

# 底部出料振冲法在地基处理工程中的应用

张广彪, 卢鹏云\*, 朱晓勇

(北京振冲工程机械有限公司, 北京 100079)

**摘要:** 底部出料振冲法是在传统振冲法的基础上, 填充材料经由振冲设备附属的下料管道直接到达制桩的实时孔底位置, 并进行碎石桩或砂桩制桩的振冲法。相较于传统振冲法, 底部出料振冲法减少了石料和水资源的使用量、减少了污水和泥浆的产生、提高了施工质量和施工效率, 可实现绿色环保施工。通过工作机理、工艺特点、施工效果、适用范围的介绍和工程实践的验证, 表明底部出料振冲法水下施工能力强, 能够分别实现全过程的干法施工、湿法施工、干湿结合施工, 满足各种复杂条件下的施工要求, 具有广阔的市场应用前景。

**关键词:** 底部出料; 振冲法; 地基处理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)03-0245-10

## Application of bottom feed vibroflotation method in foundation treatment

ZHANG Guang-biao, LU Peng-yun, ZHU Xiao-yong

(Beijing Vibroflotation Engineering Machinery Co., Ltd., Beijing 100079, China)

**Abstract:** Based on the traditional vibroflotation method, the filling materials of the bottom feed vibroflotation method directly reach the bottom position of the pile through the pipeline attached to the vibration equipment to make gravel piles and sand piles. In comparison with the traditional vibroflotation method, the bottom feed vibroflotation method greatly reduces the waste of stone, the use of water resources, the generation of sewage and mud. It also improves the construction quality and efficiency, thereby it is a kind of green construction. Using engineering practice, this paper revealed its working mechanism, technological characteristics, construction effect and application scope. The results show the bottom discharge vibroflotation method is capable for the underwater construction, and also it can realize dry construction, wet construction and dry-wet combined construction. Hence, it can meet the construction requirement under various complicated conditions, which has broad market application prospects.

**Key words:** bottom feed; vibroflotation method; foundation treatment

## 1 振冲法的应用和发展

振冲法源于上世纪 30 年代的欧洲, 早期主要是振冲挤密, 70 年代振冲碎石桩开始应用。国内于 1977 年引进振冲法, 并在建筑工程领域获得推广。

振冲法的加固机理主要为振冲挤密、弱土置换并形成高透水性的碎石桩体, 对提高承载力、改善沉降性能、加速排水固结以及消除可液化土等有显著的处理效果, 同时由于所使用设备和材料简单、便捷、成本低、施工组织和施工流程简单, 逐渐成为建筑工程中实用性很强、应用广泛的地基处理手段。

## 2 传统振冲法的适用范围和应用局限

目前, 地基加固工程中应用的振冲法主要为使用孔口填料的传统振冲法。传统的振冲法具有较为广泛的适用范围, 但也有一定的应用局限。

### 2.1 地基土类别适用范围

振冲法可用于黏土、粉土、砂土以及砾石等不同类别的土层加固。通常, 对于土壤颗粒小、颗粒间有黏结的土层可通过振冲置换法(或振冲碎石桩法)进行处理, 对于土壤颗粒较大、颗粒间无黏结或弱黏结的土层可通过振冲挤密法(无填料法或有

收稿日期: 2020-04-16

作者简介: 张广彪(1971—), 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事地基和基础工程的施工、专业设备的研发和生产工作。E-mail: zhanggb@bjvibro.com。

\*通讯作者: 卢鹏云(1971—), 湖南人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土和地基工程的设计和研究工作。Email: lupy@bjvibro.com。

填料法)进行处理。

## 2.2 传统振冲法的应用局限

传统振冲法在以下情况的应用将受到一定的局限:

(1) 含水量高抗剪强度低的饱和黏性土(淤泥或淤泥质土)

对于淤泥或淤泥质土,由于在施工中存在孔壁颈缩和周围土压力过小的现象,振冲施工易出现造孔、下料以及成桩困难的情况,国内规范 DL/T 5214-2016 规定:对于不排水抗剪强度小于 20 kPa 的淤泥、淤泥质土及该类土的人工填土地基,应通过现场试验确定其适用性。

(2) 水域施工

水下振冲碎石桩施工,由于存在定位、填料等施工工艺方面的困难,传统的振冲施工方法将很难实施。

(3) 限制施工用水的区域

传统振冲法需使用大量的水资源,在水资源紧缺的区域,传统振冲法的应用将受到限制。此外,一些工程出于避免高压水带出大量土壤颗粒,尽量减小对原状土的扰动的原由,要求使用干法施工,也会限制传统振冲法的使用。

