

某软土地基处理排水板优化及加固效果分析

方利泽

浙江大学建筑设计研究院有限公司 杭州浙江

【摘要】真空预压塑料排水板在沿海地区的软土地基处理中广泛应用，塑料排水板长度和间距的确定是平衡软土地基处理效果与工程造价的关键。本文基于某沿海地区软土地基处理工程，提出了实际工程中塑料排水板长度和间距的选取及优化设计方法。首先，采用规范法计算初步确定塑料排水板长度；其次，基于 PLAXIS 2D 数值模拟分析塑料排水板长度和间距对地基沉降量及沉降速率的影响，提出优化设计参数；最后，通过现场实测分析塑料排水板设计优化后的加固效果。结果表明：优化后的排水板长度为 10m~11m，比原设计排水板长度减短 36.8%~39.6%，经济造价节约了近 30%。排水板的合理间距在 0.8m~1.8m 范围内，随着排水板间距增加，固结速率逐渐减小，但趋于稳定的沉降值基本一致。排水板优化加固后软土地基的最终沉降量约为 55.39cm，与数值计算沉降量 61.57cm 相差约 10.03%，十字板平均剪切强度较未处理前增加约 82.94%。该研究结果为软土地基处理工程中排水板优化设计提供了有效指导。

【关键词】塑料排水板；真空预压；软土；地基处理；优化设计；数值分析

【收稿日期】2024 年 12 月 12 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.20250001

Optimization and reinforcement effect analysis of vertical drain in a soft soil foundation treatment

Lize Fang

The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co, Ltd, Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】The prefabricated vertical drain (PVD) with vacuum preloading is widely used in soft soil treatment in coastal areas. The length and spacing of PVD are the key parameters affecting the reinforcement effect and construction costs. Based on a soft soil treatment project in coastal area, this paper puts forward the selection and optimal design method of the length and spacing of PVD. Firstly, the length of PVD is preliminarily determined according to the issued standard. Secondly, the influence of the length and spacing of PVD on the final settlement and settlement rate of the foundation is analyzed based on PLAXIS 2D numerical simulation, and the optimal design parameters are proposed. Finally, the reinforcement effect of PVD after design optimization is finally analyzed through the field measurement. The results show that a reasonable optimized length of the PVD is 10m~11m in this project. Compared with the original design, the length of PVD is reduced by 36.8%~39.6%, and the construction cost is saved by 30%. The reasonable spacing of the PVD is in the range of 0.8m~1.8m. With the increase of the spacing of the PVD, the consolidation rate decreases gradually, but final settlement values tend to be the same. The final settlement of the soft soil foundation after treatment is about 55.39cm, which shows a deviation of about 10.03% from the numerically calculated settlement of 61.57cm. The average shear strength from vane shear tests increases about 82.94% for the soft soil foundation after treatment. The results provide effective guidance for the optimal design of PVD in soft soil treatment.

【Keywords】Prefabricated vertical drain (PVD); Vacuum preloading; Soft soil; Soil treatment; Design optimization; Numerical analysis

引言

中国沿海地区存在大规模的海涂围垦工程，多数

以吹填淤泥软土作为基础物源^[1-2]。在这种含水率高、渗透系数小、孔隙比大、抗剪强度低、灵敏度高的软

土层上修建(构)筑物通常会遇到沉降量大及不均匀、承载能力低、固结完成时间长等问题,严重影响建(构)筑物的施工和正常使用^[3]。开展地基处理是沿海软土地区工程中极其重要且必不可少的一部分。

