

毛乌素沙漠砂土地基处理效果分析

门青波 夏玉云 吴兴辉

(机械工业勘察设计研究院, 陕西西安 710043)

【摘要】 在对毛乌素沙漠南缘风积砂进行水坠砂(静水沉积和浸水饱和分层碾压)、振冲密实法(振冲砂桩)及强夯等现场试验的基础上, 对不同地基处理方式后风积砂的物理特性和地基承载力进行了对比分析, 提出了风积砂不同地基处理方式的优缺点, 并对不同地基处理方式的机理进行了探讨。

【关键词】 毛乌素沙漠; 风积砂; 现场试验; 地基处理; 承载力

【中图分类号】 TU 472. 3

【文献标识码】 B

doi:10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2012. 02. 005

Effect Analysis of Sandy Foundation Treatments in MU US Desert

Men Qingbo Xia Yuyun Wu Xinghui

(China JiKan Geotechnical Institute, xi'an 710043, China)

【Abstract】 In the research, some field tests on different grout treatments of sand, including water-treatment (hydrostatic deposition process and Water saturated layered rolling process), vibroflotation and dynamic consolidation were carried out to aeolian sands Subgrade in southern fringe of Mu Us desert. According to these test data, this paper had analyzed the changes on physical characteristics and carried capacity of aeolian sand foundation under different grout treatments. Then it summarized the advantages and disadvantages of different grout treatments for aeolian sand foundation, and discussed the function mechanisms of different treatment methods.

【Key words】 mu us desert; aeolian sand; ground treatment, field test, carrying capacity

0 引言

近年来,随着毛乌素沙漠各类工程建设规模的不断扩大,工程建设中不可避免地遇到风积砂这一特殊地基的处理问题,因而对风积砂地基处理的研究具有十分重要的现实意义^[1]。强夯、振冲密实法(振冲砂桩)、水坠砂法(浸水饱和分层碾压和静水沉积法)是对风积砂地基进行处理常用的方法,以往研究成果多为室内模拟实验分析或有限元分析等方法,而通过现场原位测试的研究则较少。针对这一现状,本文在对毛乌素沙漠风积砂物理特性进行试验研究的基础上,结合毛乌素沙漠某工业园区现场试验结果对风积砂不同地基处理方式的效果进行对比分析,并对其机理进行探讨,旨在为同类工程地基处理提供借鉴和参考。

1 不同地基处理方式的试验方法

1.1 研究内容

室内进行了不同深度下风积砂的颗粒分析试验(筛分法和比重计法),最大、最小干密度试验,静水沉积砂和饱和振击砂的干密度试验;现场进行了天

然状态、水坠砂(静水沉积和浸水饱和分层碾压)、振冲砂桩及强夯地基处理方法后的干密度、含水量和地基载荷试验,干密度和含水量通过灌水法试验取得,载荷试验承压板面积为 0.785 m²。

1.2 试验方法

1) 室内静水沉积砂和饱和振击砂的干密度试验

取自场地表层的风积砂进行试验,该种试验在《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)中没有相关的规定,采用了底部开孔并在底部铺设滤纸的容器,将水盛满后开始往容器中缓慢倒入砂,待砂顶面接近水面时停止倒入砂。待砂中的自由水排完后称量容器中砂的质量、体积和砂的含水量,并根据称量结果计算砂的干密度。水中振击砂的干密度试验方法与静水沉积砂相同,不同之处在于往容器中缓慢倒入砂时对容器进行振击,振击方法与进行砂最大干密度试验时采用的方法类似。

2) 水坠砂法

现场水坠砂法 1(静水沉积):试坑的尺寸为 6 m×12 m,下附薄膜铺垫,在坑中注满水,然后将砂缓慢填入

水中,直至将坑填满、整平。填砂的过程中始终保持水头位于试坑坑口(即试坑中的水始终是满的)。待砂中的自由水排完后(一般至少等待 48 h)即开始载荷试验和含水量、干密度测试。选择了 3 种厚度的试验体,试验水深分别为 0.6 m、1.5 m 和 2.0 m,在每个载荷试验点两侧采用灌水法分别进行一次砂的含水量、干密度试验。