(4) 禁止污水排放的区域

传统振冲法将产生大量的污水。出于环保要求,传统振冲法在此类地区的使用也会受到限制。

(5) 对振冲碎石桩实时桩径有严格要求的工程

由于地基土层的硬度情况不同,振冲法形成的碎石桩体沿土层分布的直径会出现大小不一的呈“葫芦状”现象。传统振冲法由于其施工特点,只能进行“平均桩径”的控制,而不能实现“实时桩径”的控制。如果工程需准确控制碎石桩的“实时桩径”,以达到控制施工质量、优化设计的目的,传统振冲法将不再适用。

## 3 底部出料振冲法

### 3.1 底部出料振冲法施工工艺

底部出料振冲法是指在振冲碎石桩或振冲砂桩施工时,填充材料经由振冲设备附属的下料管道直接到达制桩的实时孔底位置,并进行碎石桩或砂桩制桩的振冲法。

底部出料振冲法的出现和应用,进一步拓展了振冲法在各类工程中的可适用范围。

### 3.2 底部出料振冲法的工作原理和特点

在传统振冲法的施工中,堆积在地表的石料从

孔口自上而下经由孔壁落入孔底,再通过振冲器的振挤作用密实成桩。而底部出料振冲法施工中,由于底部出料振冲设备自带下料管道,石料由管道直接到达孔底,从而避免了孔壁对石料的滞留和扰动影响,可确保全部石料准确送达振冲器实时制桩位置,如图 1 所示。

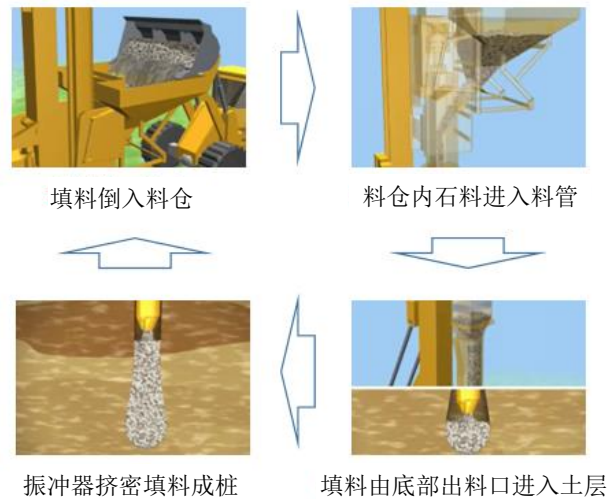


图 1 底部出料振冲法的工作原理

Fig. 1 Working principle of bottom feed vibroflotation method

### 3.3 底部出料振冲法的干法施工

所谓振冲法的干法施工是指在振冲施工中,不使用高压水冲而使用高压空气来辅助成孔和制桩的施工工艺。这种新的施工工艺使振冲法能够减少对水资源的依赖,同时避免大量泥浆和污水的产生,更有利于环境保护和绿色文明施工。

用于底部出料振冲法施工的振冲施工设备,由于其配置特殊的管道系统,可分别实现全过程的干法施工、湿法施工、干湿结合施工的工艺。这几种不同类型的施工工艺在施工过程中也可进行独立、灵活的转换,以满足在不同情形下的施工需求。

此外,传统振冲施工中使用的高压水容易把原地基土的大量土壤颗粒带出地表,从而使原始地基土的物理特性(如颗粒级配、土壤颗粒含量等)发生不利改变。因此,一些振冲法地基处理工程,如泥炭土、液态土的振冲工程中,会指定使用干法施工工艺,以达到保护原地基土的物理力学性能的目的。

### 3.4 底部出料施工法的优点

(1) 底部出料振冲法有效解决了传统振冲法在淤泥地层中的施工问题

底部出料施工工艺的特点使振冲法在淤泥和淤泥质土中的下料问题和制桩问题得到改善,从而

适用性得到提高。

a) 下料问题: 由设备自带的旁通管道直接将填料输送到制桩位置, 淤泥土层缩孔现象不会对石料下落的通畅性造成影响。

b) 成桩问题: 由于底部出料工艺可采用干法制桩工艺, 不会带出大量土壤颗粒, 造成地基土大面积置换; 同时底部出料法可采用悬打法施工工艺, 可避免由于周围土压力过小而形成过大直径碎石桩, 或松软土层被完全置换的情形出现。

