

高压气溶胶解构排水固结法处理软基现场试验研究

吴慧明¹, 龚晓南², 林小飞¹, 宋 词¹, 马泉坤¹

(1. 浙江开天工程技术有限公司, 浙江 宁波 315000; 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: 高压气溶胶解构排水固结法是一种新型软土地基处理方法, 本文在工程现场选取了多组大尺寸试验段, 采用多种原位测试技术, 进行了长期试验, 获取了翔实可靠的原始数据。试验结果表明, 由于此方法独具的土体解构、深层增压、气举效应和降水等综合作用, 使得施工期排水速度快、处理深度深、侧向位移小, 从而缩短工期、减少工后沉降, 还可减少人工荷载, 取得了显著的经济效益。研究成果是大规模工程应用及新技术工法建立的可靠依据, 也是深入理论研究的必要基础。

关键词: 高压; 气溶胶; 解构; 排水固结; 地基处理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)02-0098-07

In-situ test study on the method of high pressure aerosol injecting structure decomposition drainage consolidation for soft soil ground treatment

WU Hui-ming¹, GONG Xiao-nan², LIN Xiao-fei¹, SONG Ci¹, MA Quan-kun¹

(1. KaitianEngineering Technology co. Ltd, Ningbo 315000, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: High pressure aerosol injecting structure decomposition drainage consolidation is a new method for soft soil ground treatment. In this paper, a number of large-scale test sections were selected from the engineering site, a variety of in-situ testings were conducted, and accurate and reliable original data were obtained. The test results show that due to the unique comprehensive effects of soil decomposition, deep pressurization, air lift effect and precipitation, this method will speed up the drainage during the construction period, since the depth of treatment is deep, and the lateral displacement is small. So the method can thus shorten the construction period, reduce the post-construction settlement, and the artificial pre-loadly. This in-situ test research is the basis for large-scale engineering applications and the new technologies, as well as for theoretical research in the future.

Key words: high pressure; aerosol; structure decomposition; drainage consolidation; foundation treatment

0 概 述

排水固结法^[1-2]是一种常用的软基处理方法, 由排水系统和加压系统组成。排水系统包括砂井或塑料排水板等竖向排水体和砂垫层等水平排水层, 加压系统可选堆载预压、真空预压或联合预压。工程经验表明, 该方法普遍所需工期较长, 堆载预压法常受土石方资源限制, 真空预压法成本较高。吴慧明^[3-5]发明的新型高压气溶胶解构排水技术, 通过在设置了排水系统的软基中增加一道旋喷注射高压气溶胶工序, 用以改进现有固结法的不足。高压气

体旋喷切割可完成土体解构, 携带的环境友好型溶胶组份快速掺入土体起到提高强度与渗透性作用, 最终在深部土体内形成多组间隔分布的水平向排水面, 土体内一维竖向排水系统改进成立体排水系统。高压气体首先对深部土体产生竖向增压, 然后逐渐沿竖向排水体上升至地面产生强烈的“烟囱现场”, 即气举效应, 地表平面加荷系统改进成地下、地上共同作用的立体加荷系统。高压气溶胶解构排水实施完成后, 竖向排水体及周围土体内的水位大幅度下降, 起到一定程度的降水作用。新技术解构、深部增压、气举、降水等各种特有效应共同作用后,

收稿日期: 2020-04-03

基金项目: 浙江省住建厅科研项目 (2015K152); 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2019B10047)。

作者简介: 吴慧明 (1967—), 女, 江苏南通人, 博士学位, 教授级高工, 主要从事岩土工程领域科研与生产。E-mail: 1242739931@qq.com。

土体处理深度加深、速度加快、效果加大。该技术增加的沉降可取消或部分取消预压法的超载, 节省预压土石方, 加快工期, 有着显著的经济性。

宁波北仑万人沙滩工程, 由海域沙滩与陆域广场组成, 陆域采用围海吹泥而成, 面积约 20 万 m², 原状软土厚度 30 m 左右。排水固结法是该项目软基处理的首选方法, 如采用传统堆载预压方式存在当地土石方资源缺乏、建设工期要求紧、造价超过预期等问题。高压气溶胶解构排水固结法是解决传统排水固结预压法存在问题的方法之一, 但目前缺少现场试验验证方法的有效性。本文的现场试验研究也是验证设计合理性、总结施工工艺及参数的重要环节。

