

ICS 27.140

P 59

备案号: J426—2017



中华人民共和国电力行业标准

P

DL / T 5214 — 2016

代替 DL / T 5214 — 2005

---

# 水电水利工程振冲法地基处理 技术规范

Technical specification for vibroflotation ground treatment  
of hydroelectric and water resources projects

2016-12-05 发布

2017-05-01 实施

---

国家能源局 发布

中华人民共和国电力行业标准

# 水电水利工程振冲法地基处理技术规范

Technical specification for vibroflotation ground treatment  
of hydroelectric and water resources projects

**DL / T 5214 — 2016**

代替 DL / T 5214 — 2005

主编机构：中国电力企业联合会

批准部门：国家能源局

施行日期：2017年5月1日

中国电力出版社

**2017 北 京**

## 国家能源局

# 公 告

2016 年 第 9 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《煤层气集输设计规范》等 373 项行业标准，其中能源标准（NB）66 项、能源/石化标准（NB/SH）29 项、电力标准（DL）111 项、石油标准（SY）167 项，现予以发布。

上述标准中煤层气、生物液体燃料、电力、电器装备领域标准由中国电力出版社出版发行，煤制燃料领域标准由化学工业出版社出版发行，煤炭领域标准由煤炭工业出版社出版发行，石油天然气领域标准由石油工业出版社出版发行，石化领域标准由中国石化出版社出版发行，锅炉压力容器标准由新华出版社出版发行。

附件：行业标准目录

国家能源局

2016 年 12 月 5 日

DL / T 5214 — 2016

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
162	DL/T 5214—2016	水电水利工程振冲法地基处理技术规范	DL/T 5214—2005		2016-12-05	2017-05-01
...						



## 前 言

本规范是根据《国家能源局关于下达 2012 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2012〕83 号）的要求，对《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》DL/T 5214—2005 进行修订。

本规范在编制过程中，编制组经过广泛调查研究，认真总结实践经验，与国内相关标准协调，并在广泛征求意见的基础上进行修订。

本规范共分为 7 章，其修订的主要内容有：

- 增加了无填料振冲挤密技术的适用范围、设计规定。
- 将振冲器的适用范围从 75kW 及以下提高至 130kW 及以下。
- 增加了振冲法底部出料施工工艺。
- 增加了无填料振冲挤密施工工艺。
- 取消了振冲法地基处理深度的限值。

本规范由中国电力企业联合会提出。

本规范由电力行业水电施工标准化技术委员会归口。

本规范起草单位：北京振冲工程股份有限公司

本规范主要起草人员：于洪治 李晓力 张志伟 李庆跃  
郭双田 卢伟 姚军平

本规范主要审查人员：许松林 楚跃先 汪毅 孙来成  
肖恩尚 梅锦煜 高翔 郭光文  
林鹏 孙志禹 温彦峰 孙昌忠  
陈宏 黄中鑫 王鹏禹 吴高见  
向建 王军 钟彦祥 沈益源  
杨涛 何小雄 吴义航

本规范在执行过程中的意见和建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

## 目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	4
4	设计	5
4.1	一般规定	5
4.2	振冲桩复合地基设计	6
4.3	无填料振冲挤密设计	10
5	施工	12
5.1	一般规定	12
5.2	主要施工设备的选择	13
5.3	振冲桩施工	13
5.4	无填料振冲挤密施工	14
6	质量控制	15
7	检测与验收	16
附录 A	复合地基（单桩）载荷试验	18
附录 B	振冲法施工记录格式	20
	本规范用词说明	21
	引用标准名录	22
	附：条文说明	23

## Contents

1	General provisions .....	1
2	Terms .....	2
3	Basic requirements .....	4
4	Design .....	5
4.1	General requirement .....	5
4.2	Stone columns composite foundation design .....	6
4.3	Vibro compaction design .....	10
5	Construction .....	12
5.1	General requirement .....	12
5.2	Determination of main construction equipment .....	13
5.3	Stone columns construction .....	13
5.4	Vibro compaction construction .....	14
6	Quality control .....	15
7	Inspection and acceptance .....	16
	Appendix A Composite foundation (single column) load test .....	18
	Appendix B Vibroflotation construction record format .....	20
	Explanation of wording in this specification .....	21
	List of normative standards .....	22
	Addition:Explanation of provisions .....	23



## 1 总 则

**1.0.1** 为规范水电水利工程振冲法地基处理，特制定本规范。

**1.0.2** 本规范规定了振冲法地基处理工程的设计、施工、质量控制、检测与验收等。

**1.0.3** 本规范适用于水电水利地基处理工程，其他振冲法地基处理工程可参照使用。

**1.0.4** 振冲法地基处理应结合水电水利工程的特点，坚持因地制宜、就地取材、质量安全、保护环境和节约资源的原则。

**1.0.5** 振冲法地基处理除应符合本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 振冲法 vibroflotation method

在振冲器水平振动和高压水或辅以高压空气的共同作用下，使松散地基土层振密；或在地基土层中成孔后，回填性能稳定的硬质粗颗粒材料，经振密形成增强体（振冲桩），增强体和周围地基土形成复合地基的处理方法。

### 2.0.2 振冲复合地基 vibro-composite ground; vibro-composite foundation

振冲法地基处理所形成的复合地基。

### 2.0.3 振冲复合土体 vibro-treated composite soil

振冲法地基处理后的振密土体或增强体与周围地基土组成的等效土体。

### 2.0.4 现场试验 in-situ tests

在建设场地工程地质条件有代表性的区域进行的振冲法试验性施工及质量检验，为振冲法地基处理方案提供设计依据。

### 2.0.5 工艺试验 process trial

工程施工前，为进一步确定合理的施工工艺所进行的振冲法试验性施工。

### 2.0.6 面积置换率 replacement rate

复合地基中增强体的面积与其控制范围面积的比值。

### 2.0.7 桩土应力比 stress ratio

复合地基中增强体与其周围地基土所承担应力的比值。

### 2.0.8 平均桩径 equivalent column diameter

在复合地基深度范围内，增强体的直径按相应土层厚度的加权平均计算值。

**2.0.9 加密电流 compaction current**

振密土体或填料制桩过程中，振冲器电机需达到的设计电流值。

**2.0.10 加密段长度 compacting cycle increment**

振冲器振密土体或填料制桩的段次长度。

**2.0.11 留振时间 compaction time**

振密土体或填料制桩过程中，振冲器电机维持加密电流所持续的时间。

**2.0.12 无填料振冲挤密 vibro-compaction**

对于振密效果显著的砂土地基，采用振动密实或以原地层土体作为孔内填料的地基振冲处理方法。

### 3 基本规定

**3.0.1** 采用振冲法地基处理技术，应根据建设场地工程地质条件和建（构）筑物对地基的要求进行技术可行性和经济合理性论证。

**3.0.2** 振冲法地基处理适用于以下范围：

1 各类可液化土的抗液化处理。

2 碎石土、砂土、粉土、黏性土、人工填土，以及湿陷性土等地基的加固处理。

3 无填料振冲挤密法适用于黏粒含量不大于10%的砂土地基。

**3.0.3** 对于不排水抗剪强度小于20kPa的淤泥、淤泥质土及该类土的人工填土等地基，应通过现场试验确定其适用性。

**3.0.4** 选定采用振冲法地基处理时，应制定详细的试验方案，对振冲法的处理深度和范围进行论证，并按建（构）筑物级别有区别地进行现场试验。

**3.0.5** 振冲复合地基设计应满足建（构）筑物承载力、变形、地基稳定性及抗震等要求。

**3.0.6** 施工前，应进行工艺试验。

**3.0.7** 地基经振冲法处理后，应对建（构）筑物从施工阶段开始进行沉降观测。



## 4 设 计

### 4.1 一 般 规 定

#### 4.1.1 设计所需基本资料:

1 建设场地岩土工程勘察报告、钻孔剖面图及土的物理力学性质指标等。

2 工程等别、建（构）筑物级别、基础形式、建（构）筑物荷载及抗震设防等级。

3 复合地基承载力、沉降量以及抗剪强度指标的设计要求等。

4.1.2 采用振冲法地基处理的设计划分应按《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180 的规定执行。

1 1 级、2 级建（构）筑物应通过复合地基载荷试验确定。

2 3 级及 3 级以下的建（构）筑物宜采用单桩载荷试验和桩间土试验结果按公式计算确定，也可采用工程类比法确定。

#### 4.1.3 现场试验应符合下列要求:

1 应选择在建设场地工程地质条件有代表性的区域进行。

2 试验数量不少于 3 点。

3 土的物理力学性质指标测试应符合《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287 和《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

#### 4.1.4 地基处理范围设计应符合下列要求:

1 处理深度应满足建（构）筑物对地基承载力、变形和稳定性等的要求。对于可液化地基，处理深度应符合《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《水电工程水工建筑物抗震设计规范》NB 35047