底部出料悬打法施工工艺是振冲法在淤泥或淤泥质土中可采用的特殊制桩工艺。振冲碎石桩悬打法的制桩过程中, 在起吊设备负载的状态下, 振冲器处于“空悬状态”, 对底部土层不施加由于自重而产生的下压力(反插力), 而直接通过激振力对石料进行振动挤密, 并形成碎石桩体的施工工艺。在淤泥或淤泥质土的地层中使用干法底部出料悬打法施工工艺, 可以有效避免大量土壤颗粒被高压水带出而造成孔洞不断过大, 以及孔壁由于稀软而形成过小的周围土压力, 致使成桩直径过大, 甚至处理区域完全置换的情形发生。悬打法通常通过填料量进行质量控制。使用悬打法处理的淤泥或淤泥质土地层, 应在地基土充分排水固结后进行质量检测, 通常不少于 28 d。

(2) 底部出料振冲法有效解决了传统振冲法水下振冲碎桩的施工难题

由于水下振冲施工通常面临以下多方面的施工难题:

a) 施工平台问题: 水下施工需要通过围堰施工形成施工空间, 否则需要在水面搭设施工平台或配置施工驳船。

b) 配套设备问题: 由于水下施工的特殊性, 需要配置适合水下施工用的数量多且复杂的特殊配套工具和设备。

c) 施工工艺问题: 由于成桩过程发生在水下, 所以有效、准确的将石料送达制桩位置成为一个必须解决的工艺难题。

在以往使用传统振冲工法的水下施工案例中, 由于以上问题的存在, 振冲施工的成本更高, 效率低下, 同时施工质量难以保障。见图 2。

由于其特殊的施工工艺特点, 底部出料振冲施工工艺在水下振冲碎石桩的施工中有高效表现。底部出料振冲法可使用施工平台、施工驳船等多种方式组织施工。在使用较简单设备的情况下, 可实现多台振冲设备并联施工, 运用化整为零、分批落料



(a)



(b)

图 2 传统振冲法的应用实例

Fig. 2 Application example of traditional vibroflotation method

的填料工艺, 将石料不经由水体直接送至孔底, 最大程度减少石料的浪费, 高效精确的进行碎石桩制桩施工。提高了施工质量可控性和施工效率。如图 3 所示。

在已完成的港珠澳大桥香港人工岛地基加固工程、以色列阿什杜德港地基处理工程和目前正在进行的东帝汶帝巴湾新集装箱码头地基处理工程中(图 4), 水下施工的底部出料振冲法的应用取得了良好的使用效果, 得到了建设单位的高度评价和认可。

(3) 底部出料振冲法可实现干法施工, 有效解决了缺水地区振冲施工的问题

底部出料振冲法可进行干法、湿法以及干湿联动等多种工艺的施工。其中的干法施工可解决传统振冲法在水资源缺乏、污水排放受限区域或为避免破坏土壤颗粒级配而指定干法施工的矛盾。此外, 底部出料振冲法也可根据土层硬度、成孔效率等情形, 采用湿法或干湿联动方法施工, 更具灵活性和可适应性。如图 5 和图 6 所示。

(4) 底部出料振冲法可实现对碎石桩桩体实时桩径的控制

传统振冲施工由于其落料工艺的特点，填料需自孔口延孔壁下落，由于下落途径孔壁土层的滞留影响，施工人员无法确定最终实际落入孔底实时制桩位置的石料准确数量（图 7），因此，仅仅依据填入石料的总量，施工人员通过计算得出的碎石桩直径仅为“平均桩径”，而无法获取“实时桩径”，即整个碎石桩不同位置的“葫芦状”桩径分布情况。

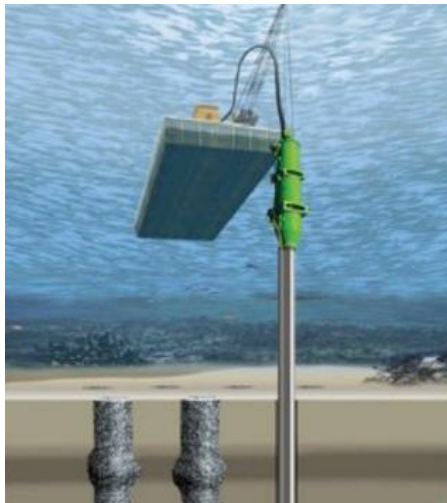


图 3 在施工驳船上进行的底部出料水下振冲碎石施工示意图  
 Fig. 3 Schematic diagram of underwater construction of bottom feed vibroflotation on barge



图 4 港珠澳大桥香港人工岛口岸底部出料振冲施工  
 Fig. 4 Bottom feed vibroflotation construction in Hongkong-Zhuhai-Macao bridge



图 5 干法底部出料振冲施工配置的空压机和空气储气罐  
 Fig. 5 Air compressor and air accumulator for bottom feed vibroflotation dry construction



图 6 东帝汶帝力帝巴湾新集装箱码头干法底部出料振冲施工  
 Fig. 6 Bottom feed vibroflotation dry construction in Timor-Leste Dili new container port project

