

颗粒级配对真空预压法处理吹填土效果影响试验研究

颜永国, 董志良, 杨昌斌, 陈平山, 邱青长

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 采用改进的真空预压试验模型对颗粒级配对吹填土加固效果的影响进行试验研究, 在相同的加载条件下进行了 7 组不同颗粒级配的试样真空预压室内模型试验, 分别从土体的沉降量、排水量、物理力学试验等几个方面对不同试样的加固效果进行对比分析, 简述吹填土的颗粒级配对加固效果的影响。试验结果表明, 采用真空预压加固吹填土, 不同的颗粒级配对沉降量、排水量和加固后物理力学性质有显著影响, 是影响吹填土加固效果的主要因素。试验结果对在吹填土选择合适加固方法时有一定指导意义。

关键词: 吹填土; 颗粒级配; 加固效果; 沉降量; 排水量

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)11-1775-05

作者简介: 颜永国(1979-), 男, 浙江台州人, 工程师, 主要从事软基加固研究。E-mail: yyongguo@g2pcc.com。

Experimental study on effect of grain size distribution on improvement of dredger fill

YAN Yong-guo, DONG Zhi-liang, YANG Chang-bin, CHEN Ping-shan, QIU Qing-chang

(Engineering Technology Research Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: By using the improved vacuum preloading model, the effects of grain size distribution on the improvement of dredger fill are studied. Laboratory vacuum preloading tests on seven groups of samples with different grain size distributions are performed under the same loading condition. Then axial settlement, drainage flow and physical mechanics are analyzed to study the effects of the grain size distribution on the improvement of dredger fill. The results show that different grain size distributions have great influences on the axial settlement, drainage flow and the properties of soils, and the grain size distribution is a key factor to influence the improvement of the dredger fill if the vacuum preloading is adopted to improve dredger fill. This study has guiding significance for choosing the proper improvement method for the dredger fill.

Key words: dredger fill; grain size distribution; improvement; settlement; drainage flow

0 引言

真空预压法是利用抽真空来加固软土地基的一种地基加固方法, 在吹填造陆、公路、机场、民用建筑等工程中的软基处理中广泛应用^[1-3]。近些年在吹填造陆工程中, 真空预压处理方法陆续出现失败案例。究其原因, 与吹填土的颗粒组成有较大关系, 如吹填土颗粒较细, 在真空预压过程, 容易出现细颗粒在竖向排水体周边堆挤形成土柱, 而导致竖向排水体失效, 导致整个真空预压处理方法失效。吹填土的工程性质与颗粒组成有密切关系, 对含砂量较多的吹填土, 它的固结情况和力学性质较好。对含黏土颗粒较多的吹填土, 则往往是属于强度较低和压缩性较高的欠固结土, 其强度和压缩性指标都比同类天然沉积土差。目前对土的颗粒组成对土的工程性质影响的国内外研究主要集中在对孔隙介质对渗透系数的影响^[4-5]。对于一些特殊土质, 如超软弱淤泥或吹填土, 其颗粒组成对

加固效果影响的相关理论和试验研究比较少。本文试图通过增加吹填土中起骨架作用的粗颗粒含量, 改善吹填土的颗粒级配情况, 进行室内真空预压模拟试验^[6-8], 研究吹填土的颗粒级配对其加固效果的影响。

1 室内试验

1.1 试验内容

对掺入不同粒径和不同掺量的粗颗粒的吹填土进行室内真空模型试验, 通过分析真空预压试验过程沉降量、排水量和加固后物理力学指标数据来对比各颗粒级配下吹填土固结性质的影响。