1 试验场地工程地质概况

试验段地处梅山水道南堤北侧、毗邻洋沙山西侧。场地原始地貌为泥质海滩, 后吹填淤泥并经浅层真空预压处理至地面承载力特征值 40 kPa; 深层海积淤泥未经处理, 不能满足场地后续建设承载力及沉降变形要求。在场地深层软基处理前, 场地典型地质剖面如图 1 所示, 主要土层的物理力学性质指标如表 1 所列。



图 1 典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological profile

表 1 地基土物理力学性质指标 (地基处理前)

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of the foundation soil (Initial survey)

层号	土层名称	含水量 w/%	重度 γ/(kN/m ³)	孔隙比 e	液限 w _L /%	塑限 w _p /%	压缩模量 E _{S1-2} /MPa	水平固结系数 C _h /(cm ² /s)	垂直固结系数 C _v /(cm ² /s)	水平渗透系数 k _h /(cm/s)	垂直渗透系数 k _v /(cm/s)	承载力特征值 f _{ak} /kPa
① ₁	淤泥	62.2	15.9	1.769	49.9	26.9	1.64	4.49E-03	2.89E-03	3.59E-08	2.16E-08	40
① ₂	淤泥质黏土	49.2	16.8	1.396	41.9	21.9	2.50	4.54E-03	4.53E-03	1.15E-07	1.05E-07	50
② ₁	淤泥质黏土	45.8	17.1	1.294	41.5	21.8	2.72	5.41E-03	5.30E-03	9.22E-08	9.11E-08	55
② ₂	淤泥质粉质黏土	38.4	17.9	1.070	36.2	21.1	3.40	6.83E-03	6.68E-03	1.85E-08	1.21E-08	65
② ₃	淤泥质黏土	45.3	17.2	1.281	42.0	21.8	2.77	5.55E-03	5.55E-03	5.81E-08	5.54E-08	60
④	黏土	43.8	17.3	1.240	47.4	24.6	3.06	5.94E-03	5.33E-03	7.25E-08	6.07E-08	80

2 试验段设计及施工概述

2.1 设计条件

试验段区域滩涂原地面标高约 -1.00 m (黄海高程, 下同), 吹填疏淤泥并进行第一次浅层真空预压至标高 +1.55, 吹填土层厚度 2.55 m。本次软基处理目标: 软基处理后交地标高 +3.20 m, 地基承载力特征值 ≥ 80 kPa, 工后 10 年沉降 ≤ 20 cm。计算采用的典型地质剖面图见图 1, 加载-时间关系见图 2。

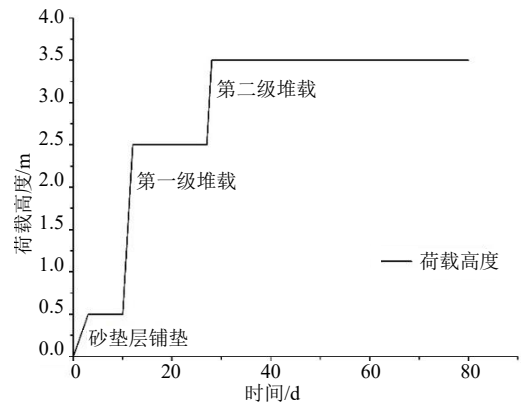


图 2 加载-时间关系图

Fig. 2 Load varies with time

2.2 对比试验设计

试验段中布置了 3 组对比试验区 S1、S2、S3, 每个试验区面积均为 24 m×40 m、试验区间距均为 30 m, 3 试验区地面标高、地质条件基本一致。竖向排水采用 SPB-B 型塑料排水板, 设计长 19.0 m。试验区 S1 排水板间距 1.1 m 正方形布置, 采用传统堆载预压法; 试验区 S2 与 S3 排水板间距分别为 1.2 m、1.1 m 正方形布置, 采用堆载结合高压气溶胶解构排水固结法。高压气溶胶喷射法注入深层土体喷射注气孔间距 9.0 m、最大深度 17.0 m。试验段及观测和测试点平面布置如图 3 所示, 试验段 1-1' 剖面见图 4。