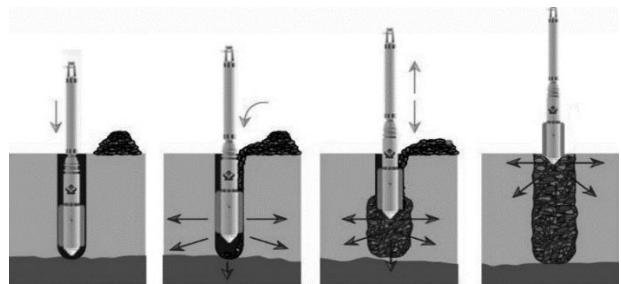


图 7 传统振冲施工的孔口落料工艺示意图  
 Fig. 7 Schematic diagram of top feed process in traditional vibroflotation

振冲碎石桩实现“实时桩径”控制具有很大意义。一方面，通过对“实时桩径”的了解，可以辅助验证地基勘测数据和振冲施工设计方案的合理性，为“半经验半理论”的振冲设计方案的进一步优化提供数据支持，从而使设计方案更加符合地基处理的要求。另一方面，“实时桩径”能指导施工人员结合地勘报告，判断地基土的真实情况，进一步优化、完善施工工艺和施工流程，保证施工质量。同时，相对准确的实时桩径，可用于计算不同地层位置的面积置换率，有助于更准确的计算承载力和沉降，从而使“半经验、半理论”的振冲法理论化程度得到进一步提升。可以说，振冲碎石桩对“实时桩径”准确控制的实现，对振冲法理论发展和应用的进一步推广具有重大的意义。

底部出料振冲施工工艺可通过精确计量准确控制填料数量，并将填入的全部石料直接送至实时制桩位置，落料途径无滞留石料，从而实现碎石桩实时直径的控制。同时通过振冲施工系统配置的数据记录设备实时记录包括填料量在内的各项施工参数，实现全过程检测、控制施工流程、确保精确化施工。见图 8。

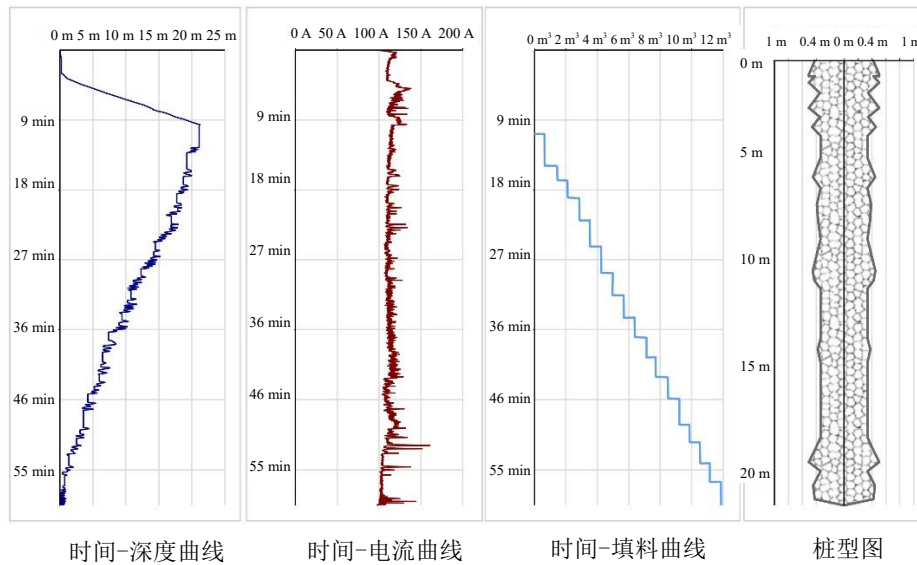


图 8 底部出料振冲法的施工参数和桩形图

Fig. 8 Construction parameters and pile shape of bottom feed vibroflotation

### 4 底部出料振冲施工设备

底部出料振冲施工需使用底部出料振冲器集成系统进行实施。此集成系统由以下部分构成:

- (1) 振冲器系统, 由电动或液压振冲器、延长导杆、减震器以及电控系统组成。
- (2) 上料系统, 主要由卷扬式、滑轨式的提升料斗组成。
- (3) 料仓系统, 由双仓式或单仓式的料仓、料位计以及料仓控制系统组成。
- (4) 下料管道系统, 由下料管和料管减震器组成。

底部出料振冲器可配套使用的起吊设备包括履带吊车、步履式桩架、旋挖钻机架等。国外也有与挖掘机配套使用的案例。

此外, 底部出料振冲施工还需选择配备其它的配套设备和设施, 如: 装载机、发电机、空压机、水泵等。施工人员需根据工程的不同情况对这些设备或设施的类别、型号和能力进行选配。如图 9 所示。

