

“十三五”国家重点图书出版规划项目



上海出版集团
Shanghai Publishing Group

李志农 金昌宇 陈杰 王翠 等。著

风积沙

工程特性及工程实践研究

丝绸之路经济带

——沙漠地区风积沙
路基研究与应用

上海科学技术出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目



上海出版资金项目
Shanghai Publishing Funds

丝绸之路经济带——沙漠地区风积沙路基研究与应用

风积沙工程特性及工程实践研究

李志农 金昌宇 陈 杰 王 翠 等 著



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书对风积沙工程特性及工程应用做大量室内外试验分析的基础上,进行了深入系统的研究,并结合工程实例,介绍了风积沙在公路路基中的应用。全书共8章,内容包括风积沙国内外研究概况,风积沙的物理化学基本性质,风积沙基本力学特性研究,风积沙压实特性研究,风积沙毛细水及冻胀、盐胀特性研究,粉黏粒含量对风积沙工程特性的影响研究,风积沙加固试验研究,最后结合实际工程介绍风积沙在道路工程中的应用。

本书可供从事公路研究、教学、设计与施工工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风积沙工程特性及工程实践研究 / 李志农等著. —

上海: 上海科学技术出版社, 2018. 4

(丝绸之路经济带: 沙漠地区风积沙路基研究与应用)

ISBN 978-7-5478-4019-1

I. ①风… II. ①李… III. ①沙漠带—道路工程—研究 IV. ①U419.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 092863 号

风积沙工程特性及工程实践研究

李志农 金昌宇 陈 杰 王 翠 等 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上 海 科 学 技 术 出 版 社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 889×1194 1/16 印张 23.75

字数 500 千字

2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-4019-1/U·64

定价: 150.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

2013年9月,国家主席习近平出访中亚提出共建“丝绸之路经济带”的重大倡议得到了国际社会的高度关注。为了落实“一带一路”倡议,加强与相关国家互联互通,促进边疆地区的繁荣与发展,包括新疆在内的我国广大西部地区基础设施建设得到了国家的高度重视,公路、铁路运输快速发展,骨架网络建设取得了系列成果。

然而新疆地区地质情况复杂,气候环境变化大,多沙漠,风积沙分布广泛,高品质筑路材料匮乏。外运筑路材料运距远、造价高,为解决种种矛盾,如何就地取材,趋利避害,同时又能够经济、优质地做好工程建设,使得采用风积沙填筑路基的研究显得尤为必要。

目前系统介绍利用风积沙作为填料填筑高速公路路基工程的出版物较少,本丛书以近年来多项沙漠地区风积沙路基工程研究和实践为基础,从风积沙路基材料性能、设计参数、施工方法和检测手段等方面首次对沙漠地区高速公路风积沙路基工程进行了全面、系统的总结,尤其在风积沙长期使用性能、风积沙易溶盐含量快速测定方法等关键技术的研究和应用方面填补了国内空白。丛书的出版为推广应用风积沙填筑公路路基提供了重要的参考资料。

丛书分为《风积沙工程特性及工程实践研究》《风积沙路基公路设计、施工与防沙》以及《风积沙路基公路建设关键技术与应用》三分册。新疆维吾尔自治区交通运输厅原总工李志农同志担纲主编了前两分册,李志农同志是交通运输部专家委员会成员,先后主持和参与了沙漠地区风积沙利用系列课题研究以及多条沙漠地区高速公路的建设管理工作,在风积沙和盐渍土研究与运用方面有较高的造诣。第三分册的主编过震文同志以援疆干部的身份主持了穿越沙漠边缘区和农灌区的S215线三莎高速公路建设项目,他和他的团队在建设期间攻克了一系列在盐渍土和软弱地质条件下大体量采用风积沙填筑路基修筑高速公路的技术难题。

丛书既有先进技术的推广应用,又有施工经验的科学总结,对指导西部沙漠地区公路建设具有较大的意义,也为“丝绸之路经济带”推进重大基础设施建设提供了重要技术依据。

郑健龙

2016年12月

风积沙是沙漠地区地表分布最广泛的物质,大量的试验研究和工程实践表明,风积沙具有良好的工程性质,可作为筑路材料广泛应用于路基填筑。20 世纪六七十年代,新疆公路科技工作者即开展了沙漠地区公路修筑技术研究工作,并取得了很多应用性成果。20 世纪八九十年代,随着塔克拉玛干沙漠腹地石油开发,通往沙漠腹地的公路建设提到议事日程,相应的筑路技术亟须攻关解决,新疆交通科学研究院、长安大学等单位的科技工作者借助参与在国家“八五”攻关研究的机遇,围绕风积沙的工程特性开展了深入系统的应用研究工作,并取得了较为丰富的试验研究成果,且在穿越沙漠腹地的公路修筑中得到大规模应用。21 世纪初,随着沙漠地区高等级公路建设的需求迅速增加,沙漠筑路技术亟须深化和完善,交通运输部为此立项,开展了沙漠地区公路建设成套技术的研究工作——对风积沙的工程特性也开展深入的理论和试验研究工作。通过近十年的努力,不仅在沙漠筑路成套技术上取得重大成果,同时在风积沙应用于沙漠公路路基填筑方面也获得大量的理论及工程实践成果。本书是作者及其研究团队近 30 年来从事风积沙工程特性研究所取得的成果及实践经验总结。其中,除本书的著者外,先后参与课题研究的还有彭世古、唐勇、张登良、陈忠达、窦明建、申爱琴、郑明权、宁江波、楚虹、戴经梁、张维峰、郑传超、陈晓光、刘涛、贾聿卿、刘照斌、王琼等同志,本书亦凝聚了他们的心血和智慧。同时,本书在撰写过程中,也充分借鉴了其他学者和工程技术人员的研究成果和实践经验。

