

# 实时过程数据在振冲碎石桩全过程 质量控制中的应用

卢鹏云, 张广彪, 臧成新  
(北京振冲工程机械有限公司, 北京 100079)

**摘要:** 结合岩土理论和工程实践, 阐述了振冲碎石桩在岩土勘探、工程设计、碎石桩施工及效果检测等过程中的不确定性, 由此提出优化振冲碎石桩全过程质量控制的新思路。在此基础上, 阐述了动态实时数据的获取对于实现有效的振冲碎石桩全过程质量控制新思路的重要性, 同时对影响振冲碎石桩工程质量的核心实时数据的分类、作用以及应用进行了详细论述, 以实现促进振冲碎石桩在地基加固工程中的理论和应用的发展的目的。

**关键词:** 振冲碎石桩; 不确定性; 全过程质量控制; 优化

中图分类号: TU741

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)05-0404-10

## Application of real-time process data in whole process quality control of vibro replacement stone column

LU Peng-yun, ZHANG Guang-biao, ZANG Cheng-xin  
(Beijing Vibroflotation Engineering Machinery Co., Ltd., Beijing 100079, China)

**Abstract:** Combined with geotechnical theory and engineering practice, this paper expounds the uncertainty of vibro replacement stone columns in the process of geotechnical exploration, engineering design, stone columns construction and effect detection. It puts forward a new idea of optimizing the whole process quality control of vibro replacement stone columns. On this basis, the importance of obtaining dynamic real-time data for the realization of effective whole process quality control of vibro replacement stone column engineering is expounded. At the same time, the classification, function and application of core real-time data affecting the quality of vibro replacement stone columns are described and demonstrated in detail, in order to realize the purpose of promoting the development of theory and application of vibro replacement stone columns in ground improvement engineering.

**Key words:** vibro replacement stone column; uncertainty; whole process quality control; optimization

### 1 振冲碎石桩的工艺描述及特点

振冲碎石桩是指在使用振冲置换法的地基加固工程中, 利用振冲器的水平振动和高压水冲(气冲)的共同作用, 在软弱土层中形成的碎石或其它粗粒料加强桩体的施工工艺。此加强桩体与原地基土形成人工复合地基, 以满足建筑物的荷载与变形要求。

振冲碎石桩工艺可实现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。其工艺具有以下特点:

#### (1) 形成柔性桩体

振冲碎石桩由无黏结作用的骨料(碎石、卵石或矿渣等)经振冲器挤压加密形成, 具有柔性桩体的特征。

#### (2) 形成不同桩径的变截面桩体

通常来说,工程中所提到的碎石桩直径一般是指碎石桩的平均桩径。当地基土的不同土层强度和硬度变化较大时,振冲碎石桩的施工工艺形成的碎石桩桩体在不同的土层中的桩径将有所不同。振冲碎石桩的变截面特性对于提升天然地基不同土层间的均匀性具有一定的积极作用。

### (3) 振冲碎石桩的可透水性

振冲碎石桩通常由粒径 20~150 mm 的粗骨料组成,因此有较强的透水性能。碎石桩桩体形成后,相当于在天然地基中置入了大量的透水通道,周围土体与碎石桩之间形成显著的水压差,能够加速土体的排水固结。

## 2 振冲碎石桩工程的不确定性分析

振冲碎石桩工程从开始到完成通常包含地质勘察、振冲桩设计、振冲桩施工以及施工效果检测 4 个环节。目前,对于大多数振冲碎石桩工程来说,此 4 个环节的实施流程具有时间节点的单向性特点。由于振冲碎石桩工程在各个实施流程中存在一定程度的不确定性,对于当前振冲碎石桩的全过程质量控制的单向性特点提出了进一步优化的要求。

### 2.1 地质勘察信息的局限性

根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)对详勘点数量的要求,对于地基复杂程度等级为一级的详勘点的间距要求为 10~15 m,二级为 15~30 m,对于地基复杂程度等级为三级的详勘点间距要求达到 30~50 m,同时,对于采取土样孔的数量要求为不少于勘探孔总数的 1/2,对于原位测试孔的数量要求为不少于勘探孔总数的 1/3。有限的勘察孔的数量和布置,以及有限的采取土样孔的数量和原位测试孔的数量,都不能保证全面反映全区域地基土的真实状况。

另一方面,对于复杂地基来说,各地层分布变化大,对于振冲碎石桩重要设计依据的代表性勘测孔的选取较为复杂,这也将很大程度上影响最终的设计方案。依据某单一代表性勘测孔制定的振冲碎石桩设计方案不能覆盖所有需加固区域的地质情形的要求。

### 2.2 振冲碎石桩工程设计的半经验半理论性特点

振冲碎石桩工程的设计通常包含土力学计算、桩体布置和基本参数设计以及施工工艺设计等内容。由于这些设计内容基本上都是在半经验半理论的基础上制定并实施,这也给振冲碎石桩工程带来

一定程度的不确定性。

#### (1) 土力学计算中大量经验值的使用

振冲碎石桩的土力学计算通常包括承载力计算、沉降计算、稳定性验算和抗液化计算。几乎所有这些计算内容,都会使用到较多的经验公式或经验值。这些经验公式和经验值与地基土的真实情形难免存在一定的差异,因此,由此制定的设计方案的有效性需要通过工艺试验、工程实施情况以及加固效果检测来进行评估和验证。