#### 4.1 底部出料振冲器

底部出料振冲器通常采用 180 kW 以上的大功率电机, 以满足成孔和制桩的需要(见图 10 和表 1)。由于有干法施工的功能, 底部出料振冲器通常会使用特殊的电机冷却系统, 如自动外循环水冷系统, 以保护电机, 延长振冲器的使用寿命。

#### 4.2 料仓系统

底部出料振冲器所使用的料仓系统有单腔单

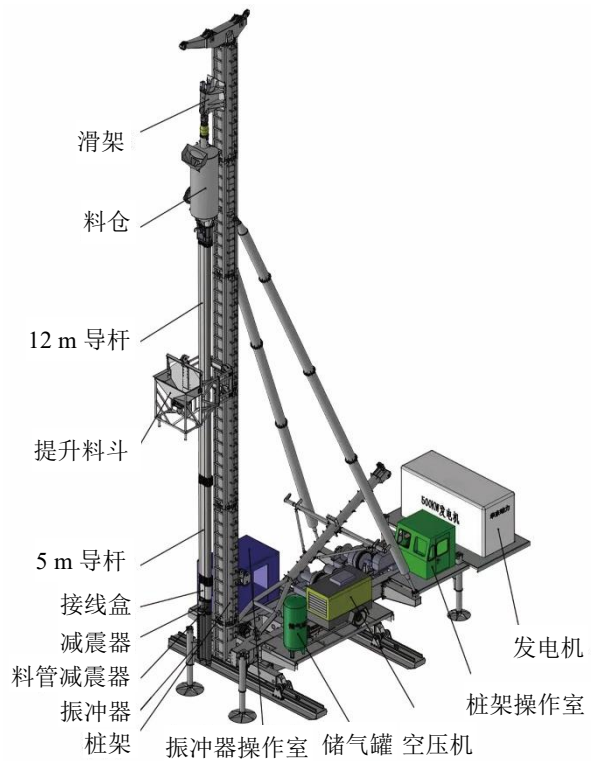


图 9 底部出料振冲施工设备系统集成 (配套步履式桩架)

Fig. 9 Integrated equipment system of bottom feed vibroflotation (Equipped with walking pile frame)

阀门料仓和双腔双阀门料仓 (双锁压力仓) 两种形式。其中双腔双阀门料仓可以使下料管道中始终保持一定的空气压力, 并以此来确保石料的顺利下落。在水下施工中, 由于下料管道中空气压力的存在, 可避免外部水灌入管道甚至返流到料仓的情形发生。因此双腔双阀门料仓通常在较大桩深的工程或水下振冲碎石桩工程中使用。如图 11 所示。对



图 10 底部出料振冲器系统外观  
Fig. 10 Bottom feed vibration system

表 1 底部填料振冲器系统参数

Tab. 1 Parameters of bottom feed vibroflot system

底部填料电动振冲器参数	
型号	BJZC-BFS-400-180
功率/kW	180
频率/Hz	40~60
转速/rpm	1 200~1 800
工作桩径/mm	900~1 200
系统压力/bar	6
激振力/kN	200~300
料斗容积/m <sup>3</sup>	1.2
下料管通径/mm	DN250
控制形式	变频控制
电机冷却方式	循环水冷

