leq 5$, 表明风沙土属于级配不良的细砂。

3.1.2 风沙土击实试验

1. 风沙土在击实功 I 下的击实试验（轻型击实试验）

本试验所用的仪器为南实处型击实仪（轻型击实仪），用来测定风沙土的含水量与干密度的关系，由此确定风沙土在一定的击实功下所能达到的最优含水率及其对应的最大干密度。

本实验按照《公路土工试验规程》（JTJ051-93）中规定的试验方法进行试验，即轻型击实试验测定最优含水率和最大干密度，其中击实锤质量为 2.5kg ，落距 30.5cm （击实功 I），分三层击实，每层击数 27 次，试筒容积 997cm^3 。

击实试验所得到的结果见表 3-2，风沙土的击实曲线绘制见图 3-2，风沙土的最优含水率为 12%，最大干密度为 1.611g/cm^3 。

表 3-2 风沙土击实试验结果（击实功 I）

Table.3-2 Results of hitting of Aeolion sandy soil (The compaction power I)

含水率 ω (%)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
干密度 ρ (g/cm^3)	1.599	1.586	1.576	1.583	1.593	1.607	1.611	1.608	1.598

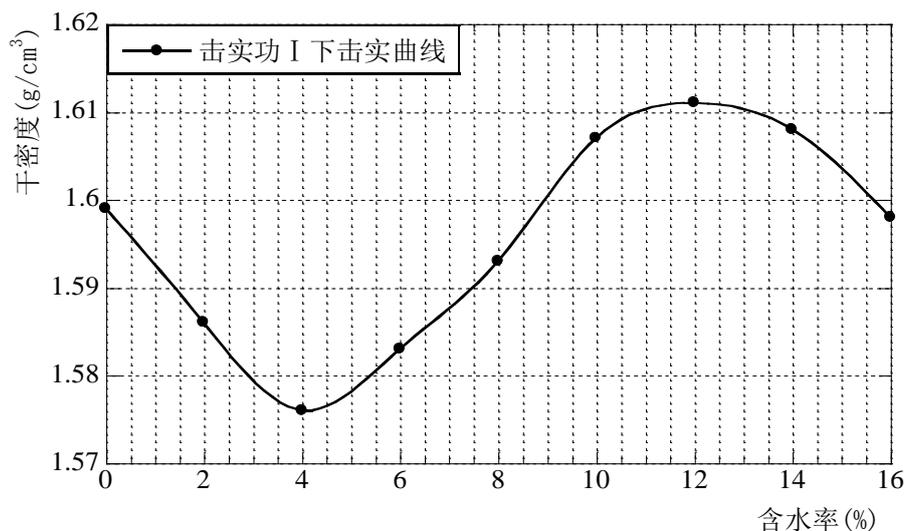


图 3-2 干密度与含水率的关系曲线 (击实功 I)

Fig.3-2 Curve of dry-density and rate of containing water (The compaction power I)

2. 风沙土在击实功 II 下的击实试验

在对风沙土进行的冻融循环试验中, 由于制备试样所用的击实筒、击实器锤重以及落距 (击实功 II) 与轻型击实仪不同, 见图 3-3。为了能够准确的测出在自制击实器下所制备土样在冻融循环前的初始干密度值。又对风沙土进行了击实功 II 下的击实试验。



图 3-3 击实器与击实土样

Fig.3-3 The compaction and the hitting soil sample

试验也是按照《公路土工试验规程》(JTJ051-93) 中规定的试验方法进行试验, 分三层击实, 每层击数 27 次, 试筒容积 785cm^3 。击实试验所得到的结果见表 3-3, 风沙土的击实曲线绘制见图 3-4, 风沙土的最优含水率为 11%, 最大干密度为 1.750g/cm^3 。

表 3-3 风沙土击实试验结果（击实功 II）

Table.3-3 Results of hitting of Aeolion sandy soil (The compaction power II)

含水率 ω (%)	0	2	4	6	8	10	12	14
干密度 ρ (g/cm^3)	1.741	1.732	1.724	1.726	1.736	1.748	1.749	1.742

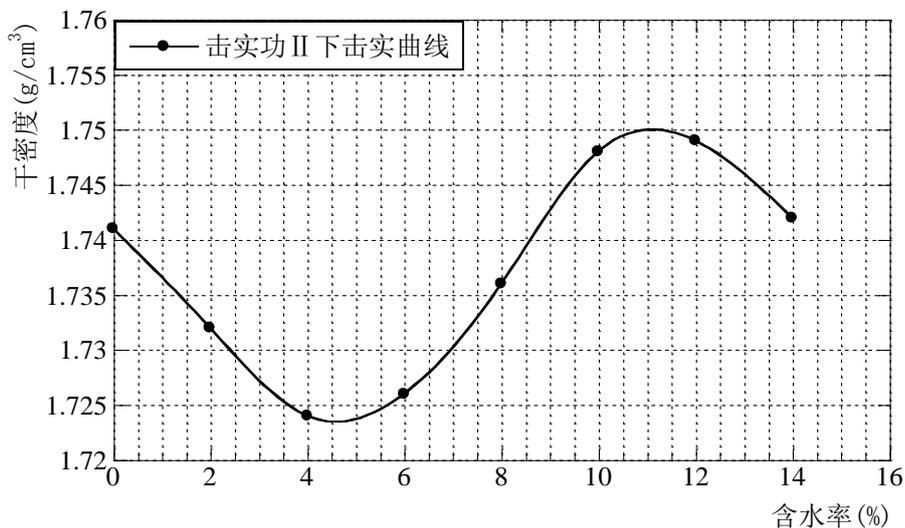


图 3-4 干密度与含水率的关系曲线（击实功 II）

Fig.3-4 Curve of dry-density and rate of containing water (The compaction power II)

3.2 冻融循环试验方案

3.2.1 试验仪器

本次试验是利用内蒙古农业大学水利与土木建筑学院的三温冻融循环试验仪，该仪器箱体内的腔室为圆柱形，直径 10cm，高度为 10cm。腔室顶面连有顶板，底部连有底板。由于该仪器能够实现分别设定箱体环境、顶板、底板各自的温度，所以称为三温冻融循环试验仪，见图 3-5。



图 3-5 三温冻融循环试验仪

Fig.3-5 The freeze-thaw cycle test instrument of three temperatures

3.2.2 试验方案拟定

路基置于自然环境中,由于其周围的环境温度与地表温度接近,故假设路基顶面、周围环境、底面的温度一致,通过设定相同的箱体、顶板和底板冻结温度和融化温度,来模拟风沙土路基在自然环境中受到的冻融作用。

将现场采集的土样根据风沙土在击实功 II 下的击实曲线(见图 3-4),按照最佳含水率(11%)在有机玻璃筒内压实制备土样,使土样达到一定的干密度($1.750\text{g}/\text{cm}^3$)。土样为直径 10cm,高度 10cm 的圆柱体。然后利用三温冻融循环试验仪对制备好的土样进行室内冻融循环试验,研究风沙土路基在冻融循环前后水分重分布规律以及由于土样内部水分迁移引起的土体干密度变化和竖向变形^{[41]-[45]}。

根据内蒙古地区冻融季节 30 年来的年平均气温资料,确定试验中土样在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的温差范围内进行冻融循环试验。试样顶板和底板用冷浴降温,箱体温度由低温循环冷浴控温,将顶板、底板和箱体的温度同时设置到 -20°C 来实现试样的冻胀,直到冻胀完毕后再将顶板、底板和箱体的温度同时设置到 20°C 来实现试样的融沉,直到融沉完毕。循环周期为 1 天,冻融循环次数分别为 1 次、2 次、3 次。冻融循环试验开始前,将位移传感器放置在顶板的中心处,以便测定冻融循环试验过程中试样的竖向净变形量。同时将土样在竖向上分为 10 层,每层 1cm,将 10 个温度传感器分别放入每层中,以便观测冻融循环过程中试样内部的温度变化情况,试验土样模型如图 3-6 所示。温度控制精度为 0.1°C ,变形传感器的精度为 0.001mm 。

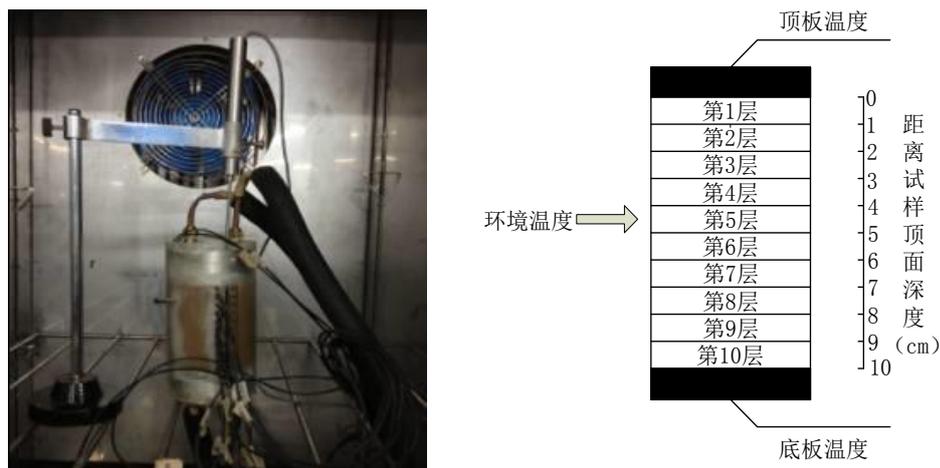


图 3-6 土样模型

Fig.3-6 Soil sample model

考虑到风沙土无粘聚力，试样内部的孔隙水为自由水，在重力作用下会随着时间缓慢向下迁移。因此本次试验中还增加了对比试验，即将试样放置在试验箱内的腔室里，不经过冻融循环作用，但经过对应循环周期的时间且保持箱体温度在 0°C 以上，研究其内部水分重分布情况和干密度的变化情况。

3.3 冻融试验结果分析

3.3.1 土体含水量沿土样深度方向重分布

土样经过一定冻融循环次数后，将其自上而下按每 1cm 一层分层取样，用烘干法测定每一层含水率，分析土样在多次冻融循环下的水分重分布规律。土样自顶面向下延伸各层的含水率随着冻融循环次数的变化，如表 3-4 所示，由此可绘制出土样在冻融循环作用前和经过一定冻融循环次数后，内部各层含水量随深度的变化关系图 3-7。

在对比试验中，土样放置在试验箱腔室中不经过冻融循环作用，但经过相同循环周期的时间且使箱体温度保持在 0°C 以上，其内部水分在重力作用下的重分布情况如表 3-5，由此可绘制出土样在重力作用下其内部各层含水量随土样深度的变化关系图 3-8。

