

# 振冲碎石桩高精度数智化监测技术研究

金忠富，曲云霄，陈阳  
(中交一航局第三工程有限公司)

**摘要：**为了解决振冲碎石桩成桩过程中关键振冲参数之间匹配性困难的问题，在大连临空产业园填海造地工程地基处理试验区振冲碎石桩工艺试验过程中，通过数智化采集和计算，将成桩重要参数进行合理匹配，同时结合地基处理检测结果，形成一种系统性、符合规范要求的数智化监测技术，为单桩成桩连续性、成桩参数分析提供基础数据，结合成桩质量检测结果，优化成桩参数，进一步指导后续施工。

**关键词：**填海工程；地基处理；监测检测；效果评估

## 0 引言

振冲法是以起重机吊起振冲器，启动潜水电机带动偏心块，使振冲器产生高频振动，同时开动高压水泵，使高压水由喷嘴射出，在振冲作用下将振冲器逐渐沉入土中至设计深度。清孔后即从地面向孔内逐段填入碎石直至地面，由此在地基中构筑大直径的密实碎石桩体，形成桩体与桩间土共同工作的复合地基<sup>[1]</sup>。在振冲碎石桩成桩监测领域，由于振冲成桩中的密实电流变动极快，成桩深度、成桩电流、留振时间的匹配性很难监测，随着数智化技术的发展，目前可以通过数智化方法采集和展示数据，但没有根据规范要求进行有效的逻辑处理，达不到规范的记录要求，一直没有解决成桩关键参数之间匹配性的难题。本文介绍了一种系统性、符合规范要求的振冲碎石桩高精度数智化监测技术，可为相关工程施工提供参考。

## 1 工程概况

大连临空产业园填海造地工程直填区不进行海域清淤，通过在淤泥层上直接回填开山石形成大规模覆盖式软基(“上石下泥”形式)。开山石覆盖层下部淤泥层厚度不均，差异沉降潜在风险大，“上石下泥”地基处理难度大<sup>[2]</sup>。淤泥和淤泥质土含水率为 43.8%~62.1%，孔隙比为 1.20~1.74，压缩模量为 1.86~2.31 MPa。

为保证陆域形成地基承载力和不均匀沉降符合要求，本区域后续地基处理采用振冲碎石桩工艺，上覆回填开山石厚度约 5~15 m，下部淤泥层厚度约 8~20 m，采用 130 kW 以上大功率振冲器，

桩径 1.2 m，桩间距 2.5 m，正三角形布置，置换率 20.9%，桩长 20~30 m。振冲施工完成后，进行 300 mm 厚度碎石垫层施工并分层碾压回填料至地基处理设计标高。

## 2 主要施工方法

根据试验桩确定的施工参数进行振冲碎石桩施工。在成桩过程中，结合地质条件和设计要求，通过传感器、无线发射器、数据处理器等数智化控制系统，将振冲数据实时反馈到设备操作间，由操作人员按参数操作，保证振冲过程。振冲碎石桩施工断面示意图如图 1 所示。

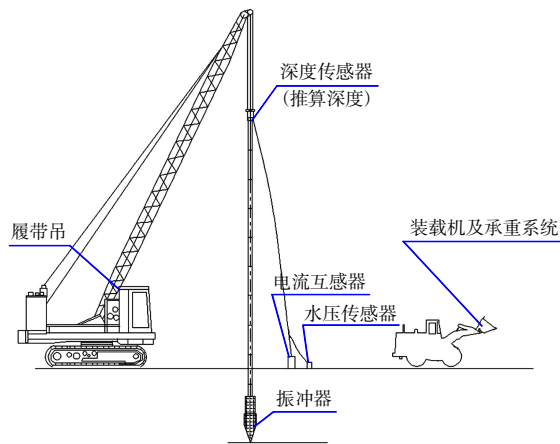


图 1 振冲碎石桩施工断面示意图

### 1) 振冲成孔

使用起重机将振冲器起吊至设置点位垂直上方，起重机缓慢将振冲器放下，在振冲成孔的过程中，应保持振冲器垂直，密切关注振冲器是否偏差，一旦发现振冲器倾斜及时调整。在振冲成

孔过程中，保持喷嘴有水流出，防止喷嘴被砂土堵住，缓慢下沉直到振冲器到达设计深度。振冲成孔完成后，继续将振冲器提出孔口，再较快地从原孔贯入 1~2 次使桩孔畅通。实施过程中，工作电流为实时获取的振冲装置振冲成孔的电流数据，通过该参数可以监控振冲器的工作状态，也可间接反映区域地层土体的强弱情况。