的有关规定。

2 抗滑稳定性处理深度应超过最危险滑动面不少于 2.0m，地基处理范围按稳定性计算结果确定。

3 当按下卧层承载力确定处理深度时，尚应进行下卧层承载力的验算。

4 对于可液化地基，在基础外缘扩大处理宽度不小于基础底面下可液化土层厚度的 1/2，且不宜小于 5m。

## 4.2 振冲桩复合地基设计

4.2.1 复合地基承载力特征值按下述方法确定：

1 通过复合地基载荷试验确定，试验方法见附录 A。

2 根据单桩和桩间土的试验成果按下列公式计算确定，单桩载荷试验方法见附录 A：

$$f_{\text{spk}} = m f_{\text{pk}} + (1 - m) f_{\text{sk}} \quad (4.2.1-1)$$

$$m = \frac{d_0^2}{d_e^2} \quad (4.2.1-2)$$

式中： $f_{\text{spk}}$ ——复合地基承载力特征值（kPa）；

$f_{\text{pk}}$ ——桩体承载力特征值（kPa）；

$f_{\text{sk}}$ ——桩间土承载力特征值（kPa），对于非可加密土，取其天然地基承载力特征值；对于可加密土，取其加密后的地基承载力特征值；

$m$ ——面积置换率；

$d_0$ ——桩长范围内的平均桩径（m）；

$d_e$ ——单桩等效影响圆直径（m），等边三角形布桩， $d_e = 1.05s$ ；正方形布桩， $d_e = 1.13s$ ；矩形布桩， $d_e = 1.13\sqrt{s_1 s_2}$ 。其中， $s$ 、 $s_1$ 、 $s_2$  分别为桩的间距、纵向间距、横向间距，单位为 m。

3 对于 3 级及 3 级以下的建（构）筑物，当无载荷试验资料时，可按下式计算确定：

$$f_{\text{spk}} = [1 + m(n-1)] f_{\text{sk}} \quad (4.2.1-3)$$

式中： $n$ ——桩土应力比，无实测资料时取 2~4，桩间土强度低时取大值，高时取小值。

#### 4.2.2 复合地基承载力特征值应按下式进行埋深修正：

$$f_{\text{spa}} = f_{\text{spk}} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (4.2.2-1)$$

式中： $f_{\text{spa}}$ ——修正后的复合地基承载力特征值（kPa）；

$f_{\text{spk}}$ ——复合地基承载力特征值，按本规范第 4.2.1 条确定（kPa）；

$\eta_d$ ——基础埋深的地基承载力修正系数，根据基底土类别按经验值确定，淤泥和淤泥质土、人工填土  $\eta_d = 1.0$ ，孔隙比  $e$  及液性指数  $I_L$  均小于 0.85 的黏性土  $\eta_d = 1.3$ ，粉砂、细砂、粉土  $\eta_d = 1.5$ ，中砂、粗砂、砾砂及碎石土  $\eta_d = 2.0$ ；

$\gamma_m$ ——基础底面以上土的加权平均重度（kN/m<sup>3</sup>），地下水位以下取浮重度；

$d$ ——基础埋深（m），在填方整平地区，可自填土地面标高算起，但填土在上部结构施工后完成时，应从天然地面标高算起。

#### 4.2.3 复合地基变形计算按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定执行，复合土层的分层与天然地基相同。

##### 1 压缩模量可按下列方法确定：

##### 1) 复合土体的压缩模量按下式计算确定：

$$E_{\text{spi}} = \xi E_{\text{si}} \quad (4.2.3-1)$$

$$\xi = \frac{f_{\text{spk}}}{f_{\text{ak}}} \quad (4.2.3-2)$$

式中： $E_{\text{spi}}$ ——第  $i$  层复合土体的压缩模量（MPa）；

$E_{\text{si}}$ ——第  $i$  层桩间土的压缩模量（MPa）；

$\xi$ ——复合土体的压缩模量提高系数；

$f_{\text{spk}}$ ——复合地基承载力特征值 (kPa)；

$f_{\text{ak}}$ ——基础底面下桩间土天然地基承载力特征值 (kPa)。

- 2) 对于 3 级及 3 级以下的建(构)筑物，当无载荷试验资料时，可按下式计算确定：

$$E_{\text{spi}} = [1+m(n-1)] E_{\text{si}} \quad (4.2.3-3)$$

- 2 复合土体的变形模量可按下列方法确定：

- 1) 通过复合地基载荷试验确定。

- 2) 通过单桩和桩间土载荷试验按下式计算确定：

$$E_{\text{opi}} = mE_{\text{pi}} + (1-m) E_{\text{oi}} \quad (4.2.3-4)$$

式中： $E_{\text{opi}}$ ——第  $i$  层振冲复合土体的变形模量 (MPa)；

$E_{\text{pi}}$ ——第  $i$  层桩体的变形模量 (MPa)；

$E_{\text{oi}}$ ——第  $i$  层桩间土的变形模量 (MPa)。

- 3) 当现场仅做桩或桩间土载荷试验时，可按下列公式计算确定：

$$E_{\text{opi}} = [1+m(n-1)] E_{\text{pi}}/n \quad (4.2.3-5)$$

$$E_{\text{opi}} = [1+m(n-1)] E_{\text{oi}} \quad (4.2.3-6)$$

**4.2.4** 振冲复合地基稳定性计算按 GB 50007 及《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 的有关规定执行。振冲复合土体的抗剪强度指标可按下列方法确定：

- 1 通过复合地基现场直接剪切试验确定。

- 2 无现场试验资料时，可按下列公式计算确定：

$$\tan \phi_{\text{sp}} = m\mu_{\text{p}} \tan \phi_{\text{p}} + (1-m\mu_{\text{p}}) \tan \phi_{\text{s}} \quad (4.2.4-1)$$

$$c_{\text{sp}} = (1-m\mu_{\text{p}}) c_{\text{s}} \quad (4.2.4-2)$$

$$\mu_{\text{p}} = \frac{n}{1+m(n-1)} \quad (4.2.4-3)$$

式中： $\phi_{\text{sp}}$ ——振冲复合土体的等效内摩擦角 (°)；

$\phi_{\text{p}}$ ——桩体材料的内摩擦角 (°)；

$\phi_s$ ——桩间土体内摩擦角 ( $^{\circ}$ ), 非可加密土取原值, 可加密土取挤密后的值;

$\mu_p$ ——应力集中系数;

$c_{sp}$ ——振冲复合土体的等效黏聚力 (kPa);

$c_s$ ——桩间土黏聚力 (kPa)。

#### 4.2.5 布桩范围应按下述原则确定:

1 土石坝(堤)体及坝(堤)基, 按变形和稳定性计算分析结果确定其布桩范围。

2 建筑物的箱形基础、筏形基础在基础范围内布桩, 并根据原地基土质情况, 在基础外缘宜设置 1 排~2 排护桩。

3 建筑物的独立基础、条形基础应在基础范围内布桩, 当基础外为软黏土、松散回填土或基础位于不利地形条件(如沟、塘、斜坡边缘)时, 宜在基础范围外设置 1 排~2 排护桩。

#### 4.2.6 布桩形式按下列原则确定:

1 对大面积坝(堤)基、箱基、筏基等, 可采用三角形、正方形、矩形布桩。

2 对条形基础, 可沿基础的中心线布桩, 当单排桩不能满足设计要求时, 可采用多排布桩。

3 对独立基础, 可采用三角形、正方形、矩形或混合形布桩。

#### 4.2.7 桩间距按下列原则确定:

1 根据复合地基的设计要求, 通过现场试验或按计算确定。

2 30kW 振冲器布桩间距宜为 1.2m~2.0m, 75kW 振冲器布桩间距宜为 1.5m~3.0m, 130kW 振冲器布桩间距宜为 2.0m~3.5m, 130kW 以上振冲器布桩间距应通过现场试验确定。

4.2.8 振冲桩桩长宜超过设计有效桩顶高程 1.0m~1.5m, 当超高不足时, 应在振冲施工后对基底土层及有效桩体顶部做密实处理。

4.2.9 振冲桩复合地基顶部应铺设 0.2m~0.5m 厚的密实砂石

垫层。

**4.2.10** 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，或其他无腐蚀性、无污染、性能稳定的硬质材料。对于 30kW 振冲器，材料粒径宜为 20mm~100mm；对于 75kW 以上振冲器，材料粒径宜为 20mm~150mm；采用底部出料法施工时，材料粒径宜为 8mm~50mm。

