

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 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 地基处理 ground treatment

提高地基强度，改善其变形性质或渗透性质而采取的技术措施。

2.1.2 复合地基 composite foundation

部分土体被增强或被置换，形成的由地基土和增强体共同承担荷载的人工地基。

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 cushion

挖去表面浅层软弱土层或不均匀土层，回填坚硬、较粗粒径的材料，并夯压密实形成的垫层。

2.1.5 加筋垫层 reinforced cushion

在垫层材料内铺设单层或多层水平向加筋材料形成的垫层。

2.1.6 预压地基 preloading foundation

对地基进行堆载预压或真空预压、或联合使用堆载和真空预压，形成的地基土固结压密后的地基。

2.1.7 堆载预压 drift preloading

对地基进行堆载使地基土固结压密的地基处理方法。

2.1.8 真空预压 vacuum preloading

通过对覆盖于竖井地基表面的不透气薄膜内抽真空排水使地基土固结压密的地基处理方法。

2.1.9 压实地基 compacted foundation

利用平碾、振动碾或其它碾压设备将填土分层密实的处理地基。

2.1.10 夯实地基 rammed foundation

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，将地基土密实的处理地基。

2.1.11 挤密地基 compaction foundation

利用横向挤压设备成孔或采用振冲器水平振动和高压水共同作用下，将松散土层密实的处理地基。

2.1.12 砂石桩复合地基 sand-gravel columns composite foundation

将碎石、砂或砂石挤压入已成的孔中，形成密实砂石增强体的复合地基。

2.1.13 水泥粉煤灰碎石桩复合地基 cement fly ash-gravel pile composite foundation

由水泥、粉煤灰、碎石等混合料加水拌合形成增强体的复合地基。

2.1.14 夯实水泥土桩复合地基 **rammed cement-soil pile composite foundation**

将水泥和土按比例拌合均匀，在孔内分层夯实形成增强体的复合地基。

2.1.15 水泥搅拌桩复合地基 **cement deep mixing composite foundation**

以水泥作为固化剂的主要材料，通过深层搅拌机械，将固化剂和地基土强制搅拌形成增强体的复合地基。

2.1.16 旋喷桩复合地基 **jet grouting composite foundation**

高压水泥浆通过钻杆有水平方向的喷嘴喷出，形成喷射流，以此切割土体并与土拌合形成水泥石增强体的复合地基。

2.1.17 土桩、灰土桩复合地基 **compaction columns composite foundation**

用素土、灰土填入孔内分层夯实形成增强体的复合地基。

2.1.18 注浆加固 **grouting consolidation**

将水泥浆或其它化学浆液注入地基土层中，增强土颗粒间的联结，使土体强度提高、变形减少、渗透性降低的加固方法。

2.1.19 微型桩 **micro pile**

用桩工机械或其他小型设备在土中形成直径不大于 30cm 的桩。

2.2 符号

2.2.1 作用和作用效应

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；

2.2.2 抗力和材料性能

D_r ——砂土相对密实度；

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；

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_a ——单桩竖向承载力特征值；

U ——固结度；

w_{op} ——最优含水量；

θ ——压力扩散角；

λ_c ——压实系数；

ρ_d ——干密度。

2.2.3 几何参数

A ——基础底面积；

A_e ——一根桩承担的处理地基面积；

A_p ——桩的截面积；

b ——基础底面宽度；

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；

l ——基础底面长度，桩长；

m ——面积置换率；

s ——桩间距；

z ——基础底面下换填垫层的厚度；

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。

对具有胶结强度的增强体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 经处理后的地基，当在受力层范围内仍存在软弱下卧层时，应验算下卧层的地基承载力。

3.0.6 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，应对处理后的地基进行变形验算。

3.0.7 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。

3.0.8 存在较弱夹层地基处理设计时，对软塑、流塑状态的土层不仅应验算竖向力的作用效应，

还应验算水平力作用效应；对液化土层应验算地震作用效应。

3.0.9 复合地基设计的地基承载力验算，除满足轴心荷载作用要求外，还应满足偏心荷载作用要求。

3.0.10 处理后的地基整体稳定分析可采用圆弧滑动法，其稳定安全系数不应小于 1.30。散体加固材料的抗剪强度，可按加固体的密实度通过试验确定；胶结材料对整体稳定的作用可按材料面的摩擦考虑。

3.0.11 刚度差异的整体大面积基础地基处理宜根据结构—基础—地基共同作用进行承载力和变形验算。

3.0.12 采用多种地基处理方法综合使用的地基处理工程验收检验时，处理地基的综合安全系数不应小于 2.0。

3.0.13 复合地基载荷试验应符合本规范附录 A 的规定。

3.0.14 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。

3.0.15 地基处理采用的材料，应根据场地环境类别符合有关标准耐久性设计的要求。

3.0.16 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。

4 换填垫层

4.1 一般规定

- 4.1.1** 换填垫层适用于浅层软弱土层或不均匀土层的地基处理。
- 4.1.2** 换填垫层根据换填材料不同可分为土、石垫层和土工合成材料加筋垫层。
- 4.1.3** 换填垫层的厚度应根据置换软弱土的深度以及下卧土层的承载力确定，厚度不宜小于 0.5m，也不宜大于 3m。
- 4.1.4** 应根据建筑体型、结构特点、荷载性质、场地土质条件、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，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。作为建筑物地基垫层的粉煤灰应符合有关建筑材料标准要求。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 11kN/m³，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。在有充分依据或成功经验时，也可采用质地坚硬、性能稳定、透水性强、无腐蚀性的其他工业废渣材料，但必须经过现场试验证明其经济效果良好及施工措施完善方能应用。

7 土工合成材料加筋垫层所用土工合成材料的品种与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，通过现场试验后确定其适用性。

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，垫层材料应具有有良好的透水性。

在软土地基上使用加筋垫层时，应满足建筑物稳定性和变形的要求。

4.2.2 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：

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (4.2.2-1)$$

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 p_z 可分别按 (4.2.2-2) 和 (4.2.2-3) 式计算：

条形基础

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} \quad (4.2.2-2)$$

矩形基础

$$p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)} \quad (4.2.2-3)$$

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);

θ ——垫层的压力扩散角 ($^{\circ}$), 宜通过试验确定, 当无试验资料时, 可按表 4.2.2 采用。

表 4.2.2 垫层材料的压力扩散角 θ ($^{\circ}$)

z/b	换填材料 中砂、粗砂、砾砂、圆砾、角砾、石屑、卵石、碎石、矿渣	粉质粘土 粉煤灰	灰土	一层 加筋	二层及 二层以 上加筋
0.25	20	6	28	25-30	28-38
≥ 0.50	30	23			

注: 1) 当 $z/b < 0.25$, 除灰土取 $\theta = 28^{\circ}$ 、一层加筋取 $\theta = 25^{\circ}$ 、二层及二层以上加筋取 $\theta = 28^{\circ}$

外, 其它材料均取 $\theta = 0^{\circ}$, 必要时宜由试验确定;

2) 当 $0.25 < z/b < 0.5$ 时, θ 值可内插求得。

4.2.3 垫层底面的宽度应满足基础底面应力扩散的要求, 可按下式确定:

$$b' \geq b + 2z \tan \theta \quad (4.2.3)$$

式中 b' ——垫层底面宽度 (m);

θ ——压力扩散角, 可按表 4.2.2 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。

4.2.4 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。

4.2.5 垫层的压实标准应符合下列规定:

1. 对碎石、卵石、砂夹石、土夹石、中砂、粗砂、砾砂、角砾、圆砾、石屑、粉质粘土、灰土、粉煤灰换填材料的压实标准可按表 4.2.5 选用。

表 4.2.5 各种垫层的压实标准

施工方法	换填材料类别	压实系数 λ_c
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%）	
	中砂、粗砂、砾砂、角砾、圆砾、石屑	
	粉质粘土	0.95
	灰土	
	粉煤灰	

注：1 压实系数 λ_c 为土的控制干密度 ρ_d 与最大干密度 ρ_{dmax} 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 $2.2t/m^3$ ；

2 当采用轻型击实试验时，压实系数 λ_c 应取高值，采用重型击实试验时，压实系数 λ_c 可取低值；

2. 矿渣垫层的压实指标可按最后二遍压实的压陷差小于 2mm 控制。

4.2.6 换填垫层地基的承载力应通过现场静载荷试验确定。

4.2.7 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 4.2.2 条、第 4.2.3 条和第 4.2.5 条的条件下，换填垫层地基的变形可仅考虑其下卧层的变形。对沉降要求严格或垫层厚的建筑，应计算垫层自身的变形。

垫层下卧土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。

4.2.8 土工合成材料加筋垫层所用土工合成材料应进行材料强度验算，并符合下列规定：

$$T_p \leq T_a \quad (4.2.8-1)$$

式中： T_p ——土工合成材料作用力（MPa），对于筋材可按下式确定：

$$T_p = p_z f_s / m_c \quad (4.2.8-2)$$

式中： f_s ——筋带的似摩擦系数，由试验确定；

m_c ——土工合成材料筋材综合影响系数，宜控制在 3-8 之间，一般取 4-6；

T_a ——土工合成材料筋材的允许抗拉强度（kN/m）。

4.2.9 加筋垫层的加筋体应设置在垫层的合适部位。一层加筋时，可设置在垫层的中部；多层加筋时，首层筋材离基底的距离宜取 0.3 倍垫层厚度，筋材层间距宜取（0.3-0.6）倍的垫层厚度，且不小于 200mm。对于土工带加筋，加筋线密度宜为 0.33-0.5。垫层的边缘应有足够的锚固长度或锚固措施。

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 $w_{op} \pm 2\%$ 的范围内，粉煤灰垫层的施工含水量宜控制在 $w_{op} \pm 4\%$ 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土层受扰动，可保留约 200mm 厚的土层暂不挖去，待铺填垫层后再挖至设计标高。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 铺设土工合成材料施工，应符合以下要求：

- 1 下铺地基土层顶面应平整，防止土工合成材料被刺穿、顶破；
- 2 土工合成材料应先铺纵向后铺横向，且铺设时应把土工合成材料张拉平整、绷紧，严禁有折皱；
- 3 土工合成材料的连接宜采用搭接法、缝接法或胶接法，连接强度不应低于原材料抗拉

强度，端部应采用有效固定方法，防止筋材拉出；

4 应避免土工合成材料暴晒或裸露，阳光暴晒时间不应大于 8 小时。

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。

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设下层土。

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 50~100 m² 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。在有充分试验依据时也可采用标准贯入试验或静力触探试验。

4.4.5 对加筋垫层中土工合成材料应进行如下检验：

- 1、土工合成材料质量符合设计要求、外观无破损、无老化、无污染；
- 2、土工合成材料要求张拉平整、无皱折、紧贴下承层，锚固端锚固牢固；
- 3、上下层土工合成材料搭接缝要交替错开，搭接强度应满足设计要求。

5 预压地基

5.1 一般规定

5.1.1 预压地基是指采用堆载预压、真空预压或真空和堆载联合预压处理淤泥质土、淤泥、冲填土等饱和粘性土地基。

5.1.2 对塑性指数大于 25 且含水量大于 85%的淤泥，应通过现场试验确定其适用性。加固土层上覆盖有厚度大于 5m 以上的回填土或承载力较高的粘性土层时，不宜采用真空预压加固。

5.1.3 预压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，查明透土层的位置、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先期固结压力、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。

5.1.4 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。

5.1.5 对堆载预压工程，预压荷载应分级逐渐施加，保证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。

5.1.6 对以变形控制设计的建筑物，当塑料排水带或砂井等排水竖井处理深度范围和竖井面以下受压土层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。对以地基承载力或抗滑稳定性控制设计的建筑物，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。

5.1.7 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，可采用真空和堆载联合预压，其总压力宜超过建筑物的竖向荷载。

5.1.8 采用真空预压或真空和堆载联合预压时，加固区边线与周边建筑物、地下管线等的距离应考虑真空预压对其造成的附加沉降，并根据土质条件、建筑物与管线等设施重要性、对沉降的敏感性等确定，且不宜小于 20m。当距离较近时，应采取相应保护措施。

5.1.9 当预压时间、残余沉降或工后沉降不满足工程要求时，可采取超载预压。

5.2 设计

(I) 堆载预压

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 300~500 mm，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）；

δ —塑料排水带厚度（mm）。

5.2.4 排水竖井的平面布置应符合如下规定：

1 可采用等边三角形或正方形排列。

2 等边三角形排列时，竖井的有效排水直径 d_e 与间距 l 的关系为 $d_e=1.05l$ ；

3 正方形排列时，竖井的有效排水直径 d_e 与间距 l 的关系为 $d_e=1.13l$ 。

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比 n 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 排水竖井的深度应符合如下规定：

1 根据建筑物对地基的稳定性、变形要求和工期确定；

2 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；

3 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：

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

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);

$\sum \Delta p$ —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 ;

α, β —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 β 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	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
α	$\frac{8}{\pi^2}$	1	$\frac{8}{\pi^2}$	$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ c_h —土的径向排水固结系数 (cm^2/s)
β	$\frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$	$\frac{8c_h}{F_n d_e^2}$	$\frac{8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$	c_v —土的竖向排水固结系数 (cm^2/s) \bar{U}_z —双面排水土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 q_w 与天然土层水平向渗透系数 k_h 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式计算:

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

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (5.2.8-2)$$

$$F_n = \ln(n) - \frac{3}{4} \quad n \geq 15 \quad (5.2.8-3)$$

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

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

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

k_h —天然土层水平向渗透系数 (cm/s)；

k_s —涂抹区土的水平向渗透系数，可取 $k_s = \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{3}\right)k_{\square}$ (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 —竖井纵向通水量，为单位水力梯度下单位时间的排水量 (cm³/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 $\alpha = \frac{8}{\pi^2}$ ， $\beta = \frac{8c_{\square}}{F d_s^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$ 。

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、范围、加载速率应符合如下规定：

1 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。

2 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。

3 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性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：

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

式中 τ_{ft} — t 时刻，该点土的抗剪强度 (kPa)；

τ_{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；

φ_{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下式计算：

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

式中 s_f —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)；

ξ —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、地基土较软弱时应取较大值。

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

5.2.13 预压处理地基必须在地表铺设与排水竖井相连的砂垫层，砂垫层应符合如下要求：

1 厚度不应小于 500mm；

2 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 1.5g/cm^3 ，其渗透系数宜大于 $1 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 。