现场水坠砂法 2(浸水饱和和分层碾压):试坑的尺寸为 6 m×12 m,在坑中分层铺设砂,分层厚度按 0.3 m 控制,然后在该层砂上浸水直至其饱和。分层碾压设备采用 50 型装载机,碾压遍数按 7~12 遍控制。分层碾压达到预定厚度后,待砂中的自由水排完(一般至少等待 48 h)即开始载荷试验和含水量、干密度测试。选择了 2 种厚度的试验体,试验厚度分别为 0.6 m 和 1.5 m,在每个载荷试验点两侧采用灌水法分别进行一次砂的含水量、干密度试验。

3)振冲密实法(振冲砂桩)

振冲密实法(振冲砂桩)是在水和振动作用下使松散砂得到密实,使地基承载力得到提高。振冲砂桩采用 45 kV 振冲器振冲成孔,振冲砂桩桩径 900 mm,桩距 1500 mm,排距 1300 mm,4 根试桩桩长分别为 12.5 m、13.0 m、14.5 m 及 14.0 m,等边三角形布置。对振冲密实法(振冲砂桩)进行载荷试验和振冲处理后砂的含水量、干密度试验。

4)强夯法

强夯试夯第一、第二遍采用 8000 kN·m 能级,锤重 48 t,落距 16.7 m;第三遍采用 4000 kN·m 能级,锤重 48 t,落距 8.4 m;满夯采用 1500 kN·m 能级,锤重 12 t,落距 12.5 m,点夯距为 4.5 m。对强夯后地基进行载荷试验和强夯处理后砂的含水量、干密度试验。

2 试验成果及分析

2.1 室内试验成果

根据试验,发现本地地砂具有以下特性:

1)在 30.0 m 深度范围内砂粒径级配曲线形态非常相近,都属粉细砂;

2)粒径在 0.075~0.5 mm 范围内的颗粒含量大于 80%,小于 0.075 mm 的颗粒(细粒)含量接近 10%,小于 0.005 mm 的颗粒(粘粒)含量约在 2%左右;

3)室内试验得到的最小干密度为 1.45~1.48 g/cm³,平均值为 1.46 g/cm³;最大干密度为 1.70~1.72 g/cm³,平均值为 1.71 g/cm³;静水沉积砂的干密度为 1.57~1.61 g/cm³,平均值为 1.59 g/cm³,大于砂的最小干密度,为中密状态;水中振击沉积砂的干密度为 1.71~1.74 g/cm³,平均值为 1.73 g/cm³,与砂最大干密度比较接近,为密实状态。

2.2 不同地基处理方式试验成果对比分析

风积砂在天然状态下和水坠砂(静水沉积和浸水饱和和分层碾压)、振冲密实法(振冲砂桩)及强夯地基处理方法后的含水量、干密度试验结果统计见表 1,载荷试验 p-s 曲线见图 1。

表 1 风积砂在不同状态下的含水量、干密度统计表

风积土砂状态	密度/(g·cm ⁻³)		含水量/%		干密度/(g·cm ⁻³)		
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	
天然状态	1.57~1.59	1.58	2.70~3.20	3.08	1.52~1.54	1.53	
水坠砂法 1(静水沉积)	0.6 m	1.63~1.67	1.64	3.00~3.40	3.18	1.58~1.62	1.59
	1.5 m	1.61~1.65	1.63	3.60~4.50	4.12	1.54~1.59	1.57
水坠砂法 2(浸水饱和和分层碾压)	2.0 m	1.61~1.65	1.63	3.50~4.10	3.93	1.55~1.59	1.57
	0.6 m	1.67~1.96	1.85	9.67~9.90	9.81	1.52~1.78	1.73
振冲密实法(振冲砂桩)	1.5 m	1.87~1.95	1.90	9.60~9.90	9.70	1.71~1.77	1.74
	强夯	1.70~1.71	1.71	3.40~4.40	3.90	1.64~1.65	1.64
		1.90~1.92	1.91	3.30~3.60	3.38	1.84~1.85	1.85