**4.2.11** 桩体平均桩径根据下式计算确定：

$$d_0 = 2\sqrt{\eta V_m / \pi} \quad (4.2.11-1)$$

式中： $\eta$ ——密实系数，一般为 0.7~0.8；

$V_m$ ——每延米桩体平均填料量（ $\text{m}^3/\text{m}$ ）。

**4.2.12** 加密电流、留振时间、加密段长度应通过现场试验和工艺试验确定。

### 4.3 无填料振冲挤密设计

**4.3.1** 无填料振冲挤密留振时间、加密段长度、挤密遍数等设计参数应根据现场试验结果确定。

**4.3.2** 无填料振冲挤密复合地基承载力计算、变形计算、稳定性分析，按 GB 50007 及 DL/T 5395 的有关规定执行。

**4.3.3** 根据地基砂土类别、拟采用的振冲器性能指标、单头或多头振冲施工工艺、振冲布点方式与间距等影响因素，综合确定现场试验设计方案。

**4.3.4** 无填料振冲挤密设计应明确采用的振冲器的性能、施工工艺、布点方式与间距等，以及建（构）筑物设计的其他技术要求。

**4.3.5** 对于功率不大于 75kW 的振冲器，布点间距宜为 2.0m~3.5m；对于 75kW 以上的振冲器，布点间距宜为 2.5m~4.5m；粉细砂地基布点间距宜取小值，随着砂土粒径的增大，布点间距可逐步增大。

**4.3.6** 布点方式宜为正三角形。

**4.3.7** 无填料振冲挤密地基沉陷量宜为地基振冲处理深度的5%~10%。

**4.3.8** 无填料振冲挤密施工后,应对地基表层 1.0m~1.5m 厚的松散土层进行密实处理。

## 5 施 工

### 5.1 一 般 规 定

**5.1.1** 施工准备工作包括下列内容：

- 1 设计技术交底。
- 2 施工场地具备“三通一平”条件，水源、电源应接至施工现场 50m 以内。
- 3 查清施工场地范围内的地上、地下设施及障碍物，制定相应的施工处理措施。
- 4 熟悉与分析施工场地地质资料。
- 5 了解现场试验的资料和检测成果。
- 6 配备相应性能的振冲器和配套机具设备。
- 7 编制施工组织设计。
- 8 根据建（构）筑物坐标控制点测放桩位。
- 9 陆域施工场地宜划分若干区域，分区设置土埂或排浆地沟，保证泥浆及时排放，满足环保要求。
- 10 水上施工时，应设置稳定的水上作业和维修工作平台。

**5.1.2** 现场工艺试验应在护桩或建（构）筑物非重要部位进行，单项工程工艺试验桩数不少于 3 根（点）。

**5.1.3** 施工顺序可选用排打、跳打或围打。

**5.1.4** 振冲器电流超过额定值时，宜暂停或减缓振冲器的贯入或填料速度。

**5.1.5** 施工过程中每 1.0m~2.0m 应记录电流、水压（气压）、时间、填料量。振冲法施工记录格式见附录 B。

**5.1.6** 施工中发现串桩，可对被串桩重新加密或在其旁边补桩。



## 5.2 主要施工设备的选择

**5.2.1** 振冲器的选择应根据地基处理设计要求、土的性质以及施工工艺，通过现场试验确定。

**5.2.2** 起吊设备的性能指标应满足振冲器贯入到设计深度的要求。

**5.2.3** 孔口填料宜选用装载机或挖掘机，其斗容根据填料强度确定。

**5.2.4** 供水泵扬程不宜小于 80m，流量不宜小于  $15\text{m}^3/\text{h}$ 。

**5.2.5** 泥浆泵应满足排浆距离和排浆量的要求。

**5.2.6** 底部出料提升料斗的斗容与提升速度应满足连续施工的要求。

## 5.3 振冲桩施工

**5.3.1** 造孔应符合以下要求：

1 振冲器开孔允许偏差不大于 100mm。

2 造孔速度不宜超过  $2.0\text{m}/\text{min}$ 。

3 造孔深度不浅于设计处理深度  $0.3\text{m}\sim 0.5\text{m}$ 。

4 造孔过程中，应保持振冲器处于悬垂状态，发现桩孔偏斜应立即纠正。

5 孔口填料施工时，造孔水压宜控制在  $0.3\text{MPa}\sim 0.8\text{MPa}$ 。

6 孔口填料施工时，造孔返出泥浆过稠或存在桩孔缩颈现象，宜进行清孔。

7 底部出料施工时，造孔气压、水压应根据地质条件确定，且满足施工要求。

8 底部出料施工时，造孔前料管与料斗宜装满填料。

**5.3.2** 填料加密应符合以下要求：

1 孔口填料施工时，填料方式可采用强迫填料法、连续填料法或间断填料法。大功率振冲器宜采用强迫填料法，深孔宜采用连续填料法；在桩长小于 6m 且孔壁稳定时，可采用间断填料法。

2 桩体加密控制标准应符合下列规定：

1) 桩体加密应从桩底标高开始，加密段长度不宜超过

0.5m，逐段向上进行，中间不得漏振。

- 2) 填料量与设计要求相差较大时，应及时研究解决。
- 3) 孔口填料施工时，若采用加密电流、留振时间、加密段长度作为控制标准，则填料量为参考值。
- 4) 孔口填料施工时，加密水压宜控制在 0.1MPa~0.5MPa。
- 5) 底部出料施工时，采用填料量、加密段长度作为控制标准，加密电流、留振时间为参考值。
- 6) 底部出料施工时，加密过程中提升速度不大于 1.5m/min。
- 7) 底部出料施工时，加密气压宜根据处理深度、土体条件、地下水位高度确定。

#### 5.4 无填料振冲挤密施工

**5.4.1** 单（多）头施工工艺根据地层条件、处理深度等进行选择。

**5.4.2** 施工前、后应对场地标高进行测量。

**5.4.3** 造孔应符合下列规定：

- 1 振冲器开孔允许偏差不大于 100mm。
- 2 造孔过程中，应保持振冲器处于悬垂状态，发现桩孔偏斜应立即纠正。
- 3 造孔水压应根据地质条件确定，且满足施工要求。
- 4 造孔速度不宜超过 6.0m/min。
- 5 造孔深度满足设计要求。

**5.4.4** 加密控制标准应符合下列规定：

- 1 采用留振时间、加密段长度作为控制标准，加密电流为参考值。
- 2 加密应从设计底标高开始，逐段向上进行，中间不得漏振。
- 3 留振时间应满足设计要求。
- 4 加密段长度不宜大于 0.5m。

**5.4.5** 当地质条件发生变化或施工出现异常情况时，应及时研究解决。

## 6 质 量 控 制

**6.0.1** 施工过程应进行施工质量控制与监测，做好各项施工记录。当处理效果达不到设计要求时，应及时会同设计单位及有关部门研究解决。

**6.0.2** 按设计要求，选择符合标准、性能稳定的振冲器及电气控制系统。

**6.0.3** 加密电流和留振时间应采用自动控制系统控制，并及时检查其准确性。

**6.0.4** 振冲器的导杆应有明显的深度标志。

**6.0.5** 桩（点）位标识应明显、牢固，施工过程中应注意复核，保证其准确度。

**6.0.6** 填料应经过质量检验方可使用。填料宜按  $2000\text{m}^3 \sim 5000\text{m}^3$  送检一组试样进行质量检验，不足  $2000\text{m}^3$  时按一批次送检。填料的粒径、含泥量及强度等指标应符合设计要求。

## 7 检测与验收

**7.0.1** 振冲施工结束后，根据设计要求和地基处理目的，应对桩的数量、桩径、桩位偏差、桩体密度、桩间土处理效果、复合地基承载力及变形模量等进行检测与验收。

**7.0.2** 检测试验应在振冲施工结束并达到恢复期后进行，砂土恢复期不少于 7d，粉土恢复期不少于 15d，黏性土恢复期不少于 30d。

**7.0.3** 桩位允许偏差应符合下列规定：

- 1 大面积满堂布桩，桩位允许偏差为  $d_0/4$ 。
- 2 条形基础布桩，桩位允许偏差为  $d_0/5$ 。
- 3 柱基础布桩，边缘桩位允许偏差为  $d_0/5$ ，柱基内部桩位允许偏差  $d_0/4$ 。

**7.0.4** 桩体密实度宜采用重型或超重型动力触探试验进行检测。检测数量根据工程重要性和工程地质条件的复杂性确定，宜为总桩数的 1%~3%，单项工程不少于 3 根，触探平均击数应达到设计要求。

**7.0.5** 桩间土处理效果宜采用标准贯入试验、静力触探等原位测试方法，室内土工试验等方法进行检测，土工试验按《土工试验方法标准》GB/T 50123 和《水电水利工程土工试验规程》DL/T 5355 的有关规定执行。

**7.0.6** 复合地基承载力的检测应符合下列规定：

- 1 1 级、2 级建（构）筑物应采用复合地基载荷试验。
- 2 3 级及 3 级以下建（构）筑物宜采用复合地基载荷试验或单桩、桩间土载荷试验进行检测，也可结合当地情况采用其他原位测试方法综合评定。

