

中国沙漠风积沙工程性质 研究及工程应用

高玉生 程汝恩 李英海 屈志勇 刘洪启 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国沙漠风积沙工程性质 研究及工程应用

高玉生 程汝恩 李英海 屈志勇 刘洪启 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

在我国西北、华北和东北地区分布的沙漠风积沙是一种特殊的地质材料,具有区别于其他成因砂类土的特殊工程性质。本书结合目前我国在沙漠区的部分工程建设实例,对风积沙的物理化学性质、力学性质、击实特征和压实机理、冻胀性、毛管性和盐胀特征、抗拔性、施工工艺和流程、施工质量检测,以及风积沙稳定和固化技术等方面的试验研究成果进行了汇总和分析。

本书内容丰富,实用性强,可供在风积沙地区从事工程勘察设计、施工管理、检测咨询工作的工程技术人员和研究者参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用 / 高玉生
等编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-5170-1324-2

I. ①中… II. ①高… III. ①沙漠治理—研究—中国
IV. ①S156.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第283753号

书 名	中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用
作 者	高玉生 程汝恩 李英海 屈志勇 刘洪启 编著
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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 373千字
版 次	2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	78.00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

在我国西北、华北和东北地区，分布有众多沙漠和沙地。这些沙漠和沙地组成物质为风积沙，具有颗粒较细且均匀、粉黏粒含量低、含水率低等特点，与其他成因砂类土有着不同的工程性质。

沙漠地区以往一直为工程建设的禁区，工程建设经验寥寥无几，因此对风积沙工程性质和工程应用的试验研究成果也非常稀少。近几十年来，随着我国社会和经济的发展，陆续在沙漠地区完成了许多工程建设项目，包括沙漠公路、输气管道、输水渠道、水工建筑物、输变电路等。在工程建设过程中，众多工程技术人员和研究者针对风积沙工程性质、工程应用等方面内容进行了大量的试验和研究，其中既有成功经验可供借鉴，也有失败教训可供吸取。

目前，风积沙无论是作为地基土体，还是作为填筑材料，虽然都取得了一定的成果，但总体来讲，对风积沙的工程性质和工程应用的研究尚处于初期阶段，还没有形成规范性的标准和规定。我国在沙漠地区进行工程建设方兴未艾，研究和探索风积沙的技术问题，对提高工程质量、节约投资具有十分重要的现实意义。

《中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用》一书，一方面，结合黄河某水利枢纽工程，研究和总结了乌兰布和沙漠风积沙的物理化学性质、力学性质、静力和动力三轴特性、地球物理特征、渗透性、击实和压实特征等工程性质；另一方面，汇集了我国沙漠地区部分工程建设中的试验和研究成果，从风积沙物理化学性质、力学性质、击实和压实特征、冻胀性、毛管性和盐胀特征、抗拔性、设计原则、施工技术和工艺、施工质量检测，以及风积沙稳定和固化技术等几方面，对我国风积沙的工程特征和工程应用进行了归纳和汇总，以此为将来在沙漠地区进行工程建设时，对风积沙的研究、施工和处理起到一定的参考和借鉴作用。

中国工程设计大师 王宏斌

2013年10月

前 言

我国分布有众多沙漠和沙地，包括塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、柴达木沙漠、库姆塔格沙漠、乌兰布和沙漠、库布奇沙漠、科尔沁沙地、毛乌素沙地、浑善达克沙地、呼伦贝尔沙地。这些沙漠和沙地的组成物质——风积沙，为一种风积成因的砂类土，是在干旱、半干旱气候环境下形成的一种特殊的地质材料；较之其他成因的砂类土，具有组成颗粒较细且均匀、粉黏粒含量低、含水率低等特殊工程性质。

千百年来，中华民族为了生存和发展，在平原区、丘陵区 and 山区积累了丰富的工程建设经验，对这些区域冲积、洪积、坡积、残积等成因类型的砂类土工程性质进行了丰富和成熟的研究。但是对于沙漠地区，一直以来工程建设项目不多，积累的经验也不足，由此造成相关的规范和规程缺少以风积沙作为地基土体和填筑材料的标准性规定，在工程设计、施工和检测中难以起到相应的指导作用。

近几十年来，随着我国社会和经济的发展，陆续在荒芜的风积沙地区兴建完成了许多工程，包括沙漠公路、输气管道、输变电路、输水渠道、水工建筑物等工程项目。其中，尤以公路建设项目居多；针对公路建设项目开展的风积沙工程研究取得了显著成果，获得了风积沙工程特性的大量真实有效的试验资料和数据；对风积沙材料在公路建设中的应用与防护方面也研究和摸索出许多实用可靠的施工技术和措施。许多修建完成的沙漠公路已经投入应用多年，使用效果良好。