全书共分为八章。第一章介绍了国内外对风积沙的研究概况。第二章概述了风积沙的物质来源及地理分布,较详细地对其物理、化学性质进行了介绍。第三章对风积沙的回弹模量、剪切强度、CBR 值、沉降特性等基本力学特性进行论述。第四章着重对风积沙的压实特性及压实度的试验方法进行了论述。第五章着重阐述了风积沙的毛细水上升规律及冻胀、盐胀特性。第六章系统地讨论了粉黏粒含量对风积沙工程特性的影响规律。第七章阐述了物理和化学加固风积沙的试验研究成果。第八章介绍了风积沙作为路基材料在新疆麦盖提—喀什、轮台—民丰沙漠公路的应用情况。

由于新疆是我国沙漠分布最多的区域,相应的开展沙漠地区公路修筑技术研究和工程实践也较多,尤其在风积沙工程特性的研究与筑路实践上积累了较为丰富的资料,因此书中介绍的研究内容与工程实例大多是在新疆地区研究与实践的成果。此外,过震文、杨玉泉等同志为本书的审阅、润色,并对本书的出版给予了大力支持,在此表示衷心感谢。

沙漠公路工程是一个正在发展的工程领域,相应的风积沙工程特性的研究和应用实践也在逐步深入开展,无论是基础理论、还是工程技术应用,均有待进一步深入研究和实践,加之作者水平有限,书中一定会存在不足之处,敬请批评指正。

作 者

2018 年 3 月

第 1 章 风积沙国内外研究概况	1
1.1 风积沙材料性能研究	1
1.1.1 无黏性土抗剪强度研究	1
1.1.2 无黏性土强度机理研究	1
1.1.3 沙强度特性试验研究	2
1.1.4 含水量对沙强度的影响	2
1.1.5 干沙在循环作用下的抗剪强度	2
1.1.6 饱和沙在循环作用下的抗剪强度	2
1.1.7 风积沙的试验研究	2
1.2 风积沙筑路技术研究	3
1.2.1 国外风积沙筑路研究	3
1.2.2 国内风积沙筑路研究	5
1.3 风积沙加固技术研究	6
第 2 章 风积沙的物理化学基本性质	8
2.1 风积沙基本特性	8
2.1.1 风积沙物质来源	8
2.1.2 风积沙分布特征	9
2.2 风积沙基本特性试验	11
2.2.1 风积沙粒度成分	11
2.2.2 风积沙颗粒特征	14
2.2.3 风积沙矿物成分	15
2.2.4 风积沙化学成分	18
2.2.5 风积沙含盐量	18
2.2.6 风积沙比重	19
2.2.7 风积沙相对密度	20
第 3 章 风积沙基本力学特性研究	22
3.1 风积沙回弹模量	22
3.1.1 不同试验条件下的回弹模量	23

3.1.2	新疆境内风积沙路基回弹模量调查	27
3.1.3	其他内陆省区风积沙路基回弹模量调查	46
3.1.4	风积沙回弹模量室内试槽试验	67
3.1.5	风积沙回弹模量的其他相关资料	123
3.1.6	风积沙路用性能参数回弹模量的选定	136
3.1.7	风积沙回弹模量的主要结论	138
3.2	风积沙剪切强度	141
3.2.1	不同试验条件下的剪切强度特性	142
3.2.2	不同试验条件下的剪切变形特性	151
3.2.3	风积沙的抗剪强度试验	158
3.3	风积沙承载比	164
3.4	风积沙沉降特性	170
第4章 风积沙压实特性研究		182
4.1	风积沙动力特性	182
4.1.1	振动压实机理	182
4.1.2	自振频率测定	183
4.1.3	模拟风积沙振动压实特性的 MTS 测试	190
4.1.4	根据风积沙的压实特性选择振动压路机的参数	194
4.1.5	风积沙成型后的变形	195
4.1.6	波在风积沙中的传播	196
4.1.7	风积沙动力特性小结	200
4.2	风积沙重型击实	200
4.3	风积沙振动压实	206
4.4	浸水+环刀法测定干燥风积沙密度研究	208
4.4.1	试验研究目的	208
4.4.2	试验研究思路	209
4.4.3	试验研究概述	209
4.4.4	试验结果与分析	215
第5章 风积沙毛细水及冻胀、盐胀特性研究		225
5.1	风积沙水理性质试验(毛细水)	225
5.1.1	风积沙界限含水量	225
5.1.2	风积沙渗透性能	226
5.1.3	风积沙毛细水上升高度	227
5.2	风积沙盐胀特性研究	230
5.2.1	硫酸钠盐渍土的基本性质	230
5.2.2	硫酸钠盐渍土的盐胀试验	233
5.2.3	盐胀量随含盐量变化的规律	234