2) 振密成桩

采用填料装载机运料至桩孔附近，振冲器下放到设计桩基深度，然后向桩位填加石料，当振冲器达到设计规定的振密电流和留振时间后，分段提升成桩，逐段施工，重复振密成桩步骤直到

全部深度成桩密实，关闭振冲器 and 高压水泵移动到下一个桩位施工。实施过程中，通过填料量可以估算成桩的平均桩径和地基处理区域的面积置换率等，反映桩体的成桩效果<sup>[3]</sup>。

3 数智化应用架构设计

振冲碎石桩施工数智化应用过程为设备终端完成自动数据采集，系统平台通过对采集的基础数据进行分类、整合、筛选、运算等分析过程，形成可直接用于项目管理的分析结果，最终用于辅助项目决策、提供报警及预警等<sup>[4]</sup>，总体架构包含数据采集层、数据分析层、数据应用层，如图 2 所示。

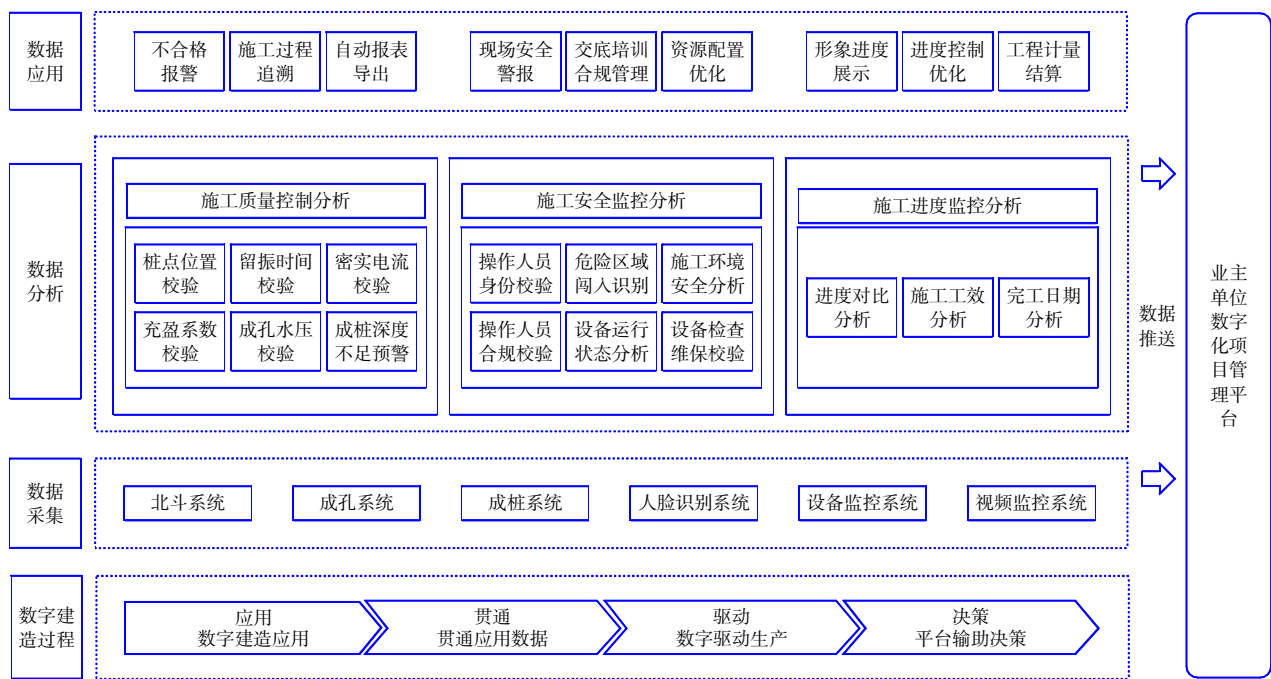


图 2 振冲碎石桩数智化施工技术应用架构

1) 数据采集层

数据采集层主要包括用于定位振冲碎石桩设备、人员、桩位等的卫星定位系统，用于测量成孔时间(时间点)、成孔深度、成孔电流、成孔水压、成桩时间、成桩深度、填料量、密实电流、留振时间、成桩水压、充盈系数等施工数据系统，用于测量料斗重量的称重系统，用于监测设备运行状态的设备监控系统。