近年来，我国在沙漠地区先后建设了一些大中型水利工程，例如穿越腾格里沙漠南缘的甘肃省景电二期向民勤调水工程于2000年9月全线建成，新疆某沙漠明渠的建成填补了我国水利工程建设史上的一项空白。最近在内蒙古境内的黄河干流上建设中的黄河某水利枢纽工程土石坝段处在乌兰布和沙漠区内，目前土石坝已经施工完成，即将投入使用。此外，还有诸如输气管道、输变电路等岩土工程方面的建设项目，也得以完成和投入应用。

伴随着这些工程项目的实施，众多工程技术人员和研究者深入工程实际，详细试验和研究了各地区风积沙材料的工程特性，探索和总结了风积沙材料的应用方法和施工工艺。经过多年的、不同类型的工程项目的研究和实践，

积累了比较丰富的资料成果，同时也取得了许多宝贵的工程建设经验。尽管如此，目前国内在风积沙工程性质和工程应用方面总体上来讲尚缺乏系统的研究和总结；风积沙的工程实践经验和研究成果也比较零散，一般还局限于具体的工程项目，对于风积沙的研究和应用也没有形成相应的规范性标准。

展望未来，我国在沙漠地区进行工程建设会越来越多，而风积沙具有分布广泛、储量丰富、取材方便的特点，是沙漠地区最丰富和最廉价的物质材料，具有成为沙漠工程重要基础材料的可行性。通过对风积沙的工程性质的试验研究，使其能在不同的工程建设项目中得到很好的应用，将会取得良好的质量效益、经济效益和环境效益。

本书对黄河某水利枢纽工程所处的乌兰布和沙漠风积沙的工程性质进行了汇总；同时归纳和汇集了我国沙漠地区工程建设的部分研究和应用成果。希望能抛砖引玉，对将来风积沙研究、施工和工程处理起到一些参考和借鉴作用。

在本书的编写过程中，得到了中水北方勘测设计研究有限责任公司勘察院的大力支持和指导，同时引用了有关单位和研究者非常宝贵而有价值的资料，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，各种资料文献繁杂，编写内容不可避免地存在疏漏和不当之处，作者诚恳希望读者与专家们不吝赐教、批评指正。

作 者

2013年9月于天津

目 录

序

前言

第 1 章 我国风积沙地区工程建设概述	1
1.1 我国风积沙分布	1
1.2 我国风积沙的形成和地质时期	1
1.3 风积沙地区工程建设	2
1.4 风积沙工程研究	4
1.5 风积沙工程应用现状	5
第 2 章 风积沙的工程特性	7
2.1 试验研究方法的特点	7
2.2 颗粒组成和分类的特性	7
2.3 风积沙分层特性	8
2.4 风积沙击实特性	9
2.5 风积沙“湿陷性”	9
2.6 风积沙剪胀现象	10
2.7 风积沙施工特性	10
第 3 章 风积沙的压实机理	12
3.1 压实概述	12
3.2 压实机理的论点	12
第 4 章 乌兰布和沙漠工程建设	17
4.1 乌兰布和沙漠简介	17
4.2 黄河某水利枢纽工程	17
4.3 袁玉卿、王选仓等的研究成果	62
第 5 章 风积沙物理化学性质	68
5.1 塔克拉玛干沙漠	68
5.2 腾格里沙漠（甘肃省景电二期向民勤调水工程）	74
5.3 古尔班通古特沙漠	78
5.4 毛乌素沙地	84
5.5 浑善达克沙地（内蒙古省际通道赤峰境内公路段）	87
5.6 科尔沁沙地	88

