

风积沙改性土试样压实度控制方法

周子豪, 苏占东*, 吴成龙, 夏京

(防灾科技学院 岩土工程研究中心, 河北 廊坊 065201)

摘要:沙漠地区修筑高等级线路工程对路堤的强度和稳定性有更高要求,需对传统的风积沙材料进行改性处理并对改性土开展大量的室内试验研究,高效制作同一规格不同压实度的试块对风积沙改性土工程特性的室内试验研究至关重要。针对当前工程普遍使用的风积沙改性土,在室内分别采用应力控制压实法和位移控制压实法分3层压实和5层压实制作风积沙改性土试块,对比分析不同压实度控制方法的压实效果以及试块的应力应变特性。结果表明:应力控制压实法明显优于位移控制压实法,3层应力控制压实法优于5层应力控制压实法。结合3层应力控制压实法,给出压实度与应力值的相互关系,通过控制压实应力大小,配制不同压实度下的风积沙改性土试样。

关键词:风积沙改性土; 压实度; 应力控制压实法; 位移控制压实法; 分层压实法

1 前言

沙漠地区修筑线路工程一般依据就地取材原则,取风积沙为原料进行路堤填筑。大量学者对风积沙的物理化学特性、风积沙基本力学特性、风积沙压实特性等进行了研究,取得一系列研究成果。随着中国高等级线路工程的不断发展,单一的风积沙材料难以满足工程对于变形和强度的要求,需要对其进行改性处理。董伟等、李根峰等、谢春磊等对风积沙混凝土进行了一系列研究,包括力学性能、冻融损伤特性以及收缩变形特征等;伏兵先、王朝辉等、魏杰等、张雁等通过添加不同工程材料,例如黏土、水泥、粉煤灰、石膏和木钙等改良风积沙的力学性能,以增加其强度和稳定性为工程服务。国外较早关注到风积沙改良后可为工程建设服务的特点,Wahhab A A 和 Aiban S A 等对沙特阿拉伯东部沙丘风积沙掺入沥青、水泥或石灰进行加固改良并显著提高沙土的抗剪强度和水稳定性;Ghrieb A 等分析了稳定剂和沙的对比对混合料物理化学特性的影响;Susana L Q 等对比分析风积沙是否掺入水泥以及水泥掺量对改性土压实特性和承载能力的影响。对改性土压实度控制方法的研究则少见报道。对于风积沙改性土强度方面的室内试验研究不能脱离对制样方

法的关注。郭莹等对比分析了干装法、湿装夯实法以及水下沉积法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响。

然而,对于风积沙改性土强度试验中试块压实度控制方法的研究鲜有报道,不同压实度的改性土其工程特性会有显著差异。目前实际工程中风积沙路基采用的压实方法为振动压实法和水坠湿法压实。但风积沙振动压实因碾压频率、速度和遍数等控制不当会产生“疏松—密实—疏松”的恶性循环,而水坠湿法压实受浇水量、蒸发、渗透以及干旱沙漠地区水资源匮乏等因素的影响较大,风积沙压实方法成为困扰施工和影响施工质量的一个技术难题。在室内试验中,金昌宁等、陈忠达等的研究表明:风积沙的抗剪强度受压实度的影响。因此全面把握风积沙的路用性能特别是路基强度特征,需要能够高效稳定地制备出不同压实度的风积沙试样。该文结合某高铁客运专线路堤风积沙改性土配比(配比设计为95%风积沙+5%水泥)设计方案,在室内采用分层应力控制压实法和分层位移控制压实法对风积沙改性土压实度控制方法进行研究,从压实外观效果和力学特性两方面评价风积沙改性土的压实控制效果,为全面把握风积沙改性土的力学特性和冻融剪切变形特性等路用性能的研究提供试验基础,为实际工程中风积沙改性土的高效工程应用提供

收稿日期:2020-12-11(修改稿)

基金项目:2018年度中央高校基本科研业务费专项创新团队项目(编号:ZY20180106)