由表 1 和图 1 及现场荷载试验可知:

天然风积(回填)砂的干密度平均值为 1.53 g/cm³,为松散状态,地基承载力特征值可取 75 kPa;不同厚度(0.6 m、1.5 m 和 2.0 m)静水沉积砂的干密度为 1.57~1.59 g/cm³,为中密状态,地基承载力特征值可取 100 kPa;不同厚度(0.6 m 和 1.5 m)浸水饱和和分层

碾压砂的干密度为 1.72~1.73 g/cm³,为密实状态,地基承载力特征值不小于 250 kPa;振冲密实法(振冲砂桩)地基处理后的砂干密度平均值 1.64 g/cm³,为密实状态,地基承载力特征值可取 200 kPa;强夯法地基处理后的砂干密度平均值为 1.85 g/cm³,为密实状态,地基承载力特征值不小于 250 kPa。

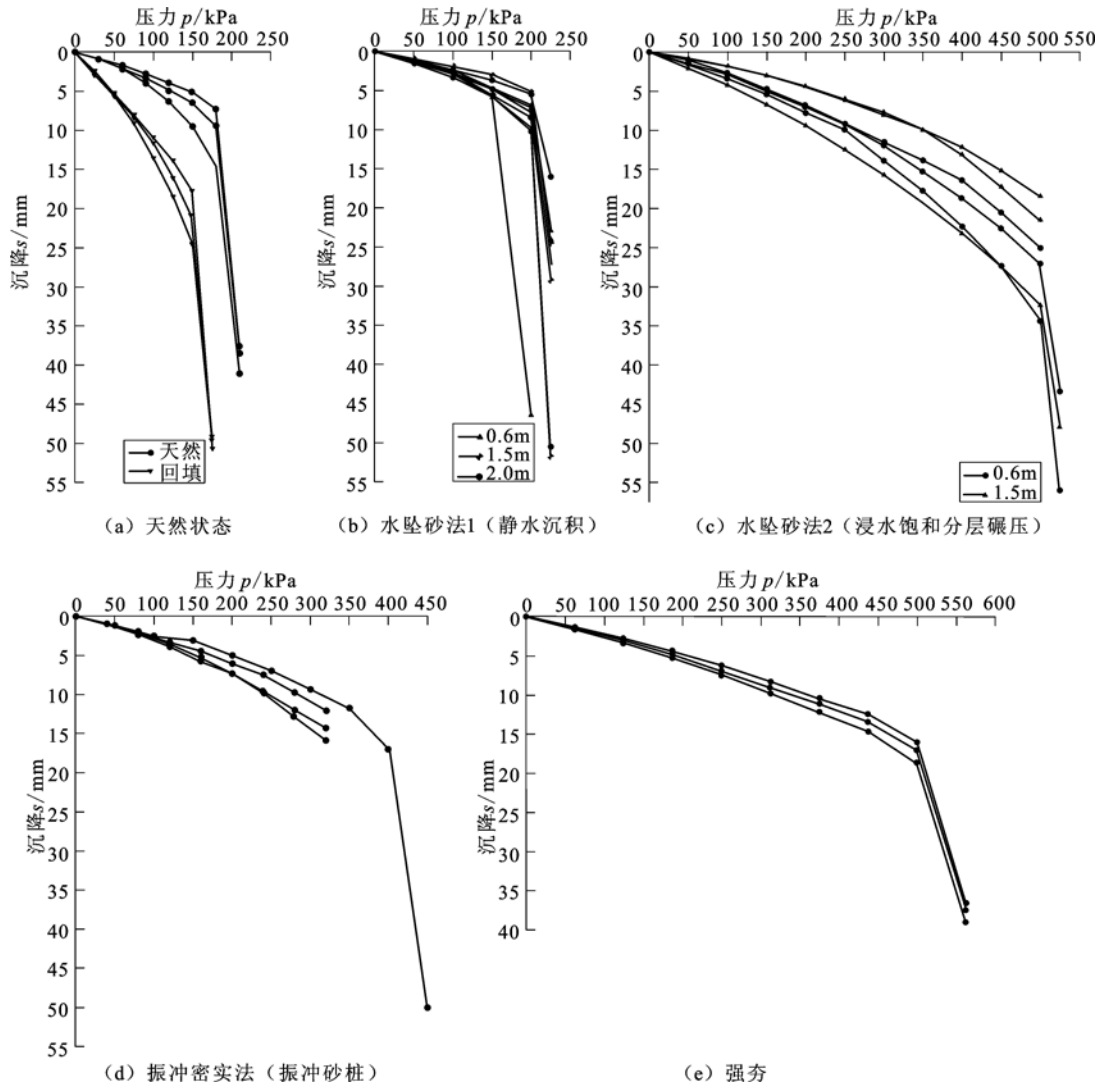


图1 风积砂在不同状态下的载荷试验 p-s 曲线

对不同地基处理方法处理后的砂进行了干密度、地基承载力试验,现对不同地基处理方法的主要

指标及各种地基处理方法的优缺点进行对比见表2。

表2 松散风积砂地基处理方法对比表

地基处理方法	地基承载力特征值 /kPa	干密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	优点	缺点
天然	75	1.53		
