

水上振动沉管碎石桩施工关键技术应用

吴松华, 章哲华

(中交水利水电建设有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘 要:针对振动沉管碎石桩水上施工应用少、合适船机设备少、桩身质量控制难等问题,通过改造施工船机设备,优化关键技术参数和施工工艺,依托具体工程开展现场研究。采用三管式碎石桩船,研发了大开度活瓣钢桩靴,配置沉桩定位及视频监控系统实现施工过程的可视化;碎石添加采用干法填料、管身开孔润料、提升过程不留振的工艺,可顺利拔管成桩;采用皮带机供料、计量斗计量、提升斗运输的一体化加料工艺,碎石填料可精确控制。结果表明:通过将桩间距 2.3 m 分别调整为桩间距 2.4 m、排间距 2.18 m 和桩间距 2.1 m、排间距 2.5 m,整个桩身分三段,并控制平均拔管速度为 1.5 m/min,充盈系数采用 1.38,合理分批次加料、干法填料,两次留振时间分别控制在 20 s 和 60 s 等措施,经重型动力触探法检测,表层 2 m 锤击数平均值为 8.3,2 m 以下锤击数平均值为 11.2,满足表层 2 m 的碎石桩重型动力触探锤击数达到 7 击以上,2 m 以下贯入 10 cm 锤击数不小于 10 击的设计要求。

关键词:沉管碎石桩;钢桩靴;三管式;干法填料;可视化;振动;密实度

中图分类号:TV131.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)04-0263-08

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.04.004

引用格式:WU S H, ZHANG Z H. Application of key technology for construction of on-water vibration sinking-pipe gravel piles[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(4): 263-270. 吴松华, 章哲华. 水上振动沉管碎石桩施工关键技术应用[J]. 海岸工程, 2020, 39(4): 263-270.

水上振动沉管碎石桩是以专业的砂桩船或碎石桩船作为作业平台实施振动沉管挤密碎石桩施工,通过碎石桩的置换、挤密、排水作用,进行软土地基加固,增加地基强度,提高原有地基的承载力和抗液化能力,是一种地基加固的新技术^[1-2]。

目前国内很少用水上振动沉管碎石桩施工,因为适合施工的船机设备少,且存在桩身质量控制难的问题。吴丽燕^[3]利用打桩机和平板驳组成碎石桩作业船,进行了水上沉管振动法施工。路程^[4]、徐瑞宝和章途鑫^[5]采用打桩船(三航砂桩 1 号)及辅助船舶,通过调整拔管速度、充盈系数、留振时间等措施,进行水下振动沉管法打设碎石桩对深层软基加固。刘伟等^[6]选用 75 kW 振冲器及辅助设备,研究水上振冲碎石桩在处理低强度饱和黏性土中的应用。多位研究人员研究了在强浪条件下采用顶升平台和辅助方式进行海上碎石桩施工技术^[7-11]。张力伟等^[12]采用中空浮箱式方驳,介绍了水上沉管碎石桩施工。周焕等^[13]通过改造打桩船、优化桩位以及监控碎石出运,改进了海上振动沉管碎石桩施工关键技术。

为有效解决水上振动沉管碎石桩施工出现的碎石拒落、灌量不足、密实度差等诸多技术难点,在舟山市岱山县大小鱼山促淤围涂项目大桥接线成陆工程中,通过对水上振动沉管碎石桩施工设备与工艺进行改进和应用,形成一套有效的水上振动沉管碎石桩施工工艺及质量控制措施,提高碎石成桩效率,保证成桩桩身质量,降低施工成本。工程位置见图 1,施工工艺流程见图 2。

收稿日期:2020-04-14

资助项目:中交上海航道局有限公司技术研发项目——振动沉管碎石桩水上工艺技术研究(SHJKJ-2017/033)

作者简介:吴松华(1983-),男,正高级工程师,硕士,主要从事水利与港航、市政及软基处理工程施工技术管理、科技研发和河口海岸动力方面研究。E-mail: wusongh@163.com

(陈 靖 编辑)