表 3-4 经过不同冻融循环周期的土样各层含水率值

Table.3-4 Moisture content of each layer of soil sample through different freeze-thaw cycle times

冻融循环周期次数		1	2	3
各层含水率 ω (%)	第 1 层	7.5	7.3	7.3
	第 2 层	7.4	7.4	7.3
	第 3 层	7.6	7.4	7.4
	第 4 层	8.3	8.0	7.9
	第 5 层	8.8	8.5	8.2
	第 6 层	9.9	9.4	9.4
	第 7 层	10.5	10.5	10.8
	第 8 层	11.5	11.7	12.0
	第 9 层	12.7	13.7	13.8
	第 10 层	14.1	14.7	14.5

表 3-5 对比试验中土样各层含水率值

Table.3-5 Moisture content of each layer of soil sample in contrast test

对比试验周期次数		1	2	3
各层含水率 ω (%)	第 1 层	8.50	8.10	7.80
	第 2 层	9.30	8.90	8.60
	第 3 层	9.70	9.10	8.70
	第 4 层	10.7	9.80	8.90
	第 5 层	11.3	10.0	9.30
	第 6 层	11.3	10.3	9.90
	第 7 层	11.3	10.6	10.8
	第 8 层	11.8	10.9	11.3
	第 9 层	11.6	12.4	12.9
	第 10 层	11.5	13.3	13.5

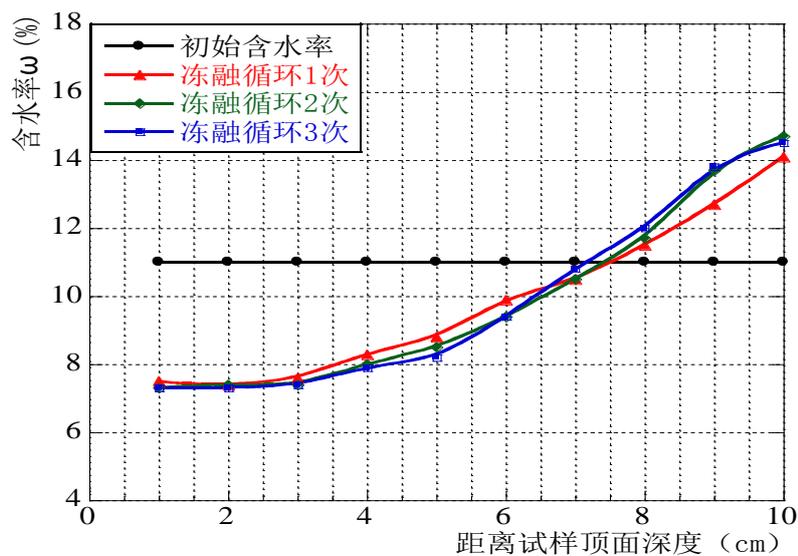


图 3-7 冻融循环前后土样含水率沿深度方向的变化

Fig.3-7 The change of soil moisture content along the depth direction before and after freeze-thaw cycle

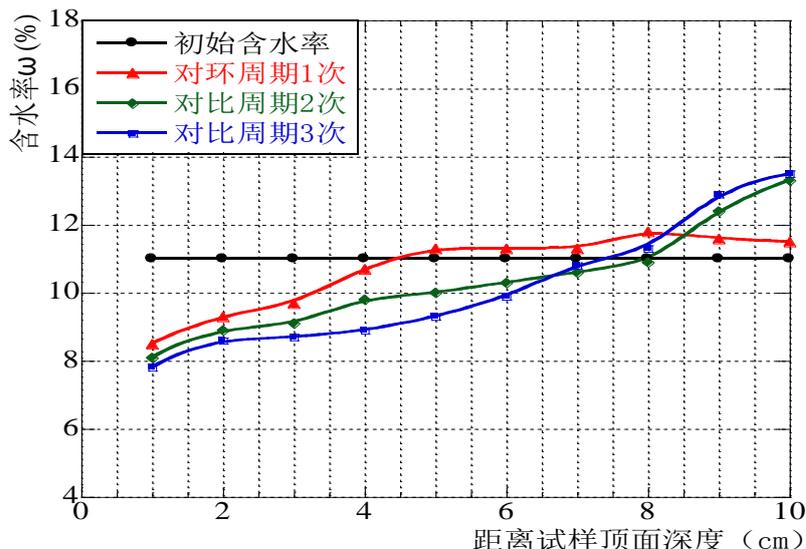


图 3-8 对比试验中土样含水率沿深度方向的变化

Fig.3-8 The change of soil moisture content along the depth direction in contrast test

根据图 3-7 可以看出，土样的初始含水率为 11.0%，冻融循环作用使含水量从顶层到底层逐渐增加。这主要是由于顶板和底板温度同时达到 0℃ 以下时，土体内部温度还在 0℃ 以上，温度在土样内部呈现出中间高而上下两端低的趋势，所以土体由两端向中心冻结。对于土样上半部，水分在温度梯度作用下克服重力作用从融区(中间)向冻结区(上部)迁移较慢，而对于土样下半部，水分在重力作用和温度梯度共同作用下从融区(中间)向冻结区(下部)迁移速度较快。当顶板和底板温度变为 0℃ 以上时，土体开始由上下两端向中心融化，这时整个试样内部水分会在重力作用下又从上向下迁移。但通过图 3-7 和图 3-8 对比可以看出，土样上半部在冻结状态下向上迁移的水量较融化状态下向下迁移的水量少，并且对于土样下半部冻融作用和重力作用均会使土样水量从上到下逐渐增加，这使得土样形成了水分从上向下逐渐增大的分布规律。由于土体在冻融过程中没有补水，随着冻融次数的增加，使得土样含水量从上向下逐渐增大的规律更加明显。当冻融循环 3 次时，顶层含水率小到 7.3%，底层含水率增大到 14.5%。相比未冻融循环的情况，随着时间的推移，水分的迁移规律性增强，且随着冻融循环次数的增加，水分由上部向下部迁移更为明显。如果说未冻融循环的情况，水分是一种静力扩散，那么冻融循环作用为水分的扩散增加了动力迁移的能量。

3.3.2 土体干密度沿土样深度方向变化

土样经过一定冻融循环次数后在冻结状态下进行拆模，快速将土样自上而下按每 1cm 分层取样，用自制小环刀取样，测得土样在多次冻融循环后的各层干密度变化

情况如表 3-6 所示。根据此数据表可以绘制出土样在冻融循环作用前和经过一定冻融循环次数后，其内部各层干密度值随深度的变化关系图 3-9。

表 3-6 经过不同冻融循环周期的土样各层干密度值

Table.3-6 Dry density of soil sample each layer through different freeze-thaw cycle times

冻融循环周期次数	1	2	3
第 1 层	1.752	1.751	1.736
第 2 层	1.707	1.708	1.691
第 3 层	1.720	1.697	1.681
第 4 层	1.733	1.704	1.669
第 5 层	1.746	1.722	1.671
第 6 层	1.749	1.728	1.675
第 7 层	1.758	1.735	1.684
第 8 层	1.775	1.749	1.684
第 9 层	1.780	1.762	1.691
第 10 层	1.806	1.777	1.719

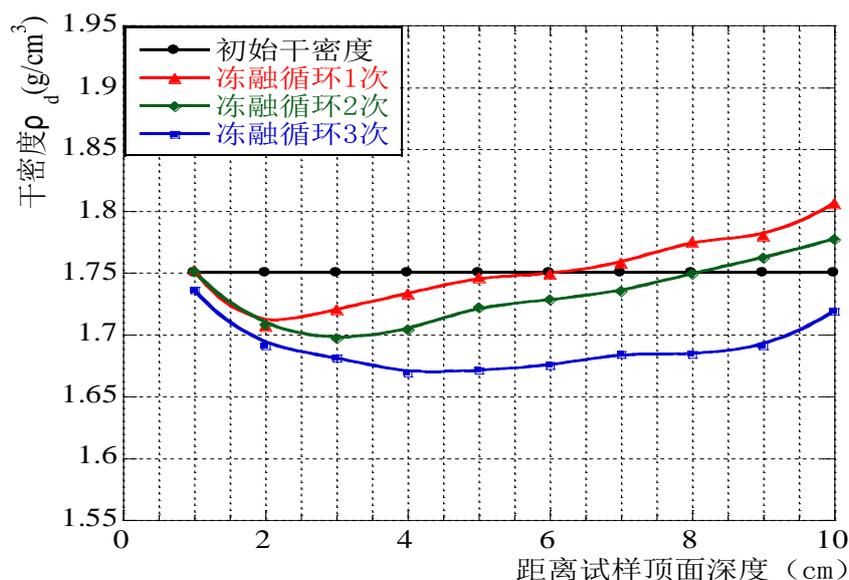


图 3-9 冻融循环前后土样干密度沿深度变化关系图

Fig.3-9 Dry density of soil moisture content along the depth direction before and after freeze-thaw cycle

根据图 3-9 我们可以看出，第一层（表层）的干密度值基本接近初始干密度值 1.750g/cm^3 ，这是由于土样试验层第一层为表层且很薄，所以受冻融作用影响较小。根据上节文章分析可知冻融作用加速了试样土体水分从上向下的迁移。当土样经过 1 次冻融后，冻融作用破坏了土体原始结构。上部土体由于水分向下迁移使其空隙率增大，干密度减小。而下部土体由于受到顶板自重和上部土体自重共同作用的影响，使得土体颗粒向下移动并重新排列，使得下部土体被压密，导致靠近底板的土体干密度

变大超过初始干密度值，土体干密度呈现出从上到下增加的趋势。当土样经过 2 次冻融循环作用后，上部土体空隙率继续增大，而使下部更密实的土体结构开始变的疏松，所以各层干密度值相对于第 1 次冻融作用来说均有所降低，并且土体干密度从上到下增加的趋势变得缓和。当土样经过 3 次冻融作用后，使得整个土体空隙率继续增大，结构变的更加疏松，干密度整体降低并趋于某一稳定值。

3.3.3 土体竖向变形

土样在无补水条件下进行冻融循环时，会发生一定的膨胀及收缩变形。本次冻融循环试验中土样的变形情况如表 3-7。

表 3-7 土样经过冻融循环作用后的总变形量

Table.3-7 The total deformation of Soil samples after freeze-thaw cycle effect

冻融循环次数	位移传感器读数(mm)		净变形量(mm)
	初始读数	最终读数	
1	6.40	6.37	+0.03
2	4.53	4.37	+0.16
3	3.68	3.97	-0.29

注：“+”表示变形向下，“-”表示变形向上

根据表 3-7 可知，当土样经过 1 次、2 次冻融循环作用时，土体产生收缩变形。在当土体经过 3 次冻融循环作用时，土体产生冻胀变形，原因是冻融循环更加使密实的砂性土样开始变的疏松，冻融循环作用使土体内部空隙率增大。