室内模型试验共进行 7 组对比试验, 7 组试验都在 80~90 kPa 的真空度(储压罐)条件下进行, 至试样变形基本稳定即停止试验。试验过程中, 记录试样

的竖向沉降量、排水量和试样中部的孔压值，对比分析各试样在不同颗粒级配条件下三种变量随时间变化情况，并测定试验后各组试样的基本物理力学参数，进行对比分析。

1.2 试验所用土料及试样的制备

试验所用土料为深圳淤泥，其基本的物理性质参数见表 1，颗粒粒径分布曲线如图 1 中不掺砂所示。模型试样制备的关键是使试样的起始状态相近，以消除因起始状态不同对试验成果有效性的影响，所以要求在试样制备过程中进行充分的搅拌并在 20 环境下静置 24 h，以保证含水率均匀。

表 1 试验土料物理性质

Table 1 Physical properties of soft samples

液限/%	塑限/%	塑性指数/%	土粒比重
62.7	33.9	28.8	2.73

表 2 掺入砂的种类与掺量

Table 2 Species and mixing amount of sand incorporation

序号	粗砂(1~2 mm)/%	粗砂(0.5~1 mm)/%	细砂(0.25~0.074 mm)/%
1	0	0	0
2	2.5	2.5	0
3	5	5	0
4	7.5	7.5	0
5	0	0	5
6	0	0	10
7	0	0	15

土料经过风干、碾压、过筛等工序。砂经洗净、烘干、筛分备用。先将风干土料与砂混合，搅拌均匀，将砂与干土按一定比例混合，各组试验掺入砂的种类与掺量见表 2，掺入砂后各土样的颗粒粒径分布曲线如图 1 所示。按含水率 $w=105\%$ 加入适量的水，再搅拌均匀，并静置 24 h。制样时分层装入至规定高度，并充分排气，再将塑料排水板垂直打设到制备的土样中，塑料排水板的高度为 82 cm、宽度为 5 cm、厚度为 0.4 cm，在淤泥土的顶部铺设 10 cm 厚的中粗砂垫层，并保证砂垫层与塑料排水板有良好的接触。