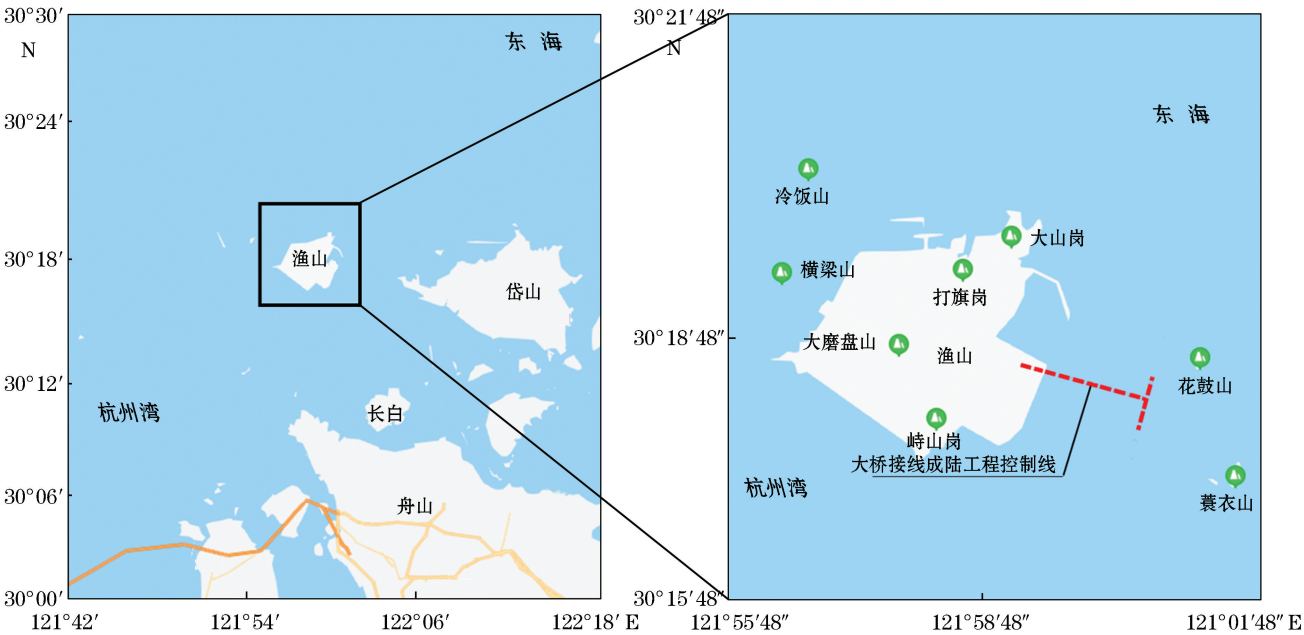


图 1 工程位置
Fig.1 Location of the project

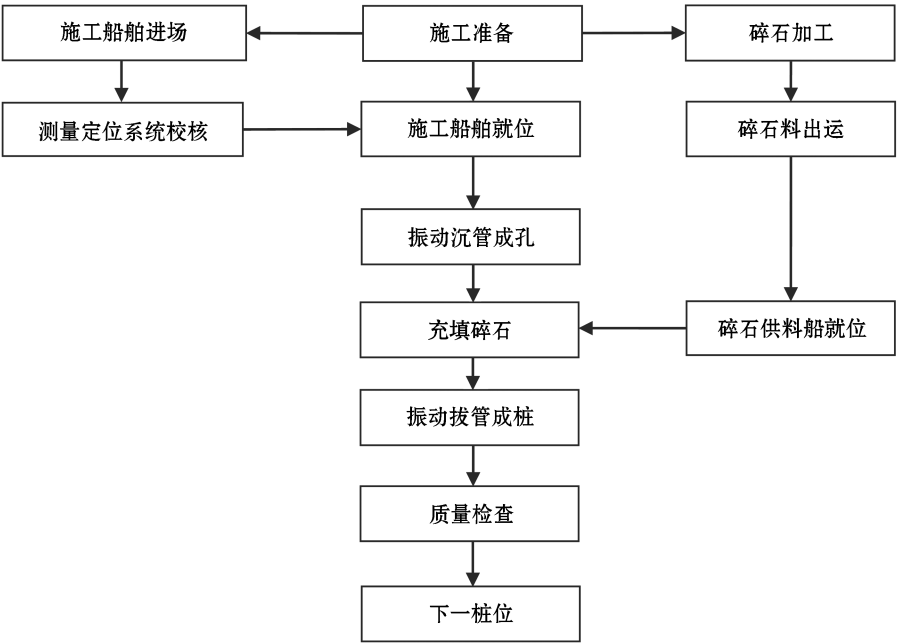


图 2 水上振动沉管碎石桩施工工艺流程
Fig.2 Process flow of the construction of on—water sinking-pipe gravel pile