作者简介:周子豪,男,硕士。E-mail:2437243749@qq.com

* 通信作者:苏占东,男,博士,讲师。E-mail:627318240@qq.com

试验参考。

2 试验过程

2.1 试验材料及仪器

试验所采用的风积沙取自内蒙古科尔沁沙地某高铁客运专线路堤施工项目段,风积沙主要矿物为石英,并含有一定量的斜长石和钾长石,含有少量的伊利石或蒙脱石。测得的基本物理指标见表 1,不均匀系数

$C_u<5$,曲率系数 $C_c<1$,颗粒较均匀,属不良级配。

试验所用主要仪器设备有竖向压实反力系统,最大试验力为 500 kN、油压千斤顶的活塞直径为 100 mm、FX101-3 型电热鼓风干燥箱温度范围为 10~250 ℃,灵敏度为±1 ℃,ZYSS2000 电液伺服压力机,轴向加载速率:0.01~20 kN/s,轴向测量分辨率:20 N,轴向测量精度:≤±1%(示值),位移测量范围:1~100 mm,位移测量分辨率:0.001 mm,位移测量精度:≤±5%。

表 1 风积沙物理指标

最大干密度/ (g·cm ⁻³)	土粒相对 密度 G_s	颗粒粒径/mm			不均匀 系数 C_u	曲率系数 C_c
		d_{10}	d_{30}	d_{60}		
1.863	2.685	0.13	0.18	0.27	2.1	0.92

2.2 试验设计及步骤

设计了应力控制压实、位移控制压实的 3 层压实和 5 层压实试验,按设计的应力范围和位移量进行风积沙改性土室内试块制作。试验设计方案和具体压实控制指标见表 2。

表 2 风积沙改性土压实设计方案

分层 数	应力控制压实		位移控制压实	
	编号	应力/MPa	编号	位移/mm
3 层	L3-1	0.70~0.75	W3-1	14.35、14.35、16.40
	L3-2	0.80~0.85	W3-2	18.45、18.45、18.45
	L5-1	0.60~0.65	W5-1	10.25、10.25、12.30、 14.35、16.40
5 层	L5-2	0.70~0.75	W5-2	12.3、12.3、12.3、 12.3、12.3

注:此表针对 150 mm×150 mm×150 mm 的风积沙改性土立方体试样配比设计。

按照试验设计方案,试样制备流程如图 1 所示。

(1) 按照试验流程,依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,对固定配比的风积沙改性土进行击实试验,测定其最优含水率 w_g 和最大干密度 ρ_d 。

(2) 分别取风积沙和改性材料若干过 0.5 mm 筛,并放入干燥箱,在 105 ℃下烘干 12 h,待其冷却至室温时,根据式(1)~(3)按预定压实度 λ 和给定配合比 η 计算烘干试料用量,称取重量为 m_{ss} 和 $m_{sc(i)}$ 的烘干试料,按最优含水率加入蒸馏水,拌匀后的试料放在密闭容器或塑料袋(封口)内浸润备用。

$$m_s=\rho_d\times V$$

(1)

$$m_{sc(i)}=\eta_{(i)}\times\lambda\times m_s$$

(2)

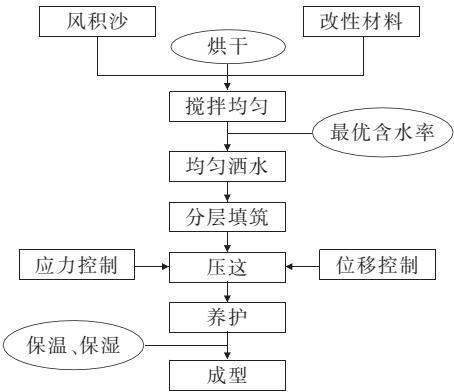


图 1 试样制备流程图

$$m_{ss}=\left(1-\sum_{i=1}^n\eta_{(i)}\right)\times\lambda\times m_s$$

(3)