3.4 本章小结

通过对压实风沙土样进行无补水条件下的多次冻融循环试验，研究了冻融循环作用对风沙土路基内部水分迁移的规律，以及由于水分迁移而引起的土体干密度变化的规律和土体总变形情况,得出以下主要结论：

(1) 土体在没有补水的条件下，冻融循环作用使得其内部的水分从上向下迁移，土体含水率从顶面到底面逐渐递增，而且随着冻融次数的增加，水分由上部向下部迁移更为明显。如果说未冻融循环的情况，水分是一种静力扩散，那么冻融循环作用为水分的扩散增加了动力迁移的能量。

(2) 土体在经过 1 次、2 次冻融循环作用后使其上部空隙率增大导致干密度降低，而下部土体在顶板自重和土体自重的作用下变得更加密实，干密度增大超过初始

干密度,使得土体干密度呈现出从上到下递增的趋势。但冻融 2 次与冻融 1 次相比较,土体整体干密度降低的幅度愈加明显,并且干密度的曲线愈加趋于平缓,干密度从上向下递增的趋势逐渐减弱。当土样经过 3 次冻融作用后,使得整个土体空隙率继续增大,结构变的更加疏松,干密度整体降低并趋于某一稳定值。

(3) 土样经过 1 次、2 次冻融循环作用后,土体被压密产生收缩变形。当土样经过 3 次冻融作用后使密实的土体内部结构变得疏松,产生膨胀变形。由于风沙土没有粘聚力,内部水分为自由水,冻融作用使风沙土样的变形较小。

本章研究了风沙土路基受到由水、温度的复合作用影响而使路基填料土体产生的冻融作用,其内部填料土体水分重分布、干密度影响严重,而对变形影响较小。

第四章 风沙土路基冻融风蚀破坏规律试验研究

内蒙古地区属于干旱寒冷地区，自然环境中的风、融雪和温度的共同作用体现了路基受到的风雪复合侵蚀作用^[46]。路基一方面受到风沙的侵蚀作用，另一方面由于积雪融化渗入路基内部引起填料土体的冻融循环侵蚀作用。路基会因风蚀和冻融侵蚀的交叉作用引起结构损伤下抗剪强度的持续衰减。

4.1 试验方案

4.1.1 试验仪器

1. 风蚀风洞机

本次冻融风蚀风洞试验所用的仪器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。

2. 低温试验箱

路基模型冻融试验所使用的仪器为内蒙古农业大学水利与土木建筑学院的低温试验箱，见图 4-1。通过自行设置低温来实现试样的冻结，冻结完毕后关闭制冷系统使试样融化，来实现路基模型的冻融循环。



图 4-1 低温试验箱

Fig.4-1 The test chamber of low temperature

3. 便携式强度测试仪

冻融风蚀风洞试验中，抗剪强度测试采用便携式强度测试仪，见图 4-2。试验时将板头插入待测的土层中，然后通过中轴杆缓慢施加扭转力矩，带动板头旋转，当旋

转到一定的扭转力矩后，仪器显示的数值突然出现回弹，此时被测土层被剪坏，使被测土层与其下层土之间形成平整的剪切面，读出仪器显示的回弹前的最大值，再经过换算得到抗剪强度值。



图 4-2 便携式强度测试仪

Fig.4-2 Portable strength tester

4.1.2 试验装置

1. 路基模型箱

模型箱是根据本次试验方案需要自制而成，方便自由组装，路基模型见图 4-3，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。

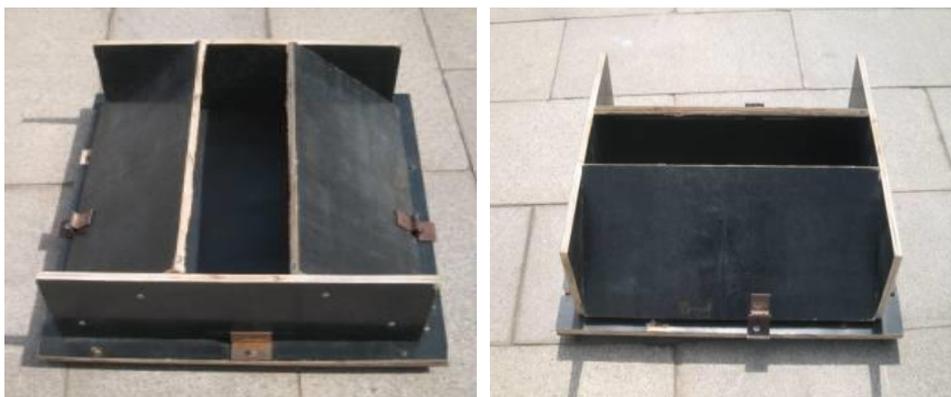


图 4-3 路基模型箱

Fig.4-3 Roadbed model box

2. 压实器

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，对路基两侧边部进行压实，见图 4-4 所示。



图 4-4 压实器

Fig.4-4 Compacting instrument

4.1.3 试验方案与步骤

路基抗风雪复合侵蚀作用的能力强弱与环境条件、土体土性参数密切相关^{[47]-[48]}, 其中包括路基高度 H 、路基边坡坡率 α 、温度 T 、路基土的含水率 ω 及其对应的容重 ρ 、冻融循环次数 N 、风速大小 V , 吹蚀循环时间 t 、等影响因素致使路基土的抗剪强度减弱, 最终导致路基破坏, 得出影响因素的公式 (4-1):

$$\tau = f(H, \alpha, T, \omega, \rho, N, V, t) \quad (4-1)$$

1. 试验模型

试验方案拟定模型的比例为 1:10, 路基模型高度 $H=170\text{mm}$, 边坡坡率 $\alpha=1:1$ 。根据风沙土在击实功 I 下的击实曲线 (见图 3-2), 选择四个具有代表性的含水率 ω 分别为 4%、8%、12%、15%, 对应容重 ρ 分别为 1.576 g/cm^3 , 1.593 g/cm^3 、 1.611 g/cm^3 、 1.603 g/cm^3 。通过控制容重和选定的模型尺寸来制备试验模型。

2. 试验方案

根据试验的可行性, 将试验方案拟定为先进行路基模型的冻融循环试验, 然后再将经过冻融循环作用后的试样置于风洞机上进行风蚀风洞试验, 来模拟寒旱区风沙土路基受到的冻融和风蚀的复合侵蚀作用。

由于土样先经过冻融循环作用, 再经过风吹蚀作用, 要研究由于冻融和风蚀作用引起的路基模型强度衰减的规律, 需要测定冻融循环前后和风蚀后的所有强度值。但测试点较多而不能在同一坡面上实现, 故拟定冻融风蚀风洞的试验方案如下:

(1) 冻融循环试验方案

将低温试验箱的温度设置为 -15°C 使试样冻结 12 小时, 冻结完毕后将低温试验箱

制冷系统关闭，使试样在 10℃室内环境中融化 12 小时。这样试样在温度 T 为-15℃~10℃的范围内实现冻融循环。循环周期为 1 天，冻融循环次数 N 分别为 1 次、2 次、3 次。冻融试验中用自制塑料罩罩住试验土样，防止土样模型中水分散逸到空气中，见图 4-5。



图 4-5 冻融试验中土样模型

Fig.4-5 The sample in freeze-thaw cycle test

由于试样是整体受冻融作用，即以路基中心线为中心分开的两部分土体受冻融作用是相同的。所以先在一侧路基土体（背风侧区域）上测定冻融循环前后的抗剪强度值见图 4-6，即路基土体冻融作用前后的抗剪强度值。



图 4-6 冻融试验现场

Fig.4-6 The site in freeze-thaw cycle test

(2) 风蚀风洞试验方案

设定仪器可调的最大风速 $V=18m/s$,风吹蚀 20min+风干 30 min 为一个吹蚀循环周期，吹蚀循环次数分别定为 1 次、2 次、3 次。

将经过冻融作用的土样放置于风洞机内进行风蚀风洞试验见图 4-7。土样经过冻融循环后的强度值，也就是该土样开始风蚀循环前的强度值。进而，以迎风坡为例，

继续对该土样进行不同风蚀循环作用，并测定土样在冻融风蚀循环共同作用下的强度值。



图 4-7 风蚀试验现场

Fig.4-7 The site in wind erosion test

本次试验中使用的便携式强度仪的板头直径 $d=48\text{mm}$ ，每测一层土厚度约为 5mm 。本次冻融风蚀风洞试验测试方案示意图如图 4-8。

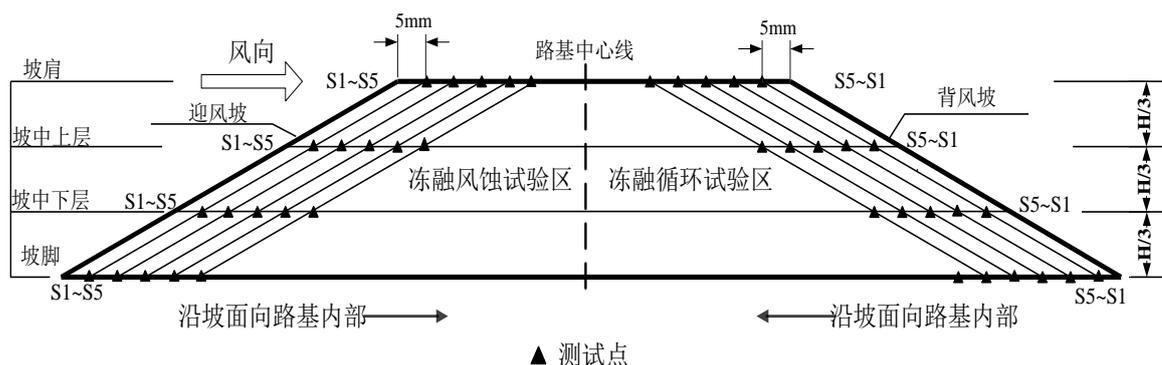


图 4-8 试验方案示意图

Fig.4-8 The schematic diagram of testing program

3. 试验步骤

(1) 先制备含水率为 4% 的路基试样模型，利用便携式强度测试仪在一侧坡面（背风坡）上进行冻融循环前抗剪强度的测定，经过 1 次冻融循环后，进行冻融后强度的测定。冻融前后对每层测试层的强度测定均平行取两个点求平均值，使测得的数据更加真实可靠。

(2) 然后将试样放置在风蚀风洞机内，在另一侧坡面（迎风坡）进行风吹蚀试验，依次进行 1 次、2 次、3 次的风蚀循环作用。在测定相应冻融风蚀次数下的强度值，每次测定各个试验层的强度时均平行取两个点求平均值。