1 施工准备

1.1 设备选型及改进

经市场调研,目前国内水上碎石桩施工的船机设备较少,水上振动沉管碎石桩的施工船舶仅有 4 艘,其

主要技术参数见表 1。

表 1 碎石桩施工设备技术参数
Table 1 Technical parameters of equipment for gravel pile construction

项 目	参 数	船舶名称			
		碎石桩 1 号	碎石桩 2 号	碎石桩 3 号	碎石桩 4 号
船体	型长/m	67.34	55.00	70.28	60.00
	型宽/m	19.52	25.00	25.40	21.00
	型深/m	4.27	3.90	4.20	3.50
	满载吃水/m	1.87	2.30	2.50	2.25
	最高点离水面/m	52.00	60.11	72.00	59.00
	桩管直径/m	0.9	0.9	0.9	0.9
	管距/m	4.2	4.2	4.8	4.2
	一次数量/根	3	3	3	3
植桩	最大桩长/m	43	46	60	50
	最大桩径/mm	1 000	1 000	1 000	1 000

现场施工区域处于外海开敞海域,结合工程地质、水深及设计桩长等要求,经比选,采用了“碎石桩 3 号”和“碎石桩 4 号”两艘大型专业施工船舶进行施工。2 艘碎石桩船均采用三管式桩架(图 3),每次 3 根桩可以同步施工。

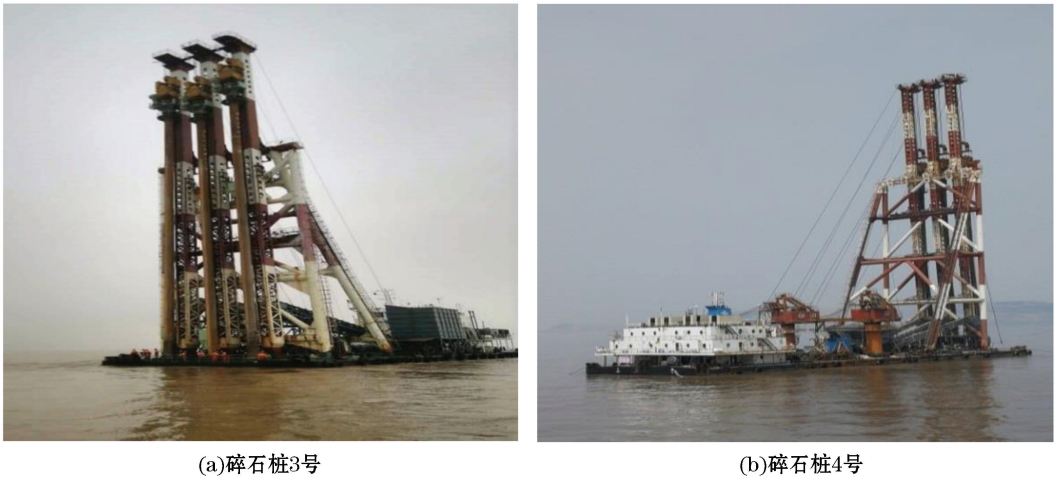


图 3 碎石桩船
Fig.3 Ship for gravel piling

为了提高碎石桩施工效率,控制成桩质量及成本,船舶分别配置了沉桩定位系统、视频监控系统及碎石添加及计量系统。

1)沉桩定位系统。碎石桩船配置有 3 根套管,可同时进行碎石桩施工,施工效率较单管式提高 3 倍。船舶配置沉桩定位系统可对碎石桩船的船位、桩管位置、施工区域进行准确定位,并实现施工过程中的可视化操作。