目前工程中通常采用真空预压排水固结法对软土地基进行处理,该方法具有施工简便,造价低廉,加固效果显著的特点,适用于大面积的软基处理工程^[3]。在排水固结中,排水板的设计对地基加固起到关键性作用。罗嘉金^[4]基于工程实例的数值分析认为塑料排水板的间距和长度是影响加固效果和经济效益的关键因素。规范^[5]指出排水板的间距通常可按井径比(竖井的有效排水直径与竖井直径的比值)选用。塑料排水板的间距一般选用井径比为15~22。工程中,塑料排水板间距多数在0.8m~1.5m之间,排水板间距越密,土层加固速率越快,其原因是减小了土体水平方向的渗流路径,加快了土体中孔隙水的排出^[6-7]。赵相超等^[8]指出,在常用的排水间距布置范围内(1~1.8m),减小排水板的布置间距可有效增大固结速率,但随着时间的增长,最终的加固效果基本不变。由此可见,排水板设计的关键在于排水板的入土深度。针对大面积需处理的地基土,若排水板设计过长,会极大增加经济支出,若排水板设计过短,则地基加固效果会低于设计标准,导致地基加固效果无法达到预设的强度。然而对于排水板的入土深度取值,规范^[5]虽然提出了计算思路进行计算选取,但所得到的深度是否经济合理取决于设计师的理论功底及对土层性质认识的深

度。因此,如何科学选取排水板长度,使地基处理既经济又合理是目前真空预压排水固结法研究中的一个重点和难点。

本文以河北省沧州市某液体化工罐区工程吹填软土地基的排水板加固处理为例,通过规范公式计算初步确定排水板的长度范围;结合数值分析开展不同排水板长度和间距对加固效果的影响分析,提出排水板长度和间距的优化设计结果;并基于现场实测数据和数值分析结果对比论证排水板优化后的地基加固效果。

1 工程概况及地质条件

河北省沧州市某液体化工罐区工程场地原为潮间带浅滩,2014年经人工吹填形成陆地,其平均地下水埋深约1.9m。该场地地表平均标高约为5.4m,场地东西总长约835m。需处理的地块长度约734.75m~739.23m,南北宽约497m,处理面积约366~329.82m²(图1)。

该场地自上而下土层主要为:1 冲填土、2 淤泥质黏土、2-1 粉土、3 粉质黏土、4 淤泥质黏土、5 黏土和6 粉土,各土层基本物理性质见表1。土层最大含水量达48.13%,水平最大渗透系数为40.20%,垂直最大渗透系数为21.90%。对该软弱地基采用真空预压排水固结法以提高场地地基承载力,水平排水通道设计采用0.5m厚中粗砂层,垂直排水通道采用塑料排水板,排水板间距原设计为1.0m,按正方形布置,板底原设计标高为-12.0m,即排水板长度约17.4m。