**7.0.7** 载荷试验检测点应按下列原则布置：

- 1 具有代表性和均匀性。
- 2 布置在建（构）筑物的重要部位。
- 3 布置在不同工程地质条件的代表性区域、施工过程中出现异常的地段。

**7.0.8** 载荷试验检测点数量应为每 200 根~400 根桩抽检 1 点，且检测点的总数不得少于 3 点。

**7.0.9** 无填料振冲挤密处理的砂土地基，施工质量检验可采用标准贯入、静力触探、重型动力触探及载荷试验等。检测点应均匀布置，并考虑地质条件的代表性区域或施工过程中出现异常的地段。检测点数量宜取振冲点数量的 0.5%~1.0%，总数不应少于 3 点。

**7.0.10** 振冲法地基处理工程，应在检测试验后，根据工程大小及工程需要进行分阶段、分单元或一次性验收。

**7.0.11** 竣工验收时应具备下列文件和资料：

- 1 岩土工程勘察资料。
- 2 工程设计文件、设计变更等。
- 3 施工记录、施工大事记。
- 4 材料试验、施工质量自检及评定记录。
- 5 施工质量缺陷记录、缺陷分析及处理结果。
- 6 竣工报告及竣工图纸。
- 7 工程监理报告。
- 8 工程质量检测报告。
- 9 其他有关资料。

## 附录 A 复合地基（单桩）载荷试验

**A.0.1** 本试验要点适用于单桩复合地基载荷试验、多桩复合地基载荷试验和单桩载荷试验。

**A.0.2** 复合地基载荷试验和单桩载荷试验分别用于测定承压板下应力主要影响范围内复合土层和桩体的承载力及变形参数。单桩复合地基载荷试验的承压板可采用圆形或方形，面积为一根桩所承担的处理面积；多桩复合地基载荷试验的承压板可采用方形或矩形，其尺寸按实际桩数所承担的处理面积确定；单桩载荷试验的承压板可采用圆形，其面积与桩的截面面积相等。荷载作用点、承压板的中心应与桩的中心（或形心）保持一致。

**A.0.3** 承压板底标高宜与基础设计底标高相同。承压板底面下应铺设 200mm 厚的碎石垫层并加中粗砂找平层。试验标高处的试坑长度和宽度，应不小于承压板尺寸的 3 倍。

**A.0.4** 试验前应采取措施将地下水降至荷载板以下 0.5m。防止试验场地地基土扰动，以免影响试验结果。严禁在周围存在振动干扰的情况下进行试验。

**A.0.5** 加载与分级：荷载宜按等量分级施加。加载等级可分为 8 级～12 级。复合地基载荷试验的最大加载压力不应小于设计要求值的 2.0 倍。单桩载荷试验的最大加载压力不应小于设计要求值的 2.5 倍。

**A.0.6** 沉降观测时间：每加一级荷载后，第一小时内按间隔 10、10、10、15、15min 各测计一次沉降量，以后每隔 30min 读计一次沉降量，直至沉降量达到相对稳定标准。

**A.0.7** 相对稳定标准：每小时沉降量小于下列规定值时，即可加下一级荷载：

- 1 单桩试验时，相对稳定标准取 0.1mm/h。

2 复合地基静载荷试验时,对软黏土地基,可根据经验适当放大相对稳定标准,其他均取 0.1mm/h。

**A.0.8** 试验前应进行预加载,预载量宜为上覆土自重。

**A.0.9** 当出现下列现象之一时,可终止试验:

- 1 沉降急剧增大或承压板周围的土明显地侧向挤出。
- 2 承压板的累计沉降量已大于其宽度或直径的 6%。
- 3 达不到极限荷载,而复合地基、单桩载荷试验的最大加载压力已分别大于设计要求压力值的 2.0 倍和 2.5 倍。

当满足前两种情况之一时,其对应的前一级荷载定为极限荷载。

**A.0.10** 卸载级数可为加载级数的一半,等量进行。每卸一级,间隔 30min 读记回弹量;待卸完全部荷载后,间隔 3h 读记总回弹量。

**A.0.11** 复合地基或单桩承载力特征值的确定:

1 当压力—沉降曲线上极限荷载能确定,而其值不小于对应比例界限的 2.0 倍时,可取比例界限;当其值小于对应比例界限的 2.0 倍时,可取极限荷载的一半。

2 当压力—沉降曲线为平缓的光滑曲线时,按相对变形值确定:

- 1) 相对变形值等于承压板沉降量与承压板宽度或直径(当承压板宽度或直径大于 2.0m 时,可按 2.0m 计算)的比值。
- 2) 当地基土以黏性土、粉土为主时,可取相对变形值等于 0.015 所对应的压力;当地基土以砂土为主时,可取相对变形值等于 0.01 所对应的压力。
- 3) 对有经验的地区,也可按当地经验确定相对变形值。
- 4) 按相对变形值确定的承载力特征值不应大于最大加载压力的一半。

**A.0.12** 试验点的数量不应少于 3 点,当实测值的极差不超过其平均值的 30%时,可取其平均值作为相应的复合地基或单桩承载力特征值。

## 附录 B 振冲法施工记录格式

表 B kW 振冲法施工记录表

[illegible]

施工队长:

起吊设备操作员:

记录员:



## 本规范用词说明

**1** 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1)** 表示很严格,非这样做不可的:  
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- 2)** 表示严格,在正常情况下均应这样做的:  
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- 3)** 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:  
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- 4)** 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 《土工试验方法标准》GB/T 50123
- 《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287
- 《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180
- 《水电水利工程土工试验规程》DL/T 5355
- 《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395
- 《水电工程水工建筑物抗震设计规范》NB 35047

中华人民共和国电力行业标准

水电水利工程振冲法地基处理

技 术 规 范

**DL/T 5214—2016**

代替 DL/T 5214—2005

条 文 说 明



## 修 订 说 明

本规范是根据《国家能源局关于下达 2012 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2012〕83 号）的要求，对《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》DL/T 5214—2005（以下简称原规范）进行修订。

本规范共分 7 章，主要技术内容包括总则、术语、基本规定、设计、施工、质量控制、检测与验收。

随着我国基础设施建设的发展，无填料振冲挤密技术得到了较为广泛的应用，特别是在海南省大隆水库、上海洋山港、河北曹妃甸等大型工程中的成功应用，积累了大量的实践经验。本次修订将无填料振冲挤密技术的适用范围由原来的中、粗砂拓展到黏粒含量较少的粉细砂地基，节省了大量的原材料，取得了节能减排、保护环境的显著效果。在总结工程经验的基础上，本规范增加了无填料振冲挤密技术的设计与施工内容。

近年来，振冲法地基处理技术，如振冲器机具、施工工艺、复合地基检测技术等都有较快的发展。随着制造业的快速发展，我国已生产出 100、130、180kW 等大功率电动振冲器，性能稳定的 75kW 以上大功率振冲器在许多大型工程中得到了广泛应用，积累了大量的工程经验。机械制造水平的提高促进了振冲技术的发展。考虑到 130kW 以上振冲器的工程应用、实践经验所限，以及机械性能稳定性方面还需要完善，为慎重起见，本次修订将振冲器的适用范围从 75kW 提高至 130kW 及以下。130kW 以上大功率振冲器应用的设计与施工可参照本规范，并通过试验确定其适用性。

振冲法底部出料施工工艺主要适用于具有特殊技术要求的深厚软土地基，可以有效解决深层软土地基因缩颈及其负压所产生

的填料问题。为适应软土地基处理技术的市场需求，国内积累了一定数量的工程经验，特别是振冲法底部出料技术在超级工程——港珠澳大桥海上人工岛地基处理项目中的成功应用，使得施工技术得到了进一步的完善。本次修订增加了振冲法底部出料施工技术的相关内容。

原规范规定振冲法施工处理深度不超过 20m 是受当时起吊机具及施工难度的限制。振冲法地基处理深度的限值主要取决于起吊设备的起重能力、振冲器造孔能力，以及配套附属设备的综合能力。近年来，振冲法地基处理深度超过 20m 的工程已有很多案例，如三峡工程二期围堰深水风化砂填筑工程振冲处理深度 30m，云南普渡河鲁基厂水电站坝基振冲法处理最大深度 32.6m，田湾河仁宗海水库电站堆石坝基淤泥质壤土振冲碎石桩工程振冲法处理最大深度 28.5m，港珠澳大桥香港口岸填海工程项目中采用干法底部出料振冲技术处理最大有效深度达 35m。目前，国外振冲法施工最大深度已接近 70m。国内采用振冲法单一工艺施工最大深度达 35m，如果采用引孔辅助工艺措施，则施工深度取决于引孔能力及其振冲设备的改造水平。因此，本次修订取消了原规范 20m 的振冲法地基处理深度的限值。