2)碎石添加计量系统。为了准确控制填料量,船舶分别设置了储料斗、皮带机、计量斗和提升斗等设备。在计量斗上方设置视频监测系统,可准确控制碎石填料量。

1.2 碎石料生产

1.2.1 碎石料加工

碎石桩材料采用连续级配碎石,碎石要求采用新鲜石料轧制的碎石,粒径 0.5~5.0 cm,级配连续,含泥量小于 5%。碎石桩施工使用的碎石原材料在现场自行加工生产。在后方 20 000 m²的碎石加工场内,2 套生产能力为 200 t/h 的颚式破碎机组进行生产,碎石日生产量为 4 000~5 000 m³。碎石质量按《水运工程质量检验标准》^[14]要求的频率、批次在监理工程师的见证下取样送专业检测单位进行检测,检测质量合格后方可使用。

1.2.2 碎石料出运

碎石料运输采用水运,在临近碎石加工场的岸线处修建 2 000 吨级的临时出运码头一座,码头前沿水深 4 m,满足 1 200 t 的碎石供料运输船的吃水要求。根据 2 条碎石桩船的供料方式,选择了皮带机输送船和抓斗转驳的平板船两种船型,每艘碎石桩船各配备 2 条运输船。皮带机船装料由安装在码头岸边的皮带输送机进行装料,平板船直接由运输车运到船上卸载。

2 参数优化

正式施工前,选取典型区块进行试桩,选择最佳的施工参数,包括沉管提升速度、每次提升高度、留振时间和充盈系数等。

2.1 桩位优化

根据现场设备的固有桩间距及布置位置,进行桩位优化^[13],不改变设计置换率,调整桩位的纵横向间距。选用的两艘船相邻桩管间距分别为 4.8 和 4.2 m。按复合地基的计算方法^[15],将原设计的桩间距 2.3 m 调整为桩间距 2.4 m、排间距 2.18 m 和桩间距 2.1 m、排间距 2.5 m。调整后每次移船均可同时施工 3 根桩,实现了以最少的移船次数施工最大数量的碎石桩,大幅提高施工效率,并且采用隔排隔桩跳打的方式,对保证施工质量十分有利。

2.2 拔管速度优化

为获取合理的拔管速度,选取 3 种拔管速度(2.2, 1.8, 1.5 m/min)进行试验,每种拔管速度随机抽取 3 根。根据重型动力触探试验结果,分别得到了桩身击数与拔管速度,桩身击数与充盈系数的关系。

从图 4 中可以得到桩身质量情况如下:

1) 拔管速度越慢,桩身密实性越好,桩身 0~10 m 范围内地质条件差,密实度相对较差,10 m 以下范围密实度均较好。

2) 拔管速度为 2.2 m/min 的桩,在泥面以下 0~2 m 范围内,每 10 cm 平均击数为 5.5~7.9 击;泥面以下 2~7 m 范围内,每 10 cm 平均击数为 7.5~9.8 击;泥面以下 7 m 至桩底,每 10 cm 平均击数均大于 10 击。

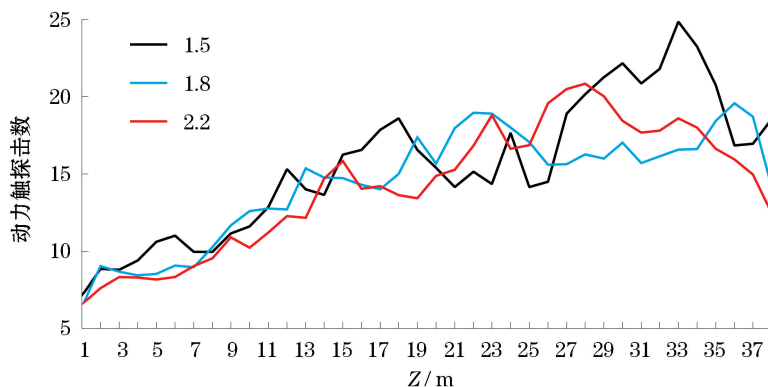


图 4 桩身击数与拔管速率的关系曲线

Fig.4 Relationship between the number of pile hitting and the velocity of pipe drawing