例如,对于振冲碎石桩的单桩承载力的计算,即使根据同样的碎石桩的周围土体剪切破坏破坏模式理论,目前也存在不同的经验公式计算方法。采用经验计算方法的不同,得到的计算结果也会有所区别。

又例如,对于地基的沉降变形计算,根据《建筑地基基础设计规范》<sup>[3]</sup>,地基的沉降变形数值可通过下式计算:

$$S = \Psi_s S' = \Psi_s \sum (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \times P_0 / E_{spi} \quad (1)$$

其中:  $\Psi_s$  为沉降经验系数,可通过规范中提供的经验值选取。

同时,规范中提供的平均附加应力系数  $\alpha_i$  的取值也是通过经验获取,通常可根据基础长宽数值和计算点深度的关系选取。

复合地基的压缩模量  $E_{spi}$  的计算受经验值影响的程度更加明显,  $E_{spi}$  在按公式  $E_{spi} = [1 + m(n-1)]E_{si}$  时,规范中给出的桩土应力比  $n$  的经验取值范围为 2~4,这也意味着,如果经验值  $n$  的取值出现较大差异,  $E_{spi}$  的计算结果也将出现较大区别。

由此可见,在地基沉降变形计算中,存在多个由于经验取值而带来的差异化的参数,地基沉降计算的结果也将出现一定的离散型和不确定性。

#### (2) 桩体布置和参数设计经验化特点

振冲碎石桩的桩体布置和参数设计包含处理范围确定(如非液化场地不同型式基础的处理范围,或液化场地基础外处理范围)、布桩型式确定(正三角形、正方形或矩形)以及施工工艺的设计(施工设备、填料形式和要求、施工质量控制要求)等。

振冲碎石桩的桩体布置和参数设计中也具有明显的经验化特点。

目前振冲碎石桩的处理深度多根据地质勘察报告中对土层的分布和土力学性能进行分析后初步按经验设定,再进行理论验算。在土层分布复杂,且土体土力学指标变化较大的地基中,土力学验算

存在很多不确定性,因而,所确定的处理深度是否能满足设计安全要求,需要在施工过程中的质量控制和效果检测进行评估和验证。

同时,在振冲碎石桩复合地基理论中,面积置换率是影响加固后复合地基承载力标准值的重要因素。复合地基的面积置换率的决定要素是振冲碎石桩的桩径以及桩距的大小。同样的面积置换率可通过不同的桩径和桩距的组合得以实现。

### (3) 施工工艺设计的经验化特点

施工工艺设计内容通常包含振冲器类别、功率和尺寸的选取、填料的种类和方式以及加密段和留振时间的确定等内容。目前,以上内容基本通过经验确定。

振冲器是振冲碎石桩施工的核心设备,振冲器的类别、功率以及尺寸的选择,对于振冲碎石桩的桩体性能、成桩质量等有着较大的影响。经过近百年的发展和应用,如今,振冲碎石桩施工所使用的振冲器也得到不断的发展和延伸。考虑驱动型式,振冲器主要分为电动振冲器和液压振冲器两种;按功率大小区分,功率范围从 55 kW 到 260 kW 的近 10 种的振冲器在各种不同工程中都是常见应用机型;按振冲器尺寸来分,振冲器的种类更加多样化。在实际施工中,振冲器种类的选取多根据地层的情况、施工的工期要求、场地条件以及工程市场的状况等多方面因素决定,具有明显的经验化特点。

填料种类和填料方式也是振冲碎石桩桩体性能和成桩质量的主要影响因素之一。按照目前国内的行业标准<sup>[2]</sup>,桩体材料宜采用含泥量不大于 5% 的碎石、卵石、砾石、砾(粗)砂、矿渣,或其它无腐蚀性、无污染、性能稳定的硬质材料。根据不同的振冲器功率大小,填料的粒径范围为 20~150 mm 不等。无论是从填料的成分、材质,还是从材料的粒径来看,对于同一振冲碎石桩项目来说,可选用填料的种类具有多样化特点。

在振冲碎石桩施工过程中,控制质量的施工控制参数主要有加密电流、留振时间和加密段等因素。其中,加密电流通常通过工艺试验中对填料数量的控制进行设定,现场工程技术人员的经验和人为因素对于加密电流的影响较大。同时,留振时间和加密段的设定同样根据经验,由现场技术人员确定。

可见,施工工艺的设定和选择很大程度上受施工人员经验影响,这也将给振冲碎石桩的桩体性能和成桩质量带来一定的不确定性。

## 2.3 振冲碎石桩施工质量控制节点的经验化特点

振冲碎石桩施工一般通过工艺试验制定工程桩的施工控制参数后,按所确定的施工参数和施工工艺要求进行大面积施工。由于工艺试验存在一定的局限性,以及作为隐蔽工程的振冲碎石桩施工的质量控制节点具有复杂性和经验化的特点,也给振冲碎石桩的最终地基处理效果带来一定的不确定性。

### (1) 工艺试验和施工参数确定

振冲碎石桩工程在工程桩大面积施工前,需要按要求在选取的范围内进行工艺试验。

工艺试验对于振冲碎石桩的施工质量的保障有帮助,同时也存在一定的局限性。一方面,工艺试验在局部区域进行,以此为依据制定的施工质量控制参数不能覆盖所有加固范围的土层需求,另一方面,局部区域桩体所形成的群桩效应与工程完工后所有桩体所形成群桩效应具有一定的偏差,由此检验的结果也不具有完全的代表性。工艺试验的局限性对后期施工的有效性将产生一定的影响。

