

砾漠地区路基工程构筑物风蚀问题的初步研究

张伯寅

(北京大学力学系)

贾复

(中国科学院力学研究所)

王厚雄

(铁道部科学研究院)

杨宏容

(新疆乌鲁木齐铁路局)

提要 利用流体力学的实验手段,对我国西北砾漠大风地区路基工程进行了充分的物理模拟研究。从而验证了已经采用的路堤、路堑、挡沙墙和截沙沟等工程方案的正确性,为防风蚀工程的措施提供了科学依据,同时也证明了实验结果的有效性。

关键词 风蚀;风积,涡旋,湍流边界层

1. 前言

大西北砾漠大风地区土工构筑物的风蚀、风积问题是十分重要的实际问题。新疆已建成和即将修建的铁路,多段通过砾漠大风地区,包括兰新线百里风区,三十里风口,南疆线吐鱼段三大风口等总长约300公里。该区大风频繁,风力强劲。以吐鱼段观测资料为例,年均八级大风183天,其中20天达12级(≥ 32.7 米/秒),三十年一遇最大风速可达63米/秒。因此由于大风给路基工程构筑物带来的灾害是相当严重的,如沙埋线路,吹翻车辆,中断运输,危及行车安全。

本文是在大量现场实测工作的基础上,以工程设计部门所采用的防风蚀工程设计方案为背景,在实验室中做了物理模拟实验研究,其结果与现场实测比较相符合,取得了较好效果。

2. 研究方法

工程设施的风蚀机理研究,从研究手段上讲,应包括:野外观测,实验室模拟及理论分析等多种研究途径的相互配合。从研究内容上讲应当包括:在一定风场中工程构筑物引起的绕流(或扰动流)场特性。在该扰动流场中沙砾运动或迁移的趋势或规律。当然还涉及到更基本的问题,即沙粒或砾石在气流作用下运动、位移的基本过程及形态。

总的说来这项研究是艰难而复杂的,野外观测条件恶劣,测试手段发展水平不能满足机理研究要求。从实验室模拟看,由于构筑物形状复杂,流场又以分离流为最显著特征,使

本文于1988年7月11日收到,1989年3月17日收到修改稿。

得定量地把握现象规律十分困难,从理论分析上看,问题涉及到极复杂条件下的湍流中固体颗粒群运动。总之,无论哪一种研究途径,都涉及到当前流体力学所未能完善解决的问题,因此在这个领域的研究工作,迄今还基本处于经验和半经验的探索阶段。

3. 实验内容及结果

模拟实验选用工程构筑物的基本模型,按几何相似将模型缩小至适合于实验的尺寸,并在多种实验条件下进行。其内容及结果见表1。

表1 实验内容及主要结果

实验内容	实验设备及测量	主要结果
模型压力分布及速度场测量 ¹⁾	用直径 2.25 米低速风洞模拟风场,采用 SGM 型组合扫描阀进行平均压力测量	得到构筑物模型的压力场及速度场,对分析路基受载及风蚀是必要的
流型显示研究	用 0.4 ^M ×0.5 ^M ×6 ^M 拖曳式水槽拖动模型,采用染色流动可视化技术对流动进行摄影和实时录像。	从形成的扰动流场中,观察到一系列直观的显示流场的流态图象,有助于宏观地分析了解构筑物附近沙砾运动的形态和规律。
边界层结构测量 ²⁾	在 0.3 ^M ×0.8 ^M ×3 ^M 低速流风洞中用热线风速仪系统进行测量	测量在不同风速下,不同表面粗糙度平板的边界层结构,旨在考察气流湍流脉动对沙砾运动、迁移的影响。

1) 作者: 林荣生

2) 作者: 钮珍南、诸乾康

4. 结果讨论

1) 关于模拟实验与实际情况的相似性

现场实际情形的雷诺数 Re 要在 10^7-10^8 以上。对于风洞所获数据而言,一般普遍接受的准则是来流的 $Re > 10^5-10^6$ 才具有雷诺数相似性,即流型、压力分布、速度分布(无量纲化)等均不强烈依赖于 Re 数。此处 Re 数定义为: $Re = UL/\nu$, 其中 U 是来流速度, ν 是流体的动力粘性系数, L 是实物或模型的特征长度。