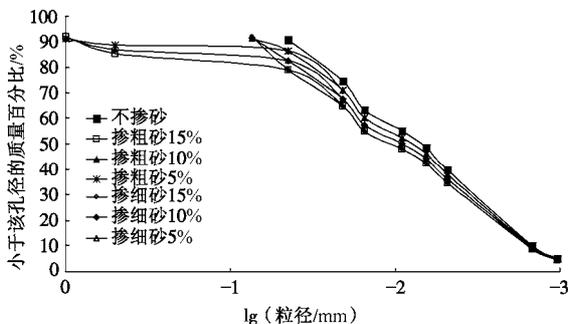


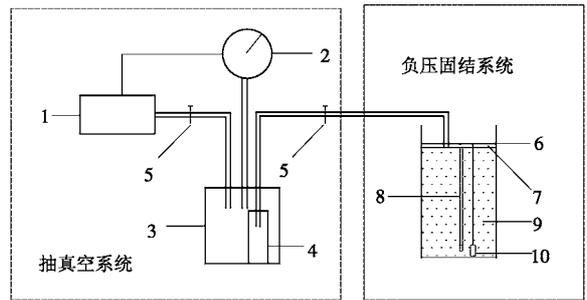
图 1 配制土的颗粒粒径分布图

Fig. 1 Grain size distribution curves of reconstituted samples

1.3 试验仪器简介

试验仪器主要由抽真空系统和模型容器组成，示

意图见图 2，实际模型组成如图 3 所示。



1、真空泵 2、电接真空表 3、储压及水气分离装置 4、量筒 5、阀门 6、密封膜 7、砂垫层 8、排水板 9、掺砂土样 10、孔压力计

图 2 试验仪器示意图

Fig. 2 Sketch of test apparatus

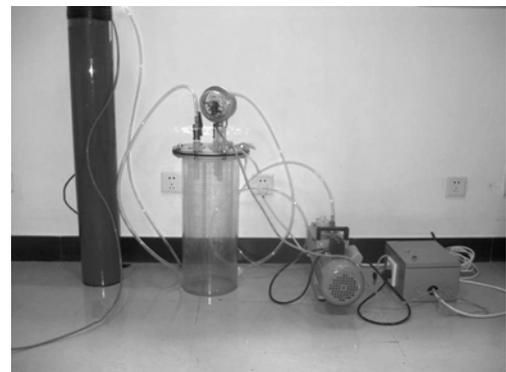


图 3 试验仪器组成

Fig. 3 Composition of test apparatus

(1) 抽真空系统

a) 真空泵

本试验中所使用的真空泵为 ZXZ-1 型直联双级旋片式真空泵，主要用来为模型试验提供真空压力。

b) 储压及水气分离装置

主要是起到稳定系统的真空压力作用，真空压力的大小是通过与真空泵相连的电接点真空表来控制。当真空度小于设定的下限值时，真空泵就会自动开启，对系统进行抽真空，以提高系统的真空度；当真空度大于设定的上限值时，真空泵又会自动关闭，以此保证在试验过程中整个系统的真空压力始终恒定在某个压力范围内。储压装置在稳定真空压力的同时实现预压过程中水气分离，并通过筒壁外侧的竖尺来量测排水量。

(2) 模型容器

模型容器用有机玻璃制成圆筒形，其大小为内径 15 cm，高度 100 cm，壁厚为 5 cm，内壁抹有润滑剂，以减小模型内壁摩擦阻力对试验结果的影响。模型外壁左右各贴竖尺，测量试验过程中沉降量。试验过程中在模型容器上部铺设柔性的密封膜，密封膜根据模型外形制成筒状，便于安装，并防止试验过程出现

较大沉降而导致密封膜撕裂, 影响系统密封性。四周用自黏胶布扎牢固定, 确保有良好的密封性。在模型容器的顶部打设有 2 个孔洞, 抽气管、真空表的电缆通过引孔进入模型容器, 为模型提供真空压力和在抽真空过程中测量膜下的真空度。

1.4 试验过程

首先, 按照试验要求将试样装入到模型容器中, 并静置 4 h, 让其在自身重力作用下自然固结, 至变形基本稳定后再进行抽真空预压, 试验过程中保持真空度为 (85 ± 5) kPa。抽真空过程中, 由于土体中孔隙水压力差的存在, 土体内的水和气被大量地排出, 伴随着孔隙水的排出, 土样也随之发生固结变形。试验过程中同时记录土体的沉降量、排水量、真空表读数, 待试样变形基本稳定后结束试验, 并测定试验后试样的物理力学性质指标, 试样固结时间大约为 5 d。

2 试验结果分析

2.1 沉降量变化分析

各掺砂情况下沉降随时间变化曲线如图 4 所示。在经历相同的固结时间 (5 d) 后, 沉降基本稳定。从图 4 中可以看出, 各试样在加载初期, 沉降曲线下降较快, 30 ~ 40 h 后沉降速度逐渐放缓。与不掺砂土样相比, 各掺砂试样最终沉降量随着掺砂量而增加。在同等掺量下, 掺粗砂试样比掺细砂试验的沉降量要大。掺粗砂 15%, 10% 和 5% 分别提高 19.0%, 11.8%, 5.5%; 掺细砂 15%, 10%, 5% 分别提高 7.1%, 5.1%, 2.9%, 详细数据如表 3 所示。根据各试样的实测表面沉降数据进行曲线拟合^[2], 计算最终沉降量并计算固结度。由固结度与时间关系图(图 5), 同等达到 90% 固结度, 不掺砂试样需要 74 h, 掺粗砂 15%, 10%, 5% 分别需要 43, 46, 52 h, 掺细砂 15%, 10%, 5% 分别需要 64, 65, 66 h。随着掺砂量的增加, 试样固结时间有较大缩短, 同等掺量下, 掺粗砂试样的固结速度要大于掺细砂试样, 掺入 5% 粗砂试样即可缩短 30% 的固结时间。

