

ICS 27.140

P 59

备案号: J426—2005

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

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**

2005-02-14 发布

2005-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 总则	3
4 术语和定义	4
5 设计	6
6 施工	11
7 质量控制	13
8 检测与验收	14
附录 A (规范性附录) 复合地基(单桩)载荷试验要点	16
附录 B (资料性附录) 国内电动振冲器技术参数	18
附录 C (资料性附录) 振冲法施工记录格式	19
条文说明	21

前 言

本标准是根据原国家经济贸易委员会《关于下达 2001 年度电力行业标准制、修订计划项目的通知》（电力 [2001] 44 号文）的要求制定的。

振冲法地基处理技术在水电水利行业已被广泛应用，并积累了大量的经验。为了促进水电水利工程振冲法地基处理技术的进步和发展，使振冲法地基处理工程的设计、施工、检测与验收规范化，确保工程质量，制定本标准。

本标准的附录 A 为规范性附录，附录 B、附录 C 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准起草单位：北京振冲工程股份有限公司。

本标准主要起草人：韦伟、刘勇、于洪治、王爱民、李晓力、郭双田、李祥、王奎。

1 范 围

本标准规定了水电水利工程振冲法地基处理工程的设计、施工、质量控制、检测与验收，其他振冲法地基处理工程可参照使用。

本标准适用于振冲法施工处理深度 20m 以内的工程，处理深度超过 20m 时可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB50007 建筑地基基础设计规范
- GB50011 建筑抗震设计规范
- GB50202 建筑地基基础工程施工质量验收规范
- GB50287 水利水电工程地质勘察规范
- DL5073 水工建筑物抗震设计规范
- DL/T5111 水电水利工程施工监理规范
- DL5180 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准

3 总 则

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 采用振冲法处理的水电水利工程，建（构）筑物级别的划分按 DL5180 规定的确定。

3.0.3 振冲法的适用范围：

1 适用于碎石土、砂土、粉土、黏性土、人工填土及湿陷性土等地基的加固处理。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地基，应通过试验确定。

2 各类可液化土的加密和抗液化处理。

3.0.4 当选定采用振冲法地基处理方案时，应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）筑物承载力和变形要求。

3.0.6 施工前，应进行工艺试验。经确认施工质量满足工程要求后，才能进行工程施工。

3.0.7 地基经振冲处理后，应从建（构）筑物的施工阶段开始进行沉降观测。

4 术语和定义

下列术语和定义使用于本标准。

4.0.1

振冲法 vibroflotation process, vibro-replacement

一种地基处理的方法，在振冲器水平振动和高压水的共同作用下，使松散碎石土、砂土、粉土、人工填土等土层振密；或在碎石土、砂土、粉土、黏性土、人工填土、淤泥土等土层中成孔，然后回填碎石等粗粒料形成桩，和原地基土组成复合地基。

4.0.2

振冲复合地基 vibro-composite subgrade, vibro-composite foundation

振冲法地基处理所形成的复合地基。

4.0.3

振冲复合土体 vibro-treated composite soil

振冲复合地基中，被振密土体或被置换形成的增强体与周围地基土组成的等效土体。

4.0.4

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。

4.0.5

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。

4.0.6

面积置换率 replacement rate

复合地基中增强体的面积与其影响范围面积之比。

4.0.7

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的应力的比值。

4.0.8

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值。

4.0.9

加密电流 compaction current

振密土体或填料制桩过程中，振冲器电动机需达到的设计电流值。

4.0.10

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。

4.0.11

留振时间 compaction time

振密土体或填料制桩过程中，振冲器电动机维持加密电流所持续的时间。

5 设 计

5.0.1 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、基础型式、建(构)筑物荷载及抗震设防烈度等。

3 复合地基承载力、变形量及抗剪强度指标等。

5.0.2 根据建(构)筑物级别,按下列规定确定设计的技术参数:

1 1级、2级建(构)筑物应采用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、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。

5.0.3 现场试验应符合下列规定:

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 GB50287 的有关规定。

5.0.4 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 根据单桩载荷试验和桩间土的试验成果按下式计算确定(单桩载荷试验方法见附录A):

$$f_{\text{spk}} = m f_{\text{pk}} + (1 - m) f_{\text{sk}} \quad (5.0.4-1)$$

$$m = \frac{d_0^2}{d_c^2} \quad (5.0.4-2)$$

式中:

f_{spk} ——复合地基承载力特征值, kPa;

f_{pk} —— 桩体单位面积承载力特征值, kPa;

f_{sk} —— 桩间土承载力特征值, kPa;

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。

1) 等边三角形布桩, $d_e=1.05s$ 。

2) 正方形布桩, $d_e=1.13s$ 。

3) 矩形布桩, $d_e=1.13\sqrt{s_1s_2}$ 。

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:

$$f_{spk} = [1+m(n-1)] f_{sk} \quad (5.0.4-3)$$

式中:

f_{sk} —— 桩间土承载力特征值(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), kPa;

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。

5.0.5 复合地基抗剪强度指标可按下式计算确定:

$$\operatorname{tg} \phi_{sp} = m\mu_p \operatorname{tg} \phi_p + (1-m\mu_p) \operatorname{tg} \phi_s \quad (5.0.5-1)$$

$$c_{sp} = (1-m\mu_p) c_s \quad (5.0.5-2)$$

$$\mu_p = \frac{n}{1+m(n-1)} \quad (5.0.5-3)$$

式中:

ϕ_{sp} —— 复合土体的等效内摩擦角, ($^{\circ}$);

ϕ_p —— 桩体材料的内摩擦角, ($^{\circ}$);

ϕ_s —— 桩间土体内摩擦角, ($^{\circ}$);

c_{sp} ——复合土体的等效黏聚力, kPa;

c_s ——桩间土黏聚力, kPa;

μ_p ——应力集中系数。

5.0.6 复合地基变形计算按 GB50007 的有关规定执行。复合土体的压缩模量和变形模量可按下列方法确定。

1 复合土体的压缩模量:

$$E_{sp} = [1+m(n-1)] E_s \quad (5.0.6-1)$$

式中:

E_{sp} ——复合土体的压缩模量, MPa;

E_s ——桩间土压缩模量(非可加密土取其天然土的压缩模量, 可加密土应取其加密后的压缩模量), MPa。

2 复合土体的变形模量:

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:

$$E_{op} = mE_p + (1-m) E_o \quad (5.0.6-2)$$

式中:

E_{op} ——复合土体的变形模量, MPa;

E_p ——桩体的变形模量, MPa;

E_o ——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式计算确定:

$$E_{op} = [1+m(n-1)] E_p/n \quad (5.0.6-3)$$

$$E_{op} = [1+m(n-1)] E_o \quad (5.0.6-4)$$

5.0.7 布桩范围应按下列原则确定:

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时（如沟、塘、斜坡边缘），宜在基础范围外设置 1 排~2 排护桩。

4 对于可液化地基，在基础外缘扩大处理宽度不宜小于基础底面下处理深度的 1/2。

5.0.8 处理深度应按下列原则确定：

- 1 处理深度应满足建（构）筑物对地基承载力和变形要求。
- 2 抗滑稳定性处理深度超过最危险滑动面 1.0m。
- 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，处理深度应按 GB50011 及 DL5073 的有关规定执行。

5.0.9 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。

5.0.10 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 1.4m~3.0m；对于不加填料的振冲工程，布点间距可根据工程地质条件和工程要求适当增大；采用其他型号振冲器时，布桩间距应按现场试验确定。

5.0.11 振冲桩应超过有效桩顶高程 1.0m~1.5m，当超高不足时，振冲施工后应对基底土层及有效桩体顶部做密实处理。

5.0.12 碎石桩顶部应铺设 0.2m~0.5m 厚密实碎石垫层。

5.0.13 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。当采用碎石时，对于 30kW 振冲器，材料粒径宜为 20mm~

100mm；对于 75kW 振冲器，材料粒径宜为 20mm~150mm。

5.0.14 桩的平均桩径根据下式计算确定：

$$d_0 = 2\sqrt{\eta V_m / \pi} \quad (5.0.14-1)$$

式中：

d_0 ——平均桩径，m；

V_m ——每延米桩体平均填料量， m^3/m ；

η ——密实系数，一般为 0.7~0.8。

5.0.15 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的结果确定。

5.0.16 复合地基承载力特征值应按下式进行埋深修正：

$$f_a = f_{spk} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (5.0.16-1)$$

式中：

f_a ——修正后的复合地基承载力特征值，kPa；

f_{spk} ——复合地基承载力特征值，按本标准 5.0.4 条确定，kPa；

η_d ——基础埋深的地基承载力修正系数，根据基底土类别按下列经验值确定：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， $\eta_d=2.0$ ；

γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度（地下水位以下取浮重度）， kN/m^3 ；

d ——基础埋深，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，m。

6 施 工

6.1 施 工 准 备

6.1.1 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 了解现场试验资料和检测成果。
- 6 配备相应型号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 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。

6.1.2 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。

6.2 主要施工设备的选择

6.2.1 选择振冲器类型应根据地基处理设计要求及土的性质通过现场试验确定，常用的振冲器技术参数参见附录 B。

6.2.2 起吊设备的起吊吨位和起吊高度应满足振冲器贯入到设计深度的要求。

6.2.3 填料设备宜选用轮式装载机，其容量根据填料强度确定。

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

6.2.5 泥浆泵应满足排浆距离和排浆量的要求。

6.3 施 工

6.3.1 制桩顺序可选用排打、跳打、围打法。

6.3.2 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 造孔水压宜控制在 0.3MPa~0.8MPa。

4 造孔速度不宜超过 2.0m/min。

5 造孔深度不应浅于设计处理深度以上 0.3m~0.5m。

6 造孔时振冲器出现上下颠动或电流大于电动机额定电流无法贯入时，应及时调整施工参数。

6.3.3 造孔时返出泥浆过稠或存在桩孔缩颈现象时宜进行清孔。

6.3.4 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。

6.3.5 桩体加密控制标准应符合下列规定：

1 采用加密电流、留振时间、加密段长度作为控制标准，填料量指标为参考值。

2 桩体加密应从桩底标高开始，逐段向上进行，中间不得漏振。

3 加密水压宜控制在 0.1MPa~0.5MPa。

4 填料量与设计要求相差较大，应及时研究解决。

6.3.6 加密过程中，电流超过振冲器额定电流时，宜暂停或减缓振冲器的贯入或填料速度。

6.3.7 施工中发现串桩，可对被串桩重新加密或在其旁边补桩。

6.3.8 造孔时每贯入 1.0m~2.0m 应记录电流、水压、时间；加密时每加密 1.0m~2.0m 应记录电流、水压、时间、填料量。施工记录格式参见附录 C。

7 质 量 控 制

7.0.1 应建立完善的施工质量保证体系，制定质量计划或质量保证措施。

7.0.2 施工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。

7.0.3 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。

7.0.4 振冲器的导管应有明显的深度标志。

7.0.5 桩位标识应明显、牢固，在施工中应注意复核，保证其准确度。

7.0.6 填料应经过质量检验方可使用，填料的粒径、含泥量及强度等指标应符合设计要求。

7.0.7 填料应按 $2000\text{m}^3 \sim 5000\text{m}^3$ 作为一组试样进行质量检验，不足 2000m^3 时按一批次送检。

7.0.8 对桩体的密实度宜采用重型动力触探试验进行抽样检测，检测时间应在成桩 1 天后进行。

7.0.9 对可加密地基土，应对桩间土的加密效果采用重型动力触探试验或标准贯入试验进行检测，根据地基土的性质宜在施工 7 天~15 天后进行。

8 检测与验收

8.0.1 振冲施工结束后，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。

8.0.2 检测试验应在振冲施工结束并达到恢复期后进行，一般砂土恢复期不少于7天，粉土不少于15天，黏性土不少于30天。

8.0.3 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 $d_0/4$ 。
- 2 条形基础桩位允许偏差 $d_0/5$ 。
- 3 柱基础边缘桩位允许偏差 $d_0/5$ ，柱基内部桩位允许偏差 $d_0/4$ 。

