

建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究

魏雁冰^{1,2}, 范明桥¹, 林生法¹, 徐 锴¹, 吴志强¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 为了寻求更为经济和环保的建筑废弃泥浆处理方法, 采用3种不同排水系统的真空预压方法对泥浆池的处理开展了试验研究. 系统分析了不同真空预压试验场地的表面沉降、孔隙水压力等监测数据. 真空卸载后, 通过原位十字板试验和平板载荷试验对地基承载力进行了检测, 并对处理前后土体的物理力学特性变化进行了总结. 结果表明, 3个试验场地的地基承载力均有显著提高, 其中以气管-滤管结合的真空抽吸排水方法效果最优.

关键词: 废弃泥浆; 真空预压; 沉降; 孔隙水压力; 地基承载力

中图分类号: TU472.99 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.201503055

0 引言

建筑工程施工常会产生一定数量的废弃泥浆, 这些泥浆基本上采用管道输送或车运方式集中倾倒堆放空地集中贮存, 形成了面积数百平米到数万平米不等的泥浆池. 建筑泥浆的排放不仅占用土地, 而且会带来诸多环境问题. 近年来, 国内对废弃泥浆处理的研究日益增多, 目前常用的处理方法有土地耕作处理法^[1]、化学絮凝固液分离处理法^[2-4]和化学固化处理法^[5-7]等. 楼春晖等^[8]采用压滤技术对建筑废弃泥浆进行处理, 并进行了理论分析和试验研究. 但是这些处理方法施工工艺相对复杂且费用较高, 因此废弃泥浆处理技术必须有更为经济、环保的发展.

建筑泥浆由黏土颗粒及水体组合而成, 并包含有各类添加剂, 其基本的工程性质与河湖及海底淤泥相近. 这类泥浆由于形成时间短, 其工程特性表现为为高含水率、高孔隙比、高压缩性、极低强度、低渗透性, 自重条件下未完成固结, 属欠固结土, 具有不稳定性 and 一定的流动性, 称为超软土. 基于建筑泥浆的这些性质, 笔者提出采用就地真空预压水土分离方式处理废弃泥浆的方法. 试验表明: 该方法能够就地解决泥浆处理问题, 且泥浆池处理后的地基承载力满足设计要求.

1 场地概况

某经济开发区由生态休闲区、城市中心区、启动区块、环湖景观带等区块组成, 规划控制面积为85 km². 近年来随着开发区基础设施建设的逐步推进, 产生了大量的建筑废弃泥浆, 这些泥浆集中贮存在待开发的郊区洼地中, 形成了数个深度约为1.5~2.5 m的泥浆池. 泥浆池经过长期晾晒, 表面失水, 形成约10 cm厚的硬壳层, 表面长满小手指粗细的芦苇等灌木植物, 植物平均高度达2 m左右.

本试验选定拟建体育馆附近3 000 m²的泥浆池作为现场试验区, 城市规划中试验区为绿化用地. 通过对试验场区泥浆池浅层开挖的初步踏勘, 发现泥浆沉积土为灰黄至灰黑色, 饱和, 可见分布全区植物根系, 地下水位约为地表下0.5 m. 试验区泥浆深度约为2~2.5 m, 虽经长期晾晒, 但场地硬壳层厚度只有10 cm, 不能满足人员及机械的施工承载力需求. 其天然含水率大于液限含水率, 由现场十字板剪切试验得到的不排水强度极低, 泥浆范围内均小于4 kPa. 颗粒分析试验结果表明, 该泥浆土所有粒组的粒径小于0.075 mm的黏粒含量为87.3%, 其中粒径小于0.005 mm的黏粒含量为43.4%. 基本的物理力学指标如表1及图1所示.

收稿日期: 2015-03-22; 修订日期: 2015-05-06

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401006)

通信作者: 范明桥(1962—), 男, 安徽定远人, 南京水利科学研究院教授级高级工程师, 主要从事地基处理及土的基本性质测试理论等方面的研究, E-mail: mqfan@nhri.cn.

引用本文: 魏雁冰, 范明桥, 林生法, 等. 建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 65-69.