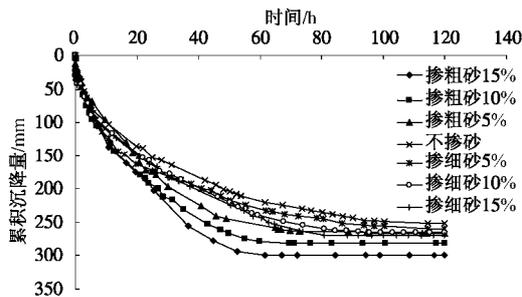


图 4 沉降量随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of axial settlements with time

表 3 最终沉降量对比
Table 3 Comparison of final axial settlements

项目	不掺砂	掺粗砂			掺细砂		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
最大沉降量/mm	252.0	265.9	281.8	300.0	259.3	265.9	270.0
差值/mm	—	13.9	29.8	48.0	7.3	13.0	18.0
沉降量增幅/%	—	5.5	11.8	19.0	2.9	5.1	7.1

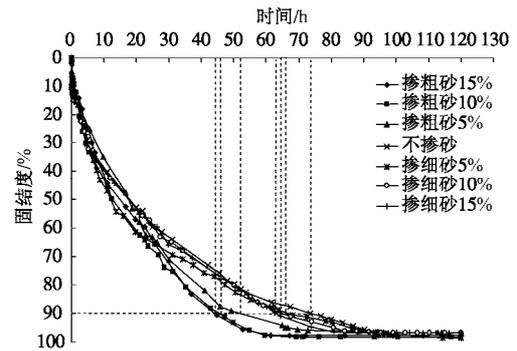


图 5 固结度随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of consolidation degree with time

2.2 排水量变化分析

真空预压法属于排水固结软基处理软土地基的方法, 排水效果的好坏将直接影响加固的效果。图 6 为各掺砂量下排水量随时间的变化曲线, 从图 6 可以看出, 各试样排水量随着掺砂量而增加。在同等掺砂量下, 掺粗砂试验排水量要大于掺细砂试样, 各掺砂量下各试样对比不掺砂试样的排水量差值见表 4。掺粗砂 5%, 10%, 15% 试样对比不掺砂试样排水量分别提高 5.4%, 9.8%, 19.5%; 细砂掺入 5%, 10%, 15% 试样对比不掺砂试样排水量分别提高 1.0%, 5.1%, 7.1%。试样的排水量和排水速率都得到了较大的提高。掺粗砂试样排水量要明显高于掺细砂试样, 同等掺砂量下, 掺粗砂试样排水量增量约为掺细砂试样的 2 倍。因而, 掺粗砂的试样真空预压的加固效果要好于掺细砂试样。

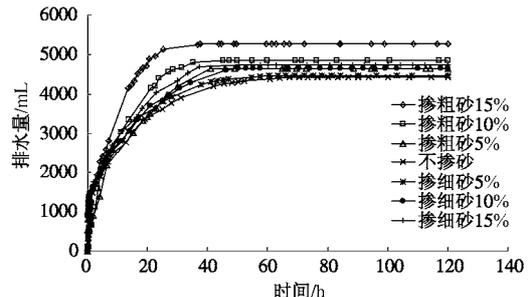


图 6 排水量随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of drainage flows with time

表4 最终排水量对照表
Table 4 Comparison of final drainage flows

项目	不掺砂	掺粗砂			掺细砂		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
最大排水量/cm ³	4414	4653	4847	5275	4459	4637	4759
差值/cm ³	—	239	433	861	45	223	315
沉降量增幅/%	—	5.4	9.8	19.5	1.0	5.1	7.1