3) 拔管速度为 1.8 m/min 的桩,在泥面以下 0~2 m 范围内,每 10 cm 平均击数为 5.9~9.5 击;泥面以下 2~5 m 范围内,每 10 cm 平均击数为 7.1~9.9 击;泥面以下 5 m 至桩底,每 10 cm 平均击数均大于 10 击。

4) 拔管速度为 1.5 m/min 的桩,在泥面以下 0~2 m 范围内,6.8~9.2 击;泥面以下 2 m 至桩底,每 10 cm 平均击数均大于 10 击。

根据设计碎石桩密实度,最终确定拔管速度为 1.5 m/min。为了提高桩身上部质量,不同深度范围内控制不同的拔管速度。将桩身分为 0~10 m,10~15 m,15 m 以深三段,控制整个桩身的平均拔管速度为 1.5 m/min,对拔管速度进行优化^[13]。

2.3 充盈系数优化

桩身充盈系数为桩管实际碎石用量与理论碎石用量之比:

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1 + V_3}{V_1} = 1 + \frac{V_3}{3.14 \times D^2 \times (h_2 - h_1) / 4}, \quad (1)$$

式中: V_1 为计算理论碎石用量; V_2 为实际填充碎石用量; V_3 一部分是设计要求桩顶超出泥面部分的体积,另一部分是碎石充满整个桩身需要补填的碎石方量; D 为设计碎石桩桩径; h_1 为实测的水深; h_2 为桩管下沉深度。

当拔管速度为 1.5 m/min 时,分析了桩身击数和充盈系数的关系并绘制曲线(图 5)。由图 5 可知,充盈系数为 1.37(计算泥面以上碎石量时,充盈系数为 1.38)时,桩身密实度较均匀,均能满足设计要求,效果较好。经过统计,试桩碎石桩平均桩长为 37.4 m,与设计要求的平均桩长 37.6 m 基本相符,也能打穿夹砂层,打设深度满足设计要求。比较各种拔管速率和充盈系数下的检测结果,充盈系数为 1.38 时,桩身击数相对比较符合设计指标。按此参数施工,桩顶高程高出砂被面 30~50 cm 左右,与设计要求一致。

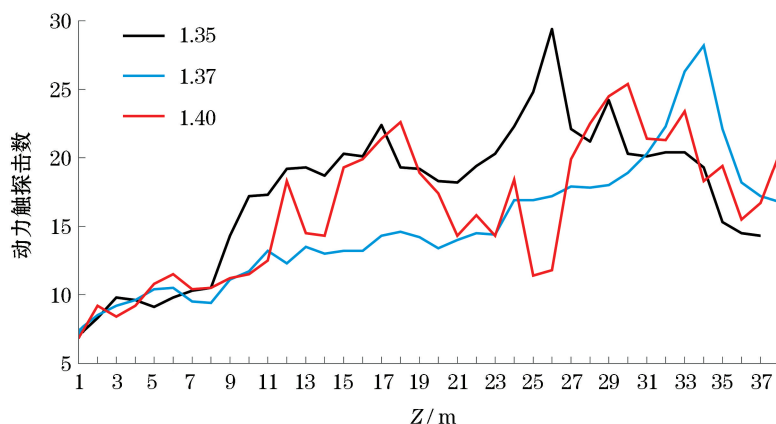


图 5 桩身击数与充盈系数的关系曲线

Fig.5 Relationship between the number of pile hitting and the coefficient of pile filling

3 工艺优化

3.1 成孔工艺

在振动锤较强的激振力作用下,桩管对周围土层产生很大的横向挤压力,成孔时桩管将地基土向管外排挤形成孔洞。

1) 在桩管下沉前,测量沉桩位置的水深,结合原始泥面标高和设计桩底标高确定沉管深度。实际施工时,可在桩管管壁上涂刷明显的刻度标志控制沉管深度。

2) 在桩位确认无误后,打开连接桩管的卷扬机,在桩管自重作用下沿固定桩架壁上的导向轨道下沉,当桩管不再下沉时,开启振动锤,在激振力的作用下桩管继续下沉,桩尖接近设计桩底标高时,注意观测套管下沉速度,保证沉管深度满足设计及规范要求^[13]。