式中: m_s 为烘干后改性土的质量(g); ρ_d 为风积沙改性土的最大干密度(g/cm³); V 为所制试样的体积(cm³),此次试验所制试样为边长 15 cm 的立方体试块, $V=1\,125\text{ cm}^3$; $m_{sc(i)}$ 为第 i 种配比材料烘干状态下的质量(g); $\eta_{(i)}$ 为第 i 种配比材料的设计配合比; λ 为预定试样的压实度(%); m_{ss} 为烘干状态下风积沙的质量(g),以小数计。

(3) 按表 2 的设计方案将拌和完成的试样平均分为 3 份或 5 份。

(4) 将钢制模具内壁擦拭干净并涂抹一薄层润滑油,将每份试料均匀平整地填入到钢制模具中,上层放置厚度约 3 mm,边长比试筒内径小约 0.2 mm 的方形刚性传力垫块,分别采用应力控制压实法和位移控制压实法进行压实,两种压实方法均将整个试模(连同垫块)放置于竖向压实反力系统上,以 1 mm/min 的

加载速率加压至设计压力值或位移值并维持 2 min。

(5) 下层压实完成后、上层试料填入前,取出传力垫块对压实土表面进行拉毛处理,以防出现明显分层。

(6) 填至最后一层时考虑顶层松铺厚度另加 2 cm 高的护筒进行填料压实,解除压力后,切除模具顶沿高出部分土样,过 2~4 h 后对试样进行脱模处理,记录试块表面完整度以及是否存在明显的分层情况。

(7) 对于每种配比试样,脱模后用环刀平行取试样的中间部分风积沙改性土 3 组,测定试样的密度和含水率,利用式(4)和(5)分别计算压实后试样的干密度和压实度;

$$\rho_d' = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \quad (4)$$

$$k = \frac{\rho_d'}{\rho_d} \times 100\% \quad (5)$$

式中: k 为压实度; ρ_d' 压实后的干密度(g/cm^3),计算至 0.01 g/cm^3 ; ρ 为压实试样密度; w 为含水率(%); ρ_d 为最大干密度(g/cm^3)。

(8) 将脱模的试块用塑料保鲜膜遮盖,移至恒温恒湿养护箱继续养护 7 d。

(9) 如需做立方体试样的无侧限抗压强度试验,取养护后的试块,在试块表面中心位置刷约 0.5 mm 厚的腻子粉浆,涂 509 缓凝胶水,待胶水黏结后,用砂纸轻轻打磨光滑,再用 502 速凝胶水黏贴应变片。

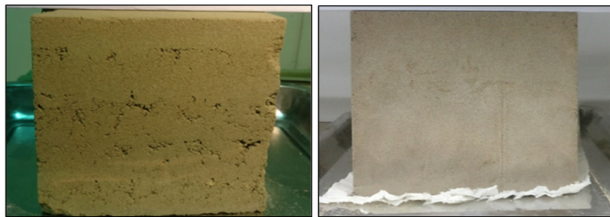
(10) 将粘贴有应变片的风积沙改性土标准试块置于伺服控制压力机上进行无侧限抗压强度试验,采用位移控制加载法,加载速率设置为 1 mm/min,试验过程中记录应力—应变曲线。

3 试验结果与讨论

3.1 试块压实效果

图 2 为 5 层位移控制压实和 5 层应力控制压实试块的表面形态。由图 2 可知:位移压实法制备出的试样完整度较差,试块分层较明显。这可能是由于应力控制法在制样过程中需要将荷载匀速压至表 2 的设计值,此过程的应力状态实际属于应力加载过程,即应力不断增加,应变随时间增加而逐渐增加的性质,此过程中风积沙改性土颗粒处于不断调整趋于平衡位置的过程,试样被挤压密实,在有侧向限制的刚性模具中沙粒空隙逐渐被填充、压密,风积沙改性土颗粒紧密排列。而位移控制压实法制样时填料松铺压实所需的位移量较大,而紧密填装压实所需位移量较小,在填装压实度