(3) 重复上述(1)、(2)步骤，进行冻融循环 2 次和冻融循环 3 次的土样冻融风蚀

试验。

(4) 重复上述(1)、(2)、(3)步骤,依次进行含水率为8%、12%、15%的路基模型的冻融风蚀试验。

4.2 试验要点和相似性

1. 冻融风蚀风洞试验要点

(1) 本次冻融风蚀风洞试验研究的路基形式为路堤,并且试样在几何上主要是控制路基的高度和边坡,即按照路基高度和坡率缩小的模型比例为1:10。

(2) 本次试验模拟的风蚀作用仅为自然风吹蚀作用,没有考虑挟沙风吹蚀作用。

(3) 本次试验是模拟自然环境下的裸边坡路基,并且不考虑上覆路面层,目的是研究在最不利的情况,即没有边坡防护的情况下,路基受风雪复合侵蚀作用其内部强度衰减变化情况。

2. 冻融风蚀风洞试验的相似性

冻融风蚀风洞试验基本原理为相似性原理。尽管有许多的局限性,但在室内做模拟试验,可以比较准确的控制试验条件,不受野外气候、环境、时间条件的影响,可以人为自由控制风速的大小以及室内温度等,在短时间内获得较多的数据。风洞模拟试验要满足三个条件:几何相似、运动相似、动力相似。既然是模拟试验就很难完全满足相似,其中风洞试验中的几点不足之处如下:

(1) 由于试验仪器尺寸的限制,路基宽度不能够按照比例缩小,只能通过满足仪器的尺寸来选定路基宽度。

(2) 野外试验时气流为无边界,而风洞机的尺寸限制了边界条件,有边界气流。

(3) 模拟时无法设置路线与来风方向夹角问题,只采用最不利的情况,即路线与来风方向夹角为 90° 的直流吹气式吹蚀。

4.3 试验结果分析

4.3.1 同一含水率下路基内部抗剪强度变化规律

由于土体本身具有自重应力和侧向土压力对试验测试结果有一定的影响,所以测试层由表层水平向里强度依次增大并趋于某一强度值稳定。根据测得的数据规律,强度测试由坡面水平向里选择五个试验测试层来分析,每层土的厚度为 $5mm$,得出: $1\sim 5mm$ 为第一测试层(表层)、 $6\sim 10mm$ 为第二测试层、 $11\sim 15mm$ 为第三测试层、

15~20mm 为第四测试层、21~25mm 为第五测试层，考察路基土抗剪强度变化。

1. 土体含水率为 12% 时路基坡肩处抗剪强度的衰减规律

以土体含水率 12% 为例，对路基坡肩处抗剪强度的衰减规律进行分析。根据试验方案和步骤，测定路基坡肩在不同冻融循环和风蚀循环的组合破坏下，由坡面向路基内部各测试层的强度值 τ (kPa) 见表 4-1(a)-(c)。

表 4-1(a) 经历 1 次冻融和 3 次风蚀循环的坡肩抗剪强度值

Table.4-1(a) The shear strength of shoulder slope after one freeze-thaw cycle and three wind erosion cycles

试验层	路基边坡坡肩				
	由坡面向路基内部				
测试深度	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm
初始值	30 kPa	40 kPa	46 kPa	50 kPa	50 kPa
冻融 1 次后 (吹蚀前)	28 kPa	34 kPa	40 kPa	44 kPa	48 kPa
继续吹蚀循环 1 次	28 kPa	34 kPa	42 kPa	44 kPa	46 kPa
继续吹蚀循环 2 次	28 kPa	32 kPa	40 kPa	46 kPa	46 kPa
继续吹蚀循环 3 次	26 kPa	34 kPa	40 kPa	44 kPa	46 kPa

表 4-1(b) 经历 2 次冻融和 3 次风蚀循环的坡肩抗剪强度值

Table.4-1(b) The shear strength of shoulder slope after two freeze-thaw cycles and three wind erosion cycles

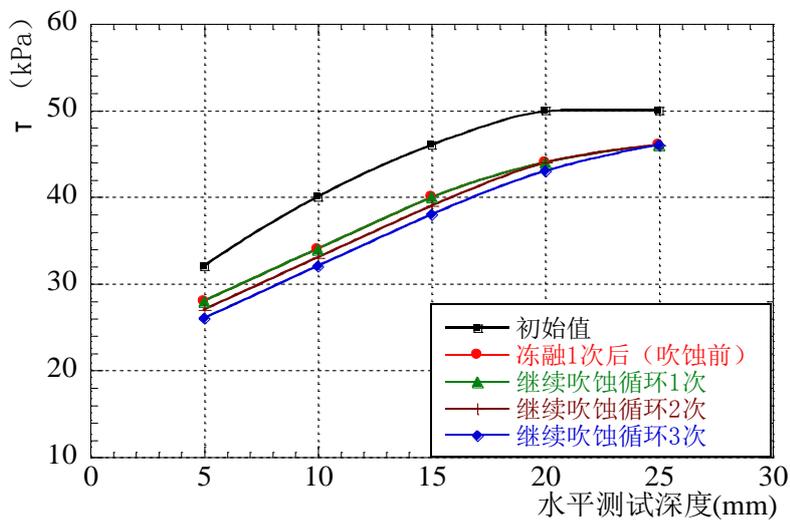
试验层	路基边坡坡肩				
	由坡面向路基内部				
测试深度	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm
初始值	36 kPa	50 kPa	54 kPa	56 kPa	56 kPa
冻融 2 次后 (吹蚀前)	28 kPa	38 kPa	46 kPa	48 kPa	48 kPa
继续吹蚀循环 1 次	26 kPa	34 kPa	42 kPa	46 kPa	48 kPa
继续吹蚀循环 2 次	22 kPa	32 kPa	36 kPa	44 kPa	48 kPa
继续吹蚀循环 3 次	20 kPa	28 kPa	36 kPa	42 kPa	46 kPa

表 4-1(c) 经历 3 次冻融和 3 次风蚀循环的坡肩抗剪强度值

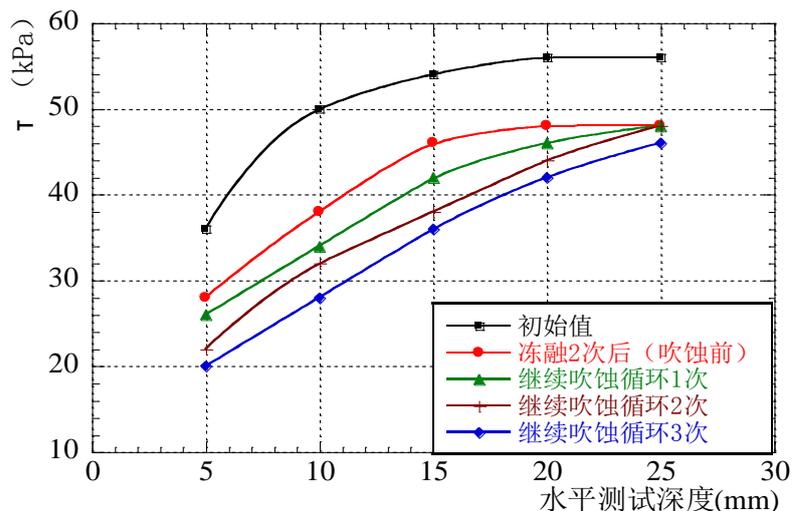
Table.4-1(c) The shear strength of shoulder slope after three freeze-thaw cycles and three wind erosion cycles

试验层	路基边坡坡肩				
	由坡面向路基内部				
测试深度	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm
初始值	28 kPa	40 kPa	48 kPa	52 kPa	54 kPa
冻融 3 次后 (吹蚀前)	18 kPa	22 kPa	34 kPa	42 kPa	44 kPa
继续吹蚀循环 1 次	18 kPa	22 kPa	34 kPa	44 kPa	44 kPa
继续吹蚀循环 2 次	16 kPa	20 kPa	28 kPa	34 kPa	38 kPa
继续吹蚀循环 3 次	14 kPa	18 kPa	28 kPa	34 kPa	42 kPa

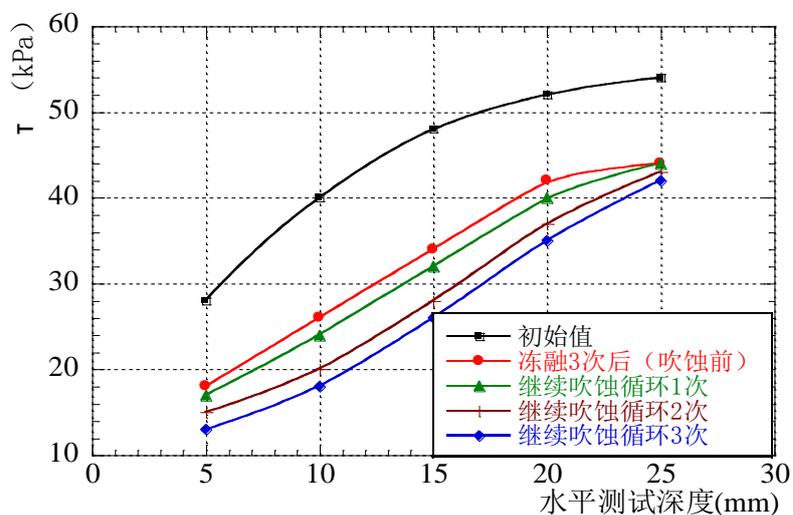
根据测定的路基坡肩处各测试深度土层的强度值如数据表 4-1(a)-(c)，土样模型经过不同冻融循环作用，但都经历风吹蚀 1 次、2 次、3 次循环的作用。可以绘制出坡肩处由坡面向路基内部的抗剪强度值沿测试深度的变化情况如图 4-9(a)-(c)所示。



(a)



(b)



(c)

图 4-9 坡肩抗剪强度值沿水平测试深度关系图

Fig.4-9 The shear strength of shoulder slope along the horizontal depth of the test

如图 4-9(a)-(c)所示, 根据初始值曲线和冻融后曲线, 我们可以看出两条曲线基本上平行。说明土样模型无论是经过 1 次、2 次还是 3 次的冻融循环后, 路基坡肩处沿水平测试深度的各个测点的抗剪强度值跟冻融前相比较均有所降低。路基坡肩在经过冻融循环作用后抗剪强度整体降低, 而且随着冻融次数的增加, 抗剪强度降低的幅度继续加大。

路基坡肩在经受冻融后强度较初始值降低, 在冻融和风蚀的复合侵蚀下强度继续降低, 且在相同的冻融循环次数下, 随着吹蚀循环次数增加, 路基坡肩在冻融循环损伤的基础上强度继续降低, 吹蚀次数增加, 强度降低越明显。