表 1 处理前泥浆土物理力学性质指标

Tab. 1 Physical and mechanical properties of slurry before treatment								
含水率	湿密度 $\rho/$	干密度 $\rho_d/$	液限	塑限	塑性指数	颗粒分析试验/%		
$w/\%$	$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$>0.075\text{ mm}$	$0.075 \sim 0.005\text{ mm}$	$<0.005\text{ mm}$
65.5	1.59	0.96	54.9	24.4	30.5	12.7	60.8	26.5

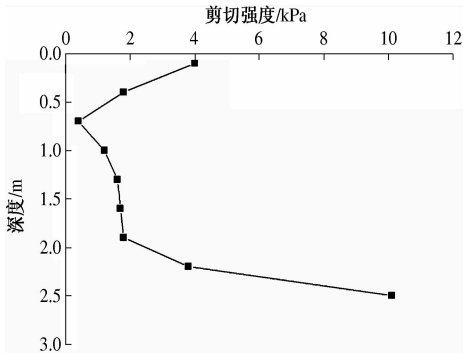


图 1 试验前场地十字板剪切强度
Fig. 1 Vane-shear strength of the site before treatment

从常规土工试验结果来看,试验区泥浆土与附近海底吹填淤泥的颗粒级配、液塑限、渗透性等物理性质均相近.且吹填淤泥采用真空抽吸水土分离方法处理取得了成功,处理深度达到了 15 m^[9],因此对经济开发区内的泥浆土也可以采用类似方法进行处理.泥浆土与淤泥物理性质对比见表 2.

2 泥浆土处理试验方案设计

就地真空吸水水土分离是通过在泥浆中插设塑料排水板,作为竖向排水通道,然后地表布置水

表 2 泥浆土和海底淤泥物理性质比较

Tab. 2 Comparison of physical properties of slurry and silt							
土样名称	液限	塑限	塑性指数	渗透系数 $k/$	颗粒分析试验/%		
	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$>0.075\text{ mm}$	$0.075 \sim 0.005\text{ mm}$	$<0.005\text{ mm}$
漩门淤泥	46.7	23	23.7	0.53	3.0	64.5	32.5
泥浆土	54.9	24.4	30.5	0.47 ~ 0.96	12.7	60.8	26.5

平向滤管或者气管与排水板相连,铺设密封膜封闭后接入真空抽吸装置(射流泵),形成负压,负压沿塑料排水板向下传递,进而向土中传递.在负压作用下,孔隙水渗流到排水通道排出,降低了泥浆含水率,使泥浆土得到排水固结^[10-11].泥浆经这样处理后其承载力预计可以达到 40 ~ 50 kPa,可以作为建筑地基或填料,从而达到综合处理建筑泥浆的目的.真空抽吸水土分离方法如图 2 所示.

采用 3 种不同排水系统的真空抽吸方法进行处理,探索建筑泥浆技术可行、经济快速、环境污染最小的处理技术方法.具体试验分区实施方案如下.

分区 A:滤管 + 排水板 + 覆膜,简称滤管区. B 型排水板间距 0.8 m,正方形布置.该区的滤管布设方法与常规真空预压施工方法一致^[12].

分区 B:气管 + 排水板 + 覆膜,简称气管区. B 型排水板间距 0.8 m,正方形布置.该区水平排水系统采用气管,在排水板顶部插入带有出水口的塑料板帽.板帽为敞口内收间距形式,便于排水板插入.板帽通过 PE 专用快速气动接头和 PU 专用气管相连,气管内径 8 mm.每排气管用主管串联后连接到真空泵,开启真空泵可以直接抽吸泥浆中孔隙水.该连接方法称为气管直吸法,连接效果如图 3 所示.

分区 C:滤管 + 气管 + 排水板 + 铺膜,二次抽吸模式,简称气滤区.采用 B 型塑料排水板,正方形布置,每部分排水板间距均为 0.8 m.其中第 1 部分排水板采用滤管连接;第 2 部分排水板用气管连接,采用气管直吸方法.两部分抽吸系统相互独立.覆膜后气管部分先真空抽气,根据场地监测