处于未知状态时,所需位移量很难确定,直接影响试样的制样效果。此外,从操作的便捷性角度考虑,位移控制压实法压实过程中存在仪器操作困难、初始值取值不一,试验内部间隙大等原因造成填筑各层压实度高低不一。



(a) 位移控制压实

(b) 应力控制压实

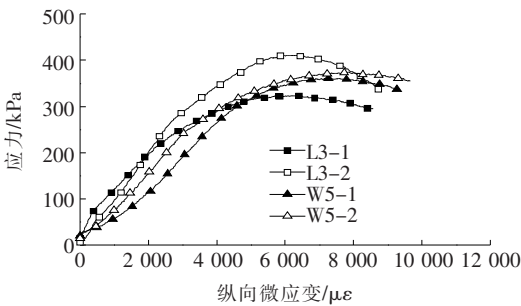
图 2 两种压实方法所制试样照片

虽然使用振动、冲击或振动+冲击的压实方法可以达到同样或更好的压密效果,但试验室条件下制备既定压实度的风积沙改性土受振动因素和沙土特性影响较大,很难控制其压实度的范围,而试验室内应力压实控制法比冲击、振动压实法具有操作简便和更容易掌控的优势。在风积沙冲击、振动压实试验中,杨人凤等的研究表明,沙漠地区风积沙路基施工采用振动压实机械进行碾压时,必须综合各种参数(粒径、级配、含水率、填料方式)选择合理的压实机械、振动频率、振幅、振时和振速,相互配合才能取得良好的压实效果,否则可能出现“疏松—密实—疏松”的恶性循环,很难快速达到预定的压实度。由此可知,冲击振动压实法考虑的因素繁杂,并不是试验室内高效制备预定压实度改性土的最优办法。

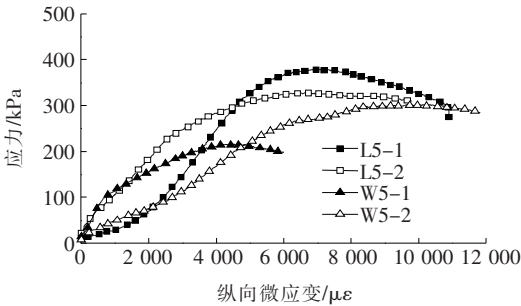
3.2 试块强度试验的应力—应变曲线及其破坏形式

风积沙改性土的应力—应变曲线见图 3。

由图 3 可知:风积沙改性土的应力—应变曲线基本呈现 4 个阶段:第 I 阶段,试验开始加载时,应力—应变曲线基本呈“上凹形”,试样处于内部空隙不断压密阶段。对于 5 层压实试样,L5-1 和 W5-2 的孔隙压密阶段较显著,其余试样并不明显,而对于 3 层压实的试样,4 组试样的孔隙压密阶段都不明显,说明 3 层压实试样的空隙较少且分布均匀;随着荷载的增加,曲线呈现线性关系。进入第 II 阶段,试样在外荷载的作用下处于弹性变形阶段,3 层压实试样的弹性变形阶段曲线斜率差异较小,而 5 层压实试样的弹性变形阶段曲线斜率变化较大,试样的压实度并没有太大差异,由此可见 5 层压实试样在内部形成的“面—面”结构对试样的弹性阶段有较大影响。第 III 阶段,该阶段黏结



(a) 3层压实试样



(b) 5层压实试样

图3 各试样的应力—应变曲线

薄弱面不断产生、发展,不可恢复的变形明显增加,应力—应变曲线偏离线性,且弯向应变轴,曲线出现极值点。无论是3层压实还是5层压实,曲线的变化趋势一致,但是与3层压实相比,5层压实的极值点有明显差异。进入第Ⅳ阶段后,从薄弱面发展开始,试样出现明显的宏观拉张裂缝,裂缝数量和宽度都急剧增加,应力—应变曲线出现负坡降,风积沙颗粒与水泥之间的部分黏结力丧失,试件破坏,如图4所示。然而,3层压实试样的负坡降段斜率总体变化不大,而5层压实试样的负坡降曲线段斜率差异较大,尤其是L5-1和W5-2之间斜率相差最大。综合可知:3层压实试样的粒间连接更加紧密,总体结构更加均匀,力学特性离散较小,应力—应变曲线整体呈现近似“弹—塑性型”;而对于5层压实的试样,试样的应力—应变曲线既有