静水沉积	(0.6m)90	1.59	经济;施工方法简单,无需大型机械设备。	承载力不高,用水量大,需要开挖。
	(1.5m)100	1.57		
浸水饱和分层碾压	(0.6m)250	1.73	经济、施工方法简单,用装载机碾压即可,承载力较高,用水量不算太大。	需要开挖并需要机械碾压。
	(1.5m)250	1.74		
振冲密实法(振冲砂桩)	>200	1.64	无需开挖,处理深度可至密实砂层,施工较方便,承载力尚可。	用水量大。
强夯	>250	1.85(浅部)	无需开挖,施工较方便快捷,承载力尚可。	对周边建(构)筑物影响较大。

3 机理探讨

3.1 风积砂微观结构

根据对不同干密度的风积砂进行偏光显微镜观

察:风积砂的颗粒之间的接触方式主要有点—线接触、线—面状接触;而孔隙结构类型以支架结构为主,偶有架空结构的孔隙。随着干密度增大,风积砂

构成孔隙的颗粒之间的接触方式由点接触为主→点和线接触为主→线一面接触,孔隙结构类型由不稳定架空结构→较为稳定的支架结构,大孔隙所占比例降低,中小孔隙所占比例增高。显微结构表明,风

积砂颗粒之间的接触方式以及孔隙的结构类型与其干密度有关。随着干密度增大,风积砂颗粒重新排列至压密状态,内摩擦角与粘聚力有增大的趋势,地基承载力相应地提高。

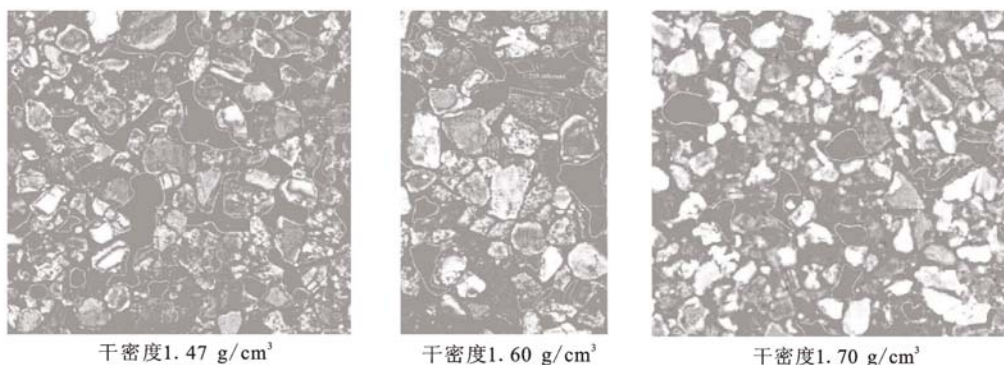


图2 风积砂不同干密度下的偏光显微镜照片^[2]