5.2.14 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。

5.2.15 砂井的砂料应选用中粗砂，其粘粒含量不应大于 3%。

(II) 真空预压

5.2.16 真空预压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。

5.2.17 排水竖井的间距可按本规范第 5.2.5 条选用。

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

5.2.19 真空预压竖向排水通道宜穿透软土层，但不应进入下卧透水层。软土层厚度较大、且以地基抗滑稳定性控制的工程，竖向排水通道的深度至少应超过最危险滑动面 3.0m。对以变形控制的工程，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，且宜穿透主要受压土层。

5.2.20 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 3.0 m。每块预压面积宜尽可能大且呈方形。

5.2.21 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%。

5.2.22 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。

5.2.23 真空预压固结度和强度增长的计算可按 5.2.7 条、5.2.8 条、5.2.11 条计算。

5.2.24 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 ξ 可取 0.8~0.9。

5.2.25 真空预压加固面积较大时，宜采取分区加固，分区面积宜为 20000~40000 m²。

5.2.26 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 1000~1500m² 确定。

(III) 真空和堆载联合预压

5.2.27 当设计地基预压荷载大于 80kPa 时，应在真空预压抽真空的同时再施加定量的堆载。

5.2.28 堆载体的坡肩线宜与真空预压边线一致。

5.2.29 对于一般软粘土，当膜下真空度稳定地达到 650mmHg 后，抽真空 10 天左右可进行上部堆载施工，即边抽真空，边施加堆载。对于高含水量的淤泥类土，当膜下真空度稳定地达到 650mmHg 后，一般抽真空 20~30 天可进行堆载施工。

5.2.30 当堆载较大时，真空和堆载联合预压法应提出荷载分级施加要求，分级数应根据地基土稳定计算确定。分级逐渐加载时，应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。

5.2.31 真空和堆载联合预压地基固结度和强度增长的计算可按 5.2.7 条、5.2.8 条、5.2.11 条计算。

5.2.32 真空和堆载联合预压以真空预压为主时，最终竖向变形可按本规范第 5.2.12 条计算，其中 ξ 可取 0.9。

5.3 施工

(I) 堆载预压

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%。

5.3.3 灌入砂袋中的砂宜用干砂，并应灌制密实。

5.3.4 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。

5.3.5 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。

5.3.6 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。袋装砂井施工所用套管内径略大于砂井直径。

5.3.7 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。

5.3.8 塑料排水带和袋装井砂袋埋入砂垫层中的长度不应小于 500mm。

5.3.9 堆载预压工程在加载过程中应满足地基强度和稳定控制要求。在加载过程中应进行竖向变形、水平位移及孔隙水压力等项目的监测。根据监测资料控制加载速率，应满足如下要求：

- 1 对竖井地基，最大竖向变形量不应超过 15 mm/d，对天然地基，最大竖向变形量不应超过 10 mm/d；
- 2 边缘处水平位移不应超过 5 mm/d；
- 3 根据上述观察资料综合分析、判断地基的强度和稳定性。

(II) 真空预压

5.3.10 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，但每块预压区至少应设置两台真空泵。

5.3.11 真空管路设置应符合如下规定：

- 1 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。
- 2 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。
- 3 滤水管应设在砂垫层中，其上覆盖厚度 100~200mm 的砂层。
- 4 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。

5.3.12 密封膜应符合如下要求：

- 1 密封膜应采用抗老化性能好、韧性好、抗穿刺性能强的不透气材料。
- 2 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。
- 3 密封膜宜铺设三层，膜周边可采用挖沟埋膜，平铺并用粘土覆盖压边、围埝沟内及膜上覆水等方法进行密封。

5.3.13 地基土渗透性强时应设置黏土密封墙。黏土密封墙宜采用双排水泥土搅拌桩。搅拌桩直径不宜小于 700mm。当搅拌桩深度小于 15m 时，搭接宽度不宜小于 200mm，当搅拌桩深度大

于 15m 时，搭接宽度不宜小于 300mm。成桩搅拌应均匀，黏土密封墙的渗透系数应满足设计要求。

(III) 真空和堆载联合预压

5.3.14 采用真空和堆载联合预压时，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，并继续抽真空。

5.3.15 堆载前需在膜上铺设土工编织布等保护层。保护层可采用编织布或无纺布等，其上铺设 100~300mm 厚的砂垫层。

5.3.16 堆载时应采用轻型运输工具，并不得损坏密封膜。

5.3.17 在进行上部堆载施工时，应密切观察膜下真空度的变化，发现漏气应及时处理。

5.3.18 堆载加载过程中，应满足地基稳定性控制要求。在加载过程中应进行竖向变形、边缘水平位移及孔隙水压力等项目的监测，并应满足如下要求：

- 1 地基向加固区外的侧移速率不大于 5mm/d；
- 2 地基沉降速率不大于 30mm/d。
- 3 根据上述观察资料综合分析、判断地基的稳定性。

5.3.19 真空和堆载联合预压施工除上述规定外，尚应符合 (I) 堆载预压和 (II) 真空预压的有关规定。

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 塑料排水带必须在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。加固前的地基土检测应在打设排水塑料板前进行。
- 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 真空预压和真空-堆载联合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 预压地基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。对真空预压和真空-堆载联合预压，加固后的检测应在卸载 3~5d 后进行。
- 3 必要时，尚应进行现场载荷试验，试验数量不应少于 3 点。

6 压实、夯实、挤密地基

6.1 压实地基

6.1.1 压实地基处理应符合下列规定：

- 1 本节压实地基系指大面积填土经处理后形成的地基，浅层软弱地基以及不均匀地基换填处理按照本规范第四章有关规定执行。
- 2 压实填土包括分层压实和分层夯实的填土。碾压法用于地下水位以上填土的压实；振动压实法用于振实非粘性土或粘粒含量少、透水性较好的松散填土地基；（重锤）夯实法主要适用于稍湿的杂填土、粘性土、砂性土、湿陷性黄土和碎石土、砂土、粗粒土与低饱和度细粒土的分层填土等地基。
- 3 应根据建筑体型、结构与荷载特点、场地土层条件、变形要求及填料等综合分析后选择施工方法并进行压实地基的设计。
- 4 当利用压实填土作为建筑工程的地基持力层时，应根据结构类型、填料性能和现场条件等，对拟压实的填土提出质量要求。未经检验查明以及不符合质量要求的压实填土，均不得作为建筑工程的地基持力层。
- 5 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。

6.1.2 压实填土的设计应符合下列规定：

- 1 压实填土的填料可选用粉质粘土，灰土，粉煤灰，级配良好的砂土或碎石土，土工合成材料，质地坚硬、性能稳定、无腐蚀性和放射性危害的工业废料等，并符合下列规定：
 - （1）以砾石、卵石或块石作填料时，分层压实时其最大粒径不宜大于 200mm，分层夯实时其最大粒径不宜大于 400mm；
 - （2）以粉质粘土、粉土作填料时，其含水量宜为最优含水量，可采用击实试验确定；
 - （3）挖高填低或开山填沟的土料和石料，应符合设计要求；
 - （4）不得使用淤泥、耕土、冻土、膨胀性土以及有机质含量大于 5% 的土。
- 2 碾压法和振动压实法施工时应根据压实机械的压实能量、地基土的性质、压实系数和施工含水量等来控制，选择适当的碾压分层厚度和碾压遍数。碾压分层厚度、碾压遍数、碾压范围和有效加固深度等施工参数宜由现场试验确定。
- 3 重锤夯实法常用锤重为 1.5~3.2t，落距为 2.5~4.5m，夯打遍数一般取 6~10 遍。宜通过试夯确定施工方案，试夯的层数不宜小于两层。当最后两遍的平均夯沉量对于粘性土和湿陷性黄土等一般不大于 1.0~2.0cm，对于砂性土等一般不大于 0.5~1.0cm。
- 4 压实填土地基承载力特征值，应根据现场原位测试（静载荷试验、动力触探、静力触探等）结果确定。其下卧层顶面的承载力应满足式 4.2.2-2、4.2.2-3 的要求。
- 5 压实填土的质量以压实系数 λ_c 控制，并应根据结构类型和压实填土所在部位按表 6.1.2-1

的数值确定。

表 6.1.2.-1 压实填土的质量控制

结构类型	填土部位	压实系数 λ_c	控制含水量 (%)
砌体承重结构 和框架结构	在地基主要受力层范围内	≥ 0.97	$w_{op} \pm 2$
	在地基主要受力层范围以下	≥ 0.95	
排架结构	在地基主要受力层范围内	≥ 0.96	
	在地基主要受力层范围以下	≥ 0.94	

注：1 地坪垫层以下及基础底面标高以上的压实填土，压实系数不应小于 0.94。

6 压实填土的最大干密度和最优含水量，宜采用击实试验确定，当无试验资料时，最大干密度可按下列式计算：

$$\rho_{d\max} = \eta \frac{\rho_w d_s}{1 + 0.01 w_{op} d_s} \quad (6.1.2-1)$$

式中， $\rho_{d\max}$ —— 分层压实填土的最大干密度；

η —— 经验系数，粉质粘土取 0.96，粉土取 0.97；

ρ_w —— 水的密度；

d_s —— 土粒相对密度（比重）；

w_{op} —— 填料的最优含水量。

当填料为碎石或卵石时，其最大干密度可取 $2.2t/m^3$ 。

7 压实填土的边坡允许值，应根据其厚度、填料性质等因素，按表 6.1.2-2 的数值确定。

表 6.1.2-2 压实填土的边坡允许值

填料类别	压实系数 λ_c	边坡允许值			
		填土厚度 H (m)			
		H≤5	5<H≤10	10<H≤15	15<H≤20
碎石、卵石	0.94~0.97	1: 1.25	1: 1.50	1: 1.75	1: 2.00
砂夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）		1: 1.25	1: 1.50	1: 1.75	1: 2.00
土夹石（其中碎石、卵石占全重的 30%~50%）		1: 1.25	1: 1.50	1: 1.75	1: 2.00
粉质粘土、粘粒含量 $\rho_c \geq 10\%$ 的粉土		1: 1.50	1: 1.75	1: 2.00	1: 2.25

注：当压实填土厚度大于 20m 时，可设计成台阶进行压实填土的施工。

8 冲击碾压法的设计应根据土质条件、工期要求等因素综合确定，施工前应进行试验段工

程，每层松铺厚度通过试验确定。

9 压实填土地基的变形计算应符合第 4.2.7 条的规定。

6.1.3 压实地基的施工应符合下列规定：

- 1 铺填料前，应清除或处理场地内填土层底面以下的耕土或软弱土层等。
- 2 分层填料的厚度、分层压实的遍数，宜根据所选用的压实设备，并通过试验确定。
- 3 采用重锤夯实分层填土地基时，每层的虚铺厚度宜通过试夯确定。当使用重锤夯实地基时，夯前应检查坑（槽）中土的含水量，并根据试夯结果决定是否需要增湿。当含水量较低，宜加水至最优含水量，需待水全部渗入土中一昼夜后方可夯击。若含水量过大，可采取铺撒干土、碎砖、生石灰等、换土或其他有效措施处理。分层填土时，应采取含水量相当于最优含水量的土料。每层土铺填后应及时夯实。
- 4 在雨季、冬季进行压实填土施工时，应采取防雨、防冻措施，防止填料（粉质粘土、粉土）受雨水淋湿或冻结，并应采取防止出现“橡皮土”。
- 5 压实填土的施工缝各层应错开搭接，在施工缝的搭接处，应适当增加压实遍数。先振基槽两边，再振中间。压实标准以振动机原地振实不再继续下沉为合格。边角及转弯区域应采取其它措施压实，以达到设计标准。
- 6 性质不同的填料，应水平分层、分段填筑，分层压实。同一水平层应采用同一填料，不得混合填筑。填方分几个作业段施工时，接头部位如不能交替填筑，则先填筑区段，应按 1:1 坡度分层留台级；如能交替填筑，则应分层相互交替搭接，搭接长度不小于 2m。

7 压实施工场地附近有需要保护的建筑物时，应合理安排施工时间，减少噪声与振动对环境的影响。必要时可采取挖减震沟等减震隔振措施或进行振动监测。

8 施工过程中严禁扰动垫层下卧层的淤泥或淤泥质土层，防止受冻或受水浸泡。施工结束后应根据采用的施工工艺，待土层休止期后再进行基础施工。

6.1.4 设置在斜坡上的压实填土，应验算其稳定性。当天然地面坡度大于 20% 时，应采取防止压实填土可能沿坡面滑动的措施，并应避免雨水沿斜坡排泄。

6.1.5 当压实填土阻碍原地表水畅通排泄时，应根据地形修筑雨水截水沟，或设置其它排水设施。设置在压实填土区的上、下水管道，应采取防渗、防漏措施。

6.1.6 压实填土地基的质量检验应符合下列规定：

- 1 压实地基的施工质量检验应分层进行，每完成一道工序应按设计要求及时验收，合格后，方可进行下道工序。
- 2 在压实填土的过程中，应分层取样检验土的干密度和含水量。每 50~100 m² 面积内应有一个检测点，压实系数不得低于表 6.1.2.3 的规定，对碎石土干密度不得低于 2.0 t/m³。
- 3 重锤夯实的质量验收，除符合试夯最后下沉量的规定要求外，同时还要求基坑（槽）表面的总下沉量不小于试夯总下沉量的 90% 为合格。如不合格应进行补夯，直至合格为止。

4 冲击碾压法垫层宜进行沉降量、压实度、土的物理力学参数、层厚、弯沉、破碎状况等的监测和检测。

5 工程质量验收可通过载荷试验并结合动力触探、静力触探、标准贯入试验等原位试验进行。每个单体工程载荷试验不宜少于3点，大型工程可按单体工程的数量或面积确定检验点数。