第 6 章 风积沙击实特征和分析	90
6.1 试验研究概述	90
6.2 塔克拉玛干沙漠	91
6.3 腾格里沙漠（甘肃省景电二期向民勤调水工程）	94
6.4 古尔班通古特沙漠	99
6.5 毛乌素沙地	106
6.6 浑善达克沙地（内蒙古自治区际通道赤峰境内公路段）	119
6.7 科尔沁沙地	122
第 7 章 风积沙力学性质特征	126
7.1 塔克拉玛干沙漠	126
7.2 腾格里沙漠（甘肃省景电二期向民勤调水工程）	134
7.3 古尔班通古特沙漠（沙漠某大型输水工程）	138
7.4 毛乌素沙地	142
第 8 章 风积沙冻胀性和防冻胀试验	149
8.1 沙漠某大型输水工程	149
8.2 内蒙古河套灌区风积沙	151
第 9 章 风积沙毛管性及盐胀的试验研究	160
9.1 盐渍土及其危害性	160
9.2 风积沙的毛管水上升高度试验	160
9.3 风积沙的盐胀试验	161
第 10 章 风积沙抗拔试验（达拉特电厂—丰镇电厂输电线路）	164
10.1 试验简介	164
10.2 试验样品和试验场地	164
10.3 试验装置和试验方法	165
10.4 试验结果及分析	167
第 11 章 风积沙填筑设计原则和设计控制标准	170
11.1 沙漠某大型输水工程风积沙筑堤土料设计	170
11.2 风积沙路基路面设计和稳定性分析	173
第 12 章 风积沙填筑压实工艺和施工流程	175
12.1 风积沙地基施工特性	175
12.2 风积沙压实工艺概述	175
12.3 施工工艺和流程	177
第 13 章 风积沙隧道施工技术	209
13.1 施工工艺概述	209
13.2 施工工艺和施工技术	209

13.3	施工中应注意的几个问题	212
第 14 章	风积沙施工质量检测项目和方法	213
14.1	施工质量检测项目	213
14.2	普通环刀法	213
14.3	灌水(砂)法	214
14.4	表面波法	214
14.5	弯沉检测	216
14.6	夹层法压实的沉降量检测	216
第 15 章	风积沙的稳定和固化技术	217
15.1	风积沙稳定和固化技术简介	217
15.2	二灰(石灰、粉煤灰)稳定风积沙	217
15.3	粉煤灰稳定风积沙	222
15.4	二灰聚丙烯纤维稳定风积沙	225
15.5	GS-2 固化剂固化风积沙	229
15.6	GLG、AUGHT-SET、CL 固化剂固化风积沙	233
第 16 章	风积沙工程性质和工程应用总结	239
	参考文献	242

第 1 章 我国风积沙地区工程建设概述

1.1 我国风积沙分布

我国是风积沙分布比较多的国家之一，西起新疆、东至黑龙江，断续展布于我国东北、华北、西北的干旱、半干旱及部分半湿润地区。我国由沙丘所覆盖的狭义沙漠，其面积有 68.4 万 km^2 ，主要分布于东经 $75^\circ \sim 125^\circ$ ，北纬 $35^\circ \sim 50^\circ$ 之间，即主要分布在东北、华北和西北地区。

习惯上，把分布在西部干旱区、主要由活动和半流动沙丘组成的地区称为沙漠；把分布在东部半干旱地区，并可能散布到半湿润地区，主要由固定和半固定沙丘组成的地区称为沙地。据此中国西部沙漠面积 58.2 万 km^2 ，东部沙地面积 10.2 万 km^2 。比较集中的主要有分布在新疆、甘肃、内蒙古、宁夏及青海等省（自治区）的塔克拉玛干、巴丹吉林、古尔班通古特、腾格里、柴达木、库姆塔格、乌兰布和、库布齐八大沙漠；以及主要分布在内蒙古、陕西、辽宁、黑龙江等省（自治区）的科尔沁、毛乌素、浑善达克、呼伦贝尔四大沙地^[1-2]。

目前，对沙漠、沙地和沙漠化土地等专业概念和内涵有着不同的理解和认识，尚存在着争议，各家所提供的沙漠化国土面积也差额甚大。其中，最主要的观点分歧是偏重自然因素的地质历史观点和偏重人为因素的历史观点。尽管如此，对中国是沙漠比较多的国家之一、沙漠分布范围相当广阔的总体认识是一致的。

1.2 我国风积沙的形成和地质时期

1.2.1 风积沙的形成机制

关于风积沙的形成机制，一般认为是在干旱地区，一定能级的风速（称为起沙风速）使沙源地的沙子开始起动，并随着风向流动或搬运，被搬运到大片平原地区堆积起来形成沙丘、沙地、沙堆和沙垄。起沙风速一般与沙粒的大小、地表特征等多种因素有关^[2]。沙漠形成的两个主要因素就是干旱和风；加上人们滥伐森林树木、破坏草原，令土地表面失去了植物的覆盖，沙漠便因此而形成。