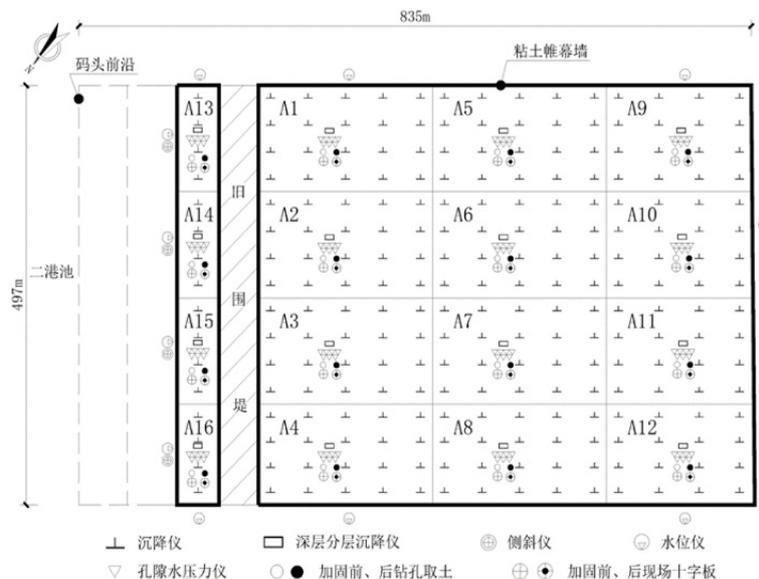


图1 地基处理总平面图

表 1 典型土层参数表

层号	岩土名称	含水量 w(%)	湿密度(g/cm ³)	承载力特征值(kPa)	压缩模量 建议值	天然孔隙比 e ₀	渗透系数(10 ⁻⁶ cm/s)		平均层厚 m
							水平	垂直	
1	冲填土	38.81	1.80	-	1.3-	1.108	7.86	4.77	5.4
2	淤泥质黏	48.13	1.68	40	2.0	1.420	0.77	0.65	3.0
2-1	粉土	24.67	1.92	90	6.0	0.740	26.99	13.61	1.2
3	粉质黏土	34.67	1.81	70	4.0	1.010	0.31	0.27	2.8
4	淤泥质黏	41.36	1.77	60	3.0	1.180	0.39	0.34	3.6
5	黏土	35.57	1.82	90	4.5	1.040	1.63	1.42	1.8
6	粉土	21.37	1.98	130	10.0	0.650	40.20	21.90	3.6

2 排水板优化的理论计算分析

为了分析排水板的合理的长度,根据规范预压荷载下地基最终竖向变形计算公式^[5],分别计算考虑 0.5m 厚砂垫层堆载(9kPa)与真空预压(85kPa)作用后的地基沉降量。图 2 分别为考虑地基土原始水位-1.9m 及水位下降至-5.4m 随深度变化的沉降量。可以看出,考虑水位下降至-5.4m 的最终地基

沉降量为 115.62cm,不考虑地下水位下降的最终地基沉降量为 100.07cm。两条曲线对比分析可知,水位下降至-5.4m 相较于未考虑水位下降的地基最终沉降量增加约 15.55cm,增加了 15.54%,沉降增加较为明显。其主要原因是地下水位下降所引起土体中孔压消散,有效应力增加,进而造成地基沉降量增大。

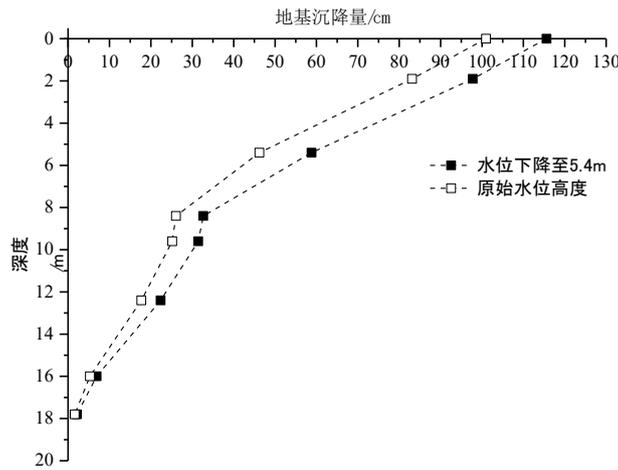


图 2 地基土随深度变化沉降曲线

图 3 为地基土原始水位-1.9m 及水位下降至-5.4m 两种条件下各层土层的沉降量占总沉降量的百分比。可以看出,在两种条件下 1 冲填土与 2 淤泥质黏土的沉降量之和占了总沉降量的大部分,分别达 71.74%和 70.26%。下卧土层除了 4 淤泥质黏土的最终沉降量略微偏大,占总沉降量的 12.3%和 13.38%,分别为 12.43cm 和 15.47cm,其余土层的最终沉降量均小于 10.00%。由此可知,对于总沉降量而言,除了 1 冲填土与 2 淤泥质黏土以外的土层沉降量只占很小一部分,真空预压处理地基深度范围主要影响的是 1 冲填土与 2 淤泥质黏土两层。因此,

塑料排水板并不需要为了穿透 4 淤泥质黏土进行排水固结,而特地将排水板长度设计为 17.4m。排水板长度应主要穿透 2 淤泥质黏土。

根据上述分析,图 4 对比了真空预压处理(假定真空预压主要对 10m 范围土层内的进行处理,即排水板长度为 10m,考虑砂垫层 9kPa 堆载及真空荷载 85kPa)及原始地基土层罐区运营期地面超载 80kPa 作用下的地基沉降量。超载作用的地基最终沉降量根据分层总和法规范修正公式^[9]计算得到。在地下水不变条件下,罐区运营期计算沉降量分别考虑荷载作用面积无限大、20m×20m、15m×15m、