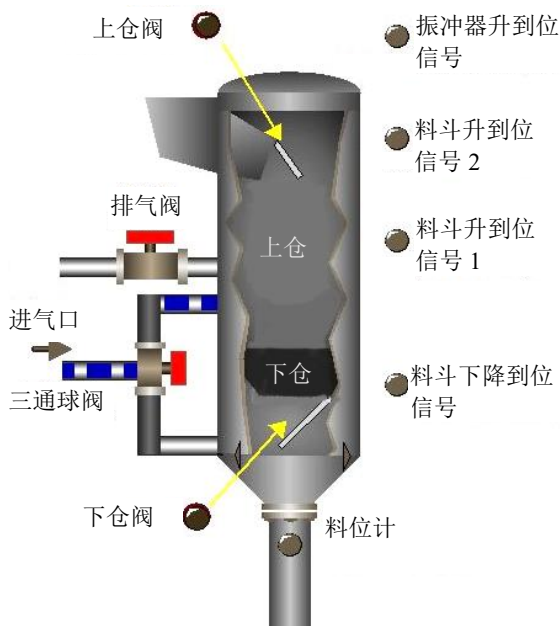


图 11 底部出料振冲器双锁压力仓系统

Fig. 11 Double lock pressure container system of bottom feed vibroflotation

于桩深较小的陆上施工，由于结构更简单，操作更方便的特点，单腔单阀门料仓的采用更为常见。

底部出料的料仓系统通常会在其底部配置料位计，以精确控制、检测料仓内的石料数量，指导施工人员上料和下料的操作。

### 4.3 上料系统

底部出料振冲器所使用的上料系统通常有滑轨滑槽式料斗和卷扬翻转式料斗。

滑轨滑槽式料斗可沿轨道上升和下降，并通过滑槽向料仓喂入石料，施工可控性和施工效率更高。如图 12 所示。

卷扬翻转式料斗通常与履带式吊车配合使用，具有结构简单、成本较低的优点。由于此类料斗通过卷扬起吊，料斗在上升和下降过程中的稳定性较差，尤其在大风天气下容易发生剧烈晃动，对施工人员的操作安全和施工效率会有一定影响，卷扬翻转式料斗通过料斗的翻转动作完成石料向料仓的倾卸，此过程所需时间比滑槽式卸料更长，因此施工效率也更低。如图 13 所示。



图 12 滑轨滑槽式料斗  
Fig. 12 Slide-style hopper



图 13 卷扬翻转式料斗  
Fig. 13 Turn-over hopper

### 4.4 下料管道系统

底部出料振冲器设备下料管道系统由上部料管、下部料管和料管减震器组成。上部料管与料仓连接，下部料管设置出料口，以将石料喂入孔内。上料管和下料管之间通过料管减震器连接，以避免振冲器的振动对料管产生过大影响。整个下料管道系统沿振冲器与振冲器延长导杆全线刚性连接，并确保设备的整体性。下料管道系统的结构及规格需满足石料顺利下落的要求。如图 14 所示。



图 14 下料管道系统  
Fig. 14 Feeding system

### 4.5 底部出料振冲集成系统的模块定制化特点

在实际工程施工中，整套振冲施工设备系统组成，可根据施工的特点，按以上系统模块进行组合以满足工程施工的需求。如图 15 所示。

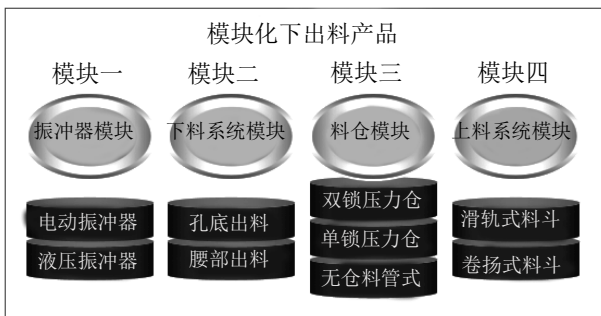


图 15 底部出料振冲设备模块化组成  
Fig. 15 Modules of bottom feed vibroflot equipment

## 5 底部出料振冲法和传统孔口填料振冲法的比较

### 5.1 共同点

(1) 地基加固的机理和加固的效果相同

二者都是通过振冲碎石桩的桩柱、垫层和排水作用达到改善地基土物理力学性能的效果。

(2) 设计原理和方法相同

二者都是依据振冲碎石桩复合地基的设计原理进行计算和设计。

(3) 效果检验的方法相同

二者都依据规范中振冲碎石桩的检测方法进行效果检验。

### 5.2 不同点

(1) 施工使用的设备不同

底部出料振冲法所使用的设备配置石料输送系统，可在设备自带管道内进行石料输送。同时，底部出料振冲设备配置特有管道，可同时实现使用高压空气的干法施工和水汽联动方式施工。

(2) 施工工艺不同

底部出料振冲法上料和落料的施工工艺可确保石料落料数量和落料位置的准确性，实现实时桩径控制，同时增加了在淤泥或淤泥质土中采用悬打法施工工艺的可行性。同时，由于施工工艺的区别，底部出料振冲法的施工可最大程度地提高石料的使用率，减少场地的石料浪费，节省施工成本的同时，更有利于保持场地的整洁，实现文明施工。如图 16~图 17 所示。



图 16 传统振冲法施工现场  
Fig. 16 Construction site of traditional vibroflotation



图 17 底部出料振冲法施工现场  
Fig. 17 Construction site of bottom feed vibroflotation

### (3) 成孔能力不同

底部出料振冲设备由于新增料管自身无动力输出,但横截面积更大,土层阻力增加,因而穿透能力将受到一定影响。

### (4) 施工工效不同

底部出料振冲法施工控制节点多,施工工艺更复杂,通常情况下的单桩制桩时间更长,因而在传统振冲法也适用的工程中,传统振冲法施工工效更高。在传统振冲法不适用的工程中,比如水下振冲碎石桩工程、淤泥或淤泥质土中的振冲碎石桩工程,底部出料振冲法将是更好的选择。

