

中华人民共和国行业标准

**建筑地基处理技术规范**

Technical code for ground treatment of buildings

**JGJ 79-2002**

**J 220-2002**

2002 北 京

中华人民共和国行业标准

**建筑地基处理技术规范**

Technical code for ground treatment of buildings

**JGJ 79-2002**

主编部门：中国建筑科学研究院

批准部门：中华人民共和国建设部

施行日期：2003年1月1日

2002 北 京

# 中华人民共和国建设部 公 告

第 64 号

---

## 建设部关于发布行业标准 《建筑地基处理技术规范》公告

现批准《建筑地基处理技术规范》为行业标准，编号为 JGJ79—2002，自 2003 年 1 月 1 日起实施。其中，第 3.0.5、3.0.6、4.4.2、5.4.2、6.1.2、6.3.5、6.4.3、7.4.4、8.4.4、9.4.2、10.4.2、11.1.2、11.3.15、11.4.3、12.4.5、13.3.9、13.4.3、14.4.3、15.4.3、16.4.2 条为强制性条文，必须严格执行；原行业《建筑地基处理技术规范》JGJ79—91 同时废止。

中华人民共和国建设部  
二 二年九月二十七日

## 前 言

根据建设部建标[1997] 71 号文的要求，规范修订组在深入调查研究，认真总结国内外科研成果和大量实践经验，并在广泛征求意见基础上，全面修订了《建筑地基处理技术规范》JGJ 79—91。

本规范主要技术内容是：1.总则；2.术语、符号；3.基本规定；4.换填垫层法；5.预压法；6.强夯法和强夯置换法；7.振冲法；8.砂石桩法；9.水泥粉煤灰碎石桩法；10.夯实水泥土桩法；11.水泥土搅拌法；12.高压喷射注浆法；13.石灰桩法；14.灰土挤密桩法和土挤密桩法；15.柱锤冲扩桩法；16.单液硅化法和碱液法；17.其他地基处理方法等。

本规范主要修订内容是：

1.增加了强夯置换法、水泥粉煤灰碎石桩法、夯实水泥土桩法、水泥土搅拌法（干法）、石灰桩法和柱锤冲扩桩法等地基处理方法的设计和施工规定。

2.对原规范中总则、主要符号、基本规定、换填法、预压法、强夯法、振冲法、土或灰土挤密桩法、砂石桩法、深层搅拌法、高压喷射注浆法和复合地基载荷试验要点等内容均作了修改、补充和完善。

3.取消了托换法一章，对其内容作了调整：将单液硅化法和碱液法内容作了补充独立成章；将其他方法列入第 17 章。

本规范由建设部负责管理和对强制性条文的解释，由主编单位负责具体技术内容的解释。

本规范主编单位：中国建筑科学研究院（地址：北京市北三环东路 30 号，邮政编码：100013）

本规范参加单位：冶金建筑研究总院

陕西省建筑科学研究设计院

浙江大学

同济大学

湖北省建筑科学研究设计院

福建省建筑科学研究院

铁道部第四勘测设计院（上海）

河北工业大学

西安建筑科技大学

铁道部科学研究院

本规范主要起草人：张永钧（以下按姓名笔画为序）

王仁兴 王吉望 王恩远 平湧 潮

叶观宝 刘 毅 刘惠珊 张 峰

杨灿文 罗宇生 周国钧 侯伟生

袁 勋 袁内镇 涂光祉 阎明礼

康景俊 滕延京 潘秋元

# 目 录

前 言 .....	4
1 总 则 .....	9
2 术语、符号 .....	9
2.1 术 语 .....	9
2.2 符 号 .....	11
3 基本规定 .....	12
4 换填垫层法 .....	14
4.1 一般规定 .....	14
4.2 设 计 .....	14
4.3 施 工 .....	17
4.4 质 量 检 验 .....	18
5 预压法 .....	19
5.1 一般规定 .....	19
5.2 设 计 .....	19
5.3 施 工 .....	24
5.4 质 量 检 验 .....	25
6 强夯法和强夯置换法 .....	26
6.1 一般规定 .....	26
6.2 设 计 .....	26
6.3 施 工 .....	28
6.4 质 量 检 验 .....	30
7 振冲法 .....	31
7.1 一 般 规 定 .....	31

7.2 设 计.....	31
7.3 施 工 .....	33
7.4 质 量 检 验 .....	34
<b>8 砂石桩法 .....</b>	<b>35</b>
8.1 一 般 规 定 .....	35
8.2 设 计.....	35
8.3 施 工.....	37
8.4 质 量 检 验 .....	38
<b>9 水泥粉煤灰碎石桩法 .....</b>	<b>38</b>
9.1 一 般 规 定 .....	38
9.2 设 计.....	39
9.3 施 工.....	41
9.4 质 量 检 验 .....	42
<b>10 夯实水泥土桩法 .....</b>	<b>42</b>
10.1 一 般 规 定 .....	42
10.2 设 计.....	42
10.3 施 工.....	43
10.4 质 量 检 验 .....	44
<b>11 水泥土搅拌法 .....</b>	<b>44</b>
11.1 一 般 规 定 .....	44
11.2 设 计.....	45
11.3 施 工.....	47
11.4 质 量 检 验 .....	49
<b>12 高压喷射注浆法 .....</b>	<b>50</b>
12.1 一 般 规 定 .....	50
12.2 设 计.....	50
12.3 施 工.....	51
12.4 质 量 检 验 .....	52

13 石灰桩法 .....53

13.1 一般规定 ..... 53

13.2 设计..... 53

13.3 施工..... 54

13.4 质量检测 ..... 55

14 灰土挤密桩法和土挤密桩法 .....55

14.1 一般规定 ..... 55

14.2 设计..... 56

14.3 施工..... 57

14.4 质量检验 ..... 59

15 柱锤冲扩桩法 .....59

15.1 一般规定 ..... 59

15.2 设计..... 59

15.3 施工..... 60

15.4 质量检验 ..... 61

16 单液硅化法和碱液法 .....61

16.1 一般规定 ..... 61

16.2 设计..... 62

16.3 施工..... 64

16.4 质量检验 ..... 66

17 其他地基处理方法 ..... 67

附录 A 复合地基载荷试验要点 .....67

本规范用词说明 .....69



## 1 总 则

1.0.1 为了在地基处理的设计和施工中贯彻执行国家的技术经济政策,做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、保护环境,制定本规范。

1.0.2 本规范适用于建筑工程地基处理的设计、施工和质量检验。

1.0.3 地基处理除应满足工程设计要求外,尚应做到因地制宜、就地取材、保护环境和节约资源等。

1.0.4 建筑工程地基处理除应执行本规范外,尚应符合国家现行的有关强制性标准的规定。经处理后的地基计算时,尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。

## 2 术语、符号

### 2.1 术 语

2.1.1 地基处理 ground treatment

为提高地基承载力,改善其变形性质或渗透性质而采取的人工处理地基的方法。

2.1.2 复合地基 composite subgrade, composite foundation

部分土体被增强或被置换形成增强体,由增强体和周围地基土共同承担荷载的地基。

2.1.3 地基承载力特征值 characteristic value of subgrade bearing capacity

由载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内规定的变形所对应的压力值,其最大值为比例界限值。

2.1.4 换填垫层法 cushion

挖去地表浅层软弱土层或不均匀土层,回填坚硬、较粗粒径的材料,并夯压密实,形成垫层的地基处理方法。

2.1.5 顶压法 preloading

对地基进行堆载或真空预压,使地基土固结的地基处理方法。

2.1.6 真空预压法 vacuum preloading

通过对覆盖于竖井地基表面的不透气薄膜内抽真空,而使地基固结的地基处理方法。

2.1.7 强夯法 dynamic compaction, dynamic consolidation

反复将夯锤提到高处使其自由落下，给地基以冲击和振动能量，将地基土夯实的地基处理方法。

#### 2.1.8 强夯置换法 dynamic replacement

将重锤提到高处使其自由落下形成夯坑，并不断夯击坑内回填的砂石、钢渣等硬颗粒，使其形成密实的墩体的地基处理方法。

#### 2.1.9 振冲法 vibroflotation, vibro-replacement

在振冲器水平振动和高压水的共同作用下，使松砂土层振密，或在软弱土层中成孔，然后回填碎石等粗粒料形成桩柱，并和原地基土组成复合地基的地基处理方法。

#### 2.1.10 砂石桩法 sand-gravle pile

采用振动、冲击或水冲等方式在地基中成孔后，再将碎石、砂或砂石挤压入已成的孔中，形成砂石所构成的密实桩体，并和原桩周土组成复合地基的地基处理方法。

#### 2.1.11 水泥粉煤灰碎石桩法 cement-flyash-gravle pile

由水泥、粉煤灰、碎石、石屑或砂等混合料加水拌和形成高黏结强度桩，并由桩、桩间土和褥垫层一起组成复合地基的地基处理方法。

#### 2.1.12 夯实水泥土桩法 rammed soil-cement pile

将水泥和土按设计的比例拌和均匀，在孔内夯实至设计要求的密实度而形成的加固体，并与桩间土组成复合地基的地基处理方法。

#### 2.1.13 水泥土搅拌法 cement deep mixing

以水泥作为固化剂的主剂，通过特制的深层搅拌机械，将固化剂和地基土强制搅拌，使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体的地基处理方法。

#### 2.1.14 深层搅拌法 deep mixing

使用水泥浆作为固化剂的水泥土搅拌法。简称湿法。

#### 2.1.15 粉体喷搅法 dry jet mixing

使用水泥粉作为固化剂的水泥土搅拌法。简称干法。

#### 2.1.16 高压喷射注浆法 jet grouting

用高压水泥浆通过钻杆由水平方向的喷嘴喷出，形成喷射流，以此切割土体并与土拌和形成水泥土加固体的地基处理方法。

#### 2.1.17 石灰桩法 lime pile

由生石灰与粉煤灰等掺合料拌和均匀，在孔内分层夯实形成竖向增强体，并与桩间土组成复合地基的地基处理方法。

### 2.1.18 灰土挤密桩法 lime soil pile

利用横向挤压成孔设备成孔，使桩间土得以挤密。用灰土填入桩孔内分层夯实形成灰土桩，并与桩间土组成复合地基的地基处理方法。

### 2.1.19 土挤密桩法 earth pile

利用横向挤压成孔设备成孔，使桩间土得以挤密。用素土填入桩孔内分层夯实形成土桩，并与桩间土组成复合地基的地基处理方法。

### 2.1.20 柱锤冲扩桩法 piles thrust-expanged in column-hammer

反复将柱状重锤提到高处使其自由落下冲击成孔，然后分层填料夯实形成扩大桩体，与桩间土组成复合地基的地基处理方法。

### 2.1.21 单液硅化法 silicification grouting

采用硅酸钠溶液注入地基土层中，使土粒之间及其表面形成硅酸凝胶薄膜，增强了土颗粒间的联结，赋予土耐水性、稳固性和不湿陷性，并提高土的抗压和抗剪强度的地基处理方法。

### 2.1.22 碱液法 soda solution grouting

将加热后的碱液（即氢氧化钠溶液），以无压自流方式注入土中，使土粒表面溶合胶结形成难溶于水的，具有高强度的钙、铝硅酸盐络合物，从而达到消除黄土湿陷性，提高地基承载力的地基处理方法。

## 2.2 符 号

$A$ ——基础底面积；

$A_e$ ——一根桩分担的处理地基面积；

$A_p$ ——桩的截面积；

$b$ ——基础底面宽度；

$D_R$ ——砂土相对密实度；

$d$ ——桩身直径；

$d_e$ ——一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径、有效排水直径；

$e$ ——孔隙比；

$f_{ak}$ ——地基承载力特征值；

$f_{pk}$ ——桩体单位截面积承载力特征值；

$f_{sk}$ ——桩间土的承载力特征值；

$f_{spk}$ ——复合地基的承载力特征值；

$I_p$ ——塑性指数；

$l$ ——基础底面长度。桩长；

$m$ ——面积置换率；

$P_K$ ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力值；

$p_c$ ——基础底面处土的自重压力值；

$q_p$ ——桩端地基土的承载力特征值，桩端端阻力特征值；

$q_s$ ——桩周土的侧阻力特征值；

$R_K$ ——单桩竖向承载力特征值；

$S$ ——桩间距；

$U$ ——固结度；

$\omega_{op}$ ——最优含水量；

$z$ ——基础底面下换填垫层的厚度；

$\theta$ ——压力扩散角；

$\lambda_c$ ——压实系数；

$\rho_d$ ——干密度。

### 3 基本规定

**3.0.1** 在选择地基处理方案前，应完成下列工作：

- 1 搜集详细的岩土工程勘察资料、上部结构及基础设计资料等；
- 2 根据工程的要求和采用天然地基存在的主要问题，确定地基处理的目的、处理范围和处理后要求达到的各项技术经济指标等；
- 3 结合工程情况，了解当地地基处理经验和施工条件，对于有特殊要求的工程，尚应了解其他地区相似场地上同类工程的地基处理经验和使用情况等；

4 调查邻近建筑、地下工程和有关管线等情况；

5 了解建筑场地的环境情况。

**3.0.2** 在选择地基处理方案时，应考虑上部结构、基础和地基的共同作用，并经过技术经济比较，选用处理地基或加强上部结构和处理地基相结合的方案。

**3.0.3** 地基处理方法的确定宜按下列步骤进行：

1 根据结构类型、荷载大小及使用要求，结合地形地貌、地层结构、土质条件、地下水特征、环境情况和对邻近建筑的影响等因素进行综合分析，初步选出几种可供考虑的地基处理方案，包括选择两种或多种地基处理措施组成的综合处理方案；

2 对初步选出的各种地基处理方案，分别从加固原理、适用范围、预期处理效果、耗用材料、施工机械、工期要求和对环境的影响等方面进行技术经济分析和对比，选择最佳的地基处理方法；

3 对已选定的地基处理方法，宜按建筑物地基基础设计等级和场地复杂程度，在有代表性的场地上进行相应的现场试验或试验性施工，并进行必要的测试，以检验设计参数和处理效果。

如达不到设计要求时，应查明原因，修改设计参数或调整地基处理方法。

**3.0.4** 经处理后的地基，当按地基承载力确定基础底面积及埋深而需要对本规范确定的地基承载力特征值进行修正时，应符合下列规定：

1 基础宽度的地基承载力修正系数应取零；

2 基础埋深的地基承载力修正系数应取 1.0。

处理后的地基，当在受力层范围内仍存在软弱下卧层时，尚应验算下卧层的地基承载力。

对水泥土类桩复合地基尚应根据修正后的复合地基承载力特征值，进行桩身强度验算。

**3.0.5** 按地基变形设计或应作变形验算且需进行地基处理的建筑物或构筑物，应对处理后的地基础进行变形验算。

**3.0.6** 受较大水平荷载或位于斜坡上的建筑物及构筑物，当建造在处理后的地基上时，应进行地基稳定性验算。

**3.0.7** 施工技术人员应掌握所承担工程的地基处理目的、加固原理、技术要求和质量标准等。施工中应有专人负责质量控制和监测，并做好施工记录。当出现异常情况时，

必须及时会同有关部门妥善解决。施工过程中应进行质量监理，施工结束后必须按国家有关规定进行工程质量检验和验收。

3.0.8 复合地基载荷试验应符合本规范附录 A 的规定。

3.0.9 对于现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定需要进行地基变形计算的建筑物或构筑物，经地基处理后，应进行沉降观测，直至沉降达到稳定为止。

## 4 换填垫层法

### 4.1 一般规定

4.1.1 换填垫层法适用于浅层软弱地基及不均匀地基的处理。

4.1.2 应根据建筑体型、结构特点、荷载性质、岩土工程条件、施工机械设备及填料性质和来源等进行综合分析，进行换填垫层的设计和选择施工方法。

### 4.2 设计

4.2.1 垫层的厚度 应根据需置换软弱土的深度或下卧土层的承载力确定，并符合下式要求：

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (4.2.1-1)$$

式中  $p_z$ ——相应于荷载效应标准组合时，垫层底面处的附加压力值（kPa）；

$p_{cz}$ ——垫层底面处土的自重压力值（kPa）；

$f_{az}$ ——垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值（kPa）。

垫层底面处的附加压力值 可分别按（4.2.1-2）和（4.2.1-3）式计算：

条形基础

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} \quad (4.2.1-2)$$

矩形基础

$$p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)} \quad (4.2.1-3)$$

式中  $b$ ——矩形基础或条形基础底面的宽度（m）；

$l$ ——矩形基础底面的长度（m）；

$p_k$ ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力值（kPa）；

$p_c$ ——基础底面处土的自重压力值（kPa）；

$z$ ——基础底面下垫层的厚度（m）；

$\theta$ ——垫层的压力扩散角（°），宜通过试验确定，当无试验资料时，可按表 4.2.1 采用。

表 4.2.1 压力扩散角  $\theta$ （°）

换填材料 $z/b$	中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾、石屑、卵石、碎石、矿渣	粉质粘土、 粉煤土	灰土
0.25	20	6	28
0.50	30	23	

注：1 当  $z/b < 0.25$ ，除灰土取  $\theta = 28^\circ$  外，其余材料均取  $\theta = 0^\circ$ ，必要时，宜由试验确定；

2 当  $0.25 < z/b < 0.5$  时， $\theta$  值可内插求得。

换填垫层的厚度不宜小于 0.5m，也不宜大于 3m。

4.2.2 垫层底面的宽度应满足基础底面应力扩散的要求，可按下列式确定：

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \quad (4.2.2)$$

式中  $b'$ ——垫层底面宽度（m）；

$\theta$ ——压力扩散角，可按表 4.2.1 采用；当  $z/b < 0.25$  时，仍按表中  $z/b = 0.25$  取值。

整片垫层底面的宽度可根据施工的要求适当加宽。

垫层顶面宽度可从垫层底面两侧向上，按基坑开挖期间保持边坡稳定的当地经验放坡确定。垫层顶面每边超出基础底边不宜小于 300mm。

4.2.3 垫层的承载力宜通过现场载荷试验确定，并应进行下卧层承载力的验算。

4.2.4 对于垫层下存在软弱下卧层的建筑，在进行地基变形计算时应考虑邻近基础对软弱下卧层顶面应力叠加的影响。当超出原地面标高的垫层或换填材料的重度高于天然土层重度时，宜早换填，并应考虑其附加的荷载对建筑及邻近建筑的影响。

垫层地基的变形由垫层自身变形和下卧层变形组成。换填垫层在满足本规范第 4.2.1 条、第 4.2.2 条和第 4.2.6 条的条件下，垫层地基的变形可仅考虑其下卧层的变形。对沉降要求严的或垫层厚的建筑，应计算垫层自身的变形。

垫层下卧层的变形量可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定计算。

#### 4.2.5 垫层可选用下列材料：

1 砂石。宜选用碎石、卵石、角砾、圆砾、砾砂、粗砂、中砂或石屑（粒径小于 2mm 的部分不应超过总重的 45%），应级配良好，不含植物残体、垃圾等杂质。当使用粉细砂或石粉（粒径小于 0.075mm 的部分不超过总重的 9%）时，应掺入不少于总重 30%的碎石或卵石。砂石的最大粒径不宜大于 50mm。对湿陷性黄土地基，不得选用砂石等透水材料。

2 粉质粘土。土料中有机质含量不得超过 5%，亦不得含有冻土或膨胀土。当含有碎石时，其粒径不宜大于 50mm。用于湿陷性黄土或膨胀土地基的粉质粘土垫层，土料中不得夹有砖、瓦和石块。

3 灰土。体积配合比宜为 2：8 或 3：7。土料宜用粉质粘土，不宜使用块状粘土和砂质粉土，不得含有松软杂质，并应过筛，其颗粒不得大于 15mm。石灰宜用新鲜的消石灰，其颗粒不得大于 5mm。

4 粉煤灰。可用于道路，堆场和小型建筑，构筑物等的换填垫层。粉煤灰垫层上宜覆土 0.3～0.5m。粉煤灰垫层中采用掺加剂时，应通过试验确定其性能及适用条件。作为建筑物垫层的粉煤灰应符合有关放射性安全标准的要求。粉煤灰垫层中的金属构件、管网宜采取适当防腐措施。大量填筑粉煤灰时应考虑对地下水和土壤的环境影响。

5 矿渣，垫层使用的矿渣是指高炉重矿渣，可分为分级矿渣、混合矿渣及原状矿渣。矿渣垫层主要用于堆场、道路和地坪，也可用于小型建筑，构筑物地基。选用矿渣的松散重度不小于  $11\text{kN/m}^3$ ，有机质及含泥总量不超过 5%。设计、施工前必须对选用的矿渣进行试验，在确认其性能稳定并符合安全规定后方可使用。作为建筑物垫层的矿渣应符合对放射性安全标准的要求。易受酸、碱影响的基础或地下管网不得采用矿渣垫层。大量填筑矿渣时，应考虑对地下水和土壤的环境影响。

6 其他工业废渣。在有可靠试验结果或成功工程经验时，对质地坚硬、性能稳定、无腐蚀性和放射性危害的工业废渣等均可用于填筑换填垫层。被选用工业废渣的粒径、级配和施工工艺等应通过试验确定。

7 土工合成材料。由分层铺设的土工合成材料与地基土构成加筋垫层。所用土工合成材料的品种、性能及填料的土类应根据工程特性和地基土条件，按照现行国家标准《土工合成材料应用技术规范》GB 50290 的要求，通过设计并进行现场试验后确定。

作为加筋的土工合成材料应采用抗拉强度较高、受力时伸长率不大于 4%～5%、耐久性好、抗腐蚀的土工格栅、土工格室、土工垫或土工织物等土工合成材料；垫层填料宜



用碎石、角砾、砾砂、粗砂、中砂或粉质粘土等材料。当工程要求垫层具有排水功能时，垫层材料应具有良好的透水性。

在软土地基上使用加筋垫层时，应保证建筑稳定并满足允许变形的要求。

4.2.6 垫层的压实标准可按表 4.2.6 选用：

表 4.2.6 各种垫层的压实标准		
施工方法	换填材料类别	压实数
碾压、振密或夯实	碎石、卵石	0.94 ~ 0.97
	砂夹石（其中碎石、卵石占全重的 30% ~ 50%）	
	土夹石（其中碎石、卵石占全重的 30% ~ 50%）	
碾压、振密或夯实	中砂、粗砂、砾砂、角砾、圆砾、石屑	0.94 ~ 0.97
	粉质粘土	
	灰土	0.95
	粉煤灰	0.90 ~ 0.95

- 注：1 压实系数  $\lambda_c$ ，为土的控制干密度  $\rho_d$  与最大干密度  $\rho_{d\max}$  的比值；土的最大干密度宜采用击实试验确定，碎石或卵石的最大干密度可取  $2.0 \sim 2.2\text{t/m}^3$ ；
- 2 当采用轻型击实试验时，压实系数  $\lambda_c$ 。宜取高值，采用重型击实试验时，压实系数  $\lambda_c$ 。可取低值；
- 3 矿渣垫层的压实指标为最后二遍压实的压陷差小于 2mm。

4.2.7 对于工程量较大的换填垫层，应按所选用的施工机械、换填材料及场地的土质条件进行现场试验，以确定压实效果。

4.3 施 工

4.3.1 垫层施工应根据不同的换填材料选择施工机械。粉质粘土、灰土宜采用平碾。振动碾或羊足碾，中小型工程也可采用蛙式夯、柴油夯，砂石等宜用振动碾，粉煤灰宜采用平碾，振动碾、平板振动器，蛙式夯。矿渣宜采用平板振动器或平碾，也可采用振动碾。

4.3.2 垫层的施工方法、分层铺填厚度，每层压实遍数等宜通过试验确定。除接触下卧软土层的垫层底部应根据施工机械设备及下卧层土质条件确定厚度外，一般情况下，垫层的分层铺填厚度可取 200 ~ 300mm。为保证分层压实质量，应控制机械碾压速度。

**4.3.3** 粉质粘土和灰土垫层土料的施工含水量宜控制在最优含水量  $\omega_{op} \pm 20\%$  的范围内，粉煤灰垫层的施工含水量宜控制在  $\omega_{op} \pm 40\%$  的范围内，最优含水量可通过击实试验确定，也可按当地经验取用。

**4.3.4** 当垫层底部存在古井、古墓、洞穴、旧基础、暗塘等软硬不均的部位时，应根据建筑对不均匀沉降的要求予以处理，并经检验合格后，方可铺填垫层。

**4.3.5** 基坑开挖时应避免坑底上层受扰动，可保留约 200mm 厚的土层暂不挖去，待铺填垫层前再挖至设计标高。严禁扰动垫层下的软弱土层，防止其被践踏。受冻或受水浸泡。在碎石或卵石垫层底部宜设置 150 ~ 300mm 厚的砂垫层或铺一层土工织物，以防止软弱土层表面的局部破坏，同时必须防止基坑边坡坍土混入垫层。

**4.3.6** 换填垫层施工应注意基坑排水，除采用水撼法施工砂垫层外，不得在浸水条件下施工，必要时应采用降低地下水位的措施。

**4.3.7** 垫层底面宜设在同一标高上，如深度不同，基坑底土面应挖成阶梯或斜坡搭接，并按先深后浅的顺序进行垫层施工，搭接处应夯压密实。

粉质粘土及灰土垫层分段施工时，不得在柱基、墙角及承重窗间墙下接缝。上下两层的缝距不得小于 500mm。接缝处应夯压密实，灰土应拌合均匀并应当日铺填夯压。灰土夯压密实后 3d 内不得受水浸泡。粉煤灰垫层铺填后宜当天压实，每层验收后应及时铺填上层或封层，防止干燥后松散起尘污染，同时应禁止车辆碾压通行。

垫层竣工验收合格后，应及时进行基础施工与基坑回填。

**4.3.8** 铺设土工合成材料时，下铺地基土层顶面应平整，防止土工合成材料被刺穿、顶破。铺设时应把土工合成材料张拉平直、绷紧，严禁有折皱；端头应固定或回折锚固；切忌曝晒或裸露；连结宜用搭接法、缝接法和胶结法，并均应保证主要受力方向的连结强度不低于所采用材料的抗拉强度。

## **4.4 质量检验**

**4.4.1** 对粉质粘土、灰土、粉煤灰和砂石垫层的施工质量检验可用环刀法、贯入仪、静力触探、轻型动力触探或标准贯入试验检验；对砂石、矿渣垫层可用重型动力触探检验，并均应通过现场试验以设计压实系数所对应的贯入度为标准检验垫层的施工质量。压实系数也可采用环刀法、灌砂法、灌水法或其他方法检验。

**4.4.2** 垫层的施工质量检验必须分层进行。应在每层的压实系数符合设计要求后铺填上层土。

4.4.3 采用环刀法检验垫层的施工质量时，取样点应位于每层厚度的 2/3 深度处。检验点数量，对大基坑每 50 ~ 100m<sup>2</sup> 不应少于 1 个检验点；对基槽每 10 ~ 20m 不应少于 1 个点；每个独立柱基不应少于 1 个点。采用贯入仪或动力触探检验垫层的施工质量时，每分层检验点的间距应小于 4m。

4.4.4 竣工验收采用载荷试验检验垫层承载力时，每个单体工程不宜少于 3 点；对于大型工程则应按单体工程的数量或工程的面积确定检验点数。

## 5 预压法

### 5.1 一般规定

5.1.1 预压法包括堆载预压法和真空预压法。预压法适用于处理淤泥质土、淤泥和冲填土等饱和粘性土地基。

5.1.2 顶压法处理地基应预先通过勘察查明土层在水平和竖直方向的分布、层理变化，查明透水层的位置、地下水类型及水源补给情况等。并应通过土工试验确定土层的光期固结压力、孔隙比与固结压力的关系、渗透系数、固结系数、三轴试验抗剪强度指标以及原位十字板抗剪强度等。

5.1.3 对重要工程，应在现场选择试验区进行预压试验，在预压过程中应进行地基竖向变形、侧向位移、孔隙水压力、地下水位等项目的监测并进行原位十字板剪切试验和室内土工试验。根据试验区获得的监测资料确定加载速率控制指标、推算土的固结系数、固结度及最终竖向变形等，分析地基处理效果，对原设计进行修正，并指导全场的设计与施工。

5.1.4 对堆载预压工程，预压荷载应分级逐渐施加，确保每级荷载下地基的稳定性，而对真空预压工程，可一次连续抽真空至最大压力。

5.1.5 对主要以变形控制的建筑，当塑料排水带或砂井等排水竖井处理深度范围和竖井底面以下受压土层经预压所完成的变形量和平均固结度符合设计要求时，方可卸载。

对主要以地基承载力或抗滑稳定性控制的建筑，当地基土经预压而增长的强度满足建筑物地基承载力或稳定性要求时，方可卸载。

### 5.2 设 计

#### ( ) 堆 载 预 压 法

5.2.1 对深厚软粘土地基，应设置塑料排水带或砂井等排水竖井。当软土层厚度不大或软土层含较多薄粉砂夹层，且固结速率能满足工期要求时，可不设置排水竖井。

5.2.2 堆载预压法处理地基的设计应包括下列内容：

- 1 选择塑料排水带或砂井，确定其断面尺寸、间距、排列方式和深度；
- 2 确定预压区范围。预压荷载大小、荷载分级、加载速率和预压时间；
- 3 计算地基土的固结度。强度增长。抗滑稳定性和变形。

5.2.3 排水竖井分普通砂井，袋装砂井和塑料排水带。普通砂井直径可取 300 ~ 500mm，袋装砂井直径可取 70 ~ 120mm。塑料排水带的当量换算直径可按下式计算：

$$d_p = \frac{2(b + \delta)}{\pi} \quad (5.2.3)$$

式中  $d_p$ ——塑料排水带当量换算直径 (mm)；

$b$ ——塑料排水带宽度 (mm)；

$\delta$ ——塑料排水带厚度 (mm)。

5.2.4 排水竖井的平面布置可采用等边三角形或正方形排列。竖井的有效排水直径  $d_e$  与间距  $l$  的关系为：

等边三角形排列  $d_e = 1.05l$

正方形排列  $d_e = 1.13l$

5.2.5 排水竖井的间距可根据地基土的固结特性和预定时间内所要求达到的固结度确定。设计时，竖井的间距可按井径  $n$  比选用 ( $n = d_e / d_w$ ,  $d_w$  为竖井直径，对塑料排水带可取  $d_w = d_p$ )。塑料排水带或袋装砂井的间距可按  $n = 15 \sim 22$  选用，普通砂井的间距可按  $n = 6 \sim 8$  选用。

5.2.6 排水竖井的深度应根据建筑物对地基的稳定性、变形要求和工期确定。

对以地基抗滑稳定性控制的工程，竖井深度至少应超过最危险滑动面 2.0m。

对以变形控制的建筑，竖井深度应根据在限定的预压时间内需完成的变形量确定。竖井宜穿透受压土层。

5.2.7 一级或多级等速加载条件下，当固结时间为  $t$  时，对应总荷载的地基平均固结度可按下式计算：

$$\bar{U}_t = \sum_{i=1}^n \frac{\dot{q}_i}{\Sigma \Delta p} \left[ (T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right] \quad (5.2.7)$$

式中  $\bar{U}_t$ —— $t$  时间地基的平均固结度；

$\dot{q}_i$ ——第  $i$  级荷载的加载速率 (kpa/d)；

$\Sigma \Delta p$ ——各级荷载的累加值 (kPa)；

$T_{i-1}$  ,  $T_i$ ——分别为第  $i$  级荷载加载的起始和终止时间 (从零点起算) (d)，当

计算第  $i$  级荷载加载过程中某时间  $t$  的固结度时， $T_i$  改为  $t$ ；

$\alpha$  ,  $\beta$ ——参数，根据地基土排水固结条件按表 5.2.7 采用。对竖井地基，表中所列  $\beta$  为不考虑涂抹和井阻影响的参数值。

表 5.2.7  $\alpha$  ,  $\beta$  值

排水固结 条件 参数	竖向排水 固结 $\bar{U}_z > 30\%$	向内径向 排水固结	竖向和向内径向 排水固结 (竖井 穿透受压土层)	说 明
$\alpha$	$\frac{8}{\pi^2}$	1	$\frac{8}{\pi^2}$	$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} 1n(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$
$\beta$	$\frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$	$\frac{8c_h}{F_n d_e^2}$	$\frac{8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$	$c_h$ ——土的径向排水固结系数 (cm <sup>2</sup> /s) $c_v$ ——土的竖向排水固结系数 (cm <sup>2</sup> /s) $H$ ——土层竖向排水距离 (cm) $\bar{U}_z$ ——双面排水层或固结应力均匀分布的单面排水土层平均固结度

5.2.8 当排水竖井采用挤土方式施工时，应考虑涂抹对土体固结的影响。当竖井的纵向通水量与天然土层水平向渗透系数的比值较小，且长度又较长时，尚应考虑井阻影响。瞬时加载条件下，考虑涂抹和井阻影响时，竖井地基径向排水平均固结度可按下列式计算：

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\frac{8c_h}{F_n d_e^2} t} \tag{5.2.8-1}$$

$$F = F_n + F_s + F_r \tag{5.2.8-2}$$

$$F_n = 1n(n) - \frac{3}{4} \qquad n \leq 15 \tag{5.2.8-3}$$

$$F_s = \left[ \frac{k_h}{k_s} - 1 \right] \ln s \quad (5.2.8-4)$$

$$F_r = \frac{\pi^2 L^2}{4} \frac{k_h}{q_w} \quad (5.2.8-5)$$

式中  $\bar{U}_r$ ——固结时间，时竖井地基径向排水平均固结度；

$k_h$ ——天然上层水平向渗透系数（cm/s）；

$k_s$ ——涂抹区土的水平向渗透系数，可取  $k_s = (1/5 \sim 1/3) k_h$ （cm/s）；

$s$ ——涂抹区直径  $d_s$  与竖井直径  $d_w$  的比值，可取  $s = 2.0 \sim 3.0$ ，对中等灵敏粘性土取低值，对高灵敏粘性土取高值；

$L$ ——竖井深度（cm）；

$q_w$ ——井纵向通水量，为单位水力梯度下单位时间的排水量（cm<sup>3</sup>/s）；

一级或多级等速加荷条件下，考虑涂抹和井阻影响时竖井穿透受压土层地基之平均固结度可按式（5.2.7）计算；其中  $\alpha = \frac{8}{\pi^2}$ ， $\beta = \frac{8c_h}{Fd_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$ 。

**5.2.9** 对排水竖井未穿透受压土层之地基，应分别计算竖井范围土层的平均固结度和竖井底面以下受压土层的平均固结度，通过预压使该两部分固结度和所完成的变形量满足设计要求。

**5.2.10** 预压荷载大小应根据设计要求确定。对于沉降有严格限制的建筑，应采用超载预压法处理，超载量大小应根据预压时间内要求完成的变形量通过计算确定，并宜使预压荷载下受压土层各点的有效竖向应力大于建筑物荷载引起的相应点的附加应力。

预压荷载顶面的范围应等于或大于建筑物基础外缘所包围的范围。

加载速率应根据地基土的强度确定。当天然地基土的强度满足预压荷载下地基的稳定性要求时，可一次性加载，否则应分级逐渐加载，待前期预压荷载下地基土的强度增长满足下一级荷载下地基的稳定性要求时方可加载。

**5.2.11** 计算预压荷载下饱和粘性土地基中某点的抗剪强度时，应考虑土体原来的固结状态，对正常固结饱和粘性土地基，某点某一时间的抗剪强度可按下式计算：

$$\tau_{ft} = \tau_{f0} + \Delta\sigma_z \bullet U_t \tan \varphi_{cu} \quad (5.2.11)$$

式中  $\tau_{ft}$ —— $t$ 时刻，该点土的抗剪强度（kPa）；

$\tau_{f0}$ ——地基土的天然抗剪强度（kPa）；

$\Delta\sigma_z$ ——预压荷载引起的该点的附加竖向应力（kPa）；

$U_t$ ——该点土的固结度；

$\varphi_{cu}$ ——三轴固结不排水压缩试验求得的土的内摩擦角（°）；

**5.2.12** 预压荷载下地基的最终竖向变形量可按式计算：

$$sf = \xi \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (5.2.12)$$

式中  $sf$ ——最终竖向变形量（m）；

$e_{0i}$ ——第 $i$ 层中点土自重应力所对应的孔隙比，由室内固结试验 $e-p$ 曲线查得；

$e_{1i}$ ——第 $i$ 层中点土自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比，由室内固结试验 $e-p$ 曲线查得；

$h_i$ ——第 $i$ 层土层厚度（m）；

$\xi$ ——经验系数，对正常固结饱和粘性土地基可取 $\xi=1.1 \sim 1.4$ 。荷载较大、地基土较软弱时取较大值，否则取较小值。

变形计算时，可取附加应力与土自重应力的比值为 0.1 的深度作为受压层的计算深度。

**5.2.13** 预压法处理地基必须在地表铺设与排水竖井相连的砂垫层，砂垫层厚度不应小于 500mm。砂垫层砂料宜用中粗砂，粘粒含量不宜大于 3%，砂料中可混有少量粒径小于 50mm 的砾石。砂垫层的干密度应大于  $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ ，其渗透系数宜大于  $1 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ 。在预压区边缘应设置排水沟，在预压区内宜设置与砂垫层相连的排水盲沟。

**5.2.14** 砂井的砂料应选用中粗砂，其粘粒含量不应大于 3%。

### （ ） 真 空 预 压 法

**5.2.15** 真空预压法处理地基必须设置排水竖井。设计内容包括：竖井断面尺

寸、间距、排列方式和深度的选择；预压区面积和分块大小；真空预压工艺；要求达到的真空度和土层的固结度；真空预压和建筑物荷载下地基的变形计算；真空预压后地基土的强度增长计算等。

5.2.16 排水竖井的间距可按本规范第 5.2.5 条选用。

砂井的砂料应选用中粗砂，其渗透系数应大于  $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。

5.2.17 真空预压区边缘应大于建筑物基础轮廓线，每边增加量不得小于 3.0m。每块预压面积宜尽可能大且呈方形。

5.2.18 真空预压的膜下真空度应稳定地保持在 650mmHg 以上，且应均匀分布，竖井深度范围内土层的平均固结度应大于 90%。

5.2.19 当建筑物的荷载超过真空预压的压力，且建筑物对地基变形有严格要求时，可采用真空-堆载联合预压法，其总压力宜超过建筑物的荷载。

5.2.20 对于表层存在良好的透气层或在处理范围内有充足水源补给的透水层时，应采取有效措施隔断透气层或透水层。

5.2.21 真空预压地基最终竖向变形可按本规范第 5.2.12 条计算，其中  $\xi$  可取 0.8~0.9 真空-堆载联合预压法以真空预压为主时， $\xi$  可取 0.9。

5.2.22 真空预压所需抽真空设备的数量，可按加固面积的大小和形状、土层结构特点，以一套设备可抽真空的面积为 1000~1500m<sup>2</sup> 确定。

## 5.3 施 工

### ( ) 堆 载 预 压 法

5.3.1 塑料排水带的性能指标必须符合设计要求。塑料排水带在现场应妥加保护，防止阳光照射、破损或污染，破损或污染的塑料排水带不得在工程中使用。

5.3.2 砂井的灌砂量，应按井孔的体积和砂在中密状态时的干密度计算，其实际灌砂量不得小于计算值的 95%。

灌入砂袋中的砂宜用于砂，并应灌制密实。

5.3.3 塑料排水带和袋装砂井施工时，宜配置能检测其深度的设备。

5.3.4 塑料排水带施工所用套管应保证插入地基中的带子不扭曲。塑料排水带需接长时，应采用滤膜内芯带平搭接的连接方法，搭接长度宜大于 200mm。袋装砂井施工所用套管内径宜略大于砂井直径。

塑料排水带和袋装砂井施工时，平面井距偏差不应大于井径，垂直度偏差不应



大于 1.5%，深度不得小于设计要求。

塑料排水带和袋装砂井砂袋埋入砂垫层中的长度不应小于 500mm。

**5.3.5** 对堆载预压工程，在加载过程中应进行竖向变形、边桩水平位移及孔隙水压力等项目的监测，且根据监测资料控制加载速率。对竖井地基，最大竖向变形量每天不应超过 15mm，对天然地基，最大竖向变形量每天不应超过 10mm；边桩水平位移每天不应超过 5mm，并且应根据上述观察资料综合分析、判断地基的稳定性。

### **( ) 真 空 预 压 洁**

**5.3.6** 真空预压的抽气设备宜采用射流真空泵，空抽时必须达到 95kPa 以上的真空吸力，真空泵的设置应根据预压面积大小和形状、真空泵效率和工程经验确定，们每块预压区至少应设置两台真空泵。

**5.3.7** 真空管路的连接应严格密封，在真空管路中应设置止回阀和截门。

水平向分布滤水管可采用条状，梳齿状及羽毛状等形式，滤水管布置宜形成回路。滤水管应设在砂垫层中，其上覆盖厚度 100~200mm 的砂层。滤水管可采用钢管或塑料管，外包尼龙纱或土工织物等滤水材料。

**5.3.8** 密封膜应采用抗老化性能好、韧性好、抗穿刺性能强的不透水材料。密封膜热合时宜采用双热合缝的平搭接，搭接宽度应大于 15mm。

密封膜宜铺设三层，膜周边可采用挖沟埋膜、平铺并用粘上覆盖压边、围捻沟内及膜上覆水等方法进行密封。

**5.3.9** 采用真空-堆载联合预压时，先进行抽真空，当真空压力达到设计要求并稳定后，再进行堆载，并继续抽气，堆载时需在膜上铺设土工编织布等保护材料。

## **5.4 质 量 检 验**

**5.4.1** 施工过程质量检验和监测应包括以下内容：

- 1 塑料排水带必须现场随机抽样送往实验室进行性能指标的测试，其性能指标包括纵向通水量、复合体抗拉强度、滤膜抗拉强度、滤膜渗透系数和等效孔径等。
- 2 对不同来源的砂井和砂垫层砂料，必须取样进行颗粒分析和渗透性试验。
- 3 对于以抗滑稳定控制的重要工程，应在预压区内选择代表性地点预留孔位，在加载不同阶段进行原位十字板剪切试验和取土进行室内土工试验。
- 4 对预压工程，应进行地基竖向变形，侧向位移和孔隙水压力等项目的监测。
- 5 真空预压工程除应进行地基变形、孔隙水压力的监测外，尚应进行膜下真空

度和地下水位的量测。

5.4.2 预压法竣工验收检验应符合下列规定：

- 1 排水竖井处理深度范围内和竖井底面以下受压土层 ,经预压所完成的竖向变形和平均固结度应满足设计要求。
- 2 应对预压的地基土进行原位十字板剪切试验和室内土工试验。必要时 ,尚应进行现场载荷试验 , 试验数量不应少于 3 点。

6 强夯法和强夯置换法

6.1 一般规定

- 6.1.1 强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基。强夯置换法适用于高饱和度的粉土与软塑 ~ 流塑的粘性土等地基上对变形控制要求不严的工程。
- 6.1.2 强夯置换法在设计前必须通过现场试验确定其运用性和处理效果。
- 6.1.3 强夯和强夯置换施工前 ,应在施工现场有代表性的场地上选取一个或几个试验区 , 进行试夯或试验性施工 , 试验区数量应根据建筑场地复杂程度、建筑规模及建筑类型确定。

6.2 设 计

( ) 强 夯 法

- 6.2.1 强夯法的有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定。  
在缺少试验资料或经验时可按表 6.2.1 预估。

表 6.2.1 强夯法的有效加固深度 ( m )

单击夯击能 ( Kn · m )	碎石土、砂土等 粗颗粒土	粉土、粘性土、湿陷性 黄土等细颗粒土
1000	5.0 ~ 6.0	4.0 ~ 5.0
2000	6.0 ~ 7.0	5.0 ~ 6.0
3000	7.0 ~ 8.0	6.0 ~ 7.0
4000	8.0 ~ 9.0	7.0 ~ 8.0
5000	9.0 ~ 9.5	8.0 ~ 8.5
6000	9.5 ~ 10.0	8.5 ~ 9.0
8000	10.0 ~ 10.5	9.0 ~ 9.5

注：强夯法的有效加固深度应从最初起夯面算起。

**6.2.2** 夯点的夯击次数，应按现场试夯得到的夯击次数和夯沉量关系曲线确定，并应同时满足下列条件：

1 最后两击的平均夯沉量不宜大于下列数值：当单击夯击能小于  $400\text{kN}\cdot\text{m}$  时为  $50\text{mm}$ ；当单击夯击能为  $4000\sim 6000\text{kN}\cdot\text{m}$  时为  $100\text{mm}$ ；当单击夯击能大于  $6000\text{kN}\cdot\text{m}$  时为  $200\text{mm}$ ；

2 夯坑周围地面不应发生过大的隆起；

3 不因夯坑过深而发生提锤困难。

**6.2.3** 夯击遍数应根据地基土的性质确定，可采用点夯  $2\sim 3$  遍，对于渗透性较差的细颗粒土，必要时夯击遍数可适当增加。最后再以低能量满夯  $2$  遍，满夯可采用轻锤或低落距锤多次夯击，锤印搭接。

**6.2.4** 两遍夯击之间应有一定的时间间隔，间隔时间取决于土中超静孔隙水压力的消散时间。当缺少实测资料时，可根据地基土的渗透性确定，对于渗透性较差的粘性土地基，间隔时间不应少于  $3\sim 4$  周；对于渗透性好的地基可连续夯击。

**6.2.5** 夯击点位置可根据基底平面形状，采用等边三角形、等腰三角形或正方形布置。第一遍夯击点间距可取夯锤直径的  $2.5\sim 3.5$  倍，第二遍夯击点位于第一遍夯击点之间。以后各遍夯击点间距可适当减小。对处理深度较深或单击夯击能较大的工程，第一遍夯击点间距宜适当增大。

**6.2.6** 强夯处理范围应大于建筑物基础范围，每边超出基础外缘的宽度宜为基底设计处理深度的  $1/2$  至  $2/3$ ，并不宜小于  $3\text{m}$ 。

**6.2.7** 根据初步确定的强夯参数，提出强夯试验方案，进行现场试夯。应根据不同土质条件待试夯结束一至数周后，对试夯场地进行检测，并与夯前测试数据进行对比，检验强夯效果，确定工程采用的各项强夯参数。

**6.2.8** 强夯地基承载力特征值应通过现场载荷试验确定，初步设计时也可根据夯后原位测试和土工试验指标按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定确定。

**6.2.9** 强夯地基变形计算应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定。夯后有效加固深度内土层的压缩模量应通过原位测试或土工试验确定。

## ( ) 强 夯 置 换 洁

6.2.10 强夯置换墩的深度由土质条件决定，除厚层饱和粉土外，应穿透软土层，到达较硬土层上，深度不宜超过 7m。

6.2.11 强夯置换法的单击夯击能应根据现场试验确定。

6.2.12 墩体材料可采用级配良好的块石、碎石、矿渣、建筑垃圾等坚硬粗颗粒材料，粒径大于 300mm 的颗粒含量不宜超过全重的 30%。

6.2.13 夯点的夯击次数应通过现场试夯确定，且应同时满足下列条件：

- 1 墩底穿透软弱土层，且达到设计墩长；
- 2 累计夯沉量为设计墩长的 1.5 ~ 2.0 倍；
- 3 最后两击的平均夯沉量不大于本规范第 6.2.2 条的规定值。

6.2.14 墩位布置宜采用等边三角形或正方形。对独立基础或条形基础可根据基础形状与宽度相应布置。

6.2.15 墩间距应根据荷载大小和原土的承载力选定，当满堂布置时可取夯锤直径的 2 ~ 3 倍。对独立基础或条形基础可取夯锤直径的 1.5 ~ 2.0 倍。墩的计算直径可取夯锤直径的 1.1 ~ 1.2 倍。

6.2.16 当墩间净距较大时，应适当提高上部结构和基础的刚度。

6.2.17 强夯置换处理范围应按本规范第 6.2.6 条执行。

6.2.18 墩顶应铺设一层厚度不小于 500mm 的压实垫层，垫层材料可与墩体相同，粒径不宜大于 100mm。

6.2.19 强夯置换设计时，应预估地面抬高值，并在试夯时校正。

6.2.20 强夯置换法试验方案的确定，应符合本规范第 6.2.7 条的规定，检测项目除进行现场载荷试验检测承载力和变形模量外，尚应采用超重型或重型动力触探等方法，检查置换墩着底情况及承载力与密度随深度的变化。

6.2.21 确定软粘性土中强夯置换墩地基承载力特征值时，可只考虑墩体，不考虑墩间土的作用，其承载力应通过现场单墩载荷试验确定，对饱和粉土地基可按复合地基考虑，其承载力可通过现场单墩复合地基载荷试验确定。

6.2.22 强夯置换地基的变形计算应符合本规范第 7.2.9 条的规定。

## 6.3 施 工

6.3.1 强夯锤质量可取 10 ~ 40t，其底面形式宜采用圆形或多边形，锤底面积宜按土的性质确定，锤底静接地压力值可取 25 ~ 40kPa，对于细颗粒土锤底静接地压

力宜取较小值。锤的底面宜对称设置若干个与其顶面贯通的排气孔，孔径可取 250 ~ 300mm。强夯置换锤底静接地压力值可取 100 ~ 200kPa。

**6.3.2** 施工机械宜采用带有自动脱钩装置的履带式起重机或其他专用设备。采用履带式起重机时，可在臂杆端部设置辅助门架，或采取其他安全措施，防止落锤时机架倾覆。

**6.3.3** 当场地表土软弱或地下水位较高，夯坑底积水影响施工时，宜采用人工降低地下水位或铺填一定厚度的松散性材料，使地下水位低于坑底面以下 2m。坑内或场地积水应及时排除。

**6.3.4** 施工前应查明场地范围内的地下构筑物和各种地下管线的位置及标高，并采取必要的措施，避免因施工而造成损坏。

**6.3.5** 当强夯施工所产生的振动对邻近建筑物或设备会产生有害的影响时，应设置监测点，并采取挖同振沟等隔振或防振措施。

**6.3.6** 强夯施工可按下列步骤进行：

- 1 清理并平整施工场地；
- 2 标出第一遍夯点位置，并测量场地高程；
- 3 起重机就位，夯锤置于夯点位置；
- 4 测量夯前锤顶高程；
- 5 将夯锤起吊到预定高度，开启脱钩装置，待夯锤脱钩自由下落后，放下吊钩，测量锤顶高程，若发现因坑底倾斜而造成夯锤歪斜时，应及时将坑底整平；
- 6 重复步骤 5，按设计规定的夯击次数及控制标准，完成一个夯点的夯击；
- 7 换夯点，重复步骤 3 至 6，完成第一遍全部夯点的夯击；
- 8 用推土机将夯坑填平，并测量场地高程；
- 9 在规定的间隔时间后，按上述步骤逐次完成全部夯击遍数，最后用低能量满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

**6.3.7** 强夯置换施工可按下列步骤进行：

- 1 清理并平整施工场地，当表土松软时可铺设一层厚度为 1.0 ~ 2.0m 的砂石施工垫层；
- 2 标出夯点位置，并测量场地高程；
- 3 起重机就位，夯锤置于夯点位置；
- 4 测量夯前锤顶高程；

5 夯击并逐击记录夯坑深度。当夯坑过深而发生起锤困难时停夯，向坑内填料直至与坑顶平，记录填料数量，如此重复直至满足规定的夯击次数及控制标准完成一个墩体的夯击。当夯点周围软土挤出影响施工时，可随时清理并在夯点周围铺垫碎石，继续施工；

6 按由内而外，隔行跳打原则完成全部夯点的施工；

7 推平场地，用低能量满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程；

8 铺设垫层，并分层碾压密实。

**6.3.8 施工过程中应有专人负责下列监测工作：**

1 开夯前应检查夯锤质量和落距，以确保单击夯击能量符合设计要求；

2 在每一遍夯击前，应对夯点放线进行复核，夯完后检查夯坑位置，发现偏差或漏夯应及时纠正；

3 按设计要求检查每个夯点的夯击次数和每击的夯沉量。对强夯置换尚应检查置换深度。

**6.3.9 施工过程中应对各项参数及情况进行详细记录。**

## **6.4 质量检验**

**6.4.1 检查施工过程中的各项测试数据和施工记录，不符合设计要求时应补夯或采取其他有效措施。强夯置换施工中可采用超重型或重型圆锥动力触探检查置换墩底情况。**

**6.4.2 强夯处理后的地基竣工验收承载力检验，应在施工结束后间隔一定时间方能进行，对于碎石土和砂土地基，其间隔时间可取 7 ~ 14d；粉土和粘性土地基可取 14 ~ 28d。强夯置换地基间隔时间可取 28d。**

**6.4.3 强夯处理后的地基竣工验收时，承载力检验应采用原位测试和室内土工试验。强夯置换后的地基竣工验收时，承载力检验除应采用单墩载荷试验检验外，尚应采用动力触探等手段查明置换墩底情况及承载力与密度随深度的变化，对饱和粉土地基允许采用单墩复合地基载荷试验代替单墩载荷试验。**

**6.4.4 竣工验收承载力检验的数量，应根据场地复杂程度和建筑物的重要性确定，对于简单场地上的一般建筑物，每个建筑地基的载荷试验检验点不应少于 3 点；对于复杂场地或重要建筑地基应增加检验点数。强夯置换地基载荷试验检验和置换墩底情况检验数量均不应少于墩点数的 1%，且不应少于 3 点。**

## 7 振冲法

### 7.1 一般规定

7.1.1 振冲法适用于处理砂土、粉土、粉质粘土、素填土和杂填土等地基。对于处理不排水抗剪强度不小于 20kPa 的饱和粘性土和饱和黄土地基，应在施工前通过现场试验确定其适用性。不加填料振冲加密适用于处理粘粒含量不大于 10%的中砂、粗砂地基。

7.1.2 对大型的，重要的或场地地层复杂的工程，在正式施工前应通过现场试验确定其处理效果。

### 7.2 设计

7.2.1 振冲桩处理范围应根据建筑物的重要性和场地条件确定，当用于多层建筑 and 高层建筑时，宜在基础外缘扩大 1~2 排桩。当要求消除地基液化时，在基础外缘扩大宽度不应小于基底下可液化土层厚度的 1/2。

7.2.2 桩位布置，对大面积满堂处理，宜用等边三角形布置；对单独基础或条形基础，宜用正方形、矩形或等腰三角形布置。

7.2.3 振冲桩的间距应根据上部结构荷载大小和场地土层情况，并结合所采用的振冲器功率大小综合考虑。30kW 振冲器布桩间距可采用 1.3~2.0m；55kW 振冲器布桩间距可采用 1.4~2.5m；75kW 振冲器布桩间距可采用 1.5~3.0m。荷载大或对粘性土宜采用较小的间距，荷载小或对砂土宜采用较大的间距。

7.2.4 桩长的确定：当相对硬层埋深不大时，应按相对硬层埋深确定；当相对硬层埋深较大时，按建筑物地基变形允许值确定；在可液化地基中，桩长应按要求的抗震处理深度确定。桩长不宜小于 4m。

7.2.5 在桩顶和基础之间宜铺设一层 300~500mm 厚的碎石垫层。

7.2.6 桩体材料可用含泥量不大于 5%的碎石、卵石、矿渣或其他性能稳定的硬质材料，不宜使用风化易碎的石料。常用的填料粒径为：30kW 振冲器 20~80mm；55kW 振冲器 30~100mm；75kW 振冲器 40~150mm。

7.2.7 振冲桩的平均直径可按每根桩所用填料量计算。

7.2.8 振冲桩复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定，初步设计时也可用单桩和处理后桩间土承载力特征值按下式估算：

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1-m)f_{sk} \quad (7.2.8-1)$$

$$m = d^2 / d_e^2 \quad (7.2.8-2)$$

式中  $f_{spk}$  ——振冲桩复合地基承载力特征值 (kPa) ；

$f_{pk}$  ——桩体承载力特征值 (kPa) ，宜通过单桩载荷试验确定 ；

$f_{sk}$  ——处理后桩间土承载力特征值 (kPa) ，宜按当地经验取值，如无经验时，

可取天然地基承载力特征值 ；

$m$  ——桩土面积置换率 ；

$d$  ——桩身平均直径 (m) ；

$d_e$  ——根桩分担的处理地基面积的等效圆直径 ；

等边三角形布桩  $d_e = 1.5s$

正方形布桩  $d_e = 1.13s$

矩形布桩  $d_e = 1.13\sqrt{s_1s_2}$

$s$ 、 $s_1$ 、 $s_2$  分别为桩间距、纵向间距和横向间距。

对小型工程的粘性土地基如无现场载荷试验资料，初步设计时复合地基的承载力特征值也可按下式估算：

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]f_{sk} \quad (7.2.8-3)$$

式中  $n$  ——桩土应力比，在无实测资料时，可取 2~4，原土强度低取大值，原土强度高取小值

**7.2.9** 振冲处理地基的变形计算应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定。复合土层的压缩模量可按下式计算：

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)]E_s \quad (7.2.9)$$

式中  $E_{sp}$  ——复合土层压缩模量 (MPa) ；

$E_s$  ——桩间土压缩模量 (MPa) ，宜按当地经验取值，如无经验时，可取天然地基压缩模量。

公式 (7.2.9) 中的桩土应力比，在无实测资料时，对粘性土可取 2~4，对粉土



和砂上可取 1.5~3，原土强度低取大值，原土强度高取小值。

**7.2.10** 不加填料振冲加密宜在初步设计阶段进行现场工艺试验，确定不加填料振密的可能性、孔距、振密电流值、振冲水压力、振后砂层的物理力学指标等。

用 30kw 振冲器振密深度不宜超过 7m，75kw 振冲器不宜超过 15m。

**7.2.11** 不加填料振冲加密孔距可为 2~3m，宜用等边三角形布孔。

**7.2.12** 不加填料振冲加密地基承载力特征值应通过现场载荷试验确定，初步设计时也应根据加密后原位测试指标按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定确定。

**7.2.13** 不加填料振冲加密地基变形计算应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定。加密深度内土层的压缩模量应通过原位测试确定。

### 7.3 施 工

**7.3.1** 振冲施工可根据设计荷载的大小、原土强度的高低、设计桩长等条件选用不同功率的振冲器。施工前应在现场进行试验，以确定水压、振密电流和留振时间等各种施工参数。

**7.3.2** 升降振冲器的机械可用起重机、自行井架式施工平车或其他合适的设备。施工设备应配有电流、电压和留振时间自动信号仪表。

**7.3.3** 振冲施工可按下列步骤进行：

- 1 清理平整施工场地，布置桩位；
- 2 施工机具就位，使振冲器对准桩位；
- 3 启动供水泵和振冲器，水压可用 200~600KPa，水量可用 200~400L/min，将振冲器徐徐沉入土中，造孔速度宜为 0.5~2.0m/min，直至达到设计深度。记录振冲器经各深度的水压、电流和留振时间。
- 4 造孔后边提升振冲器边冲水直至孔口，再放至孔底，重复两三次扩大孔径并使孔内泥浆变稀，开始填料制桩。
- 5 大功率振冲器投料可个提出孔口，小功率振冲器下料困难时，可将振冲器提出孔口填料，每次填料厚度不宜大于 50cm。将振冲器沉入填料中进行振密制桩，当电流达到规定的密实电流值和规定的留振时间后，将振冲器提升 30~50cm。
- 6 重复以上步骤，自下而上逐段制作桩体直至孔口，记录各段深度的填料量、最终电流值和留振时间，并均应符合设计规定。

7 关闭振冲器和水泵。

7.3.4 施工现场应事先开设泥水排放系统,或组织好运浆车辆将泥浆运至预先安排的存放地点,应尽可能设置沉淀池重复使用上部清水。

7.3.5 桩体施工完毕后应将顶部预留的松散桩体挖除,如无预留应将松散桩头压实,随后铺设并压实垫层。

7.3.6 不加填料振冲加密宜采用大功率振冲器,为了避免造孔中塌砂将振冲器抱住,下沉速度宜快,造孔速度宜为  $8 \sim 10\text{m/min}$ ,到达深度后将射水量减至最小,留振至密实电流达到规定时,上提  $0.5\text{m}$ ,逐段振密直至孔口,一般每米振密时间约 1 分钟。

在粗砂中施工如遇下沉困难,可在振冲器两侧增焊辅助水管,加大造孔水量,但造孔水压宜小。

7.3.7 振密孔施工顺序宜沿直线逐点逐行进行。

## 7.4 质量检验

7.4.1 检查振冲施工各项施工记录,如有遗漏或不符合规定要求的桩或振冲点,应补做或采取有效的补救措施。

7.4.2 振冲施工结束后,除砂土地基外,应间隔一定时间后方可进行质量检验。对粉质粘土地基间隔时间可取  $21 \sim 28\text{d}$ ,对粉土地基可取  $14 \sim 21\text{d}$ 。

7.4.3 振冲桩的施工质量检验可采用单桩载荷试验,检验数量为桩数的  $0.5\%$ ,已不少于 3 根。对碎石桩体检验可用重型动力触探进行随机检验。对桩间土的检验可在处理深度内用标准贯入、静力触探等进行检验。

7.4.4 振冲处理后的地基竣工验收时,承载力检验应采用复合地基载荷试验。

7.4.5 复合地基载荷试验检验数量不应少于总桩数的  $0.5\%$ ,且每个单体工程不应少于 3 点。

7.4.6 对不加填料振冲加密处理的砂土地基,竣工验收承载力检验应采用标准贯入、动力触探、载荷试验或其他合适的试验方法。检验点应选择在有代表性或地基土质较差的地段,并位于振冲点围成的单元形心处及振冲点中心处。检验数量可为振冲点数量的  $1\%$ ,总数不应少于 5 点。

## 8 砂石桩法

### 8.1 一般规定

8.1.1 砂石桩法适用于挤密松散砂土、粉土、粘性土、素填土、杂填土等地基。对饱和粘土地基上对变形控制要求不严的工程也可采用砂石桩置换处理。砂石桩法也可用于处理可液化地基。

8.1.2 采用砂石桩处理地基应补充设计、施工所需的有关技术资料。对粘性土地基，应有地基土的不排水抗剪强度指标；对砂土和粉土地基应有地基土的天然孔隙比、相对密实度或标准贯入击数、砂石料特性、施工机具及性能等资料。

8.1.3 用砂石桩挤密素填上和杂填土等地基的设计及质量检验，尚应符合本规范第 14 章中的有关规定。

### 8.2 设计

8.2.1 砂石桩孔位宜采用等边三角形或正方形布置。

砂石桩直径可采用 300 ~ 800mm，可根据地基土质情况和成桩设备等因素确定。对饱和粘性土地基宜选用较大的直径。

8.2.2 砂石桩的间距应通过现场试验确定。对粉土和砂土地基，不宜大于砂石桩直径的 4.5 倍；对粘性土地基不宜大于砂石桩直径的 3 倍。初步设计时，砂石桩的间距也可按下列公式估算。

1 松散粉土和砂土地基可根据挤密后要求达到的孔隙比  $e_1$  来确定。

等边三角形布置

$$s = 0.95\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (8.2.2-1)$$

正方形布置

$$s = 0.89\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (8.2.2-1)$$

$$e_1 = e_{\max} - D_{rl}(e_{\max} - e_{\min}) \quad (8.2.2-3)$$

式中  $s$ ——砂石桩间距 (m)；

$d$ ——砂石桩直径 (m)；

$\xi$ ——修正系数，当考虑振动下沉密实作用时，可取 1.1 ~ 1.2；不考虑振动下

沉密实作用时，可取 1.0；

$e_0$ ——地基处理前砂土的孔隙比，可按原状土样试验确定，也可根据动力或静力触探等对比试验确定；

$e_1$ ——地基挤密后要求达到的孔隙比；

$e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ ——砂土的最大、最小孔隙比，可按现行国家标准《土工试验方法 GB/T 50123 的有关规定确定；

$D_{r1}$ ——地基挤密后要求砂土达到的相对密实度，可取 0.70 ~ 0.85。

## 2 粘性土地基

### 等边三角形布置

$$s = 1.08\sqrt{A_e} \quad (8.2.2-4)$$

### 正方形布置

$$s = \sqrt{A_e} \quad (8.2.2-5)$$

式中  $A_e$ ——1 根砂石桩承担的处理面积 ( $\text{m}^2$ )

$$A_e = \frac{A_p}{m} \quad (8.2.2-6)$$

式中  $A_p$ ——砂石桩的载面积 ( $\text{m}^2$ )

$m$ ——面积置换率。可按本规范 (7.2.8-2) 式确定。

### 8.2.3 砂石桩桩长可根据工程要求和工程地质条件通过计算确定：

1 当松软件土层厚度不大时，砂石桩桩长宜穿过松软土层；

2 当松软土层厚度较大时，对按稳定性控制的工程，砂石桩桩长应不小于最危险滑动面以下 2m 的深度；对按变形控制的工程，砂石桩桩长应满足处理后地基变形量不超过建筑物的地基变形允许值并满足软弱下卧层承载力的要求；

3 对可液化的地基，砂石桩桩长应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定采用；

4 桩长不宜小于 4m。

8.2.4 砂石桩处理范围应大于基底范围，处理宽度宜在基础外缘扩大 1 ~ 3 排桩。对可液化地基，在基础外缘扩大宽度不应小于可液化土层厚度的 1/2，并不应小

于 5m。

**8.2.5** 砂石桩桩孔内的填料量应通过现场试验确定，估算时可按设计桩孔体积乘以充盈系数  $\beta$  确定， $\beta$  可取 1.2 ~ 1.4。如施工中地面有下沉或隆起现象，则填料数量应根据现场具体情况予以增减。

**8.2.6** 桩体材料可用碎石、卵石、角砾、圆砾、砾砂、粗砂、中砂或石屑等硬质材料，含泥量不得大于 5%，最大粒径不宜大于 50mm。

**8.2.7** 砂石桩顶部宜铺设一层厚度为 300 ~ 500mm 的砂石垫层。

**8.2.8** 砂石桩复合地基的承载力特征值，应通过现场复合地基载荷试验确定，初步设计时，也可通过下列方法估算：

1 对于采用砂石桩处理的复合地基，可按本规范公式（7.2.8-1）或公式（7.2.8-3）估算；

2 对于采用砂桩处理的砂土地基，可根据挤密后砂土的密实状态，按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定确定。

**8.2.9** 砂石桩处理地基的变形计算，应按本规范第 7.2.9 条的规定计算；对于砂桩处理的砂土地基，应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定计算。

**8.2.10** 当砂石桩用于处理堆载地基时，应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定进行抗滑稳定性验算。

## 8.3 施 工

**8.3.1** 砂石桩施工可采用振动沉管、锤击沉管或冲击成孔等成桩法。当用于消除粉细砂及粉土液化时，宜用振动沉管成桩法。

**8.3.2** 施工前应进行成桩工艺和成桩挤密试验。当成桩质量不能满足设计要求时，应在调整设计与施工有关参数后，重新进行试验或改变设计。

**8.3.3** 振动沉管成桩法施工应根据沉管和挤密情况，控制填砂石量、提升高度和速度、挤压次数和时间、电机的工作电流等。

**8.3.4** 施工中应选用能顺利出料和有效挤压桩孔内砂石料的桩尖结构。当采用活瓣桩靴时，对砂土和粉土地基宜选用尖锥型；对粘性土地基宜选用平底型；一次性桩尖可采用混凝土锥形桩尖。

**8.3.5** 锤击沉管成桩法施工可采用单管法或双管法。锤击法挤密应根据锤击的

能量，控制分段的填砂石量和成桩的长度。

**8.3.6** 砂石桩的施工顺序，对砂土地基宜从外围或两侧向中间进行，对粘性土地基宜从中间向外围或隔排施工；在既有建（构）筑物邻近施工时，应背离建（构）筑物方向进行。

**8.3.7** 施工时桩位水平偏差不应大于 0.3 倍套管外径；套管垂直度偏差不应大于 1%。

**8.3.8** 砂石桩施工后，应将基底标高下的松散层挖除或夯压密实，随后铺设并压实砂石垫层。

## **8.4 质量检验**

**8.4.1** 应在施工期间及施工结束后，检查砂石桩的施工记录。

对沉管法，尚应检查套管往复挤压振动次数与时间、套管升降幅度和速度、每次填砂石料量等项施工记录。

**8.4.2** 施工后应间隔一定时间方可进行质量检验。对饱和粘性土地基应待孔隙水压力消散后进行，间隔时间不宜少于 28d；对粉土、砂土和杂填土地基，不宜少于 7d。

**8.4.3** 砂石桩的施工质量检验可采用单桩载荷试验，对桩体可采用动力触探试验检测，对桩间土可采用标准贯入、静力触探、动力触探或其他原位测试等方法进行检测。桩间土质量的检测位置应在等边三角形或正方形的中心。检测数量不应少于桩孔总数的 2%。

**8.4.4** 砂石桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验。

**8.4.5** 复合地基载荷试验数量不应少于总桩数的 0.5%，且每个单体建筑不应少于 3 点。

# **9 水泥粉煤灰碎石桩法**

## **9.1 一般规定**

**9.1.1** 水泥粉煤灰碎石桩（CFG 桩）法适用于处理粘性土、粉土、砂土和已自重固结的素填土等地基。对淤泥质土应按地区经验或通过现场试验确定其适用性、

**9.1.2** 水泥粉煤灰碎石桩应选择承载力相对较高的土层作为桩端持力层。

**9.1.3** 水泥粉煤灰碎石桩复合地基设计时应进行地基变形验算。

## 9.2 设计

9.2.1 水泥粉煤灰碎石桩可只在基础范围内布置，桩径宜取 350 ~ 600mm。

9.2.2 桩距应根据设计要求的复合地基承载力、土性、施工工艺等确定，宜取 3 ~ 5 倍桩径。

9.2.3 桩顶和基础之间应设置褥垫层，褥垫层厚度宜取 150 ~ 300mm，当桩径大或桩距大时褥垫层厚度宜取高值。

9.2.4 褥垫层材料宜用中砂、粗砂、级配砂石或碎石等，最大粒径不宜大 30mm。

9.2.5 水泥粉煤灰碎石桩复合地基承载力特征值，应通过现场复合地基载荷试验确定，初步设计时也可按下式估算：

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (9.2.5)$$

式中  $f_{spk}$  ——复合地基承载力特征值 (kPa)；

$m$  ——面积置换率；

$R_a$  ——单桩竖向承载力特征值 (kN)；

$A_p$  ——桩的截面积 (m<sup>2</sup>)；

$\beta$  ——桩间土承载力折减系数，宜按地区经验取值，如无经验时可取 0.75 ~ 0.95，天然地基承载力较高时取大值；

$f_{sk}$  ——处理后桩间土承载力特征值 (kPa)，宜按当地经验取值，如无经验时，可取天然地基承载力特征值。

9.2.6 单桩竖向承载力特征值凡的取值，应符合下列规定：

- 1 当采用单桩载荷试验时，应将单桩竖向极限承载力除以安全系数 2；
- 2 当有单桩载荷试验资料时，可按下式估算：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p \quad (9.2.6)$$

式中  $u_p$  ——桩的周长 (m)；

$n$  ——桩身范围内所划分的土层数；

$q_{si}$ 、 $q_p$  ——桩周第  $i$  层上的侧阻力、桩端端阻力特征值 (kPa)，可按现行同

家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定确定；

$l_i$ ——第  $i$  层土的厚度 (m)

**9.2.7** 桩体试块抗压强度平均值应满足下式要求：

$$f_{cu} \geq 3 \frac{R_a}{A_p} \quad (9.2.7)$$

式中  $f_{cu}$ ——桩体混合料试块 (边长 150mm 立方体) 标准养护 28d 立方体抗压强度平均值 (kPa)。

**9.2.8** 地基处理后的变形计算应按现行国家标准《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，各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的  $\xi$  倍， $\xi$  值可按下列式确定：

$$\xi = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \quad (9.2.8-1)$$

式中  $f_{ak}$ ——基础底面下天然地基承载力特征值 (kPa)。

变形计算经验系数  $\psi_s$  根据当地沉降观测资料及经验确定，也可采用表 9.2.8 数值。

表 9.2.8 变形计算经验系数

$\bar{E}_s$ (MPa)	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
$\psi_s$	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

注：  $\bar{E}_s$  为变形计算深度范围内压缩模量的当量值，应该下式计算：

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} \quad (9.2.8-2)$$

式中  $A_i$ ——第  $i$  层土附加应力系数沿土层度的积分值；

$E_{si}$ ——基础底面下第  $i$  层土的压缩模量值 (MPa)，桩长范围内的复合土层按复合土层的压缩模量取值

**9.2.9** 地基变形计算深度应大于复合土层的厚度，并符合现行国家标准《建筑



地基基础设计规范》GB 50007 中地基变形计算深度的有关规定。

## 9.3 施 工

**9.3.1** 水泥粉煤灰碎石桩的施工，应根据现场条件选用下列施工工艺：

1 长螺旋钻孔灌注成桩，适用于地下水位以上的粘性土、粉土、素填土、中等密实以上的砂土；

2 长螺旋钻孔、管内泵压混合料灌注成桩，适用于粘性土、粉土、砂土以及对噪声或泥浆污染要求严格的场地；

3 振动沉管灌注成桩，适用于粉土、粘性土及素填土地基。

**9.3.2** 长螺旋钻孔、管内泵压混合料灌注成桩施工和振动沉管灌注成桩施工除应执行国家现行有关规定外，尚应符合下列要求：

1 施工前应按设计要求由试验室进行配合比试验，施工时

按配合比配制混合料。长螺旋钻孔、管内泵压混合料成桩施工的坍落度宜为 160~200mm，振动沉管灌注成桩施工的坍落度宜为 30~50mm，振动沉管灌注成桩后桩顶浮浆厚度不宜超过 200mm；

2 长螺旋钻孔、管内泵压混合料成桩施工在钻至设计深度后，应准确把握提拔钻杆时间，混合料泵送量应与拔管速度相配合，遇到饱和砂土或饱和粉土层，不得停泵待料；沉管灌注成桩施工拔管速度应按匀速控制，拔管速度应控制在 1.2~1.5m/min 左右，如遇淤泥或淤泥质土，拔管速度应适当放慢；

3 施工桩顶标高宜高出设计桩顶标高个少于 0.5m；

4 成桩过程中，抽样做混合料试块，每台机械一天应做一组（3 块）试块（边长为 150mm 的立方体），标准养护，测定其立方体抗压强度。

**9.3.3** 冬期施工时混合料入孔温度不得低于 5℃，对桩头和桩间土应采取保温措施。

**9.3.4** 清土和截桩时，不得造成桩顶标高以下桩身断裂和扰动桩间土。

**9.3.5** 褥垫层铺设宜采用静力压实法，当基础底面下桩间土的含水量较小时，也可采用动力夯实法，夯实度（夯实后的褥垫层厚度与虚铺厚度的比值）不得大于 0.9。

**9.3.6** 施工垂直度偏差不应大于 1%；对满堂布桩基础，桩位偏差不应大于 0.4 倍桩径；对条形基础，桩位偏差不应大于 0.25 倍桩径，对单排布桩桩位偏差不应大

于 60mm。

## 9.4 质量检验

9.4.1 施工质量检验主要应检查施工记录、混合料坍落度、桩数、桩位偏差、褥垫层厚度、夯填度和桩体试块抗压强度等。

9.4.2 水泥粉煤灰碎石桩地基竣工验收时,承载力检验应采用复合地基载荷试验。

9.4.3 水泥粉煤灰碎石桩地基检验应在桩身强度满足试验荷载条件时,并宜在施工结束 28d 后进行。试验数量宜为总桩数的 0.5%~1%,且每个单体工程的试验数量不应少于 3 点。

9.4.4 应抽取不少于总桩数的 10%的桩进行低应变动力试验,检测桩身完整性。

## 10 夯实水泥土桩法

### 10.1 一般规定

10.1.1 夯实水泥土桩法适用于处理地下水位以上的粉土、素填土、杂填土、粘性土等地基。处理深度不宜超过 10m。

10.1.2 岩土工程勘察应查明土层的厚度和组成、土的含水量、有机质含量和地下水的腐蚀性等。

10.1.3 夯实水泥土桩设计前必须进行配比试验,针对现场地基土的性质,选择合适的水泥品种,为设计提供各种配比的强度参数。夯实水泥土桩体强度宜取 28d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

### 10.2 设计

10.2.1 夯实水泥土桩处理地基的深度,应根据土质情况、工程要求和成孔设备等因素确定。当采用洛阳铲成孔工艺时,深度不宜超过 6m。

10.2.2 夯实水泥土桩可只在基础范围内布置。桩孔直径宜为 300~600mm,可根据设计及所选用的成孔方法确定。桩距宜为 2~4 倍桩径。

10.2.3 桩长的确定:当相对硬层的埋藏深度不大时,应按相对硬层埋藏深度确定;当相对硬层埋藏深度较大时,应按建筑物地基的变形允许值确定。

10.2.4 在桩顶面应铺设 100~3mm 厚的褥垫层,垫层材料可采用中砂、粗砂或碎石等,最大粒径不宜大于 20mm。

**10.2.5** 夯实水泥土桩复合地基承载力特征值应按现场复合地基载荷试验确定。初步设计时可按本规范公式(9.2.5)估算,公式中 $R_a$ 为单桩竖向承载力特征值(kN),可按本规范第9.2.6条规定确定; $\beta$ 为桩间的承载力折减系数,可取0.9~1.0; $f_{sk}$ 为处理后桩间土承载力特征值(kPa),可取天然地基承载力特征值。

**10.2.6** 桩孔内夯填的混合料配合比应按工程要求、土料性质及采用的水泥品种,由配合比试验确定,并应满足本规范公式(9.2.7)要求。

**10.2.7** 地基处理后的变形计算应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定执行。计算深度必须大于复合土层的深度。复合土层的压缩模量可按本规范第9.2.8条确定。

## 10.3 施 工

**10.3.1** 夯实水泥土桩的施工,应按设计要求选用成孔工艺。挤土成孔可选用沉管、冲击等方法;非挤土成孔可选用洛阳铲、螺旋钻等方法。

**10.3.2** 夯填桩孔时,宜选用机械夯实。分段夯填时,夯锤的落距和填料厚度应根据现场试验确定,混合料的压实系数 $\lambda_c$ 不应小于0.93。

**10.3.3** 土料中有机质含量不得超过5%,不得含有冻土或膨胀土,使用时应过10~20mm筛,混合料含水量应满足土料的最优含水量 $\omega_{op}$ ,其允许偏差不得大于 $\pm 2\%$ 。土料与水泥应拌和均匀,水泥用量不得少于按配比试验确定的重量。

垫层材料应级配良好,不含植物残体、垃圾等杂质。垫层铺设时应压(夯)密实,夯填度不得大于0.9。采用的施工方法应严禁使基底土层扰动。

**10.3.4** 成孔施工应符合下列要求:

- 1 桩孔中心偏差不应超过桩径设计值的1/4,对条形基础不应超过桩径设计值的1/6;
- 2 桩孔垂直度偏差不应大于1.5%;
- 3 桩孔直径不得小于设计桩径;
- 4 桩孔深度不应小于设计深度。

**10.3.5** 向孔内填料前孔底必须夯实。桩顶夯填高度应大于设计桩顶标高200~300mm,垫层施工时应将多余桩体凿除,桩顶面应水平。

**10.3.6** 施工过程中,应有专人监测成孔及回填夯实的质量,并作好施工记录。

如发现地基土质与勘察资料不符时，应查明情况，采取有效处理措施。

10.3.7 雨期或冬期施工时，应采取防雨。防冻措施，防止土料和水泥受雨水淋湿或冻结。

## 10.4 质量检验

10.4.1 施工过程中，对夯实水泥土桩的成桩质量，应及时进行抽样检验。抽样检验的数量不应少于总桩数的 2%。

对一般工程，可检查桩的干密度和施工记录。干密度的检验方法可在 24h 内采用取土样测定或采用轻型动力触探击数  $N_{10}$  与现场试验确定的干密度进行对比，以判断桩身质量。

10.4.2 夯实水泥土桩地基竣工验收时，承载力检验应采用单桩复合地基载荷试验。对重要或大型工程，尚应进行多桩复合地基载荷试验。

10.4.3 夯实水泥土桩地基检验数量应为总桩数的 0.5%~1%，且每个单体工程不应少于 3 点。

## 11 水泥土搅拌法

### 11.1 一般规定

11.1.1 水泥土搅拌法分为深层搅拌法（以下简称湿法）和粉体喷搅法（以下简称干法）。水泥土搅拌法适用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、粘性土以及无流动地下水的饱和松散砂上等地基。当地基土的天然含水量小于 3%（黄土含水量小于 25%）、大于 70%或地下水的 pH 值小于 4 时不宜采用干法。冬期施工时，应注意负温对处理效果的影响。

11.1.2 水泥土搅拌法用于处理泥炭土、有机质土、塑性指数  $I_p$  大于 25 的粘土、地下水具有腐蚀性时以及无工程经验的地区，必须通过现场试验确定其运用性。

11.1.3 水泥土搅拌法形成的水泥土加固体，可作为竖向承载的复合地基；基坑工程围护档墙、被动区加固、防渗帷幕；大体积水泥稳定土等。加固体形状可分为柱状、壁状、格栅状或块状等。

11.1.4 确定处理方案前应搜集拟处理区域内详尽的岩土工程资料。尤其是填土层的厚度和组成；软土层的分布范围、分层情况；地下水位及 pH 值；土的含水量、塑性指数和有机质含量等。

11.1.5 设计前应进行拟处理土的室内配比试验。针对现场拟处理的最弱层软土的性质，选择合适的固化剂、外掺剂及其掺量，为设计提供各种龄期、各种配比的强度参数。

对竖向承载的水泥土强度宜取 90d 龄期试块的立方体抗压强度平均值；对承受水平荷载的水泥土强度宜取 28d 龄期试块的立方体抗压强度平均值。

## 11.2 设 计

11.2.1 固化剂宜选用强度等级为 32.5 级及以上的普通硅酸盐水泥。水泥掺量除块状加固时可用被加固湿土质量的 7%~12% 外，其余宜为 12%~20%。湿法的水泥浆水灰比可选用 0.45~0.55。外掺剂可根据工程需要和土质条件选用具有早强、缓凝、减水以及节省水泥等作用的材料，但应避免污染环境。

11.2.2 水泥土搅拌法的设计，主要是确定搅拌桩的置换率和长度，竖向承载搅拌桩的长度应根据上部结构对承载力和变形的要求确定，并宜穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层；为提高抗滑稳定性而设置的搅拌桩，其桩长应超过危险滑弧以下 2m。

湿法的加固深度不宜大于 20m；干法不宜大于 15m。水泥土搅拌桩的桩径不应小于 500mm。

11.2.3 竖向承载水泥土搅拌桩复合地基的承载力特征值应通过现场单桩或多桩复合地基荷载试验确定。初步设计时也可按本规范公式 (9.2.5) 估算，公式中  $f_{sk}$  为桩间土承载力特征值 (kPa)，可取天然地基承载力特征值； $\beta$  为桩间土承载力折减系数。当桩端土经修正的承载力特征值大于桩周土的承载力特征值的平均值时，可取 0.1~0.4，差值大时取低值；当桩端土未经修正的承载力特征值小于或等于桩周土的承载力特征值的平均值时，可取 0.5~0.9，差值大时或设置褥垫层时均取高值。

11.2.4 单桩竖向承载力特征值应通过现场载荷试验确定。初步设计时也可按式 (11.2.4-1) 估算。并应同时满足式 (11.2.4-2) 的要求，应使由桩身材料强度确定的单桩承载力大于 (或等于) 由桩周土和桩端土的抗力所提供的单桩承载力：

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (11.2.4-1)$$

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (11.2.4-2)$$

式中  $f_{cu}$  ——与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块（边长为 70.7mm 的立方体，也可采用边长为 50mm 的立方体）在标准养护条件下 90d 龄期的立方体抗压强度平均值（kPa）；

$\eta$  ——桩身强度折减系数，干法可取 0.20 ~ 0.30；湿法可取 0.25 ~ 0.33；

$u_p$  ——桩的周长（m）；

$n$  ——桩长范围内所划分的土层数；

$q_{si}$  ——桩周第  $i$  层土的侧阻力特征值。对淤泥可取 4 ~ 7kPa；对淤泥质土可取 6 ~ 12kPa；对软塑状态的粘性土可取 10 ~ 15kPa；对可塑状态的粘性土可以取 12 ~ 18kPa；

$l_i$  ——桩长范围内第  $i$  层土的厚度（m）；

$q_p$  ——桩端地基土未经修正的承载力特征值（kPa），可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定确定；

$\alpha$  ——桩端天然地基土的承载力折减系数，可取 0.4 ~ 0.6，承载力高时取低值。

**11.2.5** 竖向承载搅拌桩复合地基应在基础和桩之间设置褥垫层。褥垫层厚度可取 200 ~ 300mm。其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等，最大粒径不宜大于 20mm。

**11.2.6** 竖向承载搅拌桩复合地基中的桩长超过 10m 时，可采用变掺量设计，在全桩水泥总掺量不变的前提下，桩身上部三分之一桩长范围内可适当增加水泥掺量及搅拌次数；桩身下部三分之一桩长范围内可适当减少水泥掺量；

**11.2.7** 竖向承载搅拌桩的平面布置可根据上部结构特点及对地基承载力和变形的要求，采用柱状、壁状、格栅状或块状等加固型式。桩可只在基础平面范围内布置，独立基础下的桩数不宜少于 3 根。柱状加固可采用正方形、等边三角形等布桩型式。

**11.2.8** 当搅拌桩处理范围以下存在软弱下卧层时，应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定进行下层承载力验算。

**11.2.9** 竖向承载搅拌桩复合地基的变形包括搅拌桩复合土层的平均压缩变形

$s_1$ 与桩端下未加固土层的压缩变形 $s_2$ ：

1 搅拌桩复合土层的压缩变形 $s_1$ 可按下列式计算：

$$s_1 = \frac{(p_z + p_{zd})l}{2E_{sp}} \quad (11.2.9-1)$$

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (11.2.9-2)$$

式中  $p_z$ ——搅拌桩复合土层顶面的附加压力值（kPa）；

$p_{zd}$ ——搅拌桩复合土层底面的附加压力值（kPa）；

$E_{sp}$ ——搅拌桩复合土层的压缩模量（kPa）；

$E_p$ ——搅拌桩的压缩模量，可取（100～120） $f_{cu}$ （kPa）。对桩较短或桩身强度较低者可取低值，反之可取高值；

$E_s$ ——桩间土的压缩模量（kPa）。

2 桩端以下未加固上层的压缩变形 $s_2$ ，可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定进行计算。

## 11.3 施 工

11.3.1 水泥土搅拌法施工现场事先应予以平整，必须清除地上和地下的障碍物。遇有明浜、池塘及洼地时应抽水和清淤，回填粘性土料并予以压实，不得回填杂填土或生活垃圾。

11.3.2 水泥土搅拌桩施工前应根据设计进行工艺性试桩，数量不得少于2根。当桩周为成层土时，应对相对软弱土层增加搅拌次数或增加水泥掺量。

11.3.3 搅拌头翼片的枚数、宽度、与搅拌轴的垂直夹角、搅拌头的回转数、提升速度应相互匹配，以确保加固深度范围内土体的任何一点均能经过20次以上的搅拌。

11.3.4 竖向承载搅拌桩施工时，停浆（灰）面应高于桩顶设计标高300～500mm。在开挖基坑时，应将搅拌桩顶端施工质量较差的桩段用人工挖除。

11.3.5 施工中应保持搅拌桩机底盘的水平和导向架的竖直，搅拌桩的垂直偏差不得超过1%；桩位的偏差不得大于50mm；成桩直径和桩长不得小于设计值。

**11.3.6 水泥土搅拌法施工步骤**由于湿法和干法的施工设备不同而略有差异。其主要步骤应为：

- 1 搅拌机械就位、调平；
- 2 预搅下沉至设计加固深度；
- 3 边喷浆（粉）、边搅拌提升直至预定的停浆（灰）面；
- 4 重复搅拌下沉至设计加固深度；
- 5 根据设计要求，喷浆（粉）或仅搅拌提升直至预定的停浆（灰）面；
- 6 关闭搅拌机械；在预（复）搅下沉时，也可采用喷浆（粉）的施工工艺，但必须确保全桩长上下至少再重复搅拌一次。

### （ ） 湿 法

**11.3.7** 施工前应确定灰浆泵输浆量、灰浆经输浆管到达搅拌机喷浆口的时间和起吊设备提升速度等施工参数，并根据设计要求通过工艺性成桩试验确定施工工艺。

**11.3.8** 所使用的水泥都应过筛，制备好的浆液不得离析，泵送必须连续，拌制水泥浆液的罐数、水泥和外掺剂用量以及泵送浆液的时间等应有专人记录；喷浆量及搅拌深度必须采用经国家计量部门认证的监测仪器进行自动记录。

**11.3.9** 搅拌机喷浆提升的速度和次数必须符合施工工艺的要求，并应有专人记录。

**11.3.10** 当水泥浆液到达出浆口后，应喷浆搅拌 30s，在水泥浆与桩端土充分搅拌后，再开始提升搅拌头。

**11.3.11** 搅拌机预搅下沉时不宜冲水，当遇到硬上层下沉太慢时，方可适量冲水，但应考虑冲水对桩身强度的影响。

**11.3.12** 施工时如发生故障停浆，应将搅拌头下沉至停浆点以下 0.5m 处，待恢复供浆时再喷浆搅拌提升。若停机超过三小时，宜先拆卸输浆管路，并妥加清洗。

**11.3.13** 壁状加固时，相邻桩的施工时间间隔不宜超过 24h。如间隔时间太长，与相邻桩无法搭接时，应采取局部补桩或注浆等补强措施。

### （ ） 干 法

**11.3.14** 喷粉施工前应仔细检查搅拌机械、供粉泵、送气（粉）管路、接头和阀门的密封性、可靠性。送气（粉）管路的长度不宜大于 6m。

**11.3.15** 水泥土搅拌法（干法）喷粉施工机械必须配置经国家计量部门确认的



**具有能瞬时检测并记录出粉量的粉体计量装置及搅拌深度自动记录仪。**

**11.3.16** 搅拌头每旋转一周，其提升高度不得超过 16mm。

**11.3.17** 搅拌头的直径应定期复核检查，其磨耗量不得大于 10mm。

**11.3.18** 当搅拌头到达设计桩底以上 1.5m 时，应即开启喷粉机提前进行喷粉作业，当搅拌头提升至地面下 500mm 时，喷粉机应停止喷粉。

**11.3.19** 成桩过程中因故停止喷粉，应将搅拌头下沉至停灰面以下 1m 处，待恢复喷粉时再喷粉搅拌提升。

**11.3.20** 需在地基上天然含水量小于 30%土层中喷粉成桩时。应采用地面注水搅拌工艺。

## **11.4 质量检验**

**11.4.1** 水泥土搅拌桩的质量控制应贯穿在施工的全过程，并应坚持全程的施工监理。施工过程中必须随时检查施工记录和计量记录，并对照规定的施工工艺对每根桩进行质量评定。检查重点是：水泥用量、桩长、搅拌头转数和提升速度、复搅次数和复搅深度、停浆处理方法等。

**11.4.2** 水泥土搅拌桩的施工质量检验可采用以下方法：

1 成桩 7d 后，采用浅部开挖桩头（深度宜超过停浆（灰）面下 0.5m），目测检查搅拌的均匀性，量测成桩直径，检查量为总桩数的 5%。

2 成桩后 3d 内，可用轻型动力触探（ $N_{10}$ ）检查每米桩身的均匀性。检验数量为施工总桩数的 1%，且个少于 3 根。

**11.4.3** 竖向承载水泥土搅拌桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验。

**11.4.4** 载荷试验必须在桩身强度满足试验荷载条件时，并宜在成桩 28d 后进行，检验数量为桩总数的 0.5%~1%，且每项单体工程不应少于 3 点。

经触探和载荷试验检验后对桩身质量有怀疑时，应在成桩 28d 后，用双管单动取样器钻取芯样作抗压强度检验，检验数量为施工总桩数的 0.5%，且不少于 3 根。

**11.4.5** 对相邻桩搭接要求严格的工程，应在成桩 15d 后，选取数根桩进行开挖，检查搭接情况。

**11.4.6** 基槽开挖后，应检验桩位、桩数与桩顶质量，如不符合设计要求，应采取有效补强措施。

## 12 高压喷射注浆法

### 12.1 一般规定

12.1.1 高压喷射注浆法适用于处理淤泥、淤泥质土、流塑、软塑可塑粘性土、粉土、砂土、黄土、素填土和碎石土等地基。

当土中含有较多的大粒径块石、大量植物根茎或有较高的有机质时，以及地下水流速过大和已涌水的工程，应根据现场试验结果确定其适用性。

12.1.2 高压喷射注浆法可用于既有建筑和新建建筑地基加固，深基坑、地铁等工程的土层加固或防水。

12.1.3 高压喷射注浆法分旋喷、定喷和摆喷三种类别。根据工程需要和土质条件，可分别采用单管法、双管法和三管法。加固形状可分为柱状、壁状、条状和块状。

12.1.4 对既有建筑物在制定高压喷射注浆方案时应搜集有关的历史和现状资料、邻近建筑物和地下埋设物等资料。

12.1.5 高压喷射注浆方案确定后，应结合工程情况进行现场试验、试验性施工或根据工程经验确定施工参数及工艺。

### 12.2 设计

12.2.1 高压喷射注浆形成的加固体强度和范围，应通过现场试验确定。当无现场试验资料时，亦可参照相似土质条件的工程经验。

12.2.2 竖向承载旋喷桩复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定。初步设计时，也可按本规范公式（9.2.5）

估算，公式中  $\beta$  为桩间土承载力折减系数，可根据试验或类似土质条件工程经验确定，当无试验资料或经验时，可取 0~0.5，承载力较低时取低值。

12.2.3 单桩竖向承载力特征值可通过现场单桩载荷试验确定。也可按式（12.2.3-1）和（12.2.3-2）估算，取其中较小值：

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (12.2.3-1)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A_p \quad (12.2.3-2)$$

式中  $f_{cu}$  ——与旋喷桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块（边长为 70.7mm 的立

方体)在标准养护条件下 28d 龄期的立方体抗压强度平均值 (kPa) ;

$\eta$ ——桩身强度折减系数,可取 0.33 ;

$n$ ——桩长范围内所划分的土层数 ;

$l_i$ ——桩周第  $i$  层土的厚度 (m) ;

$q_{si}$ ——桩周第  $i$  层土的侧阻力特征值 (kPa) ,可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定或地区经验确定。

$q_p$ ——桩端地基土未经修正的承载力特征值 (kPa) ,可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定或地区经验确定。

**12.2.4** 当旋喷桩处理范围以下存在软弱下卧层时,应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定进行下卧层承载力验算。

**12.2.5** 竖向承载旋喷桩复合地基宜在基础和桩顶之间设置褥垫层。褥垫层厚度可取 200 ~ 300mm ,其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等 ,最大粒径不宜大于 30mm。

**12.2.6** 竖向承载旋喷桩的平面布置可根据上部结构和基础特点确定。独立基础下的桩数一般不应少于 4 根。

**12.2.7** 桩长范围内复合土层以及下卧层地基变形值应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定计算,其中,复合上层的压缩模量可根据地区经验确定。

**12.2.8** 高压喷射注浆法用于深基坑、地铁等工程形成连续体时,相邻桩搭接不宜小于 300mm ,并应符合设计要求和国家现行的有关规范的规定。

## **12.3 施 工**

**12.3.1** 施工前应根据现场环境和地下埋设物的位置等情况,复核高压喷射注浆的设计孔位。

**12.3.2** 高压喷射注浆的施工参数应根据土质条件、加固要求通过试验或根据工程经验确定,并在施工中严格加以控制。单管法及双管法的高压水泥浆和三管法高压水的压力应大于 20MPa。

**12.3.3** 高压喷射注浆的主要材料为水泥,对于无特殊要求的工程,宜采用强度等级为 32.5 级及以上的普通硅酸盐水泥。根据需要可加入适量的外加剂及掺合料。外加剂和掺合料的用量,应通过试验确定。

12.3.4 水泥浆液的水灰比应按工程要求确定，可取 0.8~1.5，常用 1.0。

12.3.5 高压喷射注浆的施工工序为机具就位、贯入喷射管、喷射注浆、拔管和冲洗等。

12.3.6 喷射孔与高压注浆泵的距离不宜大于 50m。钻孔的位置与设计位置的偏差不得大于 50mm。实际孔位、孔深和每个钻孔内的地下障碍物、洞穴、涌水、漏水及与岩土工程勘察报告不符等情况均应详细记录。

12.3.7 当喷射注浆管贯入土中，喷嘴达到设计标高时，即可喷射注浆。在喷射注浆参数达到规定值后，随即分别按旋喷、定喷或摆喷的工艺要求，提升喷射管，由下而上喷射注浆。喷射管分段提升的搭接长度不得小于 100mm。

12.3.8 对需要局部扩大加固范围或提高强度的部位，可采用复喷措施。

12.3.9 在高压喷射注浆过程中出现压力骤然下降、上升或冒浆异常时，应查明原因并及时采取措施。

12.3.10 高压喷射注浆完毕，应迅速拔出喷射管。为防止浆液凝固收缩影响桩顶高程，必要时可在原孔位采用冒浆回灌或第二次注浆等措施。

12.3.11 当处理既有建筑地基时，应采用速凝浆液或跳孔喷射和冒浆回灌等措施，以防喷射过程中地基产生附加变形和地基与基础间出现脱空现象。同时，应对建筑物进行变形监测。

12.3.12 施工中应做好泥浆处理，及时将泥浆运出或在现场短期堆放后作土方运出。

12.3.13 施工中应严格按照施工参数和材料用量施工，并如实做好各项记录。

## 12.4 质量检验

12.4.1 高压喷射注浆可根据工程要求和当地经验采用开挖检查、取芯（常规取芯或软取芯）、标准贯入试验、载荷试验或围井注水试验等方法进行检验，并结合工程测试、观测资料及实际效果综合评价加固效果。

12.4.2 检验点应布置在下列部位：

- 1 有代表性的桩位；
- 2 施工过程中出现异常情况的部位；
- 3 地基情况复杂，可能对高压喷射注浆质量产生影响的部位。

12.4.3 检验点的数量为施工孔数的 1%，并不应少于 3 点。

12.4.4 质量检验宜在高压喷射注浆结束 28d 后进行。

12.4.5 竖向承载旋喷桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验。

12.4.6 载荷试验必须在桩身强度满足试验条件时，并宜在成桩 28d 后进行。检验数量为桩总数的 0.5%~1%，且每项单体工程不应少于 3 点。

## 13 石灰桩法

### 13.1 一般规定

13.1.1 石灰桩法适用于处理饱和粘性土、淤泥、淤泥质土、素填土和杂填土等地基；用于地下水位以上的上层时，宜增加掺合料的含水量并减少生石灰用量，或采取上层浸水等措施。

13.1.2 对重要工程或缺少经验的地区，施工前应进行桩身材料配合比、成桩工艺及复合地基承载力试验。桩身材料配合比试验应在现场地基土中进行。

### 13.2 设计

13.2.1 石灰桩的主要固化剂为生石灰，掺合料宜优先选用粉煤灰、火山灰、炉渣等工业废料。生石灰与掺合料的配合比宜根据地质情况确定，生石灰与掺合料的体积比可选用 1:1 或 1:2，对于淤泥、淤泥质土等软土可适当增加生石灰用量，桩顶附近生石灰用量不宜过大。当掺石膏和水泥时，掺加量为生石灰用量的 3%~10%。

13.2.2 当地基需要排水通道时，可在桩顶以上设 200~300mm 厚的砂石垫层。

13.2.3 石灰桩宜留 500mm 以上的孔口高度，并用含水量适当的粘性土封口，封口材料必须夯实，封口标高应略高于原地面。

石灰桩桩顶施工标高应高出设计桩顶标高 100mm 以上。

13.2.4 石灰桩成孔直径应根据设计要求及所选用的成孔方法确定，常用 300~400mm，可按等边三角形或矩形布桩，桩中心距可取 2~3 倍成孔直径。石灰桩可仅布置在基础底面下，当基底土的承载力特征值小于 70kPa 时，宜在基础以外布置 1~2 排围护桩。

13.2.5 洛阳铲成孔桩长不宜超过 6mm 机械成孔管外投料时，桩长不宜超过 8mm 螺旋钻成孔及管内投料时可适当加长。

13.2.6 石灰桩桩端宜选在承载力较高的土层中。在深厚的软弱地基中采用“悬浮桩”时，应减少上部结构重心与基础形心的偏心，必要时宜加强上部结构及基础

的刚度。

**13.2.7** 地基处理的深度应根据岩土工程勘察资料及上部结构设计要求确定。应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 验算下卧层承载力及地基的变形。

**13.2.8** 石灰桩复合地基承载力特征值不宜超过 160kpa，当土质较好并采取保证桩身强度的措施，经过试验后可以适当提高。

**13.2.9** 石灰桩复合地基承载力特征值应通过单桩或多桩复合地基载荷试验确定。初步设计时，也可按公式(7.2.8-1)估算，公式中  $f_{sk}$  为石灰桩桩身抗压强度比例界限值，由单桩竖向载荷试验测定，初步设计时可取 350 ~ 500kPa，土质软弱时取低值(kPa)； $f_{sk}$  为桩间土承载力特征值，取天然地基承载力特征值的 1.05 ~ 1.20 倍，土质软弱或置换率大时取高值(kPa)； $m$  为面积置换率，桩面积按 1.1 ~ 1.2 倍成孔直径计算，土质软弱时宜取高值。

**13.2.10** 处理后地基变形应按现行的国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 有关规定进行计算。变形经验系数  $\psi_s$  可按地区沉降观测资料及经验确定。

石灰桩复合土层的压缩模量宜通过桩身及桩间土压缩试验确定，初步设计时可按下式估算：

$$E_{sp} = \alpha[1 + m(n - 1)]E_s \quad (13.2.10)$$

式中  $E_{sp}$ ——复合土层的压缩模量(MPa)；

$\alpha$ ——系数，可取 1.1 ~ 1.3，成孔对桩周土挤密效应好或置换率大时取高值；

$n$ ——桩土应力比，可取 3 ~ 4，长桩取大值。

$E_s$ ——天然土的压缩模量(MPa)；

### 13.3 施 工

**13.3.1** 石灰材料应选用新鲜生石灰块，有效氧化钙含量不宜低于 70%，粒径不应大于 70mm，含粉量(即消石灰)不宜超过 5%。

**3.3.2** 掺合料应保持适当的含水量，使用粉煤灰或炉渣时含水量宜控制在 30% 左右。无经验时宜进行成桩工艺试验，确定密实度的施工控制指标。

**13.3.3** 石灰桩施工可采用洛阳铲或机械成孔。机械成孔分为沉管和螺旋钻成

孔。成桩时可采用人工夯实、机械夯实。沉管反插、螺旋反压等工艺。填料时必须分段压（夯）实，人工夯实时每段填料厚度不应大于 400mm。管外投料或人工成孔填料时应采取措施减小地下水渗入孔内的速度，成孔后填料前应排除孔底积水。

13.3.4 施工顺序宜由外围或两侧向中间进行。在软土中宜间隔成桩。

13.3.5 施工前应作好场地排水设施，防止场地积水。

13.3.6 进入场地的生石灰应有防水、防雨、防风、防火措施，宜做到随用随进。

13.3.7 桩位偏差不宜大于 0.5d。

13.3.8 应建立完整的施工质量和施工安全管理制度，根据不同的施工工艺制定相应的技术保证措施。及时作好施工记录，监督成桩质量，进行施工阶段的质量检测等。

13.3.9 石灰桩施工时应采取防止冲孔伤人的有效措施，确保施工人员的安全。

## 13.4 质量检测

13.4.1 石灰桩施工检测宜在施工 7 ~ 10d 后进行；竣工验收检测宜在施工 28d 后进行。

13.4.2 施工检测可采用静力触探、动力触探或标准贯入试验。检测部位为桩中心及桩间土，每两点为一组。检测组数不少于总桩数的 1%。

13.4.3 石灰桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验。

13.4.4 载荷试验数量宜为地基处理面积每 200m<sup>2</sup>左右布置一个点，且每一单体工程不应少于 3 点。

# 14 灰土挤密桩法和土挤密桩法

## 14.1 一般规定

14.1.1 灰土挤密桩法和土挤密桩法适用于处理地下水位以上的湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基，可处理地基的深度为 5 ~ 15m。当以消除地基土的湿陷性为主要目的时，宜选用土挤密桩法。当以提高地基土的承载力或增强其水稳性为主要目的时，宜选用灰土挤密桩法。当地基土的含水量大于 24%、饱和度大于 65%时，不宜选用灰土挤密桩法或土挤密桩法。

14.1.2 对重要工程或在缺乏经验的地区，施工前应按设计要求，在现场进行试验，如土性基本相同，试验可在一处进行，如土性差异明显，应在不同地段分别

进行试验。

## 14.2 设 计

**14.2.1** 灰土挤密桩和土挤密桩处理地基的面积，应大于基础或建筑物底层平面的面积，并应符合下列规定：

1 当采用局部处理时，超出基础底面的宽度：对非自重湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基，每边不应小于基底宽度的 0.25 倍，并不应小于 0.50m；对自重湿陷性黄土地基，每边不应小于基底宽度的 0.75 倍，并不应小于 1.00m。

2 当采用整片处理时，超出建筑物外墙基础底面外缘的宽度，每边不宜小于处理土层厚度的 1/2，并不应小于 2m。

**14.2.2** 灰土挤密桩和土挤密桩处理地基的深度，应根据建筑场地的土质情况、工程要求和成孔及夯实设备等综合因素确定。对湿陷性黄土地基，应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 的有关规定。

**14.2.3** 桩孔直径宜为 300 ~ 450mm，并可根据所选用的成孔设

备或成孔方法确定。桩孔宜按等边三角形布置，桩孔之间的中心距离，可为桩孔直径的 2.0 ~ 2.5 倍，也可按下式估算：

$$s = 0.95d \sqrt{\frac{\bar{\eta}_c \rho_{d \max}}{\bar{\eta} \rho_{d \max} - \bar{\rho}_d}} \quad (14.2.3)$$

式中  $s$ ——桩孔之间的中心距离 (m)；

$d$ ——桩孔直径 (m)；

$\rho_{d \max}$ ——桩间土的最大干密度 (t/m<sup>3</sup>)；

$\bar{\rho}_d$ ——地基处理前上的平均干密度 (t/m<sup>3</sup>)；

$\bar{\eta}_c$ ——桩间土经成孔挤密后的平均挤密系数，对重要工程不宜小于 0.93，对一般工程不应小于 0.90。

**14.2.4** 桩间土的平均挤密系数  $\bar{\eta}_c$ ，应按下式计算：

$$\bar{\eta}_c = \frac{\bar{\rho}_{d1}}{\rho_{d \max}} \quad (14.2.4)$$

式中  $\bar{\rho}_{d1}$ ——在成孔挤密深度内，桩间土的平均干密度 (t/m<sup>3</sup>)，平均试样数不应少于 6 组。



14.2.5 桩孔的数量可按下式估算：

$$n = \frac{A}{A_e} \quad (14.2.5)$$

式中  $n$ ——桩孔的数量；

$A$ ——拟处理地基的面积 ( $\text{m}^2$ )；

$A_e$ ——1 根土或灰土挤密桩所承担的处理地基面积 ( $\text{m}^2$ )，即：

$$A_e = \frac{\pi d_e^2}{4}$$

$d_e$ ——根桩分担的处理地基面积的等效圆直径 ( $\text{m}$ )；

桩孔按等边三角形布置  $d_e = 1.05s$ ；

桩孔按正方形布置  $d_e = 1.13s$ 。

14.2.6 桩孔内的填料，应根据工程要求或处理地基的目的确定，桩体的夯实质量宜用平均压实系数  $\bar{\lambda}_c$  控制。

当桩孔内用灰土或素土分层回填、分层夯实时，桩体内的平均压实系数值，均不应小于 0.96；消石灰与土的体积配合比，宜为 2：8 或 3：7。

14.2.7 桩顶标高以上应设置 300～500mm 厚的 2：8 灰土垫层，其压实系数不应小于 0.95。

14.2.8 灰土挤密桩和土挤密桩复合地基承载力特征值，应通过现场单桩或多桩复合地基载荷试验确定。初步设计当无试验资料时，可按当地经验确定，但对灰土挤密桩复合地基的承载力特征值，不宜大于处理前的 2.0 倍，并不宜大于 250kPa；对上挤密桩复合地基的承载力特征值，不宜大于处理前的 1.4 倍，并不宜大于 180kPa。

14.2.9 灰土挤密桩和土挤密桩复合地基的变形计算，应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定，其中复合土层的压缩模量，可采用载荷试验的变形模量代替。

## 14.3 施 工

14.3.1 成孔应按设计要求、成孔设备、现场土质和周围环境等情况，选用沉管（振动、锤击）或冲击等方法。

14.3.2 桩顶设计标高以上的预留覆盖上层厚度应符合下列要求：

- 1 沉管（锤击、振动）成孔，宜为 0.50 ~ 0.70m；
- 2 冲击成孔，宜为 1.20 ~ 1.50m。

**14.3.3** 成孔时，地基土宜接近最优（或塑限）含水量，当土的含水量低于 12% 时，宜对拟处理范围内的土层进行增湿，增湿土的加水量可按式估算：

$$Q = v\bar{\rho}_d(\omega_{op} - \bar{\omega})k$$

式中  $Q$ ——计算加水量（ $\text{m}^3$ ）；

$v$ ——拟加固土的总体积（ $\text{m}^3$ ）；

$\bar{\rho}_d$ ——地基处理前土的平均干密度（ $\text{t}/\text{m}^3$ ）；

$\omega_{op}$ ——土的最优含水量（%），通过室内击实试验求得；

$\bar{\omega}$ ——地基处理前土的平均含水量（%）；

$k$ ——损耗系数，可取 1.05 ~ 1.10。

应于地基处理前 4 ~ 6d，将需增湿的水通过一定数量和一定深度的渗水孔，均匀地浸入拟处理范围内的上层中。

**14.3.4** 成孔和孔内回填夯实应符合下列要求：

1 成孔和孔内回填夯实的施工顺序，当整片处理时，宜从里（或中间）向外间隔 1 ~ 2 孔进行，对大型工程，可采取分段施工；当局部处理时，宜从外向里间隔 1 ~ 2 孔进行；

2 向孔内填料前，孔底应夯实，并应抽样检查桩孔的直径、深度和垂直度；

3 桩孔的垂直度偏差不宜大于 1.5%；

4 桩孔中心点的偏差不宜超过桩距设计值的 5%；

5 经检验合格后，应按设计要求，向孔内分层填入筛好的素土、灰土或其他填料，并应分层夯实至设计标高。

**14.3.5** 铺设灰土垫层前，应按设计要求将桩顶标高以上的预留松动土层挖除或夯（压）密实。

**14.3.6** 施工过程中，应有专人监理成孔及回填夯实的质量，并应做好施工记录。如发现地基土质与勘察资料不符，应立即停止施工，待查明情况或采取有效措施处理后，方可继续施工。

**14.3.7** 雨季或冬季施工，应采取防雨或防冻措施，防止灰土和土料受雨水淋

湿或冻结。

## 14.4 质量检验

14.4.1 成桩后，应及时抽样检验灰土挤密桩或土挤密桩处理地基的质量。对一般工程，主要应检查施工记录、检测全部处理深度内桩体和桩间土的干密度，并将其分别换算为平均压实系数  $\bar{\lambda}_c$  和平均挤密系数  $\bar{\eta}_c$ 。对重要工程，除检测上述内容外，还应测定全部处理深度内桩间土的压缩性和湿陷性。

14.4.2 抽样检验的数量，对一般工程不应少于桩总数的 1%；对重要工程不应少于桩总数的 1.5%。

14.4.3 灰土挤密桩和土挤密桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验。

14.4.4 检验数量不应少于桩总数的 0.5%，且每项单体工程不应少于 3 点。

## 15 柱锤冲扩桩法

### 15.1 一般规定

15.1.1 柱锤冲扩桩法适用于处理杂填土、粉土、粘性土、素填土和黄土等地基，对地下水位以下饱和松软土层，应通过现场试验确定其适用性。地基处理深度不宜超过 6m，复合地基承载力特征值不宜超过 160kPa。

15.1.2 对大型的、重要的或场地复杂的工程，在正式施工前，应在有代表性的场地上进行试验。

### 15.2 设计

15.2.1 处理范围应大于基底面积。对一般地基，在基础外缘应扩大 1~2 排桩，并不应小于基底下处理土层厚度的 1/2。对可液化地基，处理范围可按上述要求适当加宽。

15.2.2 桩位布置可采用正方形、矩形、三角形布置。常用桩距为 1.5~2.5m，或取桩径的 2~3 倍。

15.2.3 桩径可取 500~800mm，桩孔内填料量应通过现场试验确定。

15.2.4 地基处理深度可根据工程地质情况及设计要求确定，对相对硬层埋藏较浅的土层，应深达相对硬上层；当相对硬层埋藏较深时，应按下卧层地基承载力及建筑物地基的变形允许值确定；对可液化地基，应按现行国家标准《建筑抗震设

计规范》GB 50011 的有关规定确定。

**15.2.5** 在桩顶部应铺设 200 ~ 300mm 厚砂石垫层。

**15.2.6** 桩体材料可采用碎砖三合土、级配砂石、矿渣、灰土、水泥混合土等。当采用碎砖三合土时,其配合比(体积比)可采用生石灰:碎砖:粘性土为 1:2:4。当采用其他材料时,应经试验确定其适用性和配合比。

**15.2.7** 柱锤冲扩桩复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定,初步设计时,也可按公式(7.2.8-3)估算,公式中  $f_{spk}$  为柱锤冲扩桩复合地基承载力特征值(kPa);  $m$  为面积置换率,可取 0.2 ~ 0.5;  $n$  为桩土应力比,无实测资料时可取 2 ~ 4 桩间土承载力低时取大值;  $f_{spk}$  为处理后桩间土承载力特征值(kPa),宜按当地经验取值,如无经验时,可取天然地基承载力特征值。

**15.2.8** 地基处理后变形计算应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定执行。初步设计时复合土层的压缩模量可按公式(7.2.9)估算,公式中  $E_{sp}$  为复合土层的压缩模量(MPa);  $E_s$  为加固后桩间土的压缩模量(MPa),可按当地经验取值。

**15.2.9** 当柱锤冲扩桩处理深度以下存在软弱下卧层时,应按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定进行下卧层地基承载力验算。

### 15.3 施 工

**15.3.1** 柱锤冲扩桩法宜用直径 300 ~ 500mm、长度 2 ~ 6m、质量 1 ~ 8t 的柱状锤(柱锤)进行施工。

**15.3.2** 起重机具可用起重机、步履式夯扩桩机或其他专用机具设备。

**15.3.3** 柱锤冲扩桩法施工可按下列步骤进行:

1 清理平整施工场地,布置桩位;

2 施工机具就位,使柱锤对准桩位;

3 柱锤冲孔:根据土质及地下水情况可分别采用下述三种成孔方式:

1) 冲击成孔:将柱锤提升一定高度,自动脱钩下落冲击土层,如此反复冲击,接近设计成孔深度时,可在孔内填少量粗骨料继续冲击,直到孔底被夯密实。

2) 填料冲击成孔:成孔时出现缩颈或坍孔时,可分次填入碎砖和生石灰块,边冲击边将填料挤入孔壁及孔底,当孔底接近设计成孔深度时,夯入部分碎砖挤密桩

端土。

3) 引复打成孔：当坍孔严重难以成孔时，可提锤反复冲击至设计孔深，然后分次填入碎砖和生石灰块，待孔内生石灰吸水膨胀、桩间土性质有所改善后，再进行二次冲击复打成孔。