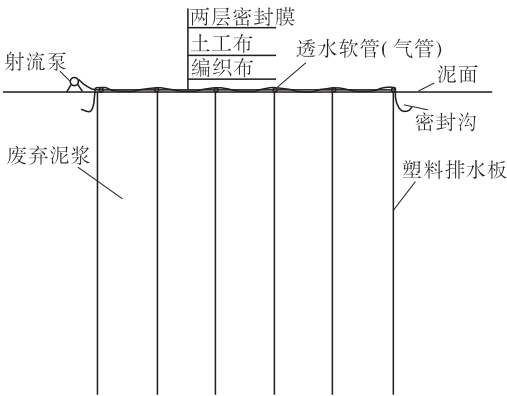


图 2 真空抽吸水土分离剖面图
Fig. 2 Profile of vacuum preloading

将泥浆池分为 3 个区块,每个区块 1 000 m²,

数据,1~2 个月后开启滤管部分真空抽气;二次抽吸系统布置图见图 4。



图 3 气管抽吸系统
Fig. 3 Air pipe suction system

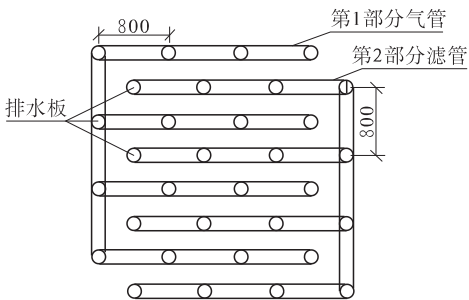


图 4 分区 C 二次抽吸系统布置示意图
Fig. 4 Twice suction system of partition C

3 个分区的排水板的插设深度根据泥浆池的深度而定,滤管区因位于泥浆池边缘位置,深度较浅,经探杆试探该区平均深度约为 2 m;气管区和气滤区的泥浆平均深度约为 2.5 m。

3 监测数据分析

每个区块布置一台 7.5 kW 的射流泵,做好维护工作,并对各区块进行了膜下真空度、地表沉降、土体中孔隙水压力等监测.从 2014 年 11 月 8 日开始抽真空至 2015 年 2 月 6 日停泵,抽真空历时 90 d.抽真空过程中 3 个区块膜下真空度基本一致,均稳定在 85 kPa 以上。

3.1 地表沉降

地表沉降能够直观地反映真空预压的处理效果.3 个区块真空预压过程中的总沉降:滤管区 280 mm、气管区 364 mm、汽滤区 402 mm.沉降速率初期可达 10~20 mm/d,70 d 后平均沉降速率已低于 2 mm/d,趋于稳定.各分区的沉降历时曲线见图 5。

从沉降时程曲线看,气管区沉降量明显大于滤管区沉降量,这是由于气管直吸系统排水板芯通过板帽、气管与真空泵直接相连,泵与排水板之

间是密封直通的,真空传递几乎没有损失.而滤管系统排水板芯要透过板芯外面包裹的滤布、滤管外面包裹的滤布、滤管与真空泵相连,泵与排水板之间多了 2 层滤布,真空传递有一定损失,影响了处理效果。

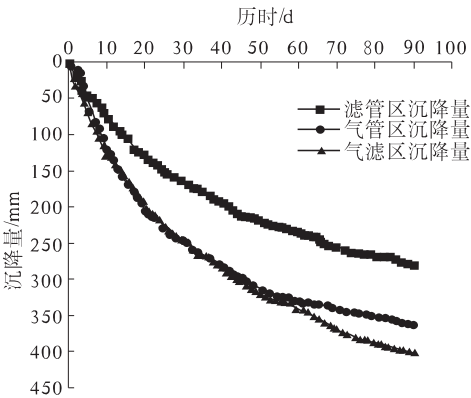


图 5 各分区表面沉降时程曲线
Fig. 5 Time travel curve of ground surface settlement

将气滤区和气管区相比较,在抽真空的前 45 d,两区的沉降曲线基本一致.但 45 d 后,气滤区停止气管抽吸,开启滤管抽吸,之后其沉降量明显超过气管区沉降量,由此说明二次抽吸系统即第二部分滤管及其下的排水板发挥作用且超过了单一气管抽吸系统。

3.2 孔隙水压力消散

根据有效应力原理,排水固结就是土中超静孔隙水压力消散,有效应力增长的过程.对于真空抽吸方法来说,就是土中孔隙水压力负向增长形成有效应力增长的过程.本次试验中监测了泥浆土中孔隙水压力的变化,1.2 m 深度处各区超静孔隙水压力消散(负压增长)结果见图 6。