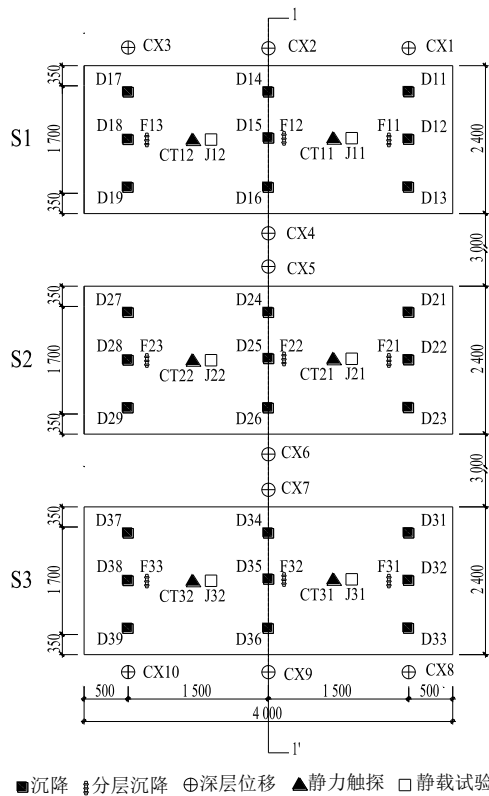


图3 试验段及观测和测试点平面布置图(单位: mm)
Fig. 3 Layout plan of test and monitoring points (Unit: mm)

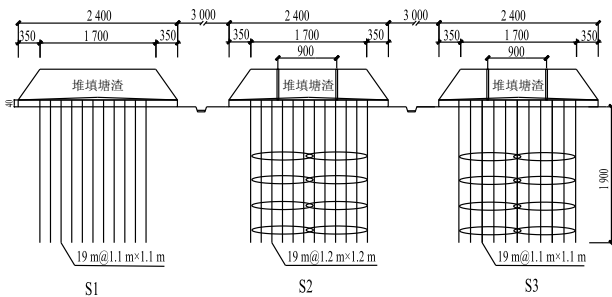


图4 试验段 1-1'剖面图(单位: mm)
Fig. 4 Profile of test section 1-1' (Unit: mm)

2.3 施工工艺及工序

高压气溶胶解构排水固结法主要施工工艺及试验流程见图5, 3个试验段均为施工期40 d、稳定期125 d。

3 试验结果及评价

3.1 沉降观测结果与分析

(1) 地面沉降速率结果与分析

3个试验区 S1、S2、S3 中心点 D15、D25、D35 的沉降速率-时间关系整理成图6。由图6可看出:

a) 两次加荷 1~2 d 内曲线呈尖锐状, 表明沉降速率急剧上升又快速下降, 其中包含大量软土侧

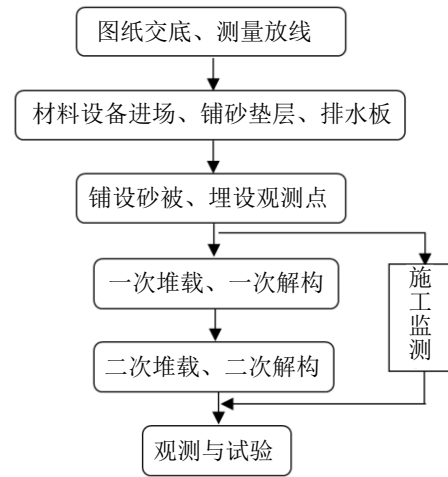


图5 施工工艺流程图
Fig. 5 Flow chart of construction technology

向挤出引起的沉降。

b) S2、S3 试验区在深层土体高压气溶胶解构施工后, 沉降速率-时间关系曲线出现明显“峰”值, 这种沉降速率增加时间可延续 7~15 d, 表明高压气溶胶解构能有效加大、加快沉降。这些“峰”与原有沉降趋势线围成的面积(图中阴影部分), 可估算为高压气溶胶解构作用增加的沉降量, 对第1次与第2次解构增加的沉降量进行估算, S2 分别为 39 mm、63 mm, S3 分别为 41 mm、77 mm, 即两次高压气溶胶解构作用累计增加沉降量 S2 为 102 mm、S3 为 118 mm。未解构的 S1 试验区在荷载稳定期间观测数据不会出现速率增大效应, 沉降速率平缓减少, 且后期 S2、S3 沉降稳定速率仍与 S1 基本一致。

