

深层快速降水动力固结法在强夯工程中的应用

王世举

(中交一航局第一工程有限公司)

摘要:为解决强夯降水工程中传统动力固结法中普遍存在降水深度浅、降水管淤堵、降水时间长、降水面积小且真空分布不均匀等问题,在江苏卫华高端智能港口装备项目厂区生产基地强夯降水工程实施中,对动力固结的降水原理、工艺流程、技术方法、存在问题等内容进行研究分析,通过对降水管材料、真空设备等进行创新改进,形成了一套由深层井式降水管、水环式真空泵组、智能控制柜、水气分离罐等组合而成的深层快速降水动力固结法,总结了一套新型软土地基处理实施方案。通过工程实例证明,采用深层快速降水动力固结法可以显著提高施工效率,同时提升强夯地基处理的质量和效果,可为此类吹填土地基的加固处理施工提供参考。

关键词:吹填土;动力固结法;强夯降水;地基加固

1 工程概况

江苏卫华高端智能港口装备项目厂区生产基地强夯降水工程,地基强夯处理总面积约 0.65 km²。根据地基有效加固深度不同,项目分区域进行施工。其中,强夯区域一:面积约 0.35 km²,有效加固深度不小于 6 m,强夯处理后地基承载力特征值 ≥ 100 kPa,有效加固深度内土的压缩模量 ≥ 10 MPa。强夯区域二:面积约 0.3 km²,有效加固深度不小于 7.5 m,强夯处理后地基承载力特征值 ≥ 160 kPa,有效加固深度内土的压缩模量 ≥ 11 MPa。

2 深层快速降水动力固结法创新及工作原理

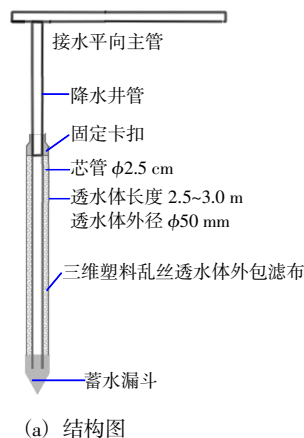
2.1 降水管创新

传统降水管的结构由井管、滤管、滤料组成。其中,井管通常采用整根成品 $\phi 32$ mmPVC 管。滤管与井管为同一根 PVC 管桩,在井管 PVC 管桩下部开孔制作而成,开孔率 15%。为防止滤管淤堵,影响滤管抽水效率,滤管区域使用滤料进行过滤,滤料通常采用瓜米石或中粗砂。

井管 $\phi 32$ mmPVC 管于市场上采购成品,长度一般为 4~6 m,由于井管和滤管由 1 根 PVC 管制作而成,如增加滤管长度,则减少井管深度,导致降水深度的降低;如降低滤管长度,则减少滤管与土体接触面积,导致单井降水量的降低。此外,由于滤管由 $\phi 32$ mmPVC 开孔制作而成,管径较细,与土体接触面积小,单井出水量小,特别在渗透性较差的土层,出水量更小。降水管属于地下隐蔽施工,井管、滤管、滤料等施工质量不

易控制^[1-2]。

为解决传统降水管问题,从井管与滤管分离,增大降水深度;增大滤管的直径和长度,提高单井出水量;工厂化生产,井管、滤管和滤料集成,提高井点质量等方面,对降水管进行创新改进,研发了新式降水管结构,该结构由竖向透水管体(蓄水漏斗、透水体芯管、三维乱丝透水体)、固定卡扣、竖向降水井管、转换接头、水平向主管等组成^[3],深层井式降水管结构示意图见图 1。



(a) 结构图

(b) 实物图

图 1 深层井式降水管结构示意图

综上所述,深层井式材料(降水管)的创新点包括:

- 1) 采用三维乱丝透水管体代替传统井点的滤管和滤料,透水结构更稳定,质量可控。
- 2) 实现了透水管体和竖向降水井管的分离。

3) 三维乱丝透水体的透水性能佳，与土体接触面积大，单井出水量大。

2.2 真空设备创新

传统的真空泵抽真空效果不佳，真空传递不均匀，工作耐久性不够，且螺杆泵属于间歇性抽真空，真空压力低，降水时间长，水位下降困难，单个控制面积小(约1 000~12 000 m²)，导致工期长，对于工期要求紧急的工程，则无法满足要求^[4-5]。