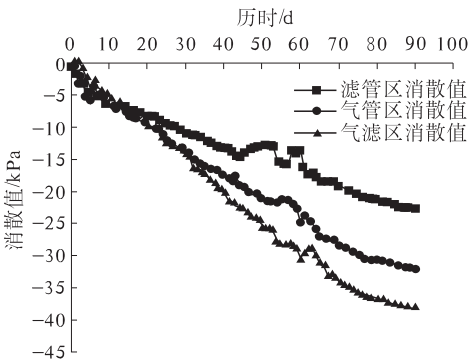


图 6 各分区超静孔隙水压力消散时程曲线
Fig. 6 Time travel curve of excess pore pressure dissipation

由图 6 可知,在真空抽吸作用下,泥浆土中负向孔隙水压力增长明显,气管区比滤管区的负向

孔隙水压力增长更大.气滤区与气管区在抽真空期间的前 45 d 孔隙水压力曲线基本重合,但在 45 d 后,气滤区停止气管抽吸开启滤管抽吸,负向孔隙水压力增长明显超过单一气管区.

由监测数据分析可知,气滤区的处理效果最好,其原因是:由于泥浆土呈流动状,在经过一段时间的真空抽吸之后,泥浆中部分细小土颗粒也会向排水板处集聚,导致排水板淤堵.经试验发现,淤堵使排水板滤膜的渗透系数降低到原来的 1/12,这直接导致排水板的排水功能严重下降.但这时开启第二部分未受淤堵的滤管排水板可以起到新打设排水板的排水效果,即气滤区的二次抽吸系统可以使排水板的淤堵影响降到最低.

4 处理效果检测

处理结束后,在各分区分别做了原位十字板剪切试验、载荷板试验,并同时取土进行室内土工试验,以进一步了解泥浆池的处理效果.

4.1 十字板剪切试验

各分区的十字板剪切强度均有显著提高,其中气滤区的表层十字板强度更是达到了 23.5 kPa,从各分区同一深度处的十字板剪切强度来看,均是气滤区最高,气管区次之.滤管区 2.2 m 深度的十字板剪切强度达到了 30.5 kPa,这是由于此深度已经到达原状土的原因.处理后各分区的十字板强度见图 7.

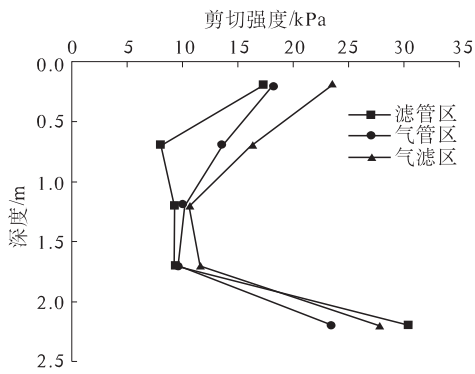


图 7 处理后各分区的十字板剪切强度

Fig.7 Vane-shear strength of the site after treatment

4.2 平板载荷试验

平板载荷试验是确定地基承载力最直接的检测方法,处理结束后,在各分区分别做了平板载荷试验,载荷板是边长为 1 m 正方形钢板.根据平板载荷试验试验结果,按照规范^[13],确定各分区的地基承载力特征值分别是滤管区 51 kPa、气管区 57 kPa、气滤区 66 kPa,采用二次真空抽吸系统的

气滤区处理效果最优.

4.3 取样试验

为进一步检测泥浆池的处理效果,了解处理后泥浆土的物理力学性质变化,处理后各分区还进行了取样室内试验如果如表 3 所示.

表 3 处理后泥浆土物理力学性质指标

Tab.3 Physical and mechanical properties of slurry after treatment

土样	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/$ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/$ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	直剪快剪试验	
				黏聚 力 c/kPa	内摩擦 角 $\Phi/(\text{^\circ})$
A 区	47.0	1.72	1.17	17	3.2
B 区	46.1	1.73	1.18	18	2.1
C 区	45.0	1.70	1.19	20	0.2

从室内试验结果看,经处理后泥浆土的含水率均有较大幅度的降低,即从 60% 以上普遍降低到 45% 左右;剪切强度超过了 17 kPa,其中气滤区直剪快剪试验的剪切强度最高,达到了 20 kPa.完全达到了预期要求.