5.3 风积沙冻胀特性研究	236
第6章 粉黏粒含量对风积沙工程特性的影响研究	239
6.1 粉黏粒含量对风积沙回弹模量的影响	239
6.2 粉黏粒含量对风积沙剪切特性的影响	243
6.3 粉黏粒含量对风积沙承载比的影响	247
6.4 粉黏粒含量对风积沙击实特性的影响	257
6.5 粉黏粒含量对风积沙沉降特性的影响	263
第7章 风积沙加固试验研究	267
7.1 风积沙的物理加固(土工格室加固风积沙技术试验)	267
7.1.1 试验方案及试验方法	267
7.1.2 试验结果及分析	270
7.1.3 土工格室加固沙强度机理浅析	285
7.1.4 土工格室加固沙路面结构及施工工艺	288
7.2 风积沙的化学加固	293
7.2.1 水泥固化剂加固风积沙技术试验	293
7.2.2 路赛砂土固化剂加固风积沙技术试验	309
7.2.3 保力马聚合剂加固风积沙技术试验	316
7.3 土工格室加固风积沙技术试验结论	322
第8章 风积沙在道路工程中的应用	323
8.1 风积沙在麦-喀高速公路中的应用	323
8.1.1 麦-喀高速公路工程概况及建设情况	323
8.1.2 风积沙路基施工工艺及检测	324
8.1.3 土工布及砾石包边土施工工艺	328
8.1.4 综合总结风积沙填筑施工工艺	330
8.1.5 试验检测	332
8.1.6 沙基稳定性分析与评价	334
8.1.7 路面质量评价指标	338
8.1.8 沥青上面层测量高程与平整度	344
8.2 风积沙在轮台至民丰沙漠公路中的应用	346
8.2.1 塔克拉玛干沙漠公路路基、路面结构设计及参数	346
8.2.2 路基、路面设计	348
8.2.3 沙漠公路施工工艺	351
8.2.4 沙漠公路使用状况调查结果及评价	355
参考文献	362



第 1 章 风积沙国内外研究概况

1.1 风积沙材料性能研究

1.1.1 无黏性土抗剪强度研究

国内外研究表明风积沙内聚力很少,基本上为零,则其剪应力与压应力关系为

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (1-1)$$

1.1.2 无黏性土强度机理研究

无黏性材料黏聚力几乎为零,抗剪强度基本上由颗粒之间相对移动的摩擦性质所决定。这种摩擦性质的物理过程包括两部分,一是滑动摩擦,二是咬合摩擦。Taylor 认为无黏性土的抗剪强度由颗粒粗糙程度有关的摩擦分量和土密度与颗粒形状有关的剪胀分量组成,其内摩擦角不仅取决于摩擦分量,而且也取决于剪胀分量。对于密实沙,剪胀分量在强度中发挥显著作用;对于极疏松的沙,则无剪胀发生,故其抗剪强度仅取决于摩擦分量;同时认为克服咬合作用所消耗的能量由剪切力做功来提供,并通过密实沙直剪慢剪试验结果给出了剪胀分量产生的内摩擦角的计算方法。

进一步研究发现,无黏性材料抗剪强度由摩擦分量和剪胀分量组成的结论无法解释试验中所观察到的所有现象。故 Rowe 认为,无黏性土在低压力下的抗剪强度由三部分组成:一是颗粒滑动摩擦阻力所发挥的强度,二是颗粒排列和定向所需能量而发展的强度,三是试样剪胀所需能量而发展的强度。同一种无黏性材料,无论是疏松状态或密实状态,其滑动内摩擦角都相同,两者在强度上的差异主要由颗粒的排列、定向作用与剪胀效应的不同形成。其中剪胀性对密实无黏性材料的强度变化起主要作用,疏松无黏性材料强度则由颗粒的重新排列和定向作用所控制。这种对强度分量的定性分离阐明了无黏性材料的强度机理。Lee 和 Seed 在 Taylor 设想的基础上,提出在高压力作用下,还应考虑颗粒的挤碎作用。通过对萨克拉门托河细标准砂的一系列试验,认为这种无黏性材料在排水条件下的强度特性受到侧压力的影响,而正是高围压使无黏性材料出现了颗粒破碎,颗粒破碎要吸收能量,而且侧压力的增高使破坏应变也增大了,这进一步增加了颗粒重新定向排列所需的能量,无疑会使抗剪强度得到提高。

1.1.3 沙强度特性试验研究

L. Bjerrum 等通过对 Fjords 细沙的一系列试验研究发现,细沙强度的影响因素同其他沙相比,具有相似性,但其抗剪性能却随孔隙率的改变而在较大范围内波动。当孔隙率超过 44% 时,沙内摩擦角迅速降低,在排水 CU 试验中, φ 在 $19^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 变化;而在不排水 CU 试验中, φ 最低只有 11° 。在松沙 CU 试验中,偏应力在摩阻力尚未充分发挥时达到了峰值,这是因为随着应变的发展,孔隙压力迅速升高的缘故。对密实沙而言,其不排水抗剪强度在摩阻力充分发挥后仍继续增长,这是因剪胀作用而产生了负孔隙压力所致。An-Bin Huang 等通过大量的 ML 沙现场和室内试验研究发现,同其他粗沙相比,这种细沙在力作用下孔隙比 e 的变化更大,这种压缩性的影响在解释 ML 沙的试验资料时易被忽视。而这种沙临界状态下割线摩擦角 φ'_{crit} 同石英砂的 φ'_{crit} 较小值相近,但 $\varphi'_{\text{max}} - \varphi'_{\text{crit}}$ (φ'_{max} 为摩擦角最大值) 却比均匀石英砂小,这是由于 ML 沙孔隙率较低所致。试验资料指出,一般情况下,当 $e_s < e_{\text{max, HS}}$ 时,这是因为沙中粗粒含量得到控制。

1.1.4 含水量对沙强度的影响

一般而言,沙粒的比表面积比黏粒小很多,表面力及其影响范围与沙粒的重量和尺寸相比微不足道,因而沙粒亲水性比较弱,不具有可塑性。由于干试样的制备和测试比湿试样简便,所以试验试样一般由风干沙制成,并用风干沙的试验结果作为设计基础。正常条件风积沙在其某一段时间内是肯定会有一定含水量。Kenneth L. Lee 等通过对 Antioch 河沙的试验研究发现,烘干沙的强度要高于饱和沙,而含有一定水分的沙则介于两者之间,当孔隙体积降低时,沙的强度随水分含量的增高而降低。

1.1.5 干沙在循环作用下的抗剪强度

常亚屏曾在 20 世纪 60 年代采用固定在竖向振动台上的轴向惯性式振动三轴试验机研究了干沙的抗剪强度。试验结果表明动静摩擦系数之比与振动次数有明显的负相关关系。同时试验发现,密实沙在振动后摩擦系数即开始下降,疏松的沙摩擦系数在振动初期则有所上升,然后再下降。Barken (1948) 和 Mogami (1953) 曾采用直剪仪固定在振动台上进行试验,也有类似结果。

1.1.6 饱和沙在循环作用下的抗剪强度

常亚屏在 20 世纪 60 年代同时采用固定在竖向振动台上的轴向惯性式振动三轴试验机研究了饱和沙排水和固结不排水三轴剪力试验,仍以试件出现剪切面作为破坏标准。试验表明动静摩擦系数之比与振动次数同样有较为明显的负相关关系,饱和沙在振动后摩擦系数有所降低。

1.1.7 风积沙的试验研究

随着塔克拉玛干沙漠油田的发现和开发,这种沙漠中的风积沙引起了工程界的普遍关注,并对风积沙进行了一些较为深入的研究。

邵生俊等通过对沙漠腹地两个具有不同地形地貌特性的场地有关资料对比分析认为,该沙漠腹地地势起伏较大,地貌的基本单元包括近似南北走向复合沙丘链和沙丘链间的平川地带,随着埋深的增加,沙层的密实度依次为松散、稍密、密实状态。根据密度状态确定的地基承载力与实测值比较接近;同时,沙漠腹地存在风蚀表层土的现象,任何永久建(构)筑物都要进行表层沙的固化处理,在 7 度

抗震区,地下水位以下的沙层不发生液化破坏。地下水的酸度、矿化度较高,对钢筋混凝土和钢材具有中等程度的侵蚀破坏。

为了正确设计在风积沙上设置动力机器基础,保证其正常运行,朱腾明等对沙漠沙的力学性能进行了试验研究。通过静三轴剪切试验确定了沙漠的邓肯-张静力学模型参数;通过共振柱试验给出了风积沙的动剪切模量及阻尼比随剪应变幅值变化的规律,从而可确定在任意动剪应变幅值下的动剪切模量和阻尼比;通过动三轴试验给出了风积沙的动强度与静剪应力比的相互关系;动抗剪强度和总抗剪强度均随潜在破坏面上的静剪应力比 α_s 而提高;干风积沙的动强度由破坏面的总法向应力决定,饱和沙的动强度则只由破坏面上的静法向应力决定。

大庆油田建设设计院通过塔中油田场地风积沙的一系列试验研究认为,风积沙地基主要由细沙组成,细沙粒径极细,含盐量较高,具有一定的侵蚀性。细沙场地天然地基承载力可以满足一般建(构)筑物的要求,但对场地表层干燥松散风积沙和回填风积沙需做压实处理后方可作为持力层。风积沙的一系列击实和压实试验表明,这种沙的击实特性不同于一般的土质,无论是轻型击实还是重型击实,都不存在最佳含水量,而是在干燥或饱和状态下击实的密度最大,压实试验结果同击实一样,压实处理的最佳施工工艺是细沙饱水后用平板振捣器均匀振压 4~6 遍即可。通过对风积沙的动力特性的全面研究,为动力机器基础的计算分析奠定了基础,给出了风积沙的邓肯-张模型参数、动模量及阻尼比随剪应变幅值变化的规律、动强度与静剪应力比的相互关系以及线性和体积界限剪应变值。

1.2 风积沙筑路技术研究

20 世纪 80 年代中期以前,在我国修筑公路时一般都尽可能绕避沙漠。所谓的沙漠公路,多是在沙漠边缘地带(小沙漠或沙地另当别论)穿越里程不长的沙丘分布区。随着社会经济的发展,特别是进入 20 世纪 90 年代后,公路建设越来越需要延伸到沙漠腹地,沙漠公路修筑技术研究也随之提上议事日程。

纵观国外类似地区,情况亦相似。沙漠地区公路修筑问题的产生并非来自基础研究,而是生产实践的需要。众所周知,干旱地区的经济比较落后,道路建设起步较晚,因而这方面的研究也相对滞后。

世界沙漠主要分布在非洲、亚洲、大洋洲,此外在北美洲、南美洲也有分布。主要有非洲的撒哈拉沙漠和纳米布沙漠,亚洲的鲁卜哈利沙漠、塔克拉玛干沙漠、塔尔沙漠、卡拉库姆沙漠,大洋洲的大沙沙漠、维多利亚沙漠、辛普森沙漠等。据有关资料统计,目前全世界沙漠(包括沙地)总面积约为 $600 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。正因为沙漠面积广阔,即使这一地区社会经济发展等比较落后,其影响还是比较大的。因而在沙漠地区有关公路修筑技术的研究也一直在进行着。国外有 Alderson 和 Metcalf 编著的《沙漠公路》、Horta 开展的“撒哈拉沙漠西北部低交通量公路的设计与施工技术”研究,以及 Ismail 开展的“沙漠公路路面排水设计的改进”研究等。相对于国外,国内对沙漠公路的研究比较深入,如塔里木石油勘探开发指挥部编著的《塔里木沙漠石油公路》(1996)、新疆交通科学研究所开展的“沙漠公路修筑技术研究”(1993)、西安公路研究所和榆林公路总段开展的“无砂石料地区公路修建技术研究”(1995)、刘贤万著的《实验风沙物理与风沙工程学》(1995),以及长安大学等单位开展的“沙区路基压实度标准及检测技术的研究”(1999)等。以下主要以时间为序,综述国内外的研究情况。

1.2.1 国外风积沙筑路研究

20 世纪 30 年代,美国工程师 R. R. 葡克特(又译普罗特)发明了葡克特击实仪,并对各种土类进

行了击实试验。发现不同土类的击实曲线(又称葡氏曲线)有所不同。“无塑沙”的击实曲线在含水量极低(含水量为零)时取得了干密度的最大值,为此称为特殊的葡氏曲线。可以说,这是最早通过试验而发现某些土类具有干压实特性的记录。

但 R. R. 葡克特此项发明的重点,是为了解决土的压实过程中的最佳含水量的问题。限于当时的条件,没有也不可能对这些土类的压实特性予以特别的关注。

1953 年,白朗基的专利文献,为冲击式压路机的设计和土壤压实原理。1970 年,在波柯立格和白朗基的试验报告中,说明了冲击式压路机比普通压路机械在压实深度方面性能要优越得多。后来,冲击式压路机多被用于路基的干压实或偏干压实,其中也包括风积沙路基的压实。

1957 年,勒弗斯在对压实机械的研究中得出结论,利用冲击式压路机的能量相对较高的优点,使得它能在较低的含水量时达到规定的压实度,且比普通的压路机压实度作用更深。从此后,高能冲击压实技术发展非常迅猛。波柯立格和白朗基(1971)、柯立福特(1976)、伯兰基(1987)等的研究都予以了充分肯定。但令人感到意外的是,在干旱或半干旱条件下为降低压实用水而将这一较新的技术应用于生产实践中却没有取得多大的进展。

范·罗斯和杯赛尔斯(1964),耐特(1969),摩里斯(1975),格林和柯克斯基(1978),爱里斯(1980),欧·康奈尔、万伯拉和耐威尔(1987),对各种砂的压实特性的研究表明,研究对象能在低含水量甚至含水量为零时得到很高的压实度,完全干燥时干密度与最佳含水量时的最大干密度相仿。