6.2 夯实地基

6.2.1 夯实地基处理应符合下列规定：

1 夯实地基是指采用强夯法或强夯置换法处理的地基。

2 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。

3 强夯置换法在设计前必须通过现场试验确定其适用性和处理效果。

4 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。

6.2.2 强夯地基的设计应符合下列规定：

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 6.2.2.1 预估。

表 6.2.2.1 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	4.0~5.0	3.0~4.0
2000	5.0~6.0	4.0~5.0
3000	6.0~7.0	5.0~6.0
4000	7.0~8.0	6.0~7.0
5000	8.0~8.5	7.0~7.5
6000	8.5~9.0	7.5~8.0
8000	9.0~9.5	8.0~9.0
10000	10.0~11.0	9.5~10.5
12000	11.5~12.5	11.0~12.0
14000	12.5~13.5	12.0~13.0
15000	13.5~14.0	13.0~13.5
16000	14.0~14.5	13.5~14.0
18000	14.5~15.5	—

注：强夯法的有效加固深度应从最初起夯面算起。

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 3000kN m 时为 50mm; 当单击夯击能不小于 3000kN m, 不足 6000kN m 时为 100mm; 当单击夯击能不小于 6000kN m, 不足 10000kN m 时为 200mm; 当单击夯击能不小于 10000kN m, 不足 15000kN m 时为 250mm; 当单击夯击能不小于 15000kN m 时为 300mm;

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。

3 夯击遍数应根据地基土的性质确定, 可采用点夯 2~4 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 1~2 遍, 满夯可采用轻锤或低落距锤多次夯击, 锤印搭接。

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 3~4 周; 对于渗透性好的地基可连续夯击。

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 2.5~3.5 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 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下设计处理深度的 1/2 至 2/3, 并不宜小于 3m。对可液化地基, 扩大范围不应小于可液化土层厚度的 1/2, 并不应小于 5m; 对湿陷性黄土地基, 尚应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑地筑规范》GB 50025 有关规定。

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。

8 根据试夯夯沉量确定起夯面标高和夯坑回填方式。

9 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地区经验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。

10 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。

6.2.3 强夯法施工应符合下列规定:

1 强夯夯锤质量可取 10t~60t, 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 kPa~80kPa, 单击夯击能高时取大值, 单击夯击能低时取小值, 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 300 mm~400mm。

2 强夯法施工应按下列步骤进行:

- 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。当夯坑过深出现提锤困难, 又无明显隆起, 而尚未达到控制标准时, 宜将夯坑回填不超过 1/2 深度后, 继续夯击;
- 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。

6.2.4 强夯置换地基的设计应符合下列规定:

- 1 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 10m。
- 2 强夯置换法的单击夯击能应根据现场试验确定。
- 3 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%。
- 4 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 第 2 款的规定值。
- 5 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 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。
- 7 当墩间净距较大时, 应适当提高上部结构和基础的刚度。
- 8 强夯置换处理范围应符合本规范第 6.2.2 第 6 款的规定。
- 9 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。
- 10 强夯置换设计时, 应预估地面抬高值, 并在试夯时校正。

11 强夯置换法试验方案的确定，应符合本规范第 6.2.2 第 7 款的规定。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。

12 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。

13 强夯置换地基的变形计算应符合本规范 7.2 节有关条款的规定。

6.2.5 强夯置换地基的施工应符合下列规定：

1 强夯置换夯锤底面形式宜采用圆柱形，夯锤底静接地压力值宜大于 100 kPa。

2 强夯置换施工应按下列步骤进行：

1) 清理并平整施工场地，当表土松软时可铺设一层厚度为 1.0m~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。

6.2.6 起吊夯锤的起重机械宜采用的带有自动脱钩装置履带式起重机、强夯专用施工机械，或其它可靠的起重设备，夯锤的质量不应超过起重机械自身额定起重质量。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。

6.2.7 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砂石材料，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，对细颗粒土，应经过晾晒，含水量满足要求后施工。

6.2.8 施工前应查明影响范围内地下建构筑物的位置及标高，并采取必要措施予以保护。

6.2.9 施工时应设置安全警戒；强夯引起的振动对邻近建构筑物可能产生影响时，应进行振动监测，必要时应采取隔震或减震措施。

6.2.10 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、每击的夯沉量、最后两级的平均夯沉量和总夯沉量，夯点施工起止时间。对强夯置换尚应检查置换深度。

6.2.11 施工过程中应对各项参数及情况进行详细记录。

6.2.12 夯实地基施工结束后应根据地基土的性质和采用的施工工艺，待土层休止期后再进行基础施工。

6.2.13 夯实地基的质量检验应符合下列规定：

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。

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。

3 强夯处理后的地基竣工验收时，承载力检验应采用静载试验、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有效手段查明置换墩着底情况及承载力与密度随深度的变化，对饱和粉土地基可采用单墩复合地基载荷试验检验。

4 竣工验收检验工作量，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着底情况检验数量均不应少于墩点数的 1%，且不应少于 3 点。其它检测工作量可根据工程实际确定。

6.3 挤密地基

6.3.1 挤密地基处理应符合下列规定：

1 挤密地基是指利用沉管、冲击、夯扩、振冲、振动沉管等方法在土中挤压、振动成孔，使桩孔周围土体得到挤密、振密，并向桩孔内分层填料形成的地基。适用于处理湿陷性黄土、砂土、粉土、素填土和杂填土等地基。

2 当以消除地基土的湿陷性为主要目的时，宜选用土桩挤密法。当以提高地基土的承载力或增强其水稳性为主要目的时，宜选用灰土桩（或其他具有一定胶凝强度桩如二灰桩、水泥土桩等）挤密法。当以消除地基土液化为主要目的时，宜选用振冲或振动挤密法。

3 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。

6.3.2 土桩、灰土桩挤密地基的设计应符合下列规定：

1 挤密地基的处理面积，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。

2 挤密地基的厚度宜为 3~15m, 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。

3 桩孔直径宜为 300~600mm, 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:

$$s = 0.95d \sqrt{\frac{\bar{\eta}_c \rho_{d\max}}{\bar{\eta}_c \rho_{d\max} - \rho_d}} \quad (6.3.2-1)$$

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^3);

$\bar{\rho}_d$ ——地基处理前的平均干密度 (t/m^3);

$\bar{\eta}_c$ ——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。

4 桩间土的平均挤密系数 $\bar{\eta}_c$, 应按下式计算:

$$\bar{\eta}_c = \frac{\bar{\rho}_{d1}}{\rho_{d\max}} \quad (6.3.2-2)$$

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

5 桩孔的数量可按下式估算:

$$n = \frac{A}{A_e} \quad (6.3.2-3)$$

式中 n ——桩孔的数量;

A ——拟处理地基的面积 (m^2);

A_e ——1 根土或灰土挤密桩所承担的处理地基面积 (m^2), 即:

$$A_e = \frac{\pi d_e^2}{4} \quad (6.3.2-4)$$

d_e ——一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径 (m);

桩孔按等边三角形布置 $d_e = 1.05s$

桩孔按正方形布置 $d_e = 1.13s$

6 桩孔内的填料, 应根据地基处理的目的和工程要求, 采用素土、灰土、二灰 (粉煤灰与石灰) 或水泥土等。对于灰土, 消石灰与土的体积配合比宜为 2: 8 或 3: 7; 对于水泥土, 水泥与土的体积配合比宜为 1: 9 或 2: 8。孔内填料均应分层回填夯实, 填料的平均压实系数 $\bar{\lambda}_c$ 值不应小于 0.97, 其中压实系数最小值不应低于 0.94。

7 桩顶标高以上应设置 300~600mm 厚的灰土或水泥土垫层,其压实系数不应小于 0.95。

6.3.3 土桩、灰土桩挤密地基承载力特征值,应通过单桩静载荷试验或复合地基载荷试验确定。

6.3.4 土桩、灰土桩挤密地基的变形计算,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。

6.3.5 土桩、灰土桩挤密地基的施工应符合下列要求:

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)、冲击或钻孔夯扩等方法。

2 桩顶设计标高以上的预留覆盖土层厚度宜符合下列要求:

1) 沉管(锤击、振动)成孔,宜不小于 1.0m;

2) 冲击成孔、钻孔夯扩法,宜不小于 1.5m。

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:

$$Q = v \bar{\rho}_d (w_{op} - \bar{w}) k \quad (6.3.5)$$

式中 Q ——计算加水量 (m^3);

v ——拟加固土的总体积 (m^3);

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

w_{op} ——土的最优含水量 (%),通过室内击实试验求得;

\bar{w} ——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土层中。

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。

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。

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。

7 雨季或冬季施工,应采取防雨或防冻措施,防止填料受雨水淋湿或冻结。

8 成桩后,应及时抽样检验挤密地基的质量。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。

9 桩孔夯填质量检验应随机抽样检测,抽检的数量不应少于桩总数的 1%;且总计不得

少于 9 根桩。

6.3.6 土桩、灰土桩挤密地基的载荷试验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。

6.3.7 振冲挤密地基的设计应符合下列规定：

1 地基处理范围应根据建筑物的重要性和场地条件确定，当用于多层建筑和高层建筑时，宜在基础外缘扩大 1~3 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，并不应小于 5m。

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。

3 桩的间距应通过现场试验确定，并应符合下列规定：

1) 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；

2) 振动沉管桩的间距，对粉土和砂土地基，不宜大于桩直径的 4.5 倍；对粘性土地基不宜大于桩直径的 3 倍。

初步设计时，桩的间距也可按下列公式估算：

等边三角形布置

$$s = 0.95\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (6.3.7-1)$$

正方形布置

$$s = 0.89\xi d \sqrt{\frac{1+e_0}{e_0-e_1}} \quad (6.3.7-2)$$

$$e_1 = e_{\max} - D_{r1}(e_{\max} - e_{\min}) \quad (6.3.7-3)$$

式中 s ——砂石桩间距 (m)；

d ——砂石桩直径 (m)；

ξ ——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。

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。

5 在桩顶和基础之间宜铺设一层300~500mm厚的碎（砂）石垫层。

6 振冲法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。振动沉管法桩体材料可用碎石、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。

7 振冲桩的直径一般为0.8~1.2m；振动沉管桩的直径一般为0.3~0.8m。可按每根桩所用填料量计算。

8 振冲挤密地基承载力特征值应通过现场载荷试验确定。

9 振冲挤密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》GB50007有关规定。加固土层的压缩模量可按下式计算：

$$E_{sp} = [1 + m(n-1)] E_s \quad (6.3.7-4)$$

式中 E_{sp} ——加固土层压缩模量(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(7.3.7-4)中的桩土应力比，在无实测资料时，对粘性土可取2~4，对粉土和砂土可取1.5~3，原土强度低取大值，原土强度高取小值。

10 不加填料振冲挤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。

11 不加填料振冲加密孔距可为2~3m，宜用等边三角形布孔。

12 不加填料振冲挤密地基承载力特征值应通过现场载荷试验确定，初步设计时也可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。

13 不加填料振冲挤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》GB50007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。

6.3.8 振冲挤密地基的施工应符合下列规定：

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。

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。

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不提出孔口, 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。

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。

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。

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 8~10m/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 0.5m, 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 振密孔施工顺序宜沿直线逐点逐行进行。

6.3.9 沉管挤密地基的施工应符合下列规定:

1 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。

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。

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。

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。

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。

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。

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 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。

6.3.10 振动挤密地基施工后应检查施工各项记录, 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。

6.3.11 施工结束后, 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 21~28d, 对粉土地基可取 14~21d, 对砂土和杂填土地基, 不宜少于 7d。。

6.3.12 桩的施工质量检验可采用单桩载荷试验, 检验数量不应少于总桩数的 0.5%, 且不少于 3 根。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%。

6.3.13 振动挤密地基竣工验收时，承载力检验应采用静载荷板试验。

6.3.14 振动挤密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。

6.3.15 对不加填料振冲挤密处理的砂土地基，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。

7 复合地基

7.1 一般规定

7.1.1 复合地基设计应满足建筑物承载力和变形要求。对于地基土为欠固结土、膨胀土、湿陷性黄土、可液化土等特殊土，设计时应综合考虑土体的特殊性质选用适当的增强体和施工工艺。

7.1.2 复合地基设计应在有代表性的场地上进行现场试验或试验性施工，并进行必要的测试，以确定设计参数和处理效果，取得地区经验后方可推广使用。

7.1.3 复合地基增强体应进行桩身完整性和承载力检验。

7.1.4 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，或采用增强体的载荷试验结果和周边土的承载力特征值根据经验确定。

7.1.5 复合地基初步设计时可按下式估算承载力：

1 对散体材料增强体复合地基

$$f_{spk} = [1 + m(n-1)]\alpha f_{ak} \quad (7.1.5-1)$$

式中 f_{spk} ——复合地基承载力特征值 (kPa)；

f_{ak} ——天然地基承载力特征值 (kPa)；

α ——桩间土承载力提高系数，应按静载荷试验确定；

n ——复合地基桩土应力比，在无实测资料时，可取 1.5~2.5，原土强度低取大值，原土强度高取小值；

m ——复合地基置换率， $m = d^2/d_e^2$ ； d 为桩身平均直径 (m)， d_e 为一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径 (m)；

等边三角形布桩 $d_e = 1.05s$

正方形布桩 $d_e = 1.13s$

矩形布桩 $d_e = 1.13\sqrt{s_1s_2}$

s 、 s_1 、 s_2 分别为桩间距、纵向桩间距和横向桩间距。

2 对有粘结强度增强体复合地基

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (7.1.5-2)$$

式中： f_{spk} ——复合地基承载力特征值(kPa)；

λ ——单桩承载力发挥系数，宜按当地经验取值，无经验时可取 0.7~0.90；

m ——面积置换率；

R_a ——单桩承载力特征值(kN)；

A_p ——桩的截面积(m²)；

β ——桩间土承载力发挥系数，按当地经验取值，无经验时可取 0.9~1.00；

f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值(kPa), 应按静载荷试验确定; 无试验资料时可取天然地基承载力特征值。

7.1.6 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(7.1.6)估算

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (7.1.6)$$

式中: 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, 应按地区经验确定。

l_i ——桩长范围内第 i 层土的厚度(m);

q_p ——桩端土端阻力特征值(kPa), 可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定确定;

7.1.7 有粘结强度复合地基增强体桩身强度应满足下列规定:

$$f_{cu} \geq 3 \frac{R_a}{A_p} \quad (7.1.7-1)$$

式中 f_{cu} ——桩体试块(边长 150mm 立方体)标准养护 28d 的立方体抗压强度平均值(kPa)

