

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.037

# 导水布袋复合压密注浆桩技术在软土质堤防加固处理中的应用研究

宾 斌, 蒋厚良, 王雪龙, 赵铁军

(湖南宏禹水利水电岩土工程有限公司, 湖南长沙 410007)

**摘要:** 为更有效地对软土质堤防进行加固处理, 将布袋注浆技术和可控性压密注浆桩技术融为一个整体, 形成一项新的软土地基处理技术——导水布袋复合压密注浆桩技术。该技术利用布袋的良好导水性, 有效解决了软土在压密注浆处理过程中, 超孔隙水压力消散过慢的技术难题。将导水布袋复合压密注浆桩技术应用于洞庭湖软土质堤防加固试验处理, 通过对处理前后的原状土进行标准贯入试验, 对桩和桩间土进行取芯检测以及施工结束后位移观测、现场回访等, 分析论证了导水布袋复合压密注浆桩技术对软土质堤防的加固效果。在加固处理一年后, 监测结果表明, 堤防侧向位移量趋于收敛, 堤基已处于稳定状态。

**关键词:** 导水布袋; 布袋注浆; 软土地基; 淤泥质土; 加固处理

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)04-0183-05

## The Application of Condensed Grouting Piles with Drainage Bag Lining in Soft Soil Embankment Reinforcement

BIN Bin, JIANG Houliang, WANG Xuelong, ZHAO Tiejun

(Hunan Hongyu Water Resources and Hydropower Geotechnical Engineering Ltd., Changsha, Hunan 410007, China)

**Abstract:** In order to reinforce soft soil embankment more effectively, bag grouting and controllable pressure grouting pile technique were combined to develop a new treatment measure of soft soil foundation, namely, condensed grouting pile with drainage bag lining. With this technique, the favorable hydraulic conductivity of the cloth bags was taken advantage of to solve the problems of slow pore water pressure dissipation in the grouting process of soft soil. Here this technique was adopted in the reinforcement treatment test of Dongting lake soft soil embankment. Based on the standard penetration tests of the undisturbed soil before and after the treatment, the detection of core soil of the pile and between the piles, as well as the displacement observation and site investigation after the construction was completed, the reinforcement effect of condensed grouting pile with drainage bag lining technique was analyzed and demonstrated. One year after the reinforcement, the monitoring results of the embankment indicate that the lateral displacement is diminishing, the foundation of the embankment is stable.

**Keywords:** drainage bag; bag grouting; soft soil foundation; silt soil; reinforcement

目前国内外常用于堤防软土地基处理的主要施工方法有:强夯法、高压旋喷桩法、深层搅拌桩法、排水固结法、堤身培厚加高法、碎石桩法<sup>[1]</sup>等。这些方法在洞庭湖软土质堤基加固处理工程应用中,存在处理效果不理想,工程造价相对较高,施工周期长等问题。

导水布袋复合压密注浆桩技术<sup>[2]</sup>是一项新的软土地基处理技术,是通过钻机引孔至设定深度,下入导水性布袋与注浆管,然后通过注浆管往布袋内注入低塌落度的水泥砂浆体或类似材料,形成均匀且具有较高强度的桩体并压密钻孔周边软土<sup>[3]</sup>;压密土体时产生的孔隙水压力通过导水布袋导引消散,

促使土体排水固结<sup>[4-5]</sup>,提高地基内软土的强度<sup>[6]</sup>,最终形成具有较高地基承载力的桩土复合地基。

该项技术综合利用了布袋注浆和控制性压密注浆技术的优点,通过采用导水布袋技术克服了压密注浆桩应用于淤泥质土中所存在的排水固结和成桩不连续等问题;采用压密注浆桩技术克服了布袋成桩技术中,注浆操作控制难度大,成桩直径小,对土体压密效果差等缺点。将布袋注浆桩与压密注浆桩技术结合起来,能做到取长补短作用。在技术中采用导水布袋一方面限制灌注浆体沿某一弱面扩散,形成较规则的桩柱,另一方面可加快孔隙水压力的消散和孔隙水排出<sup>[7]</sup>;采用压密注浆桩对桩周土体压密,较大幅度地提高了桩间土体的压缩模量,降低了土体的压缩系数,同时形成了较高强度的桩体。导水布袋复合压密注浆桩技术能够对洞庭湖区软土质堤基进行有效加固处理。