针对以上不足研发了快速固结法新设备，创新设备采用了新型水环式真空泵组、智能控制柜、水气分离罐组合设备。水环式真空泵组真空压力高，降水速度快，可持续抽真空，能达到快速降水的效果，真空分布均匀，降水深度深。整个真

空泵组通过智能控制柜最多控制 10 个水气分离罐，每个水气分离罐控制面积约 5 000~6 000 m²，整个真空泵组控制面积大(约 50 000~60 000 m²)，能有效缩短工期，且节能环保。

2.3 深层快速降水动力固结法工作原理

深层快速降水动力固结法是由深层井式降水管、水环式真空泵组、智能控制柜、水气分离罐等组合而成的一套降水系统^[6]，其工作原理：整套系统由水环式真空泵组提供抽水动力，以透水管体、竖向降水井管、水平向主管为路径，将地下水抽取至水气分离灌中，然后通过地表排水沟排放至市政管网中，以实现地下降水目的^[7]。

深层快速降水动力固结系统工作原理示意图如图 2 所示。

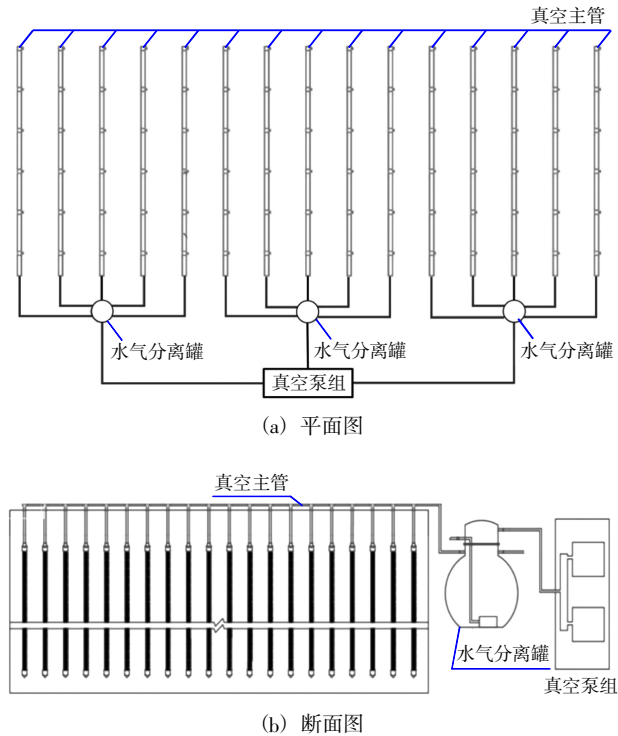


图 2 深层快速降水动力固结系统工作原理示意图

2.4 深层快速降水动力固结法优点

- 1) 使用高功率真空泵组抽真空，真空压力大，提高降水速率。
- 2) 使用水气分离罐可有效使真空压力在场地内均匀分布。
- 3) 使用了透水管体和竖向降水井管分别设置的措施，竖向降水管管口可埋设在较深的位置，实现更大的降水深度。
- 4) 透水管体长度不受竖向降水管管口埋深限制，可以调整透水管体的长度和直径，提高透水

管体与土体的接触面积，实现较大的单井出水量。

- 5) 三维乱丝透水体采用工厂生产的三维塑料乱丝成品，空隙率大，透水性强，不易淤堵。
- 6) 三维乱丝透水体的结点采用熔接技术，强度高，在外力作用下变形小，能够承受一定的冲击荷载。

3 强夯降水方案

根据水气分离罐单体控制面积及场地平面布置，按照每 5 000 m² 为 1 个区域将场区划分为若干分区，按照分区进行降水井管及夯点布置。

3.1 降水管布置方案

降水管分为水平向主管和竖向降水井管,均采用 PVC 给水管,水平向主管直径 50 mm,间距 6 m 布置;竖向管直径 25 mm,间距 4 m 布置。根据强夯区域一和区域二有效加固深度分别不小于 6 m 和 7.5 m 的要求,强夯区域一的竖向降水井管和透水管总长度 6.5 m,强夯区域二的竖向降水井管和透水管总长度 8 m,区域下部的透水芯体长度为 2.0~3.5 m。