10m×10m 和 5m×5m 五种工况。实际工程中真空预压下，1 冲填土与 2 淤泥质黏土两层地基土的固结度要求达到 85%以上。图 4 中给出考虑地下水位下降时真空预压处理后地基最终沉降量的 85%。可

以看出，真空预压完成后，地基土层 1 冲填土、2 淤泥质黏土的沉降量已经大于罐区运营期超载作用的原始地基沉降量。这意味着地基处理后运营期间，地基土层 1 冲填土、2 淤泥质黏土的沉降将会相对较小。

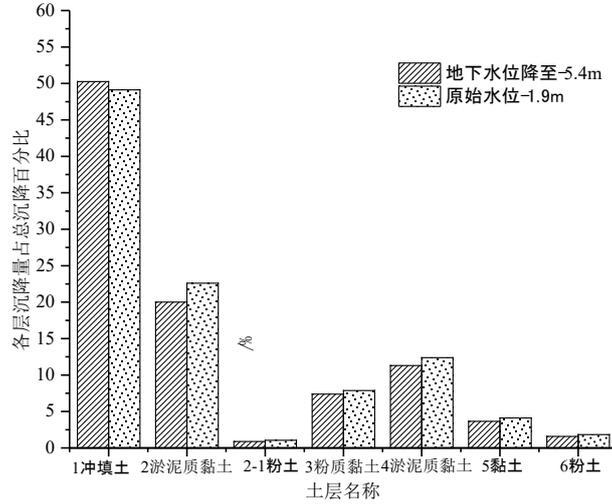


图 3 不同水位条件下各土层沉降量百分比

埋深在 10m 以下的地基土层在运营期 80kPa 的超载作用下，作用面积无限大的累计终沉降量约为 20cm，且最终沉降量将随着荷载作用面积的减小而减小。这是由于在有限荷载面积条件下附加应力随深度衰减而引起的，并且最终沉降量将在非常长的

一个周期内才能完成，因此对罐区运营期的正常使用的影响是非常小的。对比分析同样表明真空预压排水固结真正需要处理的土层主要是 1 冲填土与 2 号淤泥质黏土，对假定排水板长度约 10m 左右对地基进行真空预压处理是可靠的。

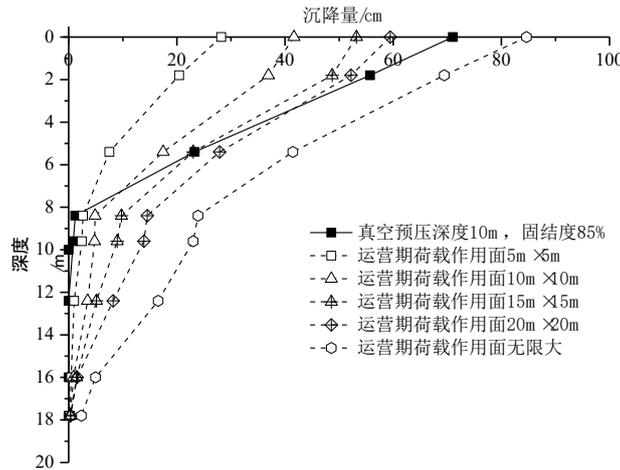


图 4 不同荷载作用面条件下各土层沉降百分比

3 排水板优化的数值计算分析

为了验证计算分析的合理性，本文采用 PLAXIS 2D 进一步开展数值模拟分析。当地基处理面积较大时，工程中通常会进行分区处理。本模型选择原设计

分区加固尺寸长度 126m，两边预留 20m 消除边界的影响。模型 X 方向长度 166m，模型 Y 方向取深度 21.6m；排水板用排水线模拟，上覆荷载用线荷载模拟。真空预压加固时上覆 0.5m 厚的砂垫层考虑