### (2) 加密电流对桩体质量的影响

加密电流是控制振冲碎石桩施工质量最重要的参数之一。由于加密电流是通过在局部区域进行试验桩的工艺试验确定,在面积更为广泛的工程桩施工中,多会遇到地质情况不同的土层。如果所遇到的土层的强度比较试验桩区域的土层更高,则可能会出现与试验桩施工差异较大的表现,如填入石料更少,形成桩体直径也更小,极端情况甚至无法填入设计方案要求的最小填料量,振冲器也容易出现频繁跳闸,甚至振冲器电机烧毁的情况。如果遇到比试验桩区域更弱的土层,通常会出现填入过多石料,形成过大桩体直径,极端情况甚至会出现不能达到加密电流而无法完成制桩,制桩的质量和效率将会收到较大影响。

振冲碎石桩在强度不同的地层中“遇强则弱,遇弱则强”形成不同桩径的桩体是复合地基中柔性桩的典型特征。这种根据地层不同特性的情景化表现有利于处理后地层的力学性能趋于一致而变得更加均匀。

通常,我们在设计中所用到的复合地基置换率是接单桩直径和桩体之间的距离计算得出。由于不同地质条件的土层中桩体直径存在差异化,其中某个特定桩体的置换率将与设计理论值出现差异。在控制振冲碎石桩的施工质量和处理效果时,除了对单桩桩体的直径进行控制外,还需要对加固区域

整体的面积置换率进行控制。目前振冲施工在这方面的控制手段的不完善性,给振冲碎石桩的施工质量和处理效果带来一定的不确定性。

(3) 振冲碎石桩的隐蔽工程特点

振冲碎石桩属于典型的隐蔽工程。要确保振冲碎石桩的施工质量,需要按隐蔽工程的要求,对工程全过程进行科学管理。

然而,目前常用的施工过程控制手段难以满足以上所述的隐蔽工程科学管理的必要条件。其中最主要的原因是存在较大的人为因素影响。

2.4 振冲碎石桩施工效果检验的代表性局限

振冲碎石桩效果检验的常见方式包括静载试验、动力触探试验、静力触探试验和标准贯入试验等多种方式。其中,静载试验是检验振冲碎石桩复合地基加固效果的最常见方式。

(1) 静载试验的不同测试方式

工程中有多多种可采用的静载试验方式,包括:对单桩和桩间土分别进行压载获取各自的承载力数据,再通过复合地基承载力计算公式,由计算获得最终复合地基承载力;同时对某个桩体及其周边的桩间土进行压载并获得单桩复合地基承载力数据;以及同时对多个桩体以及群桩范围内的桩间土进行压载并获取群桩范围的复合地基承载力数据。

多种因素将会对测试的结果产生影响,如测试的时间点(考虑到振冲碎石桩复合地基的恢复期)、静载试验的方案以及群桩效果等,因此,静载试验的结果也会存在一定的局限性。

(2) 振冲碎石桩检测数量的局限性

根据国内规范<sup>[2]</sup>的要求,当使用静载试验方式对地基承载力和变形性能进行检测时,每200~400根中须抽检1根振冲碎石桩,同时监测点总数不少于3根。当使用动力触探进行桩体密实度检测时,抽检比例为工程桩总数的1%~3%,同时单项工程不少于3根。无论是静载试验还是动力触探,有限的检验的数量无法覆盖地基加固处理全部区域的处理效果。

3 振冲碎石桩的全过程质量控制

3.1 振冲碎石桩质量控制管理的现状

目前组成振冲碎石桩全工程的地质勘探、工程设计、工程施工及效果检验各个环节大多数具有单向性特点,即各工程环节大多按时间顺序,依次进行,直到工程结束。如图1所示。如前所述,由于振冲碎石桩的各个环节都存在诸多的不确定性,因

此,有必要对具有单向性特点的振冲碎石桩工程流程管理进行合理优化,以减少或消除工程质量隐患的出现的可性。

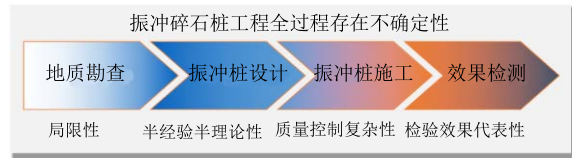


图1 振冲碎石桩工程全过程的单向性特点

Fig. 1 Unidirectional characteristics of whole process of vibro replacement stone column project

3.2 振冲碎石桩全过程质量控制流程

振冲碎石桩全过程质量控制是指对振冲碎石桩工程的各个环节(勘察、设计、施工、检测)进行动态管理,根据工程进行的实时情况各环节之间相互影响,不断优化,以达到不确定性因素较多的振冲碎石桩质量控制的要求。流程如图2所示。

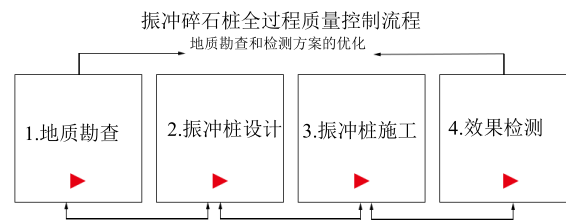


图2 振冲碎石桩全过程质量控制流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of whole process quality control process of vibro placement stone column