3.2 强夯施工方案

强夯机械设备使用履带式强夯机,夯锤锤底直径 2.5 m,采用一遍预夯、两遍点夯、一遍满夯的方式进行施工。

每次强夯前,强夯区域一将地下水位降至地表 6 m(区域二为 7.5 m)以下,超静孔隙水压力消散不小于 85%。具体施工方案见 4.5 节。

4 施工过程控制

4.1 总体施工流程

强夯降水工程总体施工流程主要包括排水沟开挖、深层快速降水动力固结系统布置、降水、强夯、孔隙水压力检测等,如图 3 所示。

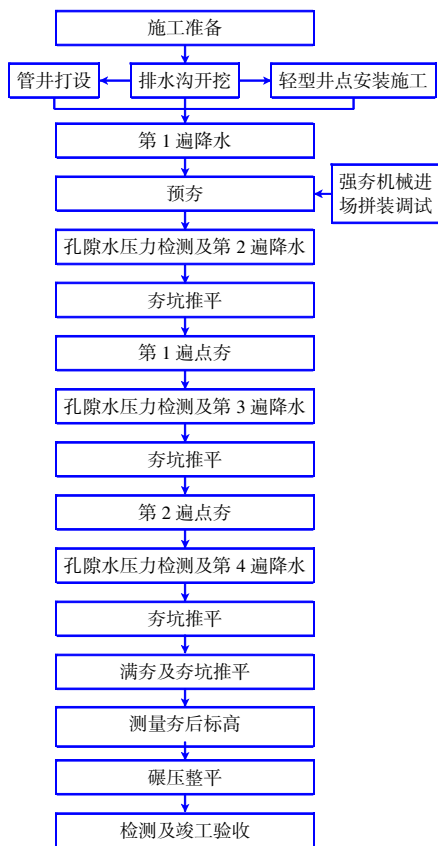


图 3 总体施工流程图

4.2 排水沟设置

1) 平面布置

为保证强夯期间排水畅通,强夯一区 and 强夯二区分别于场外四周设置排水主沟,分别于场内横向设置 3 条、纵向设置 2 条排水支沟。地下降水通过排水支沟收集,经排水主沟流至西北角处排水口,最终排入市政管网。

2) 断面布置

场外四周排水主沟按照沟深 2.5 m、下口宽 1.5 m、上口 3 m 进行开挖,场内排水支沟沟深按照 2.0 m 开挖,防止排水沟回灌,排水沟设置 0.5%~1.0% 的坡度。

4.3 深层井及管路布置

人工制作组装深层井式降水管,采用机械设备振动沉管打设井孔,将组装后的降水管插入井孔内回填黏土密封。横管间采用变径三通相互连接成整体,用 PVC 钢丝软管与变径三通连接,连接并启动抽真空装置抽真空、降水,监测水位观测孔并记录地下水位。

4.4 抽真空设备配置

抽真空设备采用水环式真空泵并配合若干水气分离罐,单台罐控制面积约 5 000~6 000 m²,内置 1 台 7.5 kW 的潜水泵,当罐内水位达到一定高度后自动开启潜水泵将罐体内的水排出,若干台水气分离罐与 1 台 110 kW 的水环式真空泵组相连,形成抽真空系统。真空泵机组上安装真空表,注意真空度的变化,出水应先浊后清。

4.5 强夯及降水施工控制

1) 第 1 遍降水

管路连接完成经试抽合格后,降水时间 5~6 d,强夯区域一水位降至地表 6 m(区域二为 7.5 m)以下后,进行预夯施工。在实际施工中可根据现场土质条件适当调整,以保证降水的效果。

2) 预夯

预夯夯锤锤底的直径为 2.5 m,其锤击能为 1 000 kN·m,每点夯击 4 击,夯点间距 3 m。

3) 第 2 遍降水

预夯结束后,进行第 2 遍降水,降水持续时间约 2~3 d。推土机推平夯坑后开始第 1 遍点夯。降水间隔时间根据超静孔隙水压力检测情况调整,要求超静孔隙水压力与初始状态相比消散不小于 85%。

4) 第 1 遍点夯

第1遍点夯期间持续进行轻型井点抽水降水,夯锤锤底直径2.5 m,锤击能2 500 kN·m,每点夯击8~10击,夯点间距6 m。

5) 第3遍降水

第1遍点夯结束后,进行第3遍降水,降水持续时间约2~3 d。推土机推平夯坑后开始第2遍点夯。降水间隔时间根据超静孔隙水压力检测情况调整,要求超静孔隙水压力与初始状态相比消散不小于85%。

6) 第2遍点夯

第2遍点夯期间持续进行轻型井点抽水降水,夯锤锤底直径2.5 m,锤击能3 000 kN·m(4 000 kN·m),每点夯击8~10击,夯点间距6 m。

7) 第4遍降水

第2遍点夯结束后,进行第4遍降水,降水持续时间约2~3 d。推土机推平夯坑后开始第2遍点夯。降水间隔时间根据超静孔隙水压力检测情况调整,要求超静孔隙水压力与初始状态相比消散不小于85%。

8) 满夯

满夯前降水结束,拔除轻型井点降水管,拆除降水设备后进行满夯施工,夯击能1 000 kN·m满夯1遍,每点夯击4次,锤印搭接1/4锤径,最后2击平均夯沉量 ≤ 50 mm。满夯结束后碾压平整场地,测量强夯后地面高程,消散期过后交付检测。

4.6 前后2遍强夯间歇时间控制

前后2遍强夯间歇时间控制采取地下水位、孔隙水压力双控的技术要求。

施工前应将强夯区域一地下水位降至地表6 m(区域二为7.5 m)以下,超静孔隙水压力消散不小于85%。通过水位观测孔记录地下水位数据,埋设孔隙水压力计每天采集数据,绘制水位变化曲线、超静孔隙水压力变化曲线,分析水位变化、

超静孔隙水压力消散情况,确定间歇时间。

在强夯施工期间降水持续不停歇,减小夯击过程中水位的变化波动。第2遍点夯结束后,拔除井点降水管路后进行满夯施工。

5 应用实例

依托江苏卫华高端智能港口装备项目的强夯降水工程,采用深层快速降水动力固结法进行降水,选取2个监测区域对水位变化及孔隙水压力进行实时监测^[8],分析实际应用效果。

5.1 水位控制

管路连接完成正式抽水前开始观测水位,强夯施工期间持续降水直至满夯结束,通过数据统计分析,降水6~7 d水位降至设计要求。监测水域水位变化曲线见图4。

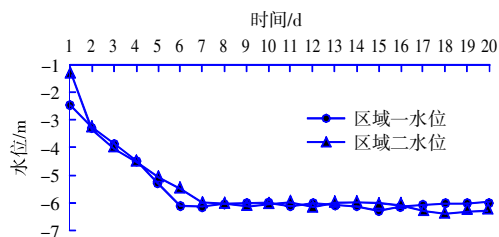


图4 监测区域一、二水位变化曲线图

由图4的水位变化曲线可以看出,区域一在降水后第6 d达到设计要求的地表以下6 m,可以开始预夯施工;区域二在降水后第7天达到设计要求的地表以下7.5 m,可以开始预夯施工。相比于传统降水施工方法的降水时间在开始降水后的10~12 d才能达到设计要求,降水时间有较大幅度的缩短,降水速度显著加快。

5.2 超静孔隙水压力消散

通过水位、孔隙水压力数据采集分析,对施工过程进行动态监测,掌握强夯过程中超静孔隙水压力的消散情况。监测水域地表以下3.5 m、6.5 m深度的孔隙水压力变化曲线见图5。

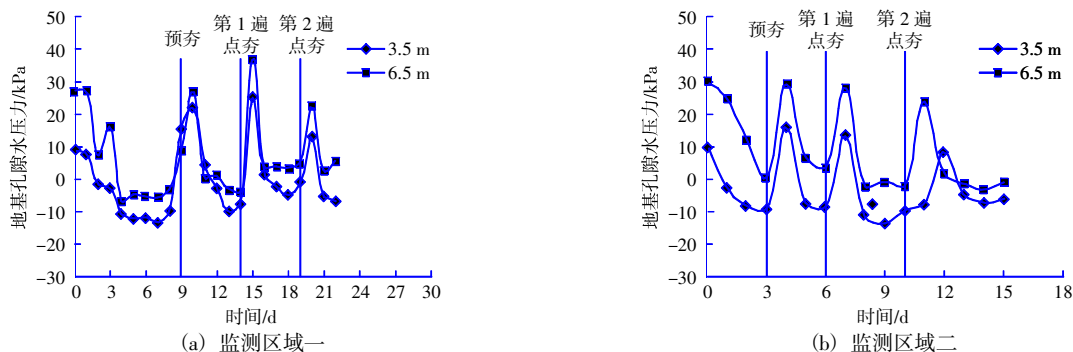


图5 监测区域孔隙水压力变化曲线图

通过分析图5中孔隙水压力变化数据可知,监测区域的强夯工作持续1 d,强夯过程中孔隙水压力快速增高,后1~2 d内超静孔隙水压力消散趋于0,消散达85%。

预夯与第1遍点夯时间间隔3~5 d,第1遍点夯与第2遍点夯时间间隔4~5 d,第2遍点夯与满夯时间间隔2~3 d。传统降水方法各施工阶段的时间间隔6~7 d,采用深层快速降水动力固结法可以较大幅度缩短强夯施工工期,效果较明显。

5.3 工效分析

1) 按照每5 000 m²计算施工工效,从管路连接至满夯结束共需要20 d,以此为依据按照流水施工制定施工进度计划,本工程共分为3期,每一期按照合同约定在90 d内顺利完工。

2) 采用深层快速降水动力固结法降水工艺,降水持续总时间为14 d,按照设计要求,传统工艺至少需要28 d,缩短了近50%,大幅度提高了施工效率。

6 质量检测

强夯一期、二期完工后,由建设单位委托的具备资质的第三方检测单位进行了地基加固效果的各项检测,检测指标包括地基承载力、土的压实系数及压缩模量、强夯地基均匀性检验,以上各项指标均达到设计合格标准。

7 结语

本文针对传统的动力降水固结法存在的问题,

提出了深层快速降水动力固结法,该方法在传统降水固结设备的基础上进行了创新改进,研发了新式降水管结构和快速固结新设备,并依托实际工程证明,新工艺具有显著效果,其优点如下,可为此类吹填土地基的加固处理施工提供参考。

1) 深层快速降水动力固结法降水速度快,单井出水量大,比常规工艺降水效果更具优势。

2) 超静孔隙水压力消散快,大幅度缩短了前后2遍夯击的时间间隔,提高了施工效率。

3) 深层快速降水动力固结法的应用,辅以合理的强夯地基处理技术方案,有效提升强夯地基处理的质量和效果。

参考文献:

- [1] 张季超,梁铁锚,杨永康. 动力排水固结法处理软土地基的关键技术研究[J]. 施工技术,2012,41(24):42-45.
- [2] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 1版. 北京:清华大学出版社,1994.
- [3] 胡书军,张森,胡书益,等. 一种深层快速降水动力固结装置及方法:CN113550341A[P]. 2021-10-26.
- [4] 宋泽华,姚忠岭,郎宏伟. 真空动力固结法加固吹填土地基的试验研究[J]. 工程勘察,2008(S2):131-135.
- [5] 张纯清. 真空动力固结法在吹填砂土地基处理中的应用[J]. 路基工程,2015(2):156-160.
- [6] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S].
- [7] 王珊珊,李丽慧,刘凯,等. 动力排水固结法加固吹填黏性土的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3157-3164.
- [8] 王昭睿,陈运涛,侯晋芳. 降水动力固结法在新吹填软土地基处理中的应用与研究[C]//中国土木工程学会港口工程分会,2014.