

· 地基与基础 ·



正反向排水板真空预压法在 地基处理工程中的应用*

武亚军¹, 陈浩¹, VU Quoc Vuong², 陈国公¹, 陈先叠³

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 越南水利大学 土木工程学院, 越南 河内 100000;
3. 浙江省龙港市兴港投资建设有限公司, 浙江 温州 325802)

摘要: 目前真空预压法加固软土地基中排水板负压源通常位于顶部, 由于真空度沿竖向的衰减, 普通真空预压对深层土体的加固效果较差。为此提出了正反向排水板相结合的排水方式, 正向排水板的负压源在排水板顶部, 反向排水板的负压源在排水板的底部。将正反向排水板结合真空预压应用于温州某地基处理工程中, 对地表沉降、真空度、孔隙水压力等指标的监测结果显示, 平均固结度达到 93.1%。相同工况下正反向排水板结合真空预压数值模拟得到的地表沉降大于正向排水板结合真空预压得到的地表沉降, 增长率达到 12.9%; 相同工况下正反向排水板结合真空预压数值模拟得到的孔隙水压力在 3~10 m 范围内的消散情况明显优于正向排水板结合真空预压, 地基加固效果更好。正反向排水板结合真空预压方法值得在工程中进一步推广应用。

关键词: 基础工程; 正反向排水板; 真空预压; 地表沉降; 数值模拟; 固结度

中图分类号: U655.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0217-09

Application of vacuum preloading method of prefabricated vertical drain and reverse prefabricated vertical drain in foundation treatment engineering

WU Yajun¹, CHEN Hao¹, VU Quoc Vuong², CHEN Guogong¹, CHEN Xiandie³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Faculty of Civil Engineering, Thuy Loi University, Hanoi City 100000, VietNam;

3. Zhejiang Longgang Xinggang Investment and Construction Co., Ltd., Wenzhou 325802, China)

Abstract: At present, the negative pressure source of the prefabricated vertical drains (PVD) in the soft soil foundation reinforced by vacuum precompression method is usually located at the top, due to the attenuation of the vacuum along the vertical direction, the effect of ordinary vacuum preloading on deep soil is relatively poor. Therefore, a drainage method combining the PVD and the reverse prefabricated vertical drains (RPVD) is proposed, the negative pressure source of the PVD is at the top of the drainage plate, and the negative pressure source of the RPVD is at the bottom of the drainage plate. The PVD and RPVD combined with vacuum precompression is applied to a foundation treatment project in Wenzhou, and the monitoring results of surface settlement, vacuum degree and pore water pressure show that the average consolidation degree reaches 93.1%. Under the same working conditions, the surface settlement value obtained by the PVD and RPVD combined with vacuum precompression numerical simulation is larger than the value of surface settlement obtained by PVD combined with vacuum precompression, and the growth rate reaches 12.9%. Under the same working conditions,

收稿日期: 2023-10-24

*基金项目: 国家自然科学基金项目(42272320、42207168)

作者简介: 武亚军 (1973—), 男, 博士, 教授, 从事真空预压软基处理研究。

the dissipation of pore water pressure in the range of 3-10 m obtained by the PVD and RPVD combined with vacuum precompression numerical simulation is significantly better than that of the PVD combined with vacuum precompression, and the foundation reinforcement effect is better. PVD and RPVD combined with vacuum precompression method is worthy of further popularization and application in engineering.

Keywords: foundation engineering; prefabricated vertical drain and reverse prefabricated vertical drain; vacuum preloading; surface settlement; numerical simulation; degree of consolidation

真空预压技术最早由瑞典皇家学院教授 Kjellman^[1]于1952年提出,现今已被广泛应用于各类软土地基的加固处理中。然而,常规真空预压技术加固吹填土存在能耗高、深层土体加固效果差、排水板滤膜易淤堵^[2-5]等问题,特别是由于真空度传递衰减快而导致深层土体加固效果差一直是该方法的短板,因此,需要研发高效、节能的真空度传递新技术,以进一步改善真空预压法地基处理效率。

近年来,真空预压相关新技术的研究取得了长足发展。针对吹填土渗透性差的弊端,武亚军等^[6-8]提出药剂真空预压的加固方法,通过有机高分子絮凝剂吸附土颗粒生成脱水效果较好的絮体,后续又提出加入以石灰为主的调理剂,通过水化反应生成强度较高的骨架结构从而增加超软土的渗透性,有效防止淤堵,取得显著的排水效果,缺点是面积处理时药剂难以均匀混合且造价较高。针对真空荷载最大只有85 kPa左右这一限制,Wu等^[9]提出通过将高压空气通入设置在软土中的不透水柔性气囊中对周围土体施加侧向挤压力、与真空负压联合作用的气囊真空预压法,并进行了模型试验,结果表明二者相结合可以增加土体孔隙水的排出,有效提高软土的力学性能。针对深层土体加固效果差这一问题,Lei等^[10]、Cai等^[11]比较了增压式真空预压与传统真空预压对土体的加固效果,发现增压式真空预压能更好地改善土体物理力学性能,深部孔隙水压力消散更加明显且分层沉降效果更好;Wu等^[12]提出反向排水板联合增压真空预压的方法,通过室内模型试验与普通真空预压进行对比,发现反向排水板中真空度衰

减程度要优于普通排水板,试验结果显示排水板堵塞情况显著缓解且十字板抗剪强度随深度的变化更均匀,这表明正反向排水板真空预压法能够通过加大深层土体处的真空压力来增强深层土体的固结效果,且该法相较于传统方法无需添加新设备,仅需增加连接反向排水板的PVC钢丝支管即可,造价大幅降低且便于施工。

综上所述,目前正反向排水板结合真空预压法的研究尚局限于实验室,还未大面积用于真空预压地基处理实际工程。为了进一步验证该方法在工程中的可行性,本文以温州某正反向排水板结合真空预压地基处理项目为背景,对处理过程中的地表沉降、孔隙水压力等进行监测分析,同时,建立相应的真空预压数值模型进行模拟,研究正反向排水板结合真空预压法软土地基处理效果,以期为类似工程项目提供参考。

1 正向排水板与反向排水板的工作原理

正向排水板与反向排水板的工作原理如图1所示。武孟琼等^[13]解释了两种方法的本质区别。当对正向排水板施加真空压力时,排水板内外均存在孔隙水,因此排水板内外部绝对压力相等,排水板内孔隙水由排水板顶部排出,排水板内及周围土体的地下水位始终在地基表面,土体始终处于饱和状态。当对反向排水板施加真空压力时,排水板内部水位在真空压力及重力作用下迅速下降至排水板底部,排水板内部空间被空气填充。土体中地下水位也会逐渐下降至排水板底部,土体转变为不饱和状态,有效应力的增加大于正向排水板引起的有效应力增加。

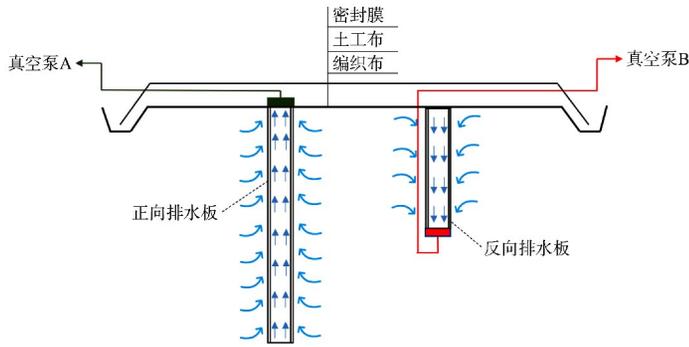


图 1 正向排水板与反向排水板工作原理

2 工程概况与软基处理方案

2.1 工程概况

温州某软基处理项目位于龙湾二期四号围垦区, 总占地面积约 23.411 7 万 m² (351 亩), 本次真空预压处理区域为其中一部分, 面积为 5.752 5 万 m²。根据地勘资料, 需要处理的软土从上到下包括 2 层, 第 1 层为淤泥夹粉砂, 厚 4.1~12.3 m; 第 2 层为淤泥, 厚 10.5~17.5 m; 以下为强度较高的黏土层, 不必进行处理。主要土层的物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层基本物理力学性质

土层名称	天然含水率 <i>w</i> /%	天然密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	液限 <i>w_L</i> /%	液性指数 <i>I_L</i>	渗透系数 <i>K</i> / (10 ⁻⁶ cm·s ⁻¹)	黏聚力(固快) <i>c</i> /kPa	内摩擦角(固快) $\varphi/(^{\circ})$
淤泥夹粉砂	51.7	1.69	41.8	1.55	1.40	7.6	11.9
淤泥	60.7	1.63	52.2	1.36	0.75	10.6	9.0
粉质黏土	32.8	1.87	35.9	0.81	1.20	15.7	17.6
黏土	31.6	1.86	44.6	0.38	0.32	24.3	12.4

2.2 软基处理方案

为了满足地基承载力与地基土固结度的要求, 拟采用覆水真空预压结合正反向排水板进行软基处理, 土层剖面、正反向排水板打设深度及孔压计竖向布置如图 2 所示。1) 在地基表面铺设一层编织布作为插板机工作垫层打设排水板, 正向排水板打设深度 18 m, 正方形布置, 间距为 0.8 m×0.8 m, 采用机械插板, 每孔插板前安装桩靴以防后续淤泥进入排水板。正向排水板全部打设完成后进行反向排水板打设, 打设深度 10 m, 正方形布置, 间距为 3.2 m×3.2 m, 采用机械插板, 打设前通过手形接头将排水板底部与 PVC 钢丝管连接, 通过 PVC 钢丝软管传递真空负压。排水板打设至指定深度后在排水板顶部安装桩靴, 保证真空压力在排水板内稳定传递。正反向排水板平面布置如图 3 所示, 在打设排水板的同时在场地布

置沉降板、孔隙水压力计, 以监测真空预压期间土体变化, 各监测点位置见图 4。2) 分别按照 1.6 和 6.4 m 间距水平铺设直径 25 mm 的 PVC 钢丝支管, 1.6 m 间距的水平管与正向排水板通过蝴蝶接头连接, 6.4 m 间距的水平管与反向排水板通过蝴蝶接头连接。3) 与水平支垂直方向按照 40 m 间距布置直径 50 mm 的 PVC 钢丝主管, 主管与真空泵连接。4) 在排水管网上依次铺设 1 层 150 g/m² 编织布, 1 层 200 g/m² 无纺土工布和 2 层厚 0.16 mm 的密封膜, 将密封膜的四周埋入密封沟内, 以保证整体密封性。5) 进行抽真空, 待真空度达到稳定 85 kPa 后膜上蓄水, 水深 1 m, 二者所施加的总附加压力约为 95 kPa。6) 待连续 10 d 每天的地表沉降量不超过 2 mm 时停泵。2022-10-08—2022-12-23 抽真空, 总历时 76 d。

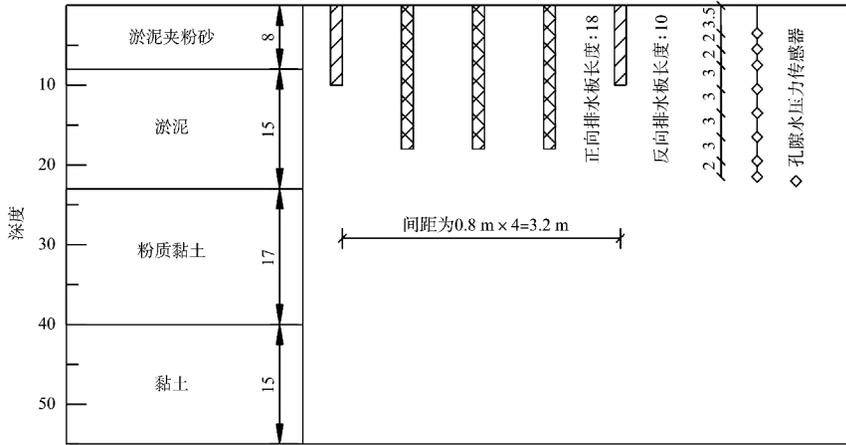


图2 土层剖面、正反向排水板打设深度及孔压计竖向布置 (单位: m)

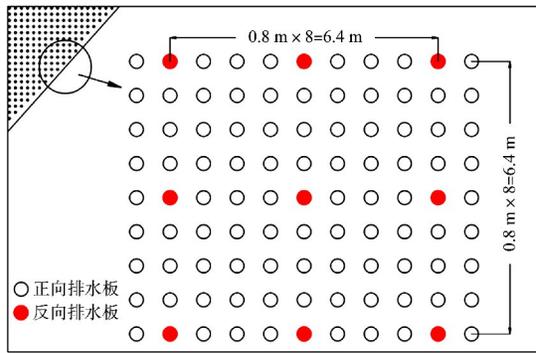


图3 正反向排水板平面布置

已超过 80 kPa, 在抽真空第 16 d, 膜下真空度突然大幅下降并持续 2 d 时间, 原因是部分真空泵出现故障需要维修, 并为后续覆水做好准备, 待真空泵全部启用后 2 d 内真空度很快超过 85 kPa, 之后开始进行膜上覆水, 水深 1 m。在抽真空第 76 d 进行放水卸载, 整个过程中膜下真空度并无明显变化。膜下真空度始终稳定维持高位得益于四周埋膜较深, 且覆水后密封膜未受其他人为因素干扰。

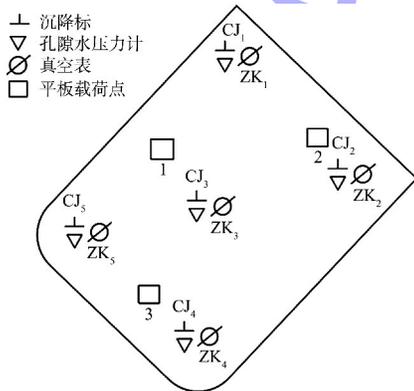


图4 监测仪器平面布置

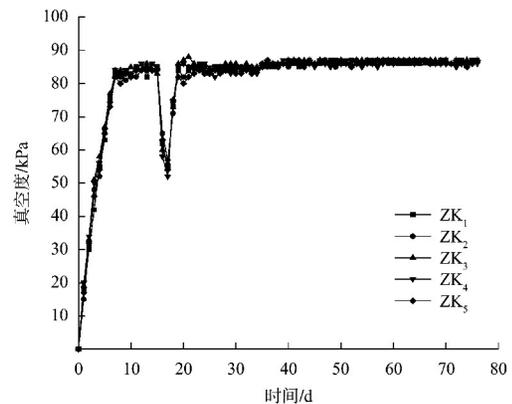


图5 膜下真空度随时间变化曲线

3 监测与检测数据分析

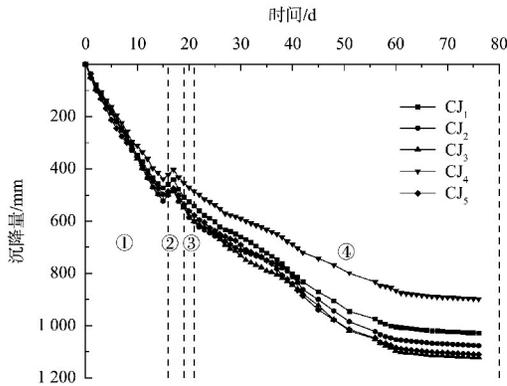
3.1 膜下真空度

在真空预压过程中采用真空压力表测量真空度, 监测频率为第一周一天 2 次, 之后适当减少, 取最高值作为当日膜下真空度数据, 本项目共设置 5 个膜下真空度监测点, 监测结果如图 5 所示。由图可知, 抽真空进行到第 7 d 时各点膜下真空度

3.2 地表沉降量

地表沉降量是衡量加固效果最直接的指标, 地表沉降变化如图 6 所示。监测频率为 1 次/d, 待 42 d 后监测频率调整为 1 次/3 d。在 62 d 后沉降逐渐趋于稳定, 沉降量接近 1124 mm。CJ₄ 点处沉降明显小于其余 4 点, 这是因为在真空预压区域场地外侧靠近 CJ₄ 点处堆放有大量土体, 在一定

程度上限制了该点处的地表沉降。



注: ①试抽真空至 85 kPa, ②真空泵维修阶段, ③覆水阶段, ④满载真空预压阶段。

图 6 地表沉降量随时间变化曲线

3.3 孔隙水压力

场地中间孔隙水压力监测结果如图 7 所示。前 24 d 孔隙水压力监测间隔时间为 6 d, 之后为 8 d。第 18 d 监测数据出现孔隙水压力上升的现象, 这是因为停泵导致地基不同深度土体所受真空负压下降, 孔隙水压力上升。孔隙水压力消散幅度随着深度的增加逐渐减小, 以 10.5 m 处为界, 10.5 m 以下土体孔隙水压力消散幅度出现大幅减小, 说明真空度在深层土体中的传递存在较大阻力, 而 10.5 m 以上孔隙水压力消散幅度变化相对较慢, 这是由于反向排水板(打设深度 10 m)的存在提升了打设深度以上土体内的真空度。

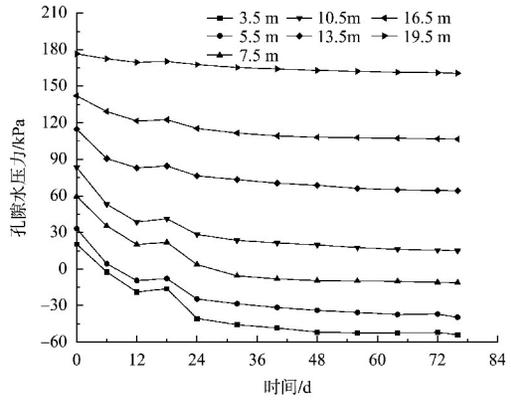


图 7 不同深度孔隙水压力随时间变化曲线

3.4 固结度

双曲线法所预测的固结度结果偏小且人为影响因素较大。因此, 本文采用 Asaoka 法基于沉降曲线进行固结度预测。该法假定用级数形式的方程近似表示一维固结方程, 该方程的一阶近似递推公式为:

$$s_j = \beta_0 + \beta_1 s_{j-1} \quad (1)$$

式中: β_0 与 β_1 为待定系数, s_{j-1} 、 s_j 为沉降量。本文选取不同时间间隔 Δt 进行最终沉降预测, 得到各测点的固结度见表 2。

选择 R^2 接近 1 的测点固结度作为预测值, 则各测点处的固结度分别为 CJ₁93.0%、CJ₂94.3%、CJ₃92.0%、CJ₄94.6%、CJ₅91.8%, 由各测点固结度数据可知加固区处理效果明显, 均满足固结度大于 85% 的设计要求, 可以卸载。

表 2 不同时间间隔下 Asaoka 法固结度预测

测点	$\Delta t/d$	β_0	β_1	相关系数 R^2	当前沉降 S_t/mm	最终沉降 S_∞/mm	固结度/%
CJ ₁	5	167.18	0.855 1	0.994 8	1 030	1 154	93.0
	10	311.99	0.728 2	0.984 1		1 148	93.3
	15	429.57	0.624 4	0.973 5		1 144	93.5
	20	528.97	0.531 8	0.977 9		1 130	94.3
CJ ₂	5	181.83	0.846 0	0.993 8	1 078	1 181	94.3
	10	343.55	0.705 8	0.981 5		1 168	95.0
	15	462.17	0.605 0	0.977 9		1 170	94.9
	20	578.65	0.496 8	0.957 0		1 150	96.0
CJ ₃	5	175.51	0.862 3	0.994 5	1 124	1 275	92.0
	10	335.52	0.733 2	0.985 8		1 258	92.9
	15	459.86	0.631 3	0.980 3		1 247	93.4
	20	573.17	0.533 2	0.959 1		1 228	94.4

续表2

测点	$\Delta t/d$	β_0	β_1	相关系数 R^2	当前沉降 S_t/mm	最终沉降 S_∞/mm	固结度/%
CJ ₄	5	148.65	0.848 9	0.995 5	897	984	94.6
	10	277.27	0.717 4	0.986 5		981	94.7
	15	381.54	0.607 5	0.976 6		972	95.3
	20	465.34	0.522 1	0.975 1		974	95.2
CJ ₅	5	172.41	0.863 7	0.994 4	1 111	1 265	91.8
	10	321.85	0.746 0	0.985 0		1 267	91.7
	15	445.03	0.644 6	0.976 2		1 252	92.5
	20	558.69	0.545 4	0.970 4		1 229	93.6

4 真空预压效果对比

正反向排水板真空预压法与传统真空预压联合堆载法相比优势主要集中在加固时间上，后者处理时间普遍超过 120 d^[14-16]，与直排直连真空联合水袋预压法^[17]处理软土地基的效果对比见表 3。工程位于广东省阳江市阳江港吉树作业区，待处理软土主要为淤泥，土层基本性质与本工程相近，排水板打设间距及深度均与本工程相同。真空预

压监测结果显示，直排直连真空联合水袋预压法在堆载压强较高的情况下工期延长率为 18%，平均固结度减小 7.6%，孔压消散情况明显减弱，其中 10.5 m 处孔压消散差值最大，衰减率达到 215%，反向排水板的存在显著提升了真空负压在深层土体中的传递效率。通过对比可知，正反向排水板真空预压法在加固效果及时间上均具有较大优势。

表 3 正反向排水板真空预压法与直排直连真空联合水袋预压法对比

真空预压方式	堆载方式	工期/d	地表平均沉降/mm	平均固结度/%	10.5 m 处孔压消散值/kPa
正反向排水板真空预压	覆水堆载 10 kPa	76	1 124.0	93.14	-68.50
直排直连真空联合水袋预压	水袋堆载 20 kPa	90	838.7	86.55	-21.72

5 正反排水板结合真空预压数值分析

5.1 基本假定

为进一步验证反向排水板在真空预压工程中的加固效果，采用 ABAQUS 软件建立有限元模型进行分析，根据工程实际情况对模型进行简化：1) 孔隙水的流动符合达西定律，即水、土为流固耦合体；2) 土体完全饱和，且不考虑地下水位的变化；3) 塑料排水板符合平均固结等效原则，可简化为砂墙地基；4) 土体的渗透系数为常数，即不考虑固结过程中排水效率的变化；5) 不考虑涂抹效应的影响；6) 根据工程实际情况划分为 4 层土，每层土之间的竖向位移完全耦合^[18]。

5.2 数值分析模型

考虑到二维模型计算结果较三维模型更保守^[19]，结合上述假定，采用简化的二维真空预压模型，场地形状、加载形式均具有对称性，因此取模型一半进行分析。现场加固区半宽 120 m，影响区设定为加固范围外 40 m，正、反向排水板打设深度分别为 18、10 m，打设间距分别为 0.8、3.2 m，计算深度 55 m。膜下真空压力维持在 85 kPa，覆水深度 1 m。选用摩尔-库仑模型，网格单元类型采用 CPE8RP 单元，计算模型见图 8。根据地勘报告，选取有限元计算所需的土体参数，见表 4。根据平面应变等效原则，将塑料排水板转化为砂墙地基，进行二维有限元分析。砂墙地基土体及塑料排水板的渗透系数见表 5。

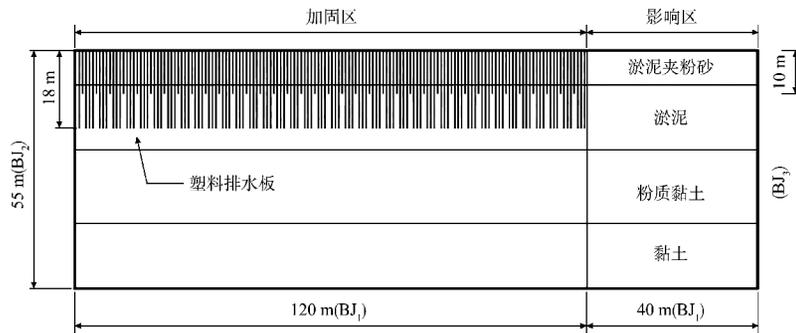


图 8 计算模型

表 4 土层参数

土层	密度 $\rho / (t \cdot m^{-3})$	孔隙比 e_0	泊松比 μ	压缩模量 E_s / MPa	黏聚力 C_u / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	渗透系数 $K / (10^{-6} cm \cdot s^{-1})$
淤泥夹粉砂	1.69	1.465	0.34	2.26	7.6	11.9	1.40
淤泥	1.63	1.728	0.35	1.76	10.6	9.0	0.75
粉质黏土	1.87	0.903	0.32	3.72	15.7	17.6	1.20
黏土	1.86	1.007	0.33	3.76	24.3	12.4	0.32

表 5 等效平面应变渗透系数

土层	原渗透系数 $K / (10^{-6} cm \cdot s^{-1})$	等效平面应变渗透系数 $K / (10^{-7} cm \cdot s^{-1})$
淤泥夹粉砂	1.40	5.71
淤泥	0.75	3.13
粉质黏土	1.20	4.91
黏土	0.32	1.32
塑料排水板	2 000	8 163

上位移为 0。渗流边界: 最大负孔压为 -85 kPa, 影响区顶面为孔压为 0 边界(透水边界); BJ₁ 与 BJ₂ 为默认的不透水边界; BJ₃ 因距加固区较远, 孔压按静水压力分布。由于膜下真空度在第 6 d 已达到 85 kPa, 所需时间较短, 因此简化为瞬时施加。真空负压在竖向排水板内的传递存在衰减现象, 根据以往真空预压工程经验结合前期数值模拟试验, 按图 9 递减规律施加排水板孔压边界。

图 8 有限元计算模型的位移边界: BJ₁ 表示 x、y、z 3 个方向位移均为 0; BJ₂ 与 BJ₃ 表示 x 方向

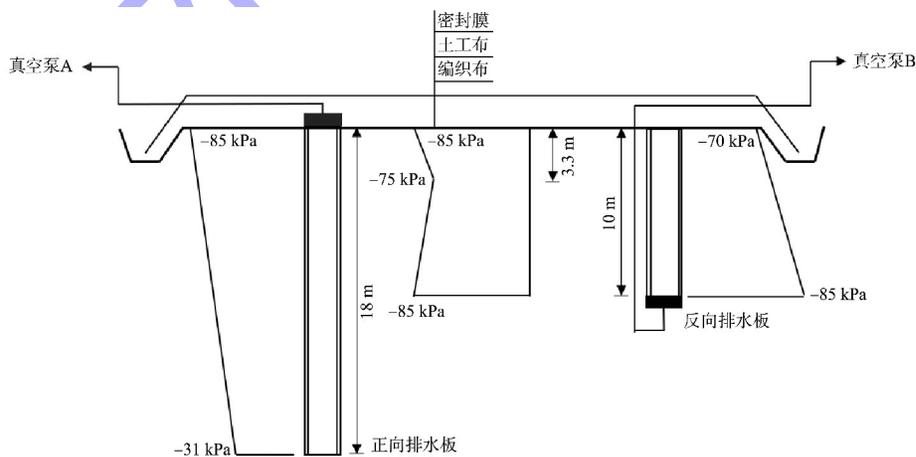


图 9 真空负压分布模式

5.3 有限元计算结果分析

5.3.1 竖向沉降

图 10 为加固区地基竖向沉降实测值与模拟值

的对比曲线。由图可知, 计算值前期沉降速率及最终沉降量均大于实测平均值, 误差在 10% 左右, 是由于实际工程中随着抽真空的进行, 加固区的

孔隙水逐渐排出，土骨架逐渐压缩，导致土体渗透系数下降，排水能力减弱。除此之外，随着土颗粒的聚集排水板周围形成“土桩”，限制真空吸力的传递并导致“土桩”处土的渗透系数进一步下降。数值模拟可为实际工程的沉降预测提供参考。

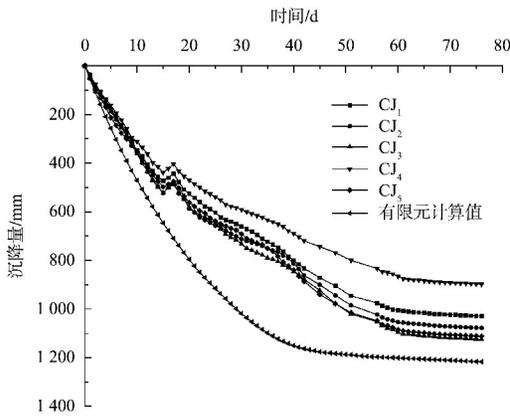


图 10 沉降实测值与有限元计算值对比曲线

图 11 为两种不同排水板布置方式下地基最终沉降量对比曲线，可以看出，两者整体沉降趋势保持一致，加固中心处沉降差最大，达到 139 mm。随着距加固中心距离增大，沉降差减小并保持在 102 mm 左右，超过加固区 120 m 范围后沉降差迅速减小至 15 mm，表明正反向排水板结合真空预压对加固区中心改善效果最佳，且越靠近加固区边缘改善效果越差。

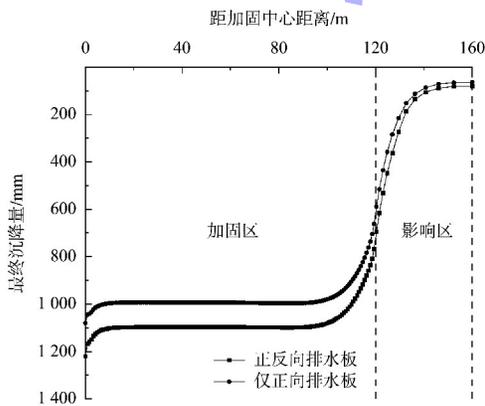


图 11 不同排水板布置下地基最终沉降模拟值对比曲线

5.3.2 孔压变化

对数值模拟结果进行数据整理，取深度 3.5、10.5 和 19.5 m 处进行研究得到不同深度处数值模

拟和实测的孔隙水压力随时间的变化曲线，如图 12 所示。数值模拟中未考虑停泵环节，因此孔压在第 18 d 处未出现上升现象。第 24 d 数值模拟孔压出现小幅上升是由于第 19~20 d 在模型加固区顶面施加了线性增加至 10 kPa 的覆水荷载，使土体产生一定的超孔隙水压力。3.5 及 10.5 m 处孔隙水压力实测值与模拟值的误差小于 5%，表明模型关于正反向排水板孔隙压力的设置较为符合实际情况。19.5 m 处最终孔隙水压力实测值与模拟值存在 10% 左右的误差，说明反向排水板深度以下的土体孔隙水压力分布仍符合常规模式。

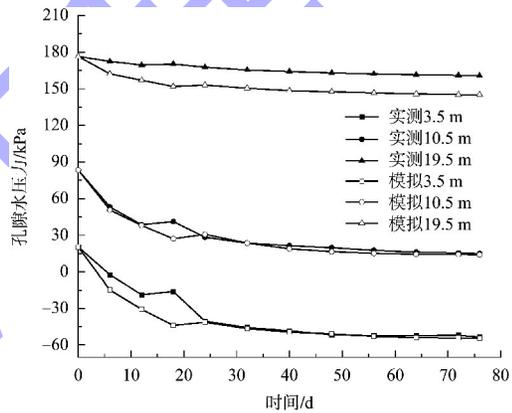


图 12 孔压实测值与有限元计算值对比曲线

图 13 为两种排水板布置下最终孔隙水压力沿深度方向的消散情况，正反向排水板结合真空预压得到的孔隙水压力最大值位于模型顶面，为 -77 kPa，这是因为孔隙水压力选取线位于正反向排水板中间位置，反向排水板顶部压强较小，对孔隙水压力消散有削弱作用。10 m 处正反向排水板孔压绝对值较仅正向排水板大 8 kPa，增长率为 16%。超过反向排水板打设深度后孔隙水压力迅速衰减并与仅正向排水板情况保持一致。可以看出，在地下 3~10 m 范围内正反向排水板结合真空预压的孔隙水压力消散情况要好于仅正向排水板的情况，表明反向排水板的存在能有效改善反向排水板打设深度范围内孔隙水压力的衰减。

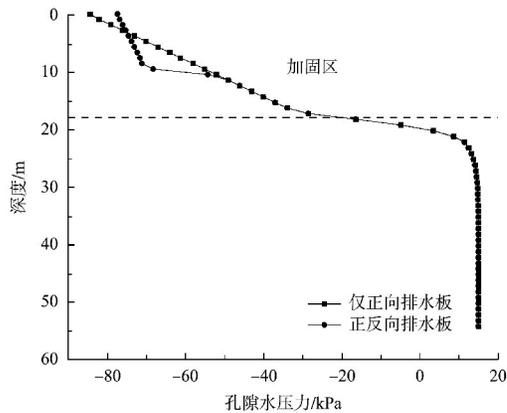


图 13 不同排水板布置下孔隙水压力模拟值对比曲线

6 结语

1) 与常规排水板相比, 反向排水板抽真空后负压源位于底部, 真空度由下向上传递, 传递效率更高, 孔隙水压力在反向排水板打设深度范围以上消散均超过 70 kPa。此外, 孔隙水在真空负压及重力作用下所受井阻作用减弱, 更容易排出。深层土体加固效果提升, 土体强度沿深度方向变化更均匀。

2) 相同工况下数值模拟得到的地表沉降与孔隙水压力消散值与实测值基本保持一致, 验证了模型参数的准确性。与仅采用正向排水板进行真空预压相比, 正反向排水板真空预压得到的最大地表沉降增长 139 mm, 增长率为 12.9%, 孔隙水压力消散值在 3~11.5 m 内更大。

3) 正反向排水板真空预压加固吹填土地基在工程实际中取得了较好的效果, 且该工法无需加入新设备, 工艺简单, 可行性高。笔者下一步将从反向排水板的真空度传递规律、打设间距及打设深度对真空预压的影响展开进一步研究, 以期大面积推广该工法。

参考文献:

[1] KJIELLMAN W. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure [C]//Proceedings of a conference on soil stabilization. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1952: 258-263.

[2] 曹杰, 郑建国, 刘智, 等. 真空预压法处理软土地基的工

程应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 124-127.

- [3] SHI L, WANG Q Q, XU S L, et al. Numerical study on clogging of prefabricated vertical drain in slurry under vacuum loading[J]. Granular matter, 2018, 20(4): 1-14.
- [4] 杨爱武, 潘亚轩, 曹宇, 等. 吹填软土低位真空预压室内试验及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 539-548.
- [5] LIU J J, LEI H Y, ZHENG G, et al. Improved synchronous and alternate vacuum preloading method for newly dredged fills: laboratory model study [J]. International journal of geomechanics, 2018, 18(8): 1-16.
- [6] 武亚军, 顾赛帅, 强小兵, 等. 基于骨架构建药剂真空预压法加固超软土试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(4): 735-743.
- [7] 武亚军, 陆逸天, 牛坤, 等. 药剂真空预压法处理工程废浆试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1365-1373.
- [8] 武亚军, 陆逸天, 骆嘉成, 等. 药剂真空预压法在工程废浆处理中的防淤堵作用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 525-533.
- [9] WU Y J, ZHOU R, LU Y T, et al. Experimental study of PVD-improved dredged soil with vacuum preloading and air pressure [J]. Geotextiles and geomembranes, 2022, 50(4): 668-676.
- [10] LEI H Y, QI Z Y, ZHANG Z P, et al. New vacuum-preloading technique for ultrasoft-soil foundations using model tests [J]. International journal of geomechanics, 2017, 17(9): 1-13.
- [11] CAI Y Q, XIE Z W, WANG J, et al. New approach of vacuum preloading with booster prefabricated vertical drains (PVDs) to improve deep marine clay strata [J]. Canadian geotechnical journal, 2018, 55(10): 1359-1371.
- [12] WU J Q, LIU X, LUO X, et al. Improvement of marine slurry by vacuum preloading and air-booster via a reverse prefabricated vertical drain [J]. Marine georesources & geotechnology, 2024, 42(2), 149-160.
- [13] 武孟琼, 王保田. 底部抽真空法在围垦工程中优越性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2916-2926.