事实上模拟实验中,很难达到以上要求。对此类实验的相似性做如下解释: Re 对于分离点位置的关键性影响是众所周知的,分离点位置的变化不仅改变压力分布等动力学量,而且也直接改变流型。分离点位置的确定不仅决定于来流 Re 数和湍流度,而且与物面形状和表面粗糙度、分离点附近物面曲率等多种因素有关,是一个十分复杂的问题。幸而我们目前所研究的构筑物形状是在迎风面具有尖角点的物形,分离点固定发生在尖角点处,因此流型及压力分布、压力系数均不太依赖于 Re 数^[1]。所以我们认为,风洞实验测到的压力分布 ($Re \approx 10^5$) 与水槽实验得到的流型 ($Re \approx 10^3$) 彼此应当具有相同的效应,而且对于实际情况有基本的动力相似性。

2) 关于路堤

路堤是铁轨的基础,保护路堤在强风作用下不被风蚀毁坏是工程中必须解决的实际问题。为此须了解路堤附近风沙流的运动规律,风沙流给路堤带来的影响和危害。图 1a 是风洞中测量的沿路基坡面的压力分布图。图 1b 是路堤流场的显示流谱,两者的比较是

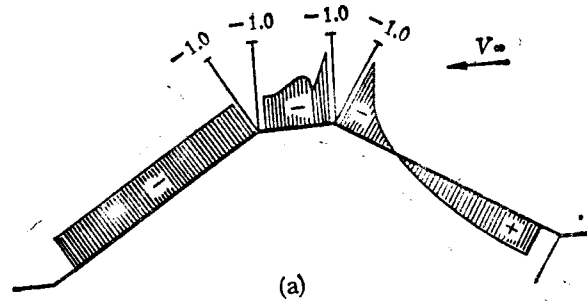


图 1a 路堤沿坡面的压力分布图
 $Re = 2.22 \times 10^5$

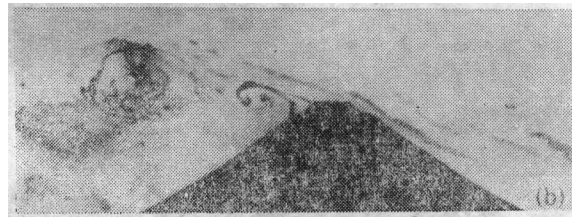


图 1b 路堤流场流动显示图
 $Re = 1.22 \times 10^5$



图 1c 路堤现场照片

相当一致的。可以肯定的事实是：沿路堤迎风面气流为单调增速过程，在路肩处负压最大，即风速最大。在显示流谱中也有类似表现。说明此处风蚀最严重。这一现象与现场观测是一致的。图 1c 是现场路堤照片（来流由左向右），可以看到在路堤肩处铺有砾石以保护路堤肩部不被风蚀。同时可以看到在路堤边坡下半部并没有布置砾石，这是因为路堤迎风面一般均有风蚀，但仅限于路肩下 1—2 米范围内有风蚀量，且以肩稜处最甚。这与实验中得到的迎风面路堤肩部负压作用的风蚀原因是一致的。说明了根据形态调查研究和风沙流流动机理的初步探讨的一致性，证明了路肩保护措施是科学的、正确的，改变了全断面加固路堤的办法，取得了很好的效益。这一结论亦可推广到沙漠地区。

3) 关于路堑

图 2a 是风洞中对路堑深处压力分布的测量结果。图 2b 是在水槽中进行的流动显示流谱。从显示流谱中可以明显地看出在路堑内形成一个大涡旋。事实上图 2a 中的压力分布状况支持了大涡旋的存在。与路堤测量比较其压力系数较小，说明了这一旋涡区风速并不大。但流动显示结果表明，由于这一涡旋运动结果会使由于风所挟带的沙粒在路