3.3 振冲碎石桩全过程质量控制流程的特点

(1) 全过程覆盖: 全工程质量控制流程覆盖振冲碎石桩工程中包括勘察、设计、施工、检测的所有环节。

(2) 双向性: 振冲碎石桩工程各环节具有动态特征,勘察方案、工程设计、工程施工和效果检测的实施方式和实施内容互为依据、相互影响。

(3) 可优化性: 振冲碎石桩工程各环节的方案和实施方式可根据工程实际情况不断优化、调整。

具有以上特点的振冲碎石桩工程全过程质量控制流程能最大程度的根据工程地质、工程设计和施工情形,有针对性的对工程各环节进行情景化的调整和优化,有助于消除不确定性较多的振冲碎石桩工程的质量和安全隐患。

3.4 振冲碎石桩全过程质量控制流程的实施要点

要实现振冲碎石桩的全过程质量管理,需要对工程各环节的实施要点按相关要求严格把控:

(1) 地质勘察的实施要点: 钻孔位置选取、钻孔数量、取样点和原位测试点选取、典型剖面

绘制。

(2) 工程设计的实施要点: 计算理论和经验数据的选取、桩体布置和桩体参数的设计、施工工艺设计、检测标准的确定。

(3) 工程施工的实施要点: 工艺试验方案及实施、施工参数设定和调整、施工中的土层情况分析和比较、桩位偏差控制、桩体直径控制、施工过程中质量检测 and 自检。

(4) 效果检测的实施要点: 检测位置和检测点的数量确定、检测时间、检测结果、差异化分析等。

振冲碎石桩全过程质量控制的最主要特征在于工程各环节的双向性和动态化。工程地质勘察和工程设计的任务一般在工程施工前进行, 而工程效果检验则是在工程桩完成后实施, 要实现各环节之间的互为依据和相互影响, 需要在振冲碎石桩施工过程中通过工艺试验和工程桩制桩来获取反映土层实际状况的施工过程实时数据以及相关的检测结果, 并进行分析和判断并制定相应的调整和优化方案。因此, 振冲碎石桩的施工环节成为实现有效的全过程质量控制的核心环节。

### 3.5 全过程质量控制流程中振冲碎石桩施工环节的功能延伸

在振冲碎石桩全过程质量控制流程中, 振冲碎石桩的施工流程的作用和功能得到进一步延伸。振冲碎石桩的施工目的不仅仅是按照设计方案的要求完成振冲碎石桩的制桩, 同时还需要实现以下 2 个目的:

(1) 通过专业的手段获取施工过程的实时动态数据, 更大范围的、更高密度的了解土层的特性。通过对每个桩点位置土层情况的了解, 实现分布密度更大的“勘察钻孔”的“详勘”。

(2) 通过施工过程实时数据和施工情形, 结合地勘报告和工程设计方案, 对实际成桩和理论成桩之间的差异化进行分析, 并提出对地质勘察和工程设计的优化建议方案。

## 4 振冲碎石桩全过程质量控制流程中的动态实时数据

### 4.1 振冲碎石桩制桩过程控制流程的动态化特征

振冲碎石桩制桩施工的质量控制流程示意图如图 3 所示:

振冲碎石桩制桩过程质量控制流程中, 工程施工情况的准确分析是实施全过程质量控制中双向

优化的关键节点。要实现对工程施工情况的准确分析, 需要工程施工人员获取准确的工程实时数据, 包括: 工程施工参数的实施情况、振冲器工作深度、填料数量、振冲器工作电流的变化等, 以及施工中发生的各种情形, 包括: 成孔效率、返土类别、返水情况、地层差异等, 并以此结合地勘报告、建筑物类别和安全要求以及设计方案和安全指标等进行分析 and 判断。

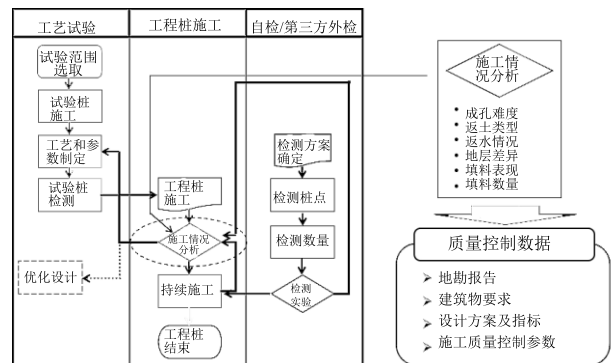


图 3 振冲碎石桩制桩施工质量控制流程示意图

Fig. 3 Construction quality control flow chart of vibro placement stone column

### 4.2 振冲碎石桩施工质量控制数据分类

按照工程的不同阶段, 振冲碎石桩施工质量控制数据主要分为以下 4 种类别:

(1) 地质数据, 包括组成地基土的土层类别和分布、天然土的力学指标、天然土的物理指标等。

(2) 建筑物数据, 包括建筑物类别、建筑物安全级别、对地基的安全要求等。

(3) 振冲碎石桩设计数据, 包括桩体基本参数、桩体布置型式和碎石桩的数量等。

(4) 施工实时数据, 包括振冲施工的耗时、工作电流、振冲器工作深度和填料数量, 施工过程中的成孔和成桩工效, 以及完成桩体的实时桩径和平均桩径等。

由于地质数据、建筑物数据和设计数据在工程实施前已获取, 因此, 获取准确的工程施工实时数据和振冲碎石桩制桩施工表现信息成为能否有效进行全过程质量控制的关键节点和核心要素。