以上试验结果表明, 高压气溶胶解构作用能加大施工期的沉降速率及沉降量。

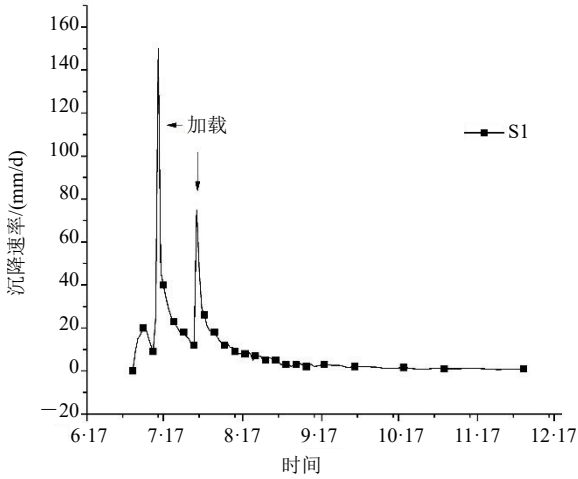
(2) 地面沉降观测结果与分析

每个试验区地表均有 9 个沉降观测点, 将 3 个试验区的中心点(D15、D25、D35)沉降值、9 个观测点沉降平均值与时间变化关系汇总成图7, 从图7可以看出:

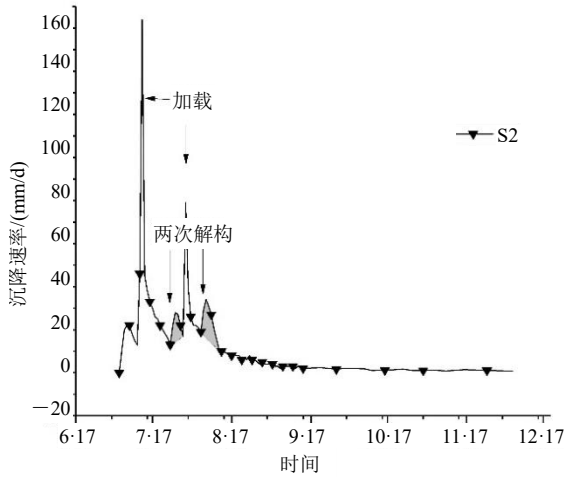
a) 3 个试验区中心点沉降量与平均沉降量, 均表现为 S3>S2>S1。施工期 S1、S2、S3 中心点最终沉降量分别为 1 238 mm、1 411 mm、1 513 mm。施工期平均最终沉降量分别为 1 050 mm、1 140 mm、1 272 mm。