欧·康奈尔、万伯拉和耐威尔 1987 年在论证砂土的干压实特性时,考虑了其他值得注意的因素,如在低含水量情况下进行压实时有关的高空气率和较高的土壤吸附值,两者都有可能使道路出现一些问题,如道路在运营期饱和度的增加产生湿陷性沉降,使路基危险性增加,致使路基强度大大降低,从而增大其对水的敏感度等。后者可能是此项技术在生产实践中推广缓慢的主要原因。

德纳帕克公司(瑞典)开发了一种直径为 150 mm,有一振捣棒的振捣式压实试验仪器。试验以完全干燥、含水量介于干燥和饱和之间、完全饱和的砂样为对象。结果显示,偏干压实的压实度最高。在炎热干旱条件下的公路施工中,该结果也被德纳帕克公司的自行振动压路机进行的现场实验所证实。尽管在含水量为 3%~4% 时有时也能获得令人满意的结果,但含水量不超过 1.5% 时干压实效果最佳。试验还证明:砂的偏干压实受其他某些细料的影响;在有盐分时也可获得更高的压实度。

位于博茨瓦纳西部及南非北部的卡拉哈迪地区有典型的半干旱环境条件,南非在此地公路施工,对减少压实用水的各种方法进行了试验。结果表明,高能冲击式压路机进行压实时,水的需求可大大降低,从而获得令人满意的施工造价。

美国的国外运输和道路研究试验室及其他部门在干旱环境中对低造价路面的设计、施工和美护方面获得了一定的经验。1974 年 11 月在对科威特的低造价道路设计中,提出了一种对于结碎石路基特别有用的施工方法,压实时的含水量低于最佳含水量。

1979 年开工的澳大利亚南部的斯图亚特公路长 925 km,有试验路段,澳大利亚道路研究部对试验路段的路基和基层的含水量、压实度、强度等道路性能的现场调查表明:许多路基和基层在相对较低的含水量时达到了平衡,且依据假定路基饱和来设计的路基厚是过分保守的。同时还证明偏干压实是可行的,而且在那种地区效果也是很好的,并且得到了基层密实度接近修改过的实验所能达到的最大干密度,也得到了具有较好的密封黏附性的稳定重黏土适于基层填筑的证据。

澳大利亚道路研究部在澳大利亚南部的干旱区修建了一些试验路段用以调查低交通量的乡村沥青表处路面的特性。运营七年后的调查结果显示,偏干压实也可用于大交通量的道路施工,压实含水量可比标准含水量低一些。

澳大利亚道路研究部还在靠近麦若汀和邦拜的特别干旱的地方各建设了黏土路基不加水压实试验路,并陈述了观察结果,但尚未见运营后的试验调查结果。

非洲八国正在修建贯穿全国的长 3 200 km 的支线公路网以对付百年不遇的干旱和饥荒的影响。美国的 Sahel 认为,在干旱的季节,偏干压实是行之有效的。现场试验的结论为:

- (1) 在土壤石屑含量少时低含水量压实是可行的。
- (2) 对高石屑含量的干燥现场土壤压实特别困难。
- (3) 两种压实通常都可得到令人满意的结果,但冲击式压路机的压实度要比振动式压路机大得多。
- (4) 保证将来压实的调查结果是使用冲击式压路机得到的。

印度公路上广泛使用的未黏结的粒状材料,在偏干压实的研究方面也取得了一些进展。认为偏干压实有很大的潜力,并要求依据当地的气候条件进行设计与施工,修改原有的仅适宜于潮湿工区的设计。

在苏丹的干旱地区,用黑色粉质黏土(膨胀性黏土)修筑的试验路证明了偏干压实的效果。

博茨瓦纳卡拉哈迪的塞罗坞-欧长莱帕公路,沿线水源奇缺,土质为四种含泥的粗砂和细砂并有湿陷性,建设部门强调要尽量降低压实用水。施工单位采用冲击压实技术进行试验及施工,结果比较理想,与普通压路机的传统施工相比,用水量降低了 50%,总费用降低了 30%。其基本结论为:

(1) 对于干旱和半干旱地区的无黏结材料,适于采用适当能量、外形、构型的冲击式压路机;与普通压路机相比,在含水量非常低、分层压实较厚时,它具有高效性和经济性。

(2) 由于冲击式压路机的推广,有必要回顾适用于低能压路机的传统规范,特别是关于每层允许的压实厚度和规定的质量控制方法。

(3) 高能冲击式压实技术比普通压路机好得多,特别是对低造价的公路经济上的影响还包括:

- ① 为最小厚度的路面建造刚性的、均匀的路基施工。
- ② 最重要的是在半干旱环境压实用水少一些,不只是因为缺水,而是水中常含有对路面和路表都有害的盐分。
- ③ 在很低的现场含水量情况下,在一定深度,达到允许的压实度要求。

此外,在沙特阿拉伯进行施工的意大利承包商 FURLANIS COSTRUZIONI GENERALI SPA 和德国承包商 FRIEDR PREUSSE 用大型的振动压路机进行偏干压实,结果可达 95%~100% 的葡氏压实度。在美国发展计划协会的赞助下,对 TRANS 撒哈拉公路进行了施工中的干燥土压实,并进行了综合调查。在格奥(地名)已完成了压实试验,已发表了《位于格奥的试验路段在较低天然含水量时进行压实的综述报告》。