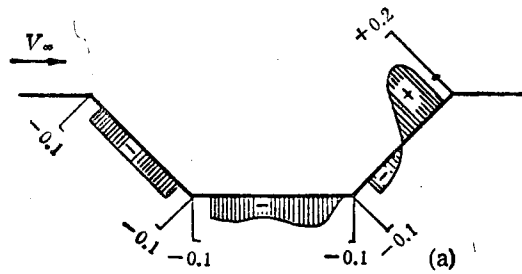


图 2a 路堑深处压力分布图

$$Re = 2.00 \times 10^5$$

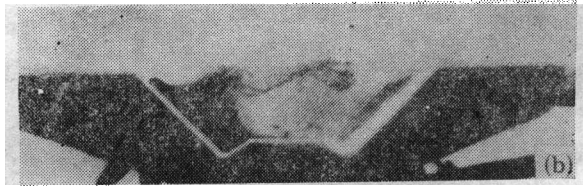


图 2b 路堑流场流动显示图

$$Re = 1.81 \times 10^5$$

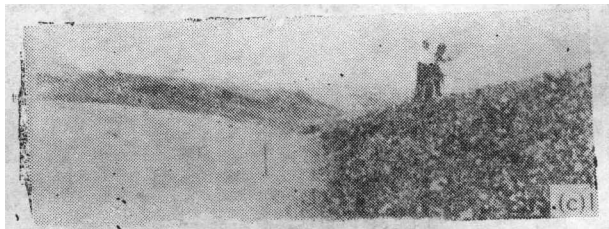


图 2c 路堑积沙现场照片

堑中沉落的同时又被挟带回到背风面一侧的路堑壁处。这一点与野外实测中背风面积沙的结论是一致的。图 2c 是现场路堑处在一侧实际积沙的情况。这张照片风是由左向右刮,在迎风面看不到沙粒而是路堤的基础,而路堑的背风面确积满了细沙粒。由此得出结论,在工程设计时可以考虑把背风面路堑边坡放缓,或留有较大容量的积沙空间。

4) 关于挡沙墙和截沙沟

为了保护铁路不被沙粒掩埋和破坏,在强风地带设置挡风墙和截沙沟。从图 3a 挡沙墙和截沙沟的流动显示流谱中,我们可以清楚地看到,大的涡旋存在于截沙沟内。挡沙墙上游的截沙沟能使气流挟带沙砾在此沉降,而且在沟内的涡旋(类似于路堑中存在的大涡一样)可以使沉积的沙粒沿背风面一侧累积,起到截沙作用。而越过挡沙墙的大涡旋运动,在确定挡沙墙与路基的距离与选择挡沙墙的高度上,完全可以给出定量的结果。对于挡沙墙和截沙沟未在风洞中进行压力分布的测量。图 3b 给出了在挡沙墙背风面处撒悬浮粒子,在大风作用下形成涡旋的现场照片。与水槽中的显示流谱是一致的。