9kPa 的上覆均布荷载，真空预压荷载为 85kPa，抽真空时间为 120 天。根据已有学者的研究经验^[10-11]，采用摩尔库伦本构计算可以有效模拟真空预压处理

地基时的土体，因此，本文同样采用摩尔库伦本构模型进行分析，模型主要土层参数见表 2，土层厚度见表 1。

表 2 各土层 Mohr-Coulomb 本构模型参数

层号	土层	天然容重 (kN/m ³)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	弹性模量 E (MPa)
1	1 冲填土	18.1	8	8	1.3
2	2 淤泥质黏土	17.2	12	9	2.0
2-1	粉土	19.7	6	29	6
3	粉质黏土	18.6	15	13	4
4	淤泥质黏土	17.9	16	10	3
5	黏土	18.5	19	10	4.5
6	粉土	20.3	12	30	8

如图 5 所示，基于上述参数，分别开展四个工况的模拟：工况一为运营罐区直接在原始地基上作用均布荷载 80kPa；工况二为真空预压作用下，排水板长度为 10m；工况三为真空预压作用下，排水板长度为 11m；工况四为真空预压作用下，排水板长度为原设计深度 17.4m。如图 5 所示，四个工况的总沉降位移分别为 62.73cm、71.02cm、72.98cm 及 90.91cm，并且地基土的主要固结沉降在土层深度 10m 范围以内。

实际工程中真空预压下地基固结度要求达到 85%以上，因此预测工况二、三、四的地基沉降量分别为 60.37cm、62.03cm、77.27cm。工况二、工况三、工况四相较于工况一的沉降量分别增加-3.76%、-1.11%、23.8%。由此可知，在进行真空预压加固过程中，排水板长度取约 10m~11m 已经可以满足地基预期固结沉降的要求。若采用排水板长度为 17.4m，其固结沉降已远超出需求值，造成没必要的成本浪费。

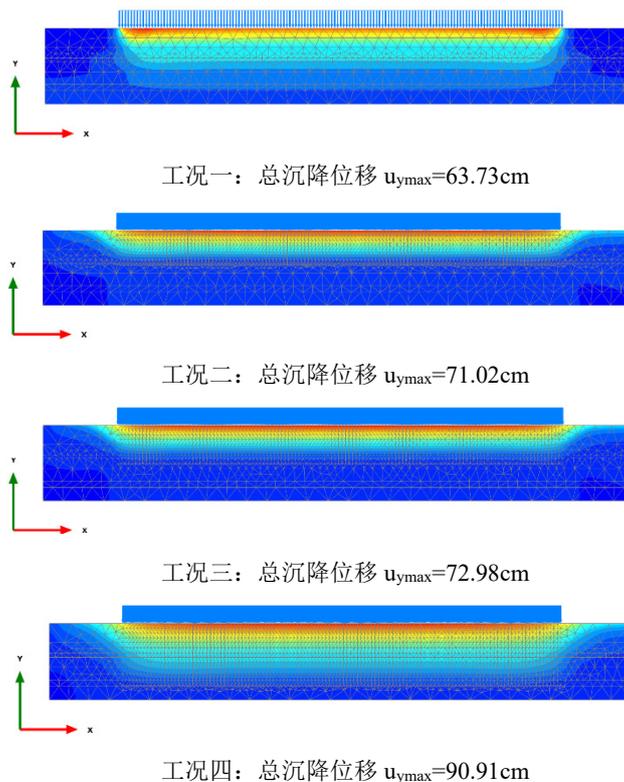


图 5 四个工况沉降位移云图

取排水板长度为 10m，研究不同排水板间距随抽真空时间增加的地基沉降量变化。从图 6 中可以看出，随着抽真空时间的增加，地基沉降量均呈现逐渐增大，并达到一定时间后沉降值趋于平缓。排水板间距为 0.8m 的固结速率要比间距为 1.0m 大，但沉降量最终均在抽真空 120 天后一起达到稳定。排水板的间距在 1.0~1.8m 范围内，间距越大，沉降值趋于稳定所需抽