2.3 物理力学性质变化分析

表5列出各试样抽真空试验后土体的物理性质指标,通过这些指标的对比可以很好地比较各掺砂量和掺砂种类对加固效果的差异。从对比来看,抽真空后各试样加固后的物理性质有较大改善,表现为含水率大幅下降,孔隙比减少,密度增加,这是由于在抽真空过程中,排出大量的孔隙水,土颗粒间的孔隙减少,土体被压实,土体的性质得到显著改善。由于砂的掺入,7组试验对土体的加固程度存在一定的差别,掺粗砂试验固结效果要明显好于掺细砂的;掺砂量大的效果明显好于掺砂量小的。从直剪结果来看,掺入砂

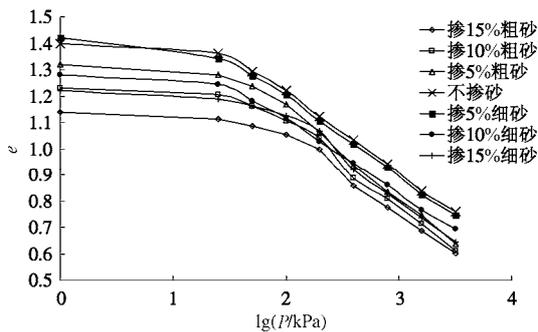


图7 加固后 e - lgP 曲线

Fig. 7 Curves of e - lgP after improvement

表5 预压后土体的物理性质指标

Table 5 Soil properties after preloading

项目	含水率 w/%	孔隙比 e	湿密度 γ/(g·cm ⁻³)	压缩系数 α _{v1-2} /(MPa ⁻¹)	高压固结		直剪试验		十字板剪 切强度 /kPa
					先期固结 压力 P _c /kPa	压缩指数 C _c	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	
掺5%粗砂	48	1.32	1.74	1.05	41.2	0.325	3.8	10.2	6.3
掺10%粗砂	44	1.23	1.77	0.67	55.7	0.331	4.8	10.4	6.9
掺15%粗砂	40	1.14	1.79	0.55	61.6	0.289	6.3	11.8	8.3
掺5%细砂	49	1.39	1.72	1.01	36.6	0.331	4.6	4.1	5.6
掺10%细砂	46	1.28	1.73	0.72	43.6	0.328	4.0	6.2	5.9
掺15%细砂	44	1.22	1.76	0.65	54.8	0.315	4.3	7.8	6.7

后,试样内摩擦角大幅增加,黏聚力也有小幅增加,对比十字板剪切试验结果来看,内摩擦角的提高对土样加固后剪切强度影响不大,吹填土加固后的强度提高主要还是依赖黏结力的提高。图7为加固后各试样的 e - lgP 曲线,在低荷载下,掺砂后压缩量要明显减小,具有良好的加固效果。

3 结 论

通过室内模型试验探讨颗粒级配对吹填土在真空预压过程中固结性质的变化影响,得出以下几点结论。

(1)不同级配条件下,掺粗砂的试样沉降量要大于掺细砂,掺15%粗砂试样的沉降量最大,是不掺砂试样的1.2倍,掺细砂试样沉降量增量要小于掺粗砂试样,说明土体颗粒级配特征对固结性质有较大影响。

(2)由于粗颗粒的掺入,试样的排水量和排水速率都得到了较大的提高。随着掺砂量的增加,试样的沉降量增加,固结时间缩短,排水量增加,掺入粗颗粒的粒径越大,上述效果越明显。同等掺量下,掺粗砂试样排水量增量约为掺细砂试样的2倍。

(3)采用抽真空方式加固后各试样加固后的物理力学性质有较大改善,表现为含水率大幅下降,孔隙比减少,密度增加,强度有较大增长,随着粗颗粒掺量的增加,土体加固后物理力学性质指标也相应改善,掺粗砂试样改善效果要好于掺细砂试样。

在围海造陆工程中,选择真空预压加固方法时,应对吹填土的颗粒组成重点考虑,针对土体性质和工程具体要求,并合理改善预加固土的颗粒级配,设计合理的施工工艺,对节约工程投资和达到工程预期效果都有积极的意义。

参考文献:

- [1] KJILLMAN K. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure[C]// Proceedings of a Conference on Soil Stabilization. Boston: MIT, 1952: 258-263.
- [2] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱吹填淤泥土试验研究及实践[D]. 广州: 华南理工大学, 2006. (ZHANG Gong-xing. Experimental study and practice on large area super-soft reclamation silt consolidated by vacuum preloading[D]. Guangzhou: Dissertation of South China University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [3] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. (LOU Yan. Technique of vacuum drainage preloading[M]. Beijing: China Communication Press, 2002. (in Chinese))
- [4] 叶正强, 李爱群, 杨国华, 等. 黏性土的渗透规律性研究[J]. 东南大学学报, 1999, 29(5): 121-125. (YE Zheng-qiang, LI Ai-qun, YANG Guo-hua, et al. Study of permeability for cohesive soil[J]. Journal of Southeast University, 1999, 29(5): 121-125. (in Chinese))
- [5] 叶含春. 基于分形理论的松散介质渗透系数空间预测—以河北平原为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2000. (YE Han-chun. Prediction of hydraulic conductivity of porous media based on the fractal theory[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2000. (in Chinese))
- [6] 刘汉龙, 李豪, 彭劫, 等. 真空-堆载联合预压加固软基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 145-149. (LIU Han-long, LI Hao, PENG Jie, et al. Laboratory test on vacuum preloading combined with surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 145-149. (in Chinese))
- [7] 吴桂芬, 高玉峰, 魏代现, 等. 真空和堆载两种预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 95-98. (WU Gui-fen, GAO Yu-feng, WEI Dai-xian, et al. Study on laboratory test of vacuum and surcharge preloading[J]. Rock and Soft Mechanics, 2005, 26(S0): 95-98. (in Chinese))
- [8] 张诚厚, 王伯衍, 曹永琅. 真空作用面位置及排水板间距对加固效果的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 45-52. (ZHANG Cheng-hou, WANG Bo-yan, CAO Yong-lang. The influence of vacuum location and the spacing of drain well on the effect of preloading improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 45-52. (in Chinese))

第三届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会

三号通知

主办单位: 中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会; 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 中国土工合成材料工程协会。

承办单位: 上海大学。

协办单位: 上海市土木工程学会; 《土木工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部。

会议议题: 城市建设引起的岩土工程问题; 自然灾害区域环境岩土工程问题; 城市垃圾及污染废弃物的处理技术; 污染土壤及修复技术; 环境岩土工程相关试验与监测技术; 高铁、地铁长期运营中的环境问题; 地下工程施工中的环境问题; 土工合成材料在环境土工中的应用; 土工加筋与加固技术及其应用; 低碳环境与岩土工程。

会议主要日程: 11月18日全天, 注册报到(五角场华美达大酒店); 11月19日, 上午, 开幕式、特邀报告, 下午, 主题报告、创新论坛(上海大学新校区(宝山)); 11月20

日上午, 主题报告; 下午, 分会场报告(五角场华美达大酒店); 11月21日, 考察上海长江隧桥工程、崇明岛湿地。

会议注册: 参会代表 900元/人(含资料费), 学生代表 500元/人(凭学生证), 陪同人员 500元/人。

报到地点: 五角场华美达大酒店; 地址: 黄兴路 1888号(近五角场国定东路)。

材料及设备展览: 会议期间将举办土工合成材料产品、岩土仪器设备展示, 新产品发布及专题报告, 欢迎相关单位报名参加。

大会秘书处联系方式: 会议网址: <http://www.ce.shu.edu.cn/Default.aspx?tabid=9452>; 会务组电子邮件地址: wjzhang2006@shu.edu.cn; 联系地址: 上海市延长路 149号上海大学土木工程系 200072; 联系人: 张文杰副教授, 13611886341(M), 陆焯博士 15221715316(M), 黄瑾老师 13916080789(M), 021-56332265(O), 传真: 021-56332265。

(第三届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会大会秘书处 供稿)