沙漠的形成，除了干旱气候条件，以及滥伐森林树木、破坏草原等人为条件外，还要有丰富的沙漠物质来源。我国沙漠地区的风积沙多来源于沉积物丰厚的内陆山间盆地和剥蚀高原面上的洼地和低平地上。

1.2.2 我国沙漠的形成地质时期

我国沙漠均形成于第四纪时期，经过漫长地质历史时期（近 300 万年以来）的演化，

才形成今日沙波浩渺的沙漠景观^[1]。

沙漠就其本身而言，就是强烈沙漠化作用的最终结果。在漫长的地质时期（主要是第四纪），由于环境的变迁，经多次反复而不断加强的沙漠化作用，在我国北方形成了分布广泛、沙丘巨大的沙漠区。近代，在气候环境及人为作用的影响下，在沙漠及其周围地区，造成活动沙丘的前移及半固定、固定沙丘的活化，使沙漠化作用不断加强，风沙危害趋于严重^[1]。

各种研究资料表明，早在中、早更新世时期，塔里木盆地中就已形成了面积较大的风沙堆积，在毛乌素沙地也发现有中更新世的古风沙堆积，等等。至晚更新世晚期—全新世早期，我国的古风沙堆积的范围和规模均发生了重大的变化。当时，全球性气候趋于干冷、洋面大幅度下降，古海岸最远退至现代大陆架的外缘，使我国北部，尤其是西北地区的内陆干旱气候得到进一步加强，造成大量湖泊消亡、河流干涸。在干旱多风和富沙的条件下，使塔里木盆地、准噶尔盆地（现塔克拉玛干、古尔班通古特沙漠地区）、祁连山以北（现巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠地区）、贺兰山附近（现乌兰布和沙漠、库布其沙漠地区）、鄂尔多斯高原（现毛乌素沙地地区）、内蒙古高原南东部（现浑善达克沙地地区）、西辽河（现科尔沁沙地地区）及呼伦贝尔高原（现呼伦贝尔沙地地区）等地，形成了大面积沙质荒漠现象。风沙充斥盆地，广泛分布于高原，甚至见于裸露的大陆架之上。另外，通过近年来的研究结果表明，距今 1500~3000 年以来又是一次风沙活动较强烈的时期，毛乌素沙地、科尔沁沙地等地的 C^{14} 年龄资料证明了这一点^[1]。

总之，我国沙漠的形成是经过长期的正逆演化，才形成现今的地貌景观。在其演化过程中，中更新世晚期、晚更新世晚期至全新世早期、全新世晚期，是我国沙漠发生、发展的重要时期，其发生过程也是沙漠化作用较为强烈而又广泛的时期。

1.3 风积沙地区工程建设

风积沙是在干旱、半干旱气候环境下形成的一种特殊地质材料，由于过去在沙漠地区工程建设的项目不多，积累的经验不够，相关的规范也缺少以风积沙作为筑路、筑堤、筑坝材料和作为地基土体的详细规定，对工程设计和施工难以起到应有的指导作用。

随着我国社会和经济的发展，需要在荒芜的风积沙地区兴建公路、铁路、水利等工程设施，这就要求工程师们深入工程实际，详细了解各地区风积沙材料的工程性质，探索和总结工程经验，为后续工程项目提供借鉴。虽然，经过多年的工程研究和实践，取得了一些成果，但总体来讲，目前国内对风积沙工程性质和工程应用方面的研究尚处于初期阶段，还缺乏系统研究和总结；对于风积沙的工程实践经验和研究成果比较零散，一般还局限于具体工程项目，没有形成相应的规范性标准。

1.3.1 公路铁路建设方面

近些年来，我国在沙漠地区建设完成的交通方面的工程比较多，其中尤以公路建设项目居多，修建完成的许多沙漠公路已经投入应用多年，使用效果良好。例如，经过毛乌素沙地南缘的国道 G210 线高速公路，横穿塔克拉玛干沙漠地区的沙漠公路，穿过浑善达克沙漠的赤峰境内省际通道公路，处于古尔班通古特沙漠的省道 S201 线克拉玛依至榆树沟

段公路改建工程,经过乌兰布和沙漠边缘的丹东—拉萨国道主干线内蒙古境内哈德门至磴口高速公路等。

鉴于在沙漠地区其他筑路材料缺乏,采用风积沙作为主要的筑路材料成为一种非常必要的需求。但风积沙的工程性质与一般道路建筑材料有显著不同,是一种有待研究完善的非常规筑路材料。同时,在风积沙的土工试验过程中也完全可能会出现异常现象。