真空时间越长，但最终趋于稳定的沉降值基本一致。说明随着排水板间距越大，其固结速率逐渐减小，但固结效果基本一致，稳定沉降值均在 71.05cm 左右。在实际工程中，真空预压时间一般在 90~120 天左右，因此本工程排水板间距可选 0.8~1.0m。但考虑经济性，且在该范围固结效果相同下抽真空时间基本一致，原设计选取排水板间距为 1.0 是较为合理的。

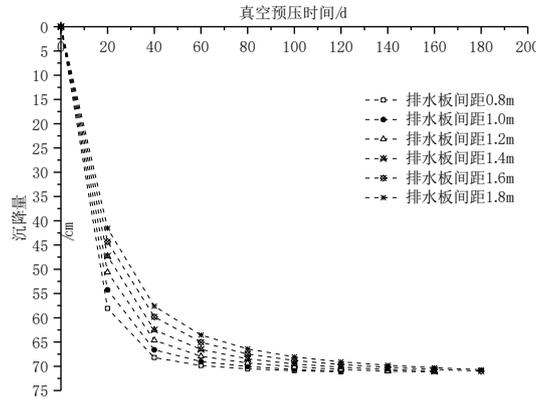


图 6 不同间距排水板的沉降值随抽真空时间变化曲线

综上所述，在本工程真空预压处理中，塑料排水板间距采用 1m，在实际工程中考虑土层的不均匀性，采用了 10.5m 及 11m 的两种排水板长度，相比于原设计排水板长度节约 36.8%~39.6%左右，其经济造价节约了近 30%。

4 现场加固效果分析

4.1 地表沉降结果

图 7 为实测与计算的地表平均总沉降位移量随抽真空时间增长的变化曲线，实际抽真空时间为 95 天，数值计算抽真空时间取 100 天。从图中可以看出，实测加固区固结沉降主要发生在抽真空前期，随着抽真空的进行，土体固结度及土体强度逐渐提升，抽真空中后期沉降速率逐渐减小，固结沉降量逐渐

趋向稳定。表层沉降数据整体上符合真空预压地基处理土体固结变形的一般规律，软弱土层经地基处理后产生了较大的沉降变形，物理力学性质得到了改善，真空预压处理效果明显。实测真空预压处理的平均总沉降位移为 55.39cm（平均固结度 86.7%），在相同固结度下，数值计算得出地表总沉降位移为 61.57cm，实测沉降位移数值计算沉降位移最终变化趋势十分接近，其主要固结沉降均在抽真空前期，后期趋于平缓，最终实测沉降量与数值相差 10.03%，其原因主要是吹填淤泥在真空预压过程中会出现淤堵现象，具体表现为排水板周围形成致密的土柱，土体渗透性极低，影响加固效果^[2]。

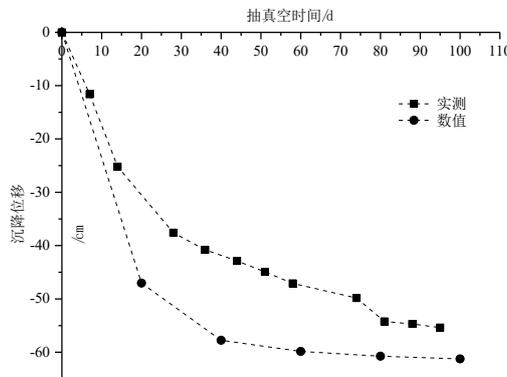


图 7 地表平均总沉降位移曲线图

4.2 土体强度指标变化

如图 8 所示，为地基处理前后十字板剪切强度深度 8m 范围内变化曲线。从图中可看出，未加固前土体最小剪切强度为 0.9kPa，4m 深度范围内平均剪切强度为 6.3kPa，5m 以下范围内平均强度为 28.65 kPa。真空预压后土体强度增幅明显，最小