3.2 水坠砂机理探讨

3.2.1 静水沉积

风积砂发生渗透作用时,其过程表现为天然砂层中的固相、液相、气相平衡的破坏。重力水在重力作用下渗过砂层而发生流动,对砂粒及结构物都有浮力作用,在这种浮力作用下,砂层中的气相大多被液相置换,砂粒得以重新排列,颗粒间孔隙减小。起初由于砂粒间孔隙较大,渗透作用较强,气相置换液相表现也较强;随着孔隙的减小,置换作用逐步减弱,砂粒间剩余的气相被封闭于狭窄的孔隙内部,最终形成暂时的稳定状态。由于其处于暂时的稳定状态,砂层中的微结构状态依然较为疏松,因而静水沉积作用下风积砂地基承载力仍然不高。

3.2.2 浸水饱和和分层碾压

在碾压荷载作用下,风积砂宏观上表现为在碾压过程中砂层总体积或总厚度的减小,在物理学

性质上表现为密度的提高,在工程性质方面则表现为地层强度的明显增强。这一过程实际上是在静水沉积作用的基础上,受碾压荷载作用,静水沉积作用达到的平衡状态再次被破坏,砂层中的液相减少,气相也进一步减少。碾压荷载作用为砂粒从不稳定微结构向有序稳定的微结构的过渡提供了动力条件^[3],破坏砂粒微结构,使得砂颗粒液化,接触处有效应力减小至零,砂颗粒随机处于一种悬浮状态,为砂粒的重新排序提供了良好的环境,在这种环境下,风积砂颗粒的自身姿态趋于向低势能的自稳姿态调节,最终结果使得颗粒之间孔隙体积减小而接触面积增大,风积砂颗粒的总势能降低。碾压结束后,砂层内的自由水在重力作用下排出(毛细水则滞留于孔隙内),使得砂粒间结合更为紧密。风积砂由碾压前疏松的微结构状态变为相对紧密的微结构状态,地基承载力较静水沉积显著提高。

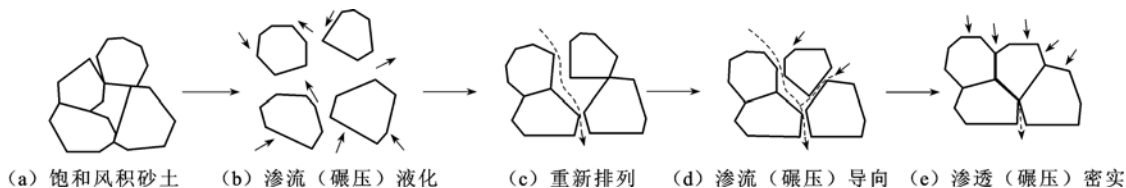


图3 水坠砂机理示意图

注:图中不规则多边形表示砂颗粒

3.3 振冲密实法(振冲砂桩)及强夯机理探讨

振冲作用对砂层的振密作用机理与碾压作用类似,依然是砂层中的固相、液相、气相原平衡的破坏和新平衡产生,期间经历振动液化→重新排列→渗流导向→渗透压密等过程。振冲(强夯)作用可以对砂施加比静压力、碾压作用大的多的瞬时作用力,高

压力作用对风积砂颗粒产生一定的破坏作用,颗粒重定向和重排列,从表面传至砂层内部的压力波更深、更强,同时振冲作用可以减小土颗粒之间的内摩擦力和粘聚力,从而使砂更好地吸收冲击作用所施加的巨大能量,这种复合作用会大大强化了压实效果。振冲(强夯)后颗粒之间的接触面积较之静水沉