3) 应用新型活瓣钢制桩靴^[16],增强桩管下沉能力,确保碎石顺利下落。

3.2 加料工艺

加料时摒弃以往一次充足加料的做法,采用合理分批次进行碎石加料。防止一次充足加料后桩管开始上提时,底部碎石下落慢,在振动作用下造成上部碎石振密板结,从而造成碎石拒落,出现缩颈或断桩的现象。该方法为桩管内碎石顺利下落提供了有力保障,有利于保证桩身质量。

1)根据实测水深和桩管下沉深度,计算桩长和理论碎石用量,根据充盈系数计算实际需要填充的碎石量和计量斗添加的数量。

2)计量斗内设置有刻度线,在计量斗上方设置视频监控系统,控制添加量。

3)碎石供料船靠泊打桩船后,由皮带输送机将碎石料转运到打桩船上的储料斗(200 m³)中(图 6a)。碎石经储料斗下方的皮带机输送到固定的计量斗(图 6b),卷扬机将碎石提升到钢套筒顶部的漏斗位置后加灌到桩管内(图 6c)。为防止超灌或少灌,应有专人负责碎石灌料工作,并做好相应记录。

4)加灌碎石前将钢桩管提高 50 cm,并打开桩靴上的 4 道门,之后再加料,防止桩靴门打不开或卡住,确保碎石能顺利下落。

5)分次加料的方法:第一次加料量为套管长度的 1/2~2/3,然后暂停,开始拔管,上拔 10~15 m 后,将剩余碎石分批次连续加入持续上拔的桩管内^[13]。

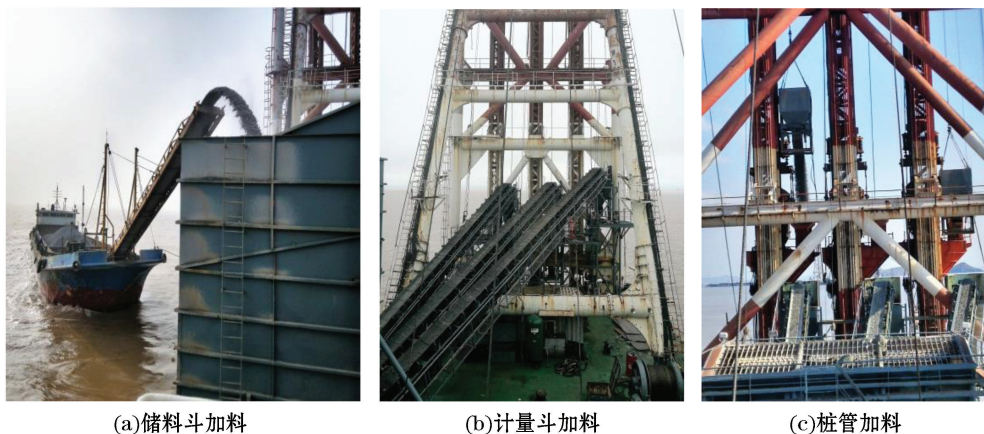


图 6 加料流程

Fig.6 Feeding process

3.3 填料工艺

为了保证填料效率,桩管填料采用干法,但干料在桩管内摩擦力较大,填料不易下沉,成桩质量受到影响。为此,初期采用添加水分润滑填料施工难度较大,最终在沿桩管高度方向,在管壁上开孔^[13],桩管下沉和提升过程中,海水可由进水孔进入桩管内,以增加自重,加速碎石充盈,并淘洗碎石中的泥土和石粉,润滑碎石。

3.4 振动工艺

当桩管内的碎石高度达到桩管的 1/2~2/3 位置时,暂停灌料,开始拔管。拔管前先开启振动锤振动 20 s,再按照试桩确定的拔管速率向上边振动边提升桩管,提升过程中不留振。拔管 10~15 m 后,将剩余碎石分批次连续加入持续上拔的桩管内。在距桩顶 2~3 m 时留振 60 s 后,将桩管拔出泥面,形成碎石桩体。