b) S1 试验区可以看出, 堆载后沉降快速发展, 之后沉降速率逐渐减小。S2 和 S3 在高压气溶胶结构作用之后, 沉降速率有明显的增大效应。

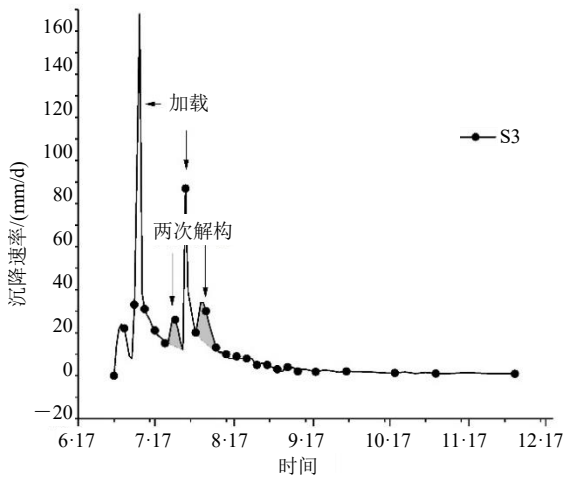
c) 与 S1 试验区相比, S2 及 S3 区两次解构均



(a) S1 区中心点沉降速率-时间关系图



(b) S2 区中心点沉降速率-时间关系图



(c) S3 区中心点沉降速率-时间关系图

图 6 沉降速率-时间关系图

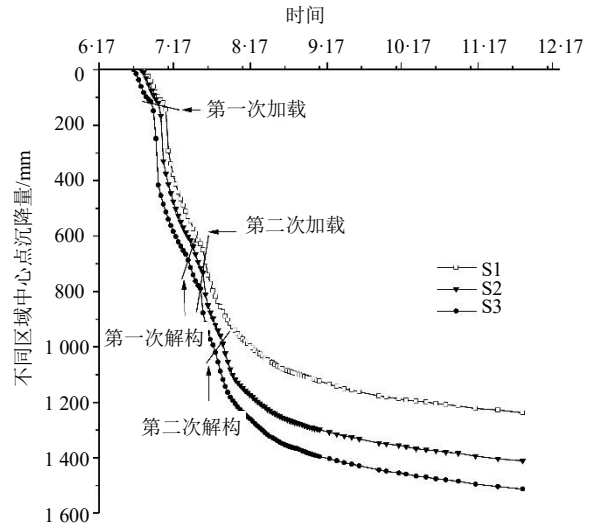
Fig. 6 Settlement rate varies with time

使沉降-时间曲线的斜率明显增加, 累计沉降量大于 S1。在第一次解构时, 3 个试验区 S1、S2、S3 第一级堆载延时分别为 17 d、19 d、21 d, 气溶胶解构作用前后的累计沉降数据列于表 2, 由表 2 可见, 与未解构的 S1 试验区相比, S2 试验区因两次解构分别增加了 76 mm、61 mm, 累计增加 137 mm; S3 试验段因两次解构分别增加了 61 mm、73 mm, 累计增加 134 mm, 与上述按沉降速率估算增加量 102 mm、118 mm 接近。

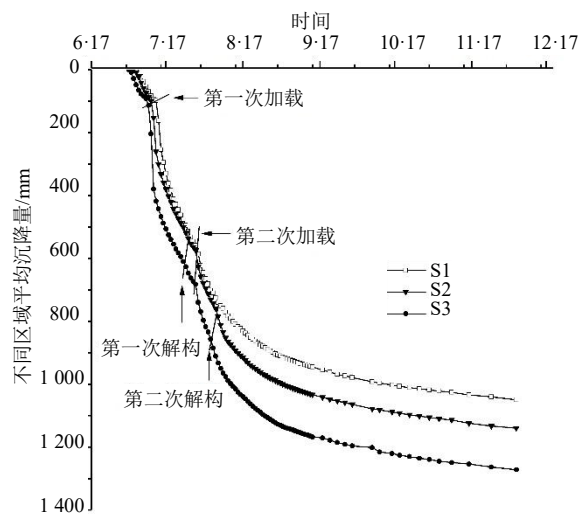
以上试验结果表明, 高压气溶胶解构排水法能大大增加施工期的沉降量。

3.2 分层沉降观测结果及分析

根据 3 个试验区分层沉降实测数据, 计算出施工期结束时不同深度的分层压缩量, 并将计算成果



(a) 中心点沉降量-时间关系图



(b) 平均沉降量-时间关系图

图 7 沉降量-时间关系图

Fig. 7 Settlements vary with time

表2 解构前后的累计沉降量比较表

Tab. 2 Comparison of cumulative settlements before and after disturbance

工况	段号	点号	解构	累计沉降量/	沉降增量/	较 S1 增加沉降量/
				mm	mm	mm
第一次解构	S1	D15	前	581	63	—
			后	644		
	S2	D25	前	616	139	76
			后	745		
	S3	D35	前	666	124	61
			后	790		
第二次解构	S1	D15	前	873	79	61
			后	952		
	S2	D25	前	989	140	—
			后	1 129		
	S1	D15	前	818	98	73
			后	916		
S3	D35	前	993	171	—	
		后	1 164			

整理成图 8。从图 8 中可以看出：

(1) 3 个试验区均在 0~3 m，出现分层土体压缩畸变现象，原因是表层低围压导致荷载施加瞬间，土体出现较大侧向剪应变所致。

(2) 传统法的 S1 试验区，分层压缩量随着深度增加呈现递减趋势，与附加应力分布随深度发展规律一致。

(3) 高压气溶胶解构处理的 S2 及 S3 试验区，分层压缩量在深度 3~12 m 之间土层压缩较大，且该区间的分层压缩量明显大于 S1。本次试验条件下，S2、S3 最大分层压缩量均在深度 7~10 m 之间，S2、S3 最大分层压缩量分别为 106 mm、126 mm。