### 4.3 振冲碎石桩工程质量控制的核心数据及其相互关系

振冲碎石桩工程质量控制的核心数据包括 5 个方面的内容:

(1) 制桩时间。通过制桩时间数据可以了解振冲碎石桩工程的施工时间、成孔效率和成桩效率, 以及土层的相对强弱情况。

(2) 振冲器实时工作深度。通过振冲器实时

工作深度数据可以监控振冲碎石桩的实时成孔位置、实时成桩位置,以及准确控制振冲碎石桩制桩的起始点和完桩点。

(3) 振冲器工作电流。通过振冲器的工作电流数据,可控制碎石桩体的加密效果,同时可监控振冲器的工作状态是否正常,保证振冲器的正常运转。此外,振冲器工作电流的变化,也可间接反映土层的强弱情况,为施工情况分析提供依据。

(4) 填料数量。通过振冲碎石桩施工中的填料数量数据,也可判断土层的软硬和强弱情况,同时也可依据此数据估算成桩的平均桩径和地基处理区域的面积置换率。

(5) 成桩的实时桩径。成桩的实时桩径指振冲碎石桩沿桩深方向,在不同位置的桩径数值。由于土层性能的不同,在同一施工质量控制参数的情形下,振冲碎石桩在不同的土层中将会出现桩径不一而表现为“葫芦”形状的变截面情况。桩体的实时桩径数据的获取,可实现有针对性判断地层情况,在施工中结合地勘报告,优化完善施工工艺,保证施工质量。也起到施工自检作用,验证施工设计方案的合理性,为设计方案的优化提供数据支持。同时,也可用于更精确地计算不同地层的面积置换率,有助于更准确的承载力和沉降计算,达到提升半理论半经验振冲法的理论化层度的目的。

振冲碎石桩工程质量控制核心参数不是独立的数据,各参数间之间、以及各参数和土层性能之间存在一定的对应关系。如图4所示。

通过核心数据的对应关系,施工人员可以较为准确地了解以下基本信息:

(1) 振冲碎石桩施工的基本信息。如:工程名称、工程地点、施工时间以及施工单位等。

(2) 连续完整的施工过程信息。如:振冲器的动作轨迹、施工全过程的振冲器工作电流随深度和时间的变化、加密段长度和留振时间、填料的时间和填料的次数,制桩的起始点和终止点等。

(3) 施工的工效。包括:振冲器在不同性能的土层各自的造孔时间、振冲器在不同性能土层的成桩时间和成桩表现等。

(4) 操作人员使用的施工工艺。能够清晰展示施工人员对振冲器的操作过程以及施工工艺的实施情况。

(5) 施工质量控制核心参数监控。能够清晰展示施工过程是否按工艺试验制定的施工质量核心参数的要求进行控制。

(6) 各土层的强弱和软硬状况。通过工作电流和施工工效的情况,可间接了解土层的强弱性能。

(7) 平均桩径和实时桩径。可在制桩的同时,展示成桩的实时桩径和平均桩径。

(8) 施工统计信息。可将各数据进行汇总和图表化,更直观的了解每个桩的施工过程和完桩信息。包括单桩统计信息、局部区域桩体统计信息和整个工程所有桩体统计信息,如施工耗时、总填料量、总桩数等。

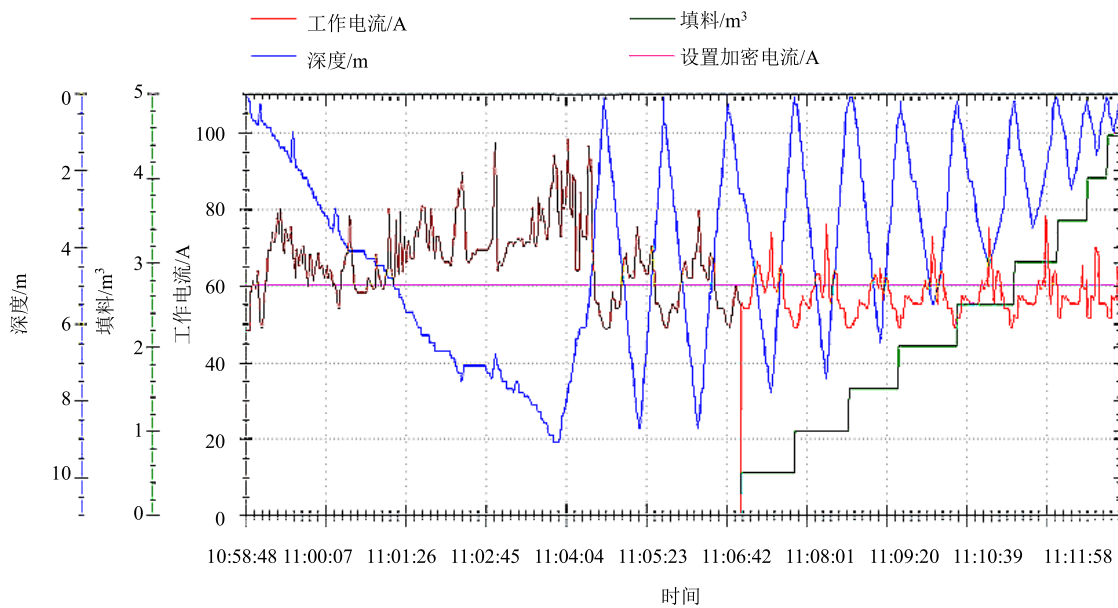


图4 振冲碎石桩制桩施工质量控制核心数据的对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship of core data of quality control in construction of vibro placement stone column