## 6 工程实例

### 6.1 工程概况

东帝汶帝巴湾新集装箱码头底部填料振冲施工工程位于东帝汶首都帝力以西 10 km,是东帝汶规模最大的港口项目。项目包括 630 m 集装箱高桩码头、350 万 m<sup>2</sup> 疏浚、27 万 m<sup>2</sup> 陆域吹填和 18.5 万 m<sup>2</sup> 的地基处理。

此工程由东帝汶政府和法国 BOLLORE 集团共同投资建设,项目总投资 1.53 亿美元。工程设计单位为中国中交四航院,DB 承包商为中国港湾集团有限公司,振冲施工的实施单位为中交四航局。合同总工期为 32 个月。

### 6.2 振冲碎石桩设计概况

#### (1) 施工区域

振冲碎石桩施工范围划分为 A、B、C、D、F1、F2 共 6 个区域。其中, C、D、F 为陆上振冲处理区域,碎石桩数量 37 053 根。A、B 为海上振冲处理区域,碎石桩数量 17 543 根。采用主要粒径为 20~50 mm 级配碎石,洛杉矶磨损小于 35% 的碎石(混凝土骨料洛杉矶磨耗值是表示混凝土骨料抵抗冲击、磨耗和边缘剪切等联合作用能力的一个参数)。

#### (2) 工程数量及施工主要参数

振冲施工分海上施工部分和陆域施工部分,其中海上部分总桩数 17 543 根,桩长范围在 12~26 m 之间。陆域部分总桩数 37 053 根,桩长范围在 14~21 m 之间。桩径要求大于 800 mm(后调整为 1 000 mm)。如图 18,图 19 和表 2 所示。

出于对碎石桩透水性能的要求,结合底部出料振冲法的施工工艺特点,项目要求石料颗粒粒径范围 20~50 mm。

#### (3) 施工目的及关键问题



图 18 振冲碎石桩施工区域分布图

Fig. 18 Distribution of vibroflotation construction area

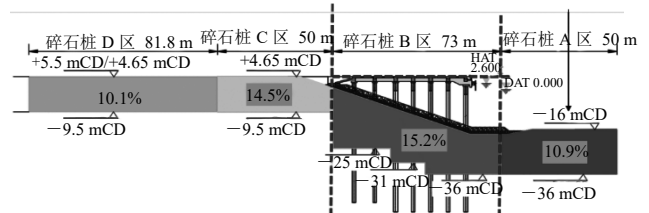


图 19 振冲碎石桩横断面示意图

Fig. 19 Cross section of vibro-replacement stone columnn

陆上地基处理区域的回填料多为珊瑚砂,含钙质较高,孔隙较多,不符合作为码头后方在沉降和稳定性方面的要求,同时考虑有大量的水下区域施工,同时对实时桩径的控制有较高的要求,因此最终确定底部出料振冲法进行振冲碎石桩施工,与原地基土形成复合地基,以适应地震后抗液化要求。

工程海上部分振冲施工工程量大,海上施工组织 and 实施所需的设备复杂,因此,海上部分振冲施工的有效组织是本项目能够成功实施的关键。此外,地勘报告的数据显示,60%~70%振冲碎石桩处理区域的 SPT 击数为 20 以内,有少数的孔位超过 30 击,极个别的位置超过 50 击,还有显示为 100 击的 SPT 值。因此,除了海上施工的有效组织和实施外,振冲设备能否高效穿透坚硬土层、满足施工效率的要求也是本项目需要解决的主要问题。

### 6.3 底部出料振冲法陆域施工

#### (1) 主要施工设备

振冲设备采用北京振冲 BJZC-BFS-400-180 双锁压力仓底部出料振冲系统,配套桩架采用浙江振中 JZB200 步履式桩架。如图 20 所示。

BJZC-BFS-400-180 双锁压力仓底部出料振冲



表2 振冲碎石桩数量及施工参数

Tab. 2 Quantity and construction parameters of vibro-replacement stone columnn

区域	施工方法	面积/m <sup>2</sup>	置换率/%	桩径/m	桩数/Nos	桩长范围/m	理论工程量, 碎石用量/m <sup>3</sup>
A	水上碎石桩 (护底区域)	38 920	10.90	0.9	6 669	12~20	77 004.9
B	水上碎石桩 (码头区)	51 082.7	15.20	0.9	10 874	13~26	128 102.6
汇总					17 543		205 107.5
C	陆上碎石桩	30 501	14.50	0.8	8 799	14.35, 18.35	64 238
D	陆上碎石桩	115 070	10.10	0.8	23 121	14.15, 14.35, 18.85, 15.20	170 676
F1	陆上碎石桩	9 067.6	14.50	0.8	2 616	14.70, 20.90	26 205
F2	陆上碎石桩	8 721.9	14.50	0.8	2 517		
汇总					37 053		261 119
总量					54 596		466 266.5