本规范是在总结近年来水电水利工程实践经验的基础上修订而成的。在规范编制过程中，编制组经过广泛调查研究，认真总结实践经验，与国内相关标准协调，并在广泛征求意见的基础上，同时参考国内外振冲技术的最新发展水平，最终通过审查定稿。

## 目 次

1	总则 .....	27
3	基本规定 .....	29
4	设计 .....	31
4.1	一般规定 .....	31
4.2	振冲桩复合地基设计 .....	32
4.3	无填料振冲挤密设计 .....	36
5	施工 .....	38
5.1	一般规定 .....	38
5.2	主要施工设备的选择 .....	39
5.3	振冲桩施工 .....	41
5.4	无填料振冲挤密施工 .....	43
6	质量控制 .....	45
7	检测与验收 .....	46

# 1 总 则

**1.0.1** 振冲法是国内应用较普遍和有效的地基处理方法。采用振冲法地基处理技术，可以达到提高地基承载力、减小建（构）筑物地基沉降量、提高土石坝（堤）体及地基的稳定性、消除地基液化的目的。在总结经验的基础上，为了更好地指导工程实践，编制适用于水电水利工程特点的振冲法地基处理技术规范，使设计、施工、检测与验收等具有科学性、实用性和可操作性，做到技术标准化，达到安全、经济及确保工程质量的目的。为规范振冲法地基处理技术在水电水利工程中的应用，特制定本规范。

**1.0.2** 本规范主要针对水电水利工程振冲法地基处理技术作出规定。根据水电水利工程规模大、工程地质条件复杂等特点，在修订过程中，结合近年来国内外振冲技术和施工设备的发展状况，既吸取了其他工程的建设经验，又体现了水电水利工程的特点和重要性。本规范规定了水电水利振冲法地基处理工程的设计、施工、质量控制、检测与验收等。

**1.0.3** 水电水利系统是我国较早引进振冲法地基处理技术的行业之一。许多大、中、小型水电水利工程采用振冲法地基处理技术后，获得了很好的经济效益和社会效益。在水电水利工程中应用振冲法地基处理技术，除了可以处理水工建（构）筑物（坝、堤、闸等）的地基外，还可以对已建成的土石坝（堤）体、围堰进行加固处理。例如，云南松华坝主坝后坡玄武岩风化碎石土松散坝壳、山东牟山水库松散坝体、重庆万州水库坝体等采用振冲法提高坝体的密实度，为大坝加高、水库扩容、水库坝体的安全性奠定了基础。振冲法也是提高土石坝（堤）体及地基稳定性的有效方法之一，如云南南盘江盘虹桥河堤多次滑坡段采用振冲法处理



后，有效地保证了河堤的抗滑稳定。本规范适用于水电水利振冲法地基处理工程，其他行业振冲处理工程可参照使用。

**1.0.4** 由于岩土工程的复杂性，地基处理技术仍处于半经验和半理论的状态。因此，振冲法地基处理应结合水电水利工程的特点，综合分析场地工程地质和水文地质条件、建（构）筑物各种特征、施工条件、材料情况等边界状况，在保证质量、安全适用、保护环境和节约资源等原则下，因地制宜、就地取材，积极采用新技术、新设备、新工艺、新材料。

**1.0.5** 本规范在体现水电水利工程特点的基础上，修订过程中尊重现行相关标准并与之协调。因此，振冲法地基处理除应符合本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

### 3 基 本 规 定

**3.0.1** 振冲法地基处理技术与其他地基处理技术一样，有其适用范围。当建（构）筑物对地基的要求和地基工程地质条件符合振冲法适用条件时，才能发挥其技术优势，获得良好的经济效益。因此，采用振冲法时，应对建（构）筑物的使用功能、建设场地工程地质条件进行研究，对采用振冲法地基处理技术的可行性与经济合理性作出评价。

**3.0.2** 振冲法原则上适用于各类地基土的加固处理。振冲法在碎石土、砂土、粉土、黏性土、人工填土，以及湿陷性土地基处理工程中均得到了广泛应用。振冲法对砂土具有良好的挤密作用，是消除地基液化的有效方法，并在国内外，特别是日本多次地震后的工程实例中得到验证。

无填料振冲挤密技术在海南大隆水库坝基加固、上海洋山港粉细砂地基处理、河北曹妃甸吹填粉细砂地基处理等大型工程中得到了成功的应用，借助于国内设备能力的提高和采用多点同时挤密的施工工艺，拓展了无填料振冲挤密技术的适用范围。实践证明，无填料振冲挤密技术在黏粒含量不大于 10% 的砂土地基中有其适用性；对于粒径级配接近粉土的粉砂地层，应通过试验确定其适用性。

**3.0.3** 对于不排水抗剪强度小于 20kPa 的软黏土，采用振冲法处理在国内已有成功实例，如天津塘沽长芦盐场氯化镁车间软黏土地基不排水十字板抗剪强度仅为 16.1kPa，港珠澳大桥海上人工岛项目海底淤泥层不排水抗剪强度甚至低至 10kPa，振冲法处理均获得成功，但存在填料量大、不易成桩、后期沉降较大等问题，故本条规定小于 20kPa 的软黏土应通过试验确定其适用性。

**3.0.4** 当初步选定采用振冲法地基处理方案时，应对建（构）筑物场地地基处理的必要性和可行性进行充分论证，并通过调查研究，对有关地基处理方案进行技术经济比较，推荐出两个或若干个技术可靠、经济合理的地基处理方案进行优化论证。

**3.0.6** 工艺试验是在工程桩施工前进行，为进一步确定合理的施工工艺所进行的试验性施工制桩。水电水利工程地基处理工程量较大、地质条件复杂，且存在多个施工单位参与施工、施工机具存在差异等情况，同时为了调试机具设备、协调具体操作与各项工序的关系，使之适应地层条件，保证施工质量满足设计要求，地基处理施工前，应进行工艺试验。试验区域的选定应充分考虑其工程地质条件的代表性。试验区数量和试验施工工程量可根据工程地质条件的复杂程度，按工程要求确定。

**3.0.7** 由于复合地基压缩性指标的计算和取值具有一定的经验性，沉降计算结果与实际沉降值间存在一定的误差，因此本规范要求从建（构）筑物的施工阶段开始进行沉降观测，记录地基沉降的速率和发展趋势，当出现异常情况时，应及时分析原因，采取必要的处理措施。地基沉降值稳定后，观测结束。

## 4 设 计

### 4.1 一 般 规 定

**4.1.1** 建设场地的地质资料、建（构）筑物对地基处理的要求，是评价采用振冲法地基处理方案是否合理、可靠的重要依据。无上述资料，不得进行振冲法地基处理的方案设计。

**4.1.2** 振冲法的方案设计目前处在半理论半经验状态，理论方面有待于进一步完善，某些设计参数尚需要凭经验确定。

振冲法地基处理的效果直接与建设场地地基土类别和性质、振冲器性能、施工工艺及施工技术参数有关。因此，本条根据《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180 中关于建（构）筑物级别对设计参数的确定作了具体规定，推荐采用现场载荷试验确定地基土的加密效果、复合地基承载力和变形模量，从而确定合理的施工技术参数和施工工艺等。

考虑小型或级别较低工程的工程量少、工期短和建（构）筑物的重要性等因素，在有经验的基础上可以通过工程类比进行设计，但应通过施工前的试验施工对设计方案予以优化、修正、补充和完善。

**4.1.3** 地基土类别和性质是影响振冲法地基处理效果的主要因素之一。在场地工程地质条件存在较大差异的情况下，为了掌握不同工程地质条件下的地基处理效果，现场试验应分别在工程地质条件有代表性的区域进行。

为确保现场试验数据统计分析结果的有效性，本规范规定现场试验点的数量不少于 3 点。

**4.1.4** 振冲法地基处理的深度应同时满足建（构）筑物对地基承

载力和变形的要求。设计计算时，一般按承载力要求计算布桩，按变形要求进行校核验算。

对于以稳定性为主要控制指标的工程，在实际工程中由于滑动面位置不易准确判定，为安全起见，处理深度应超过最危险滑动面不少于 2.0m，地基处理范围按最危险滑动面的分布情况由计算确定。

## 4.2 振冲桩复合地基设计

**4.2.1** 大量试验资料表明，根据单桩和桩间土的载荷试验成果，按式（4.2.1-1）计算得到的复合地基承载力要比由复合地基载荷试验确定的承载力稍低。其主要原因是单桩载荷试验桩的周围无超载或不能反映群桩效应等。因此，依据单桩载荷试验确定单桩承载力后，按式（4.2.1-1）计算复合地基承载力是安全的。