当承载力验算考虑基础埋深的深度修正时增强体桩身强度还应满足下式规定:

$$f_{cu} \geq 3 \frac{R_a}{A_p} + \gamma_m (d - 0.5) \quad (7.1.7-2)$$

式中 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;

d ——基础埋置深度 (m)。

7.1.8 复合地基变形计算应符合国家《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定。

复合土层的压缩模量可按下式计算:

$$E_{sp} = \zeta \cdot E_s \quad (7.1.8-1)$$

$$\zeta = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \quad (7.1.8-2)$$

式中 f_{ak} ——基础底面下天然地基承载力特征值 (kPa)

7.1.9 复合地基的变形计算经验系数应根据地区沉降观测资料统计确定, 无经验资料时可采用表

7.1.9 的数值。

表 7.1.9 变形计算经验系数 ψ_s

\bar{E}_s (MPa)	4.0	7.0	15.0	30.0	45.0
复合地基	1.0	0.7	0.4	0.25	0.15

7.2 砂石桩复合地基

7.2.1 砂石桩复合地基处理应符合下列规定：

1 砂石桩施工方法，根据成孔的方式不同可分为振冲法、振动沉管法等。根据桩体材料可分为碎石桩、砂石桩和砂桩。碎石桩、砂石桩施工可采用振冲法或沉管法，砂桩施工可采用沉管法。

2 砂石桩复合地基适用于处理松散砂土、粉土、挤密效果好的素填土、杂填土等地基。砂石桩挤密法处理可液化地基应符合规范第 6.3 节的规定。

3 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。

7.2.2 砂石桩复合地基设计应符合下列规定：

1 砂石桩复合地基处理范围应根据建筑物的重要性和场地条件确定，宜在基础外缘扩大 1~3 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，且不应小于 5m。

2 桩位布置，对大面积满堂处理，可采用三角形、正方形、矩形布桩；对条形基础，可沿基础轴线布桩，当单排桩不能满足设计要求时，可采用多排布桩；对单独基础，可采用三角形、正方形、矩形或混合型布桩。

3 砂石桩直径可根据地基土质情况、成桩方式和成桩设备等因素确定，其平均直径可按每根桩所用填料量计算。对采用振冲法成孔的碎石桩，直径通常采用 800~1200mm；当采用振动沉管法成桩时，直径通常采用 300~600mm。

4 砂石桩的间距的确定应符合 6.3.7 条的有关规定；

5 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) 当松软土层厚度不大时，砂石桩桩长宜穿透松软土层；

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》GB50011 的有关规定采用。

6 桩体材料应符合 6.3.7 条的有关规定；

7 在桩顶和基础之间宜铺设一层厚度为 300~500mm 的砂石垫层。

8 砂石桩复合地基的承载力初步设计按 (7.1.5-1) 式估算承载力时，桩间土承载力提高系数 α ，宜按当地经验取值，如无经验，对于松散的砂土、粉土可取 1.2~1.5，原土强度低取大值，原土强度高取小值；复合地基桩土应力比 n ，在无实测资料时，可取 1.5~2.5，原土强度低取大值，原土强度高取小值。

9 砂石桩复合地基的地基变形计算应符合 7.1.8 条的要求；

10 当砂石桩用于处理堆载地基时，应进行抗滑稳定性验算。

7.2.3 振冲砂石桩的施工应符合 6.3.8 条的有关规定。

7.2.4 沉管砂石桩复合地基的施工应符合下列规定：

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。

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。

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。

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；一次性桩尖可采用混凝土锥形桩尖。

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。

6 砂石桩桩孔内材料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确定，充盈系数可取 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。

7 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，在既有建（构）筑物邻近施工时，应背离建（构）筑物方向进行。

8 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%。

9 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。

7.2.5 砂石桩复合地基的检测与检验应符合下列规定

1 检查碎石桩施工各项施工记录，如有遗漏或不符合规定要求的桩，应补做或采取有效的补救措施。

2 施工后应间隔一定时间，方可进行质量检验。对砂土地基，不宜少于 7d；对粉土和杂填土地基，不宜少于 14d。

3 砂石桩复合地基施工质量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%。

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。

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。

7.3 水泥土搅拌桩复合地基

7.3.1 水泥土搅拌桩复合地基处理应符合下列规定：

1 水泥土搅拌桩的施工工艺分为浆液搅拌法(以下简称湿法)和粉体搅拌法(以下简称干法)。适用于处理淤泥、淤泥质土、素填土、软—可塑粘性土、松散—中密粉细砂、稍密—中密粉土、松散—稍密中粗砂和砾砂、黄土等土层。不适用于含大孤石或障碍物较多且不易清除的杂填土，硬塑及坚硬的粘性土、密实的砂类土以及地下水渗流影响成桩质量的土层。当地基土的天然含水量小于 30%(黄土含水量小于 25%)、大于 70%时不应采用干法。寒冷地区冬季施工时，应考虑负温对处理效果的影响。

2 水泥土搅拌法用于处理泥炭土、有机质含量较高或 PH 值小于 4 的酸性土、塑性指数大于 25 的粘土或在腐蚀性环境中以及无工程经验的地区采用水泥土搅拌法时，必须通过现场和室内试验确定其适用性。

3 水泥土搅拌法可采用单头、双头、多头搅拌或连续成槽搅拌形成水泥土加固体；湿法搅拌可插入型钢形成排桩(墙)。加固体形状可分为柱状、壁状、格栅状或块状等。

4 拟采用水泥土搅拌法处理地基的工程，除按现行规范规定进行岩土工程详勘外，尚应查明拟处理土层的 PH 值、有机质含量、地下障碍物及软土分布情况、地下水及其运动规律等。

5 设计前应进行拟处理土的室内配比试验。针对现场拟处理的软弱层软土的性质，选择合适的固化剂、外掺剂及其掺量，为设计提供不同龄期、不同配比的强度参数。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。

6 固化剂宜选用强度等级不低于 32.5 级的普通硅酸盐水泥(型钢水泥土搅拌墙不低于 P.0.42.5 级)。水泥掺量应根据设计要求的水泥土强度经试验确定；块状加固时水泥掺量不应小于被加固天然土质量的 7%，作为复合地基增强体时不应小于 12%，型钢水泥土搅拌墙(桩)不应小于 20%。

湿法的水泥浆水灰比可选用 0.45~0.55，应根据工程需要和土质条件选用具有早强、缓凝、减水以及节约水泥等作用的外掺剂；干法可掺加二级粉煤灰等材料。

7 竖向承载水泥土搅拌桩复合地基宜在基础和桩之间设置褥垫层，刚性基础下褥垫层厚度可取 150~300mm。褥垫层材料可选用中粗砂、级配砂石等，最大粒径不宜大于 20mm，褥垫层的压实系数不应小于 0.94。

8 竖向承载的水泥土搅拌桩复合地基承载力特征值不宜大于 180kPa。

9 型钢水泥土搅拌墙(桩)的设计和施工应符合《型钢水泥土搅拌墙技术规程》JGJ-的规定。型钢水泥土搅拌桩或水泥土中插入混凝土预制桩时，单桩竖向抗压承载力应通过单桩静载荷试验确定，桩身强度的计算不应考虑水泥土的作用。

10 水泥土搅拌形成水泥土加固体，用于基坑工程围护挡墙、被动区加固、防渗帷幕、大面积

水泥稳定土等的设计、施工可按本节规定使用。

7.3.2 水泥土搅拌桩复合地基的设计应符合下列规定：

1 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，并应穿透软弱土层到达承载力相对较高的土层；设置的搅拌桩同时为提高抗滑稳定性时，其桩长应超过危险滑弧 2.0m 以上。

干法的加固深度不宜大于 15m；湿法及型钢水泥土搅拌墙(桩)的加固深度应考虑机械性能的限制。单头、双头加固深度不宜大于 20m，多头及型钢水泥土搅拌墙(桩)的深度不宜超过 35m。

2 竖向承载力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(7.1.5-2)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； β 为桩间土承载力折减系数。当桩端土未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取高值。单桩承载力发挥度系数可取 1。

3 单桩竖向承载力特征值应通过现场荷载试验确定。初步设计时也可按式(7.1.6)估算。并应同时满足式(7.3.2-1)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：

$$R_a = \eta f_{cu} A \quad (7.3.2-1)$$

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)；单头、双头搅拌桩不宜小于 1MPa；型钢水泥土搅拌桩不宜小于 0.8MPa；

η ——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 ——桩横截面周长(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；对稍密砂类土可取 15~20kPa；对中密砂类土可取 20~25kPa；

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》GB50007 的有关规定确定；

α ——桩端天然地基土的承载力发挥系数，可取 0.4~0.6，天然地基土承载力高时取低值。

4 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。

5 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。桩可只在刚性基础平面范围内布置，独立基础下的桩数不宜少于 3 根。柔性基础应通过验算在基础内、外布桩。柱状加固可采用正方形、等边三角形等布桩型式。

6 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》GB50007 的有关规定进行下卧层承载力验算。

7 对堆载场地柔性基础下的水泥石桩复合地基应进行稳定性验算。

8 柔性基础下复合土层稳定性验算的计算参数可按下式估算：

$$\tan \Phi_{sp} = m \tan \Phi_p + (1-m) \tan \Phi_s \quad (7.3.2-2)$$

$$C_{sp} = m C_p + (1-m) C_s \quad (7.3.2-3)$$

式中： Φ_{sp} 、 C_{sp} ——复合土层的内摩擦角及凝聚力；

Φ_p 、 C_p ——水泥石加固体的内摩擦角及凝聚力，重要工程应通过直剪试验确定，应考虑桩身受弯按地区经验予以折减；一般工程可取 $\Phi_p=0$ ， $C_p=80\sim 100\text{kPa}$ ；

Φ_s 、 C_s ——桩间土的内摩擦角及凝聚力；

m ——面积置换率。

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 可按下式计算：

$$s_1 = \frac{(P_z + P_{zi})l}{2E_{sp}} \quad (7.3.2-4)$$

$$E_{sp} = mE_p + (1-m)E_s \quad (7.3.2-5)$$

式中： P_z ——搅拌桩复合土层顶面的附加压力值(kPa)；

P_{zi} ——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) 桩端以下未加固土层的压缩变形 s_2 可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定进行计算。

当加固土层为深厚淤泥、淤泥质土，且水泥石桩桩端进入相对较好土层的深度较浅时， s_2 宜采用等代实体基础，按单向压缩分层总和法进行计算。

7.3.3 水泥石搅拌桩复合地基施工应符合下列规定：

1 水泥石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，回填土料应压实，不得回填生活垃圾。

2 水泥石搅拌桩施工前应根据设计进行工艺性试桩，数量不得少于 3 根，多头搅拌不得少于 3 组。应对工艺试桩的质量进行必要的检验。

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，钻头每转一圈的提升(或下沉)量以 1.0~1.5cm 为宜，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。

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，应将桩顶以上 500mm 土层及搅拌桩顶端施工质量较差的桩段用人工挖除。

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。

6 水泥石搅拌法施工主要步骤应为：

- 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，必须确保全桩长上下至少再重复搅拌一次。

对地基土进行干法咬合加固时，如复搅困难，可采用慢速搅拌，保证搅拌的均匀性。

7 湿法施工应符合下列要求：

- 1) 水泥浆液到达喷浆口的出口压力不应小于 10Mpa；
- 2) 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；
- 3) 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；
- 4) 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；
- 5) 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；
- 6) 搅拌机预搅下沉时不宜冲水，当遇到硬土层下沉太慢时，方可适量冲水，但应考虑冲水对桩身强度的影响；
- 7) 施工时如因故停浆，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；

8) 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。

8 干法施工应符合下列要求:

1) 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 60m。

2) 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体计量装置及搅拌深度自动记录仪。

3) 搅拌头每旋转一周, 其提升高度不得超过 16mm。

4) 搅拌头的直径应定期复核检查, 其磨耗量不得大于 10mm。

5) 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。

6) 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。

7.3.4 水泥土搅拌桩复合地基质量检验应符合下列规定:

1 水泥土搅拌桩的质量应进行施工全过程的施工质量控制。施工过程中应作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: 喷浆压力、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。

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, 采用浅部开挖桩头进行检查, 开挖深度宜超过停浆(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})检查上部桩身的均匀性。检验数量为施工总桩数的 1%, 且不少于 3 根。

3) 桩身强度检验应在成桩 28d 后, 用双管单动取样器钻取芯样作搅拌均匀性和水泥土抗压强度检验, 检验数量为施工总桩(组)数的 0.5%, 且不少于 6 点。钻芯有困难时, 可采用单桩抗压静载荷试验检验桩身质量。

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

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。验收检测检验数量为桩总数的 0.5%~1%, 其中每单项工程单桩复合地基载荷试验的数量不应少于 3 根(多头搅拌为 3 组), 其余可进行单桩静载荷试验或单桩、多桩复合地基载荷试验。

5 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。

7.4 旋喷桩复合地基

7.4.1 旋喷桩复合地基应符合下列要求：

1 旋喷桩复合地基适用在淤泥、淤泥质土、一般粘性土、粉土、砂土、黄土、素填土等地基中采用高压旋喷注浆形成增强体的地基处理；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应性。

2 高压旋喷桩施工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。

3 在制定高压旋喷桩方案时应搜集邻近建筑物和周边地下埋设物等资料。

4 高压旋喷桩方案确定后，应结合工程情况进行现场试验、试验性施工确定施工参数及工艺。

5 高压旋喷注浆用于土层加固或用于基坑工程防水可按照本节规定使用。

7.4.2 高压旋喷桩形成的增强体强度和直径，应通过现场试验确定。当无现场试验资料时，可参照相似土质条件的工程经验进行初步设计。

7.4.3 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(7.1.6)估算。并同时满足式(7.3.2-1)的要求，桩身强度折减系数 η 可取 0.33。

7.4.4 旋喷桩复合地基的地基变形计算应符合 7.1.8 条的有关要求。

7.4.5 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》GB50007 的有关规定进行下卧层承载力验算。

7.4.4 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 200~300 mm，其材料可选用中砂、粗砂、级配砂石等，最大粒径不宜大于 30 mm。

7.4.5 旋喷桩的平面布置可根据上部结构和基础形式确定。独立基础下的桩数一般不应少于 4 根。

7.4.6 旋喷桩复合地基施工应符合下列规定：

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。

2 高压旋喷注桩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宜大于 30MPa，流量大于 30L/min，气流压力宜取 0.7MPa，提升速度可取 0.1~0.2m/min。

3 高压喷射注浆，对于无特殊要求的工程宜采用强度等级为 P.O.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。

4 水泥浆液的水灰比应按工程要求确定，可取 0.8~1.2，常用 0.9。

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。

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 50 mm。垂直度偏差不大于 1%。实际孔位、孔深和每个钻孔内的地下障碍物、洞穴、涌水、漏水

及岩土工程勘察报告不符等情况均应详细记录。

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，随即按旋喷的工艺要求，提升喷射管，由下而上旋转喷射注浆。喷射管分段提升的搭接长度不得小于 100 mm。

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。

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。

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。

11 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 施工中应严格按照施工参数和材料用量施工，用浆量和提升速度应采用自动记录装置，并如实做好各项施工记录。

7.4.7 旋喷桩复合地基质量检验应符合下列要求：

1 高压旋喷桩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、动力触探载荷试验等方法进行检验。

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。

3 检验点的数量为施工孔数的 2%，并不应少于 5 点。

4 质量检验宜在高压喷射注浆结束 28d 后进行。

5 旋喷桩地基竣工验收时，承载力检验可采用复合地基载荷试验和单桩载荷试验。

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。

7.5 土桩、灰土桩复合地基

7.5.1 土桩、灰土桩复合地基处理应符合下列要求：

1 土桩、灰土桩复合地基适用于处理地下水位以上的粉土、粘性土、素填土和杂填土等地基，可处理地基的厚度宜为 3~15m。当地基土的含水量大于 24%、饱和度大于 65%时，应通过现场试验确定其适用性。

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。

7.5.2 土桩、灰土桩复合地基设计应符合下列要求：

1 土桩、灰土桩复合地基处理地基的面积，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，每边不应小于基底宽度的 0.25 倍，并不应小于 0.50m。

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。

2 土桩、灰土桩复合地基处理地基的厚度（含桩顶垫层厚），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。

3 桩孔直径宜为 300~600mm，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 2.0~4.0 倍。

4 桩孔内的填料，应根据工程要求或处理地基的目的确定。对于灰土，消石灰与土的体积配合比，宜为 2: 8 或 3: 7。

5 孔内填料应分层回填夯实，填料的平均压实系数 $\bar{\lambda}_c$ 值，不应低于 0.97，其中压实系数最小值不应低于 0.90。

6 桩顶标高以上应设置 200~600mm 厚的褥垫层。垫层材料可根据工程要求采用灰土、水泥石等。

7 灰土桩复合地基承载力特征值，应按 7.1.4 条规定确定。初步设计时也可按公式(7.1.5-1)进行估算，但未经试验确定的灰土或水泥石桩复合地基承载力特征值，不宜大于处理前天然地基的 2.0 倍，也不宜大于 250 kPa。

8 土桩、灰土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，可采用复合地基载荷试验的变形模量代替。

7.5.3 土桩、灰土桩复合地基施工应符合下列要求：

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）、冲击或钻孔等方法。

2 桩顶设计标高以上的预留覆盖土层厚度宜符合下列要求：

- 1) 沉管（锤击、振动）成孔，不宜小于 1.00m；
- 2) 冲击成孔、钻孔夯扩法成桩，不宜小于 1.50m。

3 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 孔依次进行，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 孔依次进行；

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得超过桩距设计值的 5%；

5) 经检验合格后，应按设计要求，向孔内分层填入筛好的灰土填料，并应分层夯实至设计标高。

4 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。

5 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。

6 雨季或冬季施工，应采取防雨或防冻措施，防止填料受雨水淋湿或冻结。

7.5.4 土桩、灰土桩复合地基质量检验应符合下列规定：

1 成桩后，应及时抽样检验灰土桩处理地基的质量。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的干密度。

2 桩孔夯填质量检验应随机抽样检测，抽检的数量不应少于桩总数的 1%，且总计不得少于 9 根桩。

3 复合地基承载力检验应采用单桩或多桩复合地基载荷试验检测。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。

7.6 夯实水泥土桩复合地基

7.6.1 夯实水泥土桩复合地基处理应符合下列要求：

- 1 夯实水泥土桩复合地基适用于处理地下水位以上的粉土、粘性土、素填土和杂填土等地基，可处理地基的厚度不宜大于 10m。
- 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。
- 3 岩土工程勘察应查明土层厚度、含水量、有机质含量、地下水的腐蚀性等。

7.6.2 夯实水泥土桩复合地基设计应符合下列要求：

- 1 夯实水泥土桩可只在建筑物基础范围内布置；
- 2 夯实水泥土桩复合地基处理地基的厚度（含桩顶垫层厚），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。当采用洛阳铲成孔工艺时，深度不宜大于 6m；
- 3 桩孔直径宜为 300~600mm，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 2.0~4.0 倍。
- 4 桩孔内的填料，应根据工程要求进行配比试验，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。水泥与土的体积配合比，宜为 3: 7 或 2: 8。
- 5 孔内填料应分层回填夯实，填料的平均压实系数 $\bar{\lambda}_c$ 值，不应低于 0.97，其中压实系数最小值不应低于 0.94。
- 6 桩顶标高以上应设置 100~300mm 厚的褥垫层。垫层材料可采用粗砂、中砂、碎石等，最大粒径不宜大于 20mm。褥垫层的夯填度不应大于 0.9。
- 7 夯实水泥土桩复合地基承载力特征值，应按 7.1.4 条规定确定。初步设计时也可按公式(7.1.5-2)进行估算。
- 8 夯实水泥土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，可按 7.1.8 条规定确定。

7.6.3 夯实水泥土桩复合地基施工应符合下列要求：

- 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，选用钻孔、洛阳铲成孔等方法。
- 2 桩顶设计标高以上的预留覆盖土层厚度不宜小于 0.5m
- 3 成孔和孔内回填夯实应符合下列要求：
 - 1) 宜选用机械成孔；
 - 2) 向孔内填料前，孔底应夯实；分段夯填时，夯锤落距和填料厚度应满足夯填密实度的要求；

3) 土料有机质含量不应大于 5%，不得含有冻土和膨胀土，使用时应过 2mm 的筛，混合料含水量应满足最优含水量的偏差不大于 2%，土料和水泥应拌合均匀；

4) 桩孔的垂直度偏差不宜大于 1.5%；

5) 桩孔中心点的偏差不宜超过桩距设计值的 5%；

6) 经检验合格后，应按设计要求，向孔内分层填入拌合好的水泥石，并应分层夯实至设计标高。

4 铺设垫层前，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。垫层施工严禁扰动基底土层；

5 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。

6 雨季或冬季施工，应采取防雨或防冻措施，防止填料受雨水淋湿或冻结。

7.6.4 夯实水泥石桩复合地基质量检验应符合下列规定：

1 成桩后，应及时抽样检验水泥石桩处理的质量。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的干密度。

2 桩孔夯填质量检验应随机抽样检测，抽检的数量不应少于桩总数的 1%。

3 复合地基承载力检验应采用单桩或多桩复合地基载荷试验检测。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。

7.7 水泥粉煤灰碎石桩复合地基

7.7.1 水泥粉煤灰碎石桩复合地基适用于处理粘性土、粉土、砂土和自重固结完成的素填土地基处理。对淤泥和淤泥质土应按地区经验或通过现场试验确定其适用性。混凝土灌注桩、预制桩复合地基可参照本节内容使用。

7.7.2 水泥粉煤灰碎石桩复合地基设计应符合下列规定：

1 水泥粉煤灰碎石桩应选择承载力和模量相对较高的土层作为桩端持力层。

2 桩径：长螺旋钻中心压灌、干成孔和振动沉管成桩宜取 350~600mm； 泥浆护壁钻孔灌注素混凝土成桩宜取 600~800mm； 钢筋混凝土预制桩宜取 300~600mm。

3 桩距应根据基础形式、设计要求的复合地基承载力和复合地基变形、土性、施工工艺确定：箱基、筏基和独立基础，桩距宜取 3~5 倍桩径； 墙下条基单排布桩宜取 3~6 倍桩径。桩长范围内有饱和粉土、粉细砂、淤泥、淤泥质土层，采用长螺旋钻中心压灌成桩施工中可能发生窜孔时宜采用大桩距或采用跳打措施。

4 桩顶和基础之间应设置褥垫层，褥垫层厚度宜取 0.4~0.6 倍桩径。褥垫材料宜用中砂、粗砂、级配砂石和碎石等，最大粒径不宜大于 30mm。

5 水泥粉煤灰碎石桩复合地基承载力特征值，应按 7.1.4 条规定确定。初步设计时也可按 7.1.5 条、7.1.6 条要求估算。

6 水泥粉煤灰碎石桩可只在基础内布桩，应根据建筑物荷载分布、基础形式、地基土性，合理确定布桩参数：

1) 对框架核心筒结构形式，核心筒部位布桩，宜减小桩距、增加桩长或加大桩径，提高复合地基承载力和模量；

2) 对设有沉降缝或抗震缝的建筑物，宜在沉降缝或抗震缝部位，采用减小桩距、增加桩长或加大桩径布桩，以防止建筑物发生较大相向变形；

3) 对相邻柱荷载水平相差较大的独立基础，应按变形控制进行复合地基设计，荷载水平高的宜采用较高承载力确定布桩参数；

4) 对筏板基础，筏板厚度与跨距之比小于 1/6，梁板式基础、梁的高跨比大于 1/6 以及板的厚跨比（筏板厚度与梁的中心距之比）小于 1/6 时，基底压力不满足线性分布，不宜采用均匀布桩，应主要在柱边（平板式筏基）和梁边（梁板式筏基）外扩 2.5 倍板厚的面积范围布桩。

5) 墙下条形基础，当荷载水平不高时，可采用墙下单排布桩。

8 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。

7.7.3 水泥粉煤灰碎石桩复合地基施工应符合下列要求：

1 根据现场条件可选用下列施工工艺:

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、粒径不大于 60mm 土层厚度不大于 4m 的卵石(卵石含量不大于 30%), 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。

4) 泥浆护壁成孔灌注成桩, 适用土性应满足《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定。对桩长范围和桩端有承压水的土层, 应首选该工艺。

5) 锤击、静压预制桩, 适用土性应满足《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定。

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, 应掌握提拔钻杆时间, 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; 对遇有松散饱和粉土、粉细砂, 淤泥、淤泥质土, 当桩距较小时, 防止窜孔宜采用隔桩跳打措施。

3) 施工桩顶标高高出设计桩顶标高不宜少于 0.5m; 当施工作业面与有效桩顶标高距离较大时, 宜增加混凝土灌注量, 提高施工桩顶标高, 防止缩径。

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。

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。

4 清土和截桩时, 应采取防止桩顶标高以下桩身断裂和桩间土扰动。

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, 夯填度(夯实后的褥垫层厚度与虚铺厚度的比值)不得大于 0.9。

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。

7 泥浆护壁成孔灌注成桩和锤击、静压预制桩施工, 应符合《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定执行。对预应力管桩桩顶可设置桩帽或采用相同标号混凝土灌芯。

7.7.4 水泥粉煤灰碎石桩复合地基质量检验应符合下列规定:

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。

2 水泥粉煤灰碎石桩复合地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验或单桩静载荷试验。

3 水泥粉煤灰碎石桩复合地基检验应在桩身强度满足试验荷载条件，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。

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。

7.8 柱锤冲扩桩复合地基

7.8.1 柱锤冲扩桩复合地基适用于处理地下水位以上的杂填土、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 10m，复合地基承载力特征值不宜超过 160kPa。

7.8.2 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。

7.8.3 柱锤冲扩桩复合地基设计应符合下列规定：

- 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 1~3 排桩，并不应小于基底处理土层厚度的 1/2。对可液化地基，处理范围可按上述要求适当加宽。
- 2 桩位布置可采用正方形、矩形、三角形布置。常用桩距为 1.2~2.5m，或取桩径的 2~3 倍。
- 3 桩径可取 500~800mm，桩孔内填料量应通过现场试验确定。
- 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，应深达相对硬土层；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。
- 5 在桩顶部应铺设 200~300mm 厚砂石垫层。
- 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、干硬性混凝土等。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。
- 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(7.1.5-1)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_{sk} 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。
- 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(7.1.8-1)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。
- 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。

7.8.4 柱锤冲扩桩复合地基施工应符合下列要求：

- 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。
- 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。

3 柱锤冲扩桩复合地基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：
 - 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。
 - 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。
 - 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。

- 4 成孔和填料夯实的施工顺序，宜间隔进行。
- 5 基槽开挖后，应进行晾槽拍底或振动压路机碾压，随后铺设垫层并压实。

7.8.5 柱锤冲扩桩复合地基的质量检验应符合下列规定：

- 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。
- 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或标贯进行，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。
- 3 **柱锤冲扩桩复合地基竣工验收时，承载力检验应采用复合地基载荷试验。**
- 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。
- 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。

7.9 多桩型复合地基

7.9.1 多桩型复合地基是指由两种及两种以上不同材料增强体或由同一材料增强体而桩长不同时形成的复合地基，适用于处理存在浅层欠固结土、湿陷性土、液化土等特殊土，或场地土层具有不同深度持力层以及存在软弱下卧层，地基承载力和变形要求较高时的地基处理。

7.9.2 多桩型复合地基的设计应符合下列原则：

- 1 应考虑土层情况、承载力与变形控制要求、经济性、环境要求等选择合适的桩形及施工工艺进行多桩型复合地基设计；
- 2 多桩型复合地基中，二种桩可选择不同直径、不同持力层；对复合地基承载力贡献较大或用于控制复合土层变形的长桩；应选择相对更好的持力层并应穿越软弱下卧层；对处理欠固结土的桩，桩长应穿越欠固结土层；对需要消除湿陷性的桩，应穿越湿陷性土层；对处理液化土的桩，桩长应穿越液化土层。
- 3 对浅部存有较好持力层的正常固结土选择多桩型复合地基方案时，可采用刚性长桩与刚性短桩、刚性长桩与柔性短桩的组合方案。
- 4 对浅部存在欠固结土，宜先采用预压、压实、夯实、挤密方法或柔性桩等处理浅层地基，而后采用刚性或柔性长桩进行处理的方案；
- 5 对湿陷性黄土应根据黄土地区建筑规范对湿陷性的处理要求，选择压实、夯实或土桩、灰土桩、夯实水泥土桩等处理湿陷性，再采用刚性长桩进行处理的方案；
- 6 对可液化地基，应根据建筑抗震设计规范对可液化地基的处理设计要求，采用碎石桩等方法处理液化土层，再采用刚性或柔性长桩进行处理的方案；
- 7 对膨胀土地基采用多桩型复合地基方案时，应采用灰土桩等处理膨胀性，长桩宜穿越膨胀土层及大气影响层以下进入稳定土层，且不应采用桩身透水性较强的桩；

7.9.3 多桩型复合地基单桩承载力应由载荷试验确定，其设计计算可按本规范有关章节要求进行，但应考虑施工顺序对桩承载力的相互影响；对刚性桩施工较为敏感的土层，不宜采用刚性桩与静压桩的组合，刚性桩与其他桩组合时，应对其他桩的单桩承载力进行折减。

7.9.4 多桩型复合地基的布桩应满足以下原则

- 1 多桩型复合地基的布桩宜采用正方形或三角形间隔布置；
- 2 刚性桩可仅在基础范围内布置，柔性桩布置要求应满足建筑抗震设计规范、湿陷性黄土地区建筑规范、膨胀土地区建筑技术规范对不同性质土处理的规定。

7.9.5 多桩型复合地基的垫层应按以下要求设计

- 1 对刚性长短桩复合地基应选择砂石垫层，垫层厚度宜取对复合地基承载力贡献较大桩直径的二分之一；对刚性桩与柔性桩组合的复合地基，垫层厚度宜取刚性桩直径的二分之一；对柔性长短桩复合地基及长桩采用微型桩的复合地基，垫层厚度宜取 100mm~150mm。
- 2 对未完全消除湿陷性的黄土及膨胀土，宜采用灰土垫层，其厚度宜为 300mm。

7.9.6 多桩型复合地基承载力特征值应采用多桩复合地基承载力载荷试验确定，初步设计时可采

用以下方式估算：

- 1 由具有粘结强度的A桩、B桩组合形成的多桩型复合地基（含长短桩复合地基、等长桩复合地基）承载力特征值采用下式：

$$f_{spk} = m_1 \frac{\lambda_1 R_{a1}}{A_{p1}} + m_2 \frac{\lambda_2 R_{a2}}{A_{p2}} + \beta(1 - m_1 - m_2) f_{sk} \quad (7.9.6-1)$$

式中，

m_1 、 m_2 ——分别为A桩、B桩的面积置换率；

λ_1 、 λ_2 ——分别为A桩、B桩单桩承载力发挥度；应由单桩复合地基试验按等变形准

则或多桩复合地基载荷试验确定，有地区经验时也可按地区经验确定。

R_{a1} 、 R_{a2} ——分别为A桩、B桩单桩承载力特征值；

A_{p1} 、 A_{p2} ——分别为A桩、B桩的横截面面积；

β ——桩间土承载力发挥系数；

f_{sk} ——A桩、B桩处理后复合地基桩间土承载力特征值。

- 2 由具有粘结强度的A桩与散体材料B桩组合形成的复合地基承载力特征值采用下式：

$$f_{spk} = m_1 \frac{\lambda_1 R_{a1}}{A_{p1}} + \beta[1 + m_2(n - 1)] f_{sk} \quad (7.9.6-2)$$

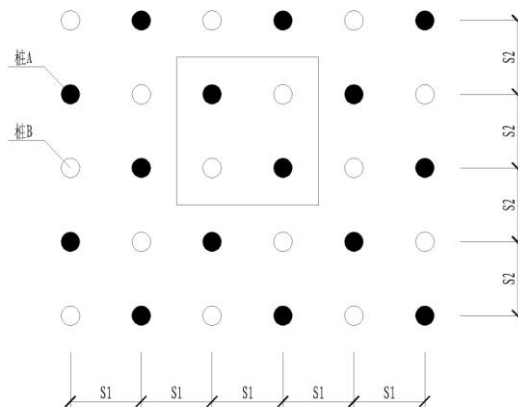
式中，

β ——仅由B桩加固处理形成的复合地基承载力发挥系数；

n ——仅由B桩加固处理形成复合地基的桩土应力比；

f_{sk} ——仅由B桩加固处理后桩间土承载力特征值。

- 7.9.7 多桩型复合地基面积置换率的计算应根据基础面积与该面积范围内实际的布桩数进行计算，当基础面积较大或条形基础较长时，也可按单元面积置换率替代。单元面积置换率的计算模型如图7.8-1所示。



(a)

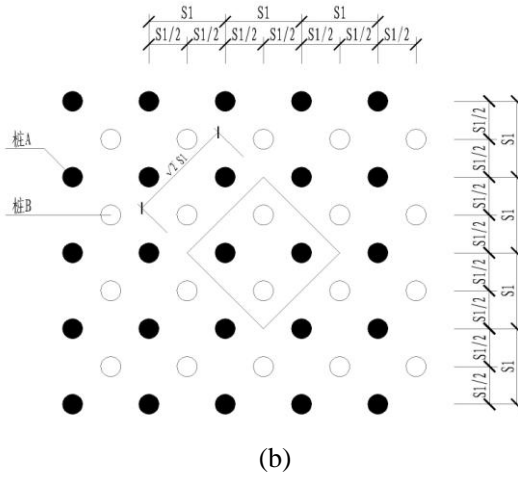


图 7.8-1 多桩型复合地基面积置换率计算模型

7.9.8 多桩型复合地基变形计算可按下列规定进行：

1 具有粘结强度的长短桩复合地基宜采用以下方法

1) 将总变形量视为三部分组成，即长短桩复合加固区压缩变形、短桩桩端至长桩桩端的加固区压缩变形、复合土层下卧土层压缩变形。其中加固区的压缩变形计算可采用复合模量法计算，复合土层下卧土层变形宜按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》的规定，采用分层总和法计算。

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (7.9.8-1)$$

式中，

s_1 ——长、短桩复合土层产生的压缩变形；

s_2 ——短桩桩端至长桩桩端复合土层产生的压缩变形；

s_3 ——下卧土层的压缩变形。

2) 采用复合模量法计算复合地基变形：

$$s = \psi_{sp} \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_b}{\zeta_1 E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n+1}^{n_2} \frac{p_b}{\zeta_2 E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{j=n+1}^n \frac{p_b}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \right] \quad (7.9.8-2)$$

式中，

s ——长短桩复合地基变形量；

n_1 、 n_2 ——分别为长短桩复合加固区、短桩桩端至长桩桩端加固区土层分层数；

n_3 ——变形计算深度内下卧土层分层；

ζ_1 、 ζ_2 ——长短桩复合加固区、短桩桩端至长桩桩端加固区各土层的模量提高系数，

分别按下式计算：

$$\zeta_1 = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \quad (7.9.8-3)$$

$$\zeta_2 = \frac{f_{spk1}}{f_{ak}} \quad (7.9.8-4)$$

式中,

f_{spk1} ——仅由长桩处理形成复合地基承载力特征值;

f_{spk} ——长短桩复合地基承载力特征值;

f_{ak} ——天然地基承载力特征值。

- 2 由具有粘结强度的A桩与散体材料B桩组合形成的复合地基变形计算,宜采用水泥粉煤灰碎石桩复合地基变形计算方法,其中散体材料桩与有粘结强度桩共同形成的复合土层模量计算采用下式:

$$\zeta_1 E_{si} = \frac{f_{spk}}{f_{sk}} [m_2 E_{p2} + (1 - m_2) E_{si}] \quad (7.9.8-5)$$

式中,

f_{sk} ——仅由B桩加固处理后桩间土承载力特征值;

E_{p2} ——散体材料桩身材料压缩模量。

或者,

$$\zeta_1 E_{si} = \frac{f_{spk}}{f_{sk}} [1 + m_2(n-1)] \alpha E_s \quad (7.9.8-6)$$

式中,

f_{sk} ——仅由B桩加固处理后桩间土承载力特征值;

n ——桩土应力比,可按7.2节有关规定选取;

α ——桩间土承载力提高系数,可按7.2节有关规定选取。

- 3 复合地基变形计算深度必须大于复合土层的厚度,并应满足现行国家标准《建筑地基基础设计规范》中地基变形计算深度的有关规定。

7.9.9 多桩型复合地基的施工应符合下列要求:

- 1 后施工桩不应使先施工桩产生使其降低或丧失承载力的扰动;
- 2 对可液化土,应先处理液化,再施工提高承载力增强体桩;
- 3 对湿陷性黄土,应先处理湿陷性,再施工提高承载力增强体桩;
- 4 对长短桩复合地基,应先施工长桩后施工短桩。

7.9.10 多桩型复合地基的承载力检测宜采用多桩复合地基载荷试验，承载力载荷试验及复合地基质量检验的具体要求应符合本规范有关章节的要求。

8 注浆加固

8.1 一般规定

- 8.1.1** 注浆加固适用于砂土、粉土、粘性土和人工填土等地基加固。根据加固目的可分别选用水泥浆液、硅化浆液、碱液等固化剂。
- 8.1.2** 注浆加固设计前应进行室内浆液配比试验和现场注浆试验，确定设计参数，检验施工方法和设备。有地区经验时可参考类似工程经验确定设计参数。
- 8.1.3** 注浆加固应保证加固地基在平面和深度连成一体，满足土体渗透性、地基土的强度和变形的设计要求。
- 8.1.4** 在地基处理中，注浆加固宜与其他地基处理方法联合使用，当采用单一注浆加固方法处理地基时要充分论证其可靠性。
- 8.1.5** 采用水泥搅拌注浆加固、高压旋喷注浆加固可按本规范第 7.3 节、第 7.4 节有关规定进行设计、施工。

8.2 设计

8.2.1 水泥为主剂的浆液注浆加固设计应符合下列规定：

- 1 对软弱土处理，可选用以水泥为主剂的浆液，也可选用水泥和水玻璃的双液型混合浆液，在有地下水流动的情况下，不应采用单液水泥浆液。
- 2 注浆孔间距按试验结果确定，一般可取 1.0~2.0m。
- 3 浆液的初凝时间应根据地基土质条件和注浆目的确定。在砂土地基中，浆液的初凝时间宜为 5~20min；在粘土地基中，宜为 1~2h。
- 4 注浆量和注浆有效范围应通过现场注浆试验确定，在粘性土地基中，浆液注入率宜为 15%~20%；注浆点上的覆盖土厚度应大于 2m。
- 5 对劈裂注浆的注浆压力，在砂土中，宜选用 0.2~0.5MPa；在粘性土中，宜选用 0.2~0.3MPa。对压密注浆，当采用水泥砂浆浆液时，塌落度宜为 25~75mm，注浆压力为 1~7 MPa。当塌落度较小时，注浆压力可取上限值。当采用水泥~水玻璃双液快凝浆液时，注浆压力应小于 1 MPa。
- 6 对人工填土，应采用多次注浆，间隔时间按浆液的初凝时间根据试验结果确定一般不应大于 4h。

8.2.2 硅化浆液注浆加固设计应符合下列规定：

- 1 渗透系数 $k=0.1\sim 80\text{m/d}$ 的砂土和粘性土宜采用压力双液硅化注浆；渗透系数 $k=0.1\sim 2\text{m/d}$ 的地下水位以上的湿陷性黄土可采用无压或压力单液硅化注浆；自重湿陷性黄土宜采用无压单液硅化注浆。
- 2 防渗注浆加固用的水玻璃模数不宜小于 2.2。用于地基加固的水玻璃模数宜为 2.5~3.3；不溶于水的杂质含量不应超过 2%。
- 3 双液硅化注浆用的氧化钙溶液中的杂质不得超过 0.06%，悬浮颗粒不得超过 1%，溶液的 PH 值不得小于 5.5。
- 4 硅化注浆加固的加固半径应根据孔隙比、浆液粘度、凝固时间、灌浆速度、灌浆压力、灌浆量等通过实验确定。无试验资料时可按土的渗透系数参数表 8.2.2 确定。

表 8.2.2 压力硅化加固半径

土的类型及加固方法	渗透系数 (m/d)	加固半径 (m)
砂土 (双液硅化法)	2~10	0.3~0.4
	10~20	0.4~0.6
	20~50	0.6~0.8
	50~80	0.8~1.0
粉砂 (单液硅化法)	0.3~0.5	0.3~0.4
	0.5~1.0	0.4~0.6
	1.0~2.0	0.6~0.8
	2.0~5.0	0.8~1.0
黄土 (单液硅化法)	0.1~0.3	0.3~0.4
	0.3~0.5	0.4~0.6
	0.5~1.0	0.6~0.8
	1.0~2.0	0.8~1.0

5 注浆管的各排间距可取加固半径的 1.5 倍；注浆管的间距可取加固半径的 1.5~1.7 倍；注浆孔超出基础底面宽度不得少于 0.5m；分层注浆时，加固层的厚度可按注浆管带孔部分的长度上下各 0.25 倍加固半径计算。

6 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。加固湿陷性黄土的溶液用量，可按式估算：

$$Q = V \bar{n} d_{N1} \alpha \quad (8.2.2-1)$$

式中 Q ——硅酸钠溶液的用量 (m^3)；
 V ——拟加固湿陷性黄土的体积 (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；
 α ——溶液填充孔隙的系数，可取 0.60~0.80。

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

$$Q' = \frac{d_N - d_{N1}}{d_{N1} - 1} \times q \quad (8.2.2-2)$$

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)。

8 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1m;

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。

8.2.3 碱液注浆加固适用于处理地下水位以上渗透系数为0.10~2.0m/d的湿陷性黄土地基;在自重湿陷性黄土场地采用时应通过试验确定其适应性。

8.2.4 碱液注浆加固设计应符合下列规定:

1 当100g干土中可溶性和交换性钙镁离子含量大于10mg eq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。

2 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II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。

3 碱液加固土层的厚度 h ,可按下列式估算:

$$h=l+r \quad (8.2.4-1)$$

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)。

4 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8.3.3条规定时,有效加固半径与碱液灌注量之间,可按下列式估算:

$$r=0.6\sqrt{\frac{V}{nl\times 10^3}} \quad (8.2.4-2)$$

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(8.2.4-3)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,可取0.40~0.50m。

5 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。

6 每孔碱液灌注量可按下列式估算:

$$V=\alpha\beta\pi r^2(l+r)n \quad (8.2.4-3)$$

式中 α ——碱液充填系数,可取0.6~0.8;

β ——工作条件系数,考虑碱液流失影响,可取1.1。

8.2.5 采用高压喷射注浆、深层搅拌注浆加固设计可按本规范第七章有关章节规定进行。

8.3 施 工

8.3.1 水泥为主剂的注浆施工应符合下列规定:

- 1 施工场地应预先平整，并沿钻孔位置开挖沟槽和集水坑。
- 2 注浆施工时，宜采用自动流量和压力记录仪，并应及时对资料进行整理分析。
- 3 注浆孔的孔径宜为 70~110mm，垂直度偏差应小于 1%。
- 4 花管注浆法施工可按下列步骤进行：
 - 1) 钻机与注浆设备就位；
 - 2) 钻孔或采用振动法将花管置入土层；
 - 3) 当采用钻孔法时，应从钻杆内注入封闭泥浆，然后插入孔径为 50mm 的金属共管。
 - 4) 待封闭泥浆凝固后，移动花管自下向上或自上向下进行注浆。
- 5 压密注浆施工可按下列步骤进行：
 - 1) 钻机与注浆设备就位；
 - 2) 钻孔或采用振动法将金属注浆管压入土层；
 - 3) 采用钻孔法时，应从钻杆内注入封闭泥浆，然后插入孔径为 50mm 的金属注浆管；
 - 4) 待封闭泥浆凝固后，捅去注浆管的活络堵头，然后提升注浆管自下向上或自上向下对地层注入水泥—砂浆液或水泥—水玻璃双液快凝浆液。
- 6 封闭泥浆 7d 立方体试块（边长为 70.7mm 的抗压强度应为 0.3~0.5MPa,浆液粘度应为 80~90s。
- 7 浆液宜用 425 号或 525 号(P.O.32.5 或 P.O.42.5)普通硅酸盐水泥。
- 8 注浆时可掺用粉煤灰代替部分水泥，掺入量可为水泥重量的 20%~50%。
- 9 根据工程需要，可在浆液拌制时加入速凝剂、减水剂和防析水剂。
- 10 注浆用水不得采用 PH 值小于 4 的酸性水和工业废水。
- 11 水泥浆的水灰比可取 0.6~2.0，常用的水灰比为 1.0。
- 12 注浆的流量可取 7~10L/min，对充填型注浆，流量不宜大于 20L/min。
- 13 当用花管注浆和带有活堵头的金属管注浆时每次上拔或下钻高度宜为 0.5m。
- 14 浆体应经过搅拌机充分搅拌均匀后才能开始压注，并应在注浆过程中不停缓慢搅拌，搅拌时间应小于浆液初凝时间。浆液在泵送前液压经过筛网过滤。
- 15 日平均温度低于 5℃或最低温度低于-3℃的条件下注浆时，应在施工现场采取措施，保证浆液不冻结。
- 16 水温不得超过 30~35℃；并不得将盛浆桶和注浆管路在注浆体静止状态暴露于阳光下，防止浆液凝固。
- 17 注浆顺序应按跳孔间隔注浆方式进行，并宜采用先外围后内部的注浆施工方法。当地下水流速较大时，应从水头高的一端开始注浆。
- 18 对渗透系数相同的土层，首先应注浆封顶，然后由下向上进行注浆，防止浆液上冒。如土层的渗透系数随深度而增大，则应自下向上注浆。对互层地层，首先应对渗透性或孔隙率大的地层进行注浆。
- 19 当既有建筑地基进行注浆加固时，应对既有建筑及其邻近建筑、地下管线和地面的沉降、倾斜、位移、和裂缝进行监测。并应采用多孔间隔注浆和缩短浆液凝固时间等措施，减少既有建筑基础因注浆而产生的附加沉降。

8.3.2 硅化浆液注浆施工应符合下列规定：

1 压力灌浆溶液的施工步骤应符合下列规定：

- 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。
- 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。
- 3 计算溶液量全部注入土中后，所有注浆孔宜用 2: 8 灰土分层回填夯实。

8.3.3 碱液注浆施工应符合下列规定：

1 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。

2 碱液可用固体烧碱或液体烧碱配制，加固 1m³ 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。

3 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 1m³ 浓度为 M 的碱液时，每 1m³ 水中的加碱量为：

$$G_s = \frac{1000M}{P} \quad (8.3.3-1)$$

式中 G_s ——每 1m³ 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 1m³ 浓度为 M 的碱液时，投入的液体烧碱量 V_1 为：

$$V_1 = 1000 \frac{M}{d_N N} \quad (8.3.3-2)$$

加水量 V_2 为：

$$V_2 = 1000 \left(1 - \frac{M}{d_N N} \right) \quad (8.3.3-3)$$

式中 V ——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。

4 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℃。

5 灌注碱液的速度，宜为 2~5L/min。

6 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。同时灌注的两孔间距不应小于 3m。

7 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。

8.4 质量检验

8.4.1 水泥为主剂的注浆加固质量检验应符合下列规定：

1 注浆检验时间应在注浆结束 28d 后进行。可选用标准贯入、轻型动力触探或静力触探对加固地层均匀性进行检测。

2 应在加固土的全部深度范围内每隔 1m 取样进行室内试验，测定其压缩性、强度或渗透性。

3 注浆检验点可为注浆孔数的 2%~5%。当检验点合格率小于或等于 80%，或虽大于 80%但检验点的平均值达不到强度或防渗的设计要求时，应对不合格的注浆区实施重复注浆。

8.4.2 硅化注浆加固质量检验应符合下列规定：

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。

2 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。

8.4.3 碱液加固质量检验应符合下列规定：

1 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。

2 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。

9 微型桩加固

9.1 一般规定

- 9.1.1 微型桩加固适用于新建建筑物的地基处理，也可用于既有建筑地基加固。
- 9.1.2 微型桩加固后的地基，当桩与承台整体连结时，可按桩基础设计；不整体连结时应按复合地基设计，按复合地基设计时，褥垫层厚度不宜大于100mm。
- 9.1.3 微型桩加固按桩型、施工工艺可分为树根桩法、静压桩法、注浆钢管桩法。
- 9.1.4 既有建筑地基基础加固设计采用微型桩加固，应符合《既有建筑地基基础加固技术规范》JGJ 123的有关规定。
- 9.1.5 微型桩中钢构件或钢筋的防腐耐久性设计应考虑环境的腐蚀性、微型桩的类型、荷载类型（受拉或受压）、钢材的品种及要求的设计使用年限。防腐层可采用水泥浆、砂浆、混凝土保护层，或增加一定厚度损失的钢材防腐层。
- 9.1.6 水泥浆、砂浆或混凝土与钢构件或钢筋构成的微型桩，保护层最小厚度分别为水泥浆20mm、砂浆35mm、混凝土50mm。
- 9.1.7 微型桩用型钢（钢管）由于腐蚀造成的损失厚度（mm），宜按下表选取。

表9.1.7 土中桩用钢材由于腐蚀造成的损失厚度（mm）

原状土（砂土、淤泥、粘土、片岩）	25 年	50 年
受污染的土体和工业地基	0.30	0.60
有腐蚀性的土体（沼泽、湿地、泥炭）	0.75	1.50
非挤压无腐蚀性的土体（粘土、片岩、砂土、淤泥）	1.00	1.75
非挤压有腐蚀性的土体（灰、矿渣）	0.70	1.20
原状土（砂土、淤泥、粘土、片岩）	2.00	3.25

- 9.1.8 软土地基条件下微型桩的设计施工应满足下列要求：
- 1 应选择较好的土层作为桩端持力层，进入持力层深度不宜小于 5 倍的桩径或边长。
 - 2 在特别软弱的土层中，应采用永久套管来包裹现浇的水泥浆、砂浆或混凝土。
 - 3 当微型桩处于不排水剪切强度特征值小于 10kPa 的土层中时，应进行考虑施工误差和变位的成孔试验性施工。
 - 4 应采取跳跃、均匀布点、控制注浆施工速度等措施，减小加固施工期间的地基附加变形，控制基础不均匀沉降及总沉降量。
 - 5 应在微型桩施工前和施工过程中观测并记录相邻建筑和边坡的变形，必要时建立报警系统。

9.2 树根桩法

9.2.1 树根桩法适用于淤泥、淤泥质土、粘性土、粉土、砂土、碎石土及人工填土等地基处理。

9.2.2 树根桩加固设计应符合下列规定：

1 树根桩的直径宜为150mm~300mm，桩长不宜超过30m，新建工程桩的布置应采用垂直桩型，加固工程可采用斜桩网状型。

2 树根桩的单桩竖向承载力可通过单桩载荷试验确定，当无试验资料时，也可按国家现行标准《建筑地基基础设计规范》GB50007有关规定估算。当采用水泥浆二次注浆工艺措施时，桩侧阻力可乘以大于1.0的系数。

3 桩身强度不应小于C25，注浆材料可采用水泥浆液、水泥砂浆、细石混凝土或其他灌浆料，也可用碎石或细石填灌再灌注水泥浆。

4 树根桩主筋不宜少于3根，宜通长配置。对只承担压应力的非地震区桩可不通长配筋。

5 应采取设计措施防止土体高渗透性和地下空洞（自然或人工形成的）导致浆液的流失以及在极软的粘土和泥炭土中施工过程中出现的桩孔变形与移位引起微型桩的失稳与扭曲等问题的发生。

9.2.3 树根桩用灌注料应符合以下要求：

1 具有较好的抗离析性、可塑性、粘聚性、流动性、自密实性；

2 当采用管送或泵送混凝土或砂浆时，应选用圆形骨料。骨料的尺寸不应大于15mm及纵筋净距的1/4、泵送管或水下浇注管内径的1/6中的最小值。

3 对水下浇注混凝土料的水泥含量不应小于375 kg/m³，水灰比应小于0.6。

9.2.4 树根桩施工应符合下列规定：

1 桩位平面允许偏差±20mm；桩倾斜度偏差不应大于1%。

2 土层中钻孔时可采用钻机成孔，宜采用清水或天然泥浆护壁，也可用套管。

3 树根桩用钢筋笼宜整根吊放，当分节吊放时，节间钢筋搭接焊缝长度双面焊不得小于5倍钢筋直径；单面焊不得小于10倍钢筋直径，施工时应缩短吊放和焊接时间；灌注管应直插至孔底。

4 灌注施工时应采用间隔施工、间歇施工或增加速凝剂掺量等措施，以防止相邻桩孔移位和串孔。

5 当地下水流速较大可能导致新浇水泥浆、砂浆或混凝土受到侵蚀时，应采用永久套管、护筒或其他保护措施。

9.2.5 树根桩水泥浆注浆施工应符合下列要求：

1 水泥浆的制配应符合本章9.4.4条的规定，水灰比不宜大于0.55。

2 通过临时套管灌浆时，钢筋的放置应在临时套管拔出之前完成，套管拔出过程中应每隔2米施加灌浆压力。

3 采用管件作为承重构件时，可通过其底部进行灌浆；

4 采用花管灌浆时，可以通过花管进行全长段多次灌浆，也可通过花管及特殊阀门进行分段灌浆，或通过互相交错的后注浆管进行分步灌浆。

5 二次及多次灌浆，只有在通过上述方法注入的水泥浆凝固之后才能进行。当不能施加设计指定的灌浆压力时，应等待至可以施加规定灌浆压力时进行。

6 在灌浆过程结束时，灌浆管中应充满水泥浆并维持灌浆压力一定时间。

7 当采用碎石或细石填灌再注浆工艺时，填料应经清洗，投入量不应小于计算桩孔体积的 0.9 倍，填灌时应同时用注浆管注水清孔。一次注浆时，注浆压力宜为 0.3MPa~1 MPa，由孔底使浆液逐渐上冒，直至浆液泛出孔口停止注浆。第一次注浆浆液初凝时方可进行二次注浆，二次注浆采用水泥浆压力宜为 2 MPa ~4MPa。拔除注浆管后应立即在桩顶填充碎石，并在 1m~2m 范围内补充注浆。

9.2.6 对成桩质量可能产生不良影响的受污染程度较强的土壤或生活垃圾填土，应预先测定地下水、土壤的腐蚀性以及污染范围、厚度和性质，采取措施保证树根桩的耐久性。

9.2.7 树根桩质量检验应符合下列规定：

- 1 宜采用预留试块测定桩身抗压强度，桩身强度应符合设计要求。
- 2 应采用载荷试验检验树根桩的竖向承载力，桩身质量可采用动测法检验。

9.3 静压桩法

9.3.1 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处理。

9.3.2 静压桩体可为预制混凝土桩、钢管桩、型钢等，静压施工除满足《建筑桩基技术规范》JGJ94 要求外，尚应符合下列要求：

1 对型钢制微型桩应保证压桩过程中计算桩体材料最大应力不超过材料屈服强度特征值（抗压强度标准值）的 0.9 倍。

2 对预制混凝土桩，所用材料及预制过程（包括连接件）、压桩力应符合有关预制桩规范的要求。

3 除用于减小桩身阻力的涂层外，涂层和防腐材料、靠近连接件处防腐措施的耐久性应符合有关规范的要求。

4 钢筋笼或承重构件应该通过悬挂或支撑的方法确保其在灌注、灌浆或浇注混凝土时保持正确的位置和高度。

5 当在斜桩中组装钢筋或承重构件时，应采用适当的支撑和定位方法。

9.3.3 静压桩的单桩竖向承载力可通过单桩载荷试验确定；当无试验资料初步设计时，也可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007有关规定估算。

9.3.4 静压桩质量验收应按国家有关技术标准的规定执行。

9.4 注浆钢管桩法

9.4.1 在已施工的钢管桩周进行注浆处理，形成注浆钢管桩加固地基的方法适用于桩周软土层较厚、桩侧阻力较小的地基加固处理工程。

9.4.2 注浆钢管桩单桩承载力的设计计算，可按现行国家及行业有关技术标准的规定执行，当采用二次注浆工艺措施时，桩侧阻力可以乘以大于1.0的系数。

9.4.3 钢管桩可采用静压、植入、拧入等方法施工。

9.4.4 水泥浆的制备应符合下列要求：

- 1 通过水泥浆的制备以及灌注或灌浆程序的实施，保证达到材料的设计强度。
- 2 储存、加工以及运输过程中应避免发生水泥浆及其原料的污染。
- 3 水泥浆的配合比应通过经认证的测量装置进行确定。
- 4 计量和拌合过程应进行控制确保材料参量符合设计要求。
- 5 选用的搅拌机应能够保证搅拌出的水泥浆的均匀性。
- 6 在搅拌槽和泵之间应设置存储池，混合物在存储池中应进行搅拌以防止水泥浆离析和凝固。
- 7 注浆泵和灌浆系统应与选定的灌注或灌浆方法相适应。
- 8 应尽可能地靠近灌浆点来测量灌浆压力。

9.4.5 当微型桩处于风化或有严重裂隙的岩层中时，为避免水泥浆向周围岩体的流失，同时保证水泥浆保护层能有效保护钢筋和承重构件，应进行桩孔测试和预灌浆。

9.4.6 水泥浆灌注应符合下列要求：

- 1 应尽可能缩短桩孔成孔和灌注水泥浆之间的时间间隔。
- 2 应采取可靠方法保证桩长范围内完全灌满水泥浆。
- 3 当通过水下浇注管或带孔钻杆或管状承重构件进行浇注时，水下浇注管或带孔钻杆的末端应没入水泥浆中。灌浆过程应连续进行，直到顶端溢出浆体的粘稠度与注入浆体的基本一致且出现新鲜浆液时为止。
- 4 灌浆时应避免空气和钻孔液的影响，以保证灌浆充分。
- 5 灌浆泵与注浆孔口距离不宜大于30米，以减小灌浆管路系统阻力，保证实际的灌浆压力。
- 6 当采用桩身钢管进行注浆时可通过其底部进行一次或多次灌浆。也可以将桩身钢管加工成花管进行多次灌浆，或采用花管及特殊阀门的分段灌浆。

9.4.7 注浆钢管桩钢管的连接应采用套管焊接，焊接强度质量要求应满足有关技术标准要求。

9.4.8 桩顶与基础的连接设计、施工及整个工程质量验收应符合有关标准规范的规定。

10 检验与监测

10.1 一般规定

- 10.1.1 地基处理的试验阶段、施工过程以及完成后，应进行地基处理检测。为设计提供依据的试验应在设计前进行。
- 10.1.2 地基处理的检验要求宜根据工程重要性、工程地质情况、处理方法等综合确定，应选择浅层、深层结合的多种方法综合检测，并应符合先简后繁、先粗后细、先面后点的原则。
- 10.1.3 应调查、收集被检测工程的岩土工程勘察资料、地基基础设计及施工资料，了解施工工艺和施工中出现的异常情况。应根据调查结果和检测目的，选择检验方法，制定检测方案。
- 10.1.4 地基处理工程宜在加固前、加固后分别对原地基土和桩体（或置换体）、桩间土（或夯间土）进行检测。
- 10.1.5 水泥土搅拌桩、砂石桩、旋喷桩、夯实水泥土桩、灰土桩、柱锤冲扩桩、土桩等方法处理后的地基按复合地基进行检测；预压、换填、强夯、注浆、压实、挤密等方法处理后的地基按天然地基进行检测；对水泥粉煤灰碎石桩、树根桩、混凝土桩等刚性桩应按单桩进行检测。
- 10.1.6 应根据检测目的合理选择检测方法。检测内容宜包括地基承载力、变形参数、复合地基增强体的施工质量评价。检测方法可选择平板载荷试验、钻芯法、静力触探试验、动力触探试验、标准贯入试验、波速测试等。复合地基载荷试验可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。
- 10.1.7 工程验收检测静载荷试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的2倍。为设计提供依据的静载荷试验应加载至破坏。
- 10.1.8 工程验收检测应在竖向增强体及其周围土体物理力学指标基本稳定后进行，地基处理施工完毕至检测的时间间隔可根据工程特点具体确定，对砂土地基，其间隔时间不宜少于 7d，对粉性土地基不宜少于 14d，粘性土地基不宜少于 28d；竖向增强体的检测宜在施工结束 28d 后进行。
- 10.1.9 检测抽检位置应按下列情况综合确定：
- 1 同类地基的抽检位置宜随机均匀分布，检测结果应具代表性；
 - 2 设计认为重要部位；

- 3 局部岩土特性复杂可能影响施工质量的部分；
- 4 当采用两种或两种以上检测方法时，应根据前一种方法的检测结果确定后一种方法的检测位置；
- 5 施工出现异常情况的部位。

10.1.10 检测数量应根据场地复杂程度和建筑物的重要性确定。

对按天然地基进行检测的人工地基，每单位工程的检验点不应少于 3 点，1000m² 以上工程每 100m² 至少应有一点，3000m² 以上工程每 300m² 至少应有一点，每个独立基础下应有一点。对复杂场地或重要建筑物地基应增加检验点数，检验深度应不小于设计有效加固深度。

对按复合地基进行检测的人工地基，复合地基承载力检验数量应为施工总桩数的 0.5%~1%，且每项单体工程不应少于 3 点。有单桩强度和质量检验要求时，检验数量应为施工总桩数的 0.5%~1%，且不应少于 3 根。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。

10.2 检验

10.2.1 换填垫层和压实地基的工程验收检测应采用静载荷试验并结合静力触探试验、轻便触探试验或标准贯入试验等方法进行。载荷试验的压板面积不宜小于 1m²。

10.2.2 预压处理地基的工程验收检测应符合下列规定：

- 1 应对预压的地基土进行现场载荷试验、原位十字板剪切试验、静力触探试验和室内土工试验；

- 2 对以稳定性控制的重要工程，应在预压区内选择有代表性地点预留孔位，对加载不同阶段和真空预压法在抽真空结束后进行原位十字板剪切试验、静力触探试验和取土进行室内试验；

- 3 在预压期间应及时整理沉降与时间、孔隙水压力与时间、位移与时间等关系曲线，推算地基的最终变形量、不同时间的固结度和相应的变形量，预压后消除的竖向变形和平均固结度应满足设计要求。

10.2.3 强夯地基的工程验收检验应采用载荷试验、静力触探试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、圆锥动力触探试验、多道瞬态面波法等多种原位测试方法和室内土工试验进行综合检验。强夯置换后的地基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方法查明施工后土层密度随深度的变化，对饱和粉土地基可采用单墩复合地基载荷试验。强夯地基或强夯置换地基载荷试验的压板面积不宜小于 4m²。

10.2.4 挤密地基的工程验收检测应采用静载荷试验、标准贯入试验、静力触探试验或动力触探

试验等方法进行。

10.2.5 砂石桩的工程验收检测，对桩体可采用动力触探试验方法进行；对桩间土可采用标准贯入试验、静力触探试验、动力触探试验或其他原位测试方法进行，检测位置应在等边三角形或正方形的中心。承载力检测应采用单桩复合地基或多桩复合地基静载试验方法。

10.2.6 水泥土搅拌桩、旋喷桩、夯实水泥土桩、灰土桩的工程验收检测可成桩后用双管单动取样器分段钻取芯样作抗压强度试验和桩身标准贯入试验；承载力检测应进行单桩载荷试验、单桩或多桩复合地基载荷试验。

10.2.7 注浆加固工程竣工验收检测应根据设计提出的要求进行，对于设计明确提出承载力要求的工程，应采用载荷试验进行检验；若无特殊要求时可选用标准贯入试验、静力触探试验或轻便触探试验对加固地层进行检测。对注浆效果的评定应注重注浆前后数据的比较，以综合评价注浆效果。

10.2.8 水泥粉煤灰碎石桩、树根桩等刚性桩的工程验收检测应进行基桩桩身完整性和单桩竖向承载力检测，以及单桩或多桩复合地基载荷试验。

10.2.9 处理地基的静载荷试验应符合下列规定：

1 进行单桩或复合地基静载荷试验前，应采用合适的检测方法对复合地基竖向增强体施工质量进行检验；

2 单桩和复合地基平板载荷试验应符合本规范附录 A 的有关规定。

10.2.10 钻芯法检测应符合下列规定：

1 应采用单动双管钻具，并配备相应的孔口管、扩孔器、卡簧、扶正器及可捞取松软渣样的钻具。混凝土桩应采用金刚石钻头，水泥土桩可采用硬质合金钻头。钻头外径不宜小于 101mm。混凝土芯样直径宜不小于 80mm；

2 钻芯孔垂直度偏差应不大于 0.5%，应使用扶正器等确保钻芯孔的垂直度；

3 水泥土桩钻芯孔宜位于桩半径中心附近，应采用低转速，采用较小的钻头压力；

4 对桩底持力层的钻探深度应满足设计要求，且不宜小于 3 倍桩径；

5 每回次进尺宜控制在 1.2m 内；

6 抗压芯样试件每孔不应少于 6 个，抗压芯样应采用保鲜袋等进行密封，避免晾晒；

7 其他要求应符合现行国家有关标准的规定。

10.2.11 动力触探试验应符合下列规定：

1 动力触探包括圆锥动力触探和标准贯入试验，可用于散体材料桩、柔性桩、桩间土检测，重型动力触探、超重型动力触探可以评价强夯置换墩着底情况；

- 2 触探杆应顺直，每节触探杆相对弯曲宜小于 0.5%；
- 3 试验时，应采用自由落锤，避免锤击偏心 and 晃动，触探孔倾斜度不应大于 2%，每贯入 1m，应将触探杆转动一圈半；
- 4 当采用动力触探试验结果评价复合地基竖向增强体的施工质量时，宜对单个增强体的试验结果进行统计评价。评价竖向增强体之间土体加固效果时，应对动力触探试验结果按照设计单位工程进行统计，需要进行深度修正时，修正后再统计。对设计单位工程某一土层，应采用平均值法计算各个检测孔的试验结果的代表值（提出异常值），然后利用该土层各孔的代表值计算该土层的标准值。
- 5 其他要求应符合现行国家有关标准的规定。

10.2.12 当发现检测数据异常或对检测结果有怀疑时，应查找原因，必要时重新检测。

10.2.13 当对检测结果有异议时，应在原试验点附近重新选点进行验证检测。验证检测的抽检数量宜根据实际情况确定。

10.2.14 当检测结果不满足设计要求时，应进行扩大抽检，扩大抽检的数量宜按不满足设计要求的检测点数加倍扩大抽检。

10.3 监测

10.3.1 地基处理工程的质量应进行全程的监测。施工过程中，应有专人或专门机构负责工程监测，施工过程中必须随时检查施工记录和计量记录，并按照规定的施工工艺对工序进行质量评定。

10.3.2 对粉质粘土、灰土、粉煤灰和砂石垫层的监测可选用环刀法、贯入仪、静力触探、轻型动力触探或标准贯入试验等方法进行；对砂石、干渣垫层的监测可采用重型动力触探方法进行。并均应通过现场试验以设计密实度指标所对应的贯入度为标准检验垫层的施工质量。密实度指标也可采用环刀法、灌砂法、灌水法或其它方法检验。

10.3.3 土工合成材料垫层应对基底清理、材料铺放方向、材料的接缝或搭接、材料与结构物的连接、回填料及其压实度、压重和保护层等进行监测。

10.3.4 碾压施工宜进行沉降量、压实度、土的物理力学参数、层厚、弯沉、破碎状况等的监测。

10.3.5 对堆载预压工程，在加载过程中应进行竖向变形量、水平位移及孔隙水压力等项目的监测。真空预压应进行膜下真空度、地下水位、地面沉降、深层竖向变形、孔隙水压力等项目的监测。真空预压加固区周边有建筑物时，还应进行深层侧向位移和地表边桩位移监测。

10.3.6 夯实法应进行夯击次数、夯沉量、隆起量、孔隙水压力等项目的监测。对强夯置换尚应进行置换深度的监测。

10.3.7 挤密地基、灰土桩和柱锤冲扩桩应对桩间土和桩体的干密度进行监测。

- 10.3.8 挤密砂石桩施工应对密实电流、留振时间和填料量进行监测。
- 10.3.9 水泥土搅拌桩、夯实水泥土桩、旋喷桩施工应对水泥用量、桩长等进行监测。
- 10.3.10 注浆加固施工应对水泥用量、注浆压力、注浆流量、注浆孔深、注浆顺序等项目进行监测。
- 10.3.11 水泥粉煤灰碎石桩、树根桩等刚性桩施工应对桩长、桩身试块抗压强度、桩位偏差等进行监测。
- 10.3.12 对强夯、振冲、夯扩、挤密、注浆等施工可能对周边环境及建筑物产生不良影响时，应对施工过程的振动、水压力、地下管线、建筑物沉降变形进行监测。
- 10.3.13 大面积填方、填海等地基处理工程，应对地面沉降进行长期监测，直到沉降达到稳定标；施工过程中还应对土体位移、孔隙水压力等进行监测。

附录 A 复合地基竖向抗压载荷试验要点

- 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。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 试验应在桩顶设计标高进行。承压板底面以下宜铺设 100~150mm 中、粗砂垫层(桩身强度高时取大值)。如采用设计垫层厚度进行试验，对独立基础和条形基础应采用设计基础宽度，对大型基础有困难时应考虑承压板尺寸和垫层厚度对试验结果的影响。
- 试验标高处的试坑宽度和长度不应小于承压板尺寸的 3 倍。基准梁及加荷平台支点(或锚桩)宜设在试坑以外，且与承压板边的净距不应小于 2m。
- A.0.4 试验前应采取试坑内的防水和排水措施，防止试验场地地基土含水量变化或地基土扰动，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承载力特征值的 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)；当以粉土或砂土为主的地基，可取 s/b 或 s/d 等于 0.01 所对应的压力。
 - 2) 对土挤密桩、石灰桩或柱锤冲扩桩复合地基，可取 s/b 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 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，可按当地经验确定相对变形值。对变形控制严格的工程也可按设计要求的沉降允许值作为相对变形值。

6) 复合地基荷载试验，当采用承压板边长或直径超过 2m 的大承压板进行试验时， b 或 d 按 2m 计。

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，设计时可取其平均值为复合地基承载力特征值。工程验收时应视建筑物结构、基础形式综合评价，对于独立基础，桩数少于 5 根或条形基础，桩数少于 3 排时应取最低值。