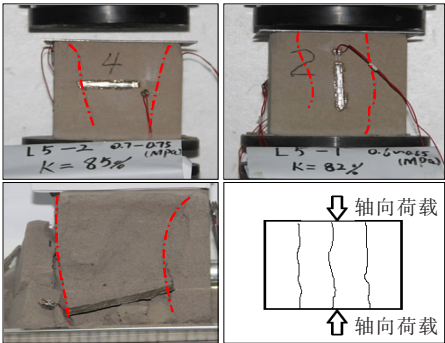


图4 试样破坏模式图

“弹—塑性型”(L5-2和W5-1)又有“塑—弹—塑性型”(L5-1和W5-2),说明无论应力控制压实法还是位移控制压实法,5层压实试样的应力—应变曲线具有明显差异,对力学性质的对比分析有重要影响。

综合以上分析可知,对于立方体风积沙改性土试样,采用3层应力控制压实法制样较优。

3.3 压实度与应力值的关系

在室内采用3层应力控制压实法制作了不同应力水平控制下的95%风积沙+5%水泥系列试样,并利用试样制备步骤(7)中式(4)、(5)计算所制试样的压实度,绘制应力值和压实度关系曲线,如图5所示。

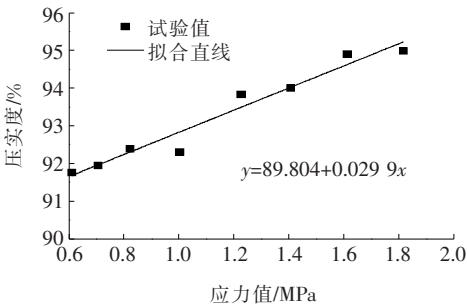


图5 压实度与应力值的相互关系

由图5可知:随着控制应力的不断增加,所制试样的压实度整体增加,压实度与控制应力的拟合关系式为: $y=89.804+0.0299x$,相关系数 $R^2=0.9342$,说明压实度与控制应力有着良好的正相关关系。由此可得风积沙改性土制样的压实度(λ)与控制应力(σ)服从近似的关系式: $\lambda=0.03\sigma+90$ 。当需要配制某一压实度下的风积沙改性土试样时,可通过此经验公式计算出相应的控制应力,对室内风积沙改性土试样进行制备。

4 结论

针对风积沙改性土对大尺寸方形试样的要求,该文通过分层位移控制压实法和应力控制压实法对风积沙改性土试样进行制备,从试样的外观效果和力学特性方面进行对比,确定出较优制样方法,结论如下:

(1) 从制备试样的外观效果分析,位移压实法制备出的试样完整度较差、分层较明显;应力控制压实法所制试样较均匀,无明显分层。

(2) 由试块无侧限抗压强度应力—应变曲线特征可知,3层压实试样的空隙较少且分布均匀,应力—应变曲线趋同性较好;5层压实试样的应力—应变曲线具有明显差异,对后期力学性质的对比分析影响很大。

(3) 对于 3 层应力控制压实法而言,随着控制应力的不断增加,所制试样的压实度整体增加。对于 95% 风积沙+5% 水泥的配比,压实度与控制应力存在近似关系公式:压实度=90+0.03×控制应力。

参考文献:

- [1] 李万鹏. 风积沙的工程特性与应用研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2004.
- [2] 张德媛. 毛乌素沙漠风积砂工程物理特性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2009.
- [3] 陈忠达, 张登良. 塔克拉玛干风积沙工程特性[J]. 西安公路交通大学学报, 2001(3).
- [4] 严西华, 赵永波. 风积沙的工程力学性质试验研究[J]. 山西建筑, 2008(26).
- [5] 安建林. 新疆风积沙力学性质与动力性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2003.
- [6] 张生辉, 李志勇, 彭帝, 等. 风积沙作为路基填料的静力特性研究[J]. 岩土力学, 2007(12).
- [7] 张宏, 王智远, 刘润星, 等. 科尔沁沙地区风积沙路用性能室内试验研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2015(3).
- [8] 李烘星. 风积沙的工程力学性质试验研究[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2007(3).
- [9] 杨人凤, 曾家勇, 林冬. 风积沙压实机理及压实特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011(4).
- [10] 袁玉卿, 王选仓. 风积沙压实特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007(3).
- [11] 董伟, 申向东, 等. 不同风积沙掺量对水泥砂浆流动度和强度的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013(9).
- [12] 李根峰, 申向东, 吴俊臣, 等. 风积沙混凝土收缩变形的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016(4).
- [13] 谢春磊, 张勇. 利用风积沙配制高强混凝土的研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2015(6).
- [14] 付兵先. 不同含泥量风积沙的路用性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2006.
- [15] 王朝辉, 王选仓, 谭雪琴. 路用风积沙固化剂配制及其混合料性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011(1).
- [16] 魏杰. 水泥改良风积沙强度及重载铁路路基风积沙填料变形特性研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2017.
- [17] 张雁, 李维生, 李娟. 水泥风积沙工程性质试验研究[J]. 路基工程, 2010(1).
- [18] Aiban S A. A Study of Sand Stabilization in Eastern Saudi Arabia[J]. Engineering Geology, 1994, 38(1-2): 65-79.
- [19] Wahhab A A, Asi I M. Improvement of Marl and Dune Sand for Highway Construction in Arid Areas [J]. Building and Environment, 1997, 32(3): 271-279.
- [20] Ghrieb A, Mitiche-Kettab R, Bali A. Stabilization and Utilization of Dune Sand in Road Engineering[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(3): 1517-1529.
- [21] Susana López-Querol, Arias-Trujillo J, Gm-Elipe M, et al. Improvement of the Bearing Capacity of Confined and Unconfined Cement-Stabilized Aeolian Sand [J]. Construction and Building Materials, 2017: 374-384.
- [22] 郭莹, 陈珍. 成样方法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响[J]. 土木工程学报, 2010(S2).
- [23] 张浩, 胡江洋, 折学森, 等. 沙漠地区某高速公路风积沙压实特性与压实工艺研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(4).
- [24] 边艳妮, 薛方. 韦罗高速冲积平原区风积沙路基压实工艺[J]. 黑龙江交通科技, 2017(3).
- [25] 贺国峰. 尉犁至且末沙漠公路风积沙填筑路基压实力学特性研究[J]. 湖南交通科技, 2018(2).
- [26] 焦莉, 王磊. 风积沙路基压实特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012(4).
- [27] 任辉明, 曾新迪, 师高鹏. 蒙华重载铁路风积沙路基湿压法工艺研究[J]. 兰州交通大学学报, 2018(6).
- [28] 王磊. 风积沙路基压实质量控制方法研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [29] 韩永久. 风积沙填筑路基施工方法探讨[J]. 公路交通科技, 2006(3).
- [30] 刘玉红, 邱睿, 刘军勇. 厚层风积沙路基压实试验研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2017(4).
- [31] 金昌宁, 金伟涛. 粉黏粒含量对浸水+环刀法测定干燥风积沙密度的影响[J]. 中外公路, 2018(4).
- [32] 金昌宁, 张玉红. 塔克拉玛干沙漠风积沙的剪切变形特征[J]. 中外公路, 2016(1).
- [33] 陈忠达, 李万鹏. 风积沙振动参数及振动压实机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007(1).
- [34] 苏占东, 孙进忠, 周富彪, 等. 风积沙改性土热物理性质的测试与分析[J]. 水利水电技术, 2019(7).
- [35] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].