复合地基（单桩）载荷试验遵照附录 A 的规定执行。

桩间土承载力特征值可采用载荷试验或其他原位测试法、公式算法、结合当地工程实践经验等方法综合确定。

对于 3 级及 3 级以下的建（构）筑物，当无载荷试验资料时，可采用式（4.2.1-3）计算确定。对于黏性土，桩间土可以取天然地基的承载力；对于可加密土，由于经振冲挤密后，桩间土承载力可有明显的提高，振冲桩施工后，松散的粉砂、细砂、中粗砂地基的承载力特征值可以分别提高到 150、200、250kPa，故桩间土应取其加密后的承载力值。通过总结多项工程静载荷试验检测结果得出，实测的桩土应力比  $n$  多为 2~6。考虑到我国不同区域建设场地工程地质条件的复杂性，建议桩土应力比取 2~4；对有足够经验积累的地区，可根据经验取值。

**4.2.2** 修正后的复合地基承载力特征值，对基础宽度地基承载力修正系数取零是为了考虑安全储备，一般意见比较一致，按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的相关条文执行。但对于基础埋深地基承载力修正系数的取值则意见不一。本规范提出基础埋深

地基承载力修正系数主要考虑以下因素：

地基承载力深度修正的主要原因是基础周围上覆土产生的超载使土的被动土压力增大。

经振冲处理后的复合地基等效土体内摩擦角均明显大于天然地基，复合土体的综合抗剪强度指标得到显著提高。

使用阶段复合地基的弹塑性区将主要集中在振冲加固区域。

因此，按原地基土类别进行修正是可行的。但由于目前无对比试验，为安全起见，沿用原规范的取值，并提出对孔隙比  $e$  及液性指数  $I_L$  均小于 0.85 的黏性土，基础埋深的地基承载力修正系数  $\eta_d$  取 1.3。

**4.2.3** 复合地基变形计算按 GB 50007 的相关规定执行，复合土体的压缩模量提高系数采用下式确定：

$$\xi = \frac{f_{\text{spk}}}{f_{\text{ak}}} \quad (4-1)$$

在持力层厚度较大、地基沉降量主要发生在持力层范围内的条件下，采用单一复合土体的压缩模量提高系数  $\xi$  值比较合理；当下卧层产生的沉降量较大时，可根据具体地层条件分层考虑复合土体压缩模量的提高程度。

**4.2.4** 对于有条件或者有特殊要求的工程，复合地基的抗剪强度指标可根据设计要求，通过现场大型直接剪切试验确定。

无现场试验条件或者初步估算时，也可按复合地基抗剪强度指标计算。式（4.2.4-2）和式（4.2.4-3）考虑了复合地基在剪应力作用下桩体剪应力的集中效应，在概念上较为合理。工程应用结果表明，采用上述公式进行土体的稳定分析计算是安全可靠的。对于砂土地基，应考虑经振冲挤密后桩间土内摩擦角改善提高的因素。

当无实测资料时，一般碎石桩体的内摩擦角可取  $35^\circ \sim 45^\circ$ 。

**4.2.5** 对于土石坝（堤）体及坝（堤）基加固工程，应按相应的

变形和稳定要求，通过计算确定振冲法地基处理范围。

箱形基础、筏形基础基础边缘桩体的受力条件较差，宜在外缘设置护桩，以提高桩体的侧向约束力。护桩间距、设计深度可根据地质条件、基底反力等因素适当调整。

国内大量的工程实例表明，对于建筑物条形基础、独立基础的地基处理工程，采用振冲法处理时可不设护桩，使用仍安全可靠。因此，一般对条形基础、独立基础，可只在基础范围内部布桩。

对于可液化地基，在基础外缘扩大处理宽度不小于基础底面下可液化土厚度的  $1/2$ ，且不宜小于  $5.0\text{m}$ 。基础外缘扩大处理宽度应按振冲施工的有效影响范围考虑。振冲施工影响范围与砂土类别、振冲器的功率相关，随着砂土粒径增大、振冲器功率提高，影响范围随之增大。经验表明，振冲施工有效影响半径可达  $2.0\text{m}\sim 3.0\text{m}$ 。

**4.2.6** 振冲桩常采用等边三角形布置。由于振冲器在土中传播的振动能量与距离的平方成反比，因此加固效果随距离增加而快速衰减。为了与邻近振冲点的加密范围重合，一般采用等边三角形布桩效果最佳，但根据基础形式和需要，对条形基础或面积较小的基础，可采用正方形、矩形或等腰三角形布置。

用等效影响圆计算地基的置换率只适用于大面积满堂地基处理。对于条形基础或独立基础，置换率等于基础底面积范围内桩体横截面面积之和与相应基础底面积的比值。

**4.2.7** 本条根据大量的工程经验资料给出了常用桩间距的参考范围，最小间距以不串桩为原则。串桩是指已制成桩的填料进入正在施工的振冲孔中，造成原桩体的破坏。发生串桩时应及时处理，一般可采用对被破坏桩重新加密的处理方法，重新加密的深度应超过串桩深度。串桩与桩间距、地基土类别有关。一般在黏性土、中（粗）砂土层中串桩较少，在砂质粉土和粉细砂土层中易发生串桩现象。本条规定的最小桩间距的限值仅适用于以黏性土和中

(粗)砂等为主的不易发生液化的土层。为鼓励技术进步与创新,在安全可靠的基础上,规定 130kW 以上振冲器的布桩间距应通过现场试验确定。

**4.2.8** 为使基底以下有效桩顶范围内的桩体得到充分振密,达到桩体密实度要求,振冲施工时有效桩顶标高以上应留有一定厚度的土层。采用的振冲器功率小时取小值,振冲器功率大时取大值。当有效桩顶标高以上土层厚度小于 1.0m~1.5m 时,振冲施工后应对基底土层进行密实处理。

**4.2.9** 桩顶砂石垫层一方面是用来调整桩和桩间土的应力和变形协调,发挥桩间土的承载力;另一方面可与桩体构成桩间土的排水通道,加速桩间土的固结,提高桩间土后期强度,故本条规定应设置垫层。当桩间土强度低、桩土应力比大时,垫层厚度取大值;桩间土强度高、桩土应力比小时,垫层厚度取小值。根据工程需要,当对垫层有特殊要求时,可参照有关标准执行。

**4.2.10** 桩体材料的选择应坚持就地取材的原则。振冲法施工用填料量很大,规定的填料级配在实际施工中很难实现。依据大量工程实践经验,本条提出了当采用碎石作为填料时不同型号振冲器的填料粒径范围。对于卵石等磨圆度较好的材料,可以通过试验适当提高材料粒径的上限值。对于通过送料管孔中深部填料施工工艺,应以确保填料过程顺利通畅为原则选择填料粒径。有特殊要求的工程,填料按设计要求选定。

**4.2.11** 密实系数是松散填料干密度与桩体干密度的比值。有条件时,密实系数宜通过现场测试桩体干密度确定;无现场试验资料时,取松散填料干密度  $1.4\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 、桩体干密度  $1.8\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$  进行换算,一般可取 0.7~0.8。

**4.2.12** 由于地基土类别、物理力学性质和施工机具性能不同,应通过工艺试验并结合现场试验结果确定适当的施工技术参数,以使桩体质量满足密实度、桩径等设计要求。

对于振冲桩工程,一般情况下,加密电流宜在原空载电流的



基础上提高 20A~40A，留振时间宜为 8s~15s，加密段长度宜为 200mm~500mm。特殊条件下，可结合设计要求根据现场试验结果确定。

### 4.3 无填料振冲挤密设计

**4.3.1** 由于地基土类别、物理力学性质和施工机具性能不同，应通过现场试验并结合工艺试验结果确定适当的施工技术参数，以达到地基处理的设计要求。

**4.3.2** 复合地基承载力计算、变形计算、稳定性分析按 GB 50007 和《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395 中评价天然土层的规定执行，其参数按无填料振冲挤密施工完成后检测试验结果取值。

**4.3.3~4.3.5** 初步设计应根据地基土的类别，给出试验期间建议的振冲器性能、施工工艺、布点方式及间距等要求，最终根据现场的试验结果确定。

早在 20 世纪中叶，国外就已经有了大规模的多头无填料振冲挤密施工方法的工程应用实例。著名的埃及阿斯旺大坝吹填砂地基处理工程中采用了 6 头振冲施工工艺，每次振冲挤密达到  $96\text{m}^2$ ，地基处理效果显著。

根据曹妃甸地区、洋山港等项目施工数据的对比，采用多头振冲处理的效果好于单头振冲的处理效果。因此，建议在有条件的情况下，宜优先采用多头振冲工艺，以提高处理效果，并且可以在一定程度上提高施工工效。处理深度在 15m 以内，宜选择 3 头及以上；处理深度在 20m 以内；可选择双头，处理深度在 20m 以上，可选择单头振冲挤密施工工艺。

