

喷射气扰改良排水固结法现场模型试验研究

吴慧明¹, 龚晓南², 林小飞¹, 宋 词¹

(1. 浙江开天工程技术有限公司, 浙江 宁波 315100; 2. 浙江大学滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对沿海地区广泛分布的由淤泥沉积物及少量腐殖质土组成的软弱地基, 提出了喷射气扰改良排水固结法, 并通过现场模型试验, 研究软土地基在气扰前后过程中地表沉降及深层土体水平位移等特性。结果表明采用该方法处理可加速软土地基排水, 增加施工期沉降, 减少工后沉降, 改善土体剪应变。通过总结气体扰动的施工工艺、施工参数、量测方法等, 为喷射气扰改良排水固结法今后深入研究及大面积推广应用提供了依据。

关键词: 喷射; 气体; 扰动; 改良; 排水固结; 模型试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)02-0008-04

作者简介: 吴慧明(1967-), 女, 江苏南通人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程领域的工作。E-mail: 1242739931@qq.com。

Study on field model test of improved drainage consolidation by jet air

WU Hui-ming¹, GONG Xiao-nan², LIN Xiao-fei¹, SONG Ci¹

(1. Kaitian Engineering Technology Co., LTD, Ningbo, Zhejiang Province, 315000; 2. Research center of coastal and urban geotechnical engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, 310058)

Abstract: For soft foundation composed of widely distributed mud deposit with small amounts of humus in the coastal area, an improved drainage consolidation method by gas injection is proposed. Site model test was done to study characteristics of the ground surface settlement and horizontal displacement of soft soil foundation. The results show that this method can accelerate the rate of drainage in soft soil foundation, reduce post-construction settlement and shear stain. By summarizing construction technology, construction parameters, measuring method etc, this study provides the basis for widely popularizing the improved drainage consolidation method by gas injection.

Key words: jet; gas; disturbance; improvement; drainage consolidation; model test

0 引言

我国沿海地区广泛分布有淤泥沉积物及少量腐殖质土所组成的海相软弱场地, 这种软土具有高含水率、高孔隙比、高压缩性, 且具有低抗剪强度、低渗透性、低承载力等特点。堆载(真空)预压排水固结法是一种较为经济且有效的软基处理方法, 在国内外软基处理工程中得到广发应用, 但也有一定局限性, 主要表现在: (1) 处理深度有限。堆载(真空)预压是一种由地表向地下深处处理的技术, 但由于附加应力随土层深度增加而快速衰减的性质, 一般来说经济处理深度不超过 15 m; 真空预压排水固结法由于成本、技术等原因, 一般经济处理深度 10 m 左右。(2) 处理时间较长。由于软土土体渗透系数极小, 无论堆载预压还是真空预压, 通过竖向排水体缓慢排水的过程, 往往需要几个月甚至更长的时间。(3) 后续土体仍长期蠕变、工后

沉降较大。预压法工后沉降主要由两部分组成, 一部分来自未完成的主固结沉降, 其中很大一部分是由于施工期不能有效处理的深层软土造成; 一部分来自土体的次固结(软土的流变性)沉降, 这种变形主要是由于土性决定的, 改善土性才能有效减小次固结。堆载预压及真空预压由于处理深度有限、且无法改良土性, 故仍较难有效控制工后沉降^[1-2]。

喷射气扰改良排水固结法提出了一种新技术研究思路, 即对已设有竖向排水通道的软土地基, 通过注入高压气体对土体进行平面切割, 拥有以下功效: (1) 深层立体排水: 高压气体切割土体, 在不同深度增设了多道水平排水通道, 从而加快软土地基的排水固结; (2) 气举效应: 高压气体进入塑料排水板内, 与塑料排水板内的存水激烈碰撞, 产

基金项目: 浙江省建设厅课题(2017k133)

收稿日期: 2019-09-30

生大量气泡, 气泡沿塑料排水板向上运动, 同时将塑料排水板内的存水带到地表, 降低排水板内水位, 增大与土体的水力梯度, 促进排水固结; (3) 深层增压: 高压气体对土体进行深层切割、增压, 使得传统的地表平面加压体系, 改进成地表、地下共同作用的立体增压体系, 因此本技术不仅能减少施工工期, 还能增大软土处理深度、消除次固结、减少工后沉降^[3-4]。

本次结合某地基处理工程试验场地, 开展喷射气扰改良排水固结法的现场对比试验, 研究其沉降特性, 为喷射气扰改良排水固结法的大面积推广应用提供依据。

1 试验场地工程地质概况

现场试验地点位于宁波市鄞州区, 场地原为大面积农田, 表层已于试验前二年去除 1.0 m 耕植土并回填 1.0 m 塘渣, 较为有利于试验。对本次拟进行的 3 组模型试验, 专门进行了 3 点原位取土工程地质勘察, 土工试验成果见表 1。

2 现场模型试验设计概述

2.1 模型试验总体布置

本次共进行 3 组现场模型试验, 每组试坑面积 5 m×5 m, 试验面积 3 m×3 m, 试验组与组间距 25 m 以避免互相影响。其中一组不进行干扰、另其他两组进行气体干扰。现场模型试验布置见图 1。

2.2 模型试验设计

排水体采用 Φ70 mm 袋装砂井, 正方形布置、间距 2 m, 长度 9 m。施工方法采用 XY-100 钻机取土, 然后将袋装砂井放入孔中, 施工完成后进行加荷试验。

2.3 扰动方法及施工参数设计

(1) 扰动方法: 扰动介质为空气, 采用旋喷钻机旋转喷射施工。

(2) 扰动深度: 扰动范围为地表下 8 m 至地表下 3 m, 由下至上进行高压空气旋喷气扰。

(3) 扰动点布置: 其中 A 组不扰动, B 组试验模型采用 4 点扰动、C 组试验模型采用 2 点扰动, 具体点位布置见图 1。

(4) 扰动压力、时间等具体施工参数: 试验时采用 0.4~1.2 MPa 进行试验, 以取得最优压力参数; 旋转采用 9~18 转/min 进行, 通过试验取得最优旋喷时间。其他施工参数均通过试验选取。

表 1 土工试验成果报告表
Table 1 Report form of soil test results

野外土样编号	物理性指标											压缩系数 <i>a</i> 0.1~0.2 MPa ⁻¹	压缩模量 <i>E_s</i> 0.1~0.2 MPa	固快(<i>C_q</i>) 黏聚力 <i>c</i> /kPa 内摩擦角 <i>φ</i> /°	土定名 依据规范 GB50021-2001 定名				
	含水率 <i>w</i> /%	密度 ρ	干密度 ρ_d	比重 G_s	孔隙比 e_0	饱和度 S_r /%	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	塑性指数 I_p /%	液性指数 I_L /%	各级压力下孔隙比 e_i								
											50 kPa					100 kPa	200 kPa	400 kPa	
1	59.4	1.65	1.04	2.76	1.666	98	50.5	26.7	23.8	1.37	1.459	1.335	1.186	1.005	1.49	1.79	11.1	6.3	淤泥
2	32.1	1.89	1.43	2.72	0.901	97	36.4	23.4	13	0.67	0.855	0.82	0.77	0.708	0.5	3.8	19.5	16.5	粉质黏土
3	40.8	1.79	1.27	2.76	1.171	96	47.6	25.5	22.1	0.69	1.11	1.054	0.975	0.871	0.79	2.75	20.3	11.2	黏土
4	28	1.91	1.49	2.74	0.836	92	40.8	22.8	18	0.29	0.805	0.784	0.753	0.712	0.31	5.92	36.2	20.1	淤泥质黏土

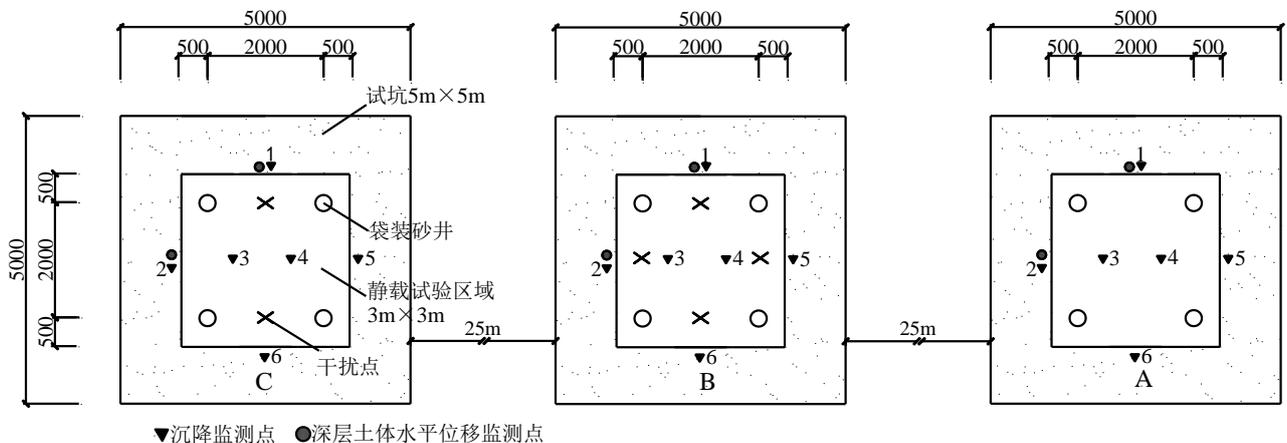


图 1 现场模型实验场地布置

Figure 1 Site layout of field model experiment

(5) 扰动面形状: 采用螺旋喷射面, 钻杆提升速度采用 $0.5 \sim 1 \text{ m/min}$, 通过试验取得最优提升速度。模型试验剖面示意图 2。

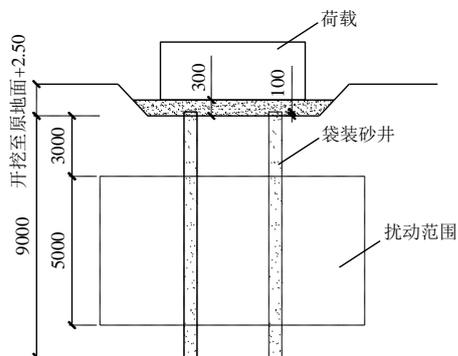


图 2 现场气扰排水固结模型试验剖面图

Figure 2 Section view of model test for consolidation of the field gas drainage

2.4 原位试验^[5-6]

(1) 试验前对试验场地进行工程地质勘察;
(2) 旋喷过程中对深层土体位移进行监测;(3) 旋喷结束后进行原位静载试验;(4) 进行长期静载试验。

2.5 现场模型试验实施概述

(1) $\Phi 70 \text{ mm}$ 袋装砂井灌注、XY-100 钻机埋设袋装砂井;
(2) 清表至原状土+2.50、施工排水沟、铺设 30 cm 砂垫层;
(3) 埋设沉降标、深层土体位移等测试元件, 并读取初始数据;
(4) 进行喷射气扰改良排水固结法施工;
(5) 读取沉降标第二次数据;

(6) 铺设土工织物;

(7) 原位地基静载试验 (模拟堆载):

载荷板尺寸: $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$

荷载分级: 分 4 级, 分别为 16.25 kPa、32.50 kPa、48.75 kPa、65.00 kPa。

沉降变形测读方法: 每级半小时读数 1 次, 连续读数 6 次, 再进行下一级荷载加载; 第三级荷载施加后, 每半小时读数 1 次连续 6 次后, 每天读取一次, 再根据实际情况决定是否施加第四级荷载。待加荷完成后, 第 1 天每隔 2 个小时读取测斜管数据 1 次, 以后每天测读 1 次, 测读数不少于 5 天。

3 试验结果

3.1 深层土体水平位移监测结果

本次对比试验, 每组试验组均在荷载施加范围 ($3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) 外 0.5 m、边长中间部位埋设 2 根测斜管, 管长 16 m。

(1) 在扰动实施过程中, B、C 两组试验组均未监测到深层土体水平位移; 其中 C 组的 2 点扰动的试验组, 扰动结束后只在地表出现少量负位移。

(2) 在荷载施加过程中, 由于本次试验荷载较小, 三组对比试验组, 均未监测到深层土体水平位移的发生。

3.2 沉降监测结果

本次三组对比试验, 每组各埋设 6 点沉降监测点, 将其中各组 3、4 点的沉降监测结果汇总成表 2, 将各试验组中间沉降板沉降监测结果绘制成图 3。

表 2 沉降变形汇总表

Table 2 Summary of settlement deformation

荷载	级数	0	1 级	2 级	3 级	4 级					
	/kPa	0	16.25	32.5	48.75	65.00					
A 组	日期	5/25	5/25	5/25	5/25	5/25	5/26	5/26	5/27	5/28	5/29
	时间	10:00	15:00	17:20	18:35	18:24	9:20	16:50	9:20	9:00	9:00
	A3	0	1.91	4.29	7.31	8.14	9.41	13.13	14.24	14.84	14.84
	A4	0	1.84	3.86	7.06	7.56	8.32	11.2	12.08	12.99	13.01
B 组	日期	5/25	5/25	5/25	5/25	5/25	5/26	5/26	5/27	5/28	5/29
	时间	10:00	15:01	17:21	18:39	18:25	9:20	16:50	9:20	9:00	9:00
	B3	0	4.85	8.65	12.65	13.76	14.51	19.48	20.43	21.34	22.03
	B4	0	4.95	9.15	13.2	14.13	15.93	20.95	22.76	24.64	25.61
C 组	日期	5/25	5/25	5/25	5/25	5/25	5/26	5/26	5/27	5/28	5/29
	时间	10:00	15:05	17:23	18:41	18:30	9:20	16:55	9:20	9:00	9:00
	C3	0	5.8	10.11	13.3	14.41	15.49	21.3	23.29	24.92	25.92
	C4	0	5.97	11.38	15.56	16.85	17.77	21.97	23.91	25.78	26.97

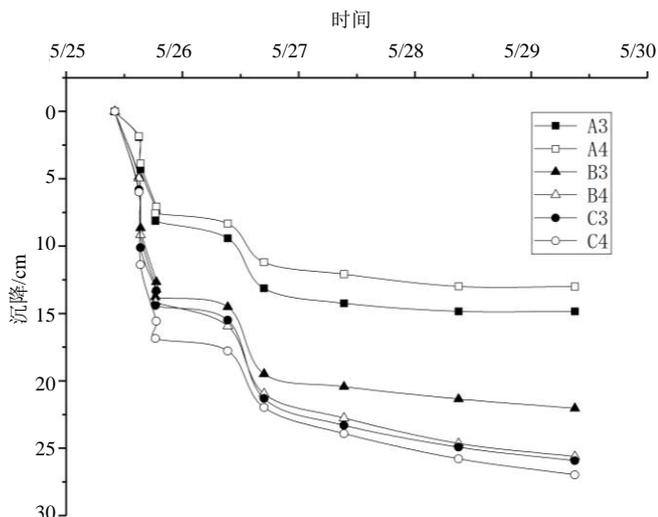


图3 各试验组中间沉降板监测结果汇总图

Figure 3 Summary of monitoring results of intermediate settlement plate in each test group

4 结果分析与讨论

(1) 通过三组现场模型试验累计沉降变形监测结果看, B、C 二组扰动排水固结试验的累计沉降, 均大于未扰动试验对应的累计沉降, 充分证明气扰是能加速软土排水固结的一种工艺。

(2) 通过三组现场模型试验沉降变形速率看, B、C 二组扰动排水固结试验在扰动后一天内的沉降速率较未扰动试验的高出很多, 但后期速率差异不大, 说明小孔高压气体在土体中产生可控的“薄层”切割面, 短时间内可加速土层排水, 但待气孔闭合及土体恢复后加速排水功能快速消失, 由此可见, 气扰能一定程度上起到减少施工工期、降低工后沉降的作用, 但气扰作用快速消失的特性会大大影响其实际工程应用时的功效。

(3) 通过 B、C 两组气扰排水固结试验的累计沉降结果看, B 组 4 点气扰的效果反而差于两点扰动, 分析原因有: ①本次试验是第一次现场原位采用连续旋喷气扰的排水固结试验, 无经验参考、无成熟理论, 首先进行的四点扰动试验模型, 采用的压力 (0.8~1.2 MPa) 过大、扰动转速过快 (12~18 转/min)、提升速率较慢 (0.5 m/min), 切割面偏多; 后面进行的 C 组 2 点气扰, 是在总结 B 组 4 点气扰后进行的, 采用的较小压力 (0.4~0.6 MPa)、较慢扰动转速 (9~15 转/min)、较快提升速率 (1 m/min), 从现场情况看明显好于四点扰动; ②本次模型试验尺寸小、B 组 4 点气扰扰动间距太近,

导致扰动面局部多次交叉重复, 可能导致局部“块扰”。

5 结语与展望

(1) 喷射气扰改良排水固结法在减少施工工期、降低工后沉降、改善土体剪应变等方面, 均能有效改良现有排水固结方法, 作为地基处理中一种开创性方法, 为一种主动排水的地基处理方式, 其效果远大于目前地基处理方法的被动排水效果。

(2) 喷射气扰改良排水固结法效果虽然明显, 但扰动面快速闭合会影响扰动效率, 今后应研发掺有功能性材料的高压气溶胶代替高压气体, 以有效地解决这一问题。

(3) 高压气溶胶解构排水是今后重要研究方向, 在此次模型试验的基础上, 进一步开展室内模型试验、试验段原位试验研究。

(4) 试验手段与理论研究相结合, 对高压气溶胶解构排水的深层立体排水、深层增压、气举效应三大主要机理, 进行深入研究。

(5) 建立高压气溶胶解构排水方法的设计体系, 尤其是压力、转速、旋喷时间等施工参数, 应根据设计要求、土性、井径比、排水深度等进行控制性标准制定。

(6) 建立高压气溶胶解构排水方法的设计、施工、验收等流程体系, 制定完善工法。

(7) 开展高压气溶胶解构排水固结法示范工程试验, 为该方法大面推广及应用积累经验。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] 吴慧明. 一种不同深度扰动结合排水固结的软土地基处理方法: 中国, 201510301241.4[P]. 2016-06-04.
- [4] 吴慧明. 一种应用气溶胶对软土地基进行扰动处理的方法: 中国, CN201611224965.4[P]. 2018-12-11.
- [5] JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [6] JGJ 340-2015 建筑地基检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.