中部土体较上部出现更大的有效压缩量，这是高气溶胶解构排水固结方法独具的优势特征，充分表明该方法能有效加大软土处理深度。

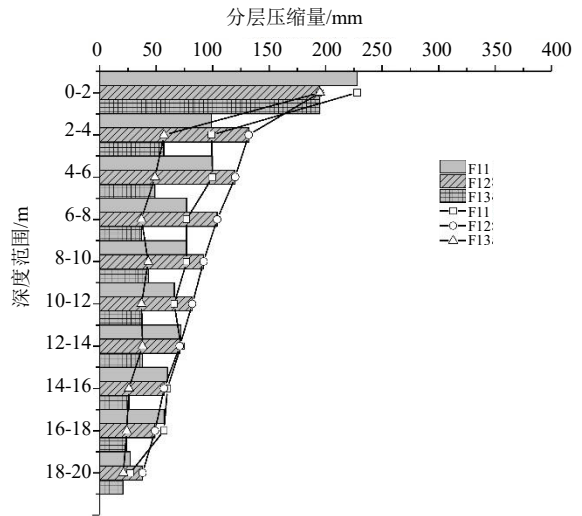
3.3 深层土体水平位移观测分析

选取本试验段最具代表性的对称布置的测斜孔 CX2 (S1 区外侧) 及 CX9 (S3 区外侧)，高压气溶胶解构后 5 d，CX9 量测的深层土体侧向位移增量，与传统法 CX2 对应时段的位移增量进行比对，两孔实测位移增量-深度关系绘制成图 9，其中土体向试验段外侧位移用“+”表示、向内用“-”表示。从图 9 可以看出：

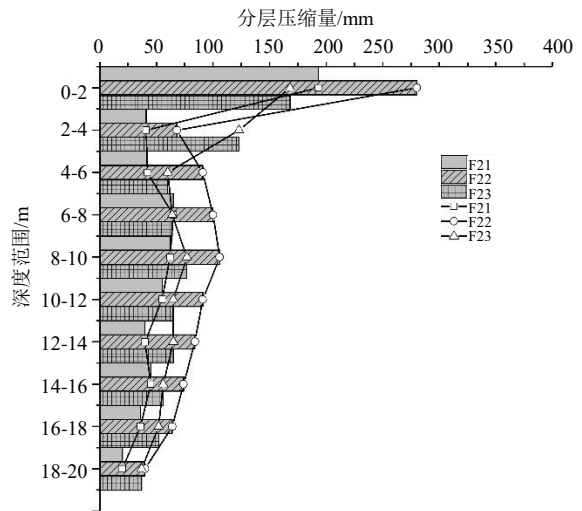
(1) 3 m 以上，由于表层低围压导致堆载后土体水平位移增量出现畸变。

(2) 第一次解构：3 m 以下深层土体水平位移增量，解构法对应的测斜孔 CX9 较传统法 CX2，不仅大大减小，而且在 6~17 m 范围局部出现“-”