## 5 振冲碎石桩施工动态实时数据的获取手段

振冲碎石桩施工中使用智能化的振冲碎石桩质量管理监控系统取代人工方式,是施工质量、安全和获取准确连续的施工实时数据的保障和发展趋势。

### 5.1 振冲碎石桩质量管理监控系统的主要功能

振冲碎石桩质量管理监控系统的主要包含2方面功能:

#### (1) 施工操作和施工监控供能

通过振冲碎石桩质量管理监控系统实现主要施工设备的启停控制、施工设备安全操作监控、施工工艺指导以及成孔和密实监控等功能。

#### (2) 施工实时数据的获取

通过振冲碎石桩质量管理监控系统获取相对准确的过程实时数据,包括施工质量控制核心参数实时数据采集、实时动态桩形图、施工数据汇总以及报表及图像输出等。

### 5.2 振冲碎石桩质量管理监控系统的工作原理

振冲碎石桩质量管理监控系统运用现有先进的机电技术和数据采集技术,通过传感器和编码器对振冲碎石桩施工过程中的核心数据进行采集和数字化处理,以获取振冲碎石桩施工的动态实时数据。振冲碎石桩质量管理监控系统可根据工程的需要进行定制化设计。

### 5.3 振冲碎石桩质量管理监控系统的组成

振冲碎石桩质量管理监控系统由硬件部分和软件部分组成。

#### (1) 硬件组成

a) 控制终端和显示器:常见为手持终端和平板电脑。

b) 系统电气控制柜:主要包括可编程控制器单元、变频器和低压电气系统。

c) 传感器和执行器:主要包括编码器、变送器、传感器等

#### (2) 软件组成

a) 施工管理系统下位机软件:指与终端控制设备相连的控制器底层软件,用于数据采集和控制安全。

b) 绞车变频控制软件:包括进行安全和倾斜控制的超重控制提升、超轻控制下放的控制软件。

c) 施工管理系统上位机软件:包括终端控制设备(电脑或工控机)的内置软件、控制设备启停、

数据记录、GPS或北斗导航的控制器软件。

d) 碎石桩数据存取及分析软件:指用于离机分析成桩质量的软件,对施工数据进行汇总、分析和图表化处理。

## 6 工程实例

### 6.1 工程概况

本工程为东帝汶帝巴湾新集装箱码头底部填料振冲施工工程。该项目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。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。

本项目包括630 m集装箱高桩码头,350万m<sup>2</sup>疏浚,27公顷陆域吹填和18.5公顷的地基处理,其中包括总桩数为37 053根的振冲碎石桩工程。

振冲振冲碎石桩工程包含海域施工和陆域施工2部分,陆域处理的地基利用海域基床砂石料吹填而成,地基土层均匀性差,颗粒组成复杂。海域施工的施工条件不利于施工质量有效控制。同时,由于条件限制,此项目的地质勘察孔的数量有限,处理范围的地基,尤其是海域的地基情况存在较多的不确定因素,因而,此项目要求对振冲碎石桩施工的实时过程数据进行采集,以控制、保证工程的质量。

### 6.2 振冲碎石桩质量管理监控系统的应用

此项目中使用的振冲碎石桩质量管理监控系统根据工程需要进行定制化设计。系统涵盖了机、电、液、软件等相关技术领域,各功能和组成具有模块化设计特点,主要功能包括振冲施工计划导入、GPS桩机定位导航、成孔和密实自动控制、监测、信息采集、水气联动、实时动态桩形图、施工报表及曲线定制输出(后处理系统)等。本文主要以陆域施工冲碎石桩质量管理监控系统为例进行介绍。

#### (1) 系统概况

本项目中陆地振冲碎石桩质量管理监控系统硬件设备主要包括:EIPC10-E5 10.1寸工业级平板电脑、EMS-V型振冲施工管理系统控制柜(内含振冲提升绞车变频控制系统及料斗提升绞车变频控制系统)、深度传感器、压力传感器、温度变送器、电动压力调节阀、称重传感器及驾驶室绞车操

作板。

平板电脑安装在驾驶室前方, 便于吊车手的操作。振冲碎石桩质量管理监控系统的电气总控制柜和振冲器电机变频柜安装在有空调的电气室内。起重设备(桩架)平台上安装有 3 台电动调节阀, 阀后安装压力变送器, 以检测调节后的管道压力, 并以闭环控制的方式实现管道压力的自动控制。同时, 在冷却水泵出口管道上也安装压力变送器, 用来监测冷却水泵出口压力, 此压力值可用于判断冷却水循环是否通畅。为监测冷却电机后的水温, 在冷却水回水管道上安装有温度变送器。驾驶室控制板上安装无极变速手操器, 可在手动控制模式下, 控制振冲器提升绞车及料斗提升绞车的提升和下降。也可以通过手动/自动控制模式切换旋钮, 切换到自动模式, 由程序操作振冲器提升绞车及料斗提升绞车的提升和下降。