随着国内公路建设多年来的高速发展,在沙漠区域修建公路的工程范例很多,针对沙漠区公路地基和筑路材料方面的工程研究成果和实践经验比较丰富,获得了风积沙工程性质的大量真实有效试验资料和数据;对风积沙材料在公路建设中的应用与防护方面也探索出许多实用可靠的施工技术和措施。

在公路建设设计方面,沙漠地区人烟稀少、筑路材料缺乏,所需的砂石料、水泥、沥青、钢材等材料均需远途运送。为降低工程造价,本着就地取材的原则,路基设计方案常以风积沙为主。一方面风积沙填筑的路基具有整体稳定性好、沉降量小且均匀、水稳定性好等优点,并可以作为隔断层解决盐渍化问题,作为路面结构层并参与路面计算的研究和实践结果表明,风积沙填筑的路基能够保证工程质量;另一方面利用当地丰富的风积沙作为修建路基填料,基本解决了沙漠地区公路建设筑路材料匮乏的难题,可以降低工程造价。

在公路建设施工方面,虽然风积沙路基具有整体稳定性好、沉降量小、沉降速度快、水稳性好等优点,但其在天然条件下呈松散状态,黏聚力几乎为零,一般机具难以在其上直接行驶,普通钢轮压路机根本无法碾压至规定的压实度。同时由于沙漠地区特殊的气候条件和地质状况,使沙漠公路的施工比一般环境条件下的公路施工难度要大得多。虽然目前现行公路工程施工规程、规范当中还没有一套完整的用风积沙作路基填料的施工流程、压实方法和压实标准的规定,但通过多年的试验及尝试,总结出许多较为方便、实用的施工工艺,以及施工控制中的要点。例如针对公路沿线水源缺乏而探索和使用的干压法施工技术,在多条沙漠公路予以应用,对保证公路建设质量、节约公路成本有很大作用;其他诸如风积沙湿压法(水坠法+挖掘机或推土机碾压、水坠法+振动压路机碾压等)、不同形式的夹层法施工工艺、采用固化材料进行风积沙固化的措施和工艺等,都在不同的公路和铁路工程建设中得到研究和应用,并且取得了良好的质量效益和经济效益。

在路基施工质量检测方面,路基压实度是衡量施工质量的重要指标,也是保证道路有足够高的强度和稳定性,以及较长使用寿命的关键。各国测定路基压实度的方法很多,如环刀法、灌砂法、核子密度仪法,以及由振动压路机直接测量压实度等方法,不同的压实度检测方法适用于不同的路基和材料。但对于风积沙而言,一方面其土质疏松,检测时土样容易发生扰动而改变原有状态,使检测精度受到一定影响;另一方面风积沙黏结力严重不足,在含水率小于3%的情况下,采用常规的试验检测方法获取压实度值的难度比较高,测试成果的误差也比较大。针对于此,许多工程技术人员通过不同公路项目的工程实践,对规范中的常规土工试验装置和方法进行了改进和完善,进一步探索和改造出不少合适且实用的检测方法。

展望未来,根据中国西部开发远景规划和西部各省(自治区)沙漠地区公路发展规划,将修筑相当数量的沙漠公路。而风积沙是沙漠地区最丰富和最廉价的物质材料,其具

有水稳定性好、沉降均匀以及受不利季节影响小等特点,并且分布广泛、取材方便,因此在沙漠地区修筑公路首选上风积沙作为路基填料。

1.3.2 岩土工程建设方面

在岩土工程建设方面,达拉特电厂至丰镇电厂的超高压输电线路可以作为一个工程范例。该超高压输电线路穿越库布其沙漠,经过地区为风积沙构成的活动性及半活动性沙丘,土质为细砂,其含水率低、流动性大。在沙漠地区建造承受上拔荷载的输电线路铁塔基础,其设计依据及稳定性如何是设计关键,国内外尚无可靠的试验依据。内蒙古工业大学、内蒙古电力勘测设计院刘文白、曹玉生等研究者,通过室内模型试验和现场原型试验的位移、土中应力、破坏形式测试,提出了风积沙的上拔破坏机理和设计计算模式,使铁塔基础达到了设计上安全、可靠、经济和便于施工的要求。