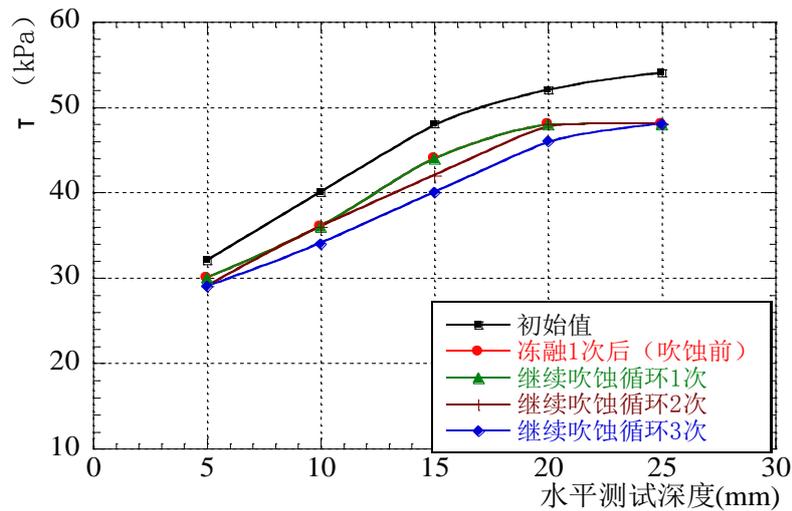
根据风蚀试验结果可知, 在经过 1 次、2 次、3 次的吹蚀循环后与吹蚀前相比,

随着风蚀次数的增加，路基坡肩从坡面水平向内延伸至深度为 25mm 的范围内，各测点的抗剪强度值逐渐减小。三条曲线沿测试深度向内延伸逐渐收敛，即靠近表层的测点抗剪强度值降低的幅度最大，水平延伸向里测点抗剪强度值降低的幅度逐渐减小，到水平测试深度为 25mm 时，抗剪强度降低的幅度基本不明显。说明在坡肩处风蚀作用由坡面水平向内延伸逐渐减弱，其影响深度可以认为是 25mm。

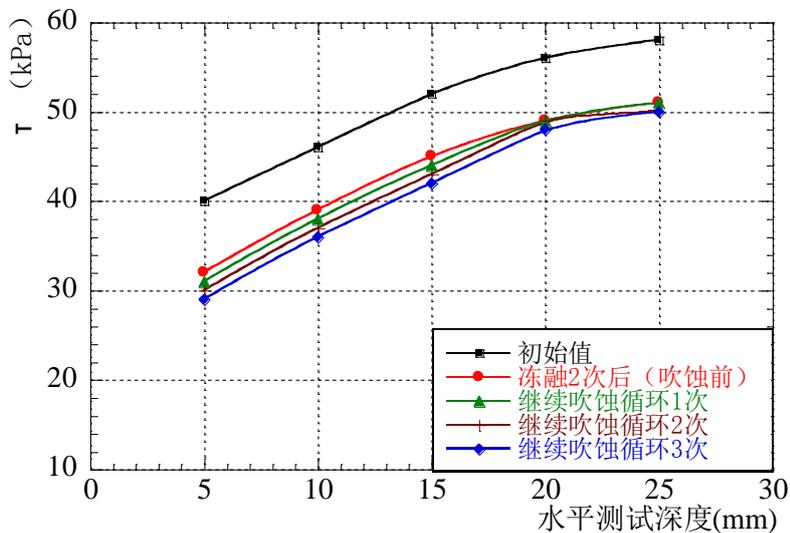
通过以上分析，我们可以看出冻融作用影响整个坡肩，而风蚀作用的影响是逐渐减弱的，即在路基坡肩处自坡面向内延伸风蚀作用的影响逐渐减弱，就试验中土样模型而言，风蚀影响深度为 $H/7$ (H 为路基高度)。

2. 土体含水率为 12% 时路基坡中上层处抗剪强度的衰减规律

以土体含水率 12% 为例，对路基坡中上层抗剪强度的衰减规律进行分析。根据试验测定的路基坡中上层在不同冻融循环和风蚀循环的组合破坏下，由坡面向路基内部的抗剪强度值 τ 与水平测试深度绘制成图 4-10(a)-(c)。



(a)



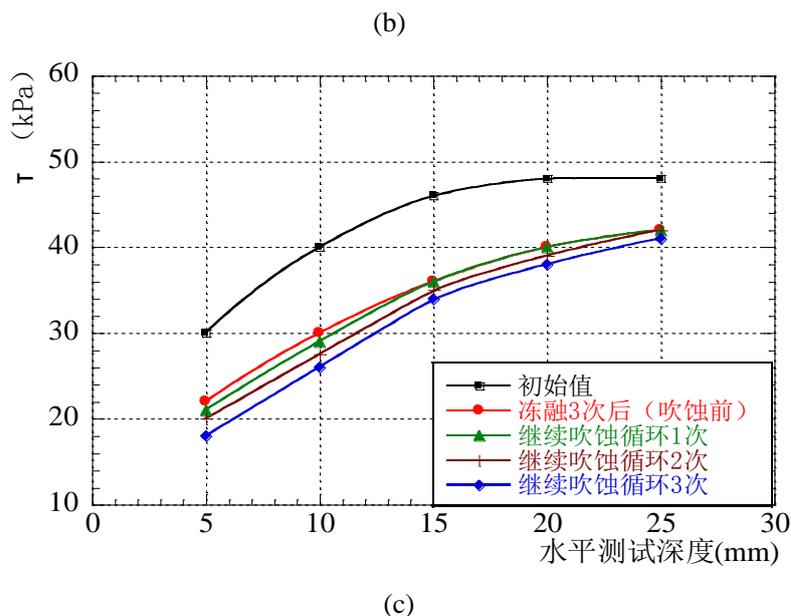


图 4-10 坡中上层抗剪强度值沿水平测试深度关系图

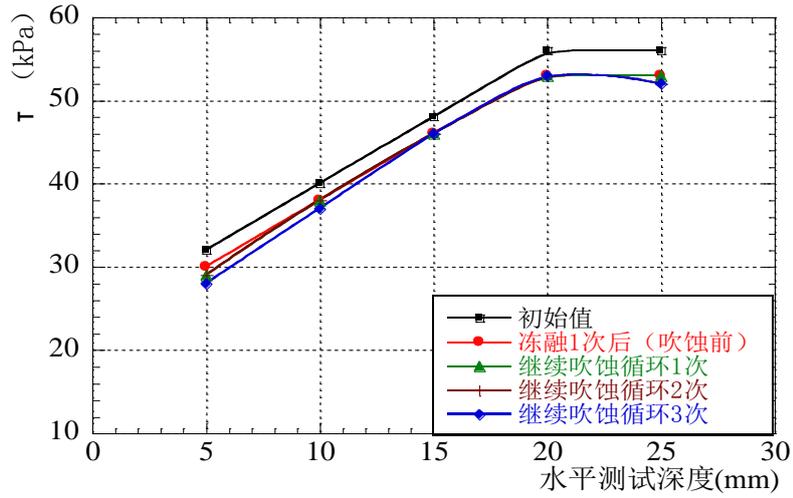
Fig.4-10 The shear strength of upper slope along the horizontal depth of the test

根据风蚀试验得出的曲线可知，随着风蚀次数的增加，路基坡中上层从坡面水平向内延伸到深度为 20mm 的范围内，各测点的抗剪强度值逐渐减小。三条曲线沿水平测试深度向内延伸逐渐收敛，在水平测试深度超过 20mm 时，抗剪强度降低的幅度基本不明显。说明在路基坡中上层，风蚀作用由坡面向内延伸逐渐减弱，且其影响深度为 20mm 。

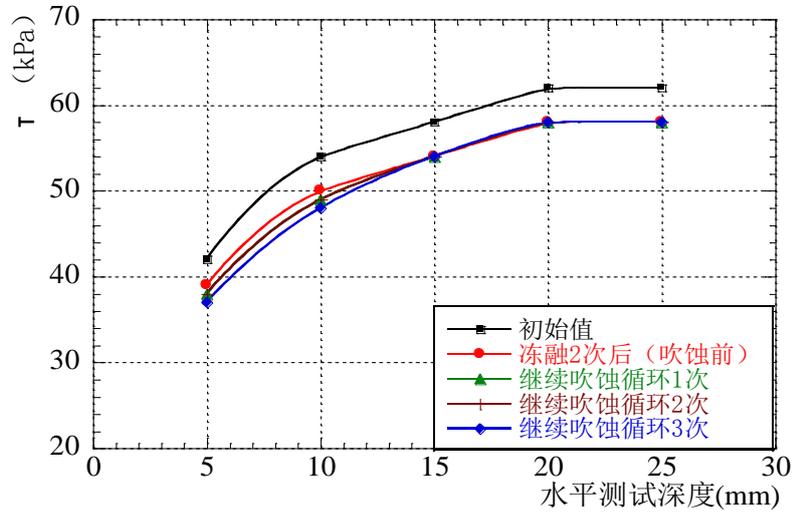
通过对路基坡中上层冻融风蚀风洞试验数据的如上分析，我们可以看出冻融作用影响整个试验层，而风蚀作用影响从坡面向内延伸至 $H/9$ 范围。

3. 土体含水率为 12% 时路基坡中下层抗剪强度的衰减规律

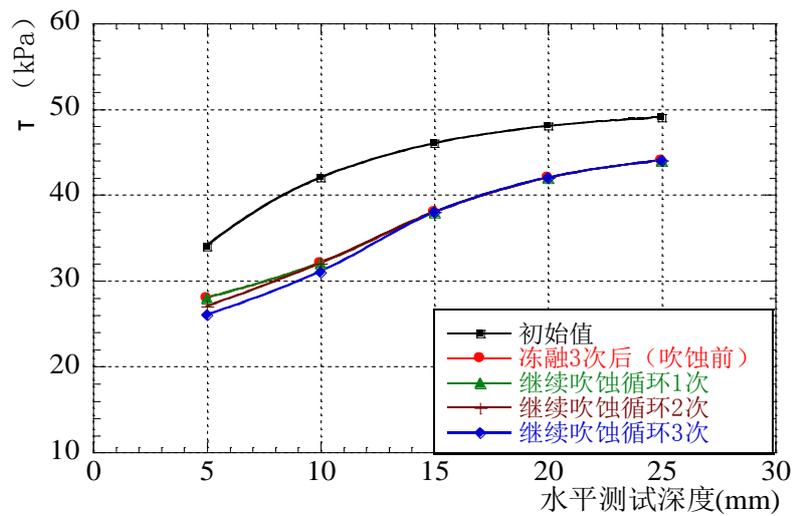
以土体含水率 12% 为例，对路基坡中下层抗剪强度的衰减规律进行分析。根据试验测定的路基坡中下层在不同冻融循环和风蚀循环的组合破坏下由坡面向路基内部的抗剪强度值 τ 与水平测试深度绘制成图 4-11(a)-(c) 所示：