(2) 系统工作流程介绍

a) 系统使用前的准备工作

在系统使用前, 将振冲器、水泵、空压机、桩架等施工相关的设备准备好, 并确保发电机供电、水气管路、下出料控制柜、电源电压处于正常工作状态。驾驶室绞车操作面板, 绞车运行处于手动状态, 抱闸选择开关处于自动状态。同时将施工管理系统控制柜上的选择开关切换到自动位置。

b) 施工基本参数设置

电脑开机启动后, 将直接进入施工主界面, 如图 5、图 6 所示。

通过主界面的菜单, 可以对相关施工控制参数, 包括设备工作参数、石料称重参数、桩体密实参数、实时成像参数以及其它参数进行设置。以下图 7、图 8、图 9、图 10 分别为参数设置主页面、称重参数设置页面和密实参数页面以及其它参数设置页面。

c) 施工桩号选取和定位

通过主界面的菜单, 可进行施工桩号的选取并进行 GPS 桩点定位。如图 11 和图 12 所示。



图 5 质量管理监控系统启动界面

Fig. 5 Start-up interface of quality management and monitoring system

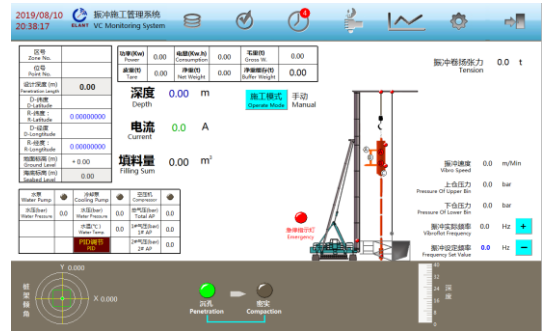


图 6 质量管理监控系统主界面

Fig. 6 Main interface of quality management and monitoring system



图 7 质量管理监控系统参数设置主页面

Fig. 7 Main page of parameter setting for quality management and monitoring system



图 8 质量管理监控系统称重参数设置页面

Fig. 8 Weighing parameter setting page of quality management and monitoring system



图 9 质量管理监控系统密实参数设置页面

Fig. 9 Compaction parameter setting page of quality management monitoring system





图 10 质量管理监控系统其它参数设置页面

Fig. 10 Other parameters setting page of quality management and monitoring system

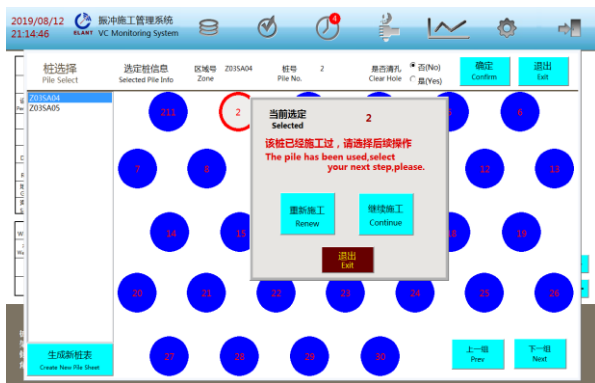


图 11 质量管理监控系统施工桩号的选取

Fig.11 Selection of construction pile number of quality management monitoring system

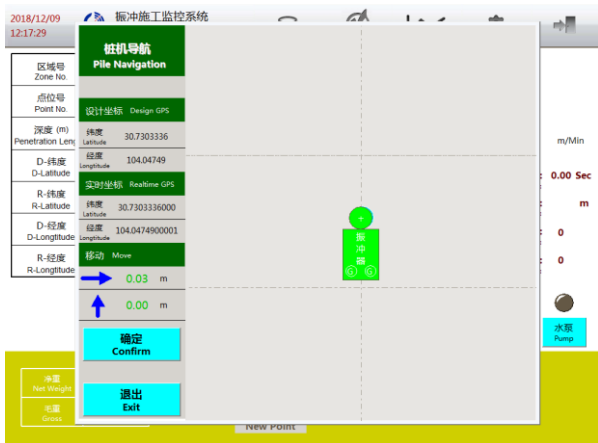


图 12 质量管理监控系统施工桩点的 GPS 定位

Fig. 12 GPS positioning of construction pile points of quality management monitoring system

d) 振冲碎石桩施工

桩点定位完成后,即可进行振冲碎石桩的施工。振冲碎石桩施工过程中,电脑屏幕将显示施工设备的工作状态和工作参数、施工过程实时参数的变化趋势以及振冲碎石桩施工的模拟动画图像,其

中,核心质量控制参数也可进行更直观的图可视化显示,如图 13、图 14 所示。

当一根振冲碎石桩施工结束后,系统将自动弹出新桩号选择界面,进行下一根桩的施工。

e) 实施数据获取

施工人员可用 USB 将施工终端电脑的数据文件导出,并进行办公室后台处理。如图 15 即为施工数据后台处理得到的施工质量控制核心参数的综合曲线图。

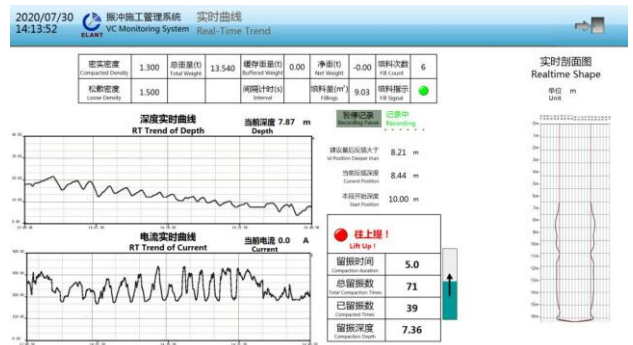


图 13 质量管理监控系统工作动态实时数据

Fig. 13 Dynamic real time data of working state of quality management and monitoring system