综合以上结果发现:无论是原位试验还是室内试验,检测结果均是采用二次抽吸模式的气滤区为最优.这是由于在先进行了一段时间的气管系统抽吸后,泥浆的物理力学性质得到了很大的改善,有了一定的强度,此时再开启第二部分抽吸系统,减弱了滤管系统排水板的淤堵,保证了排水板的排水通畅,有利于泥浆土的固结.

5 结论

(1)通过现场踏勘及取样室内试验,发现泥浆土与超软土具有类似的工程性质,因此,可以采用既经济又环保的真空预压方法对泥浆池进行处理.

(2)设置了 3 种不同排水系统对泥浆池进行了真空预压方法处理,结果表明:气管区处理效果优于滤管区,其中气滤区的气管-滤管结合的二次抽吸方法可以在一定程度上规避排水板的淤堵,效果最优.处理后各分区的地基承载力均有显著提高,可以作为一般过程场地,真空预压方法可在类似工程中推广.

(3)经初步计算,试验区 3 种方法的费用:滤管区约为 55 元/ m^2 ,气管区约为 60 元/ m^2 ,气滤管区约为 75 元/ m^2 ,而常规的化学固化法费用约为 130 元/ m^3 ,对于一般建筑场地承载能力 50 kPa 要求,可采用滤管区的真空抽吸方法进行处理;对于较高的承载能力要求(80 kPa 以下),可采用气

管区的真空抽吸方法或气滤区的二次抽吸方法进行处理.

参考文献:

[1] 伍丹丹,杨旭,李颖,等. 土地处理法处理钻探泥浆的土壤特性研究[J]. 污染防治技术,2006,19(3):3-5.

[2] 万玉纲,余学海. 桩基工程泥浆水处理技术[J]. 环境工程,1999,17(1):14-15.

[3] 刘勇健,沈军,张建龙. 废泥浆固液分离的试验研究[J]. 广东工业大学学报,2000,17(2):53-56,75.

[4] 欧孝夺,曹净,周东. 广西平果铝尾矿泥浆化学絮凝处理试验研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):201-203.

[5] 王冀川. 川东北地区钻井废弃泥浆固化法处理技术及运用[J]. 科技创业月刊,2007,20(11):185-187.

[6] 董娅玮. 废弃钻井泥浆固化处理技术研究[D]. 西安:长安大学环境科学与工程学院,2009.

[7] 肖遥,王蓉沙,邓皓. 废弃钻井液化学强化固液分离处理[J]. 中国环境科学,2000,20(5):453-456.

[8] 楼春晖,张忠苗,房凯. 泥浆压滤处理技术理论分析及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(6):57-61.

[9] 林生法,范明桥,姜彦彬,等. 气管直吸联合覆膜真空预压现场试验研究[J]. 中国港湾建设,2014(7):34-38.

[10] 张志允,翟国民,张明晶. 堆载预压法和真空预压法加固机理的比较研究[J]. 岩土工程界,2002,5(11):24-26.

[11] 董江平,张雄壮,洪雷,等. 无砂垫层真空预压法提高吹填淤泥地基承载力试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(4):131-133,180.

[12] 娄炎. 真空排水预压法加固软基技术[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2013.

[13] 建设部. 岩土工程勘察规范:GB/T 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

Experimental Study on Construction Waste Slurry
Treatment by Vacuum Preloading

WEI Yanbing^{1,2}, FAN Mingqiao¹, LIN Shengfa¹, XU Kai¹, WU Zhiqiang¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to seek more economic and environmental protection treatment methods. Three different vacuum preloading methods were adopted in this paper to study the treatment of building mud pool, and monitoring data of settlement and pore water pressure were analyzed. After unloading, the field vane test and plate loading test were conducted to detect the bearing capacity of foundation. Moreover, the physical and mechanical parameters of soil were compared. The results show that the foundation bearing capacity of different sites has been improved significantly, and the combination of air pipe and chimney filter can get a better treatment effect.

Key words: construction waste slurry; vacuum preloading; settlement; pore water pressure; bearing capacity of foundation .