## 1 工程概况

洞庭湖某蓄洪垸防护围堤等级为 3 级,属于两水夹堤型,在 2012 年,围堤内侧及内侧中部平台先后发生坍塌现象,最大错距约 0.8 m,长度近 100 m。

围堤地层自上而下主要为人工堆积( $Q^s$ )、全新统冲湖积堆积( $Q_4^{al+1}$ )、第四系中更新统( $Q_2^{al}$ )冲积堆积等,其中全新统冲湖积堆积( $Q_4^{al+1}$ )以黏土和淤泥质土为主,层厚为 4.0 m~6.0 m,含水率为 33.8%~45.3%,孔隙比为 0.935~1.305,内摩擦角  $6^\circ\sim 8^\circ$ ,黏聚力 8 kPa~12 kPa,现场标贯仅为 4 击~7 击,属于软土;第四系中更新统( $Q_2^{al}$ )冲积堆积主要为网状粉质黏土,承载力较高。经分析,堤基出现坍塌主要原因是黏土和淤泥质土层呈高压缩性、抗剪强度与承载力较低,透水性较弱;当外洞庭湖水位较高时,在水渗压和堤身自重作用下,堤基遭受剪切破坏,侧向呈塑流状挤出,导致堤基下沉、堤身内侧出现坍塌,影响防洪堤的安全功能。

为使围堤能够正常阻挡洪水,湖南宏禹水利水电岩土工程有限公司研究开发导水布袋复合压密注浆桩技术对软土质堤防围堤段进行了试验加固施工处理,处理深度 3.0 m~9.5 m 的黏土和淤泥质土层。现将试验前后所测量的数据进行对比、分析与讨论如下。

## 2 布桩方式和成桩工艺简介

### 2.1 导水布袋复合压密注浆桩布置

根据堤防的地质结构特征,建立堤防的平面二

维有限元分析模型,采用 SIGMA/W 软件进行二维数值计算;依据有限元计算结果,采用 SLOPE/W 对堤防抗滑稳定性进行计算分析。依据工程实际情况和堤身地质结构特征,在最不利工况条件下,建立极限平衡分析模型,对导水布袋复合压密注浆桩的加固效果进行模拟,提出最优加固方案。方案共布置 5 排注浆桩,其中 I、III、IV 三排桩径均为  $\Phi 500$  mm, II、V 两排桩径为  $\Phi 600$  mm,孔间距均为 2.0 m,呈等边三角形布置,在此方案下,堤防边坡的最小安全系数为 1.428,可以满足工程安全要求。

成桩深度穿过黏土层或淤泥质土层,深入下部网状粉质黏土内 0.5 m,桩顶进入表层填土 0.5 m。采用跳孔方式施工,桩长 5.5 m~6.5 m,累计施工 280 根桩,施工桩总长度约 1 700 m,加固堤基长度约 110 m。

### 2.2 导水布袋复合压密注浆桩施工工艺

施工工艺流程:测、放孔位→钻孔→下入布袋及注浆管→配制注浆材料→注浆→分段拔管→重复注浆、拔管至形成单桩。

#### (1) 钻孔

在平整过的场地上,标记施工桩孔位置。采用地质钻机造孔、泥浆护壁至设定孔深,钻孔孔径  $\Phi$  为 110 mm;如钻孔内遇软土层缩颈时,可下入套管进行防护。

#### (2) 机制导水布袋

机制导水布袋孔径  $\Phi$  为 500 mm 或 600 mm,较孔深稍长的圆柱形布袋,布袋下端封闭。布袋制作时,在经度和纬度方向,均采用具有较好排水功能的绳或带,与布袋缝合成一体,做成导水布袋。