(下转第85页)

这个参考值是试验得出,太大或者太小都会对试样扰动破坏。

3)试验验证了应用 ASTM 标准进行孔压稳定判断的可行性,即孔压在 1 min 内的变化值小于围压和反压之间的压力差的 5%,则认为孔压稳定。

4)三种不同的加压饱和方式各具优缺点。手动加压饱和由人工操作实现,可以灵活设置各级围压,每级加压结束可测得实时的 B 值,从而能够随时控制试验的进程。缺点是费时相对来说较长(3~5 h)。自动加压方式要求对土样的性质有较好的了解才能使饱和和试验一次性的成功,其缺点在于一次施加围压不稳定,且整个施加压力和孔压量测量过程中偶尔会出现管路抖动现象,原因是其一次性加压较大造成的。对于连续性自动加压饱和方式能够高效的对吹填土样进行饱和并且用时较短(2 h 左右),但是对于连续性自动加压饱和方式合理设置各个 ID 下的压力是试验成功的关键。

本文给出了三种不同加压方式下对于天津吹填土较为合理的参数,可供参考。

参 考 文 献

- [1] 杜东菊,杨爱武. 天津滨海吹填土[M]. 北京: 科学出版社,2010:1-11.
- [2] 王江宏. 天津市滨海新区吹填土快速结壳的真空预压法研究[D]. 天津:天津城市建设学院硕士论文,2008:1-9.
- [3] SL_237-1999 土工试验规程[S]. 162.
- [4] GB/T50123-1999 土工试验规范[S].
- [5] 沈 扬. 考虑主应力方向变化的原状软粘土试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [6] 孙海妹,王兰民,等. 原状黄土的反压饱和法试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2002,30(1):98-102.
- [7] Annual book of ASTM standards [S]. Soil and rock (1), American Society for Testing and Materials.
- [8] CATS Hollow Cylinder Test Mode 1. 91, User's Guide and Reference[R].
- [9] British Standard[S] Soils for civil engineering purposes, British Standards Institution.

收稿日期:2012-01-11

(上接第 77 页)

积和碾压作用有所增加,颗粒间排列更为紧密,砂土

的内摩擦角增大,使承载力提高。

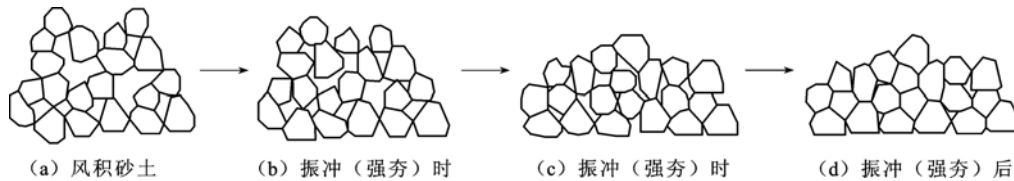


图 4 振冲及强夯机理示意图

注:图中不规则多边形表示砂颗粒

4 结 论

1)风积砂干密度可变化范围一般在 $1.53 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$,地基承载力随干密度的增加而增加。

2)通过室内室外试验结果表明:水坠砂、振冲砂桩及强夯是毛乌素沙漠风积砂地区较为适用的施工方法,处理后可达到的干密度依次为:强夯>振冲砂桩>浸水饱和分层碾压>静水沉积。

特性室内实验研究[J]. 工程地质学报. 2010,18(6): 894-899.

[2] 张德媛. 毛乌素沙漠风积砂工程物理特性研究[D]. 西安:长安大学,2009:28-29.

[3] 李邦旭. 毛乌素沙漠风积砂地基力学特性研究[D]. 西安:长安大学,2009:29.

收稿日期:2011-12-16

参 考 文 献

[1] 宋焱勋,彭建兵,王志军,等. 毛乌素沙漠风积砂力学