2) 数据分析层

数据分析层主要从施工质量控制、施工安全控制和施工进度控制 3 个方向，利用数据采集层提供的数据进行分析计算，为现场管理决策提供

数据参考。主要施工数据包括留振时间校验、密实电流校验、填料量校验、充盈系数校验、设备运行状态分析、施工时间分析等。

3) 数据应用层

数据应用层主要包括成孔深度预警、桩位偏差预警、填料量不足预警、不合格桩点报警、施工过程回看及追溯、自动生成并打印报表、资源配置优化、形象进度展示等。

4 高精度监测技术

振冲碎石桩施工数智化应用过程中，针对大量监测项目数据，数据采集的全面性和数据处理的逻辑性是确保项目实施质量的关键因素，通过

数智化处理手段,形成客观的关键参数的匹配性关系,解决人工无法记录真实数据的难题(电流数据变化极快,均为隐蔽数据很难记录),为项目施工指导和理论研究提供数据基础。

#### 4.1 数据采集原则

通过数智化手段使用传感器、电流互感器、称重系统、无线数据采集仪等采集振冲过程数据。每1s采集1组数据。按照生成时间顺序,将大量监测项目数据汇总,形成可导出的监测项目原始数据库。

#### 4.2 参数处理方法

由于生成的原始数据库内数据量庞大,要制定有效数据筛选规则,依靠数智化手段,结合JTS 206—2017《水运工程地基基础施工规范》要求,将大量数据规律筛选,选取有效数据,排除不合格数据。

有效数据选取规则如下:

1) 按照生成数据的时间顺序,筛选达到设计密实电流所对应的振冲数据,小于设计密实电流的按照规范要求排除;

2) 在步骤1)筛选得到的数据基础上,筛选达到设计留振时间所对应的振冲数据,由于过程中每1s产生1组数据,会得到有效数据段。数据段同实际留振持续时间匹配,但大于设计留振时间,小于设计留振时间的按照规范要求排除;

3) 通过步骤1)、2),得到多个振冲有效数据段,每个有效数据段关键参数为时间点、成桩深度、密实电流、留振时间(有效数据段持续的时间)。

无效数据剔除原则为:剔除振冲器应反复上提的数据点,只提取桩成孔过程中工作深度依次递增的数据,对于工作深度不变的数据,仅保留振冲器起始到达点数据;剔除电流为零的工作点数据。

#### 4.3 关键参数计算

以上述得到的有效数据段为基础,以深度为基准点,计算相应深度的施工平均密实电流和实际留振时间,可以得到成桩过程每个振密深度的实际施工参数。

##### 1) 深度的确定

由于在实际施工过程中需要通过人员操作设备,留振时间内的振冲深度必然会有有一定的竖向位移,取留振时间内的平均深度为记录深度,计

算公式为:

$$H = \frac{\sum h_1 + h_2 + \cdots + h_n}{n}$$

式中:  $H$  为平均深度;  $h$  为时间点深度;  $n$  为留振时间。

##### 2) 时间点的确定

选有效数据段开始的时间。

##### 3) 留振时间的确定

由于每1s采集1组振冲数据,即留振时间为有效数据段持续的时间。

##### 4) 密实电流的确定

计算留振时间内的平均密实电流,计算公式为:

$$A = \frac{\sum a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}$$

式中:  $A$  为平均密实电流;  $a$  为时间点密实电流;  $n$  为留振时间。

通过上述步骤,每个有效数据段以深度为基准,只形成1组数据,根据此方法,重复计算其他有效数据段,由于振冲施工过程中,要求每0.3~0.5m为1个振冲密实段,所以每施工0.5m左右就会形成1组数据,完全达到规范记录要求。

上述关键参数计算以达到设计振冲密实电流和设计留振时间合格区域的深度为基准,再进一步确定此深度的实际密实电流和留振时间,实现成桩关键参数成桩深度、密实电流、留振时间之间的匹配性关系。其他参数处理方法类似,如成孔记录、成孔水压、成孔电流、成桩水压、填料记录等,数据处理方式均同上述关键参数的处理方式。

#### 4.4 参数应用

##### 1) 成桩的合格判断

根据得到的振冲记录,将相邻振密深度相减得到深度差值,通过差值判断振密过程是否满足规范要求(振密段不超过0.5m),从而监控成桩的质量。

##### 2) 参数的理论研究

通过数智化计算,形成成桩深度、密实电流、留振时间的匹配性记录,后续采用动力触探检测桩体的连续性,为成桩连续性、成桩参数、成桩地质条件变化的关联性分析提供真实、直观的研究数据(见图3),可进一步提升振冲工艺质量。