4 主要质量保证措施

从施工设备机具、充盈材料的质量等方面着手,把留振时间、拔管速率、充盈系数等施工参数作为桩身质量控制的重点和难点,通过施工试验加以检测检验,针对存在的缺陷和不足点采取合理措施进行纠正。

1)正式施工前,选取典型区块进行试桩,选择最佳的施工参数,包括沉管提升速度、每次提升高度、留振时间和反插深度。试桩过程中记录原始数据,并由专业检测单位检测成桩质量。最后,结合现场施工的实际情况分析各拟定参数的成桩质量检测结果,选择一组适合现场地质条件的施工技术参数。碎石桩施工参数最终须经业主、监理等审核后方进行大规模施工。试桩位置应具有代表性,应在工程护桩部位或工程非主要部位进行。试桩数量应根据设计要求和场地的地质条件确定,且不得少于3根。

2)正式施工时,严格按照试桩试验确定的施工技术参数进行施工,以确保碎石桩的施工质量。桩管提升速度应均匀但不能过快,以保证桩身连续性,碎石桩不得中断、脱节、缩径、陷口,否则应在附近重打。

3)施工中若遇到地质条件发生变化,应再次会同设计、监理人员等分析原因,适当调整施工技术参数,采取补救措施,确保施工顺利进行,并做好记录。

4)料斗内设置计量线,确保添加碎石量的正确性。施工前,应与监理工程师一起对计量斗容量进行校核,并做好不同容量标识标记。加灌碎石时,应有专人负责计量工作,必须保证斗数和每斗方量均计量准确。

5)碎石桩成桩后采用重型动力触探或大吨位静力触探对桩体的密实度进行检测,检测数量宜取总桩数的1%~2%,且不得少于3根。对砂土和粉土地基,检测宜在碎石桩成桩1d后进行;对黏性土地基,检测宜在成桩后10d左右进行。

5 结 论

通过对现有专业施工设备进行改造、优化桩位布置、关键技术参数和工艺等措施,实现了供料速度快,碎石添加计量准确,自动化程度高,施工效率高。解决了水上振动沉管碎石桩施工出现的碎石拒落、灌量不足、密实度差等诸多技术难点,且成桩桩体直径大、排水效果好,地基承载力高、后期沉降小。适用于需要满足上部结构快速加载施工要求的软土地基加固处理工程。

1)研究采用三管式同步成桩施工装备,应用沉桩定位系统及视频监控系统,实现了碎石桩施工过程的可视化操作,大大提高了施工效率。

2)应用新型大开度活瓣钢桩靴提高了桩管下沉能力,并确保碎石顺利下落成桩。

3)采用干法填料、分批次输送的供料工艺,以确保碎石料不堵管、不断桩,提高了工效,保证了质量。

参考文献(References):

- [1] MA Z Y. Strengthening soft foundation by vibro sinking gravel pile[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(3): 75-76. 马肇援. 海上振动沉管碎石桩加固软弱地基[J]. 河南科技, 2013(3): 75-76.
- [2] WANG H P, CHEN Y X. Research on application of vibroflotation gravel pile in foundation treatment of hydraulic revetment[J]. Science & Technology Vision, 2013(28): 100-101. 王海鹏, 陈云侠. 振冲碎石桩在水工护岸地基处理中的应用研究[J]. 科技视界, 2013(28): 100-101.
- [3] WU L Y. Construction technology of gravel pile on water[J]. Small Hydro Power, 2012(3): 67-69. 吴丽燕. 水上碎石桩施工工艺[J]. 小水电, 2012(3): 67-69.
- [4] LU C. Technology for controlling density of vibration driven gravel piles in underwater immersed tubes[J]. China Harbor Engineering, 2013, 33(4): 72-75. 路程. 水下振动沉管碎石桩施工密实度控制施工技术[J]. 中国港湾建设, 2013, 33(4): 72-75.
- [5] XU R B, ZHANG T X. Application of soft foundation reinforcement of gravel pile by water pipe sinking method in port engineering[J]. Pearl River Water Transport, 2017(5): 78-79. 徐瑞宝, 章途鑫. 水上沉管法碎石桩软基加固在港口工程中的应用[J]. 珠江水运, 2017(5): 78-79.
- [6] LIU W, LIU X P, SUN X P, et al. Application of water vibrator used in low-strength saturated-cohesive soil foundation treatment[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(7): 190-197. 刘伟, 刘晓鹏, 孙新鹏, 等. 水上振冲法在低强度饱和黏性土地基处理中的应用[J]. 水运工程, 2015(7): 190-197.
- [7] XU J, YANG X L, HUA X T, et al. Construction method and equipment of stone column in long-period swell area[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(8): 106-109. 徐杰, 杨秀礼, 华晓涛, 等. 长周期涌浪地区碎石桩施工方法及装备[J]. 水运工程, 2015(8): 106-109.