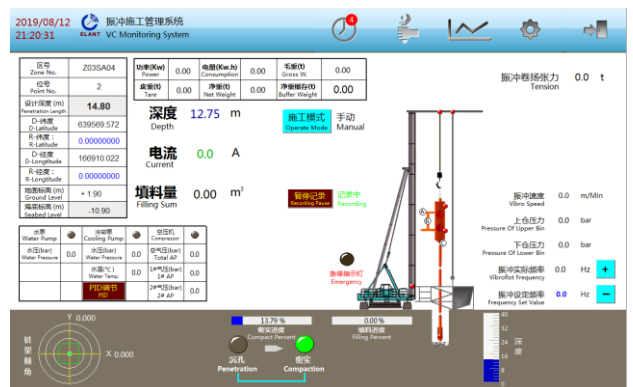


图 14 质量管理监控系统核心参数图可视化显示

Fig. 14 Graphical display of core parameters of quality management and monitoring system

6.3 振冲碎石桩质量管理监控系统应用效果

本项目中,振冲碎石桩质量管理监控系统的应用取得了良好的效果。通过此手段,施工人员能够更加高效安全的进行规范施工,并通过对所获取的实时数据的分析,施工过程中能够有针对性的对地质勘察信息和设计方案进行对比验证,并提出优化方案(振冲碎石桩桩径有 700 mm 调整为 1 000 mm,桩深也进行了部分调整)。在提高工效和施工安全性的同时,确保了振冲碎石桩的施工质量。

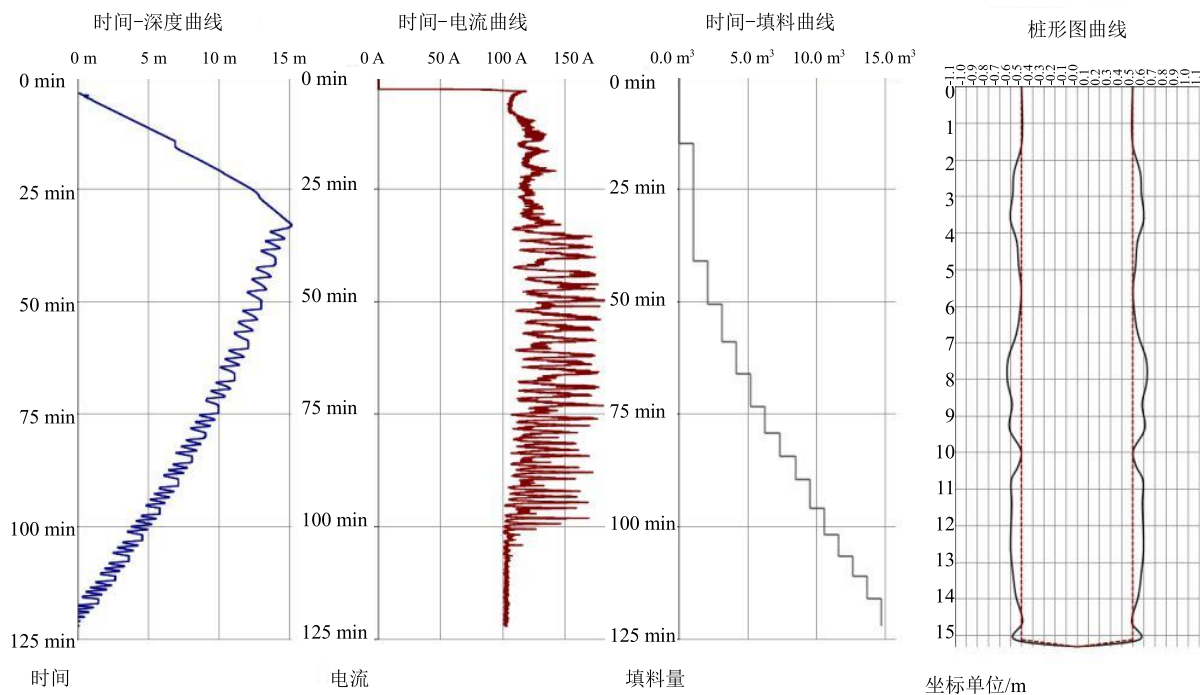


图 15 质量管理监控系统施工核心参数综合曲线图

Fig. 15 Comprehensive curve chart of construction core parameters of quality management monitoring system

## 7 总结和展望

(1) 作为岩土工程的一种施工工艺, 振冲碎石桩工程的地质勘察、工程设计、工程施工以及效果检测等过程存在出多不确定性, 要保证其工程质量, 需对全过程工程质量管理流程进行优化。

(2) 具有双向性、和可优化性特点的动态化振冲碎石桩全过程质量管理是质量保证体系的优化和升级。

(3) 振冲碎石桩的实时施工数据的获取是优化后的全过程质量管理体系实施的核心和关键。

(4) 智能化的振冲碎石桩实时施工数据的获取手段的应用是振冲行业未来的发展趋势。

## 参考文献

[1] 于洪治, 张志伟, 王文鹏, 等. 水利水电工程施工技术全书第一卷第五册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电水利工程振冲法地基处理技术规范: DL/T 5214-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

[3] 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: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[4] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.