无填料振冲挤密布点的间距取决于振冲器的性能与土层的参数。通过总结广东飞来峡水利枢纽、上海洋山港、河北唐山港曹妃甸、吉林哈达山水利枢纽工程土坝基础处理，以及海南大隆水库坝基处理等大型工程的实践经验，结合阿联酋棕榈岛、世界岛等国际大型地基处理工程的资料，砂土地基振冲挤密设计布点间

距可以采用 2.0m~4.5m。对于粉细砂地基，布点间距宜取小值，随着砂土粒径增大，布点间距可逐步增大。

**4.3.6** 对于多头振冲挤密技术，布点方式宜采用正三角形，以最大限度地发挥多头共同作用对地基土的叠加挤密效应，达到最佳的地基处理效果。

**4.3.7** 无填料振冲挤密地基沉陷量可根据原土层孔隙比、处理后的土层孔隙比及设计要求进行估算。依据大量的工程实践经验，无填料振冲挤密地基沉陷量为地基振冲处理深度的 5%~10%；当振冲挤密沉陷量过大时，应分析原因，避免因施工水压过大造成孔口过量返砂，从而产生过大的无效地表沉陷。

采用振冲挤密工艺处理新近吹填粉细砂土地基的沉陷量较大。无填料振冲挤密设计应适当考虑地表标高的预抬量。

**4.3.8** 为使基底以下有效桩顶范围内的桩体得到充分振密，振冲施工时有效桩顶标高以上应留有一定厚度的土层。通常情况下，振冲挤密法用于大面积的地基处理工程中，预留覆盖土层有一定的难度，因此在无填料振冲挤密施工后，应对地基表层 1.0m~1.5m 厚的松散土层进行密实处理。

## 5 施 工

### 5.1 一 般 规 定

**5.1.1** 做好施工准备工作是保证工程顺利进行的必要条件。

**1** 技术交底内容包括：设计要求，如建（构）筑物的使用功能、振冲法处理目的、桩位布置图、桩长、桩径、基础埋置深度、加固后的复合地基承载力和压缩模量等；施工技术参数，如加密电流、留振时间、加密段长度、填料数量和水压等。

**3~5** 振冲法处理地基的效果与工程地质条件密切相关，设计单位提供的施工技术参数适用于地基内有代表性的土质，不一定适合施工场地所有土质。因此，施工前应尽可能收集施工场地详细的地质资料，如地质剖面图、土的物理力学性质指标、水文地质条件等，通过整理分析，用来指导施工。

**7** 施工组织设计应根据设计要求、工程地质条件、场地情况、工程其他要求编写，主要内容如下：

- 1) 工程概况；
- 2) 工程地质条件；
- 3) 施工工艺及技术参数；
- 4) 施工进度计划；
- 5) 施工机械设备计划；
- 6) 施工管理组织机构及劳动力计划；
- 7) 施工质量管理体系或措施；
- 8) 安全生产、文明施工、节能环保等措施。

**8** 为保证施工桩位的准确性，施工单位应对建（构）筑物的坐标控制点进行复核，经复核无误后方可使用；控制轴线由施工

单位测放时，应编写相应的测量成果报告，经监理单位（建设单位）复核批准后方可进行下一步的测量工作。

**10** 水上施工时，为保证施工安全与工效，应建立稳定的作业平台及维修平台。

此外，施工用水量、电容量应满足施工要求。一般单台机组功率：30kW 振冲器为 60kW，75kW 振冲器为 120kW，130kW 振冲器为 200kW 以上；电压应保持  $(380 \pm 20)$  V。单台机组的供水用水量不小于  $15\text{m}^3/\text{h}$ ，水泵供水压力不宜小于 0.8MPa。

**5.1.2** 工艺试验的目的：调试施工机具，确定并优化施工工艺；验证施工技术参数的处理效果；通过试验施工成果，确认或调整施工工艺和施工技术参数。

鉴于工程地质条件的复杂性，即使施工前做过现场试验，但由于施工机具性能的差异性，以及场地存在的特殊地质条件等因素，对地基处理结果均可能产生一定程度的影响，因此要求正式施工前每台施工机组都应进行工艺试验。

**5.1.3** 振冲桩的施工顺序如下：

排打：由一端开始，依次制桩到另一端结束。

跳打：隔排或隔孔制桩。

围打：先制外围桩，逐步向内施工。对于以消除地基液化为主的工程，可优先选用围打。

同一施工场地可以采用不同打法或混合打法。

## 5.2 主要施工设备的选择

**5.2.1** 目前国内电动振冲器的电机功率分别为 13、30、45、55、75、100、130、180kW。其中，13kW 振冲器国内已经很少使用，55kW 振冲器虽有生产，但用于工程实践相对较少，75、130kW 振冲器应用最为广泛。国内虽然已研制生产出 180kW 及以上更大功率的振冲器并已经应用于工程实践，但相应的工程实例及相关经验还需要一定的积累过程。国内施工常用振冲器的功率为

30、75、100、130kW。

液压驱动可调频振冲器最初是从欧洲引进的，目前国内已有厂家研制成功并具备生产条件。液压振冲器较电动振冲器具有更强的施工造孔能力和穿透力，适用于处理含有砂卵石层或坚硬土层的地基，主要用于疑难项目的地基处理工程。例如，在云南普渡河、四川向家坝等含砂卵石层，以及海南大隆水库局部区域的地基处理工程中，液压振冲器均得到了成功应用。但是，由于应用范围与市场需求的限制，液压振冲器的应用实例较少。

国内常用电动振冲器的技术参数见表 5-1。

表 5-1 国内常用电动振冲器的技术参数

电机 额定功率 (kW)	额定电流 (A)	转速 (r/min)	振幅 (mm)	振动力 (kN)	质量 (t)	振冲器 外径 (mm)	振冲器 长度 (mm)
30	65	1450	4.2~6.4	100	1.38	375	1954
45	98	1450	4.2~6.4	100	1.5	375	2008
55	118	1450	4.2~6.4	120	1.6	375	2017
75	158	1450	12~14	160	2.5	426	2710
100	206	1450	12~15	180	2.55	426	2810
130	267	1450	14~16	200	2.81	426	2922

**5.2.2** 采用汽车式起重机施工比较方便、灵活，工效较高。30kW 振冲器（6m 以内孔深）可选用 8t 汽车式起重机，75kW 振冲器宜选用 16t 汽车式起重机，25t~30t 汽车式起重机可满足 20m 以内孔深施工。20m~30m 孔深宜选用 30t 及以上的汽车式起重机。此外，起吊设备还可选用履带式起重机或桩机架等。

**5.2.3** 振冲法施工要求填料数量大且集中，一般宜选用 0.5m<sup>3</sup>~2.0m<sup>3</sup> 装载机填料。水上施工可采用挖掘机或输送带上料。

### 5.3 振 冲 桩 施 工

#### 5.3.1 造孔施工要求:

2 造孔是保证施工质量的首要条件。造孔速度取决于地层条件、振冲器类型、造孔水压等,因此造孔速度无法完全人为控制。本规范仅控制造孔的最大速度。造孔速度过快不利于成孔,甚至影响加密。根据工程实践经验,造孔的最大速度一般控制在不大于 2.0m/min 为宜。造孔中出现孔位偏斜时应查明原因,采取纠偏措施。遇土质软硬不同时,宜将振冲器偏土质硬的一侧对准,偏移量通过现场施工调整;也可在土质软的一侧倒入填料,减少偏斜。造孔过程中应控制振冲器导杆的垂直度,发现倾斜应随时调整。

3 造孔深度不浅于设计处理深度 0.3m~0.5m,仅对造孔而言。目的是为了防止高压水对设计处理深度以下地基土的扰动破坏。填料加密时振冲器应从设计桩底标高开始,即加密深度与设计深度相符合。

6 孔口填料施工时,当地基中存在黏性土层时,一般需要采取清孔措施,以降低孔口返浆的稠度,从而提高成孔质量。清孔是指将振冲器提至孔口或在需要清理的孔段上下提拉,使振冲器在孔内顺直通畅,以利填料加密。

7 底部出料施工工艺主要适用于深厚的软土地基。由于深厚软土层中容易出现因缩颈、孔内负压等造成填料难以下落到预定深度的问题,因此,采用通过送料管将填料直接送至深部孔中的措施,确保填料过程通畅。