强度为 18.5kPa，4m 深度范围内平均剪切强度为 27.6kPa，较处理前增加 77.17%，5m 以下范围内平均强度为 52.08kPa，较处理前增加 88.70%，深度范围内平均强度较处理前增加约 82.94%。可见排水板优化后的真空预压地基处理加固效果非常明显。

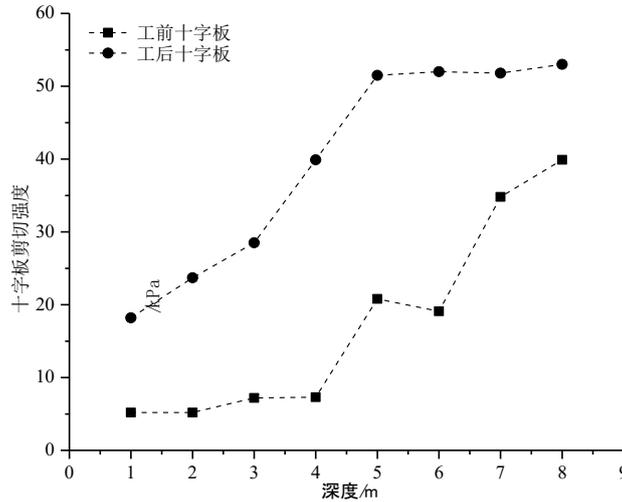


图 8 加固前后十字板强度变化曲线

5 结论

本文根据河北省沧州市某液体化工罐区工程吹填软土地基的案例，结合规范公式计算分析及数值分析对排水板进行了优化设计，并通过实测数据分析了优化后的土体加固效果，结果表明：

(1) 在理论计算的基础上，结合对各土层的工程性质进行分析，并利用数值模拟计算，能够有效得出本工程合理的排水板长度。优化后的排水板长度为 10m~11m，相比于原设计排水板长度减短 36.8%~39.6%左右，经济造价节约了近 30%。

(2) 排水板的合理间距在 0.8m~1.8m 范围内，真空预压的加固速率随着排水板的间距增加而减小。此外，随着加固速率增大，所需抽真空的时间减少；但随着抽真空时间延长，土体的固结效果均能达到基本一致。

(3) 实测真空预压处理的平均总沉降位移为 55.39cm（平均固结度 86.7%），在相同固结度下，数值计算得出地表总沉降位移为 61.57cm，实测沉降位移数值计算沉降位移变化趋势十分接近；真空处理后的十字板平均剪切强度较未处理前增加约 82.94%。

参考文献

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(01): 96-115.
- [2] 蔡袁强. 填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(02): 201-225.
- [3] 盛文治. 基于塑料排水板处理的软土地基沉降规律研究[J]. 四川建材, 2021, 47(7): 92-94.
- [4] 罗嘉金. 塑料排水板堆载预压法加固软基机理分析及固结沉降研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范(JGJ 79-2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [6] 李时亮. 真空预压加固软土地基作用机理分析[J]. 岩土力学, 2008(02): 479-482.
- [7] 梁发云, 秦承瑞, 汪中卫, 等. 沿海吹填土地基真空预压加固效果现场监测分析[J]. 结构工程师, 2017, 33(06): 155-161.
- [8] 赵相超, 邱永明, 戚惠峰. 塑料排水板对吹填地基加固效果影响机制的分析[A]. 中国力学学会结构工程专业委员会, 西安建筑科技大学, 《工程力学》编委会. 第 27 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册) [C], 2018: 4.

- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范(GB50007-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 赵亮, 闫澍旺. 吹填土地基道路工后不均匀沉降分析及加固措施研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(02): 176-183.
- [11] 沈宇鹏, 冯瑞玲, 钟顺元, 等. 增压式真空预压在铁路站

场地基处理的优化设计研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(04): 88-93.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS