

ICS 91.060.01

CCS P10

DB65

新疆维吾尔自治区地方标准

J 00000——2026

DB65/T XXXX-XXXX

## 振杆密实法地基处理技术规程

Technical Specification for Foundation Treatment by Vibrator  
Compaction Method  
(征求意见稿)

2026-00-00发布

2027-01-01实施

新疆维吾尔自治区住房和城乡建设厅  
新疆维吾尔自治区市场监督管理局

发布

# 前 言

根据新疆维吾尔自治区住房和城乡建设厅、新疆维吾尔自治区市场监督管理局《关于发布2024年第二批自治区工程建设地方标准制（修）订计划的公告》（2024年第11号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考其他省市相关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为6章和2个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、设计、施工、质量控制与验收等。

本规程由新疆维吾尔自治区住房和城乡建设厅负责管理，由新疆建筑科学研究院（有限责任公司）负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请反馈至新疆建筑科学研究院（有限责任公司）（地址：新疆乌鲁木齐市红山路768号，联系电话：0991-7715512，电子邮箱：625184594@qq.com）。

**主编单位：**新疆建筑科学研究院（有限责任公司）  
东南大学

**参编单位：**新疆润疆工程设计有限责任公司  
江苏盛泰泰建设工程有限公司  
新疆新工勘岩土工程勘察设计院有限公司  
华诚博远岩土工程勘察有限公司  
新疆圣峰建筑勘察设计院有限公司  
中建材新疆地质工程有限公司  
巴州基安岩土工程勘察设计院有限责任公司  
新疆花城勘测设计研究院有限责任公司

**主要起草人：**刘学军 刘松玉 陈 鑫 杜广印 侯宪明  
杨 泳 陈新文 哈月龙 王建平 蔡松清  
张希勤 何鹏翔 李严君 王 燕 刘利民  
黄新亮 董 磊 兰志兵 陈淑强 王 鑫  
**主要审查人：**张长城 朱瑞成 李 宾 夏洪荣 江 涛  
吴兰昊 彭 勃

# 目 次

|     |                         |    |
|-----|-------------------------|----|
| 1   | 总则.....                 | 1  |
| 2   | 术语和符号.....              | 2  |
| 2.1 | 术语.....                 | 2  |
| 2.2 | 符号.....                 | 4  |
| 3   | 基本规定.....               | 5  |
| 4   | 设计.....                 | 8  |
| 4.1 | 一般规定.....               | 8  |
| 4.2 | 设计计算.....               | 14 |
| 5   | 施工.....                 | 25 |
| 5.1 | 施工准备.....               | 25 |
| 5.2 | 工艺试验.....               | 26 |
| 5.3 | 施工设备.....               | 29 |
| 5.4 | 施工工艺.....               | 31 |
| 5.5 | 施工质量控制.....             | 35 |
| 5.6 | 施工监测.....               | 36 |
| 6   | 质量检验与验收.....            | 38 |
| 6.1 | 质量检验.....               | 38 |
| 6.2 | 验收.....                 | 40 |
|     | 附录 A 振杆密实法施工设备性能参数..... | 42 |
|     | 附录 B 振杆密实法施工记录模板.....   | 45 |
|     | 本规范用词说明.....            | 46 |
|     | 引用标准名录.....             | 47 |
|     | 附：条文说明.....             | 48 |

# Contents

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 General provisions.....                                                                           | 1  |
| 2 Terms and symbols.....                                                                            | 2  |
| 2.1 Terms.....                                                                                      | 2  |
| 2.2 Symbol.....                                                                                     | 4  |
| 3 Basic regulations.....                                                                            | 5  |
| 4 Design.....                                                                                       | 8  |
| 4.1 General provisions.....                                                                         | 8  |
| 4.2 Design calculation.....                                                                         | 14 |
| 5 Construction.....                                                                                 | 25 |
| 5.1 Construction preparation.....                                                                   | 25 |
| 5.2 Process experiment.....                                                                         | 26 |
| 5.3 Construction equipment.....                                                                     | 29 |
| 5.5 Construction quality control.....                                                               | 35 |
| 6 Quality inspection and acceptance.....                                                            | 38 |
| 6.1 Quality inspection.....                                                                         | 38 |
| 6.2 acceptance.....                                                                                 | 40 |
| Appendix A: Performance Parameters of Construction Equipment<br>for the Pole Compaction Method..... | 42 |
| Appendix B: Construction Record Template for the Rod<br>Compression Method.....                     | 45 |
| Explanation of wording.....                                                                         | 46 |
| List of quoted standards.....                                                                       | 47 |
| Addition: Explanation of provisions.....                                                            | 48 |

# 1 总则

1.0.1 为规范振杆密实法地基处理的设计、施工、质量检验与验收工作，贯彻国家现行技术标准与经济政策，遵循安全适用、技术先进、经济合理、绿色环保、质量可靠的原则，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于房屋建筑工程、市政基础设施工程中，采用振杆密实法开展地基处理的设计、施工、质量检验及验收工作。

**【条文说明】**1.0.2铁路、公路、水利等工程，采用振杆密实法进行地基处理可遵照本规程。

1.0.3 振杆密实法地基处理的设计、施工、质量检验和验收除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准和现行地方有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 振杆密实法 vibratory probe compaction method

利用振动锤-振杆-土系统的振动效应，使土体与振杆同步振动，实现振动能量从振动锤到振杆和周围土中的有效传递加固地基的方法。

#### 2.1.2 十字形振动杆 cross-shaped vibratory probe

由两根垂直相交的具有均匀分布圆形通孔的钢板连接成横截面呈十字形的振动杆，四条直翼边设有连续的尖刺齿，下端为锥形。

#### 2.1.3 振点间距 compaction point spacing

两个相邻振点中心间的直线距离。

#### 2.1.4 可液化土 liquefiable soil

在地震、交通等动荷载作用下会发生液化的饱和砂土或粉土。

#### 2.1.5 湿陷性黄土 collapsible loess

在一定压力下受水浸湿，土的结构迅速破坏，并产生显著附加下沉的黄土。

#### 2.1.6 杂填土 miscellaneous fill

由人类活动而堆填的土，含有建筑垃圾、工业废物和生活垃圾等大量杂物。

#### 2.1.7 粗粒混合土 coarse-grained mixed soil

碎石土中粒径小于0.075mm的细粒土质量超过总质量的25%的土。

### 2.1.8 振动影响安全距离 safe distance of construction vibration

振杆密实法施工振动产生的地表最大垂直振动速度不大于周边建筑物的容许振动速度标准时, 振点与建筑物之间的距离。

### 2.1.9 气动作用 pneumatic effect

振杆密实法施工时, 通过在振杆底部的气孔喷射一定压力的气体射流, 提高振杆贯入效率、挤密土体。

### 2.1.10 单点加固范围 reinforcement range of a single point

单个振点施工完成后, 以振点中心为圆心, 处理土层满足设计要求的范围。

### 2.1.11 孔压静力触探 Cone Penetration Test with pore pressure measurement (CPTU)

在常规静力触探探头内置孔隙水压力传感器, 贯入土层过程中同步量测锥尖阻力、侧壁摩阻力与孔隙水压力的原位测试方法。

### 2.1.12 土体振动输入能量需求 Needed Energy Demand (NED)

振杆密实施工中, 振杆振动作用施加于土体内部的总输入能量密度, 用于表征触发饱和砂土液化所需的外部输入能量。

### 2.1.13 DZ系列振动锤 DZ Series Vibration Hammer

采用工频电动机驱动振动器产生激振力, 通过夹持装置将振动传递给桩体, 用以完成桩的沉入或拔出作业的施工机械。

### 2.1.14 土体极限抗液化能量容量 Necessary Energy Capacity (NEC)

饱和砂土发生液化对应的临界能量限值, 可与施工输入能量NED对比匹配, 以此确定液化地基施工留振控制指标。

## 2.2 符号

### 2.2.1 土性参数:

$D$ ——土的阻尼比;

$D_r$ ——砂土相对密实度;

$G$ ——土的剪切模量;

$G_{\max}$ ——土的最大剪切模量;

$R$ ——超孔隙水压力比;

$u'$ ——土体中一点的超孔隙水压力;

$\sigma_{m0}'$ ——初始平均有效侧限应力;

$\gamma$ ——土体剪应变。

### 2.2.2 施工参数:

$g$ ——重力加速度。

### 3 基本规定

3.0.1 振杆密实法可用于处理可液化的砂土和粉土、湿陷性土、粗粒混合土和杂填土等地基。

3.0.2 采用振杆密实法进行地基处理设计时，应综合考虑场地岩土工程条件、上部结构使用要求、场地及周边环境等各项因素。

**【条文说明】**3.0.2 施工前应对施工振动进行专项环境影响评估，根据评估结果确定振动安全控制范围，施工作业应在振动安全影响区域外开展。当施工振动可能对周边有特殊振动防护要求的建（构）筑物、精密仪器设备等造成不利影响时，应提前采取减振、防振防护措施。

3.0.3 振杆密实法地基处理设计与施工应全面收集相关工程技术资料。

**【条文说明】**3.0.3 工程技术资料收集范围包括但不限于工程设计文件及技术要求资料、岩土工程勘察成果资料、施工场地及周边环境资料、场地邻近建（构）筑物资料。设计、施工单位应在全面掌握各类资料信息的基础上，开展地基处理设计与施工作业。

3.0.4 振杆密实法施工宜采用智能化控制系统。

**【条文说明】**3.0.4 施工过程采用智能化控制系统，可实现施工过程精准管控、安全可控、高效作业，有效提升地基处理施工质量与施工效率。

3.0.5 湿陷性黄土地基和杂填土地基处理宜采用振杆密实与气动作用协同施工工艺。

**【条文说明】3.0.5** 湿陷性黄土地基和杂填土地基施工时，仅依靠设备激振力难以将振杆贯入至设计处理深度。采用振杆密实与气动协同施工工艺，可有效提升振杆贯入施工效率，同时进一步优化地基整体加固效果。

3.0.6 振杆密实法正式施工前，应选取代表性场地开展工艺试验，根据试验结果优化完善设计方案及施工参数。

**【条文说明】3.0.6** 正式施工前开展代表性场地工艺试验，可验证振杆密实法的场地适用性与施工工艺合理性，通过配套检测工作核验施工参数及地基加固效果。工艺试验可设置多组不同施工参数方案进行对比，择优确定最优施工参数组合。

3.0.7 采用振杆密实法处理饱和可液化土地基时，应做好场地排水工作，并对周边环境开展变形监测。

**【条文说明】3.0.7** 采用振杆密实法处理饱和可液化粉土、砂土地基时，场地易出现地表冒水现象。及时排走场地地表水，既便于施工机械进场及移位作业，也可加快土体固结速率，保障地基处理质量。同时，振杆密实施工易造成场地高程发生变化，施工全过程应持续开展场地沉降变形监测，把控场地变形状态。

3.0.8 采用振杆密实法对各类地基进行加固处理时，应符合下列规定：

1 液化地基处理：加固效果应满足场地液化消除及工程设计双重要求；地基处理完成后，场地液化判别应按现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB 50011相关规定执行。

2 湿陷性黄土、粗粒混合土地基处理：加固后应完全消除地基湿陷性，并满足设计指标；场地湿陷性评价应符合

合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025的相关规定。

3 杂填土、粗粒混合土地基处理：加固后地基密实度指标应满足设计文件要求；地基检测评价方法与判定标准应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007相关规定。

**【条文说明】3.0.8 振杆密实法处理不同类型地基的加固目标及控制标准**，应结合地基土类别、工程建设要求、上部建（构）筑物特性等综合确定。饱和松散砂土、粉土地基以消除地基液化隐患为主要处理目标；湿陷性黄土地基以消除土体湿陷性为主要处理目标；杂填土地基以提升土体密实度为主要处理目标；粗粒混合土地基需同时消除土体湿陷性、提升土体密实度。对应不同地基处理目标，施工质量的检验要求与检测方法应差异化选取。

3.0.9 振杆密实法施工质量检验的项目、控制指标及检测方法，应结合地基土类型、设计技术要求经工艺试验综合确定。

3.0.10 振杆密实法加固后的地基承载力应符合设计要求；当需检测处理后地基的承载力及变形指标时，应结合工程实际采用平板载荷试验，试验方法及流程应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123及现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79的相关规定。

3.0.11 经振杆密实法处理后的场地，应依据检测确定的地层物理力学指标及拟建工程特性，合理确定地基基础方案；经处理的巨厚杂填土地基，应慎用浅基础形式。

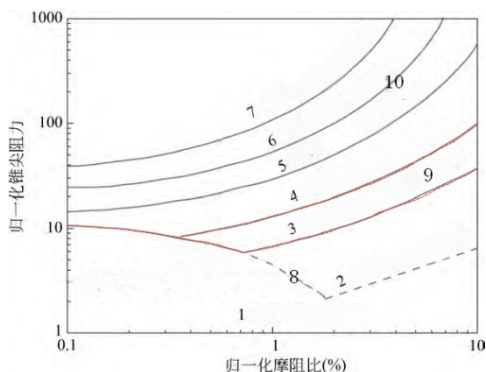
## 4 设计

### 4.1 一般规定

4.1.1 振杆密实法可应用于处理最大深度不超过20m，细粒含量低于15%~20%、黏粒含量不超过10%的液化地基；最大深度不超过30m，具有湿陷性的砂质黄土地基；最大深度不超过25m，具有湿陷性和天然土洞的粗粒混合土地基；最大深度不超过25m，有机质含量不超过5%、最大粒径不大于振杆外径的杂填土地基。

**【条文说明】**4.1.1振动密实类方法对于处理细粒粒径小于0.075mm，含量少于15%~20%、黏粒粒径小于0.005mm，含量不超过10%的颗粒土是有效的，当细粒含量超过20%则基本无效果。液化土层中的黏粒能显著降低振杆密实的有效性，1%的黏粒对密实效果的降低作用等同于10%的粉粒，土粒间的凝聚力阻止了振动下颗粒的重新排列和密实。

由于在场地获得有代表性土样的过程费时费力，且取样不连续，难以掌握地下土层的真实情况，因此基于原位测试指标的可振动密实土类评估方法更为合适。图1给出了基于CPTU土分类的振动密实土类评估方法。



1 淤泥和淤泥质土；2 黏土；3 粉质粘土；4 粉土；5 粉砂；6 细砂；7 中砂；8 不可密实；9 轻微密实；10 可密实

图 1 基于CPTU中国国标土分类的振动密实土类划分

对于归一化CPTU数据处于“7—中砂”“6—细砂”“5—粉砂”和“4—粉土”区域内的地基土被认为是可以采用振杆密实法进行加固处理的，而“2—黏土”和“1—淤泥和淤泥质土”是不可密实的。“3—粉质黏土”属于过渡阶段的“轻微密实”区，含有部分粉质黏土层的“可密实”土层在经现场调查确认后是可以进行振动密实处理的。

采用上述方法对场地砂质黄土进行判别，结果表明深度在8m以浅的大部分黄土可以归类为“细砂-粉砂-粉土”范围，处于振动密实土类的“可密实”区；部分土层被划分在“轻微密实”的“3—粉质黏土”，此外还有少量土层处于“不可密实”的“2—黏土”类。场地的砂质黄土适合采用振杆密实法进行加固处理。

CPTU指标的参数解译应基于无量纲变量，且应考虑土层上覆应力和静止孔压的影响，采用下列公式对贯入阻力进行归一化处理：

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (1)$$

$$F_s = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100\% \quad (2)$$

式中： $Q_t$ ——归一化后的锥尖阻力（MPa）；

$q_t$ ——未修正的锥尖阻力（MPa）；

$\sigma_{v0}$ ——上覆压力（kPa）；

$\sigma'_{v0}$ ——有效应力（kPa）；

$F_s$ ——归一化后的侧摩阻力（kPa）；

$f_s$ ——未修正的侧摩阻力（kPa）。

有机质的成分很不稳定，会发生持续降解且不易压实，在采用振杆密实法处理时会阻碍振动能量向周围的有效传递。振杆密实法对有机质含量在1%以下的，以建筑垃圾为主要组成的杂填土地基有良好的加固效果。参考现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定，将可密实的杂填土有机质含量上限定为5%。

4.1.2 含软土薄夹层的液化地基采用振杆密实法处理时，应通过工艺试验确定该工法的场地适应性。

**【条文说明】**4.1.2 液化地基内的软土薄夹层会阻碍土层中超孔隙水压力消散，对地基加固密实效果产生不利影响。当软土薄夹层厚度小于地基处理深度的1/5时，振杆密实法可取得良好的加固效果。由于软土薄夹层的厚度、层数、分布位置、土质特性等因素对地基处理效果的影响规律尚未完全明确，因此含软土薄夹层的液化地基施工前，必须开展专项工艺试验，验证振杆密实法场地适应性，确定合理的施工工艺。

4.1.3 振杆密实法地基处理设计方案，应根据加固地基土类型、场地周边环境、建筑物荷载、基础形式，结合液化地基、湿陷

性黄土地基、粗粒混合土地基、杂填土地基的各项土层参数综合确定。

**【条文说明】4.1.3** 本条明确不同类型地基采用振杆密实法设计时的核心参数取值依据，针对各类地基分别划定专用设计参数，具体如下：

1 液化地基：土体饱和度、相对密实度、地下水位深度、静力触探锥尖阻力、标准贯入击数、液化等级、液化指数、土的颗粒级配、液化土层厚度；

2 湿陷性黄土地基：土体饱和度、地下水位深度、土的颗粒级配、静力触探锥尖阻力、标准贯入击数、黄土湿陷类型、湿陷等级、湿陷下限深度、湿陷性黄土层厚度；

3 粗粒混合土地基：细粒土含量、天然含水率、地下水位深度、动力触探击数、湿陷等级、湿陷下限深度、土层分布情况、粗粒混合土层厚度；

4 杂填土地基：填土主要组成成分、天然含水率、有机质含量、地下水位深度、动力触探击数、杂填土层厚度。

工程涉及素填土、粉土等其他地基类型时，可参照同类土体勘察数据，结合现场工艺试验结果确定对应设计参数。

**4.1.4** 振杆密实法地基处理设计资料应包含下列内容：

1 岩土工程勘察资料，应包括以下内容：

1) 场地地质钻孔位置图、工程地质剖面图；

2) 地基土的物理力学指标、承载力特征值、地下水赋存条件；

3) 标准贯入试验、静力触探试验、动力触探试验等现场原位测试资料；

4) 对于液化地基, 应提供可液化土层的位置、厚度及场地液化等级评价资料;

5) 对于湿陷性黄土地基, 应提供湿陷性黄土层位置、厚度、湿陷系数, 湿陷性等级等资料。

2 工程场地与环境条件有关的资料, 应包括以下内容:

1) 工程场地的总平面图, 交通设施、高压架空线、地下管线和地下结构物的分布图等;

2) 相邻建(构)筑物的安全等级、基础形式及埋置深度;

3) 水、电及材料供应条件等。

3 拟建建(构)筑物有关的资料, 应包括以下内容:

1) 建(构)筑物的总平面布置图;

2) 建(构)筑物基础平面图和剖面图;

3) 建(构)筑物安全等级。

4.1.5 采用振杆密实法进行地基处理前, 应根据地基土类别, 依据现行相关国家标准开展针对性岩土工程勘察, 勘察工作应符合下列规定:

1 对于液化地基, 应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021、《建筑抗震设计规范》GB 50011规定, 查明土体饱和度、相对密实度、地下水位深度、静力触探锥尖阻力、标准贯入击数、土的颗粒级配; 确定场地类别、分析场地条件并进行液化判别, 阐明可液化土层的位置、厚度、类型, 确定液化指数和液化等级;

2 对于湿陷性黄土地基, 应按现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025规定, 查明工程所处的地貌单元; 黄土分布范围、厚度及其变化规律; 土体饱和度、

地下水位深度、土的颗粒级配、静力触探锥尖阻力、标准贯入击数、判定黄土湿陷类型、湿陷等级和湿陷下限、湿陷性黄土层厚度。明确不同地层黄土的物理、力学性质和湿陷性；

3 对于粗粒混合土地基，应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021和《建筑地基基础设计规范》GB 50007规定，查明混合土的组成、物质来源、分布以及其在水平向和垂直方向的变化规律；天然含水率、地下水位深度、动力触探击数、土层分布情况、粗粒混合土厚度；土中粗大颗粒风化情况、细粒的成分、细粒土含量、软化状态；是否具有湿陷、膨胀特性，湿陷等级和湿陷下限、地表及地下水的流向、埋深等情况；

4 对于杂填土地基，应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021和《建筑地基基础设计规范》GB 50007规定，查明杂填土的成分与来源，天然含水率、有机质含量、地下水位深度、动力触探击数。杂填土的分布、厚度、均匀性、湿陷性、密实度与压缩性以及堆积年限等情况。

**【条文说明】**4.1.5液化地基和湿陷性黄土地基作为岩土工程领域常见的特殊性不良地基，现行国家标准对其勘察、设计工作均有明确、细化的规范要求，粗粒混合土地基的勘察与设计也有对应的原则性规范依据。随着城市建设快速推进，新城及城郊工程建设中，频繁遇到建筑垃圾、开山岩屑等堆积形成的杂填土地基。此类地基均匀性差、稳定性不确定，若作为建（构）筑物持力地基，需开展全面、细致的岩土工程勘察，结合工程设计要求开展专项地基处理，确保地基性能满足建（构）筑物安全使用要求。

4.1.6 经振杆密实法处理后的场地，应静置一定时间后开展场地整平作业，采用振动压路机压实表层松土，完成表层处理后，方可开展场地高程测量与施工沉降量核定工作。

**【条文说明】**4.1.6 振杆密实法处理液化地基过程中易出现地表喷砂冒水现象，处理湿陷性黄土地基及杂填土地基时易形成地表坑洞，施工扰动会造成地表土体堆积、局部沉降等问题，直接影响场地高程与沉降测量精度。为精准获取场地实际高程变化及施工沉降数据，需消除施工扰动带来的地表形态偏差。场地表层压实的静置时长，可根据地基土类型差异化确定。

## 4.2 设计计算

4.2.1 振杆密实法设计程序宜符合下列规定：

- 1 分析场地勘察报告，进行振杆密实法适用性评估；
- 2 结合工程需求与场地地质条件，确定地基有效处理深度；
- 3 按本规程附录A的规定进行设备选型；
- 4 根据地基关键设计参数，计算确定施工振动频率、振点间距、留振时间等核心施工参数；
- 5 开展现场工艺试验，对比优选施工工艺、优化振点布置方案与振点间距，完善施工参数体系，确定最终施工方案。

4.2.2 振杆密实法地基处理设计深度，应根据地基土类型、工程建设要求、施工设备性能等因素综合确定，并应符合下列规定：

1 液化地基设计处理深度应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定；

2 湿陷性黄土地基设计处理深度应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025的规定；

3 杂填土地基设计处理深度应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的规定；

4 粗粒混合土地基设计处理深度应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025和《建筑地基基础设计规范》GB 50007的规定；

5 受施工承载平台尺寸和十字形振杆的长度限制，振杆密实法的处理深度不宜超过30m。

**【条文说明】4.2.2**随着施工机械设备的进步，振杆密实法最大加固逐渐加深，但对施工承载平台尺寸和十字形振杆的长度要求越来越高，根据研究成果和现场试验结果及目前设备能力，限定最大加固深度不宜超过30m。

4.2.3 振杆密实法处理液化地基时，单点加固范围宜取振杆直径的1.6倍～2.0倍。正式施工前，应根据工艺试验的结果，通过计算振动引发的土层剪应变水平或土体液化范围，校核确定单点加固范围，具体计算方法应符合下列规定：

1 基于振动剪应变水平确定单点加固范围，可根据振动引发土层剪应变 $\gamma$ 与土体剪切模量比 $G/G_{\max}$ 的对应关系按下式计算：

$$\gamma = \frac{v}{v_{s,\max} \cdot \sqrt{\frac{G}{G_{\max}}}} \quad (\text{式4.2.3-1})$$

式中： $v$ ——地面峰值振动速度（m/s）；

$v_{s,\max}$ ——土的小应变剪切波速（ $\gamma \leq 10^{-6}$ ）（m/s）。

2 振杆周围最大加固（液化）范围，可按动剪应变阈值对应的质点轨迹确定。土体动剪模量比与剪应变的相关关系，可通过室内动三轴试验、共振柱试验获取，也可根据土性参数选取对应经验值。

3 地面峰值振动速度 $v$ 与振杆径向距离 $r$ 的衰减关系，应依据现场地表振动实测数据拟合确定，按下式计算：

$$v_2 = v_1 \cdot \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^n \cdot \exp[-\alpha \cdot (r_2 - r_1)] \quad (\text{式4.2.3-2})$$

式中： $v_2$ ——为距振源距离为 $r_2$ 未知振动速度；

$v_1$ ——距振源距离为 $r_1$ 的已知振动速度；

$n$ ——几何阻尼系数；

$\alpha$ ——与场地条件有关的经验衰减系数，需根据现场实测数据来确定。

4 基于振动液化范围校核单点加固范围时，应在现场工艺试振过程中，监测振点不同深度、不同径向位置的超孔隙水压力，通过超孔压比判定液化范围，超孔压比计算公式如下：

$$R = u' / \sigma'_{v0} \quad (\text{式4.2.3-3})$$

式中： $R$ ——超孔压比；

$u'$ ——土体中一点的超孔隙水压力，kPa。

**【条文说明】4.2.3** 当土体超孔压比 $R$ 达到1时，土体的抗剪强度完全消失而产生液化现象，以此作为液化依据可以得到单点振动液化的液化边界。孔隙水压力监测结果表明，以超孔压比等于1为液化标准，得到的直径为60cm的十字形振杆的单点振动径向加固范围为1.0m~1.2m，约为1.6倍~2.0倍振杆直径。

4.2.4 振点间距应根据上部结构荷载等级、地基土层类型与分布特征，结合施工设备参数、单点加固范围等因素综合确定。按抗液化要求开展地基设计时，振点间距不应大于下列公式计算值：

$$s=0.95\zeta d\sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (\text{式4.2.4-1})$$

$$e_1=e_{\max}-D_A(e_{\max}-e_{\min}) \quad (\text{式4.2.4-2})$$

$$D_{r1}=0.21\sqrt{\frac{N}{0.7+\sigma'_v/100}} \quad (\text{式4.2.4-3})$$

$$e_{\max}=0.02F_c+1.0, \quad e_{\min}=0.008F_c+0.6 \quad (\text{式4.2.4-4})$$

式中： $s$ ——振点间距，m；

$\zeta$ ——修正系数，取0.90~0.92；

$d$ ——振杆直径，m；

$e_0$ ——地基处理前的孔隙比；

$e_1$ ——地基处理后要求达到的孔隙比；

$e_{\max}$ ——土的最大孔隙比；

$e_{\min}$ ——土的最小孔隙比；

$D_{r1}$ ——地基处理后要求达到的相对密实度，取0.70~0.85；

$F_c$ ——土中细粒含量百分比，%。

**【条文说明】4.2.4** 土中细粒指的是粒径小于0.075mm的颗粒

4.2.5 振杆密实法处理湿陷性黄土地基时，单点加固范围宜取振杆直径的1.2倍~1.5倍。正式施工前应开展现场工艺试验，通过计算振动引发的土层剪应变水平，校核确定单点加固范围。

**【条文说明】4.2.5**当场地缺乏充足试验数据时，湿陷性黄土地基振杆密实施工振点间距取振杆直径的2.5倍~3.0倍。

4.2.6 振杆密实法处理湿陷性黄土地基时，振点宜采用正三角形布置形式。振点间距应根据地基湿陷特性、加固处理要求、地基处理深度等因素综合确定，并满足下式要求：

$$s \leq 0.8 D_p \sqrt{\frac{\eta_{ave} \rho_{dmax}}{\eta_{ave} \rho_{dmax} - \rho_{dave}}} \quad (\text{式4.2.6})$$

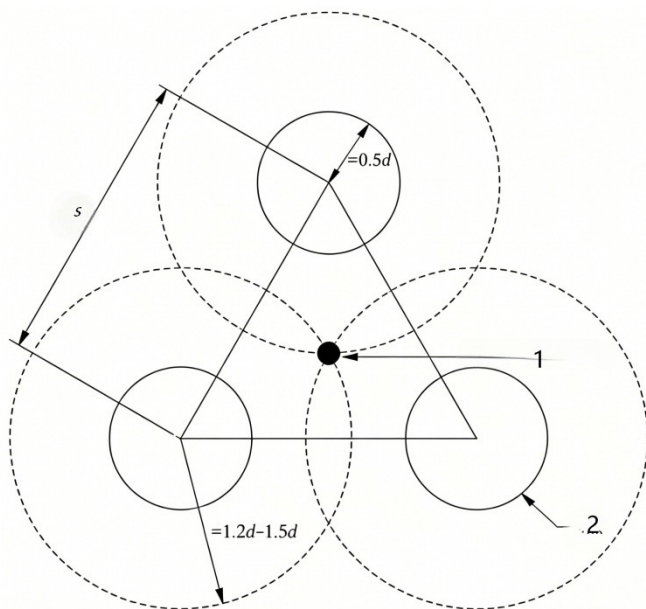
式中：  $D_p$ ——振孔的直径，取0.65m~0.70m；

$\eta_{ave}$ ——处理后振点间土的平均挤密系数；

$\rho_{dmax}$ ——地基土的最大干密度（ $\text{kg/m}^3$ ）；

$\rho_{dave}$ ——处理前振点间土的平均干密度（ $\text{kg/m}^3$ ）。

**【条文说明】**4.2.6 场地无充足试验数据支撑时，湿陷性黄土地基振点间距可取振杆直径的2.0倍~2.5倍。振点采用正三角形布置时，需确保三角形形心处地基土的加固效果满足设计要求，即形心位置需同时处于三个振点的有效加固范围内。正三角形布置形式下，振点间距的最大值为单点加固范围的 $\sqrt{3}$ 倍。结合本规程第4.2.5条，湿陷性黄土地基单点加固范围为振杆直径的1.2倍~1.5倍，对应确定工程常用振点间距为振杆直径的2.0倍~2.5倍。



1 三角形和圆形心点；2 插点

图2 采用三角形布置时振点间距的计算示意图

4.2.7 振杆密实法处理粗粒混合土地基与杂填土地基时，单点加固范围宜取振杆直径的1.2倍~1.4倍。振点宜采用正三角形布置形式，振点间距宜取振杆直径的2.0倍~2.4倍。

**【条文说明】**4.2.7 粗粒混合土存在中间粒径缺失的特性，杂填土组成成分复杂，难以精准获取孔隙比等关键设计参数，无法通过理论公式精准计算加固范围。此类地基的单点加固范围，可通过工艺试验获取不同径向距离处的动力触探检测结果分析确定。现场实测数据表明，以振点中心为圆心、1.2倍~1.4倍振杆直径为半径的加固范围内，处理后杂填土地基的动力触探击数可满足设计指标要求。可结

合本规程图4.2.6开展振点间距校核计算，正三角形布点形式下，振点间距宜取振杆直径的2.0倍~2.4倍。

4.2.8 振杆密实法地基加固平面范围应结合场地稳定性分析结果综合确定，地基加固区域宜在基础轮廓范围外增设一排振点，保障基础外围土体加固密实。

4.2.9 振杆密实法施工振动安全距离应依据现场振动速度监测数据确定。施工对建（构）筑物结构影响的容许振动值及现场振动速度监测方法，应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的相关规定。

**【条文说明】**4.2.9 振杆密实施工产生的振动会对周边环境、建（构）筑物产生不同程度的影响，施工振动安全距离受地基土性质、保护对象结构类型、振动锤激振力、振杆尺寸等多重因素影响。因此，具备条件的工程应结合实际需求开展现场振动测试，精准确定振动安全控制距离。

土体特性直接决定振动速度的衰减规律：软弱、松散、低密实度地基土对振动的衰减作用更快，振动传播范围较小；土层坚硬密实、软弱薄层下卧坚硬土层的场地，振动衰减速率较慢，振动传播距离更远。振杆密实法施工振动影响的安全距离优先依据现场实测振动速度数据确定，也可结合当地成熟工程经验取值。无监测条件或经验不足时，可依据表1确定。

表1 振杆密实法施工振动影响的安全距离（m）

| 地基类型     | 工业建筑、公共建筑 | 居住建筑 | 对振动敏感、具有保护价值、不能划归前两类的建筑 |
|----------|-----------|------|-------------------------|
| 可液化砂土、粉土 | >8        | >10  | >15                     |
| 湿陷性黄土    | >12       | >15  | >25                     |
| 杂填土      | >10       | >15  | >20                     |
| 粗粒混合土    | >10       | >12  | >20                     |

4.2.10 振杆密实法施工激振频率，宜结合现场波速测试获取的土体最大动剪切模量、室内试验测定的土体阻尼比，采用单自由度强迫振动模型计算确定，激振频率应在15Hz～20Hz之间。

【条文说明】4.2.10

振动系统单自由度模型表达式见下式：

$$\omega = \sqrt{1 - 2D^2} \cdot \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (3)$$

式中： $\omega$ ——激振圆频率；

$D$ ——土体阻尼比；

$k$ ——土体刚度（N/m）；

$M$ ——十字形振动杆和振动锤质量之和（kg）。

地基土土体刚度在不具备现场测试条件下，可由弹性半空间理论按下式计算：

$$k = \frac{4Gr_0}{1-\mu} \quad (4)$$

式中： $G$ ——土的剪切模量（Pa）；

$r_0$ ——刚性圆基础半径，即沉杆半径（m）；

$\mu$ ——土的泊松比。

对于湿陷性黄土地基和杂填土地基，根据式（3）和式（4）计算出的激振频率通常不大于10Hz。依托现场工程实测与已有研究成果，低频工况易造成机具共振、设备大幅振动，振杆贯入效率偏低；工程实践表明，激振频率提升至15Hz~20Hz区间时，可有效规避设备共振问题，优化设备运行工况，显著提升振杆贯入效率，满足地基处理施工要求。因此该两类地基施工方案设计时，振动频率根据宜选用15Hz~20Hz。

4.2.11 振杆密实法施工留振时间应根据地基土类型差异化控制，应符合下列规定：

- 1 可液化地基留振时间不宜小于30s；
- 2 湿陷性黄土地基留振时间不宜小于15s；
- 3 粗粒混合土地基留振时间不宜小于60s；
- 4 杂填土地基留振时间不宜小于30s。

【条文说明】4.2.11对于可液化地基，振杆密实法的留振时间应满足动力作用和土的极限抵抗能力相等的液化触发条件。

振杆动力作用定义为施加于土中能量需求NED按下列公式计算：

$$NED = 2\pi \cdot D \cdot G_{max} \cdot \left( \frac{G}{G_{max}} \right) \cdot \gamma^2 \cdot f \cdot dur \cdot \frac{1}{\sigma'_{m0}} \quad (5)$$

$$\sigma'_{m0} = \left( \frac{1+2K_0}{3} \right) \cdot \sigma'_{v0}; \quad (6)$$

式中：f——振动频率，Hz；

dur——振动持续时间，s；

$\sigma'_{m0}$ ——初始平均有效侧限应力。

土层极限抵抗液化能力定义为土的能量容量 $NEC$ ，常与现场测试的标准贯入试验击数联系起来，按下列公式计算：

$$NEC = 1.195 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(0.185 \cdot N_{l,60cs}) \quad (7)$$

$$3 \leq N_{l,60cs} \leq 27 \quad (8)$$

式中： $N_{l,60cs}$ ——经 $NCEER$ （1997）推荐的细粒含量修正的标准化标贯击数。

振杆周边土体完全液化前，土层液化范围随留振时间延长逐步扩大；土体完全液化后，振动能量极少传递至外围非液化土层，多余能量主要用于激发已液化土层振动，继续延长留振时间无法扩大有效加固范围。液化后土体振动衰减特性，可通过工艺试验在振杆周边不同距离布设振动传感器实测确定，以此校核最优留振时长。

4.2.12 采用振杆密实与气动作用协同工艺开展地基处理时，喷气压力应根据场地土层条件、地基加固深度综合确定。其中，处理湿陷性黄土地基、杂填土地基时，喷气压力不宜大于 $0.8\text{MPa}$ 。

4.2.13 振杆密实法施工期地基总沉降量宜依据试验性施工成果确定；可采取原状土样开展处理前后土工试验的场地，地基总沉降量可按分层总和法通过下式计算：

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{1i}} H_i \quad (\text{式} 4.2.13)$$

式中： $e_{0i}$ ——设计处理深度范围内，处理前第 $i$ 层土的平均孔隙比；

$e_{1i}$ ——设计处理深度范围内，处理后第 $i$ 层土的振点间土样孔隙比；

$H_i$ ——设计处理深度范围内，第 $i$ 层土的厚度。

**【条文说明】4.2.13** 地基土体经振杆密实法加固后，在自重应力作用下发生二次固结，土体密实度提升、孔隙比减小，进而产生地基沉降变形。可根据加固深度范围内各分层土体厚度、处理前后孔隙比变化，计算单一土层的一维压缩变形量，再通过分层总和法叠加计算得到地基整体总沉降量。

4.2.14 振杆密实法处理后地基的工后沉降量计算，应采用加固完成后土层的物理力学指标，并应按照现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的相关规定执行。

## 5 施工

### 5.1 施工准备

5.1.1 工程施工前，应由建设单位组织设计单位、监理单位、施工单位开展设计交底工作，并组织各方技术人员完成施工图纸会审，明确设计要点及施工技术要求。

5.1.2 正式施工前，应彻底清理场地内大块建筑垃圾、杂物等障碍物，对场地原地面开展清表、整平、碾压作业，保障场地承载力满足施工机械进场、移位及施工作业要求。

5.1.3 施工前应布设现场测量控制网，建立完备的场地平面坐标控制点与高程控制点体系，精准测量并记录场地整平碾压完成后的初始施工标高。

5.1.4 依据施工设计图纸开展现场测量放样，精准标定振杆施工点位、划定地基处理施工范围。可结合工程经验预估场地平均沉降量，或通过现场工艺试验确定沉降参数，提前预留沉降土方，规避地基加固完成后二次回填作业。

5.1.5 施工前应按照本规程相关条款要求，确定振杆密实法施工振动的影响安全距离。当施工振动对周边建（构）筑物存在不利影响时，应设置隔振沟等减振防护措施。隔振沟深度宜为2m~3m，每侧沟体超出被保护建筑物长边长度不应小于2.0m。

5.1.6 针对液化地基处理工程，施工前应在场地内部及周边布设完善的排水系统、开挖排水沟，采用水泵抽排与人工疏导相结合的方式，及时排净场地积水，保障干地施工条件。

5.1.7 杂填土地基处理工程施工前，应详细查明杂填土的组成成分、结构构成、颗粒级配及土石比等关键参数，并提前备足符合要求的回填料。

**【条文说明】**5.1.7 振杆密实法处理杂填土地基施工过程中需配套开展反插回填作业。回填料可选用场地原位开挖的表层杂填土或合规外运土，填料中砾石最大粒径不得大于50mm，且填料内不得掺杂碎砖等超大坚硬障碍物，避免影响振杆施工及地基加固密实效果。

## 5.2 工艺试验

5.2.1 振杆密实法正式施工前应开展现场工艺试验，通过试验确定合理施工参数、施工工艺，验证地基处理效果并评价工法场地适应性，工艺试验应符合下列规定：

1 工艺试验场地位置应根据工程地质和水文地质条件选择；

2 工艺试验的规模应根据待处理场地的复杂程度、建筑规模和工程类型等确定。单组施工参数对应的试验区域面积不宜小于50m<sup>2</sup>，或布置不少于5排×5列振点。

3 液化地基处理工艺试验，应选取多组差异化施工参数开展对比试验，参数包含但不限于：振动频率、振点间距、沉杆速度、提杆速度、留振时间。

4 湿陷性黄土地基处理工艺试验，应选取多组差异化施工参数开展对比试验，参数包含但不限于：振动频率、振点间距、协同喷气压力、反插次数。

5 粗粒混合土地基处理工艺试验，应选取多组差异化施工参数开展对比试验，参数包含但不限于：振动频率、振点间距、留振时间、反插次数。

6 杂填土地基处理工艺试验，应选取多组差异化施工参数开展对比试验，参数包含但不限于：振动频率、振点间距、留振时间、反插次数。

5.2.2 工艺试验施工期间，应对周边建（构）筑物开展变形监测。变形监测的方法和设备应根据建（构）筑物类型和工程要求确定，并应符合国家现行标准《工程测量通用规范》GB 55018、《工程测量标准》GB 50026和《建筑工程施工过程中结构分析与监测技术规范》JGJ/T 302中相关规定。对监测结果的分析评价应按照现行行业标准《建筑工程施工过程中结构分析与监测技术规范》JGJ/T 302执行，当监测结果出现异常时应及时预警并查明原因。

**【条文说明】**5.2.2 工艺试验阶段对周边建（构）筑物开展变形监测，可有效探明振杆密实施工对周边环境的扰动影响，提前识别施工安全隐患，为后续正式施工的安全管控、减振防护措施布设提供依据。变形监测内容需结合场地周边建（构）筑物实际类型针对性布设，监测对象可涵盖工业与民用建筑、水工构筑物、地下工程、桥梁结构及边坡滑坡体等。

5.2.3 工艺试验施工时宜进行噪声监测。噪声监测方法、设备应符合现行国家标准《声环境质量标准》GB 3096、《建筑施工噪声排放标准》GB 12523中相关规定。噪声的控制标准可按现行国家标准《建筑施工噪声排放标准》GB 12523执行。当噪声监测结果超标时应停止施工并采取换装防音型振动锤等措施减少噪音。

**【条文说明】5.2.3** 对于声环境保护要求较高的施工区域，开展振杆密实法工艺试验及正式施工过程中，必须全程开展噪声监测，确保施工噪声排放符合场地声环境管控标准，规避施工噪声对周边人居环境、敏感区域造成不良影响。

5.2.4 现场振动速度监测方法应符合本规程第4.2.9条的规定。

5.2.5 工艺试验完成后，应整理编制完整成套的工艺试验成果资料，成果内容应包含下列内容：

1 不同工程类型、不同土质条件下，工艺试验场地地基加固后的效果检测资料；

2 针对各类工程及土质条件优化确定的振动频率、振点间距、留振时间等施工核心参数；

3 明确振杆密实法施工控制标准及施工质量控制指标；

4 校核确定地基处理后场地平均沉降量，采用灌砂法计算并评价土体密实度指标；

5 评估振杆密实施工振动对周边建（构）筑物及场地环境的影响，明确施工振动安全距离，确定合理的减振、隔振防护措施。

**【条文说明】5.2.5** 工艺试验完成后，应结合不同工程类型、地基土质条件，选取合理的检测时长开展加固效果检测。工程实践经验表明，可液化地基宜在施工完成后14d~28d范围内开展加固效果检测；湿陷性黄土地基与杂填土地基宜在施工完成7d后开展检测作业。

场地各类地基土在水平、竖向维度的厚度分布不均，土体物质组成与物理力学性质存在显著差异，场地条件具有较

强的空间变异性。基于工艺试验实测检测结果确定适配的施工质量控制指标，可规避统一参数施工带来的加固不均、质量不达标等问题，有效保障整体地基处理工程质量。

地基处理完成后的场地平均沉降量或隆起量，可直观反映土体挤密加固的有效密实程度，是评价振杆密实加固效果的重要宏观指标。通过工艺试验实测数据，可精准校核并修正场地处理前后的高程数据及相关设计、施工参数，为正式施工的沉降预留、参数优化提供可靠依据，提升地基处理精度与施工质量可控性。

### 5.3 施工设备

5.3.1 振杆密实法施工设备应符合本规程附录A第A.0.1条规定。

5.3.2 振杆密实施工振动锤宜采用DZ系列振动锤。

5.3.3 振杆结构形式、技术参数应满足下列施工要求：

1 振动杆的形状结构应符合本规程附录A第A.0.3条规定，振杆总长应大于场地最大处理深度，宽度不应小于0.6m。

2 采用气动振杆密实法处理湿陷性黄土时，振动杆应配有喷气管和喷气口，其中喷气管应内置于振动杆中心，喷气口形状应为圆形，并每工作5000m检查一次喷气口的磨损情况，发现失圆或有豁口时，及时更换喷嘴。

**【条文说明】**5.3.3 十字形振动杆与瑞典振动翼的加固效果对比结果（图3）表明，十字形振动杆在可液化地基处理上的加固效果优于国外常用的瑞典翼。

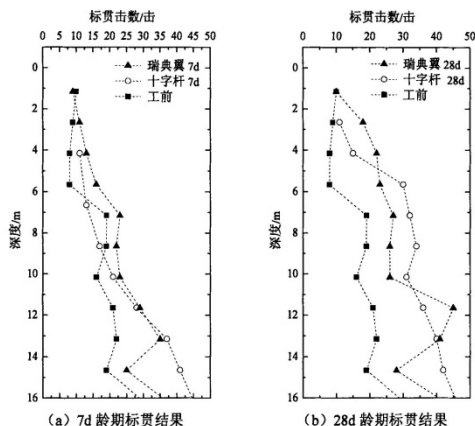


图3 十字形振动杆与瑞典振动翼的加固效果对比

十字形振动杆的通孔设计可增加振杆与土接触面积,有利于振动能量传递。

早期振杆采用半圆形齿边缘、尖刺齿圆弧底端结构形式,在湿陷性黄土、杂填土地带中贯入阻力大、贯入效率低,施工适配性较差,现已全部淘汰。现阶段统一采用尖刺齿边缘、锥形底端的新型振杆结构,有效提升各类复杂场地的振杆贯入性能与施工效率。

根据前期试验研究结果,喷气口磨损对加固效果有一定影响,每7-10天须进行检查其磨损情况,考虑到磨损与工作量密切相关,按每天工作500m~800m计算,规定每5000m检查1次。

5.3.4 振杆密实施工承载平台的整体结构形式、设备配置及使用功能,应符合本规程附录A第A.0.4条规定。

5.3.5 振杆密实法配套智能化施工系统、施工监控系统的设备组成、技术参数及控制功能,应符合本规程附录A第A.0.5条规定。

**【条文说明】5.3.5** 传统施工设备受技术条件限制，卷扬机升降速度、施工处理深度、留振时间等核心施工参数均依靠人工操控，操作离散性大，难以实现标准化、同质化施工控制，施工质量易受人为因素干扰。同时早期设备集成化程度低，各类管线、缆线外露布设，不仅作业环境差，还存在较大施工安全隐患。

现行智能化施工与监控系统可与承载平台卷扬机变频控制系统、深度记录装置等设备实现数据互联互通，支持施工参数预设、实时监测、自动采集与全程记录，实现施工过程精准管控。配套远程监控系统依托云技术，可实现施工参数实时上传、全程视频监控，搭建工程数据展示与信息汇总平台。系统采用全流程计算机自动化控制，可有效规避人为操作偏差对施工质量的影响，完整留存施工全过程数据，为工程质量追溯、参数复盘与技术总结提供可靠依据。

## 5.4 施工工艺

5.4.1 振杆密实法处理可液化地基施工步骤应按放线定位、振动下沉、、留振密实、振动提升、提至地面的流程执行（图5.4.1），并应符合下列规定：

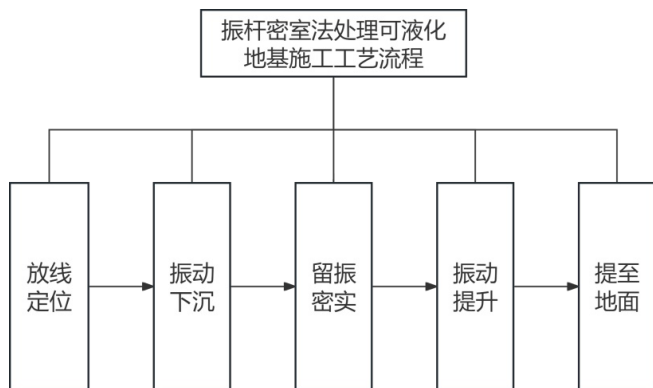


图5.4.1 振杆密室法处理可液化地基施工工艺流程图

1 施工机械到达指定区域，通过行走机构调整导向架位置使振杆与振点对中并调整垂直度，不得强行将振杆对准要打的点位。承载平台前进时应考虑“退打”方向并与施工便道垂直以便机械进出；

2 根据设计频率和工艺试验结果调整振动锤的频率，启动振动锤，使振杆匀速下沉至设计深度。下沉速度应控制在 $1.2\text{m/min} \sim 1.5\text{m/min}$ 以内，振杆达到设计深度后，留振时间应根据工艺试验结果确定。工艺试验未考察留振时间的，留振时间宜为30s；

3 留振结束后，将振杆匀速提升至地面，提升速度应控制在 $2.0\text{m/min} \sim 2.5\text{m/min}$ 以内；

4 关闭振动锤，完成振杆密室法单点施工，移动机械到下一点位进行施工。

5.4.2 振杆密室法处理湿陷性黄土地基施工步骤应按放线定位、振动下沉、留振密实、振动提升、提至地面、振动反插、回填振压、提至地面的流程执行（图5.4.2），并应符合下列规定：

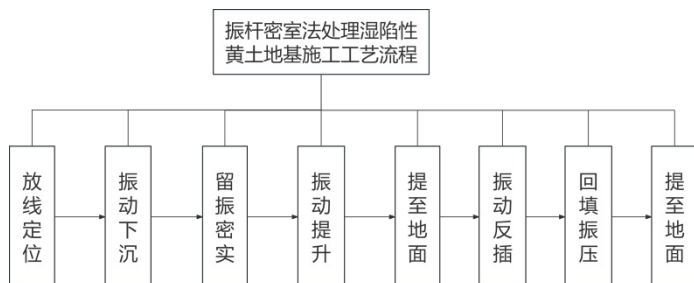


图5.4.2 振杆密室法处理湿陷性黄土地基施工工艺流程图

1 放线定位时，行走机械到达指定区域，通过走形机构调整导向架位置使振杆与振点对中并调整垂直度，不应强行将振杆对准要打的点位。机械定位时应考虑“退打”方向，以便机械进出；

2 振动下沉时，应打开空气压缩机，根据工艺试验结果调整喷气压力，使振杆的四个喷气孔均保持高压喷气的稳定状态；

3 留振密实时，应根据设计频率和试振结果调整振动锤的频率，启动振动锤，使振杆匀速下沉至设计深度。下沉速度应控制在 $1.5\text{m}/\text{min}$ 以内，振杆达到设计深度后，关闭空气压缩机并进行留振，留振时间不宜大于 $15\text{s}$ ；

4 振动提升时，将振杆匀速提升至地面，提升速度应控制在 $2.0\text{m}/\text{min}$ 以内；

5 提至地面后，保持振动锤开启，使振杆在激振力作用下反插；反插次数应根据试振结果确定，不宜多于3次；

6 最后一次反插结束后，将振杆提升至地面，通过托盘机构在钻头处安装托盘，并辅助填土机构，边填土边振压；

7 最后一次反插回填结束后，将振杆提升至地面；

8 关闭振动锤，完成振杆密实法单点施工，移动机械到下一点位进行施工，最后整平场地。

5.4.3 振杆密实法处理杂填土地基施工步骤应按放线定位、振动下沉、留振密实、振动提升、提至地面、回填反插、提至地面的流程执行（图5.4.3），并应符合下列规定：

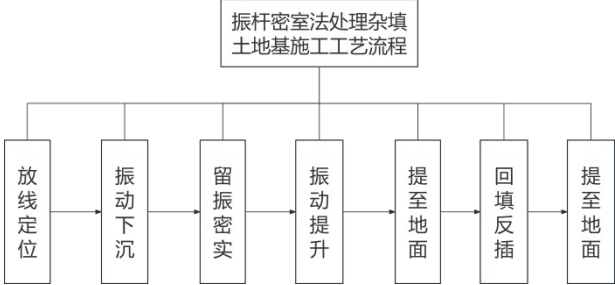


图5.4.3 振杆密实法处理杂填土地基施工工艺流程图

1 放线定位时，行走机械到达指定区域，通过走形机构调整导向架位置使振杆与振点对中并调整垂直度，不得强行将振杆对准要打的点位。机械定位时应考虑“退打”方向，以便机械进出；

2 振动下沉时，根据设计频率和工艺试验结果调整振动锤的频率，启动振动锤，使振杆匀速下沉至设计深度。下沉速度应控制在1.2m/min以内，振杆达到设计深度后，留振时间应根据工艺试验结果确定。粗粒混合土留振时间为不小于60s，杂填土留振时间宜为30s；

3 留振结束后，将振杆匀速提升至地面，提升速度应控制在2.0m/min以内；

4 保持振动锤开启，使振杆在激振力作用下反插，反插的同时向振孔中回填土料，反插回填次数应根据试振结果和处理深度确定，宜为2次～3次；

5 最后一次反插回填结束后，将振杆提升至地面；

6 关闭振动锤，完成振杆密实法单点施工，移动机械到下一点位进行施工，最后整平场地。

5.4.4 振杆密实施工完成后，应根据需要，对浅层土体进行冲击压实或振动压实处理，并应根据标高设计要求进行土体回填压实。

## 5.5 施工质量控制

5.5.1 振杆密实法施工应在落实质量保证体系及管控措施的基础上，严格依据现行相关规范标准、施工合同技术要求开展施工作业与现场管理，全面保障地基处理工程施工质量。

5.5.2 施工全过程宜采用智能化施工系统开展实时参数监测，应按照振杆密实法施工过程质量控制标准管控施工参数，重点监测振动频率、振点位置、振点间距、振杆运动速度、振杆垂直度、喷气压力等核心指标，各项参数控制应符合表5.5.2的规定。

表5.5.2 振杆密实法施工过程质量控制要求

| 控制项目   | 施工要求                                  | 允许误差                     |
|--------|---------------------------------------|--------------------------|
| 振动频率   | 按设计要求和现场工艺试振结果确定的振动频率                 | 误差不大于1Hz                 |
| 振点间距   | 按设计要求的振点间距                            | 振点间距误差不大于5cm             |
| 处理深度   | 按设计要求的处理深度                            | 不小于设计要求深度                |
| 振杆运动速度 | 振动下沉速度控制在1.5m/min以内，提升速度控制在2.0m/min以内 | 振动下沉速度和提升速度误差不大于0.1m/min |
| 垂直度    | 振动杆垂直度不大于1.5%                         | 垂直度测量误差不大于0.1%           |
| 喷气压力   | 按设计要求和现场工艺试验确定的喷气压力                   | 注气压力误差不大于0.1MPa          |

5.5.3 振杆密实法施工记录应按本规程附录B的要求及时、准确填写并整理保存。

5.5.4 振杆振动下沉施工全过程应实时监测振杆垂直度，当垂直度超过1.5%时，应立即停止施工，检修和调整振杆、导向架、连接法兰等设备，设备校验合格后方可复工。

5.5.5 地基处理施工的反插深度、反插次数，应结合设计参数、现场工艺试验成果及场地施工难易程度动态优化调整。

**【条文说明】**5.5.5采用振杆密实法处理湿陷性黄土地基和杂填土地基、粗粒混合土地基时，最大反插深度不应超过处理深度的 $3/4$ ，且反插深度宜随着反插次数增大逐渐减小。处理深度在 $8m$ 以内时，反插次数不宜少于1次，不宜超过3次；处理深度在 $8m\sim 15m$ 范围内时，反插次数不宜小于2次，不宜超过4次。

5.5.6 施工过程中应对照设计资料对振点位置进行复核，振后检查振点位置，发现偏差或漏振应及时补振。

5.5.7 处理后地基的加固深度和加固效果应满足设计要求，当不满足设计要求时应采取补振或其他方法进一步处理，直至验收合格。

## 5.6 施工监测

5.6.1 振杆密实法施工场地周围环境监测方法及频率应符合表5.6.1的规定。

表5.6.1 振杆密实法施工场地周围环境监测方法及频率

| 监测内容       | 地基类型 |         |       |         | 监测方法                                |
|------------|------|---------|-------|---------|-------------------------------------|
|            | 液化地基 | 湿陷性黄土地基 | 杂填土地基 | 粗粒混合土地基 |                                     |
| 地表沉降       | √    | √       | √     | √       | 按现行国家标准《软土地基路基监控标准》GB/T 51275有关规定执行 |
| 环境振动       | √    | √       | √     | √       | 按本规程第4.2.9条的规定执行                    |
| 周边建（构）筑物变形 | √    | √       | √     | √       | 按本规程第5.2.2条的规定执行                    |
| 噪音         | （√）  | （√）     | （√）   | （√）     | 按本规程第5.2.3条的规定执行                    |

注：“√”——必做项目；“（√）”——选做项目。

**【条文说明】5.6.1 振杆密实法地基处理工程普遍存在场地条件复杂、施工工期紧凑、施工扰动影响因素多等特点，施工过程易对周边场地、建（构）筑物及生态环境产生不同程度影响。为保障施工全过程质量可控、安全可控，最大限度降低施工对周边环境的不利影响，需结合本工法的施工特点、地基处理目标、环境扰动特性及施工工艺要求，编制专项施工环境监测方案，落实常态化环境监测工作。**

5.6.2 施工监测应采用与设计、施工相同的高程和坐标控制网，应定期对基准点进行复测。

5.6.3 当监测结果出现异常时，应及时查明原因，并采取必要措施。

## 6 质量检验与验收

### 6.1 质量检验

6.1.1 振杆密实法加固地基的工程质量检验时间应符合下列规定：

1 可液化粉土地基和液化土与软土互层地基处理工程的检测龄期不应少于28d，可液化砂土地基处理工程的检测龄期不应少于14d；

2 杂填土和湿陷性黄土地基处理工程的检测龄期不应少于7d；

3 粗粒混合土地基处理工程的检测龄期不应少于14d。

**【条文说明】6.1.1** 对于可液化地基，由于砂土的透水性较好，振杆密实法施工引起的超孔隙水压力消散较快，一般情况下砂土地基在施工完毕后14d即可进行检测。而粉土的排水性不如砂土，其检测时间应后推，一般可在施工完成28d后进行检测。液化土与软土互层地基中软弱土层排水条件不佳，应在施工完成至少28d后方可进行检测。对于湿陷性黄土地基和杂填土地基，由于不存在排水固结过程，因此在施工完成后7d即可进行检测，但在检测前必须对场地进行碾压和整平处理。粗粒混合土地基中细粒土需排水固结，因此在施工完成后14d进行检测。

6.1.2 振杆密实法处理地基的质量检测项目，应根据地基土类型、地基处理目的综合确定，检测方法及频率应符合表4的规定，且质量检测应满足下列要求：

1 处理液化地基的质量检验应进行地基液化判别，检验加固深度和加固均匀性。地基液化判别方法和加固效果评判标准应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011规定；检验方法可采用标准贯入试验、静力触探试验和室内土工试验等方法综合进行；

2 处理湿陷性黄土地基和粗粒混合土地基应检验地基土物理力学指标和湿陷系数，评价地基湿陷性。检测方法和加固效果评判标准应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025；

3 处理杂填土地基和粗粒混合土地基应检验地基土的密实度。检测方法和评判标准应符合现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202的规定；宜采用动力触探或其他原位测试方法进行。

表6.1.2 密实法地基处理工程检测方法及检测频率

| 地基处理<br>类型      | 检测方法           |            |            |           | 检测频率                                   |                                        | 备注                    |
|-----------------|----------------|------------|------------|-----------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
|                 | 标准<br>贯入<br>试验 | 静力触探试<br>验 | 动力触探试<br>验 | 湿陷性<br>试验 | 一般建筑物<br>（处理面积每<br>400m <sup>2</sup> ） | 重要建筑物<br>（处理面积每<br>300m <sup>2</sup> ） |                       |
| 可液化<br>地基       | √              | (√)        |            |           | 不少于1个点                                 | 不少于1个点                                 | 每个单体建<br>筑不少于3个<br>点。 |
| 湿陷性<br>黄土地<br>基 | √              | (√)        |            | √         | 不少于1个点                                 | 不少于1个点                                 | 每个单体建<br>筑不少于3个<br>点。 |
| 杂填土<br>地基       | √              |            | √          |           | 不少于1个点                                 | 不少于1个点                                 | 每个单体建<br>筑不少于3个<br>点。 |
| 粗粒混合<br>土地基     |                |            | √          | √         | 不少于1个点                                 | 不少于1个点                                 | 每个单体建<br>筑不少于3个<br>点。 |

注：“√”——必做项目；“(√)”——选做项目

【条文说明】6.1.2 砂土、粉土等可液化地基加固效果检验，应根据工程类型，按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》

*GB/T50011*有关规定，以标准贯入试验实测数据为核心依据，对加固后场地开展专项液化判别，核验地基抗液化加固效果。

湿陷性黄土地基加固效果检验，应按照现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》*GB 50025*的相关要求，采用井探方式采取原状土样，结合室内土工试验成果，综合评价处理后场地土体湿陷性消除效果，判定地基湿陷性改良是否达标。

杂填土、建筑垃圾土和粗颗粒地基的加固效果检验，应按照现行行业标准《建筑地基处理技术规范》*JGJ 79*有关规定，基于动力触探试验结果进行密实性评价。

## 6.2 验收

6.2.1 振杆密实法处理地基工程验收应在施工单位自检和质量检测（或抽检）均合格的基础上进行，其结论应以检测报告及设计要求为依据。

6.2.2 振杆密实法处理地基应作为一个分项工程进行验收，其验收批次应按照相同施工机械、相近工程地质单元，分段、分批次进行。

6.2.3 施工单位应在自检合格且资料齐全后提出验收申请。

6.2.4 工程验收应提供以下资料：

- 1 工程地质勘察报告、施工图、图纸会审及技术交底纪要、设计变更等；
- 2 振点测量放线图和记录，包括振点复核鉴证单；
- 3 振杆密实法施工记录表；
- 4 监督抽检资料；

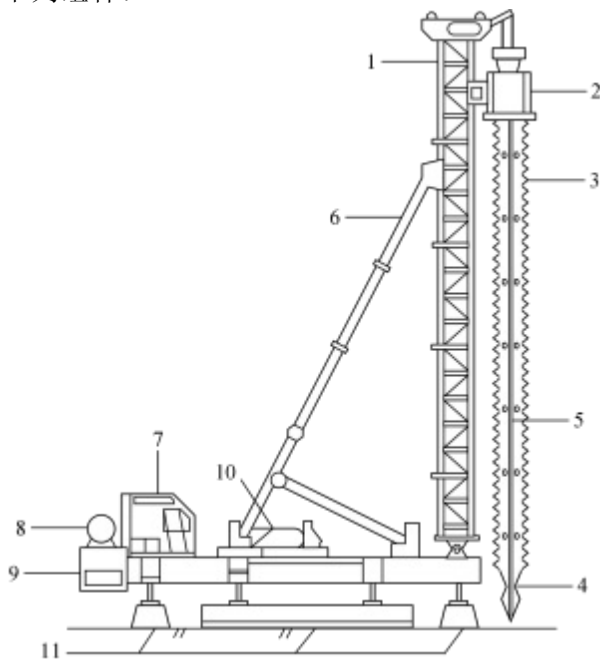
- 5 施工单位自检报告；
- 6 工程竣工平面图；
- 7 检测报告；
- 8 工程质量事故和事故调查处理资料。

**【条文说明】**6.2.4 采用智能化施工设备时，振杆密实法施工记录表宜由系统自动生成、打印。

6.2.5 工程完工后，应由参建相关单位共同开展本专项地基验收。

## 附录 A 振杆密实法施工设备性能参数

A.0.1 振杆密实法施工设备振杆密实法施工设备（图A.0.1），宜包括下列组件：



1 导向架；2 振动锤；3 振动杆；4 喷气口；5 导气管；6 支撑杆；7 控制室；8 储气罐；9 空压机；10 卷扬机；11 行走机构

图 A.0.1 振杆密实法施工设备图

A.0.2 振杆密实施工所用DZ系列振动锤规格应符合表A.0.2的规定，不同型号振动锤的场地适配范围应满足下列要求：

1 DZ60KS型振动锤：适用于处理深度8m以内的可液化地基；

2 DZ90KS型振动锤：适用于处理深度8m～15m的可液化地基、处理深度8m以内的湿陷性黄土地基及杂填土地基；

3 DZ120KS型振动锤：适用于处理深度8m～15m的湿陷性黄土地基及杂填土地基。

表 A.0.2 DZ系列振动锤规格

| 机械型号    | 电机功率<br>(kW) | 偏心力矩<br>(N·m) | 激振力<br>(kN) | 质量<br>(kg) |
|---------|--------------|---------------|-------------|------------|
| DZ60KS  | 60           | 270           | 360         | 5200       |
| DZ90KS  | 90           | 400           | 480         | 7200       |
| DZ120KS | 120          | 600           | 580         | 8800       |
| DZ150KS | 150          | 750           | 660         | 11000      |

A.0.3 十字形振动杆是由两根垂直相交的具有圆形通孔的钢板交叉连接成的横截面呈十字型的振动杆。振动杆顶部应配有和振动锤相连的法兰，四条直翼边设有连续的凸形三角齿，振杆截面每隔一定距离设有尖刺齿及圆孔。十字形振动杆总长应大于设计处理深度1m以上，质量不宜大于10t。在处理湿陷性黄土地基时应采用喷气型振动杆，振动杆底部的翼截面相互错开并对称设置4个喷气孔，孔径3mm~5 mm，与喷气孔相连的气管固定于交叉内侧。

A.0.4 振杆密实法施工应采用基于走管式或步履式平台的专用设备，导向架高度应满足振动杆起吊要求。施工平台宜包含智能化施工控制系统和卷扬机变频控制集成系统，当需要注气施工时，还需配备空气压缩机和储气罐。

A.0.5 振杆密实法智能化施工控制系统主要包括深度记录装置、摄像头和智能化控制柜。通过智能化控制柜可在施工开始前进行振动频率、注气压力、处理深度、留振时间、沉杆速度、提杆速度等关键参数的预先设定。在施工阶段可对

开始时间、结束时间、振杆X轴倾角、Y轴倾角、振动杆垂直度、振动杆当前贯入深度、工作电流等参数的实时监控。

附录 B 振杆密实法施工记录模板

表B 振杆密实法施工记录模板

工程项目名称：\_\_\_\_\_

施工单位：\_\_\_\_\_ 合同号：\_\_\_\_\_ 记录日期：\_\_\_\_\_

监理单位：\_\_\_\_\_ 编 号：\_\_\_\_\_

| 机械编号： |      | 施工段落：    |           | 加固间距 (m)： |      | 加固深度 (m)： |              | 记录日期：    |              |              |       |    |
|-------|------|----------|-----------|-----------|------|-----------|--------------|----------|--------------|--------------|-------|----|
| 序号    | 振点编号 | 施工深度 (m) | 振动频率 (Hz) |           | 开始时间 | 结束时间      | 单点施工时间 (min) | 悬停用时 (s) | 下沉速度 (m/min) | 上提速度 (m/min) | 垂直度 % | 备注 |
|       |      |          | 下沉        | 提升        |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 1     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 2     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 3     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 4     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 5     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 6     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |
| 7     |      |          |           |           |      |           |              |          |              |              |       |    |

机长：\_\_\_\_\_ 施工技术负责人：\_\_\_\_\_ 监理工程师：\_\_\_\_\_

## 本规范用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：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用词：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用词：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 规程中指明应按其他有关规程执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”

## 引用标准名录

- 《建筑与市政地基基础通用规范》GB55003
- 《建筑与市政工程抗震通用规范》GB55002
- 《工程勘察通用规范》GB55017
- 《工程测量通用规范》GB55018
- 《建筑施工噪声排放标准》GB 12523
- 《声环境质量标准》GB 3096
- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑抗震设计规范》GB/T 50011
- 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025
- 《工程测量标准》GB 50026
- 《土工试验方法标准》GB/T 50123
- 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202
- 《建筑工程容许振动标准》GB 50868
- 《软土地基路基监控标准》GB/T 51275
- 《建筑隔振设计标准》GB/T 51408
- 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 《建筑工程施工过程中结构分析与监测技术规范》JGJ/T 302
- 《建筑施工机械与设备振动桩锤》JB/T 10599
- 《岩土工程勘察标准》DB65/T 8035

新疆维吾尔自治区地方标准

# 振杆密实法地基处理技术规程

DB65/T XXXX—XXXX

条文说明