(a)



(b)



(c)

图 4-11 坡中下层抗剪强度值沿水平测试深度关系图

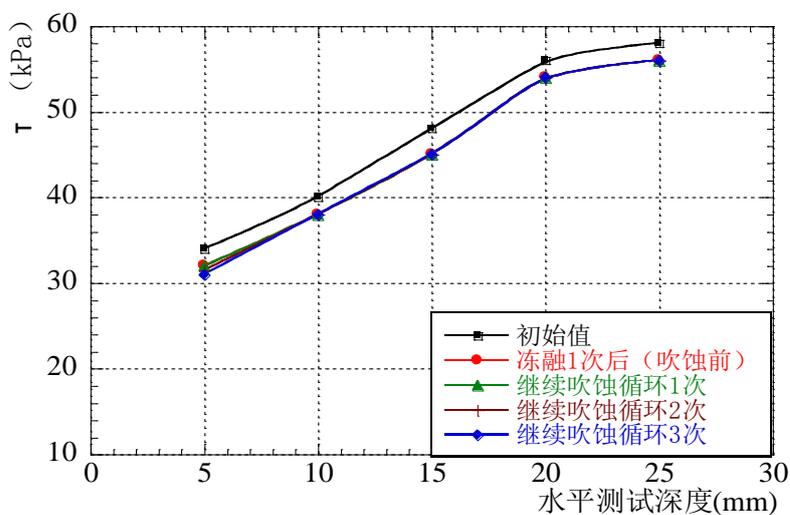
Fig.4-14 The shear strength of lower slope along the horizontal depth of the test

根据风蚀试验得出的曲线可知，随着风蚀次数的增加，路基坡中下层从坡面向内延伸，各测点的抗剪强度值逐渐减小。三条曲线逐渐收敛在水平测试深度为 10mm 左右。说明在路基边坡中下层，风蚀作用由坡面向内延伸逐渐减弱，并且影响深度为 10mm。

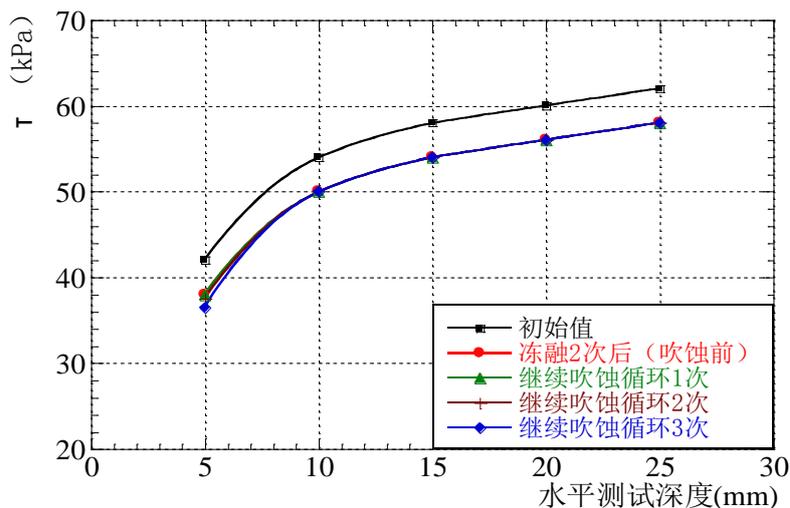
通过对路基坡中下层各个测试点强度与水平测试深度关系图分析，我们可以看出冻融作用影响整个试验层，而风蚀作用影响从坡面向内延伸至 H/17 范围。

4. 土体含水率为 12% 时路基坡脚处抗剪强度的衰减规律

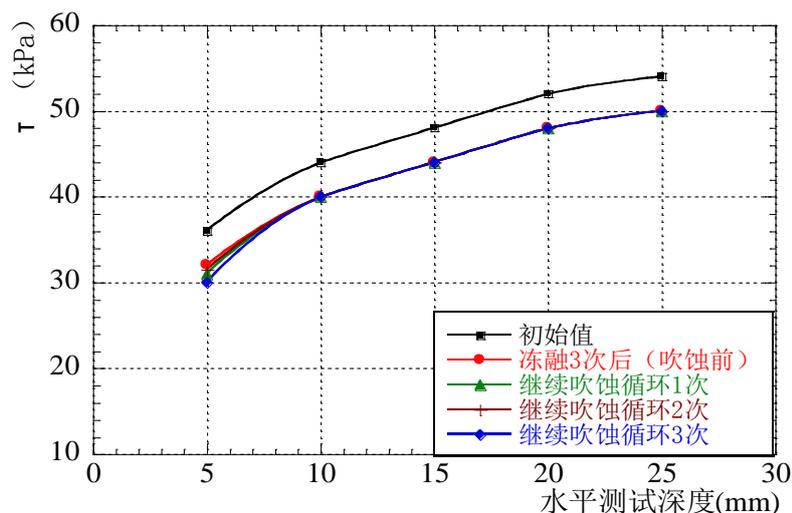
以土体含水率 12% 为例，对路基坡脚处抗剪强度的衰减规律进行分析。由坡面向路基内部的抗剪强度值 τ 与水平测试深度绘制成图 4-12(a)-(c) 如下：



(a)



(b)



(c)

图 4-12 坡脚抗剪强度值沿水平测试深度关系图

Fig.4-12 The shear strength of bottom slope along the horizontal depth of the test

根据风蚀试验得出的曲线可知,随着风蚀次数的增加,路基坡脚从坡面向内延伸到深度为 5mm 的范围内,各测点的抗剪强度值逐渐减小。三条曲线沿水平测试深度向内延伸逐渐收敛在水平测试深度为 5mm 左右。说明在路基坡脚在风蚀作用下由坡面水平向里逐渐减弱,并且影响深度为 $H/34$ 。

综合以上对路基模型含水率为 12% 时的坡肩、坡中上层、坡中下层和坡脚的抗剪强度衰减规律的分析,我们可以得出以下结论:

(1) 路基经过冻融作用后,其内部的抗剪强度整体降低,随着冻融次数的增加,其抗剪强度降低的幅度增大。通过对坡肩、坡中上层、坡中下层和坡脚这四层试验层冻融前强度值和经历 3 次冻融循环后强度值相比较,路基坡肩受冻融作用的影响最显著,其次为坡中上层相对显著,再次为坡中下层,坡脚受冻融作用影响最小。其原因根据第二章的结论我们知道,路基经受冻融作用加速了其内部水分从上向下的迁移,导致上部土体结构变的疏松,越靠近路基上部分的强度值降低越显著,而路基底部分强度值降低幅度不大。

(2) 路基土体含水率一定时,设定试验中最不利的风速,路基经过 3 次风蚀作用后,路基表层吹蚀最为严重,沿测试深度向内延伸吹蚀影响逐渐减小,直至一定深度吹蚀影响可以忽略不计。总结冻融风蚀试验结果,路基坡肩风蚀作用最明显,影响深度为 $H/7$,自上向下依次减小,坡脚处风蚀影响最小,其影响深度仅为 $H/34$ 。

4.3.2 不同含水率下路基强度变化规律

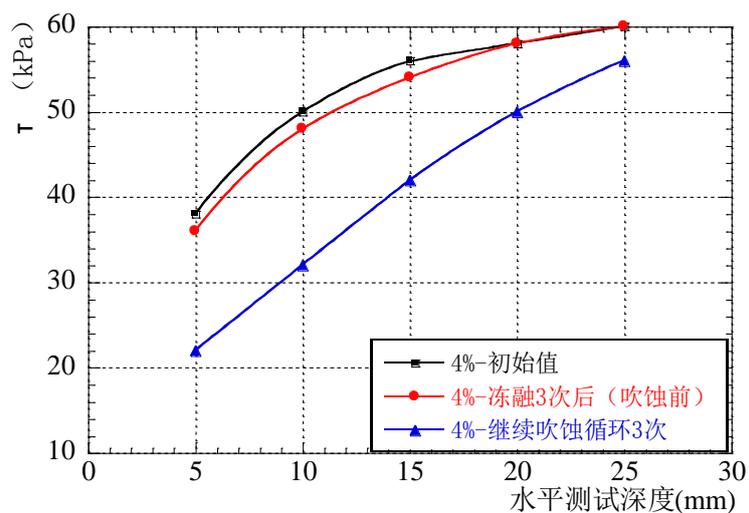
根据 4.3.1 的试验结果,路基坡肩处经受冻融和风蚀复合侵蚀作用的影响程度最为显著。以路基坡肩试验层为例,分析不同含水率(4%、8%、12%、15%)下的路基模型,在经过最不利的冻融和风蚀(冻融循环 3 次和继续吹蚀循环 3 次)复合侵蚀作用后,各个测试层抗剪强度变化特征。将测得强度值整理如表 4-2 所示。

表 4-2 不同含水率下经历最不利的冻融风蚀复合侵蚀后的路基坡肩处抗剪强度值

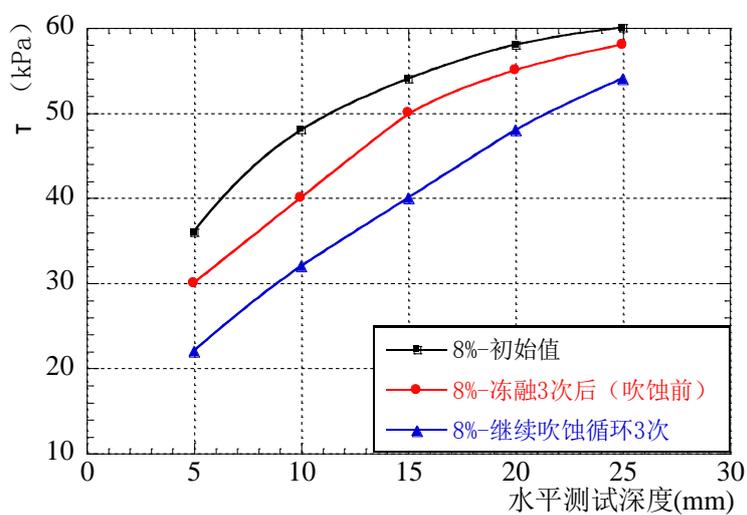
Table.4-2 The shear strength of shoulder slope of roadbed after freeze-thaw and wind composite erosion under the different moisture

试验层		路基边坡坡肩				
		由坡面向路基内部				
测试深度		5mm	10mm	15mm	20mm	25mm
	初始值	38 kPa	50 kPa	56 kPa	58 kPa	60 kPa
4%	冻融 3 次后(吹蚀前)	36 kPa	48 kPa	54 kPa	58 kPa	60 kPa
	继续吹蚀 3 次后	22 kPa	32 kPa	42 kPa	50 kPa	56 kPa
	初始值	36 kPa	48 kPa	54 kPa	58 kPa	60 kPa
8%	冻融 3 次后(吹蚀前)	30 kPa	40 kPa	50 kPa	55 kPa	58 kPa
	继续吹蚀 3 次后	22 kPa	32 kPa	40 kPa	48 kPa	54 kPa
	初始值	28 kPa	40 kPa	48 kPa	52 kPa	54 kPa
12%	冻融 3 次后(吹蚀前)	18 kPa	26 kPa	34 kPa	42 kPa	44 kPa
	继续吹蚀 3 次后	14 kPa	18 kPa	26 kPa	36 kPa	42 kPa
	初始值	38 kPa	47 kPa	53 kPa	56 kPa	58 kPa
15%	冻融 3 次后(吹蚀前)	28 kPa	38 kPa	44 kPa	48 kPa	52 kPa
	继续吹蚀 3 次后	24 kPa	36 kPa	42 kPa	47 kPa	52 kPa

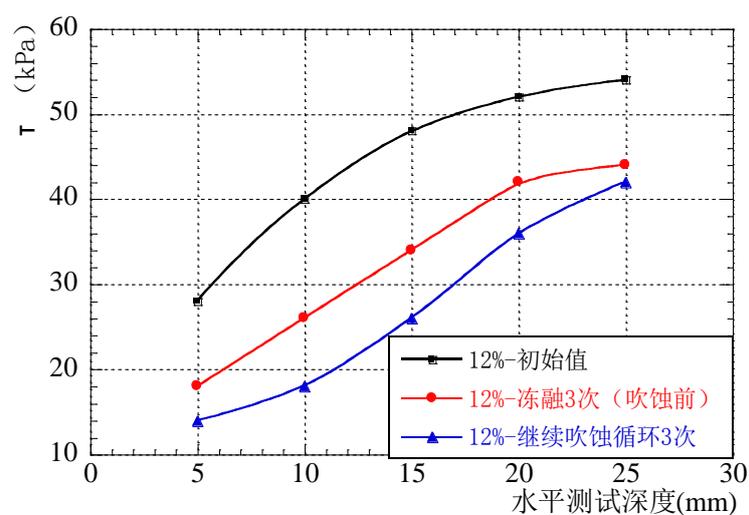
当含水率为 4%、8%、12%、15%时,分别绘制出不同含水率的路基坡肩处抗剪强度值与水平测试深度关系如图 4-13(a)-(d)如下:



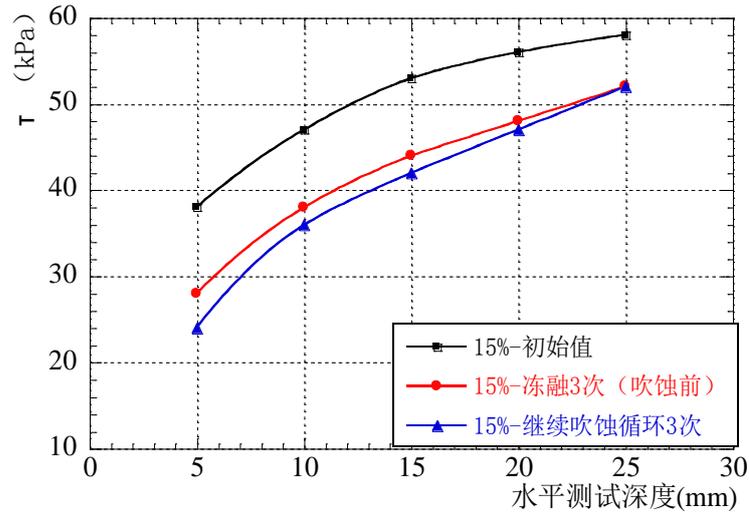
(a) 4%



(b) 8%



(c) 12%



(d) 15%

图 4-13 不同含水率试样坡肩强度值与水平测试深度关系图

Fig.4-13 The shear strength of shoulder slope in different moisture content with horizontal depth of the test

通过对比图 4-13(a)-(d) 可得出结论：对于路基坡肩处，当含水率逐渐增大，冻融循环后（吹蚀前）曲线越来越远离初始值曲线，并且吹蚀后曲线越来越靠近吹蚀前曲线。当土样含水率为 4% 时，冻融作用引起的强度降低不显著，而风蚀作用对土样强度降低影响较明显，此时风蚀作用占主导。当含水率为 8% 时，冻融侵蚀对路基的影响增加；当含水率增大到 12% 时路基开始以受冻融侵蚀破坏为主，风蚀作用对路基的影响在减弱。当含水率增大至 15% 时路基基本上受冻融侵蚀而破坏，风蚀破坏影响不明显，此时冻融侵蚀作用占主导。

4.4 本章小结

本次冻融风蚀风洞试验是研究在风雪环境下路基的风雪复合侵蚀破坏机理，利用便携式强度测试仪，分析风沙土路基经历风雪复合侵蚀前后强度变化规律。总结得出以下结论：

(1) 在一定的含水率下，路基经过冻融作用后，其内部的抗剪强度整体降低，随着冻融次数的增加，路基坡肩受冻融作用的影响最显著，其次为坡中上层相对显著，再次为坡中下层，坡脚受冻融作用影响较弱。同时在试验设定的最不利的风速下，路基经过风蚀作用后，路基迎风坡表层吹蚀最为严重，沿测试深度向内延伸，吹蚀作用影响逐渐减弱，直至一定深度吹蚀影响可以忽略不计，并据此确定了各层的风蚀影响深度；垂直方向上坡肩风蚀破坏最严重，向下风蚀影响逐渐减小，到坡脚基本影响不

大。例如当含水率为 12% 时，坡肩影响深度为 $H/7$ 左右，向下依次减小，到坡脚层影响深度只有 $H/34$ 左右。

(2) 当路基土样经过最不利的冻融风蚀复合侵蚀（即经过 3 次冻融循环和 3 次吹蚀循环）作用后，随着含水率的增大，冻融作用对路基的强度降低破坏影响越来越显著，而风蚀作用对路基强度降低破坏影响逐渐减弱。当土体含水率为 4% 时，冻融作用引起的强度降低不显著，风蚀作用占主导；当土体含水率增大到 15% 时，冻融作用占主导，风蚀作用引起的强度降低不明显；在土体含水率为 8% 或 12% 时，土体遭受冻融风蚀复合侵蚀作用。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本文通过风吹沙粒的风洞高速摄影试验、三温冻融循环试验、室内冻融风蚀风洞试验，对寒旱区风雪复合侵蚀路基的破坏机理进行研究。

1. 路基断面设计参数对风沙流中的沙粒子运动轨迹影响

通过风洞高速摄影试验研究风场中路基断面设计参数引起的风吹沙粒运动轨迹变化。分析了不同路基断面设计参数对粒子撞击位置，撞击瞬间的角度和速度的不同影响。总结本次风吹沙粒的风洞摄影试验得出以下结论：

(1) 风场中水平风速一定且风沙流经过矮路基时，大部分的沙粒子直接从路基顶面越过或是撞击路基边坡后回弹跃起并越过路基顶面，而极少部分粒子撞击边坡后向坡脚方向堆积。当风沙流经过高路基，大部分的沙粒子撞击在路基边坡经多次向上反弹后能量逐渐损失沿坡面下滑或粒子反弹后直接飞向路基坡脚处堆积。

(2) 路基为矮路基且高度一定时，大部分粒子撞击在路基边坡上部，且随着边坡坡率的增大，向上跃起至坡肩风速增加效果显著，所以对于陡边坡路基，粒子撞击边坡时的速度较缓边坡路基相比较，对边坡撞击力也更大。路基为高路基且高度一定时大部分粒子撞击在路基边坡下部，且随着边坡坡率的增大，向下至坡脚的风速增加较缓，所以粒子撞击陡边坡路基的速度略大于缓边坡。

2. 融雪与温度复合作用引起风沙土路基土体物理特征变化

通过室内三温冻融循环试验研究了冻融循环作用对风沙土路基土体的物理特征如水分重分布、干密度、变形的影响规律，得出以下主要结论：

(1) 风沙土因为没有粘聚力，在没有补水条件下土体水分在重力作用下会随着时间从上向下缓慢的迁移，由于冻融作用的加入，使得水分由上部向下部迁移速度加快。冻融循环作用为水分的向下扩散增加了动力迁移的能量。同时，冻融作用使土体空隙率增加，结构变得疏松，干密度降低。随着冻融次数的增加，土体干密度整体降低的幅度愈加明显，最终整体降低趋于某一稳定值。对于风沙土来说，冻融作用引起的变形较小。

(2) 风沙土路基受到由水、温度的复合作用影响而使路基填料土体产生的冻融作用对路基填料土体的水分重分布、干密度的降低影响严重，而对变形影响较小。这

对进行风、融雪、温度复合侵蚀路基破坏规律的研究提供了试验基础。

2. 风雪复合环境下风沙土路基内部抗剪强度衰减

冻融风蚀风洞试验中, 通过拟定最不利的路基边坡形式(坡率为 1:1), 选定最不利的风速(仪器可调最大风速为 $18m/s$), 选定最不利的风向(垂直吹向坡面)。同时, 通过变换路基的含水率, 变换风蚀循环次数(吹蚀时间)和冻融循环次数, 进行冻融风蚀风洞试验。将风雪复合侵蚀的影响量化成路基抗剪强度的持续衰减, 视反复冻融循环下土体物理特性(含水率、干密度、孔隙)的改变为内因, 风蚀为外部动力机制, 研究风雪复合侵蚀的累积损伤引起路基土体抗剪强度衰减的变化规律。得出以下结论:

(1) 一定的含水率下的风沙土路基经过冻融作用后, 其内部的抗剪强度整体降低, 随着冻融次数的增加, 路基土体抗剪强度整体降低的幅度更大。路基坡肩受冻融作用的影响最严重, 向下影响逐渐减弱, 坡脚处受冻融作用影响较弱。同时在试验设定的最不利的风速下, 路基经过风蚀作用后, 路基迎风坡表层吹蚀最为严重, 沿测试深度向内延伸, 吹蚀作用影响逐渐减弱, 直至一定深度吹蚀影响可以忽略不计, 并据此确定了各层的风蚀影响深度。例如, 当含水率为 12% 时, 坡肩影响深度为 $H/7$ 左右, 向下依次减小, 到坡脚层影响深度只有 $H/34$ 左右。同时, 坡肩风蚀破坏最严重, 向下风蚀影响逐渐减小, 到坡脚基本影响不大。