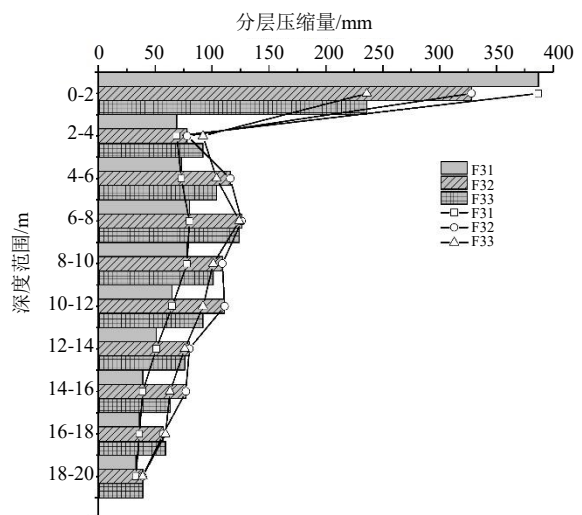
增量，说明高压气溶胶解构作用能使水平挤出的土体重新回缩。



(a) S1 区分层压缩量-深度关系图



(b) S2 区分层压缩量-深度关系图



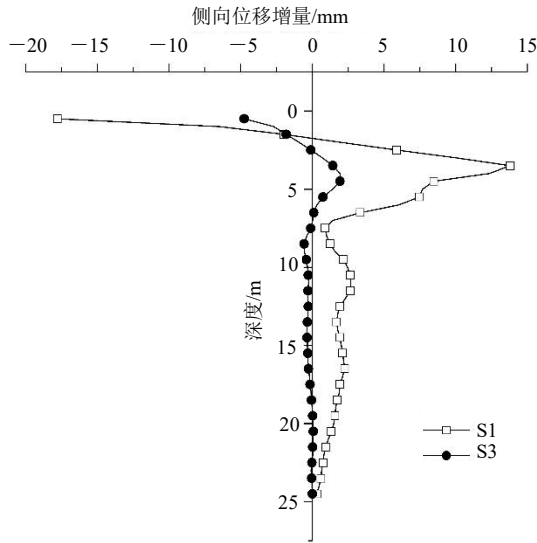
(c) S3 区分层压缩量-深度关系图

图 8 土体分层压缩量-深度关系图

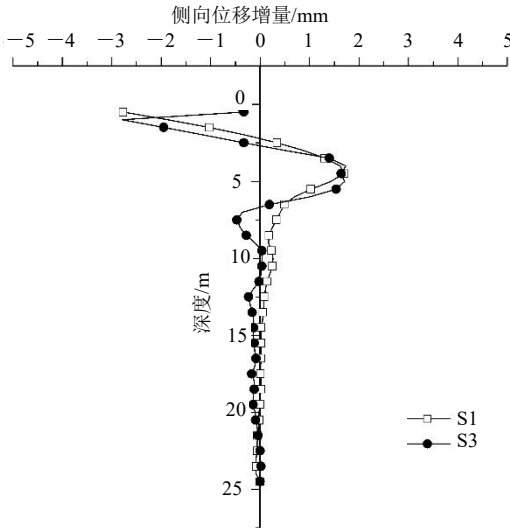
Fig. 8 Compression of each soil layer varies with depth

(3) 第二次解构: 3~5 m 范围深层土体水平位移增量, 解构法对应的测斜孔 CX9 与传统法 CX2 基本一致; 但 CX9 在 5~10 m 范围局部出现“-”增量、10 m 以下均为“-”增量, 说明解构法能使水平挤出的土体出现较大回缩; CX2 增量虽然随深度减小, 但均未出现“-”增量, 说明土体仍进一步向外挤出。

可见, 高压气溶胶解构作用对于抑制深部土体侧向位移具有一定效果。



(a) 侧向位移增量-深度关系曲线 (第一次解构 5 d 内)



(b) 侧向位移增量-深度关系曲线 (第二次解构 5 d 内)

图 9 侧向位移增量-深度关系曲线

Fig. 9 Lateral displacement increment varies with depth

3.4 静力触探成果

选取 S1、S2、S3 试验区中 CT11、CT21、CT31 测点, 在地基处理前后两次的静力触探锥尖阻力^[6] q_c 试验成果整理汇总成图 10; 前后锥尖阻力 q_c

的比值 K 计算整理成图 11。由图 10、图 11 可看出:

(1) 0~3 m 土体, 地基处理前后 q_c 比值 K 均远大于 1, 地基处理效果明显。

(2) 3~15 m 土体, S1 区 K 值位于 1.2~1.9 之间且随深度减小; S2、S3 区 3~10 m 内 K 值位于 1.8~2.3 之间, 随深度变化不大, 10~15 m 随深度减小, 但仍大于 S1 区 K 值。表明该技术处理可大大增加中部土层处理效果。

(3) 15~19 m 土体, 地基处理前后 q_c 比值 K , S1 增量很小, 而 S2、S3 区仍有较好增量, 可见 S2、S3 的深部土体处理效果明显优于 S1。