1.2.2 国内风积沙筑路研究

国内对沙漠地区公路修筑技术研究时间相对较晚,陕西、内蒙古、新疆等省区近几年相继结合该省区沙漠地区实际状况针对路基、路面、防护等进行过研究。

1992—1995 年,我国首次在新疆塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠中成功修筑了一条长达 522 km 的沙漠公路(等级三级),并开展了较为全面的沙漠地区公路修筑技术研究。陕西、内蒙古结合修建二级公路、三级公路也开展了一系列的研究。主要科研成果有中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部完成的“塔里木沙漠石油公路”(1996)、西安公路研究所与榆林公路总段共同完成的“无砂石料地区公路修建技术研究”(1995)、内蒙古交通设计研究院对“沙区路面结构”开展了研究,这些研究

成果为沙漠地区公路修建起到了指导作用,也解决了一些技术难题,为该领域的深入、系统、全面研究奠定了基础。

已有研究成果涉及不同等级路基完整的施工工艺及检测方法等内容较少,在修建沙漠地区公路时主要参考现行相关的规范及标准。实践表明采用现行相关规范、规程,在风积沙路基施工中存在许多问题,主要有风积沙最大干密度的确定方法、压实标准、检测方法等均不能满足施工技术要求。近几年来针对这些问题,西安公路交通大学和陕西榆林公路总段合作,先后开展了“沙区路基压实度标准及检测技术研究”“毛乌素沙漠高填方路基的压实和稳定性研究”等课题,对于风积沙的施工方法以及最大干密度的测定方法进行了试验,这些成果和研究主要依托二级公路。

陕西已建成的榆靖沙漠高速公路、榆林至陕蒙交界沙漠高速公路均穿越毛乌素沙漠。为了解决沙漠公路诸多技术难题,陕西省公路局、榆靖管理处、西安公路研究所、长安大学针对沙漠高速公路风积沙路基的压实问题修筑了 5 km 路基试验路,通过室内外试验和施工总结取得了阶段性研究成果。在此基础上编制了《沙漠路基施工技术规范(试行)》,已成功地应用于榆蒙沙漠高速公路、榆靖沙漠高速公路及靖王高速公路。

1.3 风积沙加固技术研究

土壤固化剂实际上是利用外渗剂对土体进行化学处理,来改变土壤的组成和土体的工程性质,从而达到提高土质强度、改善土质压实性的目的。通常工程中所使用的石灰、水泥、粉煤灰等无机结合料,也可认为是最简单的土壤固化剂。由于土(广义概念,包括砂砾等)是地球上最经济、来源最广泛的工程材料,因此要求对土体进行有效的固化,以适应工程建设更高的要求,就成为近年来国内外争相进行研究的热点问题。但是由于对土壤、结构强度、稳定性、压实标准和耐久性要求的不同,对固化剂的品质和技术要求也不同于常用的石灰、水泥等一般无机结合料,因此只有在理解固化剂基本原理、特性和技术标准的基础上,才能正确和有效地使用固化剂。

固化剂作为一种新型的筑路材料,其适应性相当广泛。对粉性土、黏性土、砂砾、风化沙、软土和湿土都可以成功地进行固化。实验表明,固化剂固化土壤的强度较高、水稳性好、抗干缩性能好,土壤经固化后形成板体,成为半刚性路面基层或底基层。由于固化后良好的整体受力性能,能提高道路质量,延长道路使用寿命,是一种具有综合稳定性能的优质筑路材料。早在 20 世纪三四十年代,欧美国等国家便开始大量使用水泥土材料。20 世纪 80 年代初开始,美国和日本利用固化剂固化路基,所建高速公路取得了良好的效果,使固化路基的技术得到迅速发展。我国研究固化剂和固化路基的技术尚处于起步阶段,目前只生产少数固化剂,而且配制固化剂所用的精料大部分从国外引进,价格昂贵。

固化剂作为一种特殊的建筑材料,其不同的物理性质和化学组成成分决定不同的类别、特点和固化方法。路用材料固化剂从形态上看,可分为固态和液态两大类;从化学构成上看,可分为主固化剂和助固化剂两大部分。其中固体粉状固化剂中的主固化剂以石灰、石膏、水泥为主;助固化剂采用高聚物(如聚丙烯酰胺、聚丙烯酸)或含有活性基团的有机化合物;液体状固化剂中主固化剂多采用水玻璃,助固化剂则采用各种无机盐,如碳酸镁、碳酸钙等。前者与土混合后加压,适用于表层或浅层土的固化;后者使用时,采用特殊工艺将浆液注入土中使土固结,适用于深层土的固化。

固态固化剂是由水泥、石灰以及各种可溶性无机盐类组成的多组分复合体。当固化剂与黏土拌和后,在水的影响下,通过各种化学反应(如水泥的水解和水化反应、石灰的碳化反应、黏土矿物离子的交换反应、沉淀反应、絮凝和凝聚反应以及催化反应),使混合集料形成链状和网状结构,从而实现