8.0.4 桩体密实度宜采用重型动力触探试验检测，检测数量根据工程重要性和工程地质条件的复杂性宜为总桩数的1%~3%，单项工程不少于3根，触探击数应达到设计要求。

桩间土处理效果宜采用标准贯入试验等原位测试方法并结合室内土工试验等方法检测。

8.0.5 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，也可结合当地情况采用其他原位测试方法综合评定。

8.0.6 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 建（构）筑物的重要部位。
- 3 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。

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

8.0.8 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或一次性验收。

8.0.9 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

(规范性附录)

复合地基(单桩)载荷试验要点

A.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.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用圆形，其面积与桩的截面积相等。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.3 承压板底标高宜与基础设计底标高相同。承压板底面宜铺设 50mm~150mm 厚粗砂或中砂垫层。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.4 试验前应采取措施，防止试验场地地基土扰动，以免影响试验结果。

A.5 加载等级可分为 8~12 级。复合地基载荷试验的最大加载压力不应小于设计要求压力值的 2 倍。单桩载荷试验的最大加载压力不应小于设计要求压力值的 2.5~3.0 倍。

A.6 每加一级荷载后，按间隔 10min, 10min, 10min, 15min, 15min, 以后每隔半小时测读一次沉降量。当一小时内沉降量小于 0.1mm 时，即可加下一级荷载。

A.7 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 当达不到极限荷载，而复合地基、单桩载荷试验最大加载

压力已分别大于设计要求压力值的 2.0 倍和 2.5~3.0 倍。

当满足前 2 种情况之一时，其对应的前一级荷载定为极限荷载。

A.8 卸载级数可为加载级数的一半，等量进行，每卸一级，间隔半小时，读记回弹量，待卸完全部荷载后间隔三小时读记总回弹量。

A.9 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 按相对变形值确定。

1) 当地基土以黏性土、粉土为主时，可取相对变形 s/b 或 $s/d=0.015$ 所对应的压力；当地基土以砂土为主时，可取 s/b 或 $s/d=0.01$ 所对应的压力（ s 为载荷试验承压板的沉降量， b 和 d 分别为承压板宽度和直径，当其值大于 2m 时，按 2m 计算）。

2) 对有经验的地区，也可按当地经验确定相对变形值。

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.10 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
(资料性附录)
国内电动振冲器技术参数

表 B.1 国内电动振冲器技术参数

电动机额定功率 kW	额定电流 A	转数 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

水电水利工程振冲法地基处理 技术规范

条文说明

目 录

1 范围	23
3 总则	25
5 设计	27
6 施工	32
7 质量控制	36
8 检测与验收	38

1 范 围

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。本标准针对水电水利工程规模大、工程地质条件复杂等特点，在编制过程中，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。本标准适用于采用振冲法处理水电水利工程建（构）筑物地基和土石坝（堤）体的设计、施工、检测与验收。其他工程可参照使用。

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。振冲技术具有显著经验性，在总结经验的基础上，为了更好地指导工程实践，编制适合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。

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。目前，我国已生产出 100kW、130kW 等型号的大功率振冲器，虽然已在工程中投入应用，取得了一定的成功经验，但由于工程实例的数量有限，本标准中尚未列入。

1.0.2 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）体进行加固处理。如云南昆明松华坝主坝后坡玄武岩风化碎石土松散坝壳，采用振冲法提高坝壳密实度，为大坝加高、水库扩容奠定了基础。振冲法也是提高土石坝（堤）体及地基的稳定性有效方法之一。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。

振冲法施工处理深度不超过 20m 是受起吊机具及施工难度的限制。对于要求处理深度超过 20m 的工程，当起吊机具的起吊能力满足要求时，其施工工艺、技术要求、施工质量控制原则等可参照本标准执行。如 1997 年三峡水利枢纽二期围堰水下抛填风化砂振冲加固工程，处理深度超过 30m。

3 总 则

3.0.1 振冲法地基处理技术和其他地基处理技术一样有其适用范围。当建（构）筑物对地基要求与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做出评价。

3.0.2 振冲法处理水电水利工程的级别划分，按 DL5180 的有关规定将建（构）筑物的级别划分为五级，以区别对待地基及堤坝处理问题。

3.0.3 振冲法原则上适用于各类地基土的加固处理。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的小值平均值为 16.1kPa，振冲处理获得成功，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。

振冲法对砂类土具有良好的挤密作用，是国内外消除地基液化的有效方法，已多次被日本地震后的工程实例所证实。

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。

当确定采用振冲法处理地基时，应按建（构）筑物级别在此阶段进行必要的现场试验。

3.0.6 工艺试验是工程桩施工前，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和施工机具差异等情况，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，使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带有一定的经验性，沉降计算结果与实际沉降值间存在一定的误差，因此本标准要求从建（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。

5 设计

5.0.1 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。

5.0.2 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。

振冲法处理地基的效果直接与建设场地地基土类别和性质、振冲器类型、施工工艺及施工技术参数有关。因此，本条根据建（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修正、补充和完善。

5.0.3 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，现场试验宜分别在工程地质条件有代表性区域进行。

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

5.0.4 大量试验资料表明，根据单桩和桩间土的载荷试验成果按5.0.4-1式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（5.0.4-1）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。

桩间土承载力特征值可采用载荷试验或其他原位测试法、公式计算法、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（5.0.4-3）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，故桩间土应取其加密后的承载力值。北京振冲工程股份有限公司通过总结 1989 年以来多项工程静载荷试验检测结果得出，实测的桩土应力比 n 值多为 2~6，见表 1。考虑到我国不同区域建设场地工程地质条件的复杂性，条文建议桩土应力比取 2~4，对有经验区域可取 2~5。

表 1 实测桩土应力比

序号	工程名称	主要土层	n	
			范围	均值
1	北京昌平区东关社区服务中心	中粗砂	2.4~2.7	2.6
2	北京怡海花园	粉土	4.0~6.5	5.4
3	山东菏泽电厂	粉土	1.9~2.1	2.0
4	北京京通小区	粉质黏土	5.3~6.5	5.8
5	山东胜利油田发电厂二期工程	粉质黏土、粉土	2.9~4.4	3.6
6	大连凯伦国际俱乐部	粉质黏土	3.8~4.8	4.4
7	河北西柏坡电厂三期工程	粉土		3.8
8	河南永城电厂一期工程试桩	粉质黏土、粉土	2.5~3.6	2.9
9	唐山电厂技改工程	粉土	2.3~3.2	2.9

5.0.5 复合地基抗剪强度指标的计算引用了中国建筑工业出版社《地基处理手册》所介绍的 Priebe 公式，该公式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，采用该公式进行土体的稳定分析计算是安全可靠的。

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

对于有特殊要求的工程，复合地基抗剪强度可按设计要求或参照水工建（构）筑物有关规定通过现场大型直接剪切试验确定。

5.0.6 复合土体压缩模量的计算参照 JGJ79，建议采用下式计算：

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)] E_s \quad (1)$$

式中：

E_{sp} ——复合土体压缩模量，MPa；

E_s ——桩间土压缩模量，MPa；

m ——面积置换率；

n ——桩土应力比。

5.0.7 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。

箱基、筏基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。一般天然地基承载力小于 100kPa 设置 2 排护桩，大于或等于 100kPa 设置 1 排护桩。

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，故一般对条形基础、独立基础可只在基础范围内部布桩。

对于可液化地基，参照 GB50011 及 DL5073 的有关规定，基础外缘处理宽度不小于基础底面下处理深度的 1/2，一般在基础范围外设置 2~4 排护桩。

5.0.8 振冲桩处理地基的深度应同时满足建（构）筑物对地基承载力和变形要求。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因素的工程，在实际工程中由于滑动面位置不易准确判定，为安全起见，处理深度应超过计算最危险滑动面深度 1.0m。

对于可液化地基，处理深度应按照 GB50011 及 DL5073 的有关规定执行。

5.0.9 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，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大面积满堂地基处理。对于条形或独立基础，置换率等于基础底面积范围内桩体横截面积之和与相应基础底面积的比值。

5.0.10 本条根据大量的工程经验资料给出了常用桩距参考范围，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。本条规定最小桩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。对于黏粒含量较少的中（粗）砂地基，可采用不加填料的振冲施工方法，由于土颗粒较粗，其桩距可根据工程地质条件和工程要求适当增大。

5.0.11 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。一般预留土层厚度为1.0m~1.5m，30kW振冲器施工时宜薄，75kW振冲器施工时宜厚。当有效桩顶标高以上土层厚度少于1.0m~1.5m时，振冲施工后应对基底土层进行密实处理。

5.0.12 桩顶碎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，故本条文规定应设置垫层。当桩间土强度低、桩土应力比大时取大值，桩间土强度高、桩土应力比小时取小值。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。

5.0.13 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，本条提出当采用碎石做为填料时不同型号振冲器的填料粒径范围。有特殊要求的工程，填料按设计要求选定。

5.0.14 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 $1.8\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 换算，一般可取 0.7~0.8。

5.0.15 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。

一般 30kW 振冲器加密电流宜为 50A~60A，75kW 振冲器加密电流宜为 80A~100A。留振时间宜为 8s~15s，加密段长度宜为 200m~500mm。

5.0.16 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，但对于基础埋深地基承载力修正系数的取值则意见不一。本标准提出基础埋深地基承载力修正系数主要考虑以下因素：

(1) 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。

(2) 经振冲处理后的复合地基等效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。

(3) 使用阶段复合地基的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，本标准参考《火力发电厂振冲法地基处理技术规范》(DL/T5101—1999) 的取值，并提出对 e 及 I_L 均小于 0.85 的黏性土， η_d 取 1.3。

6 施 工

6.1 施 工 准 备

6.1.1 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。

(2) 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。

(3) 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、文明施工措施。

(4) 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，经建设单位或监理

单位复核批准后方可进行下一步的测量工作。

水量、电容量应满足施工要求，一般单台机组用电量：30kW 振冲器为 60kW，75kW 振冲器为 120kW，电压应保持 (380 ± 20) V。单台机组用水量不小于 $15\text{m}^3/\text{h}$ ，水泵供水压力不宜小于 0.8MPa。

6.1.2 工艺试验的目的：

- (1) 调试施工机具，确定施工工艺。
- (2) 验证施工技术参数的处理效果。
- (3) 通过试验施工成果，确认或调整施工工艺和施工技术参数。

由于工程地质条件的复杂性，无论施工前是否做过现场试验，正式施工前每台施工机组都应进行工艺试验。

6.2 主要施工设备的选择

6.2.1 目前国内电动机型振冲器电机功率分别为 13kW、30kW、45kW、55kW、75kW、100kW 和 130kW。13kW 振冲器国内已经很少使用，55kW 振冲器虽有生产，但用于工程实践较少，100kW、130kW 振冲器国内已有单位研制成功，但持有单位、持有数量均不多。国内施工常用 30kW、75kW 振冲器。

液压驱动可调频振冲器，国内无生产厂家，都从国外引进，数量少，一般用于特殊工程。

6.2.2 采用汽车吊施工比较方便。30kW 振冲器（6m 以内孔深）可选用 8t 汽车吊，75kW 振冲器宜选用 16t 吊车，25t~30t 汽车吊可满足 20m 以内孔深施工。20m~30m 孔深宜选用 30t 及以上的汽车吊。此外，起吊设备还可选用履带吊或桩机架等。

6.2.3 振冲法施工要求填料数量大且集中，一般宜选用 $0.5\text{m}^3 \sim 1.0\text{m}^3$ 装载机填料。30kW 振冲器也可采用人工推车填料。

6.3 施 工

6.3.1 振冲桩的施工顺序：

(1) 排打法：由一端开始，依次制桩到另一端结束。

(2) 跳打法：一排孔隔一排孔制桩，反复进行。

(3) 围打法：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法。

(4) 同一施工场地可以采用不同打法或混合打法。

6.3.2 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。本标准仅控制造孔最大速度。造孔速度过快不利成孔，甚至影响加密，根据工程实践经验，造孔最大速度一般控制在每分钟不大于 2m 为宜。造孔中出现孔位偏斜应查明原因，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。若振冲器垂直不好，则应调整垂直度。

造孔深度浅于设计桩底标高 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。

6.3.3 清孔是指将振冲器提至孔口或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。

6.3.4 目前国内振冲法施工的填料方法可分为：强迫填料、连续填料、间断填料三种方法。在工程施工中可根据实际情况选用，也可在施工中根据需要采用几种填料方法。

(1) 强迫填料。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。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情况能向下贯入，要求振冲器电机的额定电流远大于加密电流，否则振冲器上提以后向下贯入电流超过额定电流而不能贯入到预计的位置，造成桩体漏振。因此强迫填料一般适用于大功率振冲器施工。

(2) 间断填料。填料时振冲器提出孔口，倒入一定量石料（一般为 $0.2\text{m}^3 \sim 0.3\text{m}^3$ ），再将振冲器贯入孔中振捣的填料方法。该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。

(3) 连续填料。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。

6.3.5 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。

留振时间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，因此不宜将其作为加密质量控制的主要标准。但填料数量反映了土的特征，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，确保施工质量。

7 质 量 控 制

7.0.1 建立完善的质量管理体系才能实现对施工全过程的质量控制，所有施工人员的质量责任必须分明，严格按施工工艺要求和技术质量标准进行施工。

7.0.2 地基处理是一项隐蔽工程，存在工程地质条件复杂性和随机性、存在施工队伍操作水平、施工边界条件等的差异性，这些因素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、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时，应视具体情况对施工技术参数进行必要的调整。

7.0.3 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下运行，设定的加密电流值和留振时间可能发生变化，应随时检查。

7.0.4 为保证加密段长度的准确性，振冲器导管应有明显的深度标记，一般在振冲器导管上焊上以 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。

7.0.8 大量的工程经验证明，重型动力触探试验是检测桩体密实度、检验施工质量的简便有效方法，可操作性较强，可以及时发现桩体施工中存在的质量问题，用来指导施工。对大型工程应从施工开始到施工结束按一定比例进行跟踪检测；小型工程可在施工开始、施工中间或施工结束时分阶段进行检测。其击数标准应

按设计要求执行，当无明确的设计要求时，可参照本工程的现场试验资料确定。

7.0.9 对于可加密地基土，为判断加密效果是否满足设计要求，需在施工过程中对桩间土的加密效果进行跟踪检测。检测时间应满足恢复期的要求，一般砂土地基不少于 7 天，粉土地基不少于 15 天。

8 检测与验收

8.0.1 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要求、地基土类别、施工质量控制过程等确定。

8.0.4 桩体重型动力触探检测数量可根据工程的重要性和工程地质条件的复杂性确定，宜为总桩数的1%~3%，且检测桩总数不得少于3根。当检测结果较稳定时，检测数量可适当减少，对于工程地质条件变化较大的场地，检测数量应按相应的工程地质条件分区确定。

桩间土处理效果宜采用标准贯入等原位测试或室内土工试验等方法检测，也可采用本地区成熟的检测方法。

8.0.5 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。