1.3.3 水利工程建设方面

目前,国内外在活动沙漠地区进行大规模水利工程的范例还比较少,相应地,风积沙在水利工程建设方面的应用和研究成果也非常珍贵。近年来我国在沙漠地区先后建设了一些大中型长距离输水工程,例如,甘肃省景电二期向民勤调水工程,渠线穿越腾格里沙漠南缘,经过地段风积沙层厚达数十米,在沙漠段修建由风积沙填筑的渠堤,该工程于2000年9月全线建成;新疆某沙漠明渠的建成则标志着我国在沙漠中修建大型输水工程在选线、防沙治沙、风积沙地基稳定性、沙漠明渠的断面结构、风积沙地基加固与施工方法以及沙漠风积沙的工程地质等方面的研究已取得重大突破性进展,填补了我国水利工程建设史上的一项空白;其他还有内蒙古河套灌区节水工程、宁夏毛乌素沙漠边缘兴建的月牙湖扬水工程渠线,也是穿越风积沙丘的输(引)水工程项目。

除此之外,最近在内蒙古境内的黄河干流上建设中的黄河某水利枢纽工程,其土石坝段处在乌兰布和沙漠区内,目前土石坝已经施工完成。

1.4 风积沙工程研究

风积沙是一种具有特殊性质的砂类土,其显著工程特点是:颗粒非常均匀;含水率低;遇水具有“湿陷性”;静荷载下不易压实,动荷载下易压实。因此常规的土工试验方法和结果不能完全反映出风积沙的物理、力学和水理性质。

据《岩土工程勘察设计手册》(林宗元主编,1996年版),“特殊性岩土是指与一般岩土相比有显著的差异,即具有独特的物理力学性质与工程性质以及特殊的物质组成、结构构造。因此,特殊性岩土的工程勘察、试验、设计以及治理都各有其相应的特殊性技术准则和技术方法”。据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001),特殊性岩土有湿陷性土、红黏土、软土、混合土、填土、多年冻土、膨胀岩土、岩渍岩土、风化岩和残积土、污染土等10种,尚无沙漠风积沙。可以说,目前各种规范和工程手册中并未把风积沙作为一种特殊性岩土来对待,国内外对这种具有特殊工程性质土体的认识尚不成熟,对其工程性质和工程利用的研究也比较欠缺。

近些年来,随着我国在沙漠地区工程建设的快速发展,许多工程技术人员和专业研究

者结合工程建设的需要,针对不同工程项目的性质和技术要求,对风积沙的物理化学性质、力学性质、击实特征等工程性质进行了大量试验和深入研究,也取得了大量的试验研究成果。采用的试验方法既有规范规定的常规试验方法,也有改进和创新的试验方法。获得的试验研究成果主要包括:风积沙的化学和矿物成分,颗粒组成,基本物理性质,天然和击实状态下的力学性质,渗透性,击实和压实特征,“湿陷性”,冻胀性,抗拔性质,施工工艺和施工质量检测方法,稳定和固化技术等。

但目前针对风积沙工程性质的试验,因工程类型不同且分属不同的行业,所遵循的规程规范不同,试验方法也略有差异。尽管如此,各工程项目的试验研究成果还是能够反映出风积沙的工程性质。

通过不同的工程项目的试验和研究结果,风积沙总体工程地质特征可概述如下:

(1) 不同的沙漠,即使是同一沙漠的不同区段,风积沙的密实度相差比较大;而风积沙的颗粒均匀、含水率低、粉黏粒含量低等特点,以及化学成分等特征基本变化不大;其渗透性指标也普遍在同一量级范围内。

(2) 风积沙的力学性质,如抗剪强度、压缩性等,同一沙漠的不同区段,甚至相距很远的不同沙漠的风积沙,其力学性质规律性比较强,相同密实度条件下其力学性质指标一般相差不大,击实特征也具有相似性。

虽然我国目前在沙漠地区对风积沙的工程使用范例已经不少,但总体上来说国内外对这种具有特殊工程性质土体的认识尚不成熟,并且对风积沙的试验研究和应用成果缺乏系统性的总结和归纳。目前相关的工程勘察规范和工程勘察设计手册也并未把风积沙纳入到特殊性岩土范围,相关规程规范对风积沙地区的设计和施工也缺乏规范性的指导意见和规定。

1.5 风积沙工程应用现状

风积沙储量非常丰富,随着在沙漠地区进行工程建设越来越频繁,充分研究、利用风积沙这种具有特殊性质的土,应该作为工程建设、甚至是沙漠治理和环境改善的重要课题之一。与此同时,积累下丰富和系统的工程性质指标和力学参数,使得风积沙这种具有特殊性质的土,能够和其他已经确定的特殊性岩土类一样,得到充分的研究和工程应用。