稳定固化土壤的作用。

水泥在水化过程中各种组分与水反应,生成硅酸盐、铝酸盐和氢氧化钙。两种类型的硅酸钙水化作用产生新的化合物,即石灰与硅钙石凝胶,后者在强度方面起着主要作用,因为黏结强度和体积变化主要由它来控制。当与黏土反应时,在水的作用下,空隙水能够从水泥中抽提氧化钙,以减少土的含水量。水泥的水化作用使得各种矿物之间产生很强的结合力,并构成一种有效的包围着非结合土粒的基质,体现出具有较高强度的多孔结构。

氧化钙与黏土矿物之间也发生相互作用,一类是快速的离子交换反应,另一类是较慢的碳化反应。反应开始产生絮凝和凝聚,随后黏土颗粒就形成粗粉粒状的大颗粒。由于游离的钙离子占据着吸附在黏土矿物组合周围钠离子的位置而产生了絮凝作用。石灰将增加土的 pH 值,提高了黏土矿物中硅酸盐和铝酸盐的溶解度,从而加速了其水化反应。最细的土颗粒的絮凝以及凝胶物质的形成将矿物颗粒连接和胶结起来,从而改变了整个土粒的空隙结构。

固化剂中可溶性无机盐具有催化水化反应能力,同时又是碱性刺激剂,在它的激发下,反应产生的新生态物质具有相当高的活性和分散性,容易相互胶结,因而提高了稳定土早期强度。活性剂的加入改善了水和土之间的相互作用,使土颗粒表面活性、表面极性和吸附性都发生了变化,能使水分子排挤出土粒表面,并使水不重新侵入土颗粒中,因而使土不受潮。有土颗粒表面吸附大量离子而成电性粒子,在静电作用下发生颗粒积聚,使土变成具有互不连通的多孔性并能保持不渗水性的稳定结构。

固化剂在稳定土的过程中改善了水和土之间的各类化学反应,不仅 Ca^{2+} 与黏土粒子产生离子交换,同时固化剂的某些离子也能与黏土离子产生高速率的离子交换反应,使稳定土形成链状和网状骨架结构,并消除了土壤内的液相和气相,抑制了有机质的不利影响,促进了稳定土的硬化。土粒因静电作用相互吸引而紧密结合,经过碾压增大了路基强度、耐水性和抗冻性,同时基层材料在各种交通和气候条件影响下,其强度和机械能始终保持良好状态。



第2章 风积沙的物理化学基本性质

2.1 风积沙基本特性

2.1.1 风积沙物质来源

风积沙也可称为风成沙,在某些文献中还被称作风吹沙、风沙土、流沙等。风积沙是地质作用形成的分布于地表及地表以下一定深度范围的并受风力作用改造的松散的沙质沉积物,其来源主要是沉积在地势较低地区的冲积物、洪积物、湖积物、海相沉积物等,也可以是残留在地势较高地区的基岩风化物及坡积物等。

从地质或地理角度来看,风积沙的形成需要有两个比较特殊的条件:一个是较为特殊的气候条件;另一个是较为特殊的地质、地貌条件。

较为特殊的气候条件是指不利于植物生长而导致出现荒漠景观的气候条件,如干旱、风大风多等。

较为特殊的地貌条件主要指的是两种能够大量产生沙物质沉积的地质、地貌单元或地质、地貌单元的组合,主要有以下两种:

第一种地质、地貌单元或地质、地貌单元的组合是高大的山地环绕巨大的内陆(断陷或凹陷)盆地。高大的山地是沙物质的主要来源地。如在塔里木盆地周围环绕的天山、昆仑山、阿尔金山等,在准噶尔盆地周围环绕的天山、阿尔泰山等。高山区较多的降水可汇积成河流或洪流,可将高山严寒地带物理风化作用产生的大量碎屑物质搬运到山口外及盆地中,形成巨厚的洪积物、冲积物或湖积物等。在干旱、多风的气候条件下,这些沉积物受风力吹蚀、搬运和堆积,可形成沙漠或沙地,也形成了风积沙。

第二种地质、地貌单元或地质、地貌单元的组合为剥蚀台地(高原)及残山丘陵区。在干旱、多风的气候条件下,分布在台地(高原)及残山丘陵地带的坡积物与残积物等,也可以在风力作用的改造下成为风积沙的物质来源之一,例如我国新疆的库鲁克塔格山地等。

除上述自然条件外,干旱、半干旱和部分半湿润地带,在干旱、多风和疏松沙质地表条件下,由于人为强度利用土地等因素,破坏了脆弱的生态平衡,使原非沙质荒漠的地区出现了以风沙活动(风蚀、粗化、沙丘形成与发育等)为主要标志的土地退化过程,也就是沙漠化过程。沙漠化也是导致风积沙出现的原因之一,其中有人类活动的作用。