#### (3) 下入布袋及注浆管

选用内径  $\Phi 60$  mm 的注浆管,并将布袋套在注浆管上,连接注浆管,一并下入到孔底。

#### (4) 配制注浆材料

材料配比为:

河砂:水泥:膨润土:水:外加剂 = 500:100:30:55:0.5,按顺序加入水泥、砂、膨润土等,强制搅拌均匀,再加入水和外加剂,形成塌落度 20 mm~50 mm 的注浆材料。

#### (5) 注浆至单桩结束

① 连接注浆管道,安装拔管装置;

② 采用 GJB 高压泵,在 1.5 MPa~5.0 MPa 的孔口灌浆压力下,向注浆管内泵送入低塌落度材料;

③ 当浆材从灌浆管底部进入布袋内后,根据成桩直径,定量注入。成桩直径  $\Phi 500$  mm,注入量 0.20

m<sup>3</sup>/m;成桩直径 Φ600 mm,注入量 0.28 m<sup>3</sup>/m。

反复注入、提升、记录。

④ 当注入量达到设定成桩深度所需的量时,停此该孔注入。

⑤ 移动灌浆管、拔管机至下一孔进行注浆施工。

(6) 特殊情况处理

① 当灌浆中断时,应尽早恢复灌浆,如估计在 30 min 之内难以恢复灌浆时应进行注浆管清洗,然后扫孔复灌,直至达到结束标准;

② 如中断时间较长,则应采取补桩措施进行处理。

### 3 数据分析

#### 3.1 施工前后桩间土性能数据对比与分析

在 I 序孔钻孔施工时,对部分孔深 5.3 m ~ 5.6

m、7.3 m ~ 7.6 m 进行取芯和标准贯入试验;在施工处理结束 14 d 之后,在相对应的深度,对相邻桩与桩的中心或重心位置,进行钻孔取芯和标准贯入试验,与施工之前的数据进行对比与分析。

##### 3.1.1 标准贯入试验

对施工前后黏土和淤泥质土的力学性能测试最直接、简明的方法是标准贯入试验。将施工处理前、后桩间土的标准贯入击数(N)数据统计如表 1 所示。从表 1 中的数据(均已进行深度修正)可知,施工之前为 4.3 击 ~ 6.6 击,施工处理之后桩间土的标准贯入击数达到 9.4 击 ~ 14.1 击,大部分处于 10 击 ~ 12 击之间,较施工处理之前,提高一倍;从整个数据来看,各数据均比较接近,离散性较小。说明桩间土在施工压密桩处理之后,桩间土整体的抗剪或承载能力均得到大幅提升,由施工前的软塑、可塑状土变为施工后的可塑、硬塑状土。

表 1 施工后桩间土标准贯入试验

单位:击

序号	孔深 5.3 m ~ 5.6 m 时标准贯入击数 N		孔深 7.3 m ~ 5.6 m 时标准贯入击数 N		试验之后 检查孔位置
	试验桩处理之前	试验桩处理之后	试验桩处理之前	试验桩处理之后	
1	—	10.3	—	10.3	桩与桩三角形的 重心位置
2	5.6	9.4	5.2	9.5	
3	6.6	11.3	4.3	11.2	
4	—	13.1	—	11.2	
5	—	13.1	—	10.3	两桩连线 中心位置
6	—	12.2	—	10.3	
7	5.6	4.3	11.3	10.3	
8	5.6	14.1	4.3	11.2	桩与桩三角形的 重心位置
9	5.6	9.4	6.0	10.3	
10	4.7	10.3	5.2	10.3	
11	4.7	10.3	5.2	11.2	
12	5.6	10.3	5.2	13.8	
13	5.6	10.3	5.2	11.2	
14	5.6	9.4	6.0	10.3	
平均值	5.5	11.1	5.1	10.8	

##### 3.1.2 施工处理前后土的含水率对比与分析

将施工处理前和处理之后的土进行钻孔取芯,测试土体的含水率变化,汇总如图 1 所示。施工处理之前,淤泥质土或黏土层芯样的平均含水率为 38.8%;在施工结束 14 d 后,桩间土样平均含水率为 32.3%,平均降低了 6.5%。

##### 3.1.3 施工处理前后土样的干密度对比与分析

施工处理前后土样干密度对比如图 2 所示。在施工处理前,土样中干密度低,差别较大,部分值在 1.2g/cm<sup>3</sup>左右,平均值 1.31g/cm<sup>3</sup>,计算孔隙比平

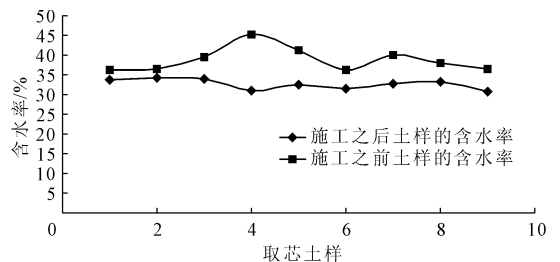


图 1 施工处理前后土样含水率对比

均值为 1.112,为疏松的高压缩性土;施工处理后,土样中干密度增大,平均值达 1.41 g/cm<sup>3</sup>,计算孔隙

比平均值降为 0.94,为中压缩性土,且处理后土样的干密度、孔隙比数值均比较相近。

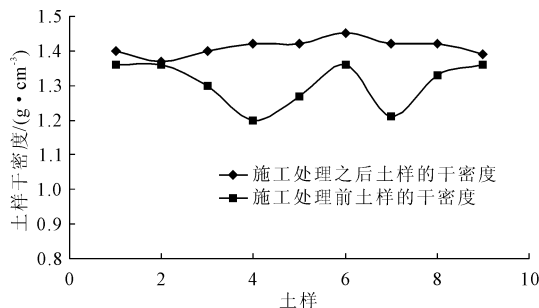


图 2 施工处理前后土样干密度对比

以软土层的平均厚度为 4.6 m 计算:施工处理之前的软土层的平均孔隙比为 1.112;施工处理之后的平均孔隙比为 0.944,依据公式(1),进行计算:

$$S = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \times h \quad (1)$$

式中: $S$  为平均沉降减少量,mm; $e_1$  为施工处理前的孔隙比; $e_2$  为施工处理后的孔隙比; $h$  为软土层的厚度,m。

计算结果为沉降 365.9 mm。因此,采用导水布袋可控压密注浆桩技术对洞庭湖区软土质堤防进行加固后,软土层的孔隙比减少,可以减少软土质的沉降达到 365.9 mm 以上,可以有效地抑制堤基后续滑坡的发生。

### 3.2 注浆桩的测试与分析

在施工结束 14 d 后,对注浆桩进行钻孔取芯,以检测桩的连续性和完整性,并测试相关力学性能数据。

#### 3.2.1 注浆桩的连续性与完整性分析

试验施工结束后,在偏离注浆孔中心约 10 cm 位置,对施工的桩进行取芯测试,累计 15 根,其中取到桩芯连续、完整芯样的钻孔 13 个,另外 2 个孔在取芯的过程中偏离桩芯,仅取到部分芯样。从取芯的芯样来看,长度大部分在 4.0 m ~ 6.0 m 之间;比较连续、完整,部分连接有布袋。取芯芯样(部分)见图 3 ~ 图 6。



图 3 J4-2 取芯芯样图



图 4 J3-17 取芯芯样图



图 5 J5-13 取芯芯样图



图 6 J3-7 取芯芯样图

#### 3.2.2 桩力学性能测试

对符合测试要求的桩体芯样,在养护龄期达到 28 d 之后,进行力学性能测试。测试结果见表 2。

表 2 压密注浆桩砂浆芯样物理力学测试数据

野外编号	龄期/d	名称	抗压强度/MPa	抗剪强度/MPa	
				$f'$	$c'$
J3-17	29	砂浆芯样	8.83	0.43	1.78
J4-35	30	砂浆芯样	13.06	0.47	2.02
J6-15	28	砂浆芯样	13.40	0.50	2.07
J4-6	29	砂浆芯样	12.42	0.50	1.97
J3-6	31	砂浆芯样	12.42	0.47	1.89

从表 2 可以看出,采用水泥、河砂、膨润土及少量外加剂,所形成的压密注浆桩,桩的单轴抗压强度

可以达到 10.0 MPa 以上;抗剪强度可以达到 1.80 MPa 以上,较方案设计时的参数取值要高,桩较高的抗剪强度和桩间土协同作用,形成具有较高强度的挡土墙,阻止堤基侧向滑移,可以有效地保证堤基加固处理效果。

## 4 堤基加固后的情况

### 4.1 位移观测

自 2013 年 6 月施工结束之后,分别在 2 个月、8 个月、18 个月后进行位移测量,现将代表性的 C7 和 C8 位移观测孔中所测的数据统计如表 3、表 4 所示。

表 3 施工处理结束后 C7 测斜管位移变化 单位:mm

深度/m	2 个月后 测试位移值	8 个月后 测试位移值	18 个月后 测试位移值
10.0	1.6	1.7	0.8
9.0	1.8	0.3	0.8
8.0	1.5	0.6	1.7
7.0	2.5	1.6	2.1
6.0	1.5	1.0	1.6
5.0	0.5	0.8	0.9
4.0	1.0	0.7	1.1
3.0	1.8	1.3	2.0
2.0	1.7	2.0	2.8
1.0	1.2	1.1	2.2
0.0	4.1	3.2	4.0

表 4 施工处理结束后 C8 测斜管位移变化 单位:mm

深度/m	2 个月后 测试位移值	8 个月后 测试位移值	18 个月后 测试位移值
10.0	0.9	1.5	0.8
9.0	1.7	1.2	0.9
8.0	0.9	1.7	0.9
7.0	0.8	0.8	0.7
6.0	4.7	1.2	1.0
5.0	3.5	0.9	0.9
4.0	12.7	0.8	0.9
3.0	5.1	1.2	0.5
2.0	3.5	1.9	0.6
1.0	1.5	1.5	0.6
0.0	2.3	2.5	1.4

从 C7 和 C8 测斜管所测的位移值来看,深度在 3.0 m~9.5 m 加固范围区内的淤泥质土或黏土层,在施工结束后的 2 个月内,位移最大值达到 12.7 mm 以内,其它均在 5.5 mm 以内;在施工结束后的 2~8 个月和 8~18 个月内,位移均在 2.5 mm 以内。

从这些数据来看,可以认为,位移变化值趋于收敛,堤基变形量逐步减少,趋于稳定化。

### 4.2 施工结束后的现场情况

(1) 施工结束两个月后现场图见图 7。



图 7 两个月后施工区域图

(2) 施工结束 1 年半后见图 8、图 9。

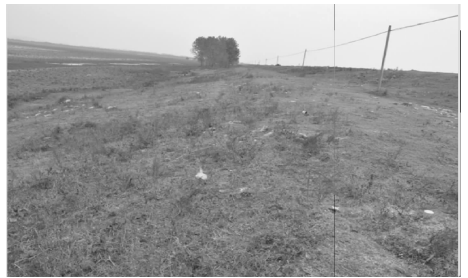


图 8 1 年半后施工区域图



(沉降区距离施工场地约 30 m 位置,在二级马道出现下沉,沉降超过 20 cm)

图 9 未进行加固施工区域在 1 年半后出现了新的沉降图

从施工结束后图形可以看到,在进行加固试验处理之后,加固区域在一年之内未再出现宽的裂缝或较大沉降现象,而未加固区域出现新的沉降和裂缝,说明采用导水布袋复合压密注浆桩技术在洞庭湖区软土质堤防中试验应用处理的效果较好。

## 5 结 语

(1) 采用导水布袋复合压密注浆桩技术,可以在软土质堤防内形成具有较高抗压强度、抗剪强度和连续、完整的注浆桩体。

(下转第 219 页)