目前风积沙在工程建设方面的应用主要有两方面:一是作为公路开挖段的路基土体、输水渠道开挖段的渠底地基土体、建筑物的地基土体;二是作为一种填筑材料,应用在公路路基填筑、输水渠道的渠堤填筑等。针对于此而进行的试验研究、工程实践的范例和经验也比较多。至于作为混凝土骨料等方面的可能性,尚需将来进行更进一步的研究和论证。从目前已知的公路工程、水利工程的检测和运用情况来看,检测指标均能达到设计要求值,而且性能稳定。

对风积沙作为坝壳填筑料,即作为一种水工建筑物的填筑材料,应用和认识尚不成熟,研究也处于探索阶段。与作为公路路基、桥涵台背和挡墙后填筑体,以及输水渠道的渠堤填筑体不同,作为水工建筑物的坝壳填筑料,填筑压实后风积沙坝体大部分处在库水位以下的饱和状态,和地表水直接接触,并且要经历库水位的变动;而作为公路路基、桥

涵和挡墙后的填筑体，一般情况下填筑体在地下水位以上，且很少有地表水和路基直接接触；作为输水渠道的渠堤填筑体，渠底和渠坡通常要进行防渗，使渠水和风积沙渠堤相隔断。

这种非常均匀的风积沙作为坝壳填筑料的质量评价，在《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》（SL 251—2000）中尚属空白，参照其中的“土石坝坝壳填筑砂砾料质量指标”比较困难。《碾压式土石坝设计规范》（SL 274—2001）中只是定性地说明“均匀中、细砂及粉砂可用于中、低坝坝壳的干燥区，但地震区不宜采用”。因此，如果拟采用作为坝壳填筑料，其质量评价标准尚为空白。在内蒙古自治区黄河干流上修建的黄河某水利枢纽工程，其左岸土石坝延伸到乌兰布和沙漠内，并且左岸乌兰布和沙漠具有储量丰富的风积沙，如果能够作为土石坝坝壳填筑料，将会产生良好的经济效益和社会效益。针对这种非常均匀的风积沙作为坝壳填筑料的问题，在黄河某水利枢纽工程的勘察设计和施工中进行了研究和评价。

综上所述，随着我国水利工程建设区域的不断扩展，会经常在沙漠地区进行各种水利工程建设，因此风积沙特殊的地质性质越来越引起工程地质界的重视。对风积沙的勘察和试验方法、力学参数的取值、风积沙的施工工艺和处理方法、基础和边坡的开挖保护等都将是今后遇到的工程课题。

采用风积沙作为填筑材料，是在不降低设计标准的前提下，充分利用当地丰富的风积沙材料，最大限度地降低工程造价。加之风积沙施工工艺在不同工程项目上的成功运用、不断发展和推新，为我国在沙漠地区工程建设提供了一种新的填筑材料、新的施工方法，意义深远。随着西部开发带来的新的建设高潮，我们有理由相信，风积沙这种储量非常丰富的天然建筑材料，必将充分展示其独特的工程材料性能，为我国的工程建设发挥积极的作用。

第2章 风积沙的工程特性

2.1 试验研究方法的特点

如前所述,风积沙是一种具有特殊工程性质的土体,普遍特征为:颗粒组成非常均匀,粉黏粒含量很低,含水率非常低,沙丘的不同深度、不同部位密实度相差比较大;压实曲线具有双峰值,即干燥和饱水状态下都可以达到较大干密度;静荷载下不易压实,动荷载下易压实,等等。因为风积沙这些特殊的工程性质,常规的土工试验方法和结果不能完全反映出其物理、力学、水理性质,特别是压实特征。主要表现在以下几方面:

(1) 风积沙最大干密度,采用标准击实试验和常规相对密度试验方法或许难以达到最理想压密效果,而采用振动试验台并在合适的振幅和振动频率条件下,压实到最大干密度或许效果更佳。

(2) 由于风积沙粉黏粒含量和含水率很低,即使压实后仍呈散体状,较之冲积成因的粉细砂,钻孔内获取真正意义上原状样品的难度更高;即使现场开挖探槽(坑)、采用环刀取样也很困难。由此造成室内土工试验获得天然状态土体的力学性质指标比较困难;虽然许多工程技术人员和研究者就此研究创新了不少试验装置和试验方法,但目前针对风积沙天然状态下的力学指标,尚未有非常理想的取样和试验方法。