(2) 当路基土样经过最不利的冻融风蚀复合侵蚀作用(即土样经过 3 次冻融循环和继续经过 3 次吹蚀循环), 随着含水率的增大, 冻融作用对路基的强度降低影响程度逐渐增加, 而风蚀作用对路基强度降低影响逐渐减弱。低含水率的路基土体, 冻融作用引起的强度降低不显著, 风蚀作用占主导; 含水率较高的路基土体, 冻融作用占主导, 风蚀作用引起的强度降低不明显。

5.2 展望

本文通过风吹沙粒的风洞高速摄影试验研究了路基断面设计参数对风场中的沙粒子运动轨迹影响; 通过三温冻融循环试验研究了风沙土路基受融雪-温度复合影响引起的冻融作用后其内部一些物理特性的变化; 通过冻融风蚀风洞试验研究了风雪复合侵蚀路基破坏的规律。由于时间与试验条件的限制, 有一些工作需要有待于进一步的完善和深化:

(1) 本文做了风吹沙粒的风洞高速摄影试验研究, 还需进一步进行风吹雪粒子以及风吹水滴粒子的风洞高速摄影试验研究。

(2) 试验中仅考虑了路基无防护无封闭的情况, 进一步研究不同防护下风雪复合侵蚀路基的破坏机理, 将会为寒旱区路基工程的实践防护提供较为充足的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 曾广勇.对大风地区铁路路基风蚀现象的认识[J].路基工程.1996,65(2):27-33
- [2] 李驰.寒旱区公路风雪灾害潜蚀破坏机理及其预警研究[M].北京:中国水利水电出版社,2012
- [3] 魏江生,张贵平,董智.影响草原牧区公路风吹雪雪害的因素分析[J].公路.2005.8:159-163
- [4] 张威伟,张光辉.风吹雪的成形机理分析[J].中国水运(理论版),2006.4(3):67-68
- [5] 陈晓光,李俊超,李长林等.风吹雪对公路交通的危害及其对策研讨[J].公路,2001,6:113-117
- [6] 王明训,董治宝,武生智等.土壤风蚀过程的一类随机模型[J].水土保持通报.2001,21(1):19~22
- [7] 杨秀春,严平,刘连友.土壤风蚀研究进展与评述[J].干旱地区农业研究.2003,21(4):19~22
- [8] Bagnold R A.A further journey through the Libyan Desert[J].Geographical Journal.1933,82, 103-129
- [9] Bagnold R A.The movement of desert sand[J]. GeographicalJournal, 1935, 85,342-369
- [10] Bagnold R A.The size-grading of sand by wind[J].Proceeding of the Royal Society of London.1937, 163(913):250-264
- [11] Bagnold R A.The transport of sand by wind [J].Geographical Journal, 1937, 89, 409-438
- [12] Bagnold R A.The measurement of sand storms[J].Proceeding of the Royal Society of London(Series A),1933,167(929):282-291
- [13] Bagnold R A.The physics of blown sand and desert dunes[M]. London:Methuen and Co,1941
- [14] Chepil W S.Milne R A.Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel[J].Sci. Agr.1939,19,249-257
- [15] Chepil W S.Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind[J].Soil Structure. Soil Sci.1952, 75,473-483
- [16] Chepil W S.Woodruff N P.The physics of wind erosion and its control[M].New York:Academic Press Inc,1963
- [17] Chepil W S.Dynamics of wind erosion,II.Initiation of soilmovement[J].Soil Sci.1945,60,397-411
- [18] Woodruff N P,Siddoway F H.A wind erosion equation[J].Soil Sci Soc Amer Proc.1965, 29, 602-608
- [19] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet theusers need [J].Journal of Soil and Water Conservation.1991,46(2):107-111
- [20] 朱震达,陈治平,吴正等.塔克拉玛干风沙地貌研究[M].北京:科学出版社,1981
- [21] 赵羽,金争平,史培军等.内蒙古土壤侵蚀[M].北京:科学出版社,1988
- [22] 董玉祥,康国定.中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].水土保持学

- 报,1994,8(3):1-7
- [23] 董治宝,陈渭南,李振山等.风沙土开垦中的风蚀研究[J].土壤学报.1997,34(1):74-80
- [24] 郑晓静,王萍.风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究[J].中国沙漠,2006,26(2): 184-188
- [25] 黄宁,郑晓静.风沙跃移运动发展过程及静电力影响的数值模拟[J].力学学报.2006,38(2): 145-152.
- [26] 郑晓静.风沙运动的力学机理研究[R].科技导报:环境力学研究专题,2007,25(14): 22-27
- [27] 林燕,谢云,王晓岚.土壤水蚀模型中的融雪侵蚀模拟研究[J].水土保持学报.2003,17(3):16-21
- [28] 张照录,薛重生.通用土壤流失方程的研究进展及其改进方法[J].地学前缘(中国地质大学,北京).2004,11(1):115-118
- [29] Kenneth G.Renard,Jeremy R..Freimund. Using monthly precipitation data to estimate the *R*-factor in the revised USLE.1997,157,287-306
- [30] 张光辉.土壤侵蚀模型研究现状与展望[J].水科学进展.2002,13(3):389-396
- [31] Guang-hui Zhang, Guo-bin Liu, and Ming-ke Tang. Detachment of soil from different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers.2007, (Paper number, SW-06576-2006)
- [32] Guanghui Zhang, S H Fu, W H Fang , Hidefumi Imura, and X C Zhang. Potential effects of climate change on runoff in the YellowRiver Basin of China[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2007, 50(3): 911-918
- [33] Guang-hui Zhang, M A Nearing, and Bao-yuan Liu. Potential effects of climate change on erosivity in the Yellow River basin of China[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.2005, 48(2): 511-517
- [34] 林燕,谢云,王晓岚.土壤水蚀模型中的融雪侵蚀模拟研究[J].水土保持学报.2003,17(3):16-21
- [35] 海春兴,史培军,刘宝元等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J]. 水土保持学报.2002,16(2): 50-56
- [36] 张平仓.水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报.1999,5(3): 93-95
- [37] 查轩,唐克丽.水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J].自然资源学报.2000,15(1): 97-100
- [38] 毕贵权,张侠,李国玉等.冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J].兰州理工大学学报.2010,36(2):114—117
- [39] 王大雁,马巍,常小晓等.冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J].岩石力学与工程

- 学报.2005, 24(23):4313-4319
- [40] 齐吉琳,马 巍.冻土的力学性质及研究现状[J].岩土力学.2010, 31(1):133-143
- [41] 王璐璐,陈晓飞,马巍等.不同土壤冻融特征曲线的试验研究[J].冰川冻土.2007,29(6):1004-1011
- [42] 郑剑锋,马巍,赵淑萍等.冻结方式影响试样内部结构变化的 CT 研究[J].中国矿业大学学报.2010,39(1):80-86
- [43] 齐吉琳,马巍.冻融作用对超固结土强度的影响[J].岩土工程学报.2006,28(12):2082-2086
- [44] 马巍,徐学祖,张立新.冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J].岩土工程学报.1999,21(2):158-160
- [45] 杨成松,何平,程国栋等.冻融作用对土体于容重和含水量影响的试验研究[J].岩土力学与工程学报.2003,22(2):2695—2699
- [46] 武鹤,张家平,魏建军.公路风吹雪灾害形成机理与空间分布特征.黑龙江工程学院学报[J],2008,22(3):5-7
- [47] 刘汉涛,麻硕士, 窦卫国等. 国内外移动式风洞在土壤风蚀试验中的应用[J].内蒙古农业大学(自然科学版). 2006, 12(12):132-135
- [48] 李驰,高瑜. 沙漠公路风沙土路基风蚀破坏试验研究[J].岩土力学. 2011, 32(1):33-38

致 谢

在导师李驰教授的精心指导下，我顺利地完成了研究生阶段的毕业论文。感谢李驰导师对我学习上、科研上的精心培养，也同时感谢李老师对我生活上给予的帮助。从最初的论文选题到试验方案的拟定与实施，以及试验结果的整理和分析都倾注了大量的心血。因老师身在美国，只能通过网上视频来对我的论文进行指导，每次视频时她那边的时间都已经深夜了，但她宁愿少休息一会儿也要为我的试验和论文进行精心的指导。李老师对在科研工作上的态度和精神深深地感染了我，让我能够以认真、诚恳的态度去完成所有的工作。祝愿李驰老师工作顺利，在科研工作上取得更优异的成绩。

感谢高利平副教授在我试验期间给予我无私的帮助和支持，也同时感谢高老师在我生活上给予的帮助。

感谢内蒙古农业大学申向东教授为我的试验提供了冻融循环仪，也感谢申老师以及他的研究生团队在我试验期间给予我热情的帮助和支持。

感谢内蒙古农业大学赵志杰教授提供的风洞仪器让我顺利完成试验，感谢赵老师以及他的研究生团队在我的风洞试验期间给予的帮助和支持。

感谢土木学院结构实验室白明海老师帮助我完成整个实验过程中的试验装置的制作。

在整个试验阶段我得到了师姐高瑜、师弟马云峰、周建飞、黄保生的倾力帮助，在此向他们表示感谢，也同时感谢李驰老师研究团队其他同学在生活中给予我的无私帮助。

感谢班里的同学们在生活上给予我的帮助和支持。我们结下了深厚的友谊，使我感到研究生阶段是一个快乐的难忘的阶段。

在这里我要特别的感谢我的父母，是他们的支持和鼓励给了我动力，让我一步一步地顺利完成学业，我会继续努力学习，拿出好成绩，让他们感到骄傲和自豪。

作者简介

葛晓东，男，蒙古族，1987年10月出生，内蒙古赤峰市喀喇沁旗人。2006年9月—2010年7月，在内蒙古工业大学土木工程学院土木工程专业攻读本科，获工学学士学位。2010年9月被保送内蒙古工业大学土木工程学院岩土工程专业攻读硕士学位，2013年7月毕业。在校攻读研究生硕士学位期间，2011年获得北京市建筑设计研究院颁发的“BIAD”专项奖学金三等奖；2012年获得“BIAD”专项奖学金二等奖；并同年获得“国家优秀研究生奖学金”。在校期间获得校级二等奖学金3次，三等奖学金2次。

攻读硕士学位期间发表的论文

1. Chi Li, Xiaodong Ge, Hao Huang. Study on wind erosion resistance ability and slope stability of wind-eroded desert roadbed. ASCE, Forensic Engineering, 2012, 746-755. EI 检索号 20130615985950。