底部出料须配备料斗和送料管,并采用科学合理的方式与振冲器连接。为保证造孔质量,施工中可以根据地质条件增加气压、水压等工艺措施。

#### 5.3.2 填料加密施工要求:

加密是振冲法施工的关键工序,为保证施工质量,应按加密

电流、留振时间、加密段长度实施多指标综合控制。加密电流是指填料加密过程中振冲器电机达到的设计电流值。由于不同振冲器的机械性能存在一定差别，相应电机的空载电流值可能不完全一致，因此在施工中宜根据不同振冲器的空载电流对设计加密电流值做适当的增减，有利于降低不同机组施工效果的差异性。

留振时间是指振冲器达到加密电流值后连续持续的时间。在规定留振时间内，电流值应大于或等于加密电流值。

加密段长度是指前一次加密段结束位置与本次加密段结束位置之间的距离。一般要求施工加密段长度应不大于设计加密段长度。

当加密标准采用加密电流、留振时间和加密段长度三个指标控制时，填料数量将随之被自然确定，不宜将其作为加密质量控制的主要标准。因天然地基各土层的物理力学性质指标存在差异，所以振冲碎石桩在各土层中的填料量随之出现一定的离散性，其结果有利于提高场地地基的均匀性，减小地基的不均匀沉降。填料数量反映了土的特性，当填料量与规定要求数量有较大差距时，可调整施工技术参数，必要时应会同业主、设计、监理等相单位共同研究解决，确保施工质量。

**1 孔口填料施工的填料方法**可分为强迫填料法、连续填料法、间断填料法三种。工程施工中可根据实际情况选用，也可在施工过程中根据需要几种填料方法组合运用。

**强迫填料法：**利用振冲器的自重和振动力将孔上部的填料挟带到孔下部的填料方法。该方法适用于孔内下料不畅的情况。由于振冲器挟带填料向下贯入，电机负荷比较大，特别要保证振冲器在填料满孔的情况下能向下贯入，要求振冲器电机的额定电流远大于加密电流，否则振冲器上提后再次向下贯入时，可能出现潜水电机的电流超过额定电流而不能贯入到预计位置的问题，而导致桩体漏振。因此，强迫填料一般适用于大功率振冲器施工。

**连续填料法：**在制桩过程中振冲器留在孔内，连续向孔内填

料，直至充满振冲孔为止。该法适用于填料入孔通畅及机械填料作业。

**间断填料法：**填料时振冲器提出孔口，倒入一定量的石料（一般为  $0.2\text{m}^3 \sim 0.3\text{m}^3$ ）后，再将振冲器贯入孔中振捣的填料方法。该方法适用于人工手推车填料作业。由于每次要把振冲器提出孔口，深孔施工效率低，设备运行也不安全，因此间断填料法一般用于浅孔。随着施工机械的普及，间断填料法已经很少采用。

**2 桩体加密控制标准：**加密是振冲法施工的关键工序，为保证施工质量，应按加密电流、留振时间、加密段长度实施多指标综合控制。

- 3) 由于地基处理深度范围内各土层的工程性质存在差异，因此，不同土层中单位桩长的填料量不一定相同。对于孔口填料施工，采用加密电流、留振时间、加密段长度作为控制标准时，填料量为参考值则更为科学合理。
- 5) 底部出料施工一般用于深厚的软土地层，在制桩加密时采用填料量和加密段长度作为控制标准。
- 6) 为保证形成的桩体均匀、连续，加密过程中提升速度不大于  $1.5\text{m/min}$ ，防止出现“断桩”或者“缩颈桩”等质量问题。
- 7) 在需要辅以气压完成送料的情况下，施加的气压应不小于孔外水头压力。气压大小应适合，过小不能有效辅助施工，过大会破坏软土原有结构。

## 5.4 无填料振冲挤密施工

**5.4.1** 在一定的地质条件下，多头比单头振冲施工的挤密效果显著，施工效率更高。单（多）头施工工艺的选择应结合地层条件、地基处理深度、施工操作能力等因素综合考虑确定。在造孔过程顺畅、设备起吊能力及其稳定性可靠的条件下，地基处理深度在



15m 以内可选择 3 头及以上, 20m 以内可选择双头, 超过 20m 宜选择单头施工。

**5.4.2** 无填料振冲挤密施工后, 因砂土的振密作用会产生一定的地基沉陷量, 地表会塌陷沉降, 对施工前、后标高进行测量, 有利于从地基塌陷的沉降量评估施工效果, 同时有利于准确计量工程量。振冲挤密施工的工程量应按施工前场地标高计量。

**5.4.3~5.4.4** 振冲挤密施工过程分为造孔和挤密两个步骤, 造孔过程中振冲器贯入速度不宜大于 6.0m/min。造孔水压应根据地质条件确定, 以孔口不过量返砂为原则, 且满足施工要求。

对于拟处理的砂土地基, 在振冲器振动荷载的作用下, 地基土体的抗剪强度将暂时出现较大幅度的降低, 甚至处于液化状态。因此, 对于易发生液化的粉细砂地基, 振冲挤密施工一般以留振时间、加密段长度作为主要的质量控制标准; 对于中粗砂地基, 则可结合具体情况, 以留振时间、加密电流、加密段长度作为质量控制标准。

振冲挤密施工加密段长度应根据现场试验确定, 一般不宜大于 0.5m。

由于土的饱和状态是砂土地基液化的必要条件, 因此, 在地下水位以上的砂层施工过程中, 应适当增加振冲器的出水量或者事先对地基辅以灌水, 以提高振冲挤密的施工质量。

**5.4.5** 当地质条件出现异常情况, 特别是当地基中出现不适用于振冲挤密施工的局部粉土、黏性土、淤泥或细颗粒土夹层时, 应及时研究, 采取局部填料等辅助措施。

## 6 质 量 控 制

**6.0.1** 地基处理是一项隐蔽工程，工程地质条件具有复杂性和随机性，存在施工队伍操作水平、施工边界条件等的差异性，导致施工质量具有一定的离散性。因此，振冲工程应有详细的施工技术措施和质量管理体系，强化质量监督与检验，做好施工记录，使工程具有一定的可追溯性。当施工质量达不到设计要求时，应及时会同设计单位及有关部门分析原因，提出解决办法。

现场试验仅在地层条件有代表性的区域进行，由于通常情况下施工场区工程地质条件存在一定的差别，因此在施工过程中如发现工程地质条件变化较大，应视具体情况对施工技术参数进行必要的调整。

**6.0.2** 各种型号或不同厂家生产的振冲器设备性能不完全相同，尤其振冲器的激振力和振幅不同，会对加密的效果产生直接影响。因此，应按设计要求，选择符合标准、性能稳定的振冲器及电气控制系统。

**6.0.3** 加密电流和留振时间是控制振冲处理效果的重要参数。由于人工很难准确控制加密电流与留振时间，因此应采用自动信号控制系统。由于电气控制设备在振动环境条件下运行，因此设定的加密电流值和留振时间可能发生变化，应随时检查。

**6.0.4** 为保证加密段长度的准确性，振冲器导杆应有明显的深度标志。一般在振冲器导杆上焊上以 1.0m 或 0.5m 为单位的刻度标志，使操作人员能较准确地掌握处理深度及加密段长度。

## 7 检测与验收

**7.0.1** 本条为检测与验收内容的一般规定，也可结合具体工程特点，根据工程设计要求、地基土类别、施工质量控制过程等确定检测预验收项目。

**7.0.4** 施工结束后处理效果检测，一般情况下检测数量应符合正文规定，对于工程地质条件变化较大的场地，检测数量应根据相应的工程地质条件，适当分区调整。

桩体密实度一般采用重型动力触探（N63.5）试验的结果进行评价。对于较长桩体，采用重型动力触探（N63.5）试验检测难度较大时，可以采用超重型动力触探（N120）试验进行检测，但是两者的相关性应通过现场对比试验加以验证。

重型动力触探（N63.5）与碎石桩密实程度的关系见表 7-1。

表 7-1 重型动力触探（N63.5）与碎石桩密实程度的关系

贯入 10cm 锤击数	>15	10~15	7~10	<7
密实程度	很密实	密实	较密实	松散

**7.0.5** 桩间土处理效果宜采用标准贯入试验、静力触探等原位测试方法，室内土工试验等方法进行检测，也可采用本地区具有成熟经验的检测方法。

**7.0.6** 采用复合地基载荷试验能够较客观、准确、直接地反映复合地基的实际效果。因此，本条规定对于 1 级、2 级建（构）筑物，应采用复合地基载荷试验进行检测与验收；对于 3 级及 3 级以下建（构）筑物，当采用复合地基载荷试验不具备条件时，允许采用单桩、桩间土载荷试验，也可结合当地经验采用其他原位

测试方法综合测评。

**7.0.8~7.0.9** 竣工验收时的效果检测，宜考虑标准贯入试验、动力触探试验、静力触探试验与单桩复合地基载荷试验的配合使用，宜减少复合地基试验的数量，在保证工程质量的前提下，降低费用和减少工期影响。

---