- [8] SUN H J, TAO R. Stone column offshore construction under strong wave condition[J]. Port & Waterway Engineering, 2017 (1): 181-185. 孙海军, 陶然. 强浪条件下振冲碎石桩施工工艺[J]. 水运工程, 2017(1): 181-185.
- [9] WU Z Q, TAO R. Offshore stone column construction technique under strong wave[J]. Port & Waterway Engineering, 2017 (4): 190-194. 吴遵奇, 陶然. 强浪条件下振冲碎石桩施工工艺[J]. 水运工程, 2017(4): 190-194.
- [10] YUE L, DIAO W, TAO R, et al. Jack-up applied in construction of deepwater breakwater foundation improvement under strong swell condition[J]. China Harbor Engineering, 2017, 37 (11): 82-86. 乐砾, 刁伟, 陶然, 等. 顶升平台在强涌浪海域深水防波堤地基处理中的应用[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(11): 82-86.
- [11] WANG C, FENG X D. Construction technology of stone column by self-elevating platform in strong swell area[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(5): 630-634. 王聪, 冯先导. 强涌浪海域自升式平台碎石桩施工技术[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 630-634.
- [12] ZHANG L W, XU W Z. A preliminary study on the construction technology of the gravel pile with immersed tube on water[J]. China Water Transport, 2017, 17(2): 260-261. 张力伟, 徐望之. 水上沉管碎石桩施工工艺初探[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(2): 260-261.
- [13] ZHOU H, WANG H D, XU L H. Key construction technology for marine vibrating sinking-pipe macadam pile[J]. Port & Waterway Engineering, 2019 (6): 203-206, 211. 周焕, 王海东, 许立华. 海上振动沉管碎石桩施工关键技术[J]. 水运工程, 2019(6): 203-206, 211.
- [14] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction: JTS 257—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008. 中华人民共和国交通运输部. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [15] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 42. 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, 2013: 42.
- [16] CCCC Water Resources and Hydropower Construction Co., Ltd.. A new type of Vibro driven pile shoe: China, 201721168497.3[P]. 2018-03-27. 中交水利水电建设有限公司. 一种新型振动沉管桩桩靴: 中国, 201721168497.3[P]. 2018-03-27.

Application of Key Technology for Construction of on-Water Vibration Sinking-Pipe Gravel Piles

WU Song-hua, ZHANG Zhe-hua

(CCCC Water Resources and Hydropower Construction Co., Ltd., Ningbo 315200, China)

Abstract: In view of the problems such as the less of application of on-water construction of vibration sinking-pipe gravel piles, the lack of suitable ship and equipment and the difficulty in quality control, and so on, a set of effective on-water construction techniques and quality control measures are formed by transforming the ship and equipment for the construction, optimizing the key technical parameters and construction technology, which are fast in feeding rate, accurate in gravel addition and measurement and high in automation level and construction efficiency. The results from the tests have indicated that the formed piles have large diameter, good drainage effect, high bearing capacity of foundation and small late settlement. As a result, many technical difficulties occurring in the construction of on-water vibration sinking-pipe gravel piles can be solved, for instance, obstruction of gravel falling, insufficient irrigation amount, poor compactness, and so on. And also, the efficiency of piling can be improved, the quality of piling can be ensured and the construction cost can be reduced. The techniques formed in this study are suitable for reinforcing and treating the soft soil foundation which needs to meet the construction requirement of superstructure fast loading.

Key words: sinking-pipe gravel pile; steel pile boots; three-pipe form; dry filling; visualization; vibration; compactness

Received: April 14, 2020