当采用上述方法仍难以成孔时，也可以采用套管成孔，即用柱锤边冲孔边将套管压入土中，直至桩底设计标高。

4) 成桩：用标准料斗或运料车将拌合好的填料分层填入桩孔夯实。当采用套管成孔时，边分层填料夯实，边将套管拔出。

锤的质量、锤长、落距、分层填料量、分层夯填度、夯击次数、总填料量等应根据试验或按当地经验确定。每个桩孔应夯填至桩顶设计标高以上至少 0.5m，其上部桩孔宜用原槽土夯封。施工中应作好记录，并对发现的问题及时进行处理。

5) 施工机具移位，重复上述步骤进行下一根桩施工。

**15.3.4** 成孔和填料夯实的施工顺序，宜间隔进行。

**15.3.5** 基槽开挖后，应进行晾槽拍底或碾压，随后铺设垫层并压实。

## **15.4 质量检验**

**15.4.1** 施工过程中应随时检查施工记录及现场施工情况，并对照预定的施工工艺标准，对每根桩进行质量评定。对质量有怀疑的工程桩，应用重型动力触探进行自检。

**15.4.2** 冲扩桩施工结束后 7 ~ 14d 内，可对桩身及桩间土进行抽样检验，可采用重型动力触探进行，并对处理后桩身质量及复合地基承载力作出评价。检验点数可按冲扩桩总数的 2% 计，每一单体工程桩身及桩间土总检验点数均不应少于 6 点。

**15.4.3** 柱锤冲扩桩地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验。

**15.4.4** 检验数量为总桩数的 0.5%，且每一单体工程不应少于 3 点。载荷试验应在成桩 14d 后进行。

**15.4.5** 基槽开挖后，应检查桩位、桩径、桩数、桩顶密实度及槽底土质情况。如发现漏桩、桩位偏差过大、桩头及槽底土质松软等质量问题，应采取补救措施。

# **16 单液硅化法和碱液法**

## **16.1 一般规定**

**16.1.1** 单液硅化法和碱液法适用于处理地下水位以上渗透系数为 0.10 ~

2.00m/d 的湿陷性黄土等地基。在自重湿陷性黄土场地，当采用碱液法时，应通过试验确定其适用性。

**16.1.2** 对于下列建（构）筑物，宜采用单液硅化法或碱液法：

- 1 沉降不均匀的既有建（构）筑物和设备基础；
- 2 地基受水浸湿引起湿陷，需要立即阻止湿陷继续发展的建（构）筑物或设备基础；
- 3 拟建的设备基础和构筑物；

**16.1.3** 采用单液硅化法或碱液法加固湿陷性黄土地基，应于施工前在拟加固的建（构）筑物附近进行单孔或多孔灌注溶液试验，确定灌注溶液的速度、时间、数量或压力等参数。

灌注溶液试验结束后，隔 7～10d，应在试验范围的加固深度内量测加固土的半径，并取土样进行室内试验，测定加固土的压缩性和湿陷性等指标。必要时，应进行浸水载荷试验或其他原位测试，以确定加固土的承载力和湿陷性。

**16.1.4** 对酸性土和已渗入沥青、油脂及石油化合物的地基土，不宜采用单液硅化法和碱液法。

## 16.2 设 计

### （ ）单液硅化法

**16.2.1** 单液硅化法按其灌注溶液的工艺，可分为压力灌注和溶液自渗两种。

- 1 压力灌注可用于加固自重湿陷性黄土场地上拟建的设备基础和构筑物的地基，也可用于加固非自重湿陷性黄土场地上的既有建（构）筑物和设备基础的地基。
- 2 溶液自渗宜用于加固自重湿陷性黄土场地上的既有建（构）筑物和设备基础的地基。

**16.2.2** 单液硅化法应由浓度为 10%～15%的硅酸钠（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）溶液，掺入 2.5%氯化钠组成。其相对密度宜为 1.13～1.15，并不应小于 1.10。

加固湿陷性黄土的溶液用量，可按式估算：

$$Q = V \bar{n} d_{N1} \alpha \quad (16.2.2)$$

式中  $Q$ ——硅酸钠溶液的用量（ $\text{m}^3$ ）；

$V$ ——拟加固湿陷性黄土的体积（ $\text{m}^3$ ）；

$\bar{n}$ ——地基加固前，土的平均孔隙率；

$d_{N1}$ ——灌注时，硅酸钠溶液的相对密度；

$\alpha$ ——溶液填充孔隙的系数，可取 0.60 ~ 0.80。

硅酸钠溶液的模数值宜为 2.5 ~ 3.3，其杂质含量不应大于 2%。

**16.2.3** 当硅酸钠溶液的浓度大于加固湿陷性黄土地基所要求的浓度时，应将其加水稀释，加水量可按式估算：

$$Q' = \frac{d_N - d_{N1}}{d_{N1} - 1} \times q \quad (16.2.3)$$

式中  $Q'$ ——稀释硅酸钠溶液的加水量 (t)；

$d_N$ ——稀释前，硅酸钠溶液的相对密度；

$q$ ——拟稀释硅酸钠溶液的质量 (t)。

**16.2.4** 采用单液硅化法加固湿陷性黄土地基，灌注孔的布置应符合下列要求：

- 1 灌注孔的间距：压力灌注宜为 0.80 ~ 1.20m；溶液自渗宜为 0.40 ~ 0.60m；
- 2 加固拟建的设备基础和建（构）筑物的地基，应在基础底面下按等边三角形满堂布置，超出基础底面外缘的宽度，每边不得小于 1mm；
- 3 加固既有建（构）筑物和设备基础的地基，应沿基础侧向布置，每侧不宜少于 2 排。

当基础底面宽度大于 3m 时，除应在基础每侧布置 2 排灌注孔外，必要时，可在基础两侧布置斜向基础底面中心以下的灌注孔或在其台阶上布置穿透基础的灌注孔，以加固基础底面下的土层。

### ( ) 碱液法

**16.2.5** 当 100 干土中可溶性和交换性钙镁离子含量大于 10 时，可采用单液法，即只灌注氢氧化钠一种溶液加固；否则，应采用双液法，即需采用氢氧化钠溶液与氯化钙溶液轮番灌注加固。

**16.2.6** 碱液加固地基的深度应根据场地的湿陷类型。地基湿陷等级和湿陷性黄土层厚度，并结合建筑物类别与湿陷事故的严重程度等综合因素确定。加固深度宜为 2 ~ 5m。

对非自重湿陷性黄土地基，加固深度可为基础宽度的 1.5 ~ 2.0 倍。

对 1 级自重湿陷性黄土地基，加固深度可为基础宽度的 2.0 ~ 3.0 倍。

**16.2.7** 碱液加固土层的厚度  $h$ ，可按下式估算：

$$h = l + r \quad (16.2.7)$$

式中  $l$ ——灌注孔长度，从注液管底部到灌注孔底部的距离（m）；

$r$ ——有效加固半径（m）。

**16.2.8** 碱液加固地基的半径  $r$ ，宜通过现场试验确定，当碱液浓度和温度符合本规范第 16.3.6 条和第 16.3.8 条规定时，有效加固半径与碱液灌注量之间，可按下式估算：

$$r = 0.6 \sqrt{\frac{V}{nl \times 10^3}} \quad (16.2.8)$$

式中  $V$ ——每孔碱液灌注量（L），试验前可根据加固要求达到的有效加固半径按式（16.2.10）进行估算；

$n$ ——拟加固土的天然孔隙率。

当无试验条件或工程量较小时， $r$ 可取 0.40 ~ 0.50m。

**16.2.9** 当采用碱液加固既有建（构）筑物的地基时，灌注孔的平面布置，可沿条形基础两侧或单独基础周边各布置一排。当地基湿陷较严重时，孔距可取 0.7 ~ 0.9m，当地基湿陷较轻时，孔距可适当加大至 1.2 ~ 2.5m。

**16.2.10** 每孔碱液灌注量可按下式估算：

$$V = \alpha \beta \pi r^2 (l + r) n \quad (16.2.10)$$

式中  $\alpha$ ——碱液充填系数，可取 0.6 ~ 0.8；

$\beta$ ——工作条件系数，考虑碱液流失影响，可取 1.1。

## 16.3 施 工

### （ ）单液硅化法

**16.3.1** 压力灌注溶液的施工步骤，应符合下列要求：

- 1 向土中打入灌注管和灌注溶液，应自基础底面标高起向下分层进行，达到设计深度后，将管拔出，清洗干净可继续使用；
- 2 加固既有建筑物地基时，在基础侧向应先施工外排，后施工内排。
- 3 灌注溶液的压力值由小逐渐增大，但最大压力不宜超过 200kPa。

**16.3.2** 溶液自渗的施工步骤，应符合下列要求：

- 1 在基础侧向，将设计布置的灌注孔分批或全部打（或钻）至设计深度；



2 将配好的硅酸钠溶液注满各灌注孔，溶液面宜高出基础底面标高 0.50m，使溶液自行渗入土中；

3 在溶液自渗过程中，每隔 2~3h，向孔内添加一次溶液，防止孔内溶液渗干。

**16.3.3** 施工中应经常检查各灌注孔的加固深度、注入土中的溶液量、溶液的浓度和有无沉淀现象。采用压力灌注时，应经常检查在灌注溶液过程中，溶液有无从灌注孔冒出地面，如发现溶液冒出地面，应立即停止灌注，采取有效措施处理后再继续灌注。

**16.3.4** 计算溶液量全部注入土中后，所有灌注孔宜用 2：8 灰土分层回填夯实。

**16.3.5** 采用单液硅化法加固既有建（构）筑物或设备基础的地基时，在灌注硅酸钠溶液过程中，应进行沉降观测，当发现建（构）筑物和设备基础的沉降突然增大或出现异常情况时，应立即停止灌注溶液，待查明原因并采取有效措施处理后，再继续灌注。

### （ ）碱液法

**16.3.6** 灌注孔可用洛阳铲、螺旋钻成孔或用带有尖端的钢管打入土中成孔，孔径为 60~100mm，孔中填入粒径为 20~40mm 的石子，直到注液管下端标高处，再将内径 20mm 的注液管插入孔中，管底以上 300mm 高度内填入粒径为 2~5mm 的小石子，其上用 2：8 灰土填入并夯实。

**16.3.7** 碱液可用固体烧碱或液体烧碱配制，加固  $1\text{m}^3$  黄土需要 NaOH 量约为干土质量的 3%，即 35~45kg。碱液浓度不应低于 90g/L，常用浓度为 90~100g/L。双液加固时，氯化钙溶液的浓度为 50~80g/L。

**16.3.8** 配溶液时，应先放水，而后徐徐放入碱块或浓碱液。溶液加碱量可按下列公式计算：

1 采用固体烧碱配制每  $1\text{m}^3$  浓度为  $M$  的碱液时，每  $1\text{m}^3$  水中的加碱量为：

$$G_s = \frac{1000M}{P} \quad (16.3.8-1)$$

式中  $G_s$  ——每  $1\text{m}^3$  碱液中投入的固体烧碱量（kg）；

$M$  ——配制碱液的浓度（g/L），计算时将 g 化为 kg；

$P$  ——固体烧碱中，NaOH 含量的百分数（%）。

2 采用液体烧碱配制每  $1\text{m}^3$  浓度为  $M$  的碱液时，投入的液体烧碱量  $V_1$  为：

$$V_1 = 1000 \frac{M}{d_N N} \quad (16.3.8-2)$$

加水量  $V_2$  为：

$$V_2 = 1000(1 - \frac{M}{d_N N}) \quad (16.3.8-3)$$

式中  $V_1$ ——液体烧碱体积 (L)；

$V_2$  ——加水的体积 (L)；

$d_N$ ——液体烧碱的相对密度；

$N$ ——液体烧碱的质量分数。

**16.3.9** 应在盛溶液桶中将碱液加热到 90℃ 以上才能进行灌注，灌注过程中桶内溶液温度应保持不低于 80℃。

**16.3.10** 灌注碱液的速度，宜为 2~5L/min。

**16.3.11** 碱液加固施工，应合理安排灌注顺序和控制灌注速率。

宜间隔 1~2 孔灌注，并分段施工，相邻两孔灌注的间隔时间不宜少于 3d。时灌注的两孔间距不应小于 3m。

**6.3.12** 当采用双液加固时，应先灌注氢氧化钠溶液，间隔 8~12h 后，再灌注氯化钙溶液，后者用量为前者的 1/2~1/4。

**6.3.13** 施工中应防止污染水源，并应安全操作。

## 16.4 质量检验

### ( ) 单液硅化法

**16.4.1** 硅酸钠溶液灌注完毕，应在 7~10d 后，对加固的地基土进行检验。

**16.4.2** 单液硅化法处理后的地基竣工验收时，承载力及其均匀性应采用动力触探或其他原位测试检验。必要时，尚应在加固土的全部深度内，每隔 1m 取土样进行室内试验，测定其压缩性和湿陷性。

**16.4.3** 地基加固结束后，尚应对已加固地基的建（构）筑物或设备基础进行沉降观测，直至沉降稳定，观测时间不应少于半年。

### ( ) 碱液法

**16.4.4** 碱液加固施工应作好施工记录，检查碱液浓度及每孔注入量是否符合

设计要求。施工中每间隔 1~3d，应对既有建筑物的附加沉降进行观测。

**16.4.5** 碱液加固地基的竣工验收，应在加固施工完毕 28d 后进行。可通过开挖或钻孔取样，对加固土体进行无侧限抗压强度试验和水稳性试验。取样部位应在加固土体中部，试块数不少于 3 个，28d 龄期的无侧限抗压强度平均值不得低于设计值的 90%。

将试块浸泡在自来水中，无崩解。当需要查明加固土体的外形和整体性时，可对有代表性加固土体进行开挖，量测其有效加固半径和加固深度。

**16.4.6** 地基经碱液加固后应继续进行沉降观测，观测时间不得少于半年，按加固前后沉降观测结果或用触探法检测加固前后土中阻力的变化，确定加固质量。

## **17 其他地基处理方法**

**17.0.1** 注浆法适用于处理砂土、粉土、粘性土和人工填土等地基。

**17.0.2** 锚杆静压桩法适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土和人工填土等地基。

**17.0.3** 树根桩法适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、砂土、碎石土、黄土和人工填土等地基。

**17.0.4** 坑式静压桩法适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、人工填土和湿陷性黄土等地基。

**17.0.5** 注浆法、锚杆静压桩法、树根桩法和坑式静压桩法的设计和施工应按行业标准《既有建筑地基基础加固技术规范》JGJ 123—2000 有关规定执行。

## **附录 A 复合地基载荷试验要点**

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

**A.0.2** 复合地基载荷试验用于测定承压板下应力主要影响范围内复合土层的承载力和变形参数。复合地基载荷试验承压板应具有足够刚度。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。桩的中心（或形心）应与承压板中心保持一致，并与荷载作用点相重合。

**A.0.3** 承压板底面标高应与桩顶设计标高相适应。承压板底面下宜铺设粗砂或中砂垫层，垫层厚度取 50~150mm，桩身强度高时宜取大值。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。基准梁的支点应设在试坑之外。

**A.0.4** 试验前应采取措施，防止试验场地地基土含水量变化或地基土扰动，以免影响试验结果。

**A.0.5** 加载等级可分为 8~12 级。最大加载压力不应小于设计要求压力值的 2 倍。

**A.0.6** 每加一级荷载前后均应各读记承压板沉降量一次，以后每半个小时读记一次。当一小时内沉降量小于 0.1mm 时，即可加下一级荷载。

**A.0.7** 当出现下列现象之一时可终止试验：

- 1 沉降急剧增大，土被挤出或承压板周围出现明显的隆起；
- 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，而最大加载压力已大于设计要求压力值的 2 倍。

**A.0.8** 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.0.9** 复合地基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 倍时，可取比例界限；当其值小于对应比例界限的 2 倍时，可取极限荷载的一半；

2 当压力—沉降曲线是平缓的光滑曲线时，可按相对变形值确定：

1) 对砂石桩、振冲桩复合地基或强夯置换墩：当以粘性土为主的地基，可取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.015 所对应的压力（ $s$  为荷载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）；当以粉土或砂土为主的地基，可取  $s/d$  或  $s/b$  等于 0.01 所对应的压力。

2) 对上挤密桩。石灰桩或柱锤冲扩桩复合地基，可取 5 小或  $s/d$  等于 0.012 所对应的压力。对灰土挤密桩复合地基，可取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.008 所对应的压力。

3) 对水泥粉煤灰碎石桩或夯实水泥土桩复合地基，当以卵石、圆砾、密实粗中砂为主的地基，可取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.008 所对应的压力；当以粘性土。粉土为主的地基，可取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.01 所对应的压力。

4) 对水泥土搅拌桩或旋喷桩复合地基，可取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.006 所对应的压力。

5) 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.0.10 试验点的数量不应少于 3 点，当满足其极差不超过平均值的 30% 时，可取其平均值为复合地基承载力特征值。

## 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”。

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“应按……执行”或“应符合……的要求（或规定）”。