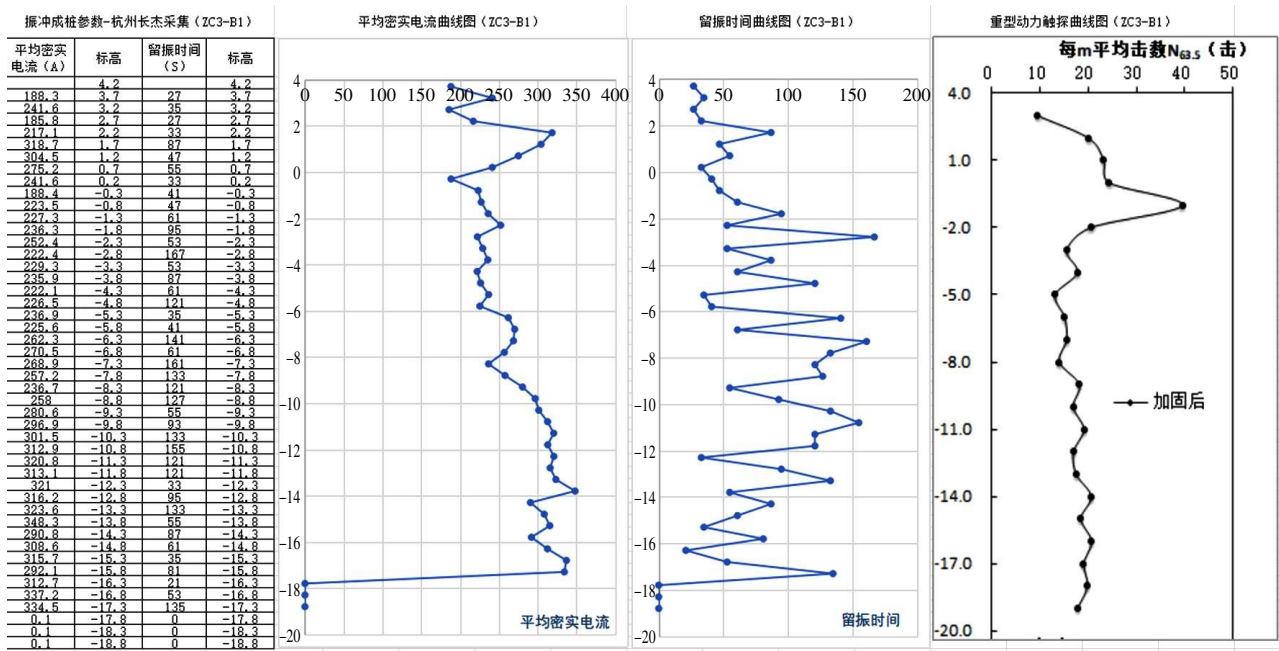


图3 成桩参数和检测结果对比示意图

5 结语

振冲碎石桩施工过程实时监控系統收集大量施工数据,对施工数据进行数智化整理、筛选,选取与地层相关的实时工作深度和关键参数进行标准化和异常值处理,建立关键参数的有效匹配性关系,可实现对成桩效果的实时研判,本高精度数智化监测技术可有效解决在振冲碎石桩施工过程中,无法通过人工记录真实数据的问题,结合《水运工程地基基础施工规范》的记录要求,本方法可将形成数据直接成表,辅助工程验收,大量降低了工作难度,明显提高了总体施工质量以及效率。

振冲碎石桩高精度数智化监测技术对后续振冲碎石桩施工参数选择、成桩质量检测分析、复合地基物理力学性质的确定,以及振冲碎石桩成桩过程数智化施工等方面都有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 龚晓南.地基处理手册[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2008.

[2] 于健,刘丹忠,林治佳,等.振冲碎石桩联合堆载预压地基处理工艺在复杂地层中的应用[J].中国港湾建设,2022,42(1):48-51.

[3] 龚晓南.复合地基理论和技术应用体系形成和发展[J].地基处理,2019,1(1):7-16.

[4] 胡贵良,魏永新,刘保柱,等.超深振冲碎石桩施工技术及应用[J].水力发电,2020,46(11):76-80.