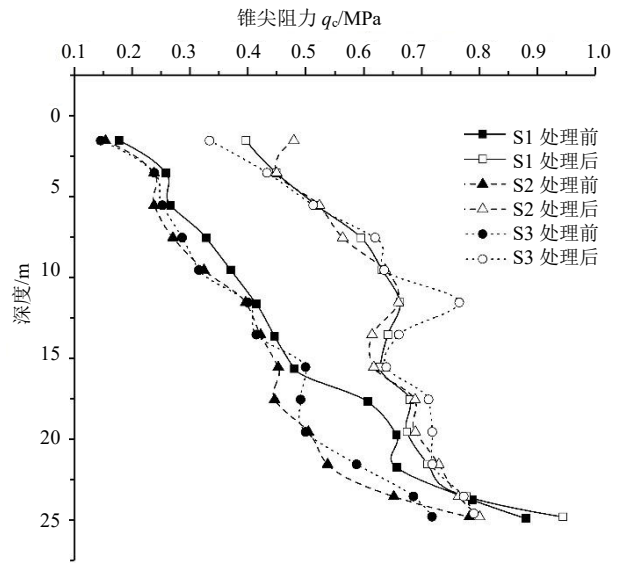


图 10 q_c -深度关系图

Fig. 10 q_c varies with depth

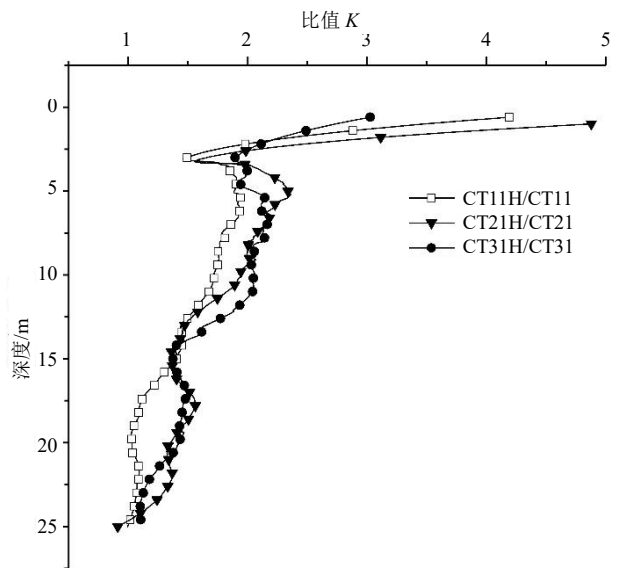


图 11 K 值-深度关系图

Tab. 11 K varies with depth

表3 静载荷试验成果汇总表
Tab. 3 Summary of static load tests

点号	最大试验荷载/kPa	最后一级沉降/mm	累计沉降/mm	回弹后残余变/mm	s/b=0.01 对应荷载/kPa	特征值/kPa
J11	192	4.14	23.88	17.93	>96	>96
J12	192	3.41	24.68	18.32	>96	>96
J21	192	5.11	27.87	22.34	>96	>96
J22	192	3.65	26.40	20.60	>96	>96
J31	192	2.44	20.26	15.64	>96	>96
J32	192	3.72	26.97	17.58	>96	>96

综上,较传统法,高压气溶胶解构排水法处理深度更深、处理效果更好。

3.5 静载试验

按照《建筑地基处理技术规范》^[7](JGJ 79-2012)进行地基原位静载试验,载荷板采用2 m×2 m正方形刚性板,试验结果见表3。结果表明,3个试验段6个试验点的竖向抗压极限承载力均大于192 kPa,承载力特征值均大于80 kPa设计要求。

4 结 论

通过试验段对比试验,万人沙滩项目排水固结处理软基方法可行,可以达到消除部分地基土沉降、提高地基强度的目的。在同样堆载条件下,采用高压气溶胶解构排水固结地基处理技术,可以起到加大、加快排水固结的软基处理效果。可初步总结以下认识和结论:

(1) 高压气溶胶解构技术施工期沉降速率明显增加。该技术可提高施工期的排水固结速率,缩短工期。

(2) 高压气溶胶解构技术能增加排水固结施工期沉降量。该技术可提高软基处理效果,增加施工期沉降,减少工后沉降。

(3) 高压气溶胶解构技术能加大地基处理深度,有效增加3~15 m深度土层压缩量,且对改善15~19 m深度土层强度仍有效果。

(4) 高压气溶胶解构技术可有效抑制深部土体侧向位移。

(5) 高压气溶胶解构处理后地基承载力均远大于设计要求。

高压气溶胶解构排水技术作为地基处理中一种开创性方法,是一种强化排水固结的地基处理方式,其效果优于目前地基处理方法的被动排水效果,有很大的应用前景。

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. 地基处理技术与展望[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] 吴慧明, 等. 喷射气扰改良排水固结法现场模型试验研究[J]. 地基处理, 2019, 1(2): 8-11.
- [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.
- [7] 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.