图 3c 是现场挡沙墙与截沙沟的照片,风向由右向左。可以看出:在截沙沟的背风面

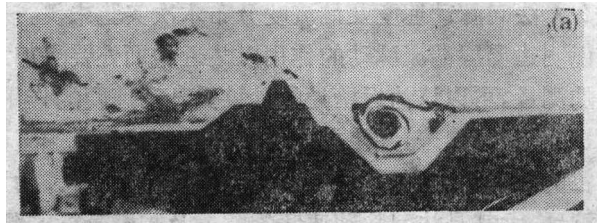


图 3a 挡沙墙和截沙沟流场流动显示图

$$Re = 3.18 \times 10^5$$

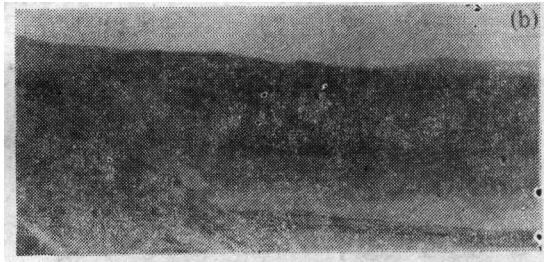


图 3b 悬浮粒子在大风作用下形成的涡

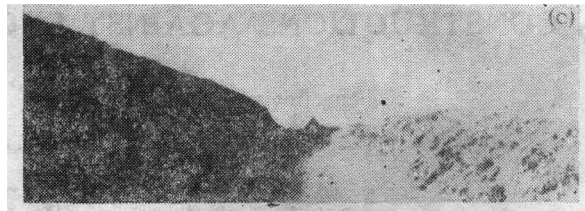


图 3c 挡沙墙与截沙沟中积沙照片

积累有大量的细沙粒, 说明了现场实际观测与模拟实验也是一致的。

5. 对沙粒迁移的初步探讨

风沙运动是多种因素造成的。有粒子弹跳撞击, 也有气流湍流脉动使沙粒成为松散体而进行蠕动, 大些的粒子也可能受到空气动力(如升力)而升起。我们认为其中湍流脉动作用(或随机小涡旋作用)及气动力作用值得重视。

为了进一步揭示砾漠地区近地面流场的运动规律, 了解砂砾迁移机制, 我们抽象出三种不同表面粗糙度背景的平板, 并改变来流风速和探头的纵向距离, 测量垂直于地面的气流平均流速、纵向脉动速度以及纵向湍流度的分布剖面。实验是在低湍流风洞中进行的, 通过测量综述出如下结论:

1) 边界层的平均速度、脉动速度、湍流度剖面的厚度随表面粗糙度的增高而增大。也随纵向距离的增大而增加。边界层厚度增大说明湍流脉动作用加剧。

2) 在边界层中平均流速从壁面处为零逐渐增加到边界层外速度相等为止。脉动速度及湍流度则由壁面处为零突然增大到一个最大值, 然后逐渐减小到与边界层外的值相等为止, 这最大值出现的位置离地面很近(几乎贴壁), 不同粗糙度及不同风速情况变化无几, 最大脉动速度值可高达边界层外风速的 10%。最大湍流度(脉动速度与当地平均风

速之比)则高达 20%。法向脉动速度及湍流度分布本次实验未测,一般来说比纵向稍小,在同一量级内。这说明边界层湍流脉动的作用以贴近地面处要更加剧烈。

以上运动规律的测量,可以认为近壁处的砂粒受脉动速度的作用,产生使砂砾移动和跳动的力,使砂砾松动而悬浮起来,并使之进入离开地面的高风速区而迁移。这种湍流脉动悬浮辅之以大颗粒的气动力作用可能是风蚀的重要机制之一。为证实这种想法,当需进行细致的湍流场测量,尤其是法向脉动速度的测量及频谱分析的测量研究。

十余年来国内外很少涉及的沙粒起动与沉降机理^[2],本文进行了非常初步的探讨。对平板边界层内部不同粗糙度的湍流运动规律做了一点定量测量,力求使风蚀风积机理的认识能推进一步。希望经过进一步研究,能应用于风蚀风积的防治工程设计中。

参 考 文 献

- [1] 普朗特, L., 流体力学概论, 郭永怀、陆士嘉译, 科学出版社出版, p591.
 [2] 钱宁、林秉南译, 风沙和荒漠沙丘物理学, (1959).

PRELIMINARY SIMULATIONS OF THE FUNCTIONS OF PROTECTION CONSTRUCTIONS AGAINST EROSION

Zhang Boying

(Department of Mechanics, Peking University)

Jia Fu

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Wang Houxiang

(China Academy of Railway Sciences)

Yang Hongrong

(Wulumuqi Railway Administration)

Abstract The practical problems of wind erosion damages of railway embankment and the effectiveness of the engineering designs of protection constructions were explored by means of laboratory simulations.

The simulation results, which are described in the present paper, show the rationality of various engineering designs for wind damage protection used in Northwest China area. The experimental results are of help, as well, in understanding the processes of wind erosion, wind drift and the functions of various protection constructions.

Key words wind erosion, wind drift and, vortex, turbulent boundary layer