图20 施工设备示意图

Fig. 20 Schematic diagram of construction equipment

系统中, 上料系统采用轨道式滑槽提升料斗系统, 可控性更好, 效率更高。

整个振冲施工的过程采用数据记录仪进行全过程施工参数记录, 并实时形成振冲碎石桩桩形图。

#### (2) 施工效果

陆域施工中振冲设备的穿透力是底部出料施工能否顺利实施的关键。在施工中, 根据地层的软硬情况, 施工人员采用了干湿结合的方法进行施工, 通过对用水量、水压和气压以及电机频率的调整, 优化施工参数和施工工艺, 取得了良好的效果, 提高了施工效率。

陆域施工部分碎石桩桩深范围约 15~21 m, 平均造孔时间为 15~25 min, 加密时间为 30~35 min, 整桩工作时间为 50~70 min, 最大 SPT 在 50 击以上, 总桩数为 37 000 根。施工效率和施工质量达到业主要求。见图 21。



图21 陆域底部出料振冲施工场景

Fig. 21 Construction site of bottom feed vibroflotation on land

## 6.4 底部出料振冲法海域施工

### (1) 主要施工设备

振冲设备采用北京振冲 BJZC-BFS-400-180 双锁压力仓底部出料振冲系统, 配套使用 2 艘施工驳船, 分别并联装配 4 套和 3 套底部出料振冲系统。施工上料系统采用自动控制的皮带输送系统, 可通过电脑操作实现全自动施工。见图 22~图 23。

### (2) 智能化的海上底部出料振冲施工

海上振冲施工采用世界领先的碎石桩施工管理系统, 施工人员通过此系统, 结合全视角的视频监控系统, 在设置于船舱中的中央控制室即可实现自动打桩, 提高施工效率。见图 24。

### (3) 施工效果

底部填料海上振冲施工采用海上 GPS 定位系统, 并通过智能化的振冲碎石桩施工管理系统, 在水深约 15 m, 最大 SPT 达到 70 击, 最大桩深达到 26 m 的施工区域, 完成总量为 17 000 根的水下碎石桩施工。施工工效和施工质量达到业主的预计要求。充分体现了底部出料振冲施工工艺在水域施工的适用性。见图 25。



图 22 海上底部出料振冲施工配套设备

Fig. 22 Construction equipment of bottom feed vibroflotation on the sea



图 23 可实现全自动控制的上料皮带机和料斗

Fig. 23 Automatically controlled belt conveyor and hopper



图 24 中央控制室

Fig. 24 Central control room

## 7 结 论

底部出料振冲法提升振冲设计的理论化程度,使振冲设计和振冲施工有更加紧密的结合,同时推动新的振冲施工工艺(如干法施工、悬打法等)在振冲施工中的使用,具有以下优势:



图 25 海上底部出料振冲施工场景

Fig. 25 Construction site of bottom feed vibroflotation on the sea

(1) 进一步拓展了振冲法在地基处理工程中的应用范围,使得以往不适合振冲法的领域,如淤泥或淤泥质土、水下碎石桩施工、干法施工以及对实时桩径有严格要求的碎石桩工程,也可以采用振冲法进行处理。

(2) 实现绿色环保施工。底部出料振冲法的施工工艺能够更加有效的利用石料,减少石料浪费以及减小水资源的使用量。在减少资源损耗的同时,最大化的避免以往困扰振冲施工正常实施的污水和泥浆的产生,实现绿色环保施工。

(3) 满足不同条件的工程施工需求。底部出料振冲施工成套设备可根据现场条件和需要,按组成模块实现设备定制化,灵活处理不同条件下的施工,可满足各种复杂条件下的振冲施工需求。

(4) 广阔的市场应用前景。底部出料振冲法的应用日趋成熟。在全世界范围已经有大规模的成功应用,使用效果良好,施工效率不断得到提高。由于底部出料振冲法的出现,振冲法在未来将会获得更为广阔的市场应用前景。

## 参考文献

- [1] Kirsch K, Kirsch F. An overview of deep soil improvement by vibratory methods[J]. Ground Improvement by Deep Vibratory Methods, 2016, 10. 1201/9781315372341: 1-4.
- [2] DL/T 5214-2016 水电水利工程振冲法地基处理技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.