(3) 采用室内配置样品,因天然状态下不同深度和部位的风积沙密实度相差比较大,得到的力学性质指标的代表性也比较差。需要在成果整理和数据统计时应充分考虑到这些因素,以便土工试验成果可以更接近现场实际状况。

(4) 采用环刀法时,由于风积沙压实后仍是散的,环刀不易拿出,应先加盖后再取环刀,以防止顶面沙子漏出影响精度。

因此,需要针对风积沙特殊的工程性质,进一步摸索和研究合适的试验装置和试验方法。

2.2 颗粒组成和分类的特性

从目前已有的成果资料来看,除局部区域风积沙以外,我国沙漠的风积沙颗粒组成基本上相差不大,普遍表现为如下的总体特征:主要由细砂粒(即粒径 $0.25\sim 0.075\text{mm}$ 的粒组)组成,粉黏粒含量很低,颗粒均匀,粒径分布比较集中,级配曲线较陡,土质定名普遍为细砂,少量为粉砂。按照国家标准《土的分类标准》(GBJ 145—90)、水利行业标准《土工试验规程》(SL 237—1999)、交通行业标准《公路土工试验规程》(JTJ 051—93)和国家标准《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)等相关规程规范中对土的分

类标准,风积沙应划归为砂类土中级配不良砂(SP);并且各地的风积沙颗粒级配比较相近,离散性不大。

但沙漠中局部区域风积沙,比如丘间低地风积沙,粉黏粒(粒径 $d < 0.075\text{mm}$)含量较高,可达到10%以上。而细粒组分含量对最大干密度试验方法、现场压实施工工艺及质量控制措施有显著影响。针对于此,据来自长安大学张展弢、陕西公路交通工程监理咨询有限公司龚海科等研究者的资料成果,结合内蒙古省际通道赤峰路段工程,根据风积沙颗粒组成的特殊性,参考《土工试验规程》(SL 237—1999)的分类法,再辅以 $d < 0.074\text{mm}$ 组分的含量的影响,对工程所处的浑善达克沙地风积沙进行了进一步分类如下:Ⅰ类风积沙(细分为Ⅰ-1类无塑性级配不良砂、Ⅰ-2类有塑性级配不良砂)、Ⅱ类风积沙和Ⅲ类风积沙。

2.3 风积沙分层特性

与其他成因类型的砂类土层不同,风积沙的风积成因决定了其土层分布和分区有其特殊性。主要表现在以下几方面:

(1) 我国沙漠的风积沙土质比较单一。根据其颗粒组成,风积沙分类包括级配不良砂(SP)和少量含细粒土砂(SF);土质定名包括细砂和少量粉砂。至于粉黏粒含量较高的风积沙,仅限于沙漠的局部区域,不具有代表性。

(2) 在一定的工程区范围内,风积沙总体上土层结构比较单一,不具有水平向层理,颗粒组成在竖向上变化很小。以黄河某水利枢纽工程区的乌兰布和沙漠风积沙土层结构为例,勘察过程中获取样品位置按照均匀布置的原则进行,无法按照层位布置取样;样品颗粒分结果,绝大多数为细砂,极少量为粉砂,表明风积沙土层结构比较单一;尽管某些沙丘部位和表层局部存在粉砂层,但分布厚度和范围很小。

(3) 对一定的工程区范围内的风积沙进行详细分层难度很大。尽管在一定的工程区域范围内,风积沙的颗粒组成有所差异,土质定名也有所不同,但是颗粒组成的较小差异主要表现在沙丘不同部位,比如沙丘的迎风坡和背风坡之间、沙丘表层和核部之间的颗粒组成会有所差异。一般来说,表层颗粒偏细,并且分布厚度不大;而深部颗粒偏粗,为沙丘的主要构成部分。但这种土质差别比较小,其分界线也非常模糊和不规则;其风积成因也决定了其中间很难形成土质差异较大的标志层。

从工程应用角度来讲,表层和局部部位的颗粒较细的分布厚度很薄,对工程的影响不大,进行详细分层的工程意义很有限。

(4) 风积沙无论是作为地基土体,还是作为填筑材料,在工程实践中,根据风积沙土质、颗粒组成和土体物理力学性质的不同,进行平面分区是必要的。这样可以对不同区域、不同工程性质的风积沙进行单独评价,同时采用不同的施工工艺。

综上所述,笔者认为,对于沙漠中的某一工程区的风积沙进行详细分类是有必要的;对于不同区域的风积沙进行分区使用和评价是非常必要的,但对于某一工程区范围内的风积沙进行更详